



FISIKA

LISTRIK MANGNET DAN OPTIK

DEPARTEMEN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

FISIKA
LISTRIK MAGNET DAN OPTIK

TIDAK DIPERDAGANGKAN UNTUK UMUM



FISIKA

LISTRIK MAGNET DAN OPTIK

Penerjemah
Musaddiq Mushbach

PERPUSTAKAAN
PUSAT PEMBINAAN DAN
PENGEMBANGAN BAHASA
DEPARTEMEN PENDIDIKAN
DAN KEBUDAYAAN

Pusat Pembinaan dan Pengembangan Bahasa
Departemen Pendidikan dan Kebudayaan
Jakarta
1996

Terpustakaan Pusat Pembinaan dan Pengembangan Bahasa	
No. Klasifikasi PB 537 6ER f	No. Induk : 0021 7916 Tgl. : 19-11-2007 Ttd. :

FISIKA: LISTRIK MAGNET DAN OPTIK

Judul Asli
Physik

Penulis

Dr. Christian Gerthsen
Dr. H.O. Kneser
Dr. Helmut Vogel

Penerjemah

Dr. Musaddiq Musbach

Pembina Proyek

Dr. Hasan Alwi

Pemimpin Proyek

Drs. A. Murad

Penyunting

A. Murad

Pembantu Teknis

Radiyo

ISBN : 979.459.693.0

Pusat Pembinaan dan Pengembangan Bahasa
Jalan Daksinapati Barat IV
Rawamangun
Jakarta 13220

Hak cipta dilindungi undang-undang.
Sebagian atau seluruh isi buku ini dilarang diperbanyak
dalam bentuk apa pun tanpa izin tertulis
dari penerbit, kecuali dalam hal pengutipan
untuk keperluan penulisan artikel
atau karya ilmiah.

KATA PENGANTAR

KEPALA PUSAT PEMBINAAN DAN PENGEMBANGAN BAHASA

Sejak Rencana Pembangunan Lima Tahun II, telah digariskan kebijakan pembinaan dan pengembangan kebudayaan nasional dalam berbagai seginya. Dalam garis haluan ini, masalah kebahasaan dan kesastraan merupakan salah satu masalah kebudayaan nasional yang perlu digarap dengan sungguh-sungguh dan berencana sehingga tujuan akhir pembinaan dan pengembangan bahasa dan sastra Indonesia dan daerah dapat dicapai. Tujuan akhir pembinaan dan pengembangan itu, antara lain, adalah meningkatkan mutu kemampuan menggunakan bahasa Indonesia sebagai sarana komunikasi nasional, sebagaimana digariskan dalam Garis-Garis Besar Haluan Negara.

Untuk mencapai tujuan itu, perlu dilakukan berbagai kegiatan kebahasaan dan kesastraan seperti (1) pembakuan ejaan, tata bahasa, dan peristilahan; (2) penyusunan berbagai kamus bahasa Indonesia dan kamus bahasa daerah serta kamus istilah dalam berbagai bidang ilmu; (3) penyusunan buku-buku pedoman; (4) penerjemahan karya kebahasaan dan buku acuan serta karya sastra daerah dan karya sastra dunia ke dalam bahasa Indonesia; (5) penyuluhan bahasa Indonesia melalui berbagai media, antara lain melalui televisi dan radio; (6) pengembangan pusat informasi kebahasaan dan kesastraan melalui inventarisasi, penelitian, dokumentasi, dan pembinaan jaringan informasi kebahasaan; dan (7) pengembangan tenaga, bakat, dan prestasi dalam bidang bahasa dan sastra

melalui penataran, sayembara mengarang, serta pemberian hadiah penghargaan.

Sebagai salah satu tindak lanjut kegiatan itu, dibentuklah oleh Pemerintah, dalam hal ini Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, Bagian Proyek Pembinaan Bahasa dan Sastra Indonesia-Jakarta. Bagian proyek itu mempunyai tugas pokok melaksanakan kegiatan kebahasaan dan kesastraan yang bertujuan meningkatkan mutu pemakaian bahasa Indonesia yang baik dan benar, mendorong pertumbuhan sastra Indonesia, dan meningkatkan apresiasi masyarakat terhadap sastra Indonesia.

Dalam rangka penyediaan sarana kerja dan buku acuan bagi mahasiswa, dosen, guru, tenaga peneliti, dan masyarakat umum naskah yang berhubungan dengan masalah bahasa, susastra, dan perpustakaan diterbitkan oleh Bagian Proyek Pembinaan Bahasa dan Sastra Indonesia-Jakarta.

Buku *Fisika: Listrik Magnet dan Optik* merupakan salah satu hasil kegiatan (penerjemahan) di bidang ilmu dasar. Buku itu berhasil diterjemahkan oleh Dr. Musaddiq Musbach. Untuk itu, kepada para penerjemah saya sampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya.

Akhirnya, kepada Pemimpin Bagian Proyek Pembinaan Bahasa dan Sastra Indonesia-Jakarta 1995/1996, Drs. Abdul Murad, Drs. Suharna (Sekretaris Proyek), Drs. Suhadi (Bendaharawan Proyek), Sdr. Tukiya, Sdr. Radiyo, dan Sdr. Sunarko (Staf Proyek) saya ucapkan terima kasih atas pengelolaan penerbitan buku ini.

Jakarta, Januari 1996

Dr. Hasan Alwi

Prakata

Puji syukur kehadiran Allah swt. yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan naskah terjemahan buku ini. Tanpa bantuan, kesabaran, dan pengorbanan istri saya, mungkin buku ini tidak akan terselesaikan.

Buku ini ditulis pertama kali ditulis oleh Dr. Christian Gerthsen pada tahun 1956. Bahan-bahannya diambil berdasarkan catatan-catatan kuliah fisika eksperimen yang dialaminya sendiri, berlangsung pada tahun 1946/1947 di Universitas Berlin. Karena buku pegangan fisika masih sangat kurang pada masa itu, buku ini ditujukan sebagai alat bantu para mahasiswa yang mempelajari fisika di perguruan tinggi. Karena isinya yang jauh dari memadai sebagai buku pegangan perkuliahan, edisi pertamanya dianggap oleh Dr. C. Gerthsen hanya sebagai bahan tambahan di luar perkuliahan.

Hingga Dr. C. Gerthsen meninggal, buku ini telah mengalami perbaikan tiga kali. Akan tetapi, isinya tidak banyak mengalami perubahan. Oleh sebab itu, pada tahun 1860 Dr. H.O. Kneser merevisinya dan melepaskan batasan-batasan tentang pengotakan bidang-bidang fisika, seperti zat padat dan zat cair, hingga menjadi edisi keempat. Terjadi perombakan total pada beberapa bagian, kecuali untuk bab III, serta berbagai tambahan sesuai dengan perkembangan fisika saat ini. Walaupun perkembangannya tidak secepat perkembangan biokimia dan astrofisika, fisika tetap berkembang jauh lebih cepat melampaui batas yang disimpulkan oleh buku-buku fisika yang ada. Menilik perkembangan fisika

hingga akhir tiga dasawarsa ini, seperti hukum-hukum di dalam fisika zat padat, partikel elementer dan kosmologi, memberikan ide baru untuk mengembangkan isi buku sesuai dengan tuntutan zaman. Pada tahun 1977, Dr. Helmut Vogel merevisi buku ini menjadi edisi ke-13. Selain itu, perevisian ditambah dengan soal-soal latihan yang dapat digunakan pembaca untuk membuat latihan-latihan, sehingga dapat menambah wawasan analitis pembaca, misalnya dalam meramalkan teori relativitas elektrodinamika, beberapa teknik dasar mekanika kuantum dan fisika statistik. Hampir semua bab yang membahas "fisika klasik" telah dikembangkan lebih baik. Teori tentang zat-zat yang dapat mengalir dan elektrostatika muncul dalam wajah baru, ditambah dengan analisis vektor sesuai dengan perkembangannya. Beberapa topik yang menyentuh pemikiran baru dalam dunia fisika diketengahkan, seperti krisis energi, hukum virial, dinamika gas, amplitudo, perbedaan fase gelombang, dan *scanning microscopy*, gelombang suara ultra dan hipersonik, fisika temperatur rendah, mata dan warna, dualisme partikel-gelombang, reaksi fusi nuklir, laju reaksi absolut, dan keadaan ekstrim materi. Buku pertama hanya akan membahas mekanika dan termodinamika, sedangkan buku kedua membahas listrik, magnet, dan optik. Buku ketiga menengahkan semua persoalan yang menyangkut pemikiran-pemikiran baru dalam fisika yang dikenal sebagai dasar-dasar fisika modern.

Bagi dunia ilmiah Indonesia umumnya, khususnya para mahasiswa, terjemahan buku ini tidak hanya sekadar turut memperkaya khasanah buku-buku pegangan untuk perguruan tinggi, juga dapat menimbulkan ide-ide baru untuk berpikir analitis dan memperkaya wawasan pengetahuan fisika. Semua hukum fisika yang ditampilkan dalam buku ini dicoba sedapat mungkin jauh dari jangkauan rumusan matematik yang rumit, sehingga dapat diikuti oleh mereka yang bukan spesialis di bidang fisika teori. Menilik sistematika yang terkandung di dalamnya dan mengingat kemudahan rumusan teori-teori fisika yang dibuat, buku ini dapat menjadi bekal pengetahuan dasar-dasar fisika mahasiswa Strata-1 dan dapat pula dipakai oleh mereka yang mengambil Strata-2. Dalam edisi bahasa Indonesia buku ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu.

1. Buku I: Mekanika dan Panas,
2. Buku II: Listrik, Magnet, dan Optik,

3. Buku III: Fisika Modern.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada Dr. Edwar Djamaris sebagai pemimpin proyek penerjemahan buku-buku ilmiah Pusat Pembinaan Bahasa, Proyek Pembinaan Bahasa dan Sastra Indonesia periode 1993/1994 beserta staf yang telah memberikan upaya dana sehingga buku ini berhasil diterjemahkan:

Kepada Prof. Dr. Beni H. Hoed sebagai Ketua Tim Pengelola Bahasa Asing dan Bahasa Indonesia beserta staf tak lupa pula penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan, bimbingan, dan kemudahan yang telah diberikan.

Bogor, 2 Februari 1995

Daftar Isi

KATA PENGANTAR	v
PRAKATA	vii
DAFTAR ISI	x
BAB 6 Elektrisitas	2
6.1 Elektrostatika	2
6.1.1 Muatan Listrik	2
6.1.2 Medan Listrik	6
6.1.3 Potensial Elektrostatik	11
6.1.4 Menentukan Medan Secara Praktis	15
6.1.5 Kapasitas	20
6.1.6 Momen Dipol Listrik	27
6.1.7 Peristiwa Induksi	30
6.1.8 Energi Sebuah Muatan	32
6.1.9 Medan Listrik: Pembawa Energi Elektrostatik	33
6.2 Dielektrika	34
6.2.1 Vektor Pergeseran Medan Listrik	34
6.2.2 Konstanta Dielektrik	35
6.2.3 Mekanisme Polarisasi Dielektrik	39
6.2.4 Kerapatan Energi Medan Listrik dalam Bahan	
Dielektrik	43
6.2.5 Polarisasi Tanpa Medan Listrik: Piezo- dan Pyroelektrik	45

6.3	Arus Searah	48
6.3.1	Pengertian Kuat Arus	48
6.3.2	Alat-alat Pengukur Arus	49
6.3.3	Hukum Ohm	51
6.3.4	Arus Listrik dan Rangkaian	59
6.3.5	Energi dan Daya Arus Listrik	61
6.4	Mekanisme Aliran Listrik	62
6.4.1	Pembuktian Adanya Elektron Bebas di dalam Logam	62
6.4.2	Pengertian Teoretik Aliran Listrik di dalam Logam	64
6.4.3	Elektrolisa	66
6.4.4	Konduktivitas Larutan Elektrolit	69
6.4.5	Awan Elektron; Potensial Kimia	78
6.5	Elemen Galvani	85
6.5.1	Kelarutan Logam dan Tegangan Larutan	85
6.5.2	Elemen Galvani dan Deret Potensial Volta	86
6.5.3	Fenomena Polarisasi pada Elemen Galvani	88
6.5.4	Tegangan Permukaan dan Polarisasi	91
6.6	Fenomena Termoelektrik	92
6.6.1	Tegangan Termoelektrik	92
6.6.2	Efek Peltier	96
	Soal-Soal § 6	98
BAB 7	Elektrodinamika	110
7.1	Medan Magnet dari Arus Listrik	110
7.1.1	Persamaan Maxwell	110
7.1.2	Medan Magnet Arus Listrik	113
7.1.3	Fluks Magnetik	115
7.1.4	Formulasi Biot-Savart dan Fluks Medan Magnet	118
7.1.5	Tegangan Magnetik	119
7.1.6	Gaya Antarkawat Berarus Listrik	121

7.2	Induksi Elektromagnetik	121
7.2.1	Percobaan Induksi dari Faraday	121
7.2.2	Hukum Induksi Magnet	126
7.2.3	Hubungan antara Induksi Magnetik dan Kuat Medan Magnet	129
7.2.4	Gaya pada Konduktor karena Medan Magnet	131
7.2.5	Momen Putar pada Kawat	132
7.2.6	Pengukur Kuat Arus	134
7.2.7	Gaya antara Dua Konduktor	136
7.2.8	Gaya pada Muatan Bergerak	137
7.2.9	Efek Hall	138
7.2.10	Arah Arus Induksi	140
7.2.11	Arus Terpusat	141
7.3	Induksi Diri	142
7.3.1	Definisi Induktivitas	142
7.3.2	Rangkaian RL -Arus Searah	143
7.3.3	Energi dan Kerapatan Energi di dalam Medan Magnet	145
7.3.4	Definisi Elektromagnetik: Ampere	147
7.4	Magnetostatik	149
7.4.1	Momen Magnetik	149
7.4.2	Kuat Kutub Magnetik	150
7.4.3	Dipol Magnet di dalam Medan Magnet Homogen dan Inhomogen	151
7.4.4	Elektromagnet	152
7.5	Bahan dan Medan Magnet	155
7.5.1	Magnetisasi dan Suseptibilitas Magnetik	155
7.5.2	Diamagnetik	156
7.5.3	Paramagnetik	158
7.5.4	Ferromagnetik	161
7.5.5	Efek Giromagnetik (Einstein-De Hass)	167
7.5.6	Struktur Bahan Ferromagnetik	169
7.5.7	Antiferromagnetik dan Ferrimagnetik	172

7.5.8	Paraelektrik dan Antiferroelektrik	174
7.6	Arus dan Tegangan Bolak-Balik	176
7.6.1	Sumber Arus Bolak-Balik	176
7.6.2	Harga Efektif Arus dan Tegangan	178
7.6.3	Tahanan pada Rangkaian Arus Bolak-Balik	180
7.6.4	Rangkaian Osilator	186
7.6.5	Tranformator	189
7.6.6	Transformator Tesla	192
7.6.7	Betatron	193
7.6.8	Skin Effect	196
7.7	Gelombang Elektromagnetik	198
7.7.1	Pergeseran Arus	199
7.7.2	Pengertian Fisis Persamaan Maxwell	201
7.7.3	Permukaan Gelombang Elektromagnetik	203
7.7.4	Kerapatan Energi dan Aliran Energi	208
7.7.5	Osilator Ruang Hampa	209
7.7.6	Osilator Linier	211
7.7.7	Pancaran Osilator Linier	213
7.7.8	Gelombang pada Kawat	219
7.7.9	Konduktor Koaksial dan Ruang "Kosong"	222
	Soal-soal § 7	224
BAB 8	Elektron Bebas dan Ion	233
8.1	Pembawa Muatan Bebas	233
8.1.1	Efek Richardson	234
8.1.2	Efek Fotolistrik	239
8.1.3	Emisi Medan listrik	241
8.1.4	Elektron Sekunder	242
8.1.5	Ion Bebas	243
8.2	Gerak Pembawa Muatan Bebas	246
8.2.1	Elektron di dalam Medan Listrik Homogen	246
8.2.2	Elektron di dalam Medan Magnet Homogen	249
8.2.3	Osilografi Berkas Elektron dan Tabung Televisi	253

8.2.4	Percobaan Thomson : Spektroskopi Massa	256
8.2.5	Massa Elektron Bergantung Kecepatan	258
8.2.6	Tabung Elektron, Kurva Karakteristik Arus-Tegangan, Pengaruh Muatan Ruang	260
8.2.7	Tabung Elektron sebagai Penguat	266
8.2.8	Percobaan Getaran Listrik Tidak Tereadam dengan Tabung Elektron	268
8.2.9	Penguat dan Percobaan Getaran Frekuensi Tinggi	270
8.2.10	Konduktifitas Gas Terionisasi	273
8.3	Pelepasan Muatan Gas	280
8.3.1	Teori Townsens	280
8.3.2	Pembagian Pelepasan Muatan pada Gas	286
8.3.3	Bentuk Bangun Bilik Pelepas Muatan	287
8.3.4	Pelepasan Muatan Disertai Kilatan Cahaya dan Pancaran Bunga Api	288
8.3.5	Pelepasan Muatan Busur	290
8.3.6	Plasma	292
	Soal-soal § 8	298

IV Optika Geometri dan Gelombang

BAB 9 Optika Geometri

9.1	Refleksi dan Pembiasan	306
9.1.1	Lintasan Cahaya: Garis Lurus	306
9.1.2	Hukum Refleksi: Pembentukan Bayangan pada Cermin	308
9.1.3	Hukum Pembiasan	317
9.1.4	Prinsip Fermat	319
9.1.5	Refleksi Total	322
9.1.6	Rambatan Gelombang Cahaya di dalam Medium Reflektor Total	323
9.1.7	Pembiasan Cahaya Melalui Prisma	327
9.2	Lensa dan Perkakas Optik	331

9.2.1	Pembiasan pada Permukaan Bola	331
9.2.2	Kombinasi Beberapa Permukaan Pembias	335
9.2.3	Lensa Tipis	336
9.2.4	Lensa Tebal	338
9.2.5	Kesalahan Bayangan pada Lensa	341
9.2.6	Ukuran Bayangan dan Perbesarannya	344
9.2.7	Kaca Pembesar (Lup)	346
9.2.8	Mikroskop	347
9.2.9	Teropong	352
9.2.10	Mata	353
9.3	Kecepatan Cahaya	355
9.3.1	Metode Astronomi	355
9.3.2	Metode Roda Gigi	356
9.3.3	Metode Cermin Berputar	358
9.3.4	Metode Resonator	359
9.4	Geometri Optika Elektron	360
9.4.1	Hukum Pembiasan untuk Berkas Elektron	360
9.4.2	Lensa Elektron Listrik	364
9.4.3	Lensa Magnet Panjang	371
9.4.4	Lensa Magnet Pendek	373
9.4.5	Peralatan Optik Elektron	375
	Soal-soal § 9	379

BAB 10 Optika Gelombang..... 391

10.1	Interferensi Cahaya	391
10.1.1	Gelombang Cahaya Koheren	391
10.1.2	Interferensi Dua Sumber Cahaya	394
10.1.3	Interferensi pada Lapisan Tipis Datar	400
10.1.4	Warna Lapisan Tipis	403
10.1.5	Pola Garis Interferensi Sama Tebal	404
10.1.6	Interferensi dengan Kemiringan Sama	408
10.1.7	Interferometer Michelson	409
10.1.8	Gelombang Cahaya Diam	410
10.2	Hamburan Cahaya	412

10.2.1	Hamburan Fresnel : Holografi	412
10.2.2	Hamburan Fraunhofer	417
10.2.3	Resolusi Perangkat Optik	422
10.2.4	Hamburan Fraunhofer pada Celah Ganda	424
10.2.5	Hamburan Kisi	427
10.2.6	Resolusi Spektral	428
10.2.7	Teori Abbe: Resolusi Mikroskop	434
10.3	Polarisasi Cahaya	436
10.3.1	Polarisasi Linier dan Eliptik	436
10.3.2	Polarisator: Perangkat Polarisasi	437
10.3.3	Polarisasi Melalui Pembiasan Ganda	439
10.3.4	Polarisasi Melalui Refleksi dan Pembiasan	446
10.3.5	Penurunan Refleksi	453
10.4	Interferensi	454
10.4.1	Interferensi Cahaya Terpolarisasi Linier	454
10.4.2	Interferensi Cahaya Konvergen Terpolarisasi	457
10.4.3	Rotasi Permukaan Polarisasi: Optis Aktif	459
10.4.4	Efek Elektro-Optik (Efek Kerr)	463
10.5	Absorpsi, Dispersi, dan Hamburan Cahaya	463
10.5.1	Absorpsi	463
10.5.2	Dispersi dan Pengertian Polarisabilitas Bergantung Frekuensi	466
10.5.3	Pengertian Atomik Dispersi	468
10.5.4	Pengertian Efek Faraday	473
10.5.5	Mengapa Langit Biru?	475
10.6	Gelombang dan Partikel	479
10.6.1	Gelombang Materi	479
10.6.2	Hamburan Elektron	481
10.6.3	Hamburan Elektron pada Celah	484
10.6.4	Relasi Ketidakpastian ..	487
	Soal-soal § 10	489
	Indeks	500

Tabel Konversi Energi	515
Tabel Beberapa Sifat Zat Padat	516
Tabel Sistem Berkala	517
Tabel Beberapa Konstanta Penting Fisika	518

Bagian III

Listrik-Magnet

BAB 6

ELEKTRISITAS

6.1 Elektrostatika

Selama beratus-ratus tahun orang menganggap bahwa peristiwa elektrisitas tidak ada kaitannya dengan suatu gaya, karena peristiwa elektrisitas muncul dari sebuah buku yang dinamakan Amber (dari bahasa Yunani: Elektron). Dalam waktu 200 tahun terakhir ini pandangan tentang elektrisitas berkembang pesat dan pengetahuan tentang elektrisitas itu dipakai sebagai "tumpuan" berbagai penelitian maupun aplikasinya yang sangat lebar, menyentuh hampir semua bidang kehidupan sekarang ini. Dalam penggunaannya, elektrisitas berkembang jauh melampaui pengertian semula, seperti: efek elektrostatik digunakan dalam teknologi fotokopi atau dalam pemercepat Van De Graff. Setiap peristiwa gaya yang ditimbulkan karena adanya muatan adalah dasar dari apa yang sekarang disebut sebagai elektrodinamika.

6.1.1 Muatan Listrik

Timbulnya pengertian dasar elektrostatis tidak terlepas dari intisari pengembangan dan pengamatan yang berlangsung selama berabad-abad. Semua pengertian yang terkandung di dalamnya tidak muncul dengan sendirinya atau tidak mengandung pengertian yang lain dari yang telah dikemukakan sebelumnya dan pengertian tersebut pada akhirnya menyentuh pengertian-pengertian dasar yang sekarang disebut sebagai

fisika modern.

1. Terdapat *dua jenis muatan*, yaitu dibedakan atas muatan positif dan negatif; kedua muatan yang tersusun bersamaan akan membentuk muatan netral. Mengapa tidak hanya terdapat satu muatan, seperti halnya "muatan gravitasi", yaitu massa, atau terdapat lebih dari dua muatan?

2. *Muatan selalu dijumpai* di dalam sistem tertutup. Jika partikel bermuatan muncul atau menghilang, hal ini selalu terjadi dalam kuantitas tanda muatan yang sama. Kandungan muatan suatu benda bahkan lebih "kuat" dibandingkan dengan kandungan massanya: massa suatu benda bergantung pada keadaan gerak pengamat sedangkan muatannya tidak.

3. *Muatan adalah terkuantisasi*: Memberikan pengertian bahwa kuantitas muatan hanya merupakan kelipatan bilangan bulat dari *muatan elementer*

$$\begin{aligned} e &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C (Coulomb)} \\ &= 4,77 \cdot 10^{-10} \text{ satuan elektrostatik.} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Harga absolutnya persis sama dengan muatan elektron atau proton. Harga ini telah dibuktikan kebenarannya dengan penelitian sebesar 10^{-20} . Telah diketahui pula ketelitian gaya antara dua benda yang terdiri atas elektron dan proton dengan jarak pisah yang lebih besar dibandingkan dengan gravitasi. Tidak ada yang mengetahui secara eksak mengapa muatan mengalami kuantisasi. Dirac mencoba menjelaskan hal ini melalui "muatan tunggal" magnet atau *monopol* (lihat §13.4.14).

4. Gaya elektrostatik (listrik) antara dua muatan elementer adalah 10^{40} kali lebih besar dibandingkan dengan gaya gravitasi antara keduanya. Tidak ada yang mengetahui makna faktor tersebut. Eddington dan Dirac mencoba mengartikannya bahwa faktor tersebut sama dengan akar jumlah materi yang terdapat di alam semesta.

5. Muatan yang sama akan saling tolak sedangkan muatan yang berbeda saling tarik. Akan tetapi, dapat pula terjadi hal lain, seperti ditunjukkan oleh gravitasi (lihat §13.4.20).

6. Arah gaya antara dua "titik muatan" berada pada "garis" penghubung antarkeduanya. Hal ini tampaknya terjadi secara otomatis karena ke arah mana selain arah itu harus ditunjukkan tidak diperoleh alasan yang tepat. Alasan ini dibuat berdasarkan pengertian ruang yang isotrop. Dengan pengertian tersebut tidak ada alasan lain selain arah seperti ditunjukkan di atas. Dengan alasan simetri demikian, hal itu harus dijelaskan dengan sangat hati-hati (lihat soal 6.1.15).

7. Gaya antara dua muatan Q dan Q' adalah dibandingkan dengan perkalian QQ' . Ramalan seperti itu, mempunyai "karakter" yang sama dengan kelakuan gaya gravitasi. Seandainya terdapat suatu pengaruh gaya pada salah satu muatan yang tidak bergantung pada metode pengukuran muatan (misalnya "menyendok suatu botol Leiden"), gaya dapat dibuktikan secara langsung. Jika tidak demikian, muatan harus didefinisikan melalui gaya atau medan. Dengan perkataan lain, apakah muatan timbul atau terpengaruh oleh medan dan apakah terdapat proporsionalitas antara muatan yang timbul dan dipengaruhi oleh medan, hukum $F \sim QQ'$ tidak lain adalah sebuah gaya, di dalamnya berlaku prinsip reaksi Newton.

8. Gaya antara dua muatan berjarak r sebanding dengan r^{-2} . Mengapa tidak sebanding dengan cara yang berbeda? Beberapa sifat medan elektrostatik, misalnya "hilangnya" gaya di dalam sebuah bola kosong homogen bermuatan tidak memenuhi hukum-hukum gaya lainnya. Teori medan kuantum menunjukkan bahwa hukum gaya yang sebanding dengan r^{-2} berhubungan dengan "hilangnya" massa diam partikel yang ditransfer oleh medan gaya (dalam hal ini dianggap *foton*). Seandainya foton mempunyai massa diam, kecepatan cahaya di vakuum haruslah bergantung pada frekuensi. Dari pengamatan pada bintang ganda dan objek-objek lainnya menunjukkan bahwa harga massa diam foton paling besar dapat mencapai 10^{-30} kg. Hukum gaya r^{-2} hanya berlaku kebenarannya hingga jarak mencapai bulan (lihat soal 15.2.17). Untuk jarak yang lebih kecil dari 10^{-14} m, yaitu jarak untuk gaya-gaya antara partikel elementer, hukum Coulomb tidak lagi berlaku. Untuk kasus ini terungkap adanya gaya berjangkau dekat (lihat §13.13).

9. Konstanta kesebandingan dalam hukum Coulomb berhubungan dengan satuan muatan yang digunakan. Dalam sistem satuan CGS berlaku dua satuan muatan [1 satuan muatan elektrostatik atau 1 esu (*elektrostatic units*) atau satu satuan jarak (1 cm) hingga terdapat gaya sebesar satu satuan gaya (1 dyne) maka hukum Coulomb ditulis menjadi:

$$F = \frac{QQ'}{r^2} r_0 \quad (6.2)$$

r_0 adalah vektor satuan pada arah "garis" penghubung antardua muatan. Dalam sistem satuan SI, muatan dinyatakan dalam pengaruh dinamikanya, satuan menjadi lebih besar sekitar $c/10 = 3 \cdot 10^9$ kali, sehingga hukum Coulomb ditulis dalam bentuk:

$$F = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0 r^2} r_0 \quad (6.3)$$

Dalam persamaan [6.3] konstanta ϵ_0 disebut sebagai *konstanta influensia* atau konstanta permitivitas dan besarnya adalah:

$$\epsilon_0 = 8,859 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{J}^{-1} \text{m}^{-1} \quad (6.4)$$

Satuan muatan dinyatakan sebagai

$$\text{Coulomb} = 1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{det} \quad (6.5)$$

10. Gaya dilihat dari muatan mempunyai sifat penambahan. Hal ini terjadi tidak hanya pada posisi terdapatnya penggabungan muatan yang sama, juga untuk muatan-muatan yang menempati posisi keteraturan tertentu. Sebuah muatan Q^1 yang berada di titik A akan mengalami gaya karena pengaruh muatan Q^2 dan Q^3 masing-masing berada di titik B dan C adalah sama dengan penjumlahan vektor gaya karena masing-masing muatan Q^2 dan Q^3 . *Superposisi* ini dapat dikembalikan dari hukum Coulomb menjadi medan total dan potensial total yang terdapat di dalam sistem

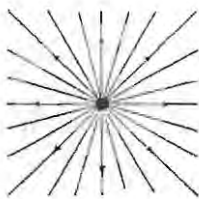
muatan. Selanjutnya dapat pula dibuat pengertian lebih jauh, bahwa semua muatan dapat digeser, sedangkan massa sebaliknya tidak bergeser lebih jauh. Oleh karena itu, hukum Coulomb tidak dapat digunakan tanpa syarat tertentu, misalnya penggunaan hukum gravitasi untuk sebuah bola yang dapat berubah bentuk, gaya dapat dihitung hanya dengan mengukur jarak r dari pusat bola. Sebaliknya pergeseran muatan atau muatan influensi adalah bertanggung jawab pula untuk perubahan bentuk benda.

6.1.2 Medan Listrik

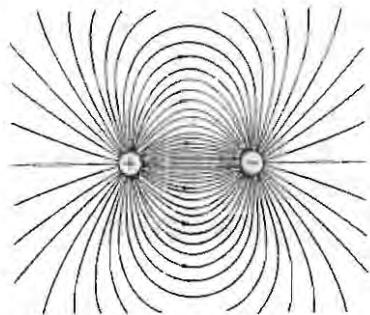
Gaya elektrostatik antara benda bermuatan Q^1 dan Q^2 dapat dibayangkan sebagai *gaya jarak jauh* yang dihubungkan oleh suatu jarak antara kedua muatan. Gambaran tentang *medan listrik* akibat adanya sebuah muatan di dalam ruang: Digambarkan bahwa ruang yang ditempati muatan mengalami "keadaan tegangan". "Keadaan tegangan" ini kemudian disebut sebagai *medan listrik*; adanya medan listrik di dalam ruang dapat diamati jika ditempatkan sebuah *muatan lain* sedemikian rupa, sehingga muatan ini mengalami gaya elektrostatik. Untuk menjelaskan lebih jauh tentang hal ini, penting menuliskan hukum Coulomb dalam bentuk lain

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{r^2} r_0 \cdot Q_2 \quad (6.6)$$

Gaya medan karena muatan yang dipengaruhi medan muatan Q^1 karena muatan Q^1



Gambar 6.1: Garis medan dari sebuah titik muatan positif.



Gambar 6.2: Garis medan dipol listrik.

Dalam hal ini, Q_2 dapat dipandang sebagai *muatan test* (atau muatan lain) yang digunakan untuk mengukur medan pada jarak r yang berbeda dari muatan Q_1 , yaitu dengan mencari gaya elektrostatik yang bekerja pada muatan Q_2 . Sebuah muatan Q akan menimbulkan *kuat medan listrik*

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (6.7)$$

Pengertian umum: jika pada sebuah muatan *test* Q (dianggap mempunyai muatan cukup kecil) pada jarak r mengalami gaya sebesar $F(r)$, diperoleh hubungan medan dan gaya sebagai berikut.

$$E(r) = \frac{F(r)}{Q} \quad (6.8)$$

disebut sebagai *kuat medan listrik* pada jarak r .

Misalnya di dalam ruang pada jarak $r_1, r_2, \dots$ terdapat muatan masing $Q_1, Q_2, \dots$. Pada muatan *test* yang terletak pada jarak r akan terdapat gaya elektrostatik karena muatan ke i sebesar

$$F_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_i Q}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^2} \mathbf{r}_{i0}$$

$\mathbf{r}_{i0}$ adalah vektor satuan pada arah dari vektor $\mathbf{r}_i$ dan $\mathbf{r}$. Gaya elektrostatik total yang bekerja pada muatan *test* Q akibat seluruh muatan $Q_1, Q_2, \dots$ dapat dicari dari penambahan vektor-vektor gaya sebagai berikut

$$\mathbf{F} = Q \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{Q_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^2} \mathbf{r}_{i0}$$

Berdasarkan persamaan [6.6], faktor pengali total yang terletak di sebelah kanan persamaan di atas dapat ditulis sebagai medan akibat muatan $Q_1, Q_2, \dots$. Kuat medan listrik adalah vektor sehingga penjumlahannya memenuhi penjumlahan vektor.

Di dalam kenyataan, muatan tidak pernah berbentuk titik, melainkan terdistribusi sebagai muatan kontinu di dalam ruang atau permukaan. Jika

di dalam elemen volume dV terdapat elemen muatan sebesar dQ maka $p = dQ/dV$ disebut sebagai *kerapatan muatan volumen* di tempat bersangkutan. Di samping itu, didefinisikan pula *kerapatan muatan permukaan*, yaitu apabila muatan terdistribusi di permukaan: $\sigma = dQ/dS$ maka medan yang ditimbulkan oleh muatan yang terdistribusikan di dalam elemen volume atau elemen luas yang cukup kecil dapat ditulis sebagai berikut.

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \rho \frac{dV}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad \text{dan} \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sigma \frac{dS}{r^2} \mathbf{r}_0$$

Penjumlahan medan keseluruhan dapat ditulis dalam bentuk integral sebagai berikut.

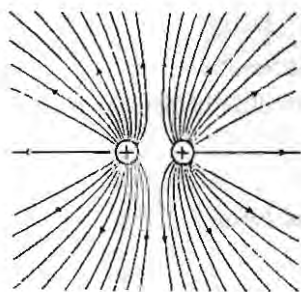
$$\mathbf{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \rho \frac{dV}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (6.9)$$

r adalah jarak antara titik tempat elemen volume bermuatan terdapat dan titik tempat dilakukan pengukuran kuat medan listrik; $\mathbf{r}_0$ adalah vektor satuan pada arah tersebut.

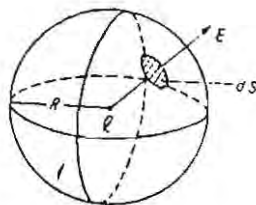
Berdasarkan definisi kuat medan mempunyai dimensi [gaya]/[muatan]. Satuannya dalam sistem satuan elektromagnetik adalah N/C. Jika 1 J/C disebut 1 V (volt) maka satuan kuat medan dapat pula dinyatakan dalam V/m.

Faraday dan Maxwell menganggap bahwa medan selalu terdapat di dalam ruang sembarang, walaupun di dalam ruang tersebut tidak terdapat muatan tes. Dengan pengertian itu jarak jauh yang digambarkan oleh hukum Coulomb dapat dipandang sebagai gaya jarak dekat antara medan dan muatan.

Pada dasarnya, orang percaya dan membuat postulasi adanya suatu medium penghantar gaya elektrostatis tersebut, yaitu analog seperti gaya yang bekerja di setiap titik di dalam medium elastik dan berhubungan dengan keadaan tegangan medium andai kata di dalam medium ini terdapat pula lokalisasi energi listrik. Fisika modern tidak lagi menggambarkan secara hipotesis adanya "eter" sebagai medium; menurut pengertian umumnya fisika modern menggambarkan medium tersebut tidak lain sebagai ruang.



Gambar 6.3: Garis medan antara dua muatan positif



Gambar 6.4: Perhitungan fluks garis medan yang berasal dari muatan Q .

Medan listrik dapat diilustrasikan dengan lebih jelas jika digunakan pengertian *garis-garis gaya medan listrik*. Suatu garis gaya di setiap titik menunjukkan arah kuat medan listrik atau gaya elektrostatis. Di dalam medan listrik yang timbul dari suatu muatan diam, garis gaya medan selalu menghubungkan muatan positif dan negatif. Garis ini tidak pernah "terputus" di dalam ruang dan garis gaya medan dalam elektrostatis tidak digambarkan sebagai garis-garis tertutup (bandingkan dengan §7.1.2). Arah garis medan ditentukan sesuai dengan arah medan listrik E dan dinyatakan melalui hukum Coulomb sebagai berikut. Garis-garis gaya medan berawal dari muatan positif dan berakhir di muatan negatif. Besarnya muatan ditentukan oleh jumlah garis medan. Garis medan yang berakhir pada satu titik dan berasal dari tempat tak berhingga yang terletak berlawanan dengan titik tersebut akan membentuk garis lurus radial (lihat gambar [6.1]). Kerapatan garis medan, seperti halnya ditunjukkan oleh hukum Coulomb sebagai perbandingan, merupakan ukuran dari kuat medan listrik.

Gambar[6.2] menunjukkan medan antara sepasang muatan yang besarnya sama, berbeda tanda (positif dan negatif), disebut sebagai medan *dipol listrik*, dalam kasus kedua dianggap bahwa terdapat dua titik bermuatan sama dengan titik berakhimnya garis-garis gaya medan listrik terletak pada jarak yang sangat jauh. Dari garis-garis medan ini dapat disimpulkan secara kualitatif gaya-gaya yang terdapat antara kedua muatan.

Jika dipandang menurut hukum Faraday bahwa garis gaya medan pada arah sepanjang garis yang menghubungkan keduanya menyebabkan muatan tarik-menarik, sedangkan pada arah melintang menyebabkan muatan tolak-menolak (lihat gambar[6.2] dan [6.3]).

Jika garis medan tidak berakhir di mana pun, maka pada bidang permukaan bola (gambar[6.4]) atau pada bidang tertutup lainnya yang menyelimuti titik muatan akan terdapat garis-garis gaya medan listrik dengan terdistribusi serba sama (homogen). Hal itu berhubungan dengan hukum Gauss (§3.3.1): Fluks medan listrik $\Phi = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$ sebuah muatan titik yang melalui permukaan tertutup adalah tidak bergantung pada bentuk permukaan, sejauh permukaan tersebut menyelubungi titik muatan tersebut. Φ untuk sebuah permukaan bola yang menyelimuti sebuah titik muatan misalnya dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Phi &= \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = 4\pi r^2 E \\ &= 4\pi r^2 \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 r^2} = \frac{Q}{\epsilon_0}\end{aligned}\quad (6.10)$$

Karena sifat menambahkan medan yang ditimbulkan beberapa muatan, berlaku rumusan umum sebagai berikut. Fluks listrik yang melalui sebuah permukaan tertutup adalah sama dengan jumlah muatan keseluruhan dibagi dengan ϵ_0 .

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint \rho \, dV \quad (6.11)$$

Rumusan ini berlaku pula untuk volume yang sangat kecil, misalnya untuk elemen volume sebuah kubus: $dx dy dz$ maka fluks yang keluar dari elemen volume tersebut sebesar $\nabla \cdot \mathbf{E} \, dV$ (lihat §3.3.1) adalah sama dengan muatan tertutup dibagi ϵ_0 :

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \\ &= \frac{\rho}{\epsilon_0}\end{aligned}\quad (6.12)$$

Pers[6.12] disebut persamaan Poisson, yang menyatakan bahwa garis medan menuju ke muatan negatif dan keluar dari muatan positif. Muatan positif adalah sumber medan dan muatan negatif adalah penerima medan. Faktor $1/\epsilon_0$ memberikan pengertian kuat sumber satuan muatan.

6.1.3 Potensial Elektrostatik

Apakah setiap medan listrik selalu mempunyai potensial? Pertanyaan ini sama artinya dengan pernyataan sebagai berikut. Apakah tidak mungkin untuk memperoleh energi hanya dengan memindahkan sebuah muatan Q melalui lintasan tertutup? Jika tidak terdapat lintasan seperti itu maka kerja untuk memindahkan muatan antara dua titik tidak bergantung pada jalan yang ditempuh. Dengan demikian, akan terdapat energi potensial yang bergantung pada tempat $W_{\text{pot}} = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = Q \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r}$ dikarakterkan oleh sifat-sifat muatan (Q) dan gaya serta *perbedaan potensial* atau *tegangan* antara dua tempat yang dinyatakan oleh r_1 dan r_2 adalah

$$U(r_1, r_2) = \int_{r_1}^{r_2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} \quad (6.13)$$

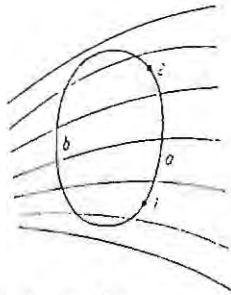
Seperti halnya energi, potensial dapat ditambahkan menurut penambahan aljabar biasa. Tentunya harus dilakukan normalisasi (lihat §1.5.5). Secara umum, potensial di tempat yang tak berhingga berharga nol.

Potensial sebuah titik muatan dapat ditulis dalam bentuk integrasi garis pada arah radial sebagai berikut

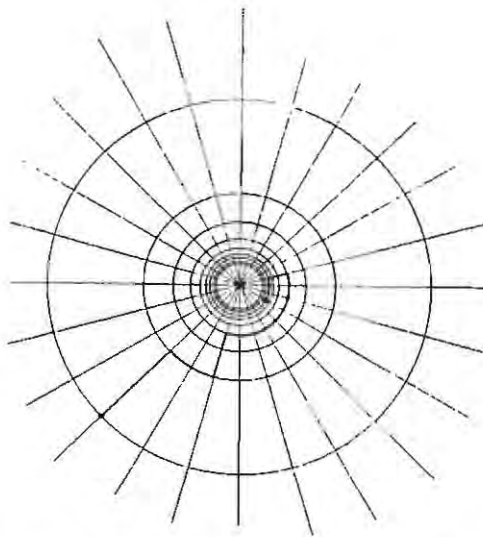
$$U(r) = \frac{Q'}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (6.14)$$

dan energi potensial titik muatan kedua adalah

$$W_{\text{pot}} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (6.15)$$



Gambar 6.5. Gambaran skematik untuk mendefinisikan potensial.



Gambar 6.6. Pada medan simetri bola atau selinder energi potensial tidak bergantung pada jalan yang ditempuh. Medan serupa itu mempunyai potensial.

Cara paling baik adalah membuat normalisasi W_{pot} dan U sehingga keduanya akan berharga nol pada jarak tak berhingga. Hasil perhitungan untuk W_{pot} dan U akan sama jika dilakukan pergeseran muatan pada jalan yang tidak radial (gambar[6.6]) Perhitungan seperti itu umumnya berlaku untuk *medan sentral*. Selain itu, setiap jalan yang dibentuk merupakan jalan zig-zag terhadap jalan radial. Dengan cara seperti ini, akan terbentuk jalan di atas suatu permukaan tertentu sehingga tidak diperlukan kerja untuk memindahkan muatan tersebut. Selanjutnya, setiap medan

elektrostatik dapat dinyatakan sebagai penjumlahan medan sentral dari titik muatan (lihat pers[6.9]) dan operasi integral pers[6.13] untuk menghitung integral, juga memenuhi operasi penambahan (linier). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa setiap medan elektrostatik mempunyai potensial total sama dengan penjumlahan semua potensial yang terdapat pada masing-masing titik-titik muatan:

$$U = \int \frac{\rho(r) dV}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (6.16)$$

Patut pula diketahui bahwa tidak semua medan menghasilkan potensial, misalnya medan listrik berpusar dan medan magnet (lihat §7). Medan seperti itu menghasilkan garis-garis gaya medan yang tertutup. Karena sifat yang demikian, khususnya untuk kasus medan listrik, sebuah muatan dapat mempunyai energi yang cukup besar. Kerja akibat pergeseran muatan bergantung pada jalan yang ditempuh antara dua titik awal dan akhir.

Potensial dan medan menggambarkan keadaan dengan informasi yang sama. Potensial U sebagai besaran skalar kebanyakan lebih mudah diperlakukan dibandingkan dengan besaran vektor medan E . Penjumlahan skalar pada persamaan[6.16] adalah jauh lebih mudah diselesaikan dibandingkan dengan mencari penyelesaian persamaan vektor persamaan [6.9].

Potensial medan dapat saling dihubungkan satu sama lain menurut persamaan sebagai berikut.

$$U(r) = - \int_{\infty}^r E ds$$

atau sama artinya dengan

$$E(r) = -\nabla U(r) \quad (6.17)$$

Medan tidak lain adalah sama dengan gradien (turunan terhadap jarak) dari potensial atau penurunan potensial terhadap jarak.

Keberadaan hubungan ini lebih mudah jika diilustrasikan secara grafis. Permukaan yang mempunyai potensial sama (bidang ekuipotensial) dari sebuah titik muatan adalah berbentuk bola, yaitu bidang yang tegak lurus terhadap garis medan (lihat gambar[6.7]). Pernyataan ini dapat lebih jelas dinyatakan dalam operasi gradien (∇) sebagai berikut. Vektor ∇U terletak pada arah berkurangnya harga U terbesar, harganya sama dengan tangen U sepanjang arah tersebut.

Dari definisi bidang ekuipotensial, dapat disimpulkan bahwa tidak ada kerja yang harus dilakukan untuk memindahkan sebuah muatan pada bidang tersebut. Komponen kuat medan listrik pada bidang tangensial permukaan ekuipotensial pada setiap tempat adalah sama dengan nol. Dengan perkataan lain, kuat medan listrik selalu terletak tegak lurus menembus bidang ekuipotensial.

Untuk sebuah medan pada arah x dinyatakan sebagai $E = -dU/dx$ maka persamaan Poisson [6.12] menjadi

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{d^2U}{dx^2} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (6.18)$$

Kerapatan muatan adalah turunan pertama medan atau turunan kedua potensial atau sebagai lengkungannya. Untuk distribusi dan arah sembarang medan, hukum Poisson dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= -\nabla \cdot \nabla U \\ &= -\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \\ &= -\nabla^2 U = \frac{\rho}{\epsilon_0} \end{aligned} \quad (6.19)$$

dengan

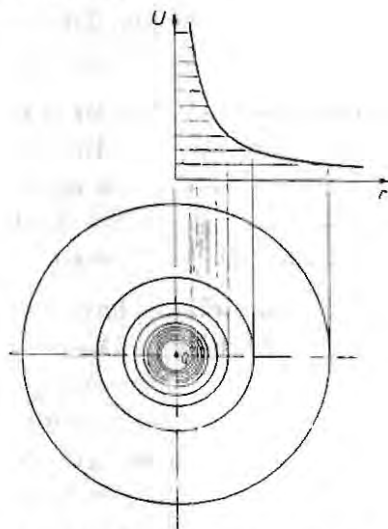
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

adalah sebagai operator Laplace.

Dari relasi-relasi di atas, besaran yang dapat diukur secara praktis adalah *perbedaan potensial* antara dua titik. Dalam pengertian medan listrik disebut *tegangan*. Potensial dan tegangan berdasarkan definisinya adalah besaran skalar dan mempunyai dimensi [kerja]/[muatan], ditulis dalam satuan

$$1 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1} = 1 \text{ V} \quad (6.20)$$

Jika sebuah muatan Q berada dalam beda potensial U maka muatan akan mengambil energi sebesar QU . Energi ini dalam sistem satuan SI tentunya dinyatakan dalam Joule: $CV = J$.



Gambar 6.7: Permukaan ekuipotensial sebuah titik muatan

6.1.4 Menentukan Medan Secara Praktis

Dengan persamaan Poisson atau hukum Gauss dalam bentuk rumusan ekuivalennya, yaitu persamaan [6.11], [6.12], [6.19], selalu dapat dicari medan elektrostatik yang timbul karena suatu distribusi muatan. Penyelesaian tersebut dapat diterima melalui kenyataan berikut. Setiap penyelesaian persamaan Poisson, yaitu setiap fungsi yang bergantung pada tempat $U(r)$,

apabila dioperasikan $U = 0$ dan memenuhi syarat batas, akan dapat dicari penyelesaiannya. Penyelesaian persamaan demikian dapat diperoleh melalui berbagai macam cara. Beberapa contoh persoalan berikut dapat dicari dengan cara yang ekuivalen.

a) Medan yang ditimbulkan oleh distribusi muatan simetri bola sembarang. Untuk kasus ini medan listrik yang ditimbulkan oleh muatan seperti ini juga mempunyai simetri bola. Dengan perkataan lain, semua garis-garis gaya medan harus menunjukkan arah keluar atau masuk ke muatan yang bersangkutan dan mempunyai harga konstan di permukaan bola konsentris. Fluks garis-garis medan yang melalui permukaan bola berjari-jari r adalah $\Phi = 4\pi r^2 E$. Di lain pihak, fluks Φ berharga sama dengan "muatan tertutup" Q/ϵ_0 , sehingga didapat $E = Q / 4\pi \epsilon_0 r^2$, yaitu sama dengan medan listrik yang timbul seakan-akan muatan terpusat.

b) Medan listrik di dalam bola kosong bermuatan serba sama Dalam hal ini, medan haruslah konsentris. Di dalam bola tidak terdapat muatan. Melalui permukaan bola konsentris yang termasuk bola kosong tidak terdapat fluks garis-garis gaya medan. Keduanya akan mungkin diperoleh jika medan di dalam bola sama dengan nol.

c) Medan listrik akibat sebuah kawat selindris bermuatan homogen dan panjang tak berhingga. Diasumsikan bahwa di dalam kawat berbentuk selinder ini terdapat kerapatan muatan "linier" (muatan per satuan panjang) sebesar $\lambda \text{ Cm}^{-1}$. Medan listrik yang ditimbulkannya haruslah terletak pada arah radial terhadap sumbu kawat. Melalui sebuah selinder konsentris berjari-jari r , panjang l , terdapat fluks garis-garis gaya medan sebesar $2\pi r l E$ (pada penampang lintang di atas dan di alas selinder tidak terdapat medan listrik), sama dengan $l\lambda/\epsilon_0$. Oleh karena itu, besarnya medan listrik diperoleh $E = \lambda / 2\pi \epsilon_0 r$.

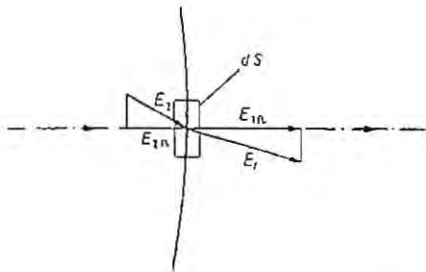
Potensial akan diperoleh dengan cara mengintegrasikan medan di atas terhadap r :

$$U = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon_0} \ln r + U_0$$

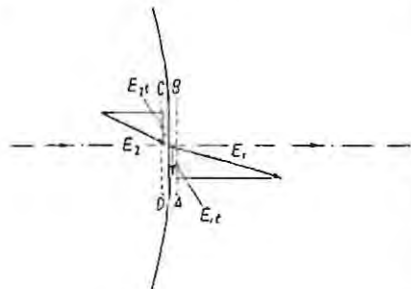
Potensial itu tidak berharga nol di tempat tak berhingga. Sifat khusus

medan listrik untuk kasus ini terkenal dan dipakai untuk membuktikan adanya gelombang alamiah elektron (lihat §10.6.2).

d) Medan listrik yang ditimbulkan oleh plat datar bermuatan serba sama. Andaikan pada plat datar terdapat kerapatan muatan permukaan $\sigma \text{ Cm}^{-2}$. Arah medan listrik yang timbul oleh muatan permukaan adalah tegak lurus plat. Melalui luas permukaan S yang sama dan merupakan permukaan tertutup, terdapat fluks garis-garis gaya medan sebesar $2SE = S \sigma / \epsilon_0$, sehingga $E = \sigma / \epsilon_0$. Apabila plat bermuatan positif E akan mempunyai harga yang sama dan selalu menjauhi dari plat. Fluks yang memasuki plat mempunyai harga sebesar $-\sigma / 2\epsilon_0$ dan $+\sigma / 2\epsilon_0$, atau sebesar σ / ϵ_0 . Dengan demikian, secara umum dapat disimpulkan setiap muatan yang terdistribusi di permukaan tidak bergantung pada bentuk permukaan tersebut yaitu jika distribusi muatannya dilihat dari sebuah titik yang terletak di dekatnya. Juga fluks yang melalui permukaan sembarang mempunyai medan listrik (tepatnya komponen tegak lurus medan listrik terhadap permukaan) sekitar σ / ϵ_0 , dengan σ adalah kerapatan muatan permukaan lokal. Sebaliknya, komponen tangensial



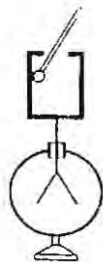
Gambar 6.8: Komponen normal kuat medan listrik pada kedua sisi sebuah plat datar bermuatan.



Gambar 6.9: Komponen tangensial kuat medan listrik pada kedua sisi sebuah plat datar bermuatan.

medan tidak mengalami perubahan pada peristiwa tersebut (lihat gambar[6.8] dan [6.9]). Berdasarkan kenyataan itu, dapat didefinisikan istilah *kapasitas* sebuah kondensator (lihat §6.1.5)

e) **Medan listrik sebuah benda logam sembarang.** Di dalam sebuah konduktor muatan listrik bebas bergerak. Muatan-muatan itu dapat berada dalam keadaan diam, atau dalam keadaan setimbang, jika muatan tersebut tidak mengalami gaya, atau tidak berada dalam kuat medan listrik, atau juga tidak ada penurunan potensial. Adanya medan listrik segera menyebabkan terjadinya kompensasi muatan dibandingkan dengan keadaan semula. Hal itu berarti bahwa (terlepas dari kejadian tidak seimbang yang terjadi hanya beberapa saat). Potensial di semua tempat di dalam konduktor berharga sama. Setiap permukaan konduktor adalah bidang pada ekuipotensial.



Gambar 6 10: Pemberian muatan sempurna di dalam "cungkup Faraday".

Jika di permukaan sebuah konduktor terdapat medan maka medan tersebut haruslah terletak tegak lurus terhadap permukaan; setiap komponen tangensial dengan sendirinya akan ditiadakan oleh adanya pergeseran muatan listrik.

Dinding bagian dalam logam konduktor adalah bidang ekuipotensial. Jika di dalam logam tidak terdapat muatan maka di semua tempat di bagian tersebut mempunyai harga Suatu fungsi $U(r)$ yang menggambarkan keadaan ini adalah sesuai dengan $U = \text{konstan}$. Penyelesaian trivial untuk keadaan itu adalah benar. Suatu potensial konstan mempunyai arti tidak terdapat medan listrik di dalam ruang kosong sebuah konduktor.

Jika muatan yang terdapat di dalam seluruh konduktor ingin dilepaskan semuanya, bagian dalam konduktor yang kosong harus disentuhkan ke dinding konduktor lainnya. Muatan akan mengalir pada permukaan sebelah luar. Untuk memberikan muatan secara sempurna, dapat dipakai sebuah gelas Faraday, yang digunakan untuk mengukur muatan dengan

cara menghubungkannya dengan motor listrik (gambar[6.10]).

Sebuah ruangan akan terlindung dari muatan statik jika ruang tersebut dilapisi logam; apa yang sering digunakan adalah cukup jika dinding hanya dilapisi susunan kawat paralel yang cukup dekat satu sama lainnya, yang disebut sangkar Faraday.

Pada bola logam muatan akan terdistribusi sedemikian sehingga potensial di permukaannya adalah sama. Dengan perkataan lain, permukaan merupakan bidang ekuipotensial. Dengan demikian, sebuah bola logam akan mempunyai distribusi muatan yang sama dan potensial di luar bola tersebut mempunyai sifat seolah muatan total terdapat di pusat bola.

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (6.21)$$

Dua bola yang mempunyai jari-jari R_1 dan R_2 mempunyai potensial yang sama apabila muatan di permukaannya sebesar Q_1 mempunyai kerapatan sebesar $\sigma_1 = Q_1/4\pi R_1^2$ dan bersifat sebagai berikut.

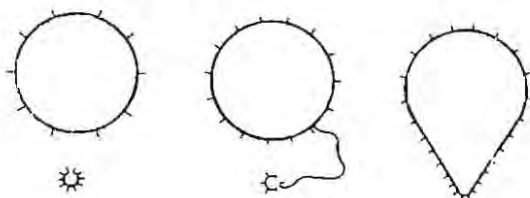
$$\frac{Q_1}{R_1} = \frac{Q_2}{R_2}; \quad \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (6.22)$$

(lihat gambar[6.11]). Pada daerah cukup dekat dengan permukaan lengkung bola akan terdapat medan hanya akibat dari muatan yang terdapat di sekitar bagian permukaan lengkungan tersebut. Sebuah ujung runcing akan mempunyai pengaruh seperti bola berjari-jari r . Adanya kesamaan potensial pada seluruh permukaan bola terjadi hanya jika kerapatan di permukaan ujung tajam, sesuai dengan persamaan[6.22] adalah lebih besar dibandingkan dengan muatan yang terdapat di daerah lengkungan tidak begitu "tajam". Berdasarkan §6.1.4d akan terdapat pula medan lokal yang sama besar di ujung permukaan. Demikian besarnya medan itu hingga dapat menimbulkan lompatan muatan di udara yang terdapat di sekitar ujung tersebut (disebut sebagai muatan ujung).

Metode teori potensial sangat baik dirumuskan sehingga dapat digunakan untuk meramalkan medan jika dilakukan pengukuran

berdasarkan hukum Coulomb pada persamaan[6.9].

Beberapa anekdot akan hal tersebut kiranya cukup dapat mengajarkan kepada kita: Newton telah merumuskan hukum gravitasi sejak 1665. Akan tetapi, tidak disebarluaskan ke khalayak ramai karena ia belum dapat membuktikan bahwa sebuah bola dapat menarik sedemikian rupa seperti halnya massa dapat diandaikan terkonsentrasi di pusat bola tersebut. Kesimpulan demikian adalah penting untuk merumuskan bahwa $g = GM/r^2$. Beberapa tahun kemudian, lama setelah Newton merumuskan hukum gravitasi, para ilmuwan yang tergabung dalam *Royal society of London* mendiskusikan hukum gaya apa sebenarnya yang bekerja pada sebuah planet yang bergerak menurut lintasan elips. Halley kemudian pergi ke



Gambar 6.11 Dua bola logam bermuatan sama yang terkecil mempunyai potensial di permukaan terbesar dan benda paling kanan mempunyai kuat medan terbesar. Akan tetapi, pada bola terkecil mempunyai kuat medan terbesar. Dengan demikian, pada puncak terkecil akan mempunyai kuat medan terbesar.

Cambridge untuk bertanya pada Newton. Newton dengan cepat menjawab: "hukum r^{-2} ". Dengan demikian, ia telah berhasil memberikan penyelesaian berapa besarnya a untuk persamaan[6.9] dan teori yang dikembangkannya dapat dianggap telah cukup disebarluaskan.

6.1.5 Kapasitas

Potensial U sebuah titik muatan atau bola logam sebanding dengan muatan Q yang terdapat padanya. Kesebandingan U dan Q itu berlaku untuk semua bentuk distribusi muatan. Jika besarnya muatan digandakan tanpa mengubah geometri distribusinya, geometri medan juga akan tetap tidak berubah, tetapi fluks garis medan menjadi dua kali semula.

Hal ini dapat terjadi jika kuat medan, juga potensialnya menjadi dua kali harga semula (dianggap bahwa potensial di tempat tersebut dinormalisasi dengan nol, sehingga medan "menghilang" atau sama dengan nol; biasanya normalisasi selalu dibuat terhadap harga potensial di tempat tak berhingga). Antara muatan total Q dan potensial U , misalnya, dianggap terhadap dinding yang terletak di tempat tak berhingga, di "bumi" maka secara umum berlaku hubungan:

$$Q = CU \quad (6.23)$$

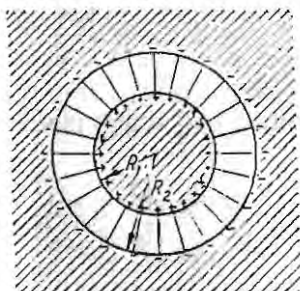
Konstanta C hanya bergantung pada bentuk penghantar dan disebut sebagai *kapasitas*. Dimensinya adalah [muatan]/[potensial] dan satuannya dalam sistem elektromagnetik adalah

$$1 \text{ Farad} = 1 \text{ F} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}} \quad (6.24)$$

Kapasitas sebuah penghantar berbentuk bola berjari-jari R berdasarkan persamaan[6.21] dapat dihitung sebesar:

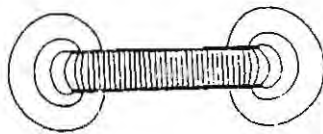
$$C = 4\pi\epsilon_0 R$$

Juga setiap motor listrik (elektromotor, lihat §6.1.5c) terdapat kapasitas. Muatan yang diberikan ke dalam sistem tersebut akan menghasilkan tegangan tertentu; hubungannya dapat dicari dengan menggunakan persamaan[6.23]. Setiap lompatan muatan tertentu "dikoordinasikan" oleh tegangan tertentu. Elektromotor dapat digunakan sebagai *coulombmeter*, seperti halnya voltmeter.



Gambar 6.12: Kondensator bola.

Dua plat logam dengan luas permukaan S diletakkan berhadapan-hadapan sejauh d satu sama lain (gambar[6.13]). Besar muatan yang terdapat pada masing-masing plat adalah sama dan hanya berbeda tanda. Seperti halnya yang seharusnya terjadi, yaitu jika kedua plat dihubungkan dengan sumber tegangan yang tidak menimbulkan muatan, hanya mengalami pergeseran muatan. Berapa besar kapasitas *kondensator plat* tersebut? Melalui permukaan tertutup yang masing-masing mempunyai muatan Q dan $-Q$ yang dipisahkan oleh jarak d tidak akan menimbulkan fluks. Jika luas sesuai dengan ukuran luas plat maka antara kedua plat tersebut akan terdapat fluks garis gaya medan listrik sebesar Q/ϵ . Medan antara kedua plat (tetapi medan di daerah sekitar pinggir plat akan mengarah ke luar) menjadi semakin kecil jika jarak d semakin kecil; lihat gambar[6.13]). Berdasarkan §6.1.4d antara kedua plat terdapat medan listrik homogen, tegak lurus terhadap permukaan plat maka fluks yang terdapat antara kedua plat adalah $S \cdot E = Q/\epsilon$; sehingga kuat medan listrik



Gambar 6.13: Medan listrik suatu kondensator plat bermuatan

menjadi $E = Q/\epsilon S$ dan beda potensial antara kedua plat adalah

$$U = E \cdot d = \frac{Qd}{\epsilon S}.$$

Dengan demikian, kapasitas kondensator plat sebesar

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon S}{d} \quad (6.25)$$

a) Hubungan Seri dan Paralel Kapasitor

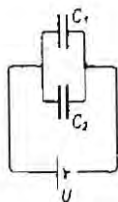
Kondensator yang dihubungkan paralel (gambar[6.14]) mempunyai kapasitansi total sebagai penjumlahan semua kapasitansi kapasitor yang bersangkutan:

$$C = C_1 + C_2 \quad (6.26)$$

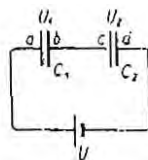
dan kapasitas total sejumlah kapasitor yang dihubungkan seri merupakan penjumlahan kebalikan masing-masing kapasitansinya:

$$C^{-1} = C_1^{-1} + C_2^{-1} \quad (6.27)$$

Dasar: Potensial sebuah kawat yang menghubungkan kapasitor secara langsung (kapasitor hubungan paralel) adalah sama (dalam hal ini tahanan



Gambar 6.14: Sistem kondensator hubungan paralel.



Gambar 6.15: Sistem kondensator hubungan seri.

kawat diabaikan). Oleh karena itu, potensial pada kapasitor plat C_1 dan C_2 yang diilustrasikan pada gambar[6.14] adalah sama, yaitu sama dengan tegangan baterai yang diberikan U . Muatan total yang terdapat pada sistem kapasitor seperti itu, sama dengan penjumlahan masing-masing muatan pada masing-masing kapasitor $Q = Q_1 + Q_2 = CU = C_1U + C_2U$. Pada sistem kapasitor yang terdapat pada gambar[6.15], potensial total sama dengan penjumlahan potensial pada masing-masing kapasitor, yaitu $U = U_1 + U_2$. Antara plat b dan c dan demikian pula antara a dan d , yang diartikan bahwa muatan dapat "dipindahkan", sehingga kapasitor C_1 dan C_2 mempunyai muatan yang sama (hubungan seri) yaitu Q , diperoleh

$$U = U_1 + U_2 = Q(C_1^{-1} + C_2^{-1}) = Q C^{-1}$$

b) Timbangan Potensial Kirchoff

Sebuah kondensator yang diberi tegangan U berdasarkan §6.1.8 mempunyai energi sebesar:

$$W = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S}{d} U^2$$

Jika jarak antarplat kondensator diubah sebesar δd , energi yang terkandung di dalamnya akan berubah sebesar $\delta W = -1/2 C U^2 \delta d =$

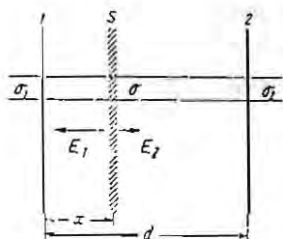
Hal ini berarti bahwa di antara kedua plat terdapat gaya sebesar:

$$F = -\frac{\delta W}{\delta d} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S}{d^2} U^2$$

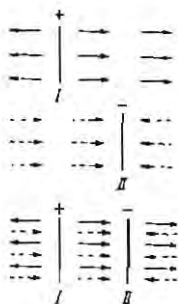
Melalui pengukuran gaya ini, potensial antara kedua plat dapat diketahui secara langsung. Untuk keperluan pengukuran gaya tersebut, biasanya dipakai *timbangan Kirchoff* (gambar[6.18]). Melalui tiga plat (talenan) terisolasi jarak d dapat dibuat, yaitu karena adanya tarik menarik listrik pada plat 1. Melalui beban yang diberikan pada timbangan di sebelahnya besarnya gaya tarik menarik dapat ditentukan, yaitu sama dengan jumlah beban jika jarak d sama dengan sebelum plat 1 dan 2 diberikan tegangan listrik. Gaya karena penambahan beban m pada lengan kanan timbangan adalah mg yang sama dengan gaya elektrostatis:

$$mg = \frac{1}{2} \epsilon_0 U^2 \frac{S}{d^2}$$

Melalui pengukuran besaran-besaran mekanik m , S dan d maka tegangan U dapat ditentukan. Pengukuran dengan cara itu disebut *pengukuran tegangan absolut*.



Gambar 6.16: Perhitungan kerapatan muatan σ dan σ pada plat 1 dan 2 akibat muatan dari pengaruh gaya F

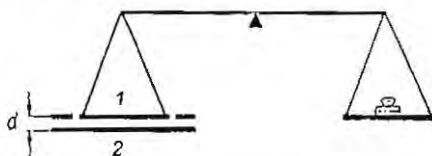


Gambar 6.17: gaya yang berpengaruh pada kondensator plat.

c) Elektromotor

Kondensator plat sering digunakan untuk membangkitkan medan listrik homogen, yang besarnya adalah berhubungan dengan potensial U antara kedua plat dan jaraknya d : $[E] = U/d$.

Suatu muatan Q yang terdapat di dalam medan listrik akan mengalami gaya sebesar $F = QU/d$; pengukuran gaya dapat dipakai untuk menentukan besarnya muatan yang terdapat di dalam sistem tersebut. Pada *elektrometer kawat* (gambar [6.10]) muatan yang akan diukur terdapat pada penyangga tetap yang terisolasi dengan tebal beberapa μm dan dihubungkan dengan kawat. Semuanya terletak di antara kondensator plat yang menimbulkan medan listrik homogen.



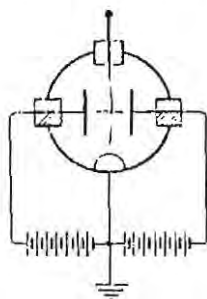
Gambar 6.18: Timbangan potensial Kischoff.

Karenanya pada muatan akan bekerja gaya yang besarnya sebanding dengan perkalian muatan dan medan dan akan menyebabkan kawat mengalami penyimpangan. Penyimpangan kawat dapat diamati secara

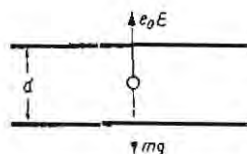
mikroskopik dan sebanding dengan muatan yang terdapat padanya. Elektrometer ini dapat mencapai ketepatan muatan hingga beberapa 10^{-14} Coulomb untuk setiap skala dalam *mirkometer okuler* dalam pembacaan pada mikroskop. Hal ini berhubungan dengan kapasitas yang cukup kecil dari peralatan hingga beberapa mV.

d) Percobaan Millikan

Sebagai pembawa muatan, di antara kondensator plat diletakkan tetesan cairan (biasanya tetesan minyak). Di dalam ruang tanpa medan listrik, tetesan akan jatuh ke bawah karena mengalami gaya gravitasi (gaya berat) dengan percepatan beraturan dan tahanan gaya gesek sebanding dengan kecepatan beraturan. Berdasarkan hukum Stoke (persamaan [3.33]) dapat ditentukan jari-jari dan gaya berat mg tetesan. Jika pada kedua plat kondensator diberikan tegangan yang dapat divariasi sedemikian rupa



Gambar 6.19: Elektrometer kawat.



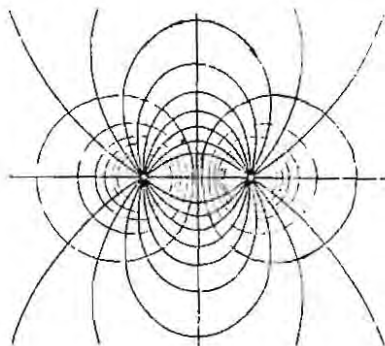
Gambar 6.20: Sebuah tetesan minyak yang mengandung muatan elementer akan mengambang di dalam medan listrik.

sehingga tetesan mengalami kesetimbangan dengan gaya karena medan listrik. Dengan perkataan lain, tetesan akan mengambang di antara kedua plat. Muatan yang terdapat di dalam tetesan dapat ditentukan sebagai berikut.

$$Q = \frac{mg}{|E|} = \frac{mgd}{U}$$

Terlihat dari persamaan di atas bahwa muatan Q dapat dinyatakan dalam besaran-besaran yang langsung terukur. Dengan perkataan lain, Q dapat ditentukan.

Dengan metode itu Millikan melakukan percobaan mengukur muatan dan dijumpainya bahwa muatan selalu merupakan kelipatan bilangan bulat jika dibagi dengan $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, yaitu muatan elementer e (lihat §6.1.1).



Gambar 6.21: Garis-garis medan sebuah dipol akan menembus tegak lurus bidang ekuipotensial.

Melalui percobaan itu, Millikan dapat menentukan e dengan ketelitian yang baik.

6.1.6 Momen Dipol Listrik

Suatu *dipol* terdiri atas sepasang muatan yang sama besar, tetapi berbeda tanda dan dibedakan pada jarak yang relatif dekat satu sama lainnya. Medan listrik yang ditimbulkan sebuah *dipol* diilustrasikan pada gambar[6.2] dan [6.21]. Potensial yang timbul akibat medan listrik di titik A (gambar[6.22]), pada jarak r terhadap *dipol* dengan panjang l ¹⁾ dapat dicari melalui penjumlahan potensial masing-masing titik muatan tersebut.

¹⁾ panjang *dipol* diartikan sama dengan jarak antara dua muatan yang berbeda tanda. dalam hal ini jaraknya adalah l .

Gambar 6.22: Perhitungan potensial karena *dipol* listrik

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-Q}{r_2} \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q(r_2 - r_1)}{r_1 r_2}
 \end{aligned}$$

Untuk $r \gg l$ maka harga $\sqrt{r^2} \approx r$ dan harga $r_2 - r_1 = l \cos \alpha$ (α adalah sudut antara sumbu *dipol* pada arah titik A):

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}_0}{r^2} \quad (6.28)$$

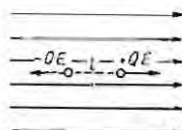
Sifat-sifat *dipol* dapat diperoleh dengan menentukan arahnya melalui vektor dan disebut *momen dipol listrik p* sebagai berikut.

$$\mathbf{p} = Q\mathbf{l} \quad (6.29)$$

Dengan demikian, persamaan [6.28] dapat ditulis kembali menjadi:

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ql \cos \alpha}{r^2} \quad (6.30)$$

dengan $\mathbf{r}_0$ adalah vektor satuan pada arah titik yang menjadi pusat perhatian. Faktor $\cos \alpha$ pada persamaan [6.28] dan "tersembunyi" di persamaan [6.30]

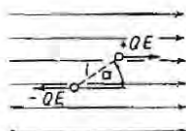
Gambar 6.23: Gaya pada sebuah *dipol* yang terdapat di dalam medan listrik homogen adalah nol.Gambar 6.24: Gaya yang bekerja pada sebuah *dipol* yang terdapat di dalam medan listrik inhomogen

menunjukkan bahwa potensial pada sumbu simetri *dipol* adalah nol. Sumbu *dipol* mempunyai harga jarak terbesar sebesar r dan akan mengalami penurunan sebanding dengan r^2 .

Sebuah *dipol* terdapat di dalam medan listrik. Kemudian akan dicari gaya yang bekerja padanya. Apabila medan listrik tidak homogen, kuat medan listrik pada tempat terdapatnya kedua muatan tersebut akan sedikit berbeda. Selanjutnya *dipol* yang terletak di sepanjang garis medan (gambar[6.24]) adalah

$$F = -Q E + Q(E + dE) = Q dE = m \frac{dE}{l}$$

Suku dE/l adalah perubahan kecepatan kuat medan listrik sepanjang garis medan dapat pula diganti, karena harga l kecil, melalui penurunan



Gambar 6.25 Momen putar (momen gaya) yang bekerja pada sebuah dipol yang terdapat di dalam medan listrik homogen.

terhadap r pada arah ini, menjadi

$$F = m \frac{dE}{dr} \quad (6.31)$$

dE/dr , adalah ukuran ketidakhomogenan medan listrik (perubahan medan listrik per satuan jarak). Jika arah *dipol* di dalam medan listrik membentuk sudut α maka gaya yang bekerja adalah:

$$F = m \frac{dE}{dr} \cos \alpha \quad (6.32)$$

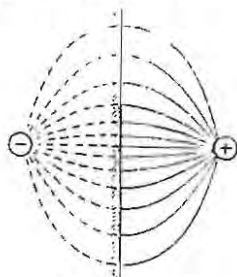
Selain itu, patut pula diperhatikan bahwa gaya yang bekerja pada pasangan muatan yang membentuk *dipol* juga merupakan pasangan gaya. *Momen putar* atau *momen gaya* M yang terbentuk karenanya adalah hasil kali lengan putar l dan gaya QE .

$$M = mQl \times E = p \times E \quad (6.33)$$

Momen putar itu terbatas untuk "menarik" *dipol* ke arah medan listrik; pada arah tersebut momen putar berharga nol.

Energi potensial dipol di dalam medan E adalah sama dengan penjumlahan energi masing-masing muatan:

$$W_{\text{pot}} = QU_1 - QU_2 = Q(U_1 - U_2) \quad (6.34)$$



Gambar 6.26: Medan listrik sebuah muatan titik yang diletakkan di depan sebuah plat logam yang dihubungkan ke bumi.

$$= Q E l \cos \alpha = p \cdot E$$

6.1.7 Peristiwa Induksi

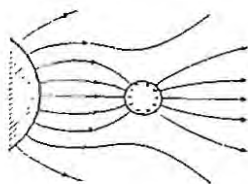
Jika sebuah muatan positif ditempatkan di dekat sebuah plat logam, garis-garis medan akan melengkung (gambar[6.25]) Hal tersebut terjadi karena garis-garis gaya tersebut akan keluar dari sisi permukaan logam lainnya secara tegak lurus. Hal itu dapat dibayangkan sebagai berikut. Komponen tangensial yang seharusnya muncul pada arah radial, menyebabkan munculnya muatan negatif yang terletak persis di seberang muatan positif. Kemudian, akan menarik muatan positif sedemikian rupa sehingga garis medan dapat mencapai arah tegak lurus. Dalam hal itu semua garis medan yang keluar dari muatan positif dan juga sebagian garis medan yang masuk ke permukaan logam akan mengalami penyimpangan; muatan negatif yang timbul di permukaan logam, yang disebut pula sebagai *muatan induksi*, sama besar dengan muatan positif. Sebagai perbandingan dengan gambar[6.21], medan yang ada, paling tidak

sebelum garis menembus plat logam, identik dengan garis medan sebuah *dipol* muatan positif dan *muatan cermin*. Muatan cermin yaitu muatan negatif, yang terdapat di belakang permukaan batas. Seperti halnya pada *dipol*, permukaan logam adalah permukaan simetri yang mempunyai potensial nol. Di dalam kenyataannya, "muatan cermin" sebenarnya tidak ada, tetapi di permukaan plat logam terdapat muatan induksi dengan kerapatan muatan permukaan α dan menurut §6.1.4d kuat medan listrik di dalam logam adalah $E = 0$. Pada muatan positif bekerja pula gaya yang sesuai distribusi medan yang terdapat di sekitarnya, seperti halnya gaya yang bekerja pada "muatan cermin", yaitu:

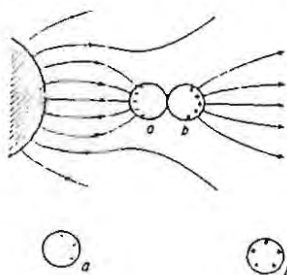
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{d^2} \quad (6.35)$$

Gaya itu disebut juga sebagai *gambaran gaya*.

Untuk logam yang terisolasi dan berbentuk sembarang, juga berlaku hal di atas. Muatan induksi adalah muatan negatif. Muatan tersebut muncul pada tempat masuknya garis medan di permukaan logam; muatan positif yang mengalami kompensasi karenanya akan berpindah ke sisi lain (muatan total tidak berubah karena muatan induksi).

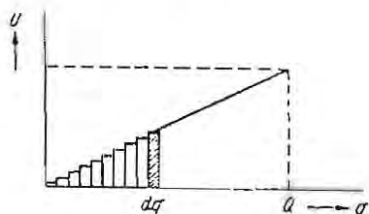


Gambar 6.27 Muatan Induksi di permukaan plat logam yang terdapat di dalam medan listrik dan adanya perubahan medan yang dipengaruhi olehnya.



Gambar 6.28 Muatan yang terdapat pada bola *a* dan *b*. padanya yang terdapat di dalam medan mengalami pergeseran akibat adanya muatan yang timbul. Dan setelah mengalami pemisahan di dalam medan, harga muatan tersebut tidak berubah, seperti di luar pengaruh medan.

Sementara itu, kuat medan di dalam logam tetap berharga nol dan potensialnya konstan. Dua logam netral yang ditempatkan di dalam medan listrik akan terpisah satu sama lain, karena pada keduanya muncul muatan induksi yang sama, tetapi berlainan tanda. Terpisahnya logam tersebut diperlukan kerja yang sama besar dengan energi potensial pada permukaan benda yang terdapat di dalam ruang tanda medan listrik (*prinsip mesin induksi*)



Gambar 6.29: Perhitungan energi pada konduktor bermuatan, yang dimuati oleh muatan Q dengan potensial U .

6.1.8 Energi Sebuah Muatan

Sebuah muatan Q pada konduktor mengalami perubahan infinitesimal sebesar dq (gambar[6.29]). Pada keadaan pertengahan, kejadian harga muatan mencapai q , yang menurut persamaan[6.23] mempunyai potensial sebesar $\nu = q/C$. Untuk melawan potensial itu agar terdapat perubahan muatan sebesar dq diperlukan kerja sebesar:

$$W = \nu dq = \frac{q dq}{C}$$

Kerja total diperoleh melalui integrasi sebagai berikut.

$$W = \int_0^Q \frac{q dq}{C} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (6.36)$$

Kerja ini disimpan sebagai energi potensial pada konduktor. Energi ini melalui persamaan[6.23] dapat dinyatakan dalam pernyataan potensial sebagai berikut.

$$W_{\text{pot}} = \frac{1}{2} C V^2. \quad (6.37)$$

Pada sebuah konduktor berbentuk bola dengan $C = 4\pi\epsilon_0 R$ terdapat energi sebesar $W_{\text{pot}} = Q^2/8\pi\epsilon_0 R$ pada muatan yang hanya terdapat di permukaan konduktor tersebut. Jika distribusi muatan yang terdapat di permukaan bola adalah homogen, energi potensial adalah $W_{\text{pot}} = \frac{3}{5} Q \frac{2}{4}$ yaitu lebih besar dari energi potensial di atas. Posisi muatan-muatan yang terdapat di permukaan satu sama lainnya saling berdekatan. Selain itu, dengan dasar energi potensial yang terdapat di dalamnya, muatan-muatan tersebut hanya akan "berupaya" ada di permukaan.

6.1.9 Medan Listrik: Pembawa Energi Elektrostatik

Dari persamaan [6.25] dan [6.37] energi yang terdapat pada sebuah kondensator bermuatan dengan potensial di antara plat U adalah

$$\begin{aligned} W_{\text{el}} &= \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S}{d} U^2 = \frac{\epsilon_0}{2} \frac{U^2}{d^2} S d \\ &= \frac{\epsilon_0}{2} E^2 V. \end{aligned} \quad (6.38)$$

dengan $E = U/d$ adalah kuat medan listrik yang terdapat di dalam ruang antara plat kondensator dan $V = Sd$ adalah volume kondensator. Relasi di atas dapat diterjemahkan sebagai berikut. Energi tersimpan "dalam" medan listrik, yaitu dengan kerapatan energi (yaitu energi yang terdapat di dalam volume yang cukup kecil dibagi dengan volumenya) adalah.

$$w_{\text{el}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (6.39)$$

Persamaan [6.39] berlaku pula untuk medan yang tidak homogen (inhomogen).

Hal itu sesuai dengan pernyataan yang dirumuskan oleh Faraday-Maxwell, yang menggambarkan sifat-sifat alamiah medan listrik. Dikatakannya bahwa medan listrik adalah pembawa energi. Sebagai perbandingan hal ini adalah analog dengan energi yang tersimpan di dalam benda yang dapat berubah bentuk (lihat §3.4.7). Dalam hal itu, tersimpannya energi dalam medan listrik tidak berarti sebagai hal yang formal melalui persamaan [6.39], melainkan energi tersebut benar-benar tersimpan atau dibawa oleh medan listrik. Hal ini nantinya akan dapat dibuktikan pada pembahasan rambatan gelombang elektromagnetik.

6.2 Dielektrika

6.2.1 Vektor Pergeseran Medan Listrik

Medan listrik mempunyai hubungan sebagai perkalian dua muatan.

1. Medan listrik ditimbulkan oleh muatan. Muatan-muatan itu dapat merupakan sumber atau penerima; dalam setiap elemen volume yang mempunyai kerapatan muatan sebesar ρ , garis-garis gaya medan listrik akan keluar dari atau masuk ke dalamnya.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (6.40)$$

2. Medan menyebabkan gaya yang bekerja pada muatan tersebut:

$$\mathbf{F} = Q\mathbf{E} \quad (6.41)$$

Relasi kedua dapat dihubungkan dengan definisi $\mathbf{E}$. Untuk lebih jelas mengamati peran serta $\mathbf{E}$, penting mendefinisikan sebuah vektor baru yaitu $\mathbf{D}$, sehingga konstanta kesebandingan pada persamaan [6.40] dapat dihilangkan. Dengan demikian, didapat:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (6.42)$$

Untuk kasus dalam vakuum berlaku

$$D = \epsilon_0 E \quad (6.43)$$

Definisi itu menunjukkan hal khusus, yaitu jika medan listrik diberikan pada benda atau materi lainnya

6.2.2 Konstanta Dielektrik

Apabila kedua permukaan plastik disapu bahan isolator, kemudian di atas bahan isolator ditempatkan plat logam paralel satu sama lainnya, dan jika kedua plat diberikan medan listrik tetap terjadi tarik menarik antara keduanya. Medan listrik yang terlindung oleh plat logam dapat menembus isolator. Bahan isolator seperti itu disebut sebagai *bahan dielektrik*.

Jika antara kondensator plat ditempatkan bahan dielektrik (seperti gelas atau plastik) dan diberi muatan, kemudian kondensator dipisahkan dari sumber tegangan, tegangan kondensator akan mengalami penurunan. Setelah plat bahan dielektrik diangkat, tegangan akan naik seperti harga semula. Pada kondensator tidak terdapat muatan yang hilang.

Pada sebuah kondensator plat ditempatkan bahan dielektrik, kemudian plat diberi tegangan sebesar U . Seandainya muatan yang terdapat di dalamnya dikeluarkan melalui *Galvanometer balistik* (lihat §7.2.6) maka muatan yang terukur pada galvanometer lebih besar dari muatan yang terdapat pada kondensator yang sama tanpa bahan dielektrik yang diberikan potensial yang sama pula.

Kedua kenyataan di atas dapat dijelaskan dengan menggunakan persamaan [6.23] sebagai berikut. Bahan dielektrik yang terdapat di antara kedua plat kondensator akan memperbesar kapasitas muatan kondensator.

Sebagai konstanta dielektrik ϵ (disingkat KD) dari bahan yang bukan bersifat konduktor dapat dinyatakan sebagai perbandingan kapasitansi kondensator yang diisi dengan bahan dielektrik terhadap kapasitansi kapasitor yang sama di vakuum.

$$\epsilon = \frac{C}{C_{vak}} \quad (6.44)$$

Berbeda dengan ϵ , ϵ tidak mempunyai satuan.

Pada kondensator plat yang sama seperti yang digambarkan di atas, terdapat penurunan medan listrik E dan potensial jika di antara plat terdapat bahan dielektrik, yaitu mengalami penurunan sebesar faktor ϵ^{-1} . Sementara itu, untuk kondensator yang berada di dalam ruang vakuum, terdapat medan listrik

Tabel 6 1: KONSTANTA DIELEKTRIK BEBERAPA MECAH BAHAN.

Bahan	Konstanta Dielektrik Dielektrik	Pada Temperatur [$^{\circ}$ C] Temp. [$^{\circ}$ C]
Gelas	5 - 10	
Sulfur	3,6 - 4,3	
Karet keras	2,5 - 3,5	
Gelas kuarsa	3,7	
Nitrobensol	37	15
Etil alkohol	25,8	20
Air	81,1	18
Minyak bumi	2,1	18
Udara	1,000576	0
Hidrogen	1,000264	0
SO ₂	1,0099	0
N ₂	1,00606	0

sebesar E_0 , sedangkan jika kondensator mengandung bahan dielektrik medan listrik menurun menjadi sebesar $\epsilon^{-1}E_0$. Berdasarkan penurunan harga potensial yang terjadi antara kondensator di vakuum di dalam medium dielektrik dapat ditentukan harga ϵ secara langsung.

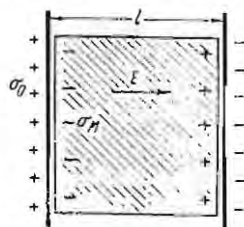
Berdasarkan §6.1.4d medan listrik yang terdapat di dalam plat datar adalah sebanding dengan kerapatan muatan permukaan yang terdapat pada plat; juga kerapatan muatan secara efektif akan menurun dengan faktor ϵ^{-1} . Muatan yang terdapat di permukaan plat tidak akan berkurang jika lapisan dielektrik disingkirkan. Oleh karena itu pada masing-masing permukaan medium dielektrik, yang terdapat di dekat plat kondensator, harus terdapat muatan permukaan yang berlawanan dari muatan pada plat logam yang menyebabkan medan listrik di dalamnya mengalami penurunan. Jika muatan yang terdapat di permukaan kondensator plat sebesar σ_0 , pada permukaan dielektrik akan terdapat muatan permukaan yang berlawanan sebesar σ_m , sehingga

$$E = \frac{1}{\epsilon} E_0 = \frac{1}{\epsilon_0} (\sigma_0 - \sigma_m)$$

atau berarti pula bahwa

$$\sigma_m = \sigma_0 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon} E = \epsilon_0 E \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon} \right) \quad (6.45)$$

Jika tebal lapisan dielektrik lebih tipis dari pada lapisan plat logam kondensator, di permukaan bahan dielektrik tersebut akan terdapat muatan yang sama seperti dinyatakan pada persamaan [6.45]; muatan tersebut menyebabkan medan yang terdapat di dalam medium dielektrik mengalami penurunan menjadi E_0/ϵ . Pada semua ruang kondensator selain itu akan



Gambar 6.30: Muatan bebas permukaan pada sebuah bahan dielektrik yang terdapat di antara kondensator plat bermuatan dan muatan ini akan berpengaruh pada harga kapasitansi kondensator.

terdapat medan listrik sebesar E_0 .

Jika lapisan bahan dielektrik cukup tebal dan di antara bahan dielektrik dan plat logam terdapat ruang di antara yang berisi udara (lihat gambar[6.30]), pada setiap permukaan bebas akan terdapat kerapatan muatan yang sama. Kerapatan muatan permukaan itu juga dapat dianggap seperti bahan dielektrik (gambar[6.30]) mengisi seluruh ruang kondensator secara kompak. Setiap elemen volume $dV = dS dl$ membawa momen listrik, harganya berdasarkan persamaan[6.29] adalah sama dengan hasil kali muatan dan jarak:

$$dp = dQ dl = \sigma_m dS dl = \sigma_m dV \quad (6.46)$$

Momen listrik itu sebenarnya adalah vektor persatuan volume yang arahnya pada *medium isotropik* searah dengan arah medan listrik. Vektor ini disebut sebagai *vektor polarisasi*. Berdasarkan persamaan[6.46] harga vektor ini adalah

$$\mathbf{P} = \frac{d\mathbf{p}}{dV}; \quad P = \sigma_m \quad (6.47)$$

Melalui persamaan[6.45] kemudian diperoleh:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \mathbf{E}_0 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon} = \epsilon_0 (\epsilon - 1) \mathbf{E} =: \epsilon_0 \chi_p \mathbf{E} \quad (6.48)$$

Konstanta bahan yang didefinisikan sebagai

$$\chi_p = \epsilon - 1 \quad (6.49)$$

(dalam sistem SI) disebut sebagai *suseptibilitas dielektrik*. Dalam sistem CGS didefinisikan $\mathbf{P} = \chi_p \mathbf{E}$, sehingga $\chi_p = (\epsilon - 1)/4\pi$.

Pada gambar[6.30] pada setiap permukaan terpisah medan listrik mengalami "lompatan". Suatu besaran yang tetap pada ruang yang berisi sepenuhnya bahan dielektrik antara kedua plat adalah tetap konstan maka

berdasarkan §6.2.1 diperoleh bahwa medan listrik E selain dikalikan dengan ϵ harus dikalikan pula dengan ω . Adanya vektor $D = \epsilon\epsilon_0 E$ berlaku pula untuk medan inhomogen yang menembus permukaan batas dua bahan dielektrik dan bahwa komponen normal vektor tersebut berharga tetap. Sementara itu komponen tangensialnya mempunyai perbandingan sesuai dengan perbandingan konstanta dielektrik (lihat pula perbandingan antara E di dalam medium dielektrik yang berbeda pada §6.1 4d).

Vektor

$$D = \epsilon_0 \epsilon E = \epsilon_0 E + P \quad (6.50)$$

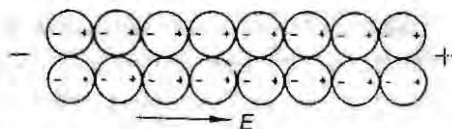
(lihat persamaan[6.48]) disebut sebagai *vektor pergeseran listrik*. Vektor ini dalam sistem SI mempunyai satuan Cm^{-2} , demikian pula dengan P .

Perbedaan antara kedua vektor E dan D memberikan pengertian tentang perbedaan antara muatan "sebenarnya" misalnya kelebihan elektron dalam logam dan muatan permukaan yang muncul hanya karena adanya vektor polarisasi di permukaan bahan dielektrik. Muatan sebenarnya berdasarkan persamaan[6.42] sebagai titik sumber atau titik akhir garis-garis medan D , di permukaan tempat muatan terdistribusi, komponen normal vektor D akan mengalami "lompatan" (diskontinu). Akan tetapi, tidak demikian halnya pada muatan induksi yang terdistribusi di permukaan dielektrik, hanya E yang mengalami lompatan (diskontinu). Hal itu sudah seharusnya terjadi. Karena adanya pengaruh gaya akibat medan E , muatan induksi mempunyai kelakuan seperti muatan sebenarnya.

Demikian pula medan E pada distribusi muatan yang ada, energi potensial antara sesama muatan, misalnya, antara partikel bermuatan yang terdapat di dalam atom-atom bahan, akan mempunyai harga lebih kecil sebesar $1/\epsilon$ dibandingkan dengan medan yang berada di vakuum.

6.2.3 Mekanisme Polarisasi Dielektrik

Penjelasan mekanisme molekuler terjadinya polarisasi muatan di dalam bahan dielektrik adalah sebagai berikut.



Gambar 6.1: Polarisasi muatan atom sebagai penyebab adanya muatan di permukaan bahan dielektrik.

a) Pergeseran Polarisasi

Muatan-muatan listrik yang membangun atom-atom bahan (inti atom dan elektron), terikat kuat satu sama lain. Suatu medan listrik hanya dapat mempengaruhi titik berat muatan-muatan tersebut tidak lagi berada pada titik yang sama sehingga sebuah atom akan menjadi *dipol*. Momen *dipol* yang terjadi adalah sebanding dengan medan yang bekerja padanya:

$$p = \alpha E \quad (6.51)$$

α disebut sebagai *polarisabilitas* sebuah atom. Hubungan itu menunjukkan bahwa muatan yang mengalami gaya $F = QE = Qp \propto x$ berada dalam keadaan terikat pada posisi kesetimbangannya. Dalam hal ini, $p = Qx$, menunjukkan bahwa gaya sebanding dengan pergeseran posisi x , sehingga dapat dikatakan analog dengan gaya elastisitas $F = Q^2x \propto x$. Energi potensial untuk gaya semacam itu adalah

$$W_{\text{pot}} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\alpha} x^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\alpha} = \frac{1}{2} pE \quad (6.52)$$

Dari gambar[6.1] muatan-muatan mengalami kompensasi ke dalam, yaitu pada kasus medan homogen. Di permukaan muncul muatan-muatan dengan cara yang sama seperti digambarkan pada gambar[6.30]. Besarnya muatan yang muncul bergantung pada harga polarisabilitas partikel dan jumlah partikel n . n momen yang mempunyai orientasi sama akibat $\propto E$ bergabung membentuk vektor polarisasi (jumlah vektor momen total dalam satu satuan volume)

$$P = n\alpha E$$

Bandingkan dengan persamaan [6.48] yang memberikan hubungan antara besaran makroskopik ϵ dan x dengan besaran mikroskopik α :

$$\alpha = \frac{1}{n}(\epsilon - 1)\epsilon_0 = \frac{1}{n} \chi_p \epsilon_0 \quad (6.52a)$$

jika n dapat dinyatakan dalam berat molekul M dan volume Mol M p yang mengandung L Molekul ($L =$ bilangan Avogadro): $n = Lp/M$ maka

$$(\epsilon - 1) \frac{M}{\rho} = \frac{1}{\epsilon_0} L \alpha \quad (6.53)$$

Hubungan ini khususnya berlaku dengan baik untuk gas. Untuk bahan yang mengandung kerapatan moleku-molekul relatif tinggi, adanya interaksi antara *dipol* sesama atom yang menyusun bahan tidak dapat diabaikan, sehingga untuk kasus ini berlaku *relasi* Clausius Mosotti

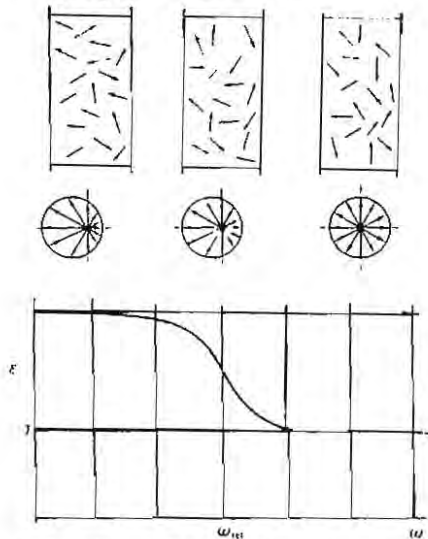
$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{1}{3} \frac{1}{\epsilon_0} L \alpha \quad (6.54)$$

untuk $\epsilon \gg 1$ persamaan [6.54] sama dengan pers [6.53].

b) Orientasi Polarisasi

Kebanyakan atom bahan telah mempunyai momen dipol tanpa pengaruh medan listrik (khususnya molekul-molekul polar seperti air, alkohol, dan berbagai asam). Gerak karena pengaruh temperatur menyebabkan *dipol-dipol* atom mengalami orientasi secara acak pada keadaan tanpa medan dan tanpa polarisasi muatan. Pemberian medan listrik pada bahan seperti itu akan menyebabkan *dipol* mengalami orientasi sebanding dengan semakin besarnya kuat medan yang diberikan dan semakin rendahnya temperatur bahan, karena gerak pengaruh panas menghalangi penyusunan arah *dipol*. Tersusunnya *dipol* sesuai dengan arah medan listrik yang diberikan memerlukan waktu. Waktu tersebut akan semakin panjang apabila medium yang terdapat di sekelilingnya *dipol* semakin *viskos*. Di dalam medan listrik harmonik berfrekuensi tinggi dapat pula terjadi bahwa

penyusunan momen *dipol* akan mengikuti sesuai arah medan (*relaksasi dipol*). Hal itu secara teknis menyebabkan kehilangan sifat dielektrik. Sebaliknya, penyusunan vektor polarisasi terjadi secara cepat, dapat mengikuti medan gelombang cahaya. Berdasarkan relasi Maxwell, indeks bias $n = \sqrt{\epsilon}$ dapat ditentukan hanya berdasarkan suku pergeseran α konstanta dielektrik (lihat §7.7.3). Indeks bias menunjukkan adanya suku pergeseran α , yaitu polarisabilitas efektif pada rumus Claussius-Mosotti persamaan[6.54] Berdasarkan evaluasi suku ini, diperoleh pernyataan bahwa suseptibilitas tegangan searah adalah



Gambar 6.32. Orientasi polarisasi elektrik: atas, susunan dipol-dipol molekuler pada tiga macam frekuensi yang berbeda. Tengah: Distribusi arah dari *dipol-dipol* (panjang tanda panah menggambarkan kemungkinan susunan yang mungkin pada arah yang bersangkutan). Bawah: Kurva relaksasi KD (konstanta dielektrik) yang dihasilkan

tetap, bergantung pada temperatur, T^{-1} . Berdasarkan teori diperoleh hubungan:

$$\chi = \epsilon - 1 = \frac{n}{\epsilon_0} \left(\alpha + \frac{p_p^2}{3kT} \right) \quad (6.55)$$

dengan pp adalah *momen dipol listrik permanen* tiap molekul, n adalah jumlah kerapatan molekul tersebut dan k adalah konstanta Boltzmann. Berdasarkan adanya ketergantungan terhadap temperatur konstanta dielektrik maka momen *dipol* molekul dapat ditentukan. Untuk molekul yang sangat polar, seperti H_2O harga momen dipol diperoleh, yaitu lebih kurang sama dengan momen *dipol* dua muatan elementer yang terpisah pada jarak atomik ($1 \text{ \AA}$) satu sama lain. Pengukuran dielektrisitas dapat memberikan sumbangan yang berguna bagi para kimiawan untuk mengetahui sifat-sifat molekul.

6.2.4 Kerapatan Energi Medan Listrik dalam Bahan Dielektrik

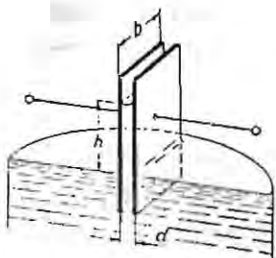
Energi $W_{el} = 1/2 C U^2$ yang terdapat pada sebuah kondensator yang diisi bahan dielektrik adalah ϵ lebih besar dibandingkan dengan kondensator yang sama, tanpa bahan dielektrik. Dengan demikian, kapasitas kondensator juga akan lebih besar dalam faktor yang sama. Demikian pula dengan pertambahan kerapatan energi persatuan volume, dibanding dengan persamaan[6.39]:

$$w_{el} = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 = \frac{1}{2} P \cdot E \quad (6.56)$$

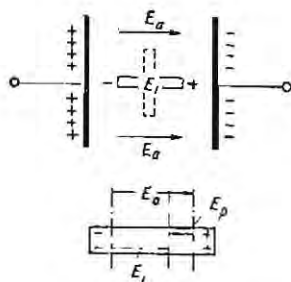
E dan D adalah medan dan pergeseran listrik di dalam bahan dielektrik. Dalam bentuk rumusan di atas persamaan[6.56] kerapatan energi elektrostatik berlaku secara umum

Dengan model persamaan[6.56] dapat dimengerti sebagai berikut. Di samping energi medan $\frac{1}{2} E^2$ di dalam bahan dielektrik terdapat pula energi total yang *dipol-dipol*, yang menyebabkan adanya vektor polarisasi $P = np$. Berdasarkan persamaan[6.52] diketahui bahwa sebuah *dipol* mempunyai energi sebesar $1/2 pE$, untuk sistem yang mengandung n *dipol* terdapat kerapatan energi sebesar $\frac{1}{2} npE = \frac{1}{2} P \cdot E = \frac{1}{2} \epsilon_0 (\epsilon - 1) E^2$ (lihat persamaan[6.48]).

Pada gambar[6.36] diilustrasikan sebuah bola kecil terbuat dari karet, tanpa muatan, mengalami tarik-menarik dengan puncak sebuah batang



Gambar 6.33: Bahan dielektrik cairan dapat naik di dalam kondensator plat yang diberikan medan listrik.



Gambar 6.34: Rotasi sebuah batang dielektrik pada arah medan listrik.

kecil terbuat dari logam yang diberi muatan. Di dalam medan listrik tidak homogen bola karet itu menjadi *dipol*. Bola tersebut, berdasarkan §6.1.6, akan bergerak ke arah puncak batang logam, di tempat medan listrik yang lebih besar. Sebaliknya, sebuah bola berisi gas di dalam cairan bersifat listrik akan bergerak menjauh dari puncak batang logam gambar[6.35]. Konstanta dielektrik gas adalah lebih kecil dari cairan yang terdapat di sekelilingnya sehingga distribusi muatan yang terdapat di permukaan bola gas akan membentuk *dipol* yang sebaliknya dibanding dengan distribusi muatan yang terdapat pada bola karet (gambar[6.36]). Dapat pula dikatakan bahwa tidak terdapatnya bahan dielektrik menyebabkan terbentuknya "anti-dipol".

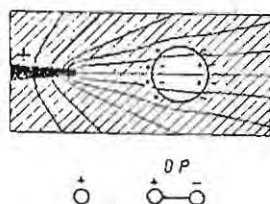
a) Elektrorestriksi

Jika suatu bahan dielektri mengalami polarisasi; timbul perubahan volume. *Dipol-dipol* yang mempunyai arah sesuai dengan medan listrik, akan mengalami tarik-menarik satu sama lain. Di sebelah kutub negatif sebuah molekul akan terdapat kutub positif molekul tetangganya. Karena adanya gaya tarik-menarik ini menyebabkan jarak antara molekul semakin dekat, sehingga terjadi kesetimbangan antara gaya elastik yang melawan gaya tarik menarik elektrostatik. Karena perubahan jarak antara molekul tersebut menyebabkan terjadinya perubahan volume. Adanya perubahan volume ini disebut sebagai *elektrorestriksi*.

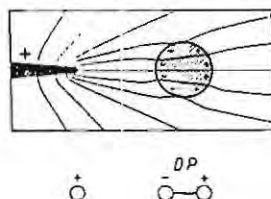
Medan listrik harmonik ²⁾ menyebabkan terjadinya deformasi yang bergetar (sebagai *pemancar gelombang ultrasonik*).

6.2.5 Polarisasi Tanpa Medan Listrik: Piezo dan Pyroelektrik

Jika sebuah kristal yang mengandung ion-ion dan mempunyai sumbu polar mengalami deformasi, kristal akan mengalami polarisasi. Di dalam kristal tersebut akan muncul momen-momen dipol atau apabila momen dipol telah ada sebelum mengalami polarisasi, momen-momen *dipol* itu



Gambar 6.35: Pengaruh gaya pada bola gas yang terdapat di dalam cairan dielektrik dengan medan listrik inhomogen. Bola gas mempunyai kelakuan seperti sebuah *dipol* yang dibentuk oleh titik muatan yang berbeda.



Gambar 6.36: Pengaruh gaya pada bola listrik (terbuat dari karet misalnya) yang terdapat di dalam medan listrik inhomogen. Bola listrik ini berkelakuan seperti sebuah *dipol* yang dibentuk oleh dua titik muatan yang berbeda.

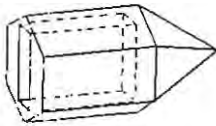
akan mengalami perubahan. Hal itu mengakibatkan di permukaan kristal terdapat muatan (*piezoelektrisitas*). Sifat seperti itu khususnya dijumpai pada kristal turmalin, kuarsa, garam seignet, dan lain-lain.

Sebuah kristal dipotong berbentuk plat yang terbuat dari kuarsa (gambar[6.37]) dan pada kedua permukaannya diberikan plat logam *A* dan *B* yang dihubungkan dengan sebuah motor listrik (gambar[6.38]). Jika kristal mengalami tarikan sesuai arah panjangnya, dapat diamati adanya perbedaan tegangan sebesar U_{piez} antara *A* dan *B*. Muatan yang

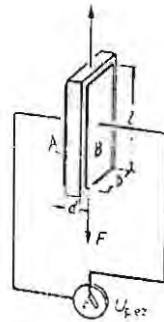
²⁾medan listrik harmonik disebut pula sebagai medan listrik bolak-balok; medan ini timbul karena potensial bola-balik.

mengalami pergeseran adalah sama dengan muatan polarisasi di permukaan kristal kuarsa yang mempunyai hubungan sebagai berikut.

$$Q = k \frac{l}{d} F \quad (6.57)$$



Gambar 6.37: Potongan sebuah kristal berbentuk plat dari kuarsa yang bersifat piezoelektrik, dipotong sesuai dengan orientasi kristal.



Gambar 6.38: Pembuktian adanya efek transversal piezoelektrik.

dengan l panjang pergeseran dan d adalah tebal plat kristal dan k adalah konstanta bahan.

Efek itu biasanya digunakan untuk pengukuran tegangan tarik atau tekanan dengan cara listrik, khususnya berguna untuk mengukur perubahan tekanan (*detonasi*).

Di samping efek transversal *piezoelektrik* itu yang arah tarikan adalah tegak lurus terhadap sumbu listrik bahan, terdapat pula efek longitudinal; pada efek longitudinal arah tarikan searah dengan arah sumbu listrik.

Kebalikan efek piezoelektrik terdapat pada perpanjangan plat kristal kuarsa dengan memberikan muatan pada suatu lapisan (pada perubahan kutub terpendek).

Jika pada lapisan diberikan tegangan bolak-balik dengan frekuensi sesuai dengan frekuensi nada dasar getaran mekanis atau frekuensi nada atas kristal kuarsa, (persamaan [4.20]), akan terjadi resonansi getaran. Kristal kuarsa yang mengalami getaran itu dapat digunakan sebagai sumber

gelombang ultrasonik dan sebagai stabilisator frekuensi untuk gerak periodik dalam teknik (lihat §4.4.1d).

Jika pada keadaan deformasi elastik pada kristal bersifat piezoelektrik dengan sumbu polar terjadi perubahan temperatur, terjadi pula regangan, terjadi pula perubahan polarisasi sehingga terdapat muatan di permukaannya (*piezoelektrisitas*). Pada kristal turmalin, misalnya, setiap adanya perubahan temperatur akan terjadi polarisasi, yang pada umumnya dapat terjadi melalui pemberian muatan luar. Selain itu, diketahui pula pada proses pemanasan turmalin di dalam vakuum dan juga melalui pendinginan dapat terjadi keadaan polarisasi yang cukup lama.

Jika dua berbeda yang sebelumnya tidak bermuatan, kemudian keduanya saling digosokkan, dalam keadaan kontak, satu sama lainnya, setelah keduanya dipisahkan akan timbul muatan pada permukaan masing-masing (*elektrisitas karena gesekan dan kontak*). Bahan-bahan tersebut dapat dikategorikan dalam deretan tegangan, yaitu bahan dapat bermuatan positif atau negatif setelah dipisahkan satu dan lainnya, bergantung bahan penggosok. Berikut adalah bahan-bahan bermuatan negatif: bulu kucing, kaki gajah, kristal batu gunung (*berg kristal*), kapas, sutera, lak, sulfur dan lain sebagainya. Gelas jika lapisan amalgamnya digosokkan dengan kulit akan bermuatan positif dan akan bermuatan negatif jika digosokkan pada bulu kucing. Aturan Coehen menyatakan bahwa bahan-bahan yang mempunyai konstanta dielektrisitas besar akan menimbulkan muatan positif jika digosokkan. Pada permukaan yang digosokkan terdapat medan listrik yang cukup kuat sehingga menyebabkan molekul-molekul di permukaannya dapat terpolarisasi (lihat §6.5.4). Bahan yang mempunyai konstanta dielektrisitas besar memberikan pengertian bahwa molekul-molekulnya dapat dengan mudah mengalami polarisasi muatan. Bahan seperti mudah memberikan elektron pada bahan lainnya (bahan yang menjadi pasangannya jika digosokkan), sehingga muatan yang tinggal hanya muatan positif. Perubahan yang terjadi di permukaan, misalnya terjadi adsorpsi gas, sangat menentukan atau mempengaruhi fenomena ini.

6.3 Arus Searah

6.3.1 Pengertian Kuat Arus

Di dalam pembahasan elektrostatis muatan dipandang sebagai partikel diam atau dianggap berada dalam keadaan setimbang; kenyataan itu benar adanya bahwa pada sebuah konduktor tidak terdapat perbedaan potensial. Akan tetapi, dalam kenyataan sehari-hari selalu dijumpai adanya perbedaan potensial pada konduktor, yaitu akibat adanya muatan yang bergerak, yang disebut *arus listrik*. Dengan pengertian bebas arus itu, akan terjadi hanya jika diberikan energi dari luar sehingga adanya muatan yang bergerak dengan cepat di dalam konduktor menyebabkan potensial dapat dianggap konstan.

Jika dalam kisaran waktu dt terdapat muatan sebanyak dQ bergerak melalui penampang lintang sebuah konduktor, misalnya melalui kawat konduktor, dikatakan pada kawat terdapat arus dengan kuat arus sebesar:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (6.58)$$

Di dalam sistem satuan elektromagnetik satuan arus dinyatakan dalam $C \text{ det}^{-1} = 1 \text{ A}$ (Ampere). Arus yang melewati konduktor adalah konstan terhadap waktu, atau disebut *arus searah* jika potensial pada konduktor tersebut, tepatnya potensial antara dua titik di konduktor adalah konstan. Sebaliknya, di dalam rangkaian listrik tertutup yang dilewati arus searah, terdapat kuat arus di semua tempat, di semua penampang lintang konduktor selalu sama. Seandainya hal ini tidak terjadi, pada suatu tempat di dalam konduktor tentu akan terjadi penumpukan atau perpindahan muatan. Seandainya terjadi seperti itu, pada bagian tersebut tentu bersifat seperti kondensator yang dapat menyimpan atau mengeluarkan muatan sehingga akan terdapat perbedaan potensial yang dapat menyebabkan adanya tumpang tindih potensial. Dengan demikian, akan terdapat arus yang berbeda.

6.3.2 Alat-alat Pengukur Arus

Alat yang dipakai untuk mengukur *kuat arus* disebut *amperemeter*; alat yang mempunyai sensitifitas terbaik disebut *galvanometer*. Peralatan yang selalu digunakan untuk mengukur kuat arus listrik adalah sebagai berikut.

α) **Galvanometer Kumpanan dan Amperemeter Kumpanan** (gambar[6.39]).

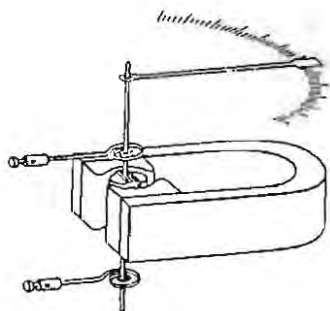
Arus yang mengalir pada kawat kumpanan mengalami momen putar karena pengaruh medan magnet permanen (lihat 7.2.6).

α) **Galvanometer Kumpanan dan Amperemeter Kumpanan** (gambar[6.39]).

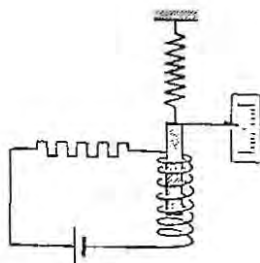
Arus yang mengalir pada kawat kumpanan mengalami momen putar karena pengaruh medan magnet permanen (lihat §7.2.6).

β) **Instrumen Mengandung Besi Lunak** (gbr[6.40] dan [6.41]).

Besi akan mengalami magnetisasi karena medan magnet yang ditimbulkan



Gambar 6.39: Amperemeter Kumpanan



Gambar 6.40: Instrumen mengandung besi lunak. Batang besi lunak yang digantungkan pada sumbu pada pengaruh medan magnet yang ditimbulkan oleh kumpanan yang dialiri arus listrik akan kembali ke kumpanan.

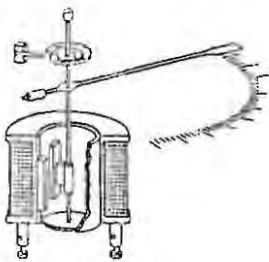
kumparan yang dialiri arus listrik, dan kemudian akan menarik besi tersebut.

λ) Amperemeter Panas

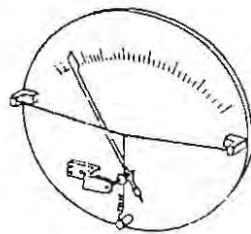
(gambar[6.42]): Kawat yang dialiri arus listrik akan mengalami pemanasan. Oleh karena itu, kawat akan mengembang dan perubahan panjangnya dikompensasikan melalui sebuah pegas dan jarum penunjuk, sehingga perubahan dapat diamati.

δ) Voltmeter

(gambar[6.43]): Dengan mengalirkan arus listrik pada potongan perak yang dicelupkan ke dalam larutan perak nitrat, perak akan mengalami pemisahan. Jumlah perak yang terpisah adalah sebanding dengan arus



Gambar 6.41. Bentuk Amperemeter besi lunak yang digunakan. Batang besi lunak yang digantungkan pada sumbunya pada pengaruh medan magnet yang ditimbulkan oleh kumparan yang dialiri arus listrik akan kembali ke kumparan.

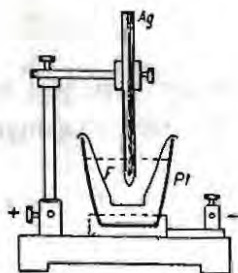


Gambar 6.42: Amperemeter melalui pemanasan.

dan waktu 1 Ampere dalam waktu 1 detik terdapat perak yang terpisah sebanyak 1,118 mg Ag (lihat §6.4.3)

Sentakan jarum pada Amperemeter besi lunak dan Amperemeter panas tidak bergantung pada arah arus, sehingga keduanya dapat dipakai untuk mengukur arus bolak-balik.

Alat yang dipakai untuk mengukur tegangan (potensial) digunakan *voltmeter* di samping elektrometer yang biasanya dipakai untuk mengukur potensial elektrostatik dan amperemeter yang telah dikalibrasi.



Gambar 6.43: Voltmeter perak. Dengan memberikan arus pada katoda perak, perak di permukaan katoda akan terlepas ke dalam larutan perak nitrat. Tabung gelas F yang terbuat dari kaca menghindari adanya anode pada voltmeter ini.

6.3.3 Hukum Ohm

Pada kawat logam terbuat dari bahan tertentu (misalnya konstantan atau mangan) dihubungkan dengan sumber tegangan U melalui penjepit, kemudian dilakukan pengukuran berikut.

1) Tegangan dibuat konstan, sedangkan semua keadaan lainnya divariasi. Diketahui bahwa

$$U \sim I \quad (6.59)$$

2) Dengan tegangan konstan, sifat-sifat kawat divariasi.

1. panjang kawat l divariasi dengan menjaga penampang lintang kawat konstan, diperoleh hubungan sebagai berikut.

$$I \sim \frac{1}{l} \quad (6.60)$$

2. luas penampang lintang S diubah dengan panjang kawat yang tetap, didapat

$$I \sim S \quad (6.61)$$

3. dengan sebuah elektrometer (lihat §6.1.5c) didapat bahwa tegangan U' pada bagian kawat homogen yang panjangnya l' adalah sebanding:

$$U' = \frac{U}{l} l'; \quad \frac{U'}{l'} = \frac{U}{l} = |E|$$

Kuat medan listrik di semua tempat di kawat adalah konstan. Oleh karena itu, selain kesebandingan $I \sim U$ dapat pula ditulis:

$$I \sim |E|$$

Untuk menggandakan kuat medan pada kawat yang sama tidak hanya diperoleh melalui penggandaan tegangan, dapat dilakukan dengan memotong kawat menjadi setengah panjang semula pada tegangan konstan maka didapat hubungan sebagai berikut.

$$I \sim \frac{U}{l}$$

Persamaan [6.59], [6.60], dan [6.61] dapat disimpulkan menjadi persamaan berikut

$$I = \frac{1}{\rho} \frac{S}{l} U \quad (6.62)$$

$\rho/l S = R$ disebut sebagai tahanan (resistansi) kawat. Dimensi tahanan adalah tegangan [kuat arus]. Satuan tahanan dalam pemakaian praktis adalah volt/A = 1 Ohm (1 Ω). *Seutas kawat mempunyai tahanan 1 Ω jika kawat tersebut diberikan tegangan sebesar 1 volt sehingga padanya*

mengalir arus listrik sebesar 1 A.

Kebanyakan p yang dinyatakan pada persamaan [6.62] bahan sangat bergantung pada temperatur, p disebut sebagai *tahanan jenis* bahan. Dimensi p adalah [tahanan].[panjang] dan satuannya adalah $\Omega \cdot m$ (dalam SI), atau $\Omega \cdot cm$ (CGS). Harga kebalikan tahanan jenis $p^{-1} = \sigma$ disebut *konduktifitas listrik* bahan. Harga tahanan jenis untuk berbagai bahan diberikan pada tabel [6.2].

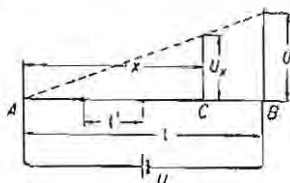
Hukum Ohm sebenarnya tidak berlaku secara umum. Semakin besar arus melewati konduktor, semakin panas konduktor tersebut yaitu karena adanya panas Joule (lihat §6.3.5). Pada kebanyakan logam tahanan akan bertambah besar dengan bertambahnya temperatur (§6.3.3b). Untuk kasus demikian, hukum Ohm yang berlaku adalah dalam bentuk diferensial yang bergantung pada arus; $R_{dif} = dU/dI$. Bentuk yang lebih rumit hubungan antara tahanan dan temperatur adalah adanya hubungan arus-tegangan, misalnya pada tabung sinar katoda, transistor atau pijar. Dalam kasus ini dapat

Tabel 6.2. TAHANAN JENIS BEBERAPA LOGAM DAN ISOLATOR PADA 18 °C.

Bahan	$p[\Omega \cdot cm]$
Perak	$0,016 \cdot 10^{-4}$
Tembaga	$0,017 \cdot 10^{-4}$
Aluminium	$0,028 \cdot 10^{-4}$
Besi	$0,098 \cdot 10^{-4}$
Air Raksa	$0,0958 \cdot 10^{-4}$
Konstantan	$0,50 \cdot 10^{-4}$
Mangan	$0,43 \cdot 10^{-4}$
Gelas Kuarsa	$5,0 \cdot 10^{18}$
Belalang	$2,0 \cdot 10^{17}$
Karet Keras	$2,0 \cdot 10^{15}$
Porselan	$= 10^{14}$
Bernstein	$> 10^{18}$

muncul *tahanan negatif* ($dU/dI < 0$).

Pada seutas kawat bertahanan dari bahan tertentu, mempunyai tebal konstan diberi tegangan U . Jika tegangan antara dua titik sembarang pada kawat diukur, diperoleh tegangan bergantung pada panjang kawat yang diukur tegangannya. Hal ini jelas, berdasarkan persamaan [6.60] bahwa tegangan akan sebanding dengan perbandingan panjang kawat x terukur terhadap panjang seluruhnya l ; $x : l$. Arus yang melewati kawat mempunyai harga yang sama di setiap tempat, yaitu I . Untuk melewatkan arus I pada



Gambar 6.44: Distribusi tegangan pada kawat homogen.

bagian kawat yang diukur tegangannya, hanya diperlukan tegangan sebesar x/l dari tegangan keseluruhan:

$$U_x = \frac{x}{l} U \quad (6.63)$$

Dapat pula dikatakan: Arus I pada setiap bagian kawat menimbulkan *penurunan tegangan* karena adanya tahanan pada kawat yang bersangkutan, berarti sebanding dengan panjang kawat:

$$U_x = I R_x$$

Dengan kenyataan itu, tegangan kawat dapat divariasikan dari 0 hingga harga maksimumnya yaitu jika pengukuran dilakukan dengan menggeser-geser salah satu ujung kawat (disebut sebagai *potensiometer* atau pembagi tegangan) atau memutar (*tahanan putar*).

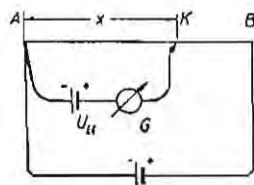
Sayangnya apa yang selalu digambarkan adalah bukan sifat-sifatnya, melainkan benda yang dialiri arus listrik sebagai tahanan (misalnya:

tahanan geser, tahanan tutup, tahanan kisi). Semua tahanan itu disebut *rheostat*. Semua rheostat dibentuk dari kawat, biasanya kawat yang terbuat dari mangan, konstantan atau nikel yang mempunyai tahanan jenis tinggi, tidak mudah berubah terhadap temperatur, dan tidak bergantung pada pembebanan. Misalkan peralatan tersebut dihubungkan dengan sumber arus melalui kawat tembaga yang tebal yang mempunyai tahanan cukup kecil dibandingkan dengan tahanan alat tersebut, maka tegangan total hanya terdapat pada alat dan hanya terdapat sedikit kesalahan.

Dengan dasar tersebut, dapat diasumsikan bahwa tegangan total pada gambar[6.44] terletak justru pada tahanan kawat. Sebaliknya terdapat tegangan yang kecil pada kawat penghubung yang terbuat dari tembaga dari akumulator (bateri) *A* dan *B*. Oleh karena itu kecilnya tahanan dapat diabaikan.

a) Pengukuran Tegangan Elemen Galvanis melalui Kompensasi (gbr[6.45]).

Tegangan sebuah kawat yang panjangnya $l = 100$ cm adalah sama dengan tegangan terukur. Kesamaan tegangan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut. Penjepit (kutub) negatif elemen kawat dan penjepit negatif akumulator (bateri) dihubungkan bersamaan dengan ujung kawat yang diukur, *A*, penjepit positif elemen dihubungkan dengan galvanometer (disebut juga *instrumen nol*) dengan sebuah kontak *K* yang dapat digeser-geser. Kontak *K* digeser-geser hingga jarum penunjuk galvanometer menunjukkan angka nol. Hal itu terjadi jika tegangan antara *A* dan *K* sama



Gambar 6.45: Pengukuran tegangan dengan metode Poggendorf, yaitu metode kompensasi.

Terakhir, berdasarkan persamaan[6.63], diperoleh

$$U_{el} = U_x = U_0 \frac{x}{l}$$

dengan U_0 adalah tegangan akumulasi (bateri) yang diketahui.

b) Ketergantungan Tahanan Jenis Spesifik terhadap Temperatur

Logam akan menjadi pengantar yang semakin jelek jika temperaturnya semakin meningkat. Pada semikonduktor hal itu adalah sebaliknya (dasar: lihat §14.3 dan 14.4). Pada daerah kisaran temperatur yang kecil hubungan ρ dan temperatur (dalam satuan $^{\circ}\text{C}$) dapat dipandang lineir sebagai berikut.

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta t)$$

α disebut sebagai *koefisien temperatur tahanan*. Pada kebanyakan logam, diketahui harga $\alpha = 1/273\text{K}^{-1}$. Seperti halnya pada tekanan gas ideal, pada p sebanding dengan temperatur absolut T (Kelvin). Biasanya $p \sim T^{3/2}$, sedangkan untuk semikonduktor diketahui kebanyakan mengikuti persamaan: $\rho \sim e^{-A/T}$ (lihat §14.3 dan 14.4).

Kebergantungan tahanan terhadap temperatur dapat dipakai untuk mengukur temperatur. *Termometer tahanan* harus mempunyai kapasitas panas yang kecil sehingga mengurangi kelembaman. Hal ini juga berguna pada temperatur sangat rendah dan tinggi (lihat *Bolometer tahanan*, §11.15).

Penghantar listrik yang baik adalah paralel dengan pengantar panas yang baik. Pada temperatur yang tidak begitu tinggi penghantar ini mengikuti hukum Wiederman-Franz

$$\frac{\text{Konduktifitas panas}}{\text{Konduktifitas listrik}} = a T \quad (6.64)$$

T adalah temperatur absolut.

Konstanta a untuk semua logam mempunyai harga yang lebih kurang sama, kira-kira sama dengan $3(k e)^2$; dengan k = konstanta Boltzmann

(lihat §5.2.2). Berdasarkan hal ini dapat disimpulkan bahwa tingginya harga konduktifitas panas dan listrik mempunyai dasar mekanisme atomik yang sama, yaitu elektron-elektron bebas yang mempunyai kontribusi pada kedua harga konduktifitas tersebut.

Superkonduktor. Pada sejumlah logam tahanan akan berharga semakin kecil pada temperatur di bawah 10 K. Hal itu bersangkutan dengan sifat superkonduktor logam.

c) Pengaruh Medan Magnet pada Harga Tahanan Jenis Spesifik
Di dalam medan magnet tahanan jenis suatu bahan pada umumnya bertambah besar. Pengaruh medan magnet itu khususnya sangat besar pada bismut; perubahan tahanan jenis bismut ini dapat dipakai untuk mengukur medan magnet. Juga titik balik superkonduktor akan semakin bergeser ke temperatur semakin rendah karena pengaruh medan magnet.

d) Efek Cahaya Internal

Daya hantar berbagai bahan, umumnya isolator yang baik. Hal itu akan meningkat jika bahan disinari cahaya pada panjang gelombang tertentu. Pada umumnya, bahan-bahan yang mempunyai konstanta dielektrisitas besar: seng, intan (*diamond*), garam batu, kalium bromida, dan lain-lain. Panas jenis spesifik modifikasi selenid melalui penyinaran dapat mencapai ratusan kali (sel selenid).

e) Kerapatan Arus

Jika dari satu posisi ke posisi lainnya dari bahan yang mempunyai sifat-sifat listrik berbeda, hukum **Ohm**, apabila masih berlaku, dapat diformulasikan dalam daerah yang kecil, misalnya pada sebuah kubus yang panjang sisinya adalah a , terletak paralel dan tegak lurus terhadap arah medan pada tempat tersebut. Jika terdapat medan listrik E , tegangan antara dua permukaan kubus adalah $U = aE$. Arus yang melewati kubus, berdasarkan persamaan [6.63] adalah $I = \sigma a^2 U / a = \sigma a^2 E$. Arus yang melewati permukaan, dibagi dengan luas permukaan disebut sebagai *kerapatan arus* j dan dalam hal ini mempunyai harga $j = I / a^2$ atau

$$j = \sigma E$$

Hubungan seperti itu seharusnya ditulis dalam bentuk vektor. Jika tidak, besarnya medan listrik seharusnya ditulis dalam bentuk akar. Kerapatan arus umumnya mempunyai arah sesuai dengan arah medan listrik, atau ditulis sebagai berikut.

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (6.65)$$

Jika arah medan membentuk sudut α terhadap elemen luas df , arus dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$I = j df \cos \alpha = \mathbf{j} \cdot d\mathbf{f}$$

Arus total yang melalui permukaan sembarang adalah

$$I = \int \mathbf{j} \cdot d\mathbf{f}$$

Apabila dinyatakan dalam kerapatan muatan ρ yang bergerak dengan kecepatan $\mathbf{v}$, kerapatan arus dinyatakan sebagai.

$$\mathbf{j} = \rho \mathbf{v} \quad (6.66)$$

Jika dalam suatu volume terdapat muatan yang keluar lebih banyak dibanding dengan muatan yang terdapat di dalamnya, kerapatan muatan tertutup akan menurun. Untuk suatu volume kecil (elemen volumen) berlaku persamaan kontinuitas muatan:

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = -\dot{\rho} \quad (6.67)$$

(lihat §3,3). Jika distribusi muatan tetap konstan, medan $\mathbf{j}$ harus bebas dari divergensi.

6.3.4 Arus Listrik dan Rangkaian

Pernyataan yang menyatakan bahwa melalui luas penampang yang sama dari sebuah bahan akan mengalir arus yang sama besar, berarti pada setiap persimpangan jumlah arus adalah sama dengan penjumlahan arus-arus yang mengalir pada persimpangan:

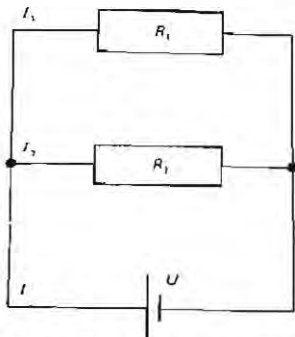
$$I = I_1 + I_2$$

Jika pada persimpangan mengalir sejumlah arus yang masuk atau keluar dan jika arus yang masuk dihitung positif dan yang keluar ditulis negatif, berlaku ketentuan.

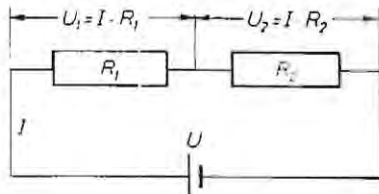
$$\sum_k I_k = 0 \quad (\text{Hukum Kirchoff I}) \quad (6.68)$$

Seperti halnya arus terdistribusi pada persimpangan suatu konduktor, maka berlaku ketentuan pada setiap ujung-ujungnya (misalnya titik *A* dan *B* pada gambar[6.45] akan mempunyai tegangan yang sama. Tegangan itu sama dengan penurunan tegangan yang terdapat pada bagian konduktor yang dialiri arus I_k dengan tahanan R_k :

$$U = I_k R_k \quad \text{atau} \quad I_k = \frac{U}{R_k}$$



Gambar 6.46: Tahanan pengganti ekuivalen: penambahan.



Gambar 6.47: Tahanan pengganti seri: tegangan total adalah penjumlahan semua tegangan pada tahanan yang bersangkutan

Arus yang mengalir adalah berbanding terbalik dengan tahananannya (hukum Kirchoff II).

Jumlah arus total menjadi:

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \\ &= U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = U \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned}$$

Bandingkan dengan $I = U/R$, bahwa tahanan efektif ditulis menjadi:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{atau} \quad \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Pada sejumlah tahanan yang dihubungkan paralel tahanan pengganti (tahanan efektif) adalah penjumlahan semua tahanan yang ada:

$$\frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad (6.69)$$

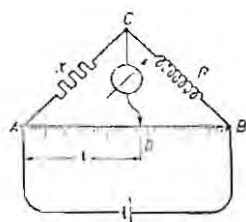
Untuk sejumlah tahanan yang dihubungkan seri satu sama lain, hukum Ohm berlaku untuk masing-masing tahanan. Dalam hal ini tegangan merupakan penjumlahan tegangan-tegangan pada masing-masing tahanan yang ada: $U = \sum_i I R_i = I \sum_i R_i$, sehingga tahanan penggantinya adalah:

$$R = \sum_i R_i \quad (6.70)$$

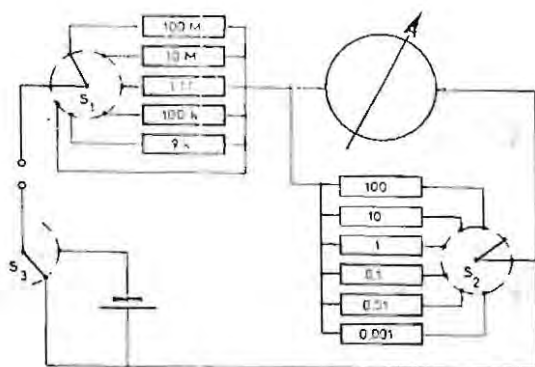
Rangkaian pengukur tahanan (seperti kembangan Wheatstone, gambar[6 48]: AB adalah kawat homogen mempunyai tahanan tertentu (kebanyakan bahan yang dipakai untuk kawat adalah konstanta) yang panjangnya L , sedangkan X adalah tahanan yang akan ditentukan besarnya; R adalah tahanan pilihan yang diketahui harganya, yaitu sebagai tahanan

pembanding. Kontak D dapat digeser-geser sepanjang kawat yang akan diukur tahanannya hingga galvanometer tidak menunjukkan adanya arus (untuk arus bolak balik seringkali digantikan dengan pendengar telepon). Oleh karena itu, antara C dan D tidak timbul tegangan. Dengan perkataan lain, penurunan tegangan yang terjadi pada X dan l adalah sama. Demikian pula pada R dan $L - l$. Juga pada R dan X mengalir arus yang sama melalui CD karena tidak adanya arus, yaitu I_1 . Melalui kawat yang diukur mengalir kuat arus I_2 . Diperoleh hubungan bahwa $I_1 X = I_2 l$, $I_1 R = I_2 (L - l)$, sehingga

$$X = R \frac{l}{R - l}$$



Gambar 6.48: Jembatan Wheatstone.



Gambar 6.49: Skematik alat pengukur tahanan, kuat arus, dan tegangan (multimeter).

6.3.5 Energi dan Daya Arus Listrik

Jika suatu muatan Q dari satu tempat berpotensi U_2 mengalir ke tempat lain berpotensi U_1 , harus terdapat energi sebesar $W = Q(U_2 - U_1) = QU$, dengan $U = U_2 - U_1$ adalah tegangan antara dua tempat yang

disebut di atas, misalnya sebagai dua titik yang dihubungkan dengan sumber tegangan (bateri). Antara kedua titik tersebut, pada saat t mengalir arus sebesar I , terdapat perpindahan muatan sebanyak $Q = I \cdot t$ maka kerja untuk memindahkan muatan tersebut adalah $W = I t U$.

Kerja yang ditimbulkan oleh arus itu dinyatakan dalam satuan elektromagnetik sebagai 1 A.det.Volt = 1 J = 1 W.det (dianggap bahwa 1 V menggantikan JC^{-1}). Istilah energi yang sering dipakai secara praktis (misalnya aliran Perusahaan Listrik Negara) adalah 1 kWh = $3,6 \cdot 10^6$ J (kWh singkatan dari *kilowatt hour* = *kilowatt jam*).

Jika aliran listrik bekerja tanpa kerja mekanik atau kimiawi, energi yang diberikan oleh sumber tegangan akan di kawat sebagai energi panas. 1 J berhubungan dengan 0,239 kalori (kal) (lihat §5.2.3). Pada arus yang melewati suatu tahanan akan dilepaskan panas sebanyak.

$$W = 0,239 \cdot I t U \text{ kalori}$$

Daya listrik dinyatakan dalam watt sebagai berikut.

$$P = IU$$

Berdasarkan hukum Ohm daya dapat pula dinyatakan dalam kombinasi U , I , dan R :

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (\text{Hukum Joule}) \quad (6.71)$$

6.4 Mekanisme Aliran Listrik

6.4.1 Pembuktian Adanya Elektrom Bebas di dalam Logam

Kelakuan alamiah pembawa arus listrik di dalam logam telah dibuktikan oleh Tolman yang melakukan percobaan berdasarkan hal berikut. Jika arus listrik melalui logam yang dibawa oleh partikel bermuatan

e dan bermassa m , dengan muatan spesifik e/m , muatan tersebut haruslah bergerak dengan percepatan a di dalam logam, yaitu di antara ion-ion kisi logam yang tidak ikut dipercepat. Gerak partikel-partikel tersebut akan mengalami perlambatan karena adanya *kelembaman* dan apabila dipandang ion-ion logam sebagai acuan, partikel-partikel tersebut bergerak dipercepat pada arah berlawanan terhadap ion-ion tersebut karena gaya *kelembanannya*. Gaya tersebut kira-kira sama dengan gaya yang dialami seorang penumpang mobil yang bergerak dipercepat, kemudian tiba-tiba direm. Elektron-elektron bermuatan terhadap ion-ion yang "tertinggal" di dalam logam. Terlepasnya elektron sebagai partikel pembawa muatan dari atom-atom logam adalah analog dengan kasus yang terjadi pada kondensator plat yang diberi medan listrik E , yang diketahui tidak akan terjadi penumpukan muatan pada akhirnya. Keseimbangan akan terjadi jika gaya elektrostatis dan gaya kelembaman sama dan saling berlawanan arah, yaitu: $-eE = ma$ sehingga di dalam konduktor terdapat medan listrik sebesar:

$$E = -\frac{c}{m} E \quad (6.72)$$

Persamaan ini berlaku seperti halnya sebuah elektron yang mengalami gaya sentrifugal, atau dengan perkataan lain elektron bergerak dipercepat. Untuk membuktikan kelakuan elektron tersebut, Tolman membuat percobaan dengan memutar sebatang logam sangat cepat. Berdasarkan persamaan [6.72] kemudian Tolman berhasil menentukan harga $e/m = 2.10^{11} \text{ Ckg}^{-1}$. Harga e/m ini ternyata mendekati harga e/m di dalam vakuum (lihat persamaan [8.16]).

Dengan pembuktian melalui percobaan di atas dapat diketahui bahwa atom-atom logam yang dalam fase gas sebagai atom netral akan kehilangan elektron yang terpisah dari atom logam tersebut tidak lagi milik masing-masing atom logam, melainkan milik seluruh *sistem yang mengalami kondensasi*³⁾. Elektron-elektron ini tidak dapat meninggalkan logam dengan mudah, karena untuk itu harus terdapat energi yang cukup besar atau

³⁾ Sistem

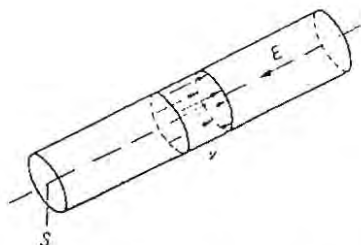
disebut sebagai "energi yang diperlukan elektron untuk keluar dari logam" (lihat 8.1.1). Di dalam logam, elektron-elektron tersebut bergerak persis atom-atom gas yang terdapat di dalam bejana (lihat pembahasan tentang gas elektron pada §14.3.2). Akan tetapi, gas elektron ini tidak lagi mengikuti kaidah mekanika klasik, melainkan kaidah-kaidah *mekanika kuantum*. Kerapatan elektron n dari satu logam dengan logam lainnya adalah berbeda. Akan tetapi, rata-rata akan mempunyai harga dalam orde yang sama untuk jumlah elektron bebas per atom. Karena jarak antaratom, di dalam logam lebih kurang dalam orde $1 \text{ \AA}$, harga $n = 1 \text{ \AA}^{-3} = 10^{23} \text{ cm}^{-3}$.

6.4.2 Pengertian Teoretik Aliran Listrik di dalam Logam

Arus listrik di dalam logam terjadi karena adanya elektron-elektron sebagai pembawa muatan, yang bergerak dalam pengaruh medan listrik. n elektron/cm³ yang mempunyai kecepatan rata-rata adalah v bergerak searah dengan medan listrik dan jumlah elektron yang lewat dalam satu satuan luas penampang lintang logam setiap detiknya adalah $nve \text{ C/cm}^2 \cdot \text{det}$ (lihat gbr[6.50]). Jumlah muatan elektron per $\text{C/cm}^2 \cdot \text{det}$ adalah sama dengan kerapatan arus j seperti yang dibicarakan pada §6.3.3, atau

$$J = -nev \quad (6.73)$$

Berdasarkan hukum Ohm, kerapatan arus sebanding dengan medan listrik $j = \sigma E$. Seandainya elektron-elektron yang terdapat di dalam logam



Gambar 6.50: Aliran elektron di dalam logam.

bergerak secara bebas, akan dipercepat dengan percepatan $a = e/mE$, sehingga elektron-elektron tersebut akan mempunyai kecepatan sebesar $v = e/mEt$ yaitu pada saat t setelah medan dihidupkan. Hal itu terjadi seandainya elektron-elektron tersebut terdapat di dalam vakuum. Akan tetapi, tidak untuk elektron yang terdapat di dalam logam.

Hukum **Ohm** menyatakan bahwa v hanya bergantung pada E , tidak bergantung pada waktu t , yaitu:

$$v = \mu E \quad (6.73a)$$

μ disebut sebagai *mobilitas elektron*. Dimensi mobilitas adalah menurut satuan $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{det}$. Konduktifitas σ berdasarkan persamaan [6.73] dan [6.73a] adalah

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \frac{j}{E} = en\mu \quad (6.74)$$

Bahwa elektron-elektron logam di dalam medan listrik bergerak beraturan, selain bergerak dipercepat, juga terletak hanya jika terdapat gaya gesek F_R yang berlawanan arah dengan gaya $-eE$ dan keduanya saling berada dalam keadaan setimbang, yaitu apabila gerak elektron dalam waktu yang amat singkat, setelah diberikan medan listrik, diabaikan. F_R haruslah sebanding dengan kecepatan v dan E berdasarkan hukum Ohm pada persamaan [6.73a]. Kesebandingan F_R dan v misalnya terdapat pada gerak sebuah benda di dalam larutan *viskos* (hukum Stoke, lihat §3.3.3). Dasar-dasar bagaimana elektron mengikuti hukum tersebut akan dijelaskan pada §14.3.1 nantinya.

Mobilitas dan kecepatan elektron logam dapat ditentukan dengan mudah secara empiris. Sebagai contoh, tembaga (Cu) dengan anggapan bahwa setiap atom dapat membebaskan 1 elektron maka diperoleh hubungan

$$\begin{aligned} n &= \frac{\text{Konstanta Avogadro}}{\text{Volume Mol}} \text{ cm}^{-3} \\ &= \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{63,6/8,9} = 8,43 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

Tahanan jenis tembaga dapat diukur sebesar $\rho_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-6} \Omega$. Mobilitas Cu menjadi:

$$\mu = \frac{1}{ne\rho} = 43 \frac{\text{cm}^3}{\Omega \text{C}} = 43 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{det}}$$

Pada kerapatan arus tertentu (maksimum berharga kira-kira beberapa A/mm²) dan medan listrik yang diberikan sebesar 100 A/cm², elektron akan bergerak dengan 0,04 mm/det. Kecepatan rambatan gelombang pemancar radio tidak terlepas dari kecepatan gerak elektron di dalam logam, melainkan juga dari kecepatan rambat medan listrik dan di sekitar kawat logam yang akan dibahas nanti (§7.7.8). Hal itu ternyata sama dengan kecepatan cahaya.

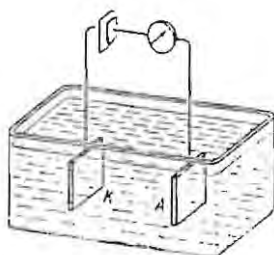
6.4.3 Elektrolisa

Di dalam sebuah bejana berisi air destilasi terendam dua buah elektroda yang terbuat dari Platina atau Nikel. Kedua elektroda tersebut, melalui penjepit dihubungkan dengan sebuah sumber tegangan dan lampu pijar atau amperemeter (gambar[6.51]). Air suling adalah penghantar listrik yang jelek. Akan tetapi, jika air ditambahkan dengan setetes asam sulfat, amperemeter akan menunjukkan adanya arus atau lampu pijar akan menyala. Adanya arus listrik melalui larutan dapat dibuktikan dengan mengukur adanya kenaikan temperatur (penambahan panas) atau secara magnetis.

Berbeda dengan aliran arus di dalam konduktor, dalam hal ini arus muncul karena adanya senyawa kimia yang terurai. Apabila baik pada *anoda A*, sebagai kutub positif atau elektroda positif, diberikan tegangan, maupun pada *katoda K* (kutub negatif), pada keduanya akan terdapat gas masing-masing gas hidrogen dan oksigen. Jika di dalam bejana diberikan larutan CuSO₄ dalam air, pada katoda akan terakumulasi logam Cu.

Bahan atau zat yang larutannya dapat menghantarkan arus listrik disebut sebagai *zat elektrolit*. Secara kimia larutan-larutan itu merupakan larutan garam, asam, atau basa. Proses penguraian atau akumulasi yang

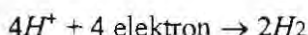
terjadi di elektroda melalui arus listrik disebut sebagai peristiwa *elektrolisa* atau disebut pula sebagai *akumulasi galvanis*.



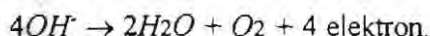
Gambar 6.51 Aliran arus melalui larutan elektrolit.

Larutan elektrolit adalah senyawa *heteropolar*, yang dibentuk oleh atom-atom bermuatan atau *radikal* dan disebut *ion-ion*. Misalnya, CuSO_4 kristal dibentuk oleh ion-ion Cu^{++} dan SO_4^{--} . Dengan melarutkan kristal tersebut ke dalam air, akan terbentuk ion-ion Cu^{++} dan SO_4^{--} yang dipisahkan oleh molekul air. Ion-ion itu terselubung oleh molekul-molekul air yang membentuk dipol listrik dan mengalami *hidrasi*. Adanya *dipol-dipol* molekul air maka energi yang tersedia cukup untuk dapat memisahkan ion-ion dari kristalnya. Ion-ion itu di dalam larutan bebas bergerak hingga terjadi kesetimbangan dengan gaya elektrostatis karena adanya gaya gesek. Medan listrik menggiring ion-ion positif (*kation*) ke katoda, sedangkan ion-ion negatif (*anion*) ke anoda. Kation-kation tersebut berupa ion-ion bermuatan positif yang berasal dari logam (ion logam) seperti NH_4^+ , H^+ dan anion adalah ion-ion sisa asam atau OH^- (sebenarnya kation-kation ini dapat berbentuk kompleks seperti H_3O^+ selain H^+). Elektroda dapat menetralkan ion-ion. Kation mengambil elektron, sedangkan anion memberikan elektron. Dengan demikian, sifat kimia H^+ , misalnya akan berubah menjadi molekul H_2 , yang muncul sebagai gas. Logam-logam yang mempunyai ion lebih ringan akan tetap tinggal di dalam larutan sebagai ion H^+ dan akan terakumulasi di elektroda. Ion-ion logam yang dapat terhidrasi kuat, khususnya ion-ion alkali, mempunyai

kecenderungan sebagai larutan kuat dibandingkan dengan ion-ion H^+ . Oleh karena itu, pada katoda akan terakumulasi ion H^+ , seperti halnya ion H^+ yang selalu terdapat pada disosiasi H_2O . Elektrolisa larutan KOH , misalnya pada katoda terdapat ion sebagai berikut.



pada anoda terdapat oksigen:



Konsentrasi larutan alkali tersebut tidak mengalami perubahan, yang mengalami penguraian hanya air.

Hasil kimiawi elektrolisa bergantung pada sifat kimia elektroda. Elektrolisa larutan $CuSO_4$ dengan menggunakan elektroda Cu , menyebabkan katode menjadi semakin berat karena penimbunan ion-ion Cu , seperti yang terjadi pada elektroda platina. Akan tetapi, ion-ion SO_4^- berlaku lain, tidak seperti pada platina, karena Cu berasal dari anoda. $CuSO_4$ kembali ke larutan sehingga konsentrasinya tidak berubah. Secara efektif yang terjadi hanya perpindahan Cu dari anoda ke katoda. Tidak bergantung pada mekanisme kimia. Kandungan kuantitatif antara jumlah massa satu yang mengalami penguraian dan "muatan" yang dipindahkan dapat dijelaskan melalui hukum Faraday berikut

1. Massa zat yang diuraikan m sebanding dengan muatan $Q = I.t$ yang dipindahkan:

$$m = A \cdot I \cdot t \quad (6.75)$$

A disebut sebagai *ekuivalen elektrokimia*, yaitu berapa gram ion dapat diuraikan sebanyak 1 C.

2. Ekuivalen elektrokimia mengandung pengertian sama dengan berat ekuivalen suatu zat.

$$\text{Berat ekuivalen} = \frac{\text{Berat atom (BA)}}{\text{Valensi}}$$

1 gram ekuivalen mengandung sebanyak gram berat ekuivalennya, misalnya Cu: $BA_{Cu}=63,6$ dan valensinya adalah 2, sehingga 1 gram ekuivalen Cu adalah sama dengan 31,8g. Ekuivalen elektrokimia untuk platina (Ag) adalah $A_{Ag} = 1,118 \cdot 10^{-3} \text{ g/C}$; untuk Cu $A_{Cu} = 9,329 \cdot 10^{-3} \text{ g/C}$.

Untuk memisahkan satu gram ekuivalen diperlukan jumlah muatan yang sama. Hal itu tidak bergantung pada jenis bahan yang dipakai, yaitu $107,9/A_{Ag}=A_{Cu}$ atau

$$F = 96486,7 \pm 0,5 \text{ C/gram ekuivalen} \quad (6.76)$$

F disebut konstanta Faraday.

Hubungan di atas berlaku untuk pengukuran absolut muatan. Satuan Coulomb pada relasi di atas menyatakan jumlah muatan yang ditimbulkan oleh larutan $AgNO_3$ di dalam air sehingga terurai sebanyak 1,1180 g Ag yang dilakukan dengan percobaan yang sangat teliti (lihat §6.3.2).

Kedua hukum Faraday di atas diturunkan dengan anggapan bahwa masing-masing ion membawa sejumlah muatan elementer, sesuai dengan bilangan atom Z . $L = 6,0222 \cdot 10^{23} \text{ Mol}^{-1}$ sebagai konstanta Avogadro sama dengan jumlah ion yang terdapat di dalam 1 gram atom. Oleh karena itu, terdapat muatan sebanyak ZeL . 1 Gram ekuivalen hanya mengandung $1/Z$ dari jumlah muatan tersebut. Berdasarkan definisi maka konstanta Faraday dapat ditulis menjadi:

$$F = eL \quad (6.77)$$

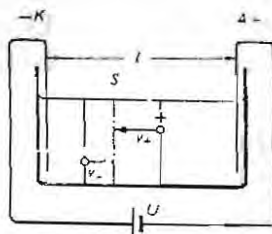
Dengan demikian, harga muatan satu partikel elementer didapat sebesar:

$$e = \frac{F}{L} = (1,602192 \pm 0,000007) \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (6.78)$$

6.4.4 Konduktifitas larutan Elektrolit

Antara dua plat paralel yang dicelupkan di dalam larutan (gambar[6.52]) terdapat medan listrik homogen $E = U/L$. Pada ion yang

mempunyai harga Z terdapat gaya sebesar $F = ZeE = ZeUL$. Seperti halnya di dalam logam, di dalam larutan partikel-partikel tidak mengalami



Gambar 6.52: Perhitungan kuat arus listrik dalam larutan elektrolit biner.

percepatan melainkan akan mengalami gerak beraturan. Dalam hal itu terdapat pula gaya gesek F_R yang sebanding dengan kecepatan. Ion-ion tersebut akan berpindah dengan cepat dan bahwa $F = F_R$. Kecepatan ion-ion tersebut sebanding dengan medan listrik masing-masing untuk:

$$\text{Kation } v_+ = \mu_+ E,$$

$$\text{Anion } v_- = \mu_- E$$

μ_+ dan μ_- adalah mobilitas masing-masing ion. Pada umumnya, keduanya didefinisikan sebagai besaran positif, juga berlaku untuk Anion yang bergerak berlawanan arah dengan arah medan listrik sehingga kecepatan v_- harus mempunyai tanda negatif.

Jika kerapatan partikel-partikel yang terdiri atas kation dan anion masing-masing adalah n_+ dan n_- , terdapat kerapatan arus masing-masing sebesar:

$$\text{Kation: } j_+ = Z_+ e v_+ n_+ = Z_+ \mu_+ E n_+,$$

$$\text{Anion: } j_- = Z_- e v_- n_- = Z_- \mu_- E n_-.$$

Kedua macam ion tersebut menyumbangkan harga kerapatan arus positif:

arus yang bergerak pada arah berlawanan anion negatif diberi tanda positif. Kerapatan arus total menjadi:

$$\mathbf{j}_+ + \mathbf{j}_- = e(Z_+ \mathbf{v}_+ n_+ + Z_- \mathbf{v}_- n_-) \mathbf{E} \quad (6.79)$$

Oleh karena itu, konduktifitas larutan elektrolit diperoleh sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{j}{E} = e(Z_+ \mathbf{v}_+ n_+ + Z_- \mathbf{v}_- n_-) \quad (6.80)$$

Pada plat dengan luas penampang lintang S terdapat arus total sebesar:

$$I = \mathbf{j} \cdot \mathbf{S} = Se(Z_+ \mathbf{v}_+ n_+ + Z_- \mathbf{v}_- n_-) \frac{l}{L} \quad (6.81)$$

Tahanan larutan elektrolit harus diukur dengan tegangan bolak-balik, karena jika menggunakan tegangan searah elektron-elektron akan mengalami "polarisasi", sesuai dengan perubahan medan listrik. Tabel[6.3] memberikan beberapa harga besaran-besaran yang terukur untuk larutan NaCl. Dari tabel[6.3] terlihat bahwa pada konsentrasi kecil konduktifitas NaCl sebanding dengan konsentrasinya. Dalam keadaan demikian, berhubungan dengan asumsi bahwa semua ion-ion NaCl mengalami disosiasi. Pada setiap konsentrasi c Mol/cm³ terdapat $n = Lc$ ion untuk setiap tanda (positif dan negatif) dalam cm³;

Tabel 6.3: TAHAPAN JENIS SPESIFIK LARUTAN NaCl PADA KONSTRASI BERBEDA-BESA (18°C)

Konsentrasi [Mol/cm ³]	ρ $\Omega \cdot \text{cm}$
10^{-7}	93000
10^{-6}	9400
10^{-5}	980
10^{-4}	109
10^{-3}	13,5

misalnya konsentrasi NaCl adalah $c = 10^{-7}$ Mol/cm³, $n = 10^{16}$. Dengan demikian, dari persamaan [6.80] terdapat

$$\begin{aligned} \rho_+ + \rho_- &= \frac{\sigma}{n_-} = \frac{1}{\rho n} \\ &= 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{det} \end{aligned}$$

Dari pengukuran tahanan hanya didapat penjumlahan mobilitas ($\mu_- + \mu_+$). Harganya, seperti yang dinyatakan pada §6.4.2, sekitar 10^{-4} , yaitu mobilitas elektron di dalam logam.

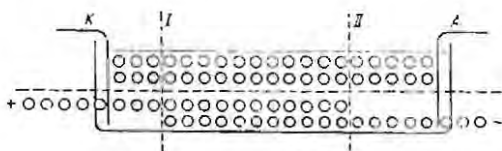
Untuk mencari mobilitas masing-masing ion diperlukan relasi lain yang tidak bergantung pada relasi di atas, misalnya mencari relasi penurunan jumlah elektrolit yang larut selama arus diberikan. Dengan catatan tentunya, kedua macam ion terpisah pada kedua elektroda.

Dibayangkan bahwa kation dan anion tersusun secara teratur pada saat keduanya menuju ke masing-masing elektroda (gambar [6.53]). Di dalam kenyataannya, tentu tidak terdapat susunan seperti itu. Dengan

asumsi di atas secara prinsip tidak mengubah peristiwa sebenarnya yang terjadi. Arus mengalir hingga lima ion pada rantai kation bergeser ke kiri dan tiga ion pada rantai anion bergerak ke kanan, sehingga diperoleh perbandingan mobilitas kation dan anion adalah $\mu_+ + \mu_- = 3/5$. Ion-ion yang digambarkan di atas telah mengalami pemisahan. Gambaran pada gambar[6.53] bawah tidak mungkin terjadi karena pembawa muatan yang bergerak dari I ke II tidak mempunyai pasangan. Keadaan demikian akan menyebabkan terdapatnya medan listrik yang sangat besar, yang serta merta akan terakumulasi pada elektroda. Tiga anion akan bergerak menuju ke katoda, sehingga kehilangan tiga anion, atau dengan perkataan lain di daerah di depan katoda, larutan akan kehilangan tiga molekul. Dengan demikian diperoleh hubungan sebagai berikut.

$$\frac{\text{penurunan jml. molekul di sekitar Katoda}}{\text{penurunan jml. molekul di sekitar Anoda}} = \frac{\mu_+}{\mu_-}$$

Di bagian kiri terdapat perbandingan massa yang "menghilang" atau penurunan konsentrasi Δc_K dan Δc_A di muka elektroda. Perubahan konsentrasi itu dapat diukur, yaitu jika melalui dinding penyekat *porosif*



Gambar 6.53 Perubahan konsentrasi di sekitar elektroda yang bergantung pada kecepatan perpindahan ion-ion.

untuk menghindari campuran ketiga macam daerah tersebut. Bilangan:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta c_K}{\Delta c_A + \Delta c_K} &= \frac{\mu_-}{\mu_+ + \mu_-} = \nu_- \\ \frac{\Delta c_A}{\Delta c_A + \Delta c_K} &= \frac{\mu_+}{\mu_+ + \mu_-} = \nu_+ \end{aligned} \quad (6.82)$$

disebut *bilangan Hittorf* dari anion dan kation. Besarnya $v_+ \div v_- = 1$. Bilangan ini memberikan informasi sumbangan masing-masing ion pada arus total. Penentuan bilangan Hittorf sebagai relasi kedua untuk mencari harga μ_+ dan μ_- . Penentuan harga mobilitas suatu ion umumnya adalah tidak bergantung kaitannya dengan asal ion yang bersangkutan. Pada tabel[6.4] diberikan beberapa harga mobilitas dari berbagai kation dan anion.

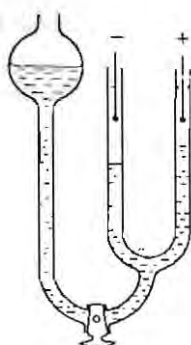
Kecepatan perpindahan ion-ion berwarna kuat seperti MnO_4^- dapat diamati secara langsung yaitu dengan cara: di dalam pipa berbentuk U (gambar[6.54] ke dalam larutan KNO_3 ditambahkan larutan KMnO_4 perlahan-lahan dengan sangat hati-hati, sehingga akan terbentuk lapisan batas antara kedua larutan. Sementara terjadi aliran, permukaan lapisan akan bergerak ke kaki sebelah pipa U terus ke atas, sedangkan pada kaki kiri bergerak ke bawah.

Konduktifitas Ekuivalen

Untuk larutan elektrolit berkonsentrasi tinggi berlaku hukum yang lebih kompleks, seperti ditunjukkan pada percobaan berikut. Di dalam sebuah bejana penampang lintang empat persegi terdapat larutan KCl berkonsentrasi tinggi (lihat gambar[6.55]). Elektroda terbuat dari plat platina yang menutup penuh seluruh luas sisi bejana. Dengan memberikan tegangan, pada amperemeter A mengalir arus yang dapat dibaca secara langsung. Jika ke dalamnya disiramkan air destilasi, arus pada amperemeter akan meningkat. Hal itu tentu saja mengagetkan kita. Dengan mengencerkan larutan jumlah KCl yang terdapat di antara elektroda tentunya tidak mengalami perubahan. Dalam hal itu, tentunya kerapatan partikel n akan menurun, sedangkan luas penampang lintang larutan S akan meningkat, yaitu bahwa hasil kali nS adalah konstan. Dalam hal itu, medan listrik yang terdapat di dalam larutan juga tetap tidak mengalami perubahan. Karena nSu tetap konstan, arus yang dinyatakan pada pers[6.81] tetap konstan. Dengan perkataan lain, konduktifitas listrik σ larutan haruslah mempunyai harga setengah karena pengenceran. Perbandingan σ n mempunyai harga tetap konstan.

Tabel 6.4: MOBILITAS ION BERBAGAI LUTURAN DALAM AIR PADA SUHU 18°C DAN PADA PENGENCERAN TAKBERHINGGA

	Zat Terlarut	μ $10^{-4} [\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{det}]$
Kation	H	33
	Li	3,5
	Na	4,6
	K	6,75
	Ag	5,7
	NH ₄	6,7
	Zn	4,8
	Fe	4,8
Anion	OH	18,2
	Cl	6,85
	Br	7,0
	J	6,95
	NO ₃	6,5
	MnO ₄	5,6
	SO ₄	7,1
	CO ₃	6,2



Gambar 6.54 Pengukuran mobilitas ion MnO_4^- .

Selain kerapatan ion n , kebanyakan para ahli kimia sering menentukan harga *molaritas* n dari larutan, yaitu jumlah gram ekuivalen dibagi oleh volume dalam liter, atau

$$\eta = \frac{1000 n}{L}$$

$A = \sigma/n$ disebut *konduktifitas ekuivalen*. Harga konduktifitas itu haruslah tidak bergantung pada konsentrasi, seperti halnya harga σ/n (lihat tabel[6.5]).

Terdapat dua kemungkinan untuk pertambahan harga A , yaitu:

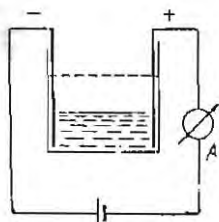
1. Pada larutan berkonsentrasi tinggi tidak semua molekul akan terurai menjadi ion. *Derajat dissosiasi*.

$$\alpha = \frac{\text{Jumlah ion dari molekul yang mengalami penguraian}}{\text{Jumlah total molekul terlarut}}$$

yang menurut *hukum efektifitas massa* akan bertambah karena pengenceran. Untuk larutan elektrolit yang mempunyai valensi $1^- - 1^+$ seperti KCl tersebut, konsentrasi ion dan molekul yang mengalami

Tabel 6.5. KONDUKTIFITAS EKVIVALEN KCL DAN CH₃COOH.

Molaritas [Mol.l ⁻¹]	KCl (18°C)	CH ₃ COOH (25°C)
1	0,0982	0,00146
10 ⁻¹	0,112	0,00515
10 ⁻²	0,123	0,0166
10 ⁻³	0,127	0,049
10 ⁻⁴	0,129	0,166
10 ⁻⁵	0,130	0,388



Gambar 6.5.6 Adanya kenaikan arus listrik pada pengenceran larutan elektrolit tanpa penambahan larutan elektrolit (penjelasan pengertian konduktifitas ekuivalen).

dissosiasi adalah:

$$\frac{[K]^+ [Cl]^-}{[KCl]}$$

$[K]^+ = [Cl]^-$ dan $[K]^+ + [KCl] = c$ yaitu konsentrasi larutan elektrolit seluruhnya maka derajat dissosiasi adalah:

$$\alpha = \frac{\lambda}{2c} \left(\sqrt{1 + \frac{4c}{\lambda}} \right) \quad (6.83)$$

(Hukum pengenceran Oswald)

Pengertian ini berlaku untuk elektrolit lemah.

2 Elektrolit kuat seperti KCl dengan konsentrasi tinggi yang mengalami dissosiasi sempurna ($\alpha = 1$). Persamaan [6.79] tetap dapat diartikan berhubungan bahwa ketergantungan Λ terhadap konsentrasi hanya pada mobilitas ion. Harganya akan meningkat dengan pertambahan konsentrasi. Teori Debye-Hueckel, dan Onsager menjelaskan bahwa di dalam larutan elektrolit, ion-ion terdistribusi secara tidak beraturan. Di dekat ion negatif akan terdapat lebih banyak ion-ion positif dibandingkan dengan pada tempat selain itu, demikian pula sebaliknya. Setiap ion akan dikelilingi oleh awan ion-ion berlawanan. Jika sebuah ion harus berpindah tempat, awan ion berlawanan yang berada didekatnya akan ikut serta dengannya karena dari bentuk bangunnya diperlukan waktu relaksasi. Awan ion yang berlawanan akan membentuk medan perintang yang semakin besar jika awan ion tersebut semakin rapat berarti pula semakin besar jika konsentrasi dan keadaan keteraturan, semakin kecil temperatur. Pada kasus pengenceran "tak berhingga", ion hanya dipengaruhi oleh medan luar semata dan dalam keadaan ini harga mobilitas mencapai harga tertinggi. Apabila temperatur semakin tinggi, awan ion berlawanan akan semakin "melunak", kebalikan dengan logam, pada temperatur tinggi, larutan elektrolit akan menghantarkan listrik semakin baik. Selain itu, pada temperatur tinggi, viskositas larutan akan menurun.

6.4.5 Awan Elektron: Potensial Kimia

Bagaimana partikel-partikel bermuatan tersusun di dalam medan listrik? Pandang suatu bahan yang hanya mengandung partikel-partikel pembawa muatan (misalnya logam, semikonduktor). Misalkan, bahan ini

pada permukaan kondensator dilapisi plat (lihat gambar[6.56]). Hingga di sini diasumsikan bahwa elektron-elektron akan mengikuti medan sedemikian rupa sehingga bagian lainnya akan melawan medan. Seandainya hal itu menyebabkan terjadinya lompatan konsentrasi elektron di belakang permukaan plat tersebut, akan terdapat arus difusi yang amat besar menurut persamaan[5 40] (lihat buku I Mekanika dan Termodinamika).

Elektron-elektron tersebut terdapat pada satu lapisan cukup *berhingga* yang masih dapat ditembus medan listrik dari arah kiri. Medan yang melemah ini dapat menimbulkan arus. Akan tetapi, terdapat pula arus difusi karena perbedaan konsentrasi yang berlainan arah dengan arus karena medan tersebut. Kesetimbangan akan terjadi apabila kedua arus tersebut akan saling berkompensasi. Terjadinya distribusi kesetimbangan juga akibat adanya kesamaan kerapatan arus karena medan dan difusi

$$j_{\text{medan}} = e\mu En = j_{\text{difusi}} = eD \frac{dn}{dx} \quad (6.84)$$

Jika kedua ruas persamaan[6 84] dibagi oleh n dan menggunakan relasi Einstein untuk hubungan antara mobilitas μ dan koefisien difusi D , $\mu = eD/kT$ (lihat persamaan[5 32], diperoleh:

$$eE = e \frac{dU}{dx} = kT \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} = kT \frac{d \ln n}{dx}$$

atau jika diintegrasikan akan menjadi

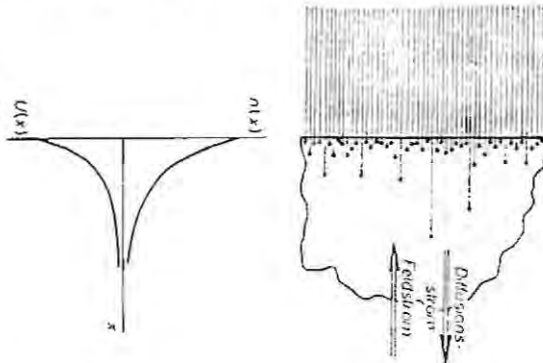
$$U + \frac{kT}{e} \ln n = \text{konstan} \quad (6.85)$$

$U + kTe^{-1} \ln n$ disebut *potensial elektrokimia* elektron. Pada keadaan *setimbang (tanpa arus)* harga *potensial elektrokimia* sama.

Rumusan di atas menjadi dasar pemikiran dalam berbagai disiplin seperti fisika semikonduktor, elektrokimia, dan fisiologi membran. Persamaan itu pada dasarnya merupakan polesan lebih jauh distribusi Boltzmann yang dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada suatu tempat

berpotensi U elektron akan mempunyai energi potensial sebesar $-eU$ maka konsentrasi elektron pada keadaan setimbang adalah n

Distribusi potensial turut ditentukan oleh distribusi elektron. Muatan akan menggeser garis-garis medan sesuai dengan persamaan



Gambar 6.56 Distribusi elektron di dalam medan listrik terdapat kesetimbangan antar arus karena medan dan arus difusi. Bawah Hasil distribusi kerapatan partikel dan potensial.

Poisson

$$-\frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = \frac{1}{\epsilon \epsilon_0 e n}$$

Terdapat sedikit kelebihan elektron untuk dapat menggeser garis-garis medan. Konsentrasi elektron n pada setiap tempat juga mempunyai harga yang sama dengan harga konsentrasi elektron yang konstan n_∞ untuk keadaan bahan yang tidak mengalami gangguan ditambah dengan kelebihan sedikit elektron n_1 . Dengan membuat deret persamaan [6 85]

$$\begin{aligned} \ln n &= \ln (n_\infty + n_1) = \ln \left[n_\infty \left(1 + \frac{n_1}{n_\infty} \right) \right] \\ &= \ln n_\infty + \ln \left(1 + \frac{n_1}{n_\infty} \right) \\ &\approx \ln n_\infty + \frac{n_1}{n_\infty} \end{aligned}$$

persamaan [6.85] menjadi

$$U + \frac{kT}{e} \frac{n_1}{n_\infty} = \text{konstan}$$

Jika persamaan di atas diturunkan dua kali terhadap x dan substitusikan d^2U/dx^2 dengan persamaan Poisson, diperoleh persamaan untuk n sebagai berikut.

$$\frac{1}{\epsilon\epsilon_0} en_1 = -\frac{kT}{en_\infty} \frac{d^2n_1}{dx^2}$$

atau

$$\frac{d^2n_1}{dx^2} = -\frac{en_\infty}{\epsilon\epsilon_0 kT} n_1$$

Penyelesaian menunjukkan bahwa konsentrasi kelebihan elektron menurun atau bertambah secara eksponensial dari harga awalnya, yaitu yang terdapat langsung dipermukaan

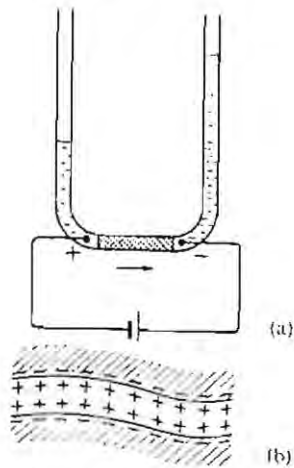
$$n_1 = n_{10} e^{-x/d}$$

dengan

$$d = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 kT}{e^2 n_\infty}} \quad (6.86)$$

adalah *tinggi skala* kelebihan elektron, yaitu jarak permukaan yang mempunyai konsentrasi menurun sebesar e^{-1} . d dan disebut *panjang Debye-Hueckel*

Jika pembawa muatan mempunyai kedua tanda (positif dan negatif), cukuplah salah satu yang terdapat dipermukaan. Sementara yang lainnya, akan menjauh dari permukaan. Sebuah ion larutan elektrolit akan terselubungi awan ion berlawanan yang mempunyai jari-jari juga sebesar d . Dalam hal itu n_∞ dapat dianggap konsentrasi total anion dan kation



Gambar 6.57 Peristiwa OSMOSE listrik.

Aliran Unipolar di dalam Cairan

Pada bahan-bahan yang mempunyai konsentrasi elektron atau ion tidak sama persis, adanya kesetimbangan elektrokimia selalu menyebabkan adanya lapisan muatan dua kali dari seharusnya dan menjadi lebih rapat jika ruang di daerah batas cukup sempit. Suatu cairan yang dibatasi oleh zat padat, jika cairan mengalir, sebagian muatan yang terdapat di dalamnya juga ikut mengalir sedangkan sebagian lainnya akan tertahan di dinding penyekat.

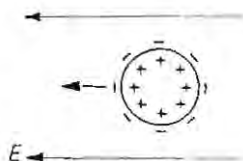
Sebuah pipa mengandung bahan porosif berbentuk botol. Di dinding ruang yang licin terbentuk dua lapisan dengan bagian yang tidak terikat melalui ion-ion karena medan listrik akan mengalir (gambar [6.57]). Ion-ion yang menjadi bagian lapisan ganda tersebut semuanya mempunyai muatan yang sama dan berada di antara molekul-molekul air yang mengalami hidratisasi. Adanya gesekan dalam menyebabkan seluruh larutan bergerak dan cairan akan naik ke salah satu kaki. Sebaliknya pada peristiwa elektrolisa, hanya terjadi perpindahan satu arah (*osmose listrik*).

Jika cairan ditekan melalui benda porosif, muatan pada lapisan ganda akan mengalir melalui kanal-kanal kapiler dan melalui suatu elektrode

yang dihubungkan dengan galvanometer, dapat diamati adanya arus listrik (aliran arus).

Di dalam cairan bukan penghantar partikel-partikel, karena medan listrik, akan bergerak (gambar[6.58]: *elektroferesis*). Arah geraknya tidak hanya bergantung pada jumlah total muatan, melainkan juga dari distribusi. Muatan permukaan menginduksi awan ion berlawanan yang terletak di daerah sempit bagian dalamnya, sehingga menyebabkan awan tersebut meregang. Oleh karena itu, setiap partikel bermuatan yang dikelilingi awan ion berlawanan dapat menetralisasi partikel bermuatan yang diam lainnya. Di dalam medan listrik homogen akan terdapat gaya pada sistem partikel ditambah dengan awan ion berlawanan, yaitu jika diamati regangan yang dialami awan ion berlawanan dan lapisan luar yang tergelincir. *Mobilitas elektroferesis* sebuah partikel selanjutnya tidak hanya bergantung pada muatannya, melainkan konsentrasi ion medium suspensi turut menentukan (khususnya harga pH medium suspensi), yang menentukan jari-jari Debye-Hueckel awan ion.

Jika partikel-partikel cairan suspensi kecil sehingga hanya membentuk fase tunggal, apakah secara molekuler tidak terjadi campuran Sebagai



Gambar 6.58: Elektroferesis. Perpindahan partikel-partikel suspensi bermuatan dalam pengaruh medan listrik.

layaknya larutan sebenarnya, hal tersebut berhubungan dengan *larutan Koloida* atau *Sol*. Cairan disebut *medium dispersi*, yang mengandung partikel-partikel yang membentuk *fase dispersi*. Jika air sebagai medium dispersi, larutan koloida disebut *hidrosol*. Misalnya putih telur, beberapa sulfida logam, senyawa-senyawa organik “bermolekul besar” dilarutkan di dalam air akan terbentuk hidrosol. Senyawa-senyawa sukar larut (logam-logam yang mengalami reduksi [emas]), hidroksida $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$, sulfida $[\text{As}_2\text{S}_3]$ biasanya membentuk koloida. Melalui pemberian kejutan

gelombang supersonik air raksa akan menjadi koloida di dalam air. Berbagai logam dapat menjadi larutan koloida, yaitu dengan cara meletakkan elektroda yang terbuat dari logam yang bersangkutan ke dalam medium dispersi, kemudian membakar elektroda dengan lompatan listrik (lihat §8.3.4). Diameter partikel-partikel koloida tersebut adalah sekitar 10^{-7} hingga 10^{-5} cm, sementara diameter atom-atom adalah sekitar 10^{-8} cm. Partikel-partikel koloida ini dapat bermuatan positif atau negatif; muatan-muatan yang berlawanan akan terletak di daerah antara partikel dan air (lihat tabel[6.6]).

Ke dalam sebuah pipa berbentuk U, seperti terlihat pada gambar[6.58], yang mengandung hidrosol diberi air maka lapisan antara air dan partikel bermuatan positif akan mengalami pergeseran ke katoda dan partikel bermuatan negatif ke anoda.

Pemuatan partikel koloida dapat dijelaskan dengan efek lapisan batas yang telah dibahas sebelumnya. Jika fase dispersi dan medium dispersi bukan penghantar (tidak elektrolit), bahan tersebut akan dimuati dan bahan tersebut mempunyai konstanta dielektrisitas yang besar (lihat aturan Coehn, §6.2.5). Bahan seperti ini dapat memberikan ion-ionnya kepada medium dispersi.

Jika medium dispersi mengandung ion maka pemuatan dapat terjadi melalui *adsorpsi* ion-ion yang berada di permukaan dari partikel-partikel koloida.

Tabel 6.6 PEMUATAN PARTIKEL DI DALAM HIDROSOL

Muatan Positif	Muatan Negatif
Fe(OH) ₃	Au, Ag, Pt
Al(OH) ₃	S, As ₂ O ₃
Cr(OH) ₃	Kuat
ZnO ₂	SiO ₂ , SnO ₂

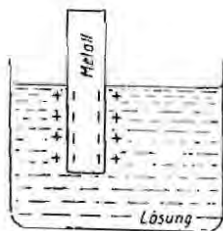
Di dalam efek-efek yang dibicarakan di atas terdapat peran kompleks fisika-kimia. Dalam biokimia, efek-efek yang dibicarakan di atas mempunyai arti penting.

6.5 Elemen Galvani

6.5.1 Kelarutan Logam dan Tegangan Larutan

Logam adalah bahan yang sukar larut dengan air. Seperti, seng sulfat mengandung ion seng bermuatan positif sebagai pembangun kisi kristal, tetapi selain ion SO_4^{2-} terdapat pula partikel lain bermuatan negatif, yaitu elektron konduksi. Dengan melarutkan ZnSO_4 maka kedua macam ion tersebut akan terurai di dalam zat pelarut. Energi yang digunakan untuk menguraikan ion-ion dari kisi kristal berasal dari energi hidratisasi yang tersimpan di dalam molekul-molekul H_2O . Dengan melarutkan logam hanya ion Zn yang dapat tercampur ke dalam pelarut. Oleh karena itu, tidak akan terdapat elektron bebas di dalam zat yang terlarutkan. Proses melarutnya logam akan terhenti jika terdapat medan listrik yang semakin besar antara lapisan batas antara logam dan ion yang terjadi seketika karena pemisahan ion dan elektron di permukaan batas tersebut. Dalam hal itu, energi ion bermuatan tidak mencukupi untuk dilewatkan di daerah tersebut. Oleh karena itu, pada daerah batas antara logam dan cairan terdapat tegangan yang disebabkan oleh muatan yang terdapat di dalam logam dan muatan berlawanan lainnya yang terdapat di permukaan batas cairan. Tegangan ini merupakan tegangan karakteristik antara logam dan elektrolit (lihat gambar[6.59]). Akibat bercampurnya ion logam ke dalam larutan menyebabkan terjadinya *tegangan larutan*, yang harganya berbeda dari satu elemen ke elemen lainnya. Tegangan larutan bergantung pada energi yang dikeluarkan oleh proses penguraian ion-ion tersebut, yaitu beda energi hidratisasi dan energi kisi kristal.

Jika besi dimasukkan ke dalam larutan CuSO_4 , tidak akan terjadi lapisan ganda dan lompatan potensial. Hal itu disebabkan oleh ion-ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} cenderung akan bergerak ke elektroda. Sebuah batang Fe yang dicelupkan ke dalam larutan CuSO_4 segera dapat diamati adanya



Gambar 6.59 "Lapisan listrik" ganda antara logam dan zat terlarut.

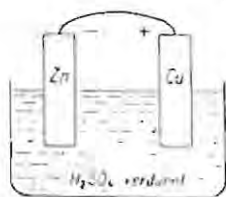
penimbunan Cu pada batang tersebut. Tegangan larutan Cu lebih kecil dibandingkan dengan Fe.

6.5.2 Elemen Galvani dan Deret Potensial Volta

Jika seng dimasukkan ke dalam asam sulfat dan Cu di dalam elektrolit yang sama, lebih baik lagi ke dalam larutan CuSO_4 , yang mengelilingi logam seng yang dipisahkan dengan sebuah dinding porosif dan kedua logam dihubungkan dengan sebuah kawat (gambar[6.60]), ion-ion seng cenderung akan menuju ke larutan. Dapat pula diamati bahwa batang seng akan menjadi semakin tipis. Sebuah amperemeter yang dihubungkan pada kawat akan menunjukkan adanya arus listrik. Dua logam berbeda yang terdapat di dalam larutan elektrolit seperti di atas disebut sebagai *elemen Galvani*. Di dalam elektroda yang dihubungkan dengan kawat akan mengalir elektron-elektron seng ke tembaga. Oleh karena itu, kelebihan elektron yang berasal dari penguraian Zn^{++} selalu sama dengan yang mengalir ke elektroda tembaga. Untuk itu, digunakan penguraian ion Cu^{++} untuk menetralisasi kelebihan muatan positif. Pada arah mana proses berjalan, bergantung pada perbedaan potensial antara permukaan batas zat pelarut logam. Proses berjalan seperti itu, bahwa logam akan berpindah ke dalam larutan karena perbedaan potensial yang lebih tinggi terhadap larutan. Logam tersebut juga sebagai kutub negatif elemen Galvani. Selanjutnya, misalkan Zn ditukar dengan Pt, Cu akan menjadi kutub negatif. Semua logam tersebut dapat disusun dalam *deret potensial*,

yaitu berdasarkan kombinasi dua elemen yang mempunyai potensial lebih positif dibandingkan dengan yang lainnya.

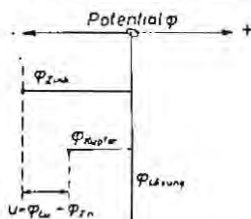
Potensial atau tegangan yang dapat diukur melalui voltmeter yang dihubungkan pada elektroda-elektroda tersebut adalah perbedaan tegangan yang berasal dari elektroda terhadap larutan elektrolit. Pada keadaan elemen terbuka, yaitu elemen dipasang tanpa menghubungkannya dengan kawat, potensial di dalam larutan elektrolit menjadi konstan. Pada gambar[6.6] potensial adalah sama dengan nol. Potensial yang dapat diukur hanya $\phi_{Cu} - \phi_{Zn} = 1,1 \text{ V}$. ϕ_{Cu} adalah lebih positif dibandingkan dengan ϕ_{Zn} . Adalah tidak mungkin bahwa perbedaan potensial antara logam dan larutan elektrolit tidak dapat diukur secara langsung. Untuk dapat menentukan perbedaan potensial masing-masing logam maka ditentukan potensial sembarang pada sebuah elektroda Pt yang dikelilingi hidrogen, diperoleh bahwa elektroda hidrogen terhadap larutan 1 N (normal) asam adalah sama dengan nol. Oleh karena itu, akan diperoleh tegangan untuk tiap logam lainnya terhadap ion logam yang terkandung di dalam larutan 1 N elektrolit, seperti terlihat pada tabel[6.7] Tentu saja harga perbedaan



Gambar 6.60 Elemen Galvani

potensial sebenarnya mengalami deviasi dari yang dinyatakan pada tabel[6.7], seperti halnya perbedaan sebenarnya perbedaan potensial elektroda hidrogen dan larutan elektrolit dari angka 0. Jika kedua elektroda dihubungkan dengan kawat, terjadi penurunan tegangan di kawat tersebut dibandingkan dengan potensial yang terdapat pada masing-masing elemen kawat. Hal ini disebabkan oleh terdapatnya bagian penurunan potensial di dalam larutan elektrolit yang disebabkan oleh adanya medan listrik antara Cu dan Zn yang bekerja pada larutan tersebut. Berarti pula bahwa ion-ion logam yang terdapat di dalam larutan elektrolit, dengan tegangan larutan

yang kecil, akan bergerak ke elemen elektroda positif, dengan perkataan lain, ion-ion Cu akan terakumulasi di elektroda Cu.



Gambar 6.61: Potensial suatu elemen Galvani adalah sama dengan beda potensial masing-masing logam elemen terhadap larutan elektrolit.

Potensial kimia ion-ion di dalam larutan dengan konsentrasi c haruslah mempunyai harga yang sama dengan bahan elemen yang mempunyai konsentrasi efektif c_0 . Untuk ion dengan harga valensi Z terdapat perbedaan potensial antara elektroda dan larutan elektrolit sebesar:

$$U = \frac{kT}{eZ} \ln \frac{c}{c_0} = \frac{RT}{FZ} \ln \frac{c}{c_0} \quad (6.87)$$

6.5.3 Fenomena Polarisasi pada Elemen Galvani

Suatu sel elektrolit dengan sepasang elektroda terbuat dari platina diisi dengan larutan asam di dalam air. Jika pada kedua elektroda diberi tegangan sebesar 1 volt, walaupun tahanan di rangkaian luar, demikian pula daya penghantar elektrolit tidak berubah, kuat arus listrik akan menurun hingga mencapai nol. Dasar yang menyebabkan terjadinya hal ini adalah akibat adanya penurunan tegangan pada elektroda. Pada katoda terakumulasi H_2 sedangkan pada anoda terdapat banyak O_2 . Elektroda yang dimuati oleh gas-gas tersebut menjadi semacam elemen Galvani, sehingga sumber arus yang terdapat di luar sel akan mengalami hambatan. Pada larutan elektrolit sebaliknya terdapat beda tegangan dengan mengalirnya arus, yang menyebabkan penurunan tegangan antara elemen

Tabel 6.7. DERET POTENSIAL BEBERAPA ELEMEN DAN POTENSIAL NORMALNYA TERHADAP NORMAL ELEKTRODA HIDROGEN. KOSENTRASI LARUTAN ELEKTROLIT: 1 Mol ion/l.

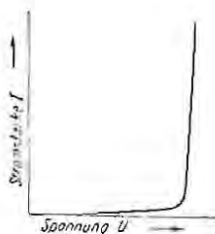
Elektroda	Potensial [Volt]
Li	-3,02
K	-2,92
Na	-2,71
Mg	-2,35
Zn	-0,762
Fe	-0,44
Cd	-0,402
Ni	-0,25
Pb	-0,126
H ₂	0
Cu	+0,345
Ag	+0,80
Hg	+0,86
Au	+1,5

hidrogen-oksigen sehingga arus yang ada adalah sangat kecil, tidak seperti yang diharapkan oleh hukum ohm. Di atas tegangan tersebut, pada tegangan ini larutan elektrolit akan mengalami penguraian dan disebut *tegangan penguraian* maka kuat arus diberikan sebagai berikut.

$$I = \frac{U - U_z}{R}$$

Dengan pengertian R adalah tahanan sel (gambar[6.62]). Perubahan yang terjadi pada elektroda ini disebut *polarisasi elektrolit* atau *polarisasi Galvani*.

Suatu penurunan tegangan seperti itu, menyebabkan terjadinya *polarisasi elektrolit* (jangan terkecoh dengan polarisasi dielektrik, §6.2.2)



Gambar 6.62 Pengaruh polarisasi elektrolit yang dihubungkan antara kuat arus dan tegangan Ekstrapolasi linier yang dibuat pada gambar yang merupakan kurva sangat tajam berlaku untuk keadaan $I = 0$ menyebabkan terjadinya penurunan tegangan sebesar U' .

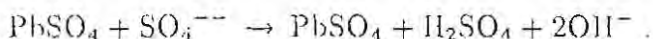
timbul pada elemen Galvani *tidak konstan*. Jika elemen demikian diberikan arus listrik, dengan arus di dalam elektrolit dibawa oleh ion-ion yang akan terakumulasi di elektroda yang bersangkutan, elektroda akan mengalami perubahan. Adanya "elektroda baru" tersebut menyebabkan perubahan tegangan dari tegangan elemen "sebenarnya" menjadi tegangan "elektroda baru". Adanya akumulasi ion pembawa muatan (baca arus) menyebabkan terjadi penurunan arus sehingga semakin lama tegangan antara kedua elektroda menjadi semakin menurun. Hal itu sering diikuti dengan adanya penimbunan H_2 pada elektroda positif. Untuk mengatasi keadaan ini, biasanya orang menambahkan bahan kimia oksidan ke dalam larutan elektrolit atau ke elektroda positif, dan bahan kimia yang digunakan misalnya kalium bikromat atau MnO_2 . Kedua bahan kimia tersebut, dapat mengoksidasi H_2 secara langsung. Elemen tersebut dinamakan *elemen konstan*.

Elemen Daniel adalah elemen konstan, karena elektroda Cu merupakan elektroda yang dapat mengalami penimbunan Cu dalam larutan elektrolit $CuSO_4$.

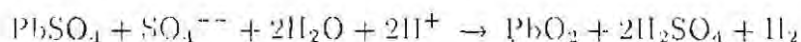
Akumulator Timah (bateri atau accu dengan elemen terbuat dari timah) adalah elemen polarisasi atau *elemen sekunder*. Dalam larutan H_2SO_4 ditambahkan air direndamkan dua elektroda terbuat dari timah yang terlapiasi lapisan $PbSO_4$, pada proses elektrolisa, yaitu proses "pemuatan",

pada katoda terdapat logam Pb sedangkan pada anoda terjadi oksida timah (PbSO_4):

Katoda :



Anoda :



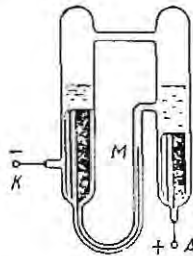
Setelah proses pemuatan bahan tersebut meneruskan arus pada arah yang berlawanan, selama hal tersebut dapat terjadi hingga bahan yang terakumulasi pada proses pemuatan digunakan seluruhnya. Tegangan pada sel akumulator (accu) adalah sekitar 2,02 volt. Kutub positif adalah plat yang dimuati oleh PbO_2 , yang jumlahnya berkurang pada proses "pembuangan" muatan. Proses pembuangan pada akumulator timah tersimpan energi listrik sekitar 70-80% dari energi listrik total yang tersimpan pada saat proses pemuatan.

6.5.4 Tegangan Permukaan dan Polarisasi

Dari §3.2.1 diketahui bahwa tegangan permukaan zat cair adalah hasil gaya-gaya satu sisi yang dikerjakan molekul zat cair. Misalnya, permukaan air raksa diberi lapisan tipis larutan elektrolit encer maka pada permukaan batas keduanya akan terdapat dua lapisan yang menyebabkan timbulnya tegangan Volta antara kedua lapisan tersebut. Pada permukaan air raksa terdapat gaya elektrostatis yang dapat mengurangi tegangan permukaan.

Elektrometer Kapiler (gbr[6.63])

Jika antara dua elektroda A dan K diberikan tegangan, tegangan permukaan yang terdapat pada permukaan air raksa akan mengalami pengecilan dengan harga tertentu. Penurunan tegangan permukaan tersebut ternyata sebanding dengan tegangan luar yang diberikan, yaitu selama tegangan tersebut tetap tidak lebih besar dari $1/10$ volt. Karena perubahan tegangan permukaan air raksa, permukaan yang terdapat di dalam pipa kecil (disebut meniskus) M akan bergeser naik ke atas dan skala pergeseran tersebut dapat diamati secara langsung melalui mikroskop. Elektrometer kapiler ini dipakai untuk mengamati tegangan permukaan dan pada umumnya dipakai sebagai alat kalibrasi.

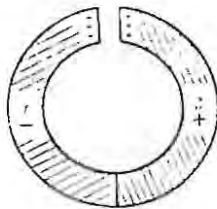


Gambar 6.63 Elektrometer kapiler (bahan di dalam bejana: air raksa dan larutan elektrolit H_2SO_4 encer).

6.6 Fenomena Termoelektrik

6.6.1 Tegangan Termoelektrik

Jika dua logam yang berbeda digesekkan satu dengan lainnya (gambar[6 64]), elektron-elektron yang terdapat pada logam dua, misalnya, akan pindah ke logam satu, yaitu dari logam yang mempunyai "energi bebas" elektron lebih kecil ke logam yang mempunyai "energi bebas" lebih besar (lihat §8.1.1). Dengan demikian, logam kedua akan bermuatan positif dibandingkan dengan logam pertama (*efek Seebeck*, 1822). Tegangan yang terdapat di antara dua logam disebut *tegangan kontak*. Jika dua logam saling kontak dibengkokkan sehingga membentuk lingkaran (*ring*),



Gambar 6.64: Tegangan kontak antara dua logam dalam keadaan kontak.

karena timbulnya tegangan antara kedua logam tersebut, pada masing-masing ujung bebas kedua logam akan terdapat medan listrik. Jika kedua ujung tersebut ditempelkan satu dan lainnya, pada permukaan konstan tersebut, jika temperatur kedua logam sama, terdapat tegangan konstan yang sama besar. Karena keduanya saling menetralisasi muatan yang ada di permukaan masing-masing, di dalam ring tidak akan timbul arus listrik. Jika salah satu logam dipanaskan, terjadi *arus termis*. Energi yang digunakan untuk peristiwa ini diambil dari sumber panas.

Dua kawat logam yang terbuat dari bahan berbeda disambungkan satu dan lainnya sebagai *termoelemen*, kemudian salah satu kawat dihubungkan dengan voltmeter, pada tempat sambungan tersebut akan terdapat tegangan sebesar U_{term} jika temperatur kedua kawat berbeda, misalkan T dan T_0 . Tegangan ini hanya bergantung pada jenis bahan kedua kawat dan temperatur pada tempat sambungan keduanya. Sebagai pendekatan, untuk perbedaan temperatur yang kecil pada tempat sambungan kedua kawat tegangan ditulis sebagai berikut.

$$\eta = \frac{dU_{\text{term}}}{dT} = a + 2b(T - T_0) \quad (6.88)$$

Perubahan tegangan termis terhadap temperatur disebut *gaya termis* (n) dari termoelemen:

$$U_{\text{term}} = a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 \quad (6.89)$$

Sifat-sifat termoelemen seperti di atas, dipenuhi dengan baik hingga temperatur mencapai 300°C . Kebanyakan termoelemen, misalnya, Cu-Konstanta atau Fe-Konstanta, untuk perbedaan temperatur yang tidak begitu besar menunjukkan harga $b \approx 0$ sehingga tegangan termis akan sebanding dengan perbedaan temperatur.

Apabila berbagai elemen diurut berdasarkan besarnya gaya termis, akan diperoleh deret tegangan termoelektrik seperti dinyatakan pada tabel[6.8]. Gaya termis untuk berbagai pasangan elemen sembarang adalah sama dengan harga perbedaan yang tertera di tabel[6.8].

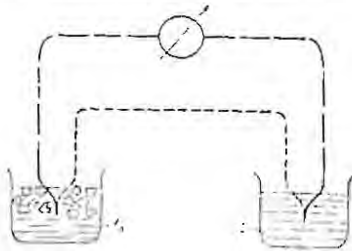
Ujung dua kawat termoelemen yang berbeda, dibuat tajam dipatri satu sama lain dapat dipakai untuk mengukur temperatur (gambar[6.65]). Pada salah satu tempat patrian kawat temperatur dijaga tetap konstan (misalnya dengan merendamnya di dalam es yang mencair) sedangkan patrian lainnya ditempatkan pada tempat yang akan diukur temperaturnya. Keuntungan "termometer" itu adalah mempunyai sensitivitas yang baik,

Tabel 6.8 DERET TEGANGAN TERMIS DARI BERBAGAI TERMOELEMEN PADA TEMPERATUR 0°C (UNTUK Pb TEGANGAN TERMISNYA DINYATAKAN SECARA SEMBARANG. YAITU SAMA DENGAN NOL).

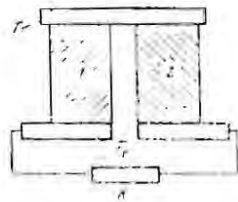
Bahan	Tegangan Termis [$\mu\text{ Volt K}^{-1}$]
Sb	+35
Fe	+16
Zn	+3
Cu	+2,8
Ag	+2,7
Pb	0
Al	-0,5
Pt	-3,1
Ni	-19
Bi	-70

bergantung pada harga konstanta α pada persamaan [6.89], misalnya termoelemen Fe-konstanta yang mempunyai harga tetap konstan hingga temperatur mencapai 300°C , yaitu sebesar $53 \mu\text{VK}^{-1}$. Untuk mengukur temperatur dari 300 hingga 1600°C biasanya dipakai termoelemen platina-platinarhodium (mengandung rhodium 10%).

Pada termoelemen energi listrik timbul karena energi panas. Bagaimana *generator termis* demikian dibentuk terlihat pada gambar [6.66]. Dua bagian generator termis terbuat dari logam berbeda,



Gambar 6.65 Pengukuran temperatur dengan menggunakan termoelemen



Gambar 6.66 Gambaran skematik generator termis

1 dan 2, berfungsi sebagai pengambil panas yang baik. Keduanya dihubungkan, dengan kontak yang cukup baik, melalui sebuah "jembatan" yang terbuat dari bahan penghantar listrik yang baik yang mempunyai permukaan cukup besar. Dalam keadaan demikian, terjadi penambahan panas. Ujung bagian bawah termoelemen terjadi temperatur T_0 . R adalah energi listrik yang digunakan. Efisiensi generator termis ini, berdasarkan termodinamika, sangat kecil. Akan tetapi, dengan menggunakan bahan-bahan p dan n (lihat §14.4.3) untuk kedua sisi generator termis ini dapat diperoleh efisiensi sekitar 8%. Generator termis seperti itu biasanya digunakan untuk satelit yang menggunakan energi cahaya matahari.

Pada saat sekarang ini energi listrik kebanyakan dibangkitkan oleh energi mekanis (melalui turbin) maka generator termis seperti dibahas di atas merupakan cara memperoleh energi listrik secara "langsung". Oleh karena itu, riset generator termis merupakan tujuan yang ingin dicapai oleh para pakar teknologi dengan menggunakan berbagai cara. Menurut catatan, hasil riset yang paling berhasil di bidang ini adalah penggunaan

apa yang disebut *sel bahan bakar*, yaitu penggunaan energi kimia yang diperoleh dari bahan bakar kimia cair dan akhirnya diubah menjadi energi listrik, tanpa menggunakan pembakaran secara langsung. Efisiensi generator termis serupa ini, dalam skala laboratorium, dapat mencapai 80%.

Terjadinya efek termoelektrik berasal dari adanya potensial elektrokimia listrik yang konstan, dinyatakan pada persamaan [6.85]. Jika n_1 dan n_2 adalah konsentrasi elektron pada masing-masing logam dan T_A adalah temperatur pada logam A , pada logam A terdapat potensial sebesar $U_A = kT_A \ln n_1/n_2$. Pada logam B yang bertemperatur T_B timbul potensial sebesar $U_B = kT_B \ln n_1/n_2$. Jika n_1 dan n_2 tidak bergantung pada T , perbedaan potensial yang dapat diperoleh adalah

$$U = U_A - U_B = k(T_A - T_B) \ln \frac{n_1}{n_2} \quad (6.90)$$

Persamaan di atas adalah suku linier kebergantungan terhadap temperatur yang telah dituliskan pada persamaan [6.88]. Dalam kenyataannya keadaan yang terjadi adalah sangat rumit, karena elektron-elektron logam pada konsentrasinya yang tinggi mengalami "degenerasi", yaitu tidak mengikuti distribusi Maxwell Boltzmann yang dipakai sebagai dasar untuk menjelaskan persamaan [6.85]. Hal itu melainkan mengikuti kaidah distribusi Fermi-Dirac (lihat §14.3.2).

6.6.2 Efek Peltier

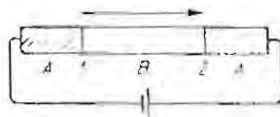
Pada kedua ujung batang logam B dipatri dua batang lain, yaitu A dan C terdapat aliran arus listrik (gambar [6.67]). Kemudian temperatur pada salah satu tempat patrian diturunkan, sedangkan pada tempat patrian lainnya temperatur dinaikkan. Keadaan ini menyebabkan adanya kenaikan temperatur karena rambatan panas Joule. Panas yang timbul setiap detik di tempat patrian adalah sebanding dengan arus yang mengalir.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \Pi \cdot I \quad (6.91)$$

Π adalah *koefisien Peltier*, merupakan konstanta bahan yang bergantung pada temperatur dan tidak bergantung pada bentuk kontak yang dibuat dari kombinasi bahan. Antara koefisien Peltier dan gaya termis (lihat persamaan[6.89]) terdapat hubungan sebagai berikut.

$$\Pi = \eta T_{abs} \quad (6.92)$$

Efek SeebeckK (§6.6.1) dan efek Peltier mempunyai hubungan erat satu dengan lain. Karena efek energi listrik dapat dibangkitkan dari perbedaan



Gambar 6.6 7 Efek PELTIER.

temperatur, tentu sebaliknya dapat dilakukan, bahwa dari energi listrik dapat ditimbulkan perbedaan temperatur. Kedua "susunan" ini disebut pula *pompa termis*, yaitu dengan mengubah R pada gambar[6.66] dengan sumber listrik. Pada pengkutuban sebenarnya, temperatur pada "jembatan" dibuat serendah mungkin, yaitu dengan cara mendinginkannya dengan air dingin, sedangkan sisi lainnya dibiarkan pada temperatur kamar.

Generator dan pompa termis ("plat pendingin") merupakan hal yang menarik perhatian di bidang riset teknologi, yaitu sejak ditemukannya bahan-bahan termoelektrik yang lebih baik daripada berbagai bahan semikonduktor (misalnya Bi_2Te_3). Hal yang masih menjadi hambatan dalam pengembangannya lebih lanjut adalah perbandingan antara konduktifitas panas dan listrik yang masih kurang efisien.

Soal-Soal § 6.1

6.1.1 Buatlah percobaan bagaimana caranya Anda menentukan definisi muatan listrik dan tandanya serta akhirnya dapat merumuskan hukum Coulomb.

6.1.2 Berapa jumlah muatan yang ada pada pemakaian alat cukur listrik dan sebuah seterika listrik untuk menyeterika sebuah blus? Seandainya kedua muatan tersebut dapat disatukan ke dalam sebuah balon udara, berapa besar gaya yang bekerja antara keduanya? Perkirakan berapa jumlah pertukaran muatan yang terjadi antara benda dan baju nilon, jika baju tersebut dibuka melalui kepala?

6.1.3 Bagaimana bentuk garis-garis medan yang homogen, yaitu medan yang mempunyai kuat medan di setiap tempat sama besar? Apa artinya jika garis-garis medan mengalami divergensi dan konvergensi? Bentuk gambar[6.2] dan gambar[6.3] berdasarkan gambar[6.1].

6.1.4 Hubungan apa yang ada antara ketidakbergantungan kerja pergeseran untuk garis-garis medan tertutup, dengan berlakunya persamaan Poisson dan adanya potensial? Contoh: Fluks garis-garis medan listrik akan lebih cepat di tengah dibandingkan dengan di pinggir, medan magnet di sekitar kawat yang dialirkan arus listrik; angin pada siang hari di atas laut dan pada malam hari di daratan yang basah. Apakah benar bahwa selalu terdapat potensial, jika garis-garis medan selalu berakhir di sebuah "muatan" sembarang? Gunakan rumusan fluks!

6.1.5 Akan diturunkan "lompatan" kuat medan listrik di suatu permukaan bermuatan relasi persamaan[6.11], yang menyatakan jumlah fluks total melewati permukaan tertutup (kurva menutupi permukaan).

6.1.6 Medan listrik sebuah bola bermuatan adalah analog seperti seandainya muatan terkonsentrasi di suatu titik dan dapat pula dibuktikan bahwa medan listrik tersebut merupakan sumbangan masing-masing muatan yang terdapat di permukaan elemen volume bola. Berdasarkan pernyataan tersebut, akan dicari potensial suatu titik di permukaan bola,

yaitu dengan cara bola dibagi dalam beberapa lapisan. Perhitungan mana yang lebih mudah dilakukan, perhitungan melalui medan atau potensial?

6.1.7 Dari sebuah bola yang mengandung muatan homogen, dicari medan listrik dan potensial di dalam dan di luar bola, demikian pula kerapatan energi elektrostatis yang terdapat di dalamnya. Petunjuk. Medan listrik di bagian dalam permukaan bola adalah nol sedangkan di luar sama dengan medan akibat titik muatan. Sebuah titik muatan yang mempunyai tanda berlawanan ditempatkan di dalam bola. Bagaimana kebergantungan gaya terhadap jarak dalam kasus tersebut? Bagaimana gerak muatan tersebut jika dianggap tidak terdapat gaya gesek dan jika terdapat gaya gesek sebanding dengan kecepatannya? Mengapa Thomson memperkenalkan model atom dan bagaimana penjelasannya tentang hal tersebut? Pengamatan apa yang kiranya hanya suatu kebetulan belaka dari model atom tersebut?

6.1.8 Apa satuan kapasitansi dalam sistem satuan CGS? Berapa besar kapasitansi sebuah ujung jarum, sebuah bola yang kulitnya ditutupi oleh lapisan stannium dan bumi dalam kedua sistem.

6.1.9 Ramalkan kapasitas sebuah awan terhadap bumi (sebaliknya lakukan ramalan untuk keadaan petir karena perbedaan panas lokal dengan harga-harga parameter yang logis, misalnya ketinggian). Kekuatan petir untuk kejadian yang singkat adalah 10^4 V/cm dan pada jarak tenggang yang panjang hanya mencapai 10^3 V/cm. Kilat terjadi dalam waktu sekitar 1 mdet. Cari jumlah muatan total, arus, energi dari hujan petir tersebut dan ramalkan berapa jumlah kilat yang akan terjadi, ramalkan pula kekuatan dan daya masing-masing kilat.

6.1.10 Teori cuaca Terjadinya kilat karena adanya penumpukan muatan yang besar pada awan dan permukaan bumi (kilat bumi) atau sebagian awan dan awan lainnya (kilat awan) dan jika medan yang ditimbulkan oleh muatan-muatan tersebut melebihi medan listrik udara (10^4 V/cm). Berapa kerapatan muatan yang terdapat pada suatu daerah bermuatan sehingga kilat dapat terjadi? Jika tiap tetes air dapat menangkap satu ion, berapa konsentrasi tetesan air yang terdapat di udara? Berapa ukuran

tetesannya (baca: kurva tetesan uap). Menurut C.T.R. Wilson tetesan tersebut hanya mempunyai satu macam muatan karena tetesan dalam keadaan medan listrik normal 100 V/cm terhadap bumi yang bermuatan negatif akan terpengaruh menjadi dipol-dipol. Dalam hal ini sisi muka ion satu akan berubah tanda dan terhadap sisi lainnya Mobilitasnya tidak besar karena itu jika tetesan mencapai ukuran kritisnya, bagian belakang tetesan yang cenderung jatuh. Cari ukuran tetesan tersebut dan bandingkan dengan harga-harga yang digunakan (lihat soal 3 3.1. mobilitas lihat §8.2.10).

6.1.11 Mengapa pada peristiwa muatan terinduksi hanya terdapat tarik-menarik antara benda bermuatan dan tidak bermuatan? Peran pengembangan apa yang diberikan oleh benda tidak bermuatan terhadap besarnya gaya? Manakah di antara bola sabun berukuran besar dan kecil yang dapat mendekati lebih cepat pada daerah yang mengandung medan?

6.1.12 Bagaimana orang membuat kondensator berukuran $1 \mu\text{F}$ untuk menghemat ruang? (lapisan film logam atau plastik yang digulung, bagaimana dengan ukurannya?)

6.1.13 Percobaan Milikan Tetesan minyak yang sangat kecil dibuat dengan jalan menyemprotkan cairan minyak melalui alat semprot. Tetesan diamati dengan menggunakan mikroskop dan akan mengambang di dalam ruang, serta jatuh perlahan-lahan karena pengaruh gravitasi. Jika diberikan medan listrik pada arah vertikal E (kondensator), tetesan yang diamati yang pada mulanya jatuh dengan kecepatan v sekarang tidak jatuh lagi. Kesimpulan apa yang dapat ditarik dari E dan v ? Seandainya gaya-gaya yang bekerja dianalogikan dengan gaya Stoke, gaya karena medan dan gaya berat, apa yang dapat diketahui dari semuanya? Kadang-kadang suatu partikel akan diam di dalam medan, tetapi tiba-tiba partikel akan jatuh atau bahkan naik dari keadaan semula, yaitu dengan kecepatan v' , apa yang terjadi? Misalkan jika kerapatan minyak $0,9 \text{ gr/cm}^3$ akan memberikan kecepatan sebesar $4 \mu\text{m/det}$, $E = 4,5 \text{ V/cm}$ dan $v' = 1,2 \mu\text{m/det}$.

6.1.14 Bandingkan gaya Coulomb antara elektron dan proton dengan gaya gravitasinya. Berapa jumlah kelebihan muatan (nyatakan dalam C) yang

terdapat di bumi dan bulan sehingga gaya gravitasi dapat dikompensasinya atau bahkan menjadi dua kali lipat dari gaya semula? Dapatkan daya gravitasi dijelaskan memakai gaya Coulomb bahwa kelebihan muatan tersebut memang terdapat atau muatan proton dan elektron berbeda sedikit (berapa?). Kenyataan apa yang menyebabkan teori tersebut tidak berlaku?

6.1.15 Secara apriori dijelaskan bahwa arah gaya antara muatan titik dapat dijelaskan melalui garis yang menghubungkan kedua muatan tersebut. Bagaimana dengan gaya antara kawat yang dialiri arus listrik dengan “muatan magnetik”.

6.1.16 Di dalam sebuah bola kosong bermuatan dibuat lubang kecil. Bagaimana kelakuan kerapatan medan dan potensial di lubang tersebut? (selesaikan tanpa perhitungan! Cari jawab hanya dengan prinsip superposisi).

6.1.17 Sebuah genderang terbuat dari setengah bola dan di atasnya ditutupi oleh membran yang diregangkan. Jika pada permukaan setengah bola terdapat muatan homogen dan membran tetap tidak bermuatan. Tunjukkan tanpa perhitungan bahwa medan pada membran selalu mempunyai arah tegak lurus dari bola!

6.1.18 Berapa besar medan yang terdapat pada sebuah kawat yang panjangnya tak berhingga? Gunakan hukum Coulomb secara langsung atau persamaan Poisson dalam bentuk integral. Oleh karena itu, cara apa yang paling mudah?

6.1.19 Sebuah elektron bergerak tegak lurus pada jarak minimal d di dekat sebuah kawat bermuatan homogen. Berapa besar sudut pembelokan yang dialami elektron karenanya? Hitung untuk pendekatan bahwa terdapat sudut pembelokan yang kecil. Mengapa Moellenstedt dan Dueker dalam percobaan elektron? Mengapa sistem ini dapat dibandingkan dengan biprisma Fresnel? Berapa besar potensial harus diberikan pada kawat?

6.1.20 Sebuah plat bermuatan homogen digeser pada celah sebuah kondensator sempit yang tidak diberikan muatan. Berapa besar muatan yang dipindahkan plat dan potensial kondensator. Apa yang terjadi jika

kondensator telah diberi potensial sebelumnya atau jika kondensator berhubungan satu sama lain.

6.1.21 Dapatkah di dalam ruang hampa bermedan listrik sebuah muatan akan berada tetap stabil dalam keadaan diam? Bagaimana medan harus dibuat agar keadaan demikian dapat direalisasi? Apakah hukum Gauss berlaku? Apakah terdapat keadaan labil atau keadaan yang berbeda dari keadaan kesetimbangan? Bagaimana bentuk umum medan tersebut untuk dapat membuat muatan menjadi stabil?

Soal-Soal § 6.2

6.2.1 Apakah muatan permukaan dan induksi pada permukaan bahan dielektrik diperlakukan sama? Berapa besar konstanta dielektrik dari suatu bahan yang tidak dapat mengalami polarisasi yang ditempatkan di permukaan logam yang merupakan c bagian volume total sistem? Berapa besar konstanta dielektrik suatu logam murni?

6.2.2 Berapa besar gaya dan energi potensial yang terdapat antara dua muatan elementer yang berjarak a satu sama lain (beberapa Å di dalam vakuum) dan di dalam air ($\epsilon = 81$)? Bandingkan dengan energi termis partikel dan kesimpulan apa yang diperoleh dari perbandingan tersebut? Apakah partikel-partikel yang bermuatan berlawanan dapat saling menempel satu sama lain? Gunakan distribusi Boltzmann untuk itu! Di mana letak peran air sebagai bahan media pelarut universal? Bahan yang bagaimana sebagai bahan pelatur yang jelek? Apakah harga ϵ hanya dapat ditentukan secara mikroskopik dan tidak secara makroskopik?

6.2.3 Berapa besar polarisabilitas model atom hidrogen dari Thomson (lihat soal 6.1.7)? Muatan positif terdistribusi serbasama di dalam volume bola V , apakah sebuah muatan titik elektron juga tertimbun padanya? Jika model atom Thomson tidak benar, tetapi paling tidak dapat digunakan cara lain untuk meramalkan harga polarisabilitas yang bersifat instruktif

(dalam CGS), yang berkaitan erat dengan sifat partikel. Cara apakah itu?

6.2.4 Di dalam zat pelarut dengan viskositas η terdapat sejumlah n molekul bermomen dipol p . Di dalamnya terdapat medan listrik E . Bagaimana distribusi momen dipol dalam keadaan kesetimbangan termis? (Petunjuk. Kebergantungan antara energi momen dipol dan arahnya, gunakan distribusi Boltzmann). Secara pendekatan dianggap bahwa hanya terdapat tiga arah momen dipol, yaitu searah, berlawanan, dan tegak lurus medan. Mana yang lebih besar energi dipol atau energi termis? Buat pendekatan untuk itu! Berapa bagian momen dipol λ yang terdapat pada arah medan jika dibandingkan dengan kasus tanpa medan? Dari mana muncul faktor angka "3" pada persamaan [6.55]? Selain bagian λ , semua dipol mengalami rotasi searah dan, apakah momen dipol dapat dirotasikan dengan sudut $\approx \lambda$ dengan polarisasi? Berapa lama rotasi tersebut terjadi (lihat momen putar pada §6.1.6 dan tahanan gesekan pada soal 3.3.3)? Sebagai kontrol: waktu relaksasi $\approx \eta \cdot \text{volume molekul} / kT$. Berikan order besar angka-angka yang persis. Gambarkan secara skematis $\epsilon(\omega)$ (ω adalah frekuensi medan listrik).

6.2.5 Sebuah kondensator dicelupkan ke dalam cairan (gambar [6.33]). Jika kondensator diberi muatan, cairan yang terdapat di antara plat akan naik. Mengapa cairan naik dan berapa tinggi kenaikannya? Apakah kondensator dapat digunakan untuk menghitung konstanta dielektrik? Dapat dibedakan dua hal yaitu pertama seperti yang digambarkan pada gambar [6.33] dan lainnya jika kondensator diberi muatan di luar cairan, kemudian dengan membuat tetap tegangannya kondensator dicelupkan sebagian ke dalam cairan.

6.2.6 Bahan elektrostriktif secara sederhana dapat dibayangkan terdiri atas suatu lapisan partikel dengan ketebalan d_1 , suatu lapisan "antaruang" dengan ketebalan d_2 , lalu lapisan partikel dan seterusnya. Kedua lapisan haruslah mempunyai modulus elastisitas tertentu. Berapa besar gaya-gaya dan tegangan mekanis antara dua lapisan partikel pada keadaan polarisasi dalam medan sebesar E ? Ramalkan pemendekan elektrostriktif!

Soal-Soal § 6.3

6.3.1 Tunjukkan bahwa arus konstan sepanjang sebuah konduktor adalah dalam keadaan kesetimbangan yang stabil dapat dianggap bahan setiap deviasi lokal dari aliran ini dapat “dihapuskan” karena deviasi cenderung saling meniadakan satu sama lainnya. Dapatkah Anda katakan mengapa dipakai istilah rangkaian RC dalam elektronik, khususnya getaran elektromagnetik, memegang peran sentral?

6.3.2 Plat sebuah kondensator bermuatan dihubungkan dengan seutas kawat sangat halus. Apa yang terjadi? Apakah terdapat arus searah seketika karenanya, jika rangkaian listrik demikian dihubungkan dengan sebuah saklar pemutus hubungan?

6.3.3 Bongkarlah peralatan elektronik seluruhnya (tentunya jangan yang terlalu mahal). Gambarkan rangkaian yang ada di dalamnya dan buat analisis untuk itu!

6.3.4 Suatu kabel tembaga yang panjangnya 6 km ditanam di dalam bumi (penampang lintang kabel bagian dalam 1 mm^2) mempunyai kesalahan isolasi. Karena orang tidak ingin menggali kabel keseluruhan untuk mencari kesalahan tersebut, dilakukan pengukuran tahanan dari bagian dalam kabel dan bumi, masing-masing pada kedua ujung kabel ($R' = 80 \Omega$, $R'' = 90 \Omega$). Apakah dengan cara demikian dapat ditentukan di mana kesalahan isolasi terjadi? Bagaimana caranya? (tahanan antara dua titik yang berjarak sangat besar dan dihubungkan dengan bumi adalah kecil dan dapat diabaikan).

6.3.5 Suatu amperemeter kumparan mempunyai tahanan $R_g = 1 \text{ k}\Omega$ dan pada pengukuran arus sebesar $10 \mu\text{A}$ menunjukkan simpangan penuh. Alat ini akan digunakan sebagai voltmeter. Berapa besar daerah tegangan yang dapat dipercaya karenanya? Dengan sebuah tahanan depan R_d daerah pengukuran dapat diperlebar menjadi 10 V. Berapa besar R_d harus dipasang untuk itu? Suatu baterai 120 V mempunyai 20 tahanan yang dihubungkan paralel, masing-masing sebesar $R = 100 \text{ k}\Omega$. Berapa besar tegangan U pada masing-masing tahanan? Pelebaran U harus dikontrol dengan

pertolongan voltmeter (dihubungkan dengan sebuah tahanan R_a). Berapa besar tegangan U' yang ditunjukkan alat? Berapa persen kesalahannya?

6.3.6 Pada gambar [6.49] ditunjukkan sebuah alat A-V- Ω secara skematis. Kumparan amperemeter mempunyai tahanan sebesar 1 k Ω digunakan hanya pada pengukuran arus dan mempunyai simpangan penuh pada 10 μ A. Bagaimana orang melakukan pengukuran tegangan, arus dan tahanan? Berapa lebar daerah yang mampu dilakukan alat tersebut? Berapa besar daya untuk masing-masing pengukuran pada kombinasi sistem saklar yang berbeda? Kombinasi mana yang tidak diperbolehkan? Di mana seharusnya sekering ditempatkan? dan berapa sekering macam apa yang harus digunakan? Bagaimana dapat diketahui, tanpa harus menggunakan alat ini terlebih dahulu. Apakah tahanan dalamnya mempunyai harga besar atau kecil sehingga dapat digunakan untuk keperluan suatu pengukuran? Berhubungan dengan apa agar sebuah amperemeter dapat digunakan untuk pengukuran arus dan tegangan searah dan bolak-balik? Bagaimana dengan skala Ω ? Apakah dalam pengukuran tahanan harus digunakan tegangan?

6.3.7 Seorang pramuniaga menawarkan sebuah pemanas listrik pada Anda dengan kemampuan 8 l/menit. Keuntungan utama pemanas ini adalah Anda tidak harus menggantikan sekering 10 A. Apakah Anda harus membeli atau menolak pramuniaga tersebut? (buat alasan secara teknis!).

6.3.8 Tiga persoalan berikut, khususnya persoalan yang terakhir sering menyebabkan banyaknya simpul pada inti kumparan. Gunakan kaedah superposisi dan kaidah lainnya untuk mengatasi persoalan ini. Selain itu, akan mempersulit persoalan. 12 tahanan, masing-masing 1 Ω dihubungkan membentuk sebuah kubus. Berapa besar tahanan antara a) dua sisi rangkaian paralel saling berdekatan? b) antara dua titik ujung diagonal bidang? c) ujung dua titik diagonal ruang? Cari pula ketiga tahanan seperti di atas jika semua tahanan tersebut membentuk tetrahedral, oktahedral, dodekahedral, ikosahedral!

6.3.9 Definisikan Sebuah konduktor terdiri atas dua bagian yang dihubungkan dengan penghubung. Ujung-ujung satu bagian disebut A dan B sedangkan ujung-ujung bagian lainnya disebut A' dan B' . Dua

konduktor yang amat panjang dipatri satu sama lain, setiap penghubung mempunyai tahanan R_2 , setiap bagian masing-masing mempunyai dua penghubung yang pada setiap titik ujungnya mempunyai tahanan sebesar R_1 . Berapa besar tahanan pada titik "teratas" antara ujung A dan A' ? Jika pada AA' diberikan tegangan sebesar U , berapa besar tegangan yang diperoleh antara dua titik hubung untuk masing-masing penghubung pertama, kedua, dan seterusnya? Apakah dimungkinkan untuk mendapatkan tegangan pada penghubung kedua adalah persis sama dengan setengah seperti pada penghubung pertama? Dalam keadaan terpaksa konduktor dibuat dengan penghubung yang lebih sedikit. Apa yang harus Anda lakukan agar tahanan antara penghubung AA' dan tegangan tidak mengalami perubahan? Petunjuk. Bagaimana perubahan tahanan antara A dan A' , jika konduktor diperpanjang ke atas pada penghubung selanjutnya R_2 dan bagian lainnya R_1 ?

6.3.10 Suatu kisi kawat berbentuk empat persegi. Tahanan setiap potong kawat yang membentuk sisi empat persegi tersebut adalah 1Ω sedangkan kontak pada masing-masing sudut empat persegi dianggap ideal. Berapa besar tahanan pada sudut empat persegi yang bertetangga, jika ukuran kisi dianggap sangat besar? Sama dengan pertanyaan di atas, seandainya kisi berbentuk segitiga dan segi enam. Mengapa tidak berlaku untuk segi lima?

Soal-Soal § 6.4

6.4.1 Nichols mencoba mengukur beda potensial antara titik tengah dan pinggir suatu lempengan berbentuk lingkaran yang dirotasikan sangat cepat. Bagaimana pendapat Anda? Apakah ia berhasil mengukur potensial dengan baik? Berapa besar potensial yang terukur jika menggunakan angka kecepatan sudut terbesar (lihat §3.4.6). Bagaimana prinsip pengukuran yang dapat dilakukan untuk ini? Sumber kesalahan apa saja yang harus diperhatikan untuk melakukan pengukuran ini, khususnya potensial

gangguan yang berasal dari mana?

6.4.2 Tollman dan Stewart melakukan pengereman suatu kumparan yang dirotasikan dengan cepat secara tiba-tiba dan melakukan pengukuran beda tegangan yang terdapat pada kumparan dengan galvanometer balistik. Buatlah ramalan eksperimen yang dilakukan mereka yaitu menyangkut. bahan kawat, kekuatan kawat, ukuran diameter kumparan, dan jenis galvanometer yang digunakannya.

6.4.3 Sebuah batang logam misalnya diselimuti oleh isolator panas sehingga batang hanya dapat dipanaskan melalui salah satu ujungnya saja. Antara kedua ujung batang terdapat beda tegangan listrik. Bagaimana distribusi temperatur yang terdapat di dalam batang? Bagaimana dapat ditentukan kelakuan kapasitas listrik menjadi kapasitas panas yang berperan penting dalam hukum Wiedeman-Franz?

6.4.4 Jika pencampuran di dalam suatu larutan elektrolit dihindarkan, daerah di dekat elektroda akan terjadi penurunan jumlah ion, tetapi tetap terjadi arus listrik. Bagaimana mungkin hal ini dapat terjadi? Bagaimana distribusi potensial, medan, muatan ruang, konsentrasi ion, dan kecepatan ion di dalam wadah tersebut? Bagaimana jika pembawa muatan tidak berpindah dari elektroda, melainkan keluar dari kedua elektroda?

6.4.5 Apakah dari hasil percobaan Tollman dapat diperoleh harga e/m , misalnya dari jumlah atau kerapatan elektron bebas yang terdapat dalam proses tersebut?

6.4.6 Seringkali diperoleh kesimpulan berikut dari percobaan Tollman. Untuk seorang pengamat yang berada di logam terlihat bahwa efek atau pengaruh kelembaman yang dialami elektron adalah berasal dari elemen E dibandingkan dengan apa yang telah dijelaskan pada §6.4.1. Apakah terdapat perbedaan tegangan antara permukaan penutup dan tengah logam yang mengalami percepatan tersebut? Jika benar adanya bagaimana dapat dijelaskan hal tersebut?

6.4.7 Apakah penjelasan pada percobaan yang terdapat pada §6.4.3 dapat direalisasi dengan baik? Apa yang dipakai sebagai sumber tegangan.

Apakah harus digunakan lampu pijar dan lain sebagainya?

6.4.8 Untuk mendissosiasikan asam cuka pada 25°C berlaku konstanta pengaruh massa $\alpha = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Mol/l}$. Bagaimana kebergantungan derajat ionisasi dan konsentrasi ion dari konsentrasi total ion? Dapatkah hal tersebut dijelaskan dengan menggunakan tabel[6.5] berdasarkan hukum pengenceran Oswald?

6.4.9 Bagaimana kebergantungan panjang lintasan Debye-Hueckel terhadap konsentrasi ion, khususnya untuk harga pH suatu larutan elektrolit tertentu? Berapa ukuran (orde) panjang lintasan tersebut menurut perkiraan Anda? Tunjukkan pula "gaya relaksasi" sebagai sebab awan muatan yang berlawanan yang bekerja melawan gerak perpindahan ion sentral.

6.4.10 Dua jenis bahan yang berbeda konstanta dielektrik dan konduktivitas berada dalam keadaan konstan satu sama lain. Bagaimana kelakuan konsentrasi elektron dan medan listrik yang terdapat pada lapisan antara kedua bahan tersebut? Apakah dipermukaan keduanya akan terdapat muatan permukaan atau dengan perkataan lain akan termuati oleh muatan? Apakah berlaku aturan Coehn secara umum? Mengapa logam tidak dapat dimuati muatan? Mengapa peristiwa ini dijelaskan dengan istilah gesekan listrik?

6.4.11 Konsentrasi ion yang berlawanan yang terdapat pada permukaan yang dimuati adalah $n = n_0 e^{-\alpha x}$ dan secara matematis terlihat mempunyai kelakuan mirip seperti gelombang harmonik, tetapi hanya kurang i (bilangan imajiner) dalam suku eksponensialnya. Akan tetapi, secara fisis tentunya tidak terdapat hubungan sama sekali antara keduanya. Kemungkinan model matematis demikian dapat pula dipakai sebagian analogi untuk kasus tiga dimensi, yaitu apakah distribusi ion berlawanan yang berada di sekitar "muatan titik" (suatu ion dengan tanda berbeda) dibedakan pula dengan suatu gelombang harmonik berbentuk bola dengan faktor i ? Apabila analogi ini benar apakah terdapat dasar pemikiran untuk itu? Apa yang dapat Anda katakan atau ramalkan untuk kasus distribusi muatan dalam selinder, seandainya ion berlawanan terdistribusi di sekitar suatu batang selinder (misalkan pada molekul linier)? Hati-hati membuat

penjelasan, karena hal terakhir tidak sama dengan kedua kasus sebelumnya. Apakah di samping awan Debye-Hueckel terdapat pula kasus lain yang mengandung solusi persamaan tanpa i ? Lihat kembali teori gelombang dan potensial sehingga akan Anda peroleh gambaran yang baik tentang hal itu. Apa artinya jika solusi mengandung i dan tanpa i ? Dalam mekanika kuantum terdapat perbedaan sangat "dramatis" jika solusi suatu persamaan mengandung i dan tidak (sempatkan diri Anda untuk melihat kembali § 16 untuk menyelesaikan persoalan ini). Apakah sesungguhnya hal itu tidak berhubungan dengan pelajaran getaran dan gelombang?

Soal-Soal § 6.5

6.5.1 Mengapa ion berpengaruh sebagai tetesan kondensasi pada peristiwa uap air? Untuk kepentingan apa sebenarnya penjelasan ini? Apakah efek ini mempunyai peran penting secara meteorologi? Pelajari hal ini dengan seksama secara kuantitatif!

6.5.2 Dalam jam gelas dimasukkan tetesan Hg yang dicairkan dengan asam sulfat maka Hg akan berbentuk datar seketika. Kemudian masukkan sebuah jarum ke dalam asam sulfat hingga menyentuh Hg. Terlihat bahwa tetesan tersebut akan kembali menghindar ujung jarum dan bentuknya berubah menjadi bola. Akan tetapi, beberapa saat kemudian kembali berbentuk datar seperti itu dan akan menyentuh jarum kembali. Perubahan bentuk tetesan Hg ini terjadi secara periodik. Buatlah percobaan demikian dan jelaskan peristiwa tersebut!

Bab 7

Elektrodinamika

7.1 Medan Magnet Arus Listrik

7.1.1 Persamaan Maxwell

Elektrodinamika secara umum membahas interaksi antara medan listrik dan magnet. Patut pula diketahui bahwa medan listrik yang dimaksud dibedakan antara E dan D , bergantung pada gaya-gaya yang bekerja pada sebuah muatan atau sebaliknya, timbulnya medan karena adanya muatan. Dari hubungan yang erat, medan magnet juga dibedakan antara B dan H . Hubungan keduanya, baik medan listrik maupun magnet, bergantung pada sifat bahan dan pada umumnya (tidak seluruhnya) sebanding dengan konstanta sifat bahan

$$D = \epsilon \epsilon_0 E, \quad B = \mu \mu_0 H$$

ϵ dan μ adalah konstanta bahan, ϵ_0 dan μ_0 digunakan bergantung pada satuan yang dipakai, yaitu sebagai faktor konversi.

Seperti halnya medan listrik yang ditimbulkan oleh muatan, medan magnet muncul karena adanya arus listrik. Selain itu, pada medan listrik yang berubah-ubah juga akan menimbulkan medan magnet dan sebaliknya. Seperti kenyataannya, James Clerk Maxwell merumuskan hal tersebut dalam empat rumus dasar yang melingkupi seluruh rumusan peristiwa listrik, magnet, serta optik. Dalam pembahasan ini akan ditulis rumusan tersebut secara aksiomatik, sebelum dibahas lebih jauh arti sebenarnya masing-masing persamaan tersebut.

$$\left. \begin{aligned} H &= \dot{D} + j, & \nabla \times E &= -\dot{B} \\ \nabla \cdot D &= \rho & \nabla \cdot B &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Kerapatan arus j umumnya (tetapi tidak semua) bergantung pada bagaimana bahan berinteraksi dengan E , yaitu berdasarkan hukum Ohm sebagai berikut.

$$j = \sigma E \quad (7.2)$$

Di samping ditulis dalam bentuk diferensial seperti pada persamaan [7.1], persamaan Maxwell juga dapat ditulis dalam bentuk integral. Kedua bentuk rumusan tersebut (diferensial dan integral) dihubungkan melalui relasi Gauss dan Stoke. Pada setiap vektor $a(r)$ berlaku untuk setiap volume V dan luas permukaan yang menyelubunginya hubungan

$$\oint_S a \cdot df = \int_V \nabla \cdot a \cdot df \quad (7.3)$$

demikian pula berlaku untuk setiap, dalam hal ini bukan permukaan

tertutup S , kurva yang membentuk permukaan tertutup tersebut, yaitu K berlaku

$$\oint_K \mathbf{a} \cdot d\mathbf{S} = \int \nabla \mathbf{a} \cdot d\mathbf{f} \quad (7.3a)$$

Jika Q adalah muatan total yang terdapat di dalam volume, V dan I adalah arus listrik yang keluar melalui permukaan S , maka bentuk integral persamaan Maxwell dapat ditulis menjadi sebagai berikut.

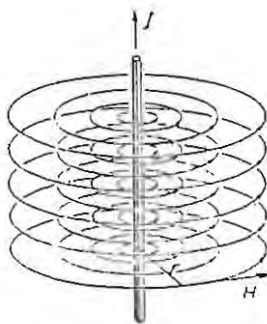
$$\left. \begin{aligned} \oint_K \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} &= \int_S \dot{\mathbf{D}} \cdot d\mathbf{f} + I, & \oint_K \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} &= - \int_S \dot{\mathbf{B}} \cdot d\mathbf{f} \\ \oint_{S'} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{f} &= Q & \oint_{S'} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{f} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.4)$$

Dari notasi yang digunakan, persamaan di atas berlaku untuk medium "diam". Untuk muatan yang bergerak akan bekerja gaya-gaya yang berbeda, dibandingkan dengan gaya yang terdapat pada medium diam. Jika suatu medan magnet dikonstantisasi, diberikan pada cairan bermuatan yang mengalir, untuk seorang pengamat yang berada bersamaan dengan cairan tersebut tidak akan mengalami arus dan medan magnet. Jika seseorang pengamat terbang melalui suatu daerah yang terdapat medan listrik berubah-ubah di setiap tempat, pada pengamat bekerja perubahan medan listrik terhadap waktu, $\dot{E}$, yang juga akan dialami oleh seorang pengamat diam. Selain itu, terdapat pula tambahan pada pengamat pertama, yaitu kecepatan gerak pengamat dan inhomogenitas medan. Persamaan Maxwell ternyata berlaku untuk semua kerangka koordinat acuan (sistem referensi), dapat dibuktikan jika dibuat transformasi medan terhadap koordinat dan arus total yang berasal dari arus hantaran (terhadap muatan medium bergerak) dan arus konveksi (dengan muatan yang bergerak karena medium bergerak). Dalam hal itu, gaya Lorentz secara eksak dapat diturunkan dari gaya Coulomb. Transformasi seperti itu akan dibahas lebih rinci dalam terori relativitas.

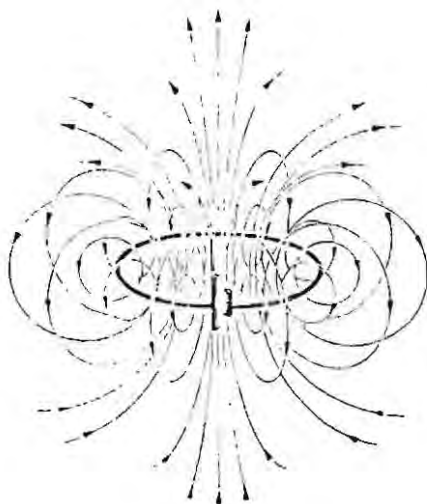
7.1.2 Medan Magnet Arus Listrik

Di sekeliling sebuah konduktor yang mengalirkan arus listrik, muatan akan mengalami gaya-gaya yang pada umumnya lebih besar dari pada gaya elektrostatis. Jika arah gaya-gaya tersebut berbeda dengan gaya elektrostatis yaitu selalu pada arah tangensial kurva tertutup. Gaya magnetik itu secara kualitatif mudah dibuktikan melalui taburan bubuk halus besi. Gaya itu berhubungan dengan medan magnet dan menunjukkan arah gaya magnetik. Untuk mengetahui gaya tersebut, secara kuantitatif dapat digantungkan jarum kompas yang dapat menunjukkan adanya "torsi elastik". Dari arah jarum penunjuk dapat diketahui arah medan magnet dan dari momen putar yang dialami jarum menunjukkan besarnya medan magnet.

Sebuah kawat lurus yang dialiri arus listrik terdapat medan magnet di sekelilingnya dan garis-garis gaya medan tersebut adalah garis-garis



Gambar 7.1 Garis-garis medan magnet di sekitar penghantar kawat lurus misalnya, yang dialiri arus listrik.

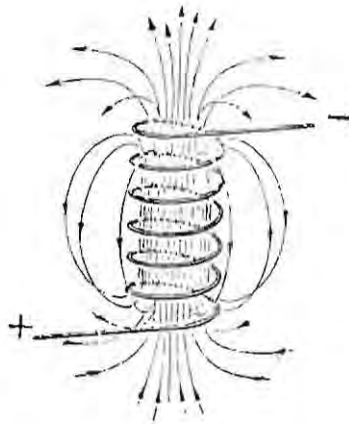


Gambar 7.2 Garis-garis medan magnet di sekitar penghantar berbentuk lingkaran.

berbentuk lingkaran dengan sumbu kawat sebagai pusat lingkarannya, lingkaran-lingkaran tersebut berada pada bidang yang tegak lurus terhadap kawat (J. Oersted, 1820: gambar[7.1]).

Pengamatan kuantitatif menunjukkan bahwa gaya dan juga kuat medan magnetik H , yang nantinya didefinisikan lebih rinci, sebanding dengan kuat arus dan berbanding dengan jarak tempat kuat medan diukur terhadap titik pusat kawat:

$$|H| = C \frac{I}{r} \quad (7.5)$$



Gambar 7.3 Medan magnet sebuah penghantar membentuk lilitan panjang.

Konstanta C tentunya bergantung pada satuan yang digunakan yaitu satuan I dan r yang terukur

Gambar[7.2] menunjukkan gambaran garis-garis gaya yang terdapat pada kawat melingkar yang dialiri arus listrik.

Medan magnet yang ditimbulkan arus listrik selalu mempunyai garis-garis medan tertutup, berlawanan dengan medan listrik yang selalu berawal

dari muatan positif (*sumber*) dan berakhir di muatan negatif (*penerima*). Hal ini mempunyai arti bahwa "muatan magnetik" tidak mempunyai peran serta.

Pada §7.5.4 akan ditunjukkan bahwa magnet statik yang berasal dari *magnet permanen* tidak mempunyai "muatan magnetik".

7.1.3 Fluks Magnetik

Akan ditunjukkan bahwa medan magnet yang ditimbulkan oleh penghantar yang dialiri arus listrik dapat dijelaskan melalui persamaan Maxwell pertama dan keempat. Diketahui bahwa garis-garis medan magnet selalu tertutup karena magnet tidak mempunyai sumber dan penerima, sesuai dengan pernyataan persamaan Maxwell . Jika di suatu tempat terdapat hasil kali akan terdapat jumlah garis-garis medan magnet yang keluar lebih banyak dibandingkan dengan garis-garis yang masuk ke dalam elemen volume yang sama, atau dengan perkataan lain, di dalam elemen volume tersebut terdapat "muatan magnet". Hal itu, kenyataannya, tidak pernah terjadi sesuai dengan persamaan Maxwell keempat

Pada persamaan Maxwell pertama, suku $\nabla \cdot \mathbf{B}$ akan "menghilang" (sama dengan nol) untuk kasus arus serbasama (*homogen*) sehingga akan terdapat medan magnet yang konstan. Dengan demikian berlaku

$$\oint_K \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} = I \quad (7.6)$$

Persamaan [7.6] adalah integral garis kuat medan magnet pada kurva tertutup K , yaitu sama dengan arus yang mengalir membentuk luas tertutup S (hukum fluks magnetik atau hukum rangkaian ampere).

Untuk mengevaluasi persamaan (7.6) tentunya bergantung pada luas S yang membentuk garis tertutup K . Untuk sebuah kawat lurus, S adalah kawat luas kawat berjari-jari r yang terletak tegak lurus terhadap sumbu kawat. Berdasarkan sifat simetri, H pada sisi lingkaran adalah sama di

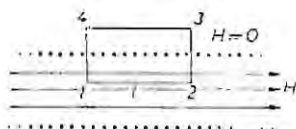
semua tempat. Karena semuanya terletak pada arah tangensial terhadap luas lingkaran tersebut, integral garis sepanjang garis sisi lingkaran K adalah $\oint H \cdot S = 2\pi rH$. Integral ini, berdasarkan persamaan[7 6] haruslah sama dengan arus I yang mengalir pada kawat tersebut. Oleh karena itu, didapat

$$2\pi rH = I \quad \text{atau} \quad H = \frac{I}{2\pi r}$$

Persamaan di atas sama dengan persamaan[7 5], dengan C dapat diperoleh dari persamaan Maxwell.

Contoh lainnya yang juga penting adalah medan magnet yang terdapat pada lilitan kawat panjang yang dialiri arus listrik (gambar[7.3]). Kawat tersebut sedemikian panjang sehingga medan magnet yang terdapat di luar lilitan, dengan berkurangnya panjang kawat akan semakin merentang lebar dibandingkan dengan medan magnet yang terdapat di dalam lilitan sehingga medan magnet tersebut dapat diabaikan. Di dalam daerah lilitan yang jauh dari ujungnya, medan-medan yang berasal dari tiap lingkaran lilitan akan tumpang-tindih satu dan lain sehingga di daerah tersebut terdapat medan yang mendekati homogen sebesar H . Akan dicari berapa besar medan di daerah tersebut, jika di dalam lilitan mengalir arus sebesar I .

Misalkan integritas sepanjang K dicari dengan menggunakan



Gambar 7 4 Perhitungan medan magnet pada sebuah kumparan berdasarkan hukum fluks garis-garis medan magnet.

segi empat (lihat gambar[7.4]). Pada kumparan terdapat n lilitan. Arus total yang mengalir pada kumparan adalah sama dengan nI . Pada lintasan $1 \rightarrow 2$, sebagai bagian integral garis, akan menghasilkan $\oint H ds = HI$.

(H dan s mempunyai arah yang sama). Pada lintasan $2 \rightarrow 3$ dan $4 \rightarrow 1$, hasil integrasi garis mempunyai harga sama dengan nol karena $H \perp s$ (lihat gambar[7.5]); lintasan $3 \rightarrow 4$ juga tidak menghasilkan harga integral garis karena medan yang terdapat di luar kumparan adalah sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Oleh karena itu, hasil integral garis seluruhnya adalah sama dengan $H l$ dan dari persamaan[7.6] akan menghasilkan

$$H \cdot l = n I \quad \text{atau} \quad H = \frac{n}{l} I \quad (7.7)$$

Kuat medan magnet di dalam kumparan bergantung pada arus yang dialirkan dan kerapatan lilitan n/l , yaitu jumlah lilitan per satu satuan panjang. Sebaliknya, jari-jari lilitan tidak mempengaruhi kuat medan magnet pada kumparan, selama jari-jari kecil dibandingkan dengan panjang kumparan.

Berdasarkan persamaan[7.5] dan [7.7], kuat medan magnet mempunyai dimensi [arus]/[panjang] dengan satuan $A m^{-1}$ (di dalam istilah teknik sering disebut sebagai *ampere lilitan per meter*).

Medan magnet di permukaan bumi, pada jarak jari-jari rata-rata bumi adalah sekitar $15 A m^{-1}$.

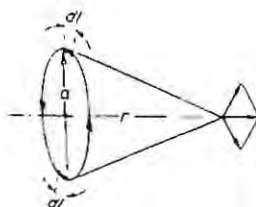
Dalam sistem satuan CGS satuan kuat medan magnet adalah Oersted (Oe) dan dapat dicari hubungannya dengan sistem satuan SI sebagai berikut

$$1 \text{ Oe} = \frac{1000}{4\pi} = 79,59 A m^{-1} \quad (7.8)$$

Jika ingin diketahui kuat medan magnet, secara prinsip dapat dilakukan sebagai berikut. Di tempat medan magnet yang akan diukur ditempatkan sebuah kumparan yang panjangnya jauh lebih besar dibandingkan dengan ukuran jari-jarinya dan pada kumparan tersebut digantungkan sebuah *torsi elastik*, yaitu sebuah jarum magnet. Kemudian ubah sumbu kumparan dan kuat arus selama mungkin sehingga jarum magnet tidak lagi mengalami momen putar. Arah kumparan menunjukkan arah kuat medan magnet, yaitu sebagai hasil kali antara kuat arus dan jumlah lilitan per satuan panjang.

Perhitungan medan magnet pada sebuah lingkaran yang dialiri arus listrik I dan jari-jari R pada jarak r di sumbu lingkaran (lihat gambar[7.5]) sedikit lebih sukar dari perhitungan medan magnet yang telah dilakukan di atas, yaitu

$$H = \frac{I}{2R} \quad (7.9)$$



Gambar 7.5 Kuat medan magnet pada sumbu kawat berbentuk lingkaran yang dialiri arus listrik (bagian kiri lingkaran di depan bidang gambar)

Persamaan[7.7.] dan [7.9] adalah bentuk khusus persamaan umum kuat medan magnet di sepanjang sumbu kumparan berbentuk selinder, berjari-jari R , dengan panjang L dan jumlah lilitan adalah N

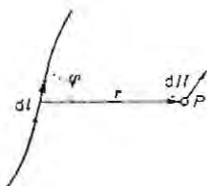
$$H = \frac{NI}{\sqrt{R^2 + L^2}} \quad (7.10)$$

7.1.4 Formulasi Biot-Savart dan Fluks Medan Magnet

Medan magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik dapat dibayangkan melalui bagian konduktor yang dialiri arus listrik. Elemen panjang sebuah penghantar listrik dl yang dialiri arus listrik sebesar I , pada jarak r akan

menghasilkan medan sebesar

$$dH = \frac{1}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \sin \alpha$$



Gambar 7.6: Perhitungan medan magnet dengan hukum Biot-Savart.

atau

$$d\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi r^3} \mathbf{r} \times d\mathbf{l} \quad (7.11)$$

α adalah sudut yang dibentuk oleh $d\mathbf{l}$ dan $\mathbf{r}$. Arah $d\mathbf{H}$ selalu tegak lurus terhadap $d\mathbf{l}$ dan $\mathbf{r}$ (gambar[7.6]). Hukum ini tentunya ekuivalen dengan hukum fluks yang telah dibicarakan sebelumnya dan perhitungan seperti ini dapat pula digunakan untuk berbagai macam konduktor yang berbeda. Kadang-kadang untuk satu penghantar dan penghantar lainnya dapat dilakukan perhitungan dengan cara yang berbeda.

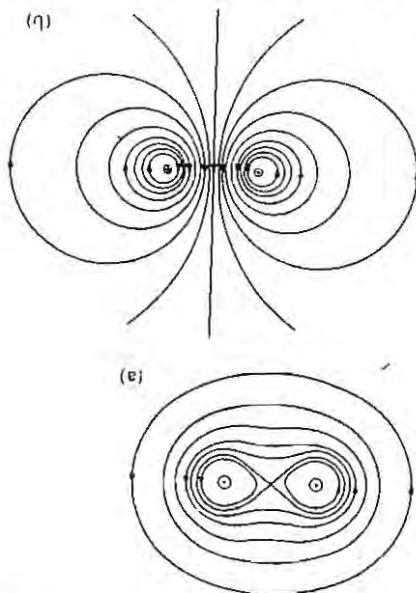
7.1.5 Tegangan Magnetik

Analog dengan tegangan listrik antara titik 1 dan 2 (lihat §6.1.3),

tegangan magnet dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut

$$U_m = \int_1^2 \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s}$$

Dimensinya adalah [kuat arus]/[sepanjang].[panjang]=[kuat arus] dan satuannya dinyatakan dalam A (ampere). Berbeda dengan tegangan listrik,



Gambar 7.7 a) dan b) menggambarkan garis-garis medan magnet dua konduktor yang dialiri arus yang sama: a) arah arus sama dan b) arahnya berlawanan.

tegangan magnet U_m tidak bergantung pada jalan integrasi yang dipilih. Misalnya titik 1 dan 2 terletak saling berdekatan satu dan lainnya maka jika dilakukan integrasi dengan memilih jalan terpendek, diperoleh harga $U_m \approx 0$. Apabila integrasi dilakukan berulang-ulang, dengan menggunakan persamaan [7.6] hingga z kali, diperoleh bahwa $U_m = zI$. Dengan menggunakan alat pengukur tegangan magnetik, dengan mempunyai kekhasannya, dapat dilakukan pengukuran arus listrik tanpa menyentuh penghantar.

7.1.6 Gaya Antarkawat Berarus Listrik

Gambar[7.7] a) dan b) menggambarkan garis-garis medan magnet dua kawat konduktor sejajar, masing-masing dengan arah arus sama dan berlawanan. Gambaran garis gaya medan magnet, berdasarkan penjelasan yang dibuat Faraday mempunyai arah yang saling berlawanan, yaitu dapat saling mengganggu pada arah tegak lurus (lihat §6.1.2). Dari gambaran di atas dapat disimpulkan melalui pernyataan berikut: *Arus yang mengalir saling sejajar pada dua konduktor akan menyebabkan konduktor tarik-menarik sedangkan jika arus berlawanan, kedua konduktor tolak-menolak satu sama lain.* Lilitan yang terdapat pada sebuah kumparan akan tarik-menarik, karena arah arus yang mengalir di dalamnya sama. Perhitungan kuantitatif tentang gaya-gaya yang bekerja pada konduktor yang dialiri arus listrik akan dibicarakan lebih rinci pada §7.2.7.

7.2 Induksi Elektromagnetik

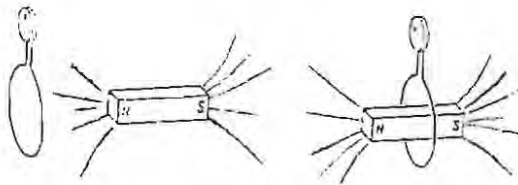
Istilah induksi elektromagnetik sering diasosiasikan dengan pengaruh tegangan magnet yang timbul akibat adanya medan magnet yang berubah terhadap waktu. Peristiwa induksi ini diungkap pertama kali oleh Michael Faraday pada tahun 1831 melalui percobaan jenius sederhana yang dibuat olehnya dan akan dibahas pada bab selanjutnya.

7.2.1 Percobaan Induksi Faraday

Sebuah kawat konduktor yang dililitkan, kedua ujung-ujung kawat tersebut dihubungkan dengan sebuah galvanometer balistik yang mempunyai jarum penunjuk dapat bergerak amat lamban dibandingkan dengan perubahan aliran arus yang dapat mengubah jarum tersebut (lihat §7.2.6). Galvanometer demikian dapat menunjukkan adanya arus listrik selama percobaan dilakukan. Percobaan pertama dilakukan dengan menggunakan sebuah batang magnet permanen, terbuat dari bahan besi.

Medan magnetnya praktis sama dengan medan magnet yang timbul pada kawat yang dialiri arus listrik, yaitu mengisi seluruh ruang. Keberadaan medan magnet tersebut dapat diuji dengan meletakkan jarum magnet atau pasir besi di dekat batang magnet (lihat §7.1.2). Jika jarum tersebut diletakkan secara "bebas", ujungnya yang ditandai dengan huruf *N* sebagai kutub utara akan menunjukkan arah Utara.

1. Jika kawat berlilitan tunggal tersebut didekatkan ke kutub Utara magnet permanen, jarum galvanometer balistik akan bergerak menunjukkan simpangan, menandakan adanya arus yang mengalir di dalam lilitan. Simpangan pada galvanometer tersebut tidak bergantung pada kecepatan kawat lilitan yang digerak-gerakkan di dalam medan magnet permanen.



Gambar 7.8 Adanya arus induksi dengan menggeser batang magnet permanen ke dalam kawat berbentuk lingkaran. Adanya arus induksi pada kawat dapat diketahui dengan menghubungkan kawat dengan galvanometer balistik.

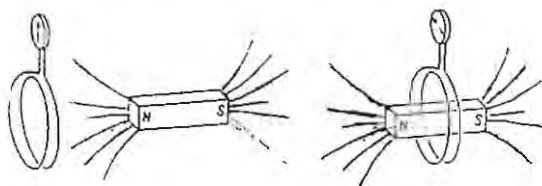
Hal ini mempunyai arti bahwa pada kawat lengkung terdapat "sejumlah muatan listrik" yang dipindahkan ke galvanometer dan hanya bergantung pada posisi ujung dan akhir kutub magnet.

2. Jika lilitan didekatkan ke magnet permanen, tetapi tidak melalui kutub Utara, melainkan melalui kutub Selatan, akan diamati adanya simpangan jarum galvanometer pada arah yang berlawanan dibandingkan dengan percobaan pada pertama.

3. Jika batang magnet dijauhkan kembali dari lilitan kawat, jarum penunjuk pada galvanometer akan bergerak membentuk simpangan pada arah yang berlawanan, lebih besar daripada saat batang magnet berada di

tengah-tengah lilitan kawat. Peristiwa itu menunjukkan bahwa gerak muatan di dalam kawat berlawanan arah.

4. Jika diambil dua batang magnet yang sama, simpangan jarum galvanometer menunjukkan dua kali lebih besar.

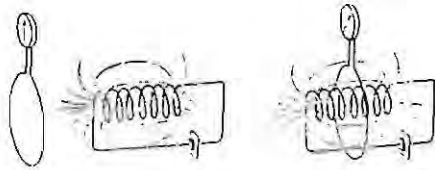


Gambar 7.9 Dua lilitan kawat yang diperlakukan seperti percobaan pada gambar[7.8] menghasilkan simpangan dua kali lebih besar.

5 Kemudian lilitan kawat tunggal diganti dengan dua lilitan kawat lain atau n lilitan (kumparan dengan 2 atau n lilitan), dapat diamati bahwa simpangan jarum galvanometer menjadi 2 atau n kali lebih besar dibandingkan dengan menggunakan sebuah kawat (lihat gambar[7.9]).

6 Apabila sumber medan magnet diganti dengan menggunakan kumparan yang dialiri arus listrik, akan dapat diamati peristiwa yang sama seandainya kumparan didekatkan atau dijauhkan dari lilitan kawat (lihat gambar[7.10]). Dengan memberikan kuat arus dua kali lebih besar, simpangan jarum menjadi dua kali lebih besar. Kesimpulan yang dapat diambil dari percobaan ini adalah bahwa muatan yang bergerak di dalam lilitan kawat adalah sebanding dengan kuat arus yang mengalir di dalam kumparan sumber medan magnet.

7. Percobaan selanjutnya adalah dengan memasukkan kumparan sumber medan magnet lebih dalam ke tengah-tengah lilitan kawat. Diketahui bahwa jarum galvanometer menunjukkan simpangan yang sama, seperti kumparan sumber medan magnet berada jauh di luar lilitan kawat (lihat gambar[7.11]).

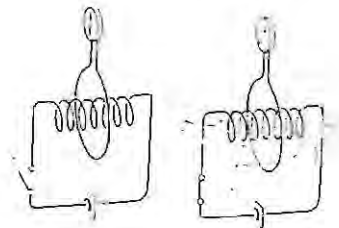


Gambar 7 10 Sebuah kumparan yang dialiri arus listrik menginduksikan medan magnet pada lilitan. seperti pada batang magnet.

8. Penambahan lilitan pada kawat akan menyebabkan pengaruh yang sama seperti pada percobaan nomor 5.

9. Jika lilitan kawat ditempatkan di dalam ruang bebas yang terdapat medan magnet (misalnya ditempatkan di antara dua kutub magnet), jarum galvanometer juga menunjukkan simpangan yang sama dan berlawanan arah sebanding dengan simpangan galvanometer pada kawat lilitan yang terletak jauh dari jangkauan medan magnet.

10. Apabila kumparan objek dirotasikan di dalam medan magnet (lihat gambar[7.12]) sedemikian rupa sehingga penampang lintang kumparan objek tepat tegak lurus terhadap garis-garis medan magnet sehingga garis-garis medan menembus penampang lintang kumparan. Dengan demikian, jarum galvanometer balistik akan menunjukkan simpangan yang sama

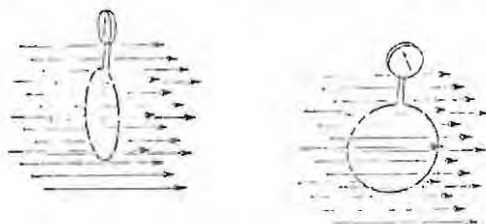


Gambar 7 11 Jika kumparan ditempatkan di dalam lilitan, di dalam lilitan akan mengalir arus listrik dan menyebabkan simpangan pada galvanometer balistik seperti kumparan digerakkan di dalam lilitan dari kiri ke kanan.

seperti kumparan berada di tempat yang cukup jauh dari medan magnet. Jika kumparan objek diputar 180° dari posisi semula hingga garis-garis medan menembus kumparan di permukaan bagian belakangnya, ternyata simpangan jarum galvanometer menunjukkan dua kali lebih besar.

11. Jika luas permukaan kumparan diubah-ubah di dalam medan magnet konstan, yaitu dengan cara menarik atau menekannya, jarum galvanometer juga tetap menunjukkan simpangan (lihat gambar[7.13]). Apabila permukaan yang dibentuk kumparan objek diperkecil hingga luasnya bisa dikatakan sama dengan nol, galvanometer tetap menunjukkan simpangan, seperti kumparan dijauhkan dari medan magnet ke tempat yang jauh tanpa medan magnet.

12. Jika di tengah-tengah kumparan yang dialiri arus konstan terdapat batang (inti) magnet (gambar[7.11], kanan) galvanometer tetap menunjukkan adanya simpangan berkali-kali lebih besar dibandingkan dengan simpangan pada saat arus mulai dialirkan di dalam kumparan.



Gambar 7 12 Induksi yang terjadi pada lilitan yang diputar di dalam ruang dengan medan magnet homogen.



Gambar 7 13 Induksi yang terjadi pada lilitan yang permukaannya diubah.

13. Pada semua percobaan di atas, galvanometer balistik dapat diganti dengan sebuah voltmeter elektrostatik (misalnya elektrometer kawat; §6.1.5c). Dengan menggunakan voltmeter, simpangan yang menunjukkan arus pada galvanometer menjadi simpangan yang senilai dengan penunjuk arus pada galvanometer.

7.2.2 Hukum Induksi Magnet

(Persamaan Maxwell kedua)

Percobaan nomor 1 hingga 11 di atas dapat dijelaskan sebagai berikut.

Jika di dalam lilitan tertutup terdapat perubahan medan magnet yang mempengaruhi lilitan tersebut, akan timbul arus listrik di dalam lilitan selama terjadinya perubahan medan magnet. Muatan listrik yang bergerak di dalam lilitan hanya bergantung pada posisi ujung-ujung kutub magnet dan orientasi garis-garis medan magnet terhadap lilitan.

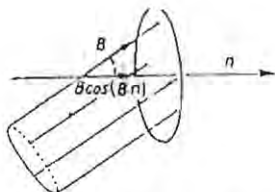
Percobaan nomor 13 membuktikan bahwa adanya perubahan medan magnet menyebabkan timbulnya tegangan yang terjadi hanya jika lilitan merupakan lingkaran penghantar listrik tertutup (misalkan melalui sebuah galvanometer balistik) dapat diamati adanya arus yang mengalir.

Percobaan 12. (timbul arus listrik dengan mengalirkan arus konstan pada kumparan sumber magnet) membuktikan bahwa tidak cukup hanya karena adanya kuat medan magnet yang dapat menimbulkan induksi, melainkan terdapat sesuatu yang lain yang erat hubungannya satu sama lain (kebanyakan bahkan mempunyai arah yang sama) yaitu vektor $\mathbf{B}$ yang disebut *medan magnet induksi* atau *fluks medan magnet* (lihat pembahasan di bawah).

Persamaan Maxwell kedua (*hukum induksi*) dapat disimpulkan dalam persamaan

$$\oint_K \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = - \oint_S \dot{\mathbf{B}} \cdot d\mathbf{f} \quad (7.12)$$

Ruas kanan persamaan di atas mengandung perubahan medan magnet



Gambar 7.14 Definisi fluks medan magnet induksi

induksi melalui lilitan yang membentuk kurva K . Dengan perkataan lain, sebagai perubahan fluks magnetik:

$$\Phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{f} \quad (7.13)$$

Untuk medan homogen dan permukaan lilitan yang tegak lurus dengannya, berlaku bahwa $\Phi = BS$.

Keadaan yang diilustrasikan sebelah kanan gambar [7.12], pada lilitan kawat selalu terdapat tegangan total induksi yang sama dengan perubahan medan magnet induksi. Tanda negatif yang diberikan menyatakan arah bertambah vektor medan magnet induksi dengan medan listrik pada kawat lilitan dan berhubungan dengan *aturan tangan kanan* (lihat §7.1.1 dan §7.2.10). Medan listrik induksi adalah berlawanan dengan medan listrik statik yang ditimbulkan muatan dan mempunyai garis-garis gaya medan tertutup. Dapat pula diamati, berdasarkan persamaan [7.12] bahwa di seluruh ruang selalu terdapat medan listrik induksi, juga apabila dilakukan pengamatan tanpa penghantar, tetap dapat menimbulkan arus listrik.

Gambar [7.15a] dan b menunjukkan kurva tegangan induksi terhadap waktu untuk batang magnet yang digerakkan perlahan. Luas kurva yang diarsir menggambarkan adanya tegangan dan keduanya mempunyai harga yang sama.

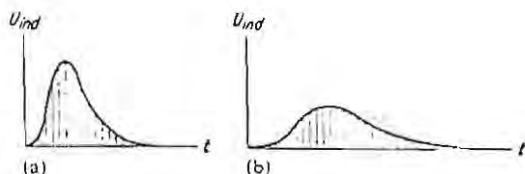
$$\int_{t_1}^{t_2} U dt = + \int_{t_1}^{t_2} \Phi dt = \Phi_2 - \Phi_1 \quad (7.14)$$

adalah sama dengan perubahan garis-garis medan sebelum dan setelah terjadi perubahan. Seperti secara sederhana ditunjukkan oleh persamaan [7.14], Φ mempunyai satuan V.det, atau induksi magnetik mempunyai dimensi [tegangan]/[luas] dan satuannya adalah Tesla = T = V.det.m⁻².

Dalam sistem satuan CGS B dinyatakan dalam "Gauss" (G)"

$$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ V} \cdot \text{det} \cdot \text{m}^{-2} \quad (7.15)$$

Induksi magnetik secara prinsip dapat diukur dengan cara sebagai berikut. Tempatkan sebuah lilitan kawat dengan ukuran sekecil mungkin di dalam ruang yang terdapat medan magnet. Lilitan tersebut dihubungkan dengan sebuah voltmeter. Atur posisi permukaan lilitan sedemikian rupa sehingga akan terbaca tegangan yang cukup besar pada saat terdapat medan induksi. Arah normal terhadap permukaan lilitan adalah arah medan magnet induksi B , tegangan dikali waktu (V.det) dibagi dengan luas permukaan lilitan adalah memberikan besarnya harga medan magnet induksi B .



Gambar 7.15 a) dan b). Tegangan induksi sebagai fungsi perubahan laju fluks magnetik.

7.2.3 Hubungan Antara Induksi Magnetik dan Kuat Medan Magnet

Pada 7.2.1 dijelaskan bahwa terdapat hubungan antara medan magnet induksi B yang berubah terhadap waktu dengan medan listrik induksi dan juga dengan kuat medan magnet H yang memberikan arus konstan. Jika pada suatu tempat terdapat B , diberikan seperti ilustrasi di atas dengan menggerakkan kawat lilitan di dalam medan magnet, dan H diberikan seperti pada §7.1.2 melalui sebuah kumparan dan jarum magnet, di dalam ruang "bebas" tersebut terdapat hubungan kesebandingan keduanya yaitu:

$$B = \mu \mu_0 H \quad (7.16)$$

μ_0 adalah konstanta universal alamiah, disebut *konstanta induksi* atau *konstanta medan magnet*. Dimensinya, seperti dinyatakan pada §7.2.2. dan §7.1.3, adalah [tegangan].[waktu]/[arus].[panjang], harganya

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{det} \cdot \text{A}^{-1} \text{m}^{-1} \quad (7.17)$$

Juga untuk bahan, kecuali ferromagnetisme (lihat §7.5.4), berlaku pula hubungan proporsionalitas antara B dan H , yaitu masih bergantung pada faktor proporsionalitas lainnya. Untuk suatu bahan hubungan keduanya ditulis dalam bentuk:

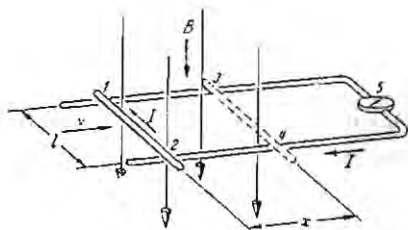
$$B = \mu_0 H \quad (7.18)$$

Konstanta tanpa dimensi disebut *permeabilitas relatif*, yang untuk bahan-bahan lainnya, kecuali bahan ferromagnetik, harganya lebih kecil daripada 1 (lihat §7.5.2 dan §7.5.3). Terlepas dari harga konstanta dielektrik untuk berbagai bahan sebagai konstanta proporsionalitas

antara D dan E yang mempunyai harga selalu lebih besar dari 1, hubungan antara B dan H adalah analog dengan hubungan D dan E .

7.2.4 Gaya Pada Konduktor Karena Medan Magnet

Dua kawat paralel, terbuat dari bahan konduktor yang baik, berjarak l satu sama lainnya dengan permukaan datar yang dibentuk keduanya dilalui, pada arah tegak lurus, medan magnet homogen dan salah satu ujung keduanya dihubungkan dengan alat pengukur arus (gbr[7.16]).



Gambar 7.16 Gambar tentang timbulnya tegangan induksi di dalam kawat lurus, yang digeser-geser di dalam medan magnet pada arah tegak lurus.

Di antara dua kawat tersebut diletakkan melintang sebuah batang atau kawat yang terbuat dari bahan yang mirip kawat paralel tersebut yang dapat digerakkan ke dua arah dengan kecepatan konstan sebesar v . Misalkan dalam waktu t batang digerakkan sejauh x . Permukaan yang dibentuk oleh kawat dan batang, yaitu 1, 3, 5, 4, 2 (lihat gambar[7.16]), menyebabkan segi empat 1, 2, 3, 4, dengan magnet yang lewat di dalamnya mengecil, sebesar $\Delta\Phi = Blx$ (lihat persamaan[7.13]). Dengan menggunakan persamaan[7.12] akan terlihat bahwa pada konduktor terdapat tegangan induksi sebesar:

$$U_{\text{ind}} = Blv$$

Tegangan ini akan menimbulkan arus induksi sebesar I dan jika dinyatakan dalam daya Joule adalah

$$P_{\text{list}} = U_{\text{ind}} I = B l v I$$

yaitu sama dengan daya yang dibebaskan ke dalam konduktor. Daya itu tidak muncul dari sesuatu begitu saja. Satu-satunya pemikiran sumber energi yang menyebabkan timbulnya daya tersebut terletak pada kerja mekanik yang berasal dari proses menggerakkan batang. Sebaliknya, pada batang haruslah terdapat gaya yang melawan arah geraknya sehingga daya mekanik berubah menjadi daya listrik:

$$P_{\text{mek}} = F v = P_{\text{list}} = B l v I$$

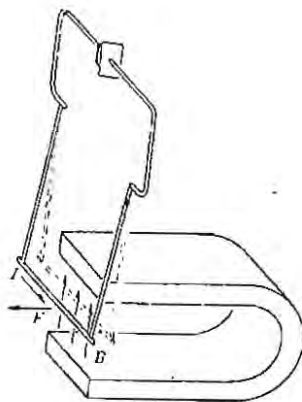
gaya yang bekerja pada batang adalah sebesar:

$$F = B I l$$

Jika batang tidak terletak tegak lurus terhadap garis-garis fluks induksi, melainkan membentuk sudut ϕ , medan magnet induksi akan berkurang dengan faktor $\sin \phi$. Demikian pula dengan daya dan gaya. Berdasarkan pembicaraan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa arah gaya tersebut adalah tegak lurus terhadap batang maupun garis-garis gaya medan magnet.

Dengan demikian, rumusan gaya dapat disederhanakan dalam bentuk formulasi vektor: *Di dalam medan magnet dengan medan magnet induksi B di dalam elemen panjang sebuah konduktor $d\mathbf{l}$ yang dialiri arus listrik I , akan bekerja gaya:*

$$\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (7.19)$$



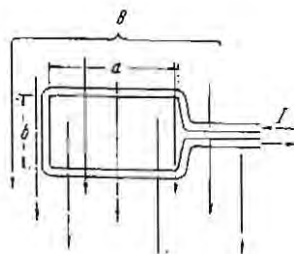
Gambar 7.17 Gaya yang dialami kawat konduktor yang mengalir arus listrik.

Jika ibu jari menunjukkan arah $d\mathbf{l}$ dan jari penunjuk menunjukkan arah garis medan induksi, jari tengah akan menunjukkan arah gaya tersebut. Untuk memperagakan hal itu, biasanya digunakan kawat segi empat yang digantungkan di dekat magnet permanen (gambar[7.17]).

7.2.5 Momen Putar pada Kawat

Suatu permukaan berbentuk segi empat terbuat dari kawat dan diletakkan di dalam medan magnet homogen (gambar[7.18]) Sisi-sisi pendek dan panjang segi empat tersebut masing-masing berukuran a dan b Pada sisi a , berdasarkan persamaan[7.19], bekerja gaya-gaya yang besarnya adalah IaB Lilitan kawat segi empat ini akan mengalami momen putar M terhadap sumbunya sebesar:

$$M = 2IaB \frac{b}{2} = IBS$$



Gambar 7.18 kawat berbentuk segi empat i dalam medan magnet.

dengan $S = ab$ adalah luas kawat segi empat. Secara vektor momen putar ditulis sebagai berikut.

$$\mathbf{M} = I\mathbf{B} \times \mathbf{S} \quad (7.20)$$

$\mathbf{S}$ berada tegak lurus terhadap permukaan lilitan kawat dan panjang sisi-sisinya memberikan harganya. Arah $\mathbf{S}$ bergantung pada arah aliran arus berdasarkan *aturan tangan kanan*. Persamaan [7.20] berlaku untuk berbagai bentuk lilitan kawat dan posisinya.

Suatu lilitan kawat yang berada dalam pengaruh magnet pada jarak yang besar tidak dibedakan oleh momen dipol (§7.1.4) sehingga dapat didekatkan sebagai momen dipol magnetik m_{mag} :

$$m_{\text{mag}} = IS$$

Analogi dengan momen dipol listrik momen dipol magnet didefinisikan sebagai perbandingan antara momen putar dan medan magnet induksi:

$$m_{\text{mag}} = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{B}}$$

Satuannya adalah A m^2

Di dalam fisika atom dan nuklir kebanyakan momen dipol magnet didefinisikan sebagai perbandingan antara momen putar M dan kuat medan magnet H dan selalu dinotasikan dengan simbol μ . Di vakuum momen dipol tersebut ditulis sebagai berikut.

$$M = n I B S$$

Kemungkinan terjadi kesalahan pengertian dengan permeabilitas relatif dalam hal ini adalah sukar dibayangkan. Notasi atau simbol seperti ini juga digunakan dalam pembahasan pada 12.

7.2.6 Pengukur Kuat Arus

1. Galvanometer Kawat (gambar[7.19]). Galvanometer ini dikonstruksi sebagai berikut. Antara kutub magnet permanen atau elektromagnet ditempakan seutas kawat (biasanya logam platina) dengan tebal beberapa μm , pada arah tegak lurus terhadap medan magnet. Pada saat terdapat arus, kawat akan mengalami simpangan (lengkungan) terhadap medan magnet, dan kelengkungan dapat diamati dengan menggunakan mikroskop M . Galvanometer kawat cocok digunakan untuk pengukuran arus listrik yang sangat kecil, misal pada peralatan *elektoradiografi*.

2. Peralatan Kumpanan Berputar (gambar[6.39], §6.3.2 dan gambar[7.19]) terdiri atas dua magnet besi yang di antara keduanya terdapat kumparan berintikan magnet permanen berbentuk selinder. Di dalam celah udara di antara keduanya terdapat garis-garis medan magnet pada arah radial. Di celah tersebut digantungkan sebuah kumparan segi empat dan dapat berputar pada sumbunya. Kumparan ini diletakkan sejajar dengan selinder yang mengandung inti magnet. Tegak lurus terhadap sumbu selinder, pada setiap tempat, terdapat garis-garis gaya medan magnet. Jika mengalir arus pada kumparan, berdasarkan persamaan[7.20], pada kumparan akan terdapat sepasang gaya yang menyebabkan momen

putar sebesar $M = IBS$. per lilitan (S adalah luas permukaan kumparan yang dilalui medan magnet). Jika pada kumparan terdapat n lilitan, akan terdapat momen putar sebesar:

$$M = nI B S \quad (7.20a)$$

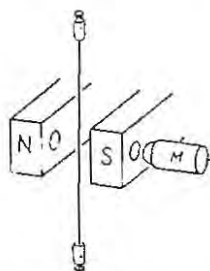
kumparan dapat digantungkan melalui kawat torsi atau ujung atas dan bawah kumparan tersebut digantungkan pada pegas dalam keadaan setimbang. Pada keduanya akan terdapat simpangan sudut kumparan sebesar α dari posisi setimbang momen putarnya. Simpangan itu sebanding dengan momen putar:

$$M = D^* \alpha$$

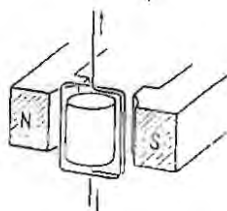
Kumparan karena berada dalam pengaruh pasangan gaya akan mengalami rotasi sebesar:

$$D^* \alpha = n I B S \quad (7.21)$$

Dengan demikian, didapat bahwa simpangan sebanding dengan arus.



Gambar 7.19 Model sebuah galvanometer kawat



Gambar 7.20 galvanometer kumparan.

Sudut putar atau simpangan dapat diukur melalui jarum penunjuk yang dihubungkan dengan kumparan dan diberi skala penunjuk, atau dapat

pula dengan menggunakan berkas cahaya yang direfleksikan lewat cermin yang ditempatkan pada posisi tetap di kumparan (*galvanometer cermin*). Berkas cahaya kemudian dijatuhkan pada skala galvanometer penunjuk (*galvanometer kumparan*) dibuat dengan kalibrasi secara empiris.

Jika arus mengalir melalui sebuah galvanometer, dengan periode getaran arus kecil dibandingkan dengan periode getaran kumparan, terdapat simpangan karena adanya arus sebesar $I dt = Q$ yang sebanding dengan muatan listrik Q . Sistem seperti ini mengandung kecepatan sudut maksimum, walaupun terdapat simpangan atau gangguan sangat kecil dari keadaan setimbangnya yang akan terpengaruh tanpa gangguan gaya luar lainnya. Dengan kecepatan awal tersebut jarum penunjuk galvanometer akan mengalami getaran dengan amplitudo tertentu, sebanding dengannya. Penggunaan alat ini adalah untuk mengetahui jumlah muatan listrik. Peralatan ini disebut *galvanometer balistik*.

7.2.7 Gaya Antara Dua Konduktor

Sementara kelakuan medan magnet di sekitar dua konduktor paralel yang panjangnya tak berhingga dapat dijelaskan menurut hukum fluks magnetik (§7.1.3), gaya-gaya yang bekerja pada keduanya dapat dihitung dengan menggunakan hukum induksi magnetik sehingga didapat hubungan antara medan magnet dan arus $F = BI l$. Jika kedua konduktor berjarak r satu sama lain dan keduanya dialiri arus yang sama besar, di setiap tempat pada masing-masing konduktor terdapat kuat medan magnet sebesar $|H| = I / 2\pi r$ (§7.1.2). Dengan demikian, fluks medan magnet diperoleh sebesar: $|B| = \mu_0 I / 2\pi r$ (untuk vakuum); arahnya fluks medan magnet adalah tegak lurus terhadap bidang yang dibentuk kedua konduktor. Dari persamaan [7.19], pada setiap konduktor dengan panjang l terdapat gaya sebesar:

yang bekerja pada masing-masing konduktor, saling tarik menarik atau tolak menolak, bergantung pada apakah arus searah atau berlawanan

Semua besaran pada persamaan[7.22], selain I dan konstanta universal dapat diukur secara langsung. Melalui pengukuran ini, arus dapat ditentukan secara absolut (lihat pengukuran tegangan absolut, §6.1.5b dan definisi elektromagnetis dari ampere, §7.3.4).

7.2.8 Gaya Pada Muatan Bergerak

(Gaya Lorents)

Gaya yang terdapat pada konduktor yang dialiri arus listrik sebenarnya bekerja karena pada konduktor terdapat muatan elektron konduksi. Dari persamaan[6.73] kuat arus listrik yang terdapat di dalam kawat berpenampang lintang S adalah

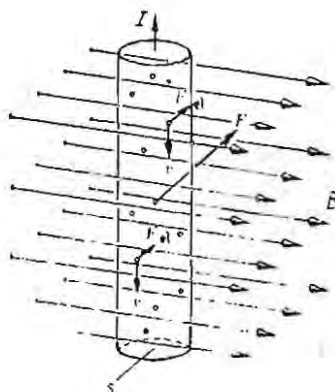
$$I = -n e S v.$$

n adalah kerapatan jumlah elektron, $-e$ adalah muatannya dan v adalah kecepatannya searah kawat. Pada kawat tersebut, elektron-elektron konduksi yang terdapat sepanjang l adalah nSl , menurut persamaan[7.19], akan mengalami gaya.

$$F = Il \times B = -n e S l v \times B.$$

Oleh karena itu, gaya pada setiap elektron adalah

$$F = -e v \times B \quad (7.23)$$



Gambar 7.21 Gaya yang bekerja pada muatan di dalam medan magnet

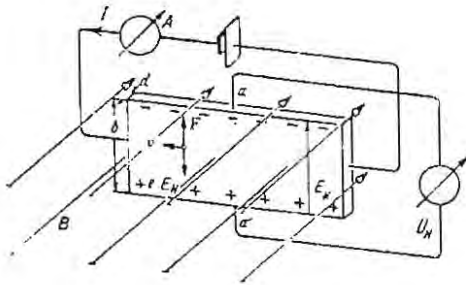
Persamaan vektor di atas menjelaskan pula arah gerak sekaligus. Arah gaya tegak lurus terhadap kecepatan dan medan magnet induksi (dalam hal ini harus digunakan *kaidah tangan kiri*, bukan *kaidah tangan kanan* karena elektron bermuatan negatif). Persamaan [7.23] berlaku untuk semua muatan yang bergerak di dalam medan magnet.

7.2.9 Efek Hall

Sebuah lempengan lebar b dan tebal d , terbuat dari bahan konduktor, dialiri arus listrik. Kemudian lempengan tersebut ditempatkan di dalam medan magnet homogen B dengan garis-garis medan berada tegak lurus terhadap bidang permukaan lempengan (gambar [7.22]). Tanpa medan listrik, di antara titik a dan a' diberikan potensial yang sama dan dengan dihubungkan penunjuk tegangan dapat diketahui tidak terdapat simpangan ($U_H = 0$). Setelah medan magnet diberikan, antara titik a dan a' terdapat tegangan Hall sebesar:

$$U_H = R_H \frac{I B}{d} \quad (7.24)$$

R_H disebut *konstanta Hall*.



Gambar 7 22 Efek Hall.

Di dalam konduktor berbentuk lempengan, setiap pembawa muatan akan mengalami gaya LORENTZ $\mathbf{F} = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ sehingga elektron akan bergerak ke atas sedangkan pembawa muatan positif akan bergerak ke bawah. Muatan-muatan tersebut bergerak selama hingga terdapat medan listrik pada arah melintang E_H . Oleh karena itu, akan terjadi keadaan setimbangan sehingga tidak terdapat arus yang mengalir pada arah melintang di dalam konduktor. Dengan demikian, seluruh gaya-gaya yang bekerja pada arah melintang akan menjadi nol:

$$-e\mathbf{v} \times \mathbf{B} + e\mathbf{E}_H = 0$$

Berdasarkan §6 4 2, kecepatan v dapat ditulis dalam I/neS dan $E_H = U_H/d$, sehingga diperoleh:

$$U_H = \frac{I}{neS} B d = \frac{I}{n e b d} B d = \frac{1}{n e} \frac{I B}{d}$$

Dengan demikian, harga konstanta Hall dapat ditentukan sebesar:

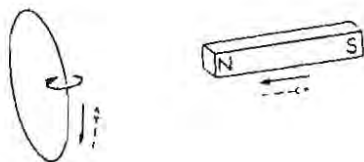
$$R_{Hl} = \frac{1}{n e} \quad (7.25)$$

Dengan memperoleh harga konstanta Hall, kecepatan muatan dan tanda muatan dapat ditentukan. Pada bahan konduktor yang baik, harga n mendekati harga kerapatan atom, sedangkan untuk bahan konduktor yang jelek, bismut misalnya, harga n lebih kecil lagi. Karenanya logam seperti Bismut dan berbagai Semikonduktor menunjukkan efek Hall yang sangat besar. Akan tetapi, teori tentang ini adalah sangat kompleks, karena ternyata diketahui kemudian, bahwa tidak semua pembawa muatan bergerak, melainkan gerak di antara dua titik setiap pembawa muatan dapat terperangkap di dalam "traps" (§14.4.2).

7.2.10 Arah Arus Induksi

(Aturan Lenz)

Arus induksi selalu mempunyai arah sedemikian, menghindari dari medan yang menyebabkan timbulnya, atau bahwa medan magnet arus induksi menghindari perubahan medan magnet yang ada.

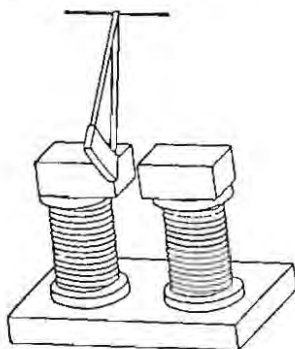


Gambar 7.23 Arah dan induksi di dalam lilitan berbentuk lingkaran (ring): a) dengan mendekatkan kutub Utara disebelah depan ($\rightarrow$) b) dengan menjauhkan batang magnet ($\rightarrow$).

Contoh Sebuah batang magnet digerakkan melalui tengah-tengah kumparan, seperti terlihat pada gambar [7.8] dan [7.8]. §7.2.1, dengan kutub Utara berada di depan sehingga arah arus induksi di dalam lilitan mengarah dari kiri ke kanan. Medan magnet arus induksi mempunyai arah sedemikian rupa sehingga kutub Utara ekuivalen momen dipol (lihat §7.2.5) lilitan berada di sebelah kanan. Ia terletak di seberang, dekat kutub Utara dan akan menembus batang magnet. Kerja mekanik pada saat batang

magnet berada di dekatnya menyebabkan adanya energi untuk menimbulkan arus induksi. Dengan menjauhkan batang magnet arus akan mengalir ke arah panah yang ditandai dengan garis putus-putus' (gambar[7.23]). Jika kutub Utara batang magnet mendekati kutub Selatan lilitan, lilitan akan menarik batang magnet.

Juga arah di dalam batang magnet yang digerakkan di dalam medan magnet mengikuti *kaidah* Lent.



Gambar 7.24 Bandul Waltenhofen

7.2.11 Arus Terpusat

Sebuah bandul yang digantungkan pada seutas kawat lebar terbuat dari tembaga diletakkan di antara dua kutub elektromagnet dan bandul berada dalam keadaan bergetar. Gerak bandul akan terhenti jika masuk ke dalam daerah pengaruh medan magnet (bandul Waltenhofen: gambar[7.24]). Apabila bandul ditarik ke batas medan magnet homogen, bandul mengalami "tahanan" seperti benda yang masuk ke dalam cairan viskos. Arus induksi menyebabkan adanya medan magnet, yang menurut kaidah Lenz (§7.2.10) mengalami interaksi dengan medan magnet induksi sehingga menghambat gerak bandul. Energi "arus berpusat" ini, dapat berubah menjadi panas Joule, berasal dari kerja mekanik, yang melawan gaya akibat magnet. Demikian pula apabila sebuah konduktor diam terdapat di dalam medan magnet yang berubah-ubah, terjadi "arus berpusar" juga.

7.3 Induksi Diri

7.3.1 Definisi Induktivitas

Melalui sebuah rangkaian listrik berbagai bentuk, terdapat "aliran" induksi yang timbul dari medan magnet yang ditimbulkannya (sebagai contoh lihat §7.2) "Aliran" induksi ini sebanding dengan arus dan ditulis sebagai berikut.

$$\Phi = LI$$

Adanya perubahan kuat arus, menyebabkan garis-garis medan mengalami perubahan dan akhirnya di dalam konduktor tertutup tersebut terdapat tegangan induksi. Dengan penambahan kuat arus I , "aliran" induksi akan berlawanan arus, karena jika tidak demikian, akan timbul akumulasi arus. (Hal ini dapat dijelaskan dengan aturan Lenz). Tegangan induksi dapat ditulis berdasarkan persamaan Maxwell kedua:

$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (7.26)$$

L disebut *induktivitas* (sebelumnya disebut koefisien konduktivitas). Φ ditentukan oleh bentuk dan medan magnet induksi B rangkaian. Karena di setiap titik medan magnet sebanding dengan kuat arus, L hanya bergantung permeabilitas μ dari bahan di sekitar dan geometri konduktor.

Induktivitas mempunyai dimensi [tegangan],[waktu]/[kuat arus]. Satuannya diambil dari singkatan nama Henry (H):

$$1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{det} \cdot \text{A}^{-1} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2}$$

Suatu rangkaian listrik atau bagian darinya, misalnya sebuah kumparan, mempunyai induktivitas 1H , jika dengan perubahan kuat arus sebesar 1A det menimbulkan tegangan induksi sebesar 1V

Untuk bentuk kumparan silindris dengan panjang l dan luas penampang lintang $S < l^2$ dan jumlah lilitan n , induktivitasnya dapat dihitung sebagai berikut. Jika pada kumparan dialiri arus sebesar I , padanya terdapat kuat medan magnet sebesar $H = In/l$ (lihat persamaan[7.7] dan fluks induksi sebesar $\Phi = \mu\mu_0 HS$ (lihat persamaan[7.18]). Fluks garis-garis medan ini memenuhi sekeliling kumparan dengan n lilitan dan akan menginduksi tegangan, yaitu jika terjadi perubahan fluks sebesar:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{ind}} &= -\frac{d\Phi}{dt} = -n\mu\mu_0 \frac{dI}{dt} \frac{n}{l} S \\ &= -\mu\mu_0 \frac{n^2}{l} S \frac{dI}{dt} \end{aligned} \quad (7.27)$$

Dengan membandingkan persamaan di atas dengan persamaan[7.26] diperoleh

$$L = \mu\mu_0 \frac{n^2}{l} S \quad (7.28)$$

7.3.2 Rangkaian RL - Arus Searah

Pada rangkaian listrik diberi tegangan sebesar U V dan tahanan R . Rangkaian ini mempunyai induktivitas L H sehingga terdapat tegangan

total yang menyimpang dari harga tegangan U yang disebut tegangan induksi U_{ind} . Dalam rangkaian tersebut terdapat arus sebesar:

$$I = \frac{U + (-L\dot{I})}{R}$$

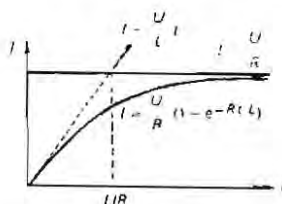
atau

$$U - L\dot{I} = IR \quad (7.29)$$

Penyelesaian persamaan diferensial di atas untuk arus searah, dengan arus mula-mula $I_0 = 0$ dan tegangan $U = \text{konstan}$ adalah

$$I = \frac{U}{R} (1 - e^{-Rt/L})$$

(lihat gambar[7.25]). Dalam hal itu, arus tidak langsung mencapai harga *stasionernya*, yaitu $I = U/R$, melainkan pada $I_0 = 0$ akan merengkat dengan laju pertambahan arus I , yang mempunyai harga awal $I = U/L$ dan tidak bergantung pada tahanan R . Jika rangkaian dibuat dengan $R = 0$, adanya kenaikan seperti tersebut di atas semakin besar. Harga tahanan hanya berpengaruh pada arus *stasioner* $I = U/R$, yang akan dicapai dalam waktu lama, seandainya harga *konstanta waktu* R/L semakin kecil.



Gambar 7.25 Kenaikan arus setelah rangkaian diberi sumber arus dicapai dalam waktu akhir konstan R/L , kemudian baru berlaku hukum Ohm.

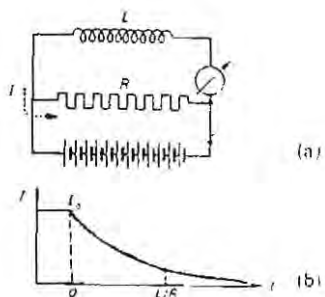
Elektromagnet umumnya mempunyai induktivitas yang besar. Oleh karena itu, keadaan arus *stasioner* pada elektromagnet dapat dicapai hingga beberapa menit.

Jika sumber arus pada rangkaian yang terdiri atas kumparan, dengan induktivitas L dan tahanan R ditiadakan, arus dalam rangkaian tersebut tidak akan langsung "menghilang" (gambar[7.26]). Segera setelah terjadi penurunan arus karena laju perubahan arus I pada kumparan, menimbulkan tegangan sebesar $-L\dot{I}$ sehingga arus yang mengalir pada L dan R menjadi:

$$-L\dot{I} = IR$$

Jika arus kumparan I_0 ditiadakan, melalui integrasi akan didapat:

$$I = I_0 e^{-Rt/L} \quad (7.30)$$



Gambar 7.26 a) dan b). a) Setelah arus ditiadakan (a) akan mengalir arus secara eksponensial sebelum mencapai harga nol di dalam rangkaian RL (b)

7.3.3 Energi dan Kerapatan Energi di dalam Medan Magnet

Energi "peluruhan" arus yang dijelas melalui persamaan[7.29] hanya terdapat yang berasal dari medan magnet yang terdapat di dalam rangkaian, atau dapat pula dikatakan sebagai energi dikembalikan ke kumparan. Pada

tahanan R akan terdapat panas Joule

$$\begin{aligned} W &= \int I^2 R dt = \int I_0^2 e^{2Rt/L} dt \\ &= RI_0^2 \frac{L}{2R} = \frac{1}{2} I_0^2 L \end{aligned}$$

Energi W ini pada saat sebelum sumber arus ditiadakan haruslah berasal dari energi magnetik W_{mag} yang terdapat di dalam kumparan. Pada saat arus diberikan kembali, kerja yang "dikerjakan" oleh I untuk melawan tegangan induksi akan dipakai sebagai energi medan magnet kumparan:

$$\begin{aligned} W &= - \int I U_{\text{ind}} dt = \int I L \dot{I} dt \\ &= \frac{1}{2} L I^2 \Big|_{t=0}^{t=\infty} \end{aligned}$$

(I_0 tentunya beranalog dengan I_0 pada saat ditiadakan). Energi untuk menimbulkan medan magnet di dalam konduktor, demikian pula timbulnya medan, berjalan sangat lamban semakin besar daripada harga L .

Melalui persamaan [7.27] energi magnetik kumparan dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$W_{\text{mag}} = \frac{1}{2} I^2 L = \frac{1}{2} \mu \mu_0 \frac{n I}{l} \frac{n I}{l} l S$$

Faktor kedua di belakang $1/2$ adalah medan magnet induksi B . Suku selanjutnya adalah medan magnet di kumparan (lihat persamaan [7.18] dan [7.7], suku terakhir sama dengan volume yang dipenuhi medan

magnet V . Kerapatan energi di dalam medan magnet adalah:

$$w_{\text{mag}} = \frac{W_{\text{mag}}}{V} = \frac{1}{2} B H \quad (7.31)$$

Persamaan ini berlaku untuk berbagai "bentuk" medan, yang juga beranalogi dengan kerapatan energi medan listrik persamaan [6.56]

7.3.4 Definisi Elektromagnetik: Ampere

Pada §6.1.1 telah didefinisikan secara sembarang bahwa satuan muatan adalah $3 \cdot 10^9$ muatan (1 C) yang berjarak 1 cm dan menyebabkan gaya sebesar 1 dyne. Berdasarkan definisi tersebut, dapat pula dibuat satuan-satuan lain, arus (1 A = C det⁻¹, §6.1.3), tegangan (1 V = 1 J C⁻¹, §6.1.3), kuat medan magnet (1 IV.det.m⁻¹ =, §7.2.3), dan kerapatan medan magnet induksi (1 IV.det.m⁻² =, §7.2.3). Antara kuat medan magnet H dan kerapatan medan magnet induksi di dalam vakuum terdapat hubungan kesebandingan.

$$\frac{B}{H} = \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ V det A}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

Satuan-satuan yang diungkapkan di atas diturunkan secara logis dan telah terbukti tanpa kekeliruan. Akan tetapi, secara teknis ada pula keburukannya: untuk membuat kalibrasi sebuah alat pengukur medan magnet tepat sebesar 1 Am⁻¹, haruslah diketahui ukuran skala pada amperemeter dengan persis. Angka penunjuk amperemeter akan diperoleh dengan persis hanya jika jumlah muatan dalam Coulomb diketahui atau dapat diukur persis pula. Cara pengukuran yang diungkap pada §6.1.1 adalah mengandung kesalahan yang cukup besar, walaupun secara prinsip tidak mengurangi kandungan pengertian di dalamnya. Juga pengukuran jumlah muatan dilakukan dengan menggunakan timbangan Kirschhoff

(§6.1.5d), dengan mengukur panjang dan menimbang harga tegangan (dalam V) dengan beban, tidak diperoleh hasil yang cukup akurat.

Kemudian, pada tahun 1948 secara internasional ditetapkan bahwa ampere adalah satuan kuat arus, berdasarkan hal sebagai berikut.

"Ampere adalah kuat (laju) perubahan arus listrik melalui dua kawat konduktor paralel yang panjangnya tidak berhingga dan terdapat di dalam vakuum, dengan penampang lintang dapat diabaikan, yang masing-masing dipisahkan oleh jarak 1 m, yang pada keduanya, di dalam ruang hampa, karena adanya arus elektrodinamis, mengalami gaya setiap 1 m panjang sepasang konduktor tersebut sebesar $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ ". Jika angka-angka di atas disubstitusikan ke persamaan[7.22] akan didapat

$$\begin{aligned}\mu &= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2} \text{ (atau H m)}^{-1} \\ &= 4\pi \text{ nH cm}^{-1}\end{aligned}$$

Harga μ pada persamaan di atas adalah hampir sama dengan definisinya pada persamaan[7.17].

Pengukuran gaya antara dua panjang kawat konduktor yang dialiri arus listrik, yang tentunya mengandung kesalahan pengukuran, dapat dikompensasikan dengan melakukan pengukuran gaya yang bekerja pada dua kawat konduktor yang sama terhadap sebuah kumparan yang juga dialiri arus listrik yang sama (timbangan arus). Ketelitian bergantung pada ukuran kumparan.

Dengan definisi satuan arus seperti itu (A) dan kemudian mendefinisikan satuan muatan sebagai 1 C=1 A det akan diperoleh harga $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ J}^{-1} \text{ m}^{-1}$ yang harganya ternyata mendekati harga ϵ_0 yang didefinisikan pada §6.1.1.

7.4 Magnetostatik

7.4.1 Momen Magnetik

Pada peristiwa elektrostatik medan listrik terdapat elemen ruang, yaitu ruang tempat garis-garis medan listrik bermuara dan berakhir, atau dengan perkataan lain ruang yang ditempati sumber dan penerima garis-garis medan. Di dalam ruang tersebut terdapat muatan. Lain halnya dengan medan magnet, tidak mempunyai akhir. Sekalipun dicoba untuk memperoleh adanya sumber dan penerima garis-garis medan magnet di dalam ruang yang terdapat garis-garis medan (misalnya di dekat kutub elektromagnet atau magnet permanen), selalu diperoleh bahwa dalam peristiwa magnet tidak terdapat "muatan magnet", yang ada hanya momen dipol magnet. Oleh karena itu, medan magnet tidak dapat dipandang sebagai peristiwa yang disebabkan oleh gaya magnet akibat "muatan magnet", seperti halnya pada peristiwa listrik. Pernyataan tersebut rupanya tidak menjadi halangan untuk mencari penyebab peristiwa magnetik. Gambaran mekanis tentang medan magnet induksi tidak digambarkan melalui gaya, melainkan B dinyatakan melalui momen putar yang bekerja pada sebuah momen dipol m yang terdapat di dalam kumparan. Momen dipol didefinisikan sebagai hasil kali antara arus yang mengalir di dalam rangkaian tertutup dengan luas permukaan datar rangkaian yang bersangkutan. Dengan demikian, dapat diperoleh tata cara pengukuran medan magnet induksi B . Jika harga B diketahui, terbukalah jalan untuk menghitung momen putar dan momen dipol magnetik suatu konduktor atau sebuah magnet permanen.

7.4.2 Kuat Kutub Magnetik

Dalam kejadiannya ada kemiripan, yaitu pandangan tentang "muatan magnetik" yang terkonsentrasi di dalam ruang. Pada kumparan yang panjang atau magnet permanen (panjang l) pada kutubnya, di tempat garis-garis medan magnet B masuk atau keluar, seolah terdapat "muatan magnetik" atau *kuat kutub magnet* $\pm P$ terkonsentrasi di daerah kutub tersebut sehingga momen magnetik kumparan atau magnet permanen dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$m_{\text{mag}} = Pl$$

Momen putar di dalam medan magnet induksi B menjadi:

$$M = PlB$$

kemudian pasangan gaya yang bekerja pada kedua kutub magnet tersebut (mengakibatkan momen putar) dapat ditulis sebagai berikut.

$$\pm F = \pm \frac{M}{l} = \pm PB \quad (7.32)$$

Dalam hal ini, B berperan seperti halnya medan listrik E . Kuat kutub magnet sebuah kumparan satu lapis dengan lilitan sebanyak N dan mempunyai luas penampang lintang S , berdasarkan persamaan [7.20] adalah

$$P = \frac{NIS}{l} = H_i S$$

dengan H_i adalah kuat medan magnet di dalam kumparan. Dengan menggunakan relasi jumlah fluks magnetik $\Phi = \mu H_i S$ yang melewati

kumparan, diperoleh hubungan lain, yaitu:

$$P = \frac{\Phi}{\mu_0} \quad (7.33)$$

Sekarang dilihat seandainya pada jarak r dari kumparan pertama, terdapat kumparan lain dengan fluks magnetik Φ' . Jika r besar dibandingkan dengan diameter kumparan, sebanyak pendekatan dapat dianggap bahwa Φ' terdistribusi homogen di sekitar sebuah bola berjari-jari r . Kerapatan medan magnet induksi kumparan di permukaan kumparan pertama adalah:

$$B(r) = \frac{\Phi'}{4\pi r^2}$$

sehingga pada ujung kumparan pertama, berdasarkan persamaan [7.31] dan [7.32] bekerja gaya sebesar:

$$F = P \frac{\Phi'}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{PP'}{r^2}$$

Untuk kuat kutub-kutub magnet dua kumparan panjang, dapat berlaku hukum Coulomb. Kuat kutub magnet adalah fluks dibagi dengan μ_0 . Dalam hal ini fluks dapat dianggap keluar dari ujung kumparan. Pernyataan terakhir ini sesuai dengan persamaan Poisson yang menyatakan bahwa muatan adalah sama dengan jumlah fluks yang keluar dari vektor pergeseran medan listrik D .

7.4.3 Dipol Magnet di dalam Medan Magnet Homogen dan Inhomogen

Gaya yang bekerja di ujung sebuah kumparan panjang atau magnet

permanen di dalam medan magnet B , berdasarkan pembahasan pada §7.4.2 adalah

$$F = PB$$

Jika B pada kedua ujung kumparan atau magnet permanen sama besar dan arahnya, terdapat momen putar sebesar

$$M = m_{\text{mag}} \times B$$

Di dalam medan magnet homogen, kedua gaya di atas tidak menyebabkan adanya momen sisa sehingga gaya yang dihasilkan adalah

$$F = m_{\text{mag}} \frac{dB}{dt} \cos \alpha$$

beranalogi dengan dipol magnetik: §6.1.6. Energi momen dipol di dalam medan magnet homogen dapat dinyatakan dalam persamaan berikut.

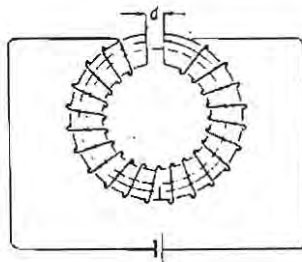
$$W_{\text{dip}} = m_{\text{mag}} B$$

7.4.4 Elektromagnet

Dengan pertolongan bahan yang mempunyai permeabilitas relatif μ tinggi, dapat diperoleh medan magnet lebih kuat. Kebanyakan bahan yang dipakai untuk ini adalah berbagai macam senyawa besi. Besi tersebut biasanya dibuat dalam bentuk tertentu, misalnya dilengkungkan dan pada "tubuh" besi tersebut dililitkan kawat konduktor (biasanya dipakai tembaga; lihat gambar[7.27]) Jika kumparan dialiri arus, pada daerah kutub-kutubnya akan terdapat medan magnet. Dengan membuat harga d kecil akan diperoleh medan magnet homogen tegak lurus terhadap

kedua kutubnya.

Misalkan kuat medan magnet yang berada di sekitar inti magnet (batang magnet yang dililiti kawat) adalah H_i dan kuat medan H_a di antara dua kutub elektromagnet diperoleh dengan menggunakan hukum fluks magnetik (persamaan[7.6]), yaitu dengan mengambil integrasi terhadap seluruh garis putus-putus pada gambar[7.27], terdapat lilitan sebanyak N , dialiri arus I :



Gambar 7.27 Perhitungan kuat medan magnet di antara dua kutub-kutub elektromagnet.

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = H_i l + H_a d = N I \quad (7.34)$$

Jika di sekitar inti magnet, antara dua kutub magnet dengan jarak d (daerah *interferrikum*) diletakkan kawat melingkar yang dapat digerakkan, jarak d akan kecil, ternyata tidak diperoleh arus induksi. Hal ini mempunyai arti bahwa fluks induksi pada daerah ini adalah konstan dan kemudian diketahui pula bahwa $B_i = B_a$ atau

$$\mu \mu_0 H_i = \mu_0 H_a \quad (7.35)$$

Jika H_i pada persamaan[7.33] dan [7.34] dieliminasi maka diperoleh:

$$H_a = \frac{N I}{d + l/\mu}$$

Dari pernyataan ini dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Jika $d < l/\mu$ medan magnet di daerah interferrikum menjadi μ kali sama besarnya seperti pada kumparan linier yang mempunyai kerapatan lilitan sama dengan kumparan pada gambar[refg7.27].

2. Apabila $d > l/\mu$ (tetapi selalu $< d$), medan magnet dalam daerah interferrikum sama besarnya dengan medan magnet seandainya kumparan tidak mempunyai inti magnet dan mempunyai jarak d sekecil mungkin. Medan magnet ini sebanding dengan d .

Medan magnet induksi ($b_i = B_a$) pada daerah antara besi (magnet permanen) dan celah udara faktor berubah; kuat medan magnet (H) bertambah sebanding dengan gaktor μ (order faktor ini dapat mencapai 1000). Fluks induksi yang melalui penampang lintang S dari inti magnet, demikian pula kumparan adalah

$$\Phi = \mu_0 H_a S = \frac{\mu_0 N I S}{d + l/\mu} \quad (7.36)$$

yang sedikit bergantung l , sebaliknya sangat bergantung pada harga d . Di dalam transformator umumnya yang mempunyai fluks induksi besar, celah udara tersebut haruslah bersifat destruktif.

Elektromagnet-elektromagnet yang dijualbelikan umumnya dengan permeabilitas tinggi $\mu \approx 200$ dan pada jarak $d \approx 1$ cm mempunyai fluks induksi sebesar $0,5 \text{ V det m}^{-2}$ ($= 5000 \text{ Gauss}$). Kondisi elektromagnet seperti di atas akan menimbulkan kuat medan magnet sebesar $4 \cdot 10^5 \text{ Am}^{-1}$ (5000 Oersted).

Dalam sistem satuan CGS B dinyatakan dalam Gauss (G) dan H dalam Oersted (Oe) dan untuk medan yang sama di vakuum, harganya adalah sama. Demikian pula dengan kuat medan listrik dan vektor pergeseran medan listrik dalam sistem satuan ini.

7.5 Bahan dan Medan Magnet

7.5.1 Magnetisasi dan Suseptibilitas Magnetik

Di dalam medan listrik setiap bagian isolator terdapat momen magnetik, momen ini timbul akibat adanya polarisasi muatan. Demikian pula halnya pada setiap bagian bahan di dalam medan magnet, terdapat momen magnetik karena bagian bahan tersebut mengalami polarisasi magnetik. Seperti halnya pada peristiwa listrik, polarisasi magnetik dapat digambarkan adanya elemen volume yang mengalami polarisasi secara homogen yang dapat merambat ke bagian tetangga lainnya. Dengan demikian, keadaan suatu bahan yang mengalami magnetisasi dapat dinyatakan dalam momen magnetisasi per satuan volume atau disebut *momen magnetisasi total* atau biasanya disebut magnetisasi saja J :

$$J = \frac{\text{momen magnetisasi}}{\text{volume}} \quad (7.37)$$

Polarisasi terjadi pada arah tertentu (umumnya sesuai dengan arah medan magnet); J tidak lain adalah juga sebuah vektor. Karena momen magnetisasi mempunyai dimensi $[\text{Arus} \cdot \text{L}^2]$, momen magnetisasi total berdimensi $[\text{Arus} \cdot \text{L}^{-1}]$, yaitu sama dengan dimensi kuat medan magnet. J biasa dinyatakan dalam satuan Acdotdet^{-1} (atau dalam satuan CGS: Oersted).

Magnetisasi total atau mengnetisasi suatu bahan adalah sebanding dengan kuat medan magnet yang diberikan pada bahan tersebut:

$$J = \chi H \quad (7.38)$$

Konstanta tanpa dimensi χ disebut sebagai *suseptibilitas magnetik*.

Magnetisasi yang dialami oleh suatu bahan di dalam medan magnet

dibedakan apakah induksi terjadi di dalam bahan atau di vakuum (§7.2.1. percobaan nomor 12). Berdasarkan kenyataan ini, dapat disimpulkan bahwa permeabilitas χ haruslah mempunyai hubungan erat dengan permeabilitas relatif μ . Persis sama seperti vektor pergeseran medan listrik, J merupakan pertambahan harga kuat medan magnet di dalam materi H_i :

$$H_i = H_o + \chi H_o = H_o (1 + \chi)$$

$$B = \mu_o H_o (1 + \chi)$$

(H_o adalah medan kuat medan magnet di vakuum). Dengan membandingkan konstanta yang terdapat pada persamaan[7.38] dengan harga permeabilitas relatif (persamaan[p7.18]), diperoleh hubungan antara permeabilitas relatif dan suseptibilitas sebagai berikut.

$$\mu = 1 + \chi \quad (7.39)$$

Bahan yang di dalam medan magnet mengalami magnetisasi berlawanan arah medan disebut bahan *diamagnetik* ($\chi < 0$; $\mu < 1$). Jika magnetisasi bahan searah dengan arah medan magnet yang diberikan, bahan disebut sebagai *paramagnet* ($\chi > 0$; $\mu > 1$). Untuk bahan *ferromagnetik*, harga permeabilitas relatif μ adalah sangat besar dan bergantung pada medan listrik yang diberikan. Bahan ini tidak mengikuti aturan yang dirumuskan persamaan[7.37].

Sifat-sifat ferromagnetisme yang terbuat dari senyawa-senyawa mengandung besi telah diketahui sejak berabad-abad lamanya, sedangkan diamagnetik dan paramagnetik diungkap oleh Faraday pada tahun 1845.

7.5.2 Diamagnetik

Sebuah bola terbuat dari bismut diletakkan di ujung dua kutub magnet suatu elektromagnet, bola tersebut akan mengalami gaya pada arah penurunan kuat medan magnet. Bola ini berkelakuan seperti sebuah

gelembung gas di muka sebuah ujung lancip bermuatan listrik di dalam cairan elektrik (§6.2.4), bola tersebut menghindar dari tumbukan, artinya semakin menjauh dari ujung bermuatan listrik tersebut, karena konstanta dielektrisitas lebih kecil dari konstanta dielektrisitas medium di sekelilingnya. Sehubungan dengan hal tersebut, permeabilitas bismut haruslah lebih kecil dari lingkungan vakuum yang ada di sekelilingnya

Tabel 7.1 SUSEPTIBILITAS MAGNETIK (χ) BEBERAPA MACAM BAHAN

Diamagnetik		Paramagnetik	
Bahan	$\chi \cdot 10^{-6}$	Bahan	$\chi \cdot 10^{-6}$
Bismut	-14	Platina	+ 19,3
Air	- 0,72	Hidrogen cair	+ 360
Nitrogen*	- 0,0003	Hidrogen*	+ 0,14
* Dalam keadaan normal			

(atau udara); yaitu $\mu < 1$ dan karena persamaan [7.39] bahwa $\chi < 1$ adalah sangat kecil (lihat tabel [7.1]) dan selalu *bergantung pada temperatur*.

Diamagnetik adalah sifat umum bahan yang untuk kebanyakan bahan menutupi sifat-sifat paramagnetiknya.

Jika sebuah benda diamagnet ditempatkan di dalam medan magnet, akan terdapat kerja melawan gaya yang cenderung mengenyahkan bahan medan magnet tersebut. Peristiwa ini mirip dengan meletakkan lempengan Cu ke alam medan magnet (§7.2.11). Seperti pada pembahasan sebelumnya, diamagnetik dapat diartikan adanya "arus melingkar" yang diinduksikan ke dalam bahan sedemikian rupa sehingga momen magnetik arah bahan tersebut cenderung menjauhi medan yang diberikan (lihat aturan Lenz, §7.2.10). Sementara pada lempengan tembaga terdapat "arus melingkar" yang diikuti dengan hilangnya tahanan. Manakala dengan serta

merta gerak terhenti, harus diasumsikan bahwa pada bahan diamagnetik yang akan terjadi haruslah arus orbital atomik tanpa tahanan, yang dalam hal ini arus induksi akan terus mengalir di dalam bahan, selama tidak terjadi perubahan medan magnet. Jika bahan diamagnetik dijauhkan dari medan atau sumber medan magnet ditiadakan, "arus melingkar" ini akan kembali mencapai harga nol. Momen magnetiknya hanya bergantung pada kuat medan magnet yang terdapat di dalamnya dan arahnya adalah berlawanan medan. Oleh karena itu, pengertian diamagnetik secara kualitatif dapat diartikan dengan polarisasi melalui induksi dan arus tanpa tahanan di dalam orbit atomik.

Kenyataannya di dalam atom benar-benar terdapat "arus melingkar", karena selalu terdapat momen dipol yang diikuti gerak presisi (§2.4.2) pada arah medan magnet (§12.7.1).

7.5.3 Paramagnetik

Di samping sifat diamagnetisme yang muncul pada berbagai bahan, terdapat pula suatu sifat lain bahan, yaitu jika arah magnetisasi searah medan magnet. Sifat seperti itu disebut *paramagnetik*. Momen magnetisasi totalnya sebanding dengan kuat medan magnet, dengan χ berharga positif dan konstan.

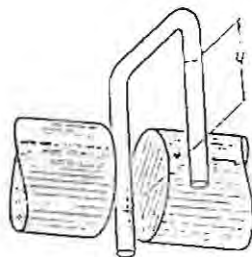
Pada temperatur yang tidak begitu rendah χ berbanding terbalik dengan temperatur absolut:

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (\text{Hukum Curie}) \quad (7.40)$$

Sebuah batang platina digantungkan dan dapat berputar bebas ditempatkan searah dengan garis-garis medan magnet. Di dalam medan homogen sebuah bola platina kecil dapat tertarik ke dalam daerah kuat medan magnet yang lebih besar. Satuan bahan paramagnet di dalam medan magnet mempunyai kelakuan seperti bahan dielektrik di dalam medan listrik. Untuk bahan paramagnetik $\chi > 0$ sehingga $\mu > 1$.

Untuk mengukur permeabilitas cairan paramagnetik dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut. Cairan paramagnetik dimasukkan ke dalam pipa U dan salah satu kaki pipa ditempatkan di antara dua kutub elektromagnet, seperti terlihat pada gambar[7.28]) dan terjadi kenaikan cairan di kaki pipa tersebut. Misalkan, h adalah perbedaan tinggi skala meniskus antara kedua kaki pipa. Untuk hal itu berlaku analogi dengan §6.2.4 sebagai berikut.

$$h = \frac{1}{\rho g} \frac{\mu_0}{2} (\mu - 1) H^2 \quad (7.41)$$



Gambar 7.28 Pengukuran permeabilitas bahan paramagnetik cairan dengan metode kenaikan tinggi cairan.

Bahan paramagnetik mempunyai kelakuan mirip dielektrik dengan polarisasi terorientasi (§6.2.3). Jika pada bahan dielektrik terdapat momen dipol molekuler, pada bahan paramagnetik dianggap terdapat momen magnetisasi permanen di dalam molekul atau atom-atomnya. Momen magnetisasi ini timbul karena arus listrik berbentuk cincin adanya "arus melingkar" atau arus *melingkar* ampere. Kebalikan adanya "arus cincin" di dalam atom, pada bahan diamagnetik arus ini juga muncul karena adanya medan magnet. "arus melingkar" ini dapat dijelaskan dengan menggunakan model atom Bohr, yaitu arus yang muncul karena elektron-elektron bergerak di dalam orbitnya (§12.3.6) atau juga karena elektron mempunyai momentum putar (§12.7.1). Pada bahan diamagnetik semua momen-momen magnetik elektron akan saling kompensasi jika dalam keadaan tanpa medan magnet, tetapi pada bahan paramagnetik, paling tidak terdapat

satu momen magnetisasi yang tersisa. Tentunya keadaan tersebut telah terjadi pada satu atom bebas sehingga di dalam ruang bebas medan magnet sekalipun atom tersebut berlaku sebagai pembawa momen magnetisasi (tetapi pada peristiwa listrik, tidak terdapat pembawa momen dipol permanen) Tanpa medan magnet, terdapat gerak karena temperatur, *magnet elementer* ini tidak mempunyai arah tertentu sehingga tidak terjadi polarisasi Medan magnet adalah pengarah momen magnetisasi dan gerak karena agitasi temperatur melawannya sehingga polarisabilitas magnetik tentunya akan semakin besar jika temperatur semakin rendah, seperti dirumuskan oleh hukum Curie pada persamaan [7.40].

Perlakuan teoretik adalah mirip perlakuan teoretik pada suseptibilitas listrik (§6.2.3) dan sesuai dengan hukum Curie sebagai berikut.

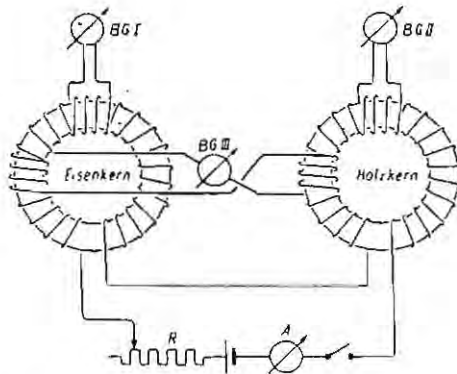
$$\chi = \mu_0 \frac{np^2}{3kT}, (1 + \gamma t)$$

n adalah kerapatan partikel di dalam atom (molekul), p adalah momen magnetisasi dan k adalah konstanta Boltzmann. Suseptibilitas molar dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\chi_{\text{mol}} = \mu_0 \frac{Lp^2}{3kT} = \mu_0 \frac{(Lp)^2}{3LkT} = \mu_0 \frac{M^2}{3RT}$$

M adalah momen magnetisasi total yaitu jumlah semua momem dipol magnetik yang mempunyai arah paling paralel dalam satu mol bahan. Dari ketergantungan harga suseptibilitas terhadap temperatur dapat ditentukan momen magnetisasi total M sebagai berikut.

$$M = \sqrt{3RT\chi_{\text{mol}}/\mu_0} \quad (7.42)$$



Gambar 7.29 Pengukuran permeabilitas dan suseptibilitas besi.

7.5.4 Ferromagnetik

Pada bahan ferromagnetik, momen magnetisasi dan kuat medan magnet H adalah searah. Terlepas dari pengaruh temperatur tinggi magnetisasi yang terjadi pada bahan ferromagnetik, jika bahan diletakkan di dalam medan magnet yang sama, jauh lebih besar dibandingkan dengan magnetisasi pada bahan paramagnetik dan tidak akan bergantung pada harga H lagi. Pada ferromagnetik suseptibilitas tidak lagi sebagai konstanta, melainkan bergantung pada harga H dan dari "sejarah" terjadinya magnetisasi pada bahan tersebut.

Sebuah "inti magnet" berbentuk cincin dan sebuah "inti kayu" berukuran sama besar dililitkan dengan jumlah lilitan yang sama (gambar[7 29]). Kedua kumparan cincin tersebut terdapat di dalam satu rangkaian yang selain keduanya terdapat pula tahanan R yang dapat divariasikan R dan amperemeter A . Di masing-masing kumparan terdapat pula lilitan sekunder dengan jumlah lilitan yang sama dengan lilitan primer dan masing-masing dihubungkan dengan galvanometer BG I dan BG II. Berdasarkan hukum fluks (§7.1.3), pada masing-masing kumparan akan timbul medan listrik yang sama. Akan tetapi, pada saat arus dialirkan melalui keduanya, terlihat

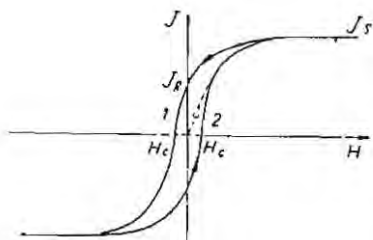
bahwa simpangan jarum penunjuk galvanometer GB I dan II adalah tidak sama. Telah diketahui bahwa simpangan yang terjadi, baik pada galvanometer GB I dan II sebanding dengan medan induksi B dan perbandingan kedua medan magnet induksi masing-masing kumparan adalah sebanding dengan perbandingan permeabilitas dari besi dan kayu. Selanjutnya, tanpa kesalahan yang berarti, harga permeabilitas vakuum ($\mu = 1$) dapat digunakan dalam perhitungan.

Apabila pada lilitan sekunder dialirkan arus melalui galvanometer GB III, simpangan yang dapat diamati adalah sebanding dengan $\mu H - H = J$ (lihat persamaan [7.39] dan [7.37], sebanding dengan magnetisasi besi).

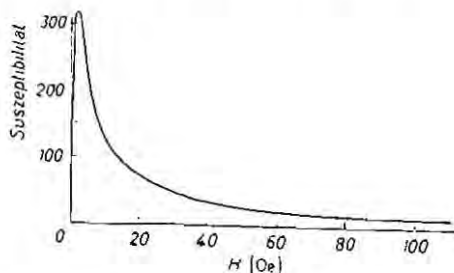
Magnetisasi total besi J akan naik lebih besar pada keadaan harga medan yang kecil, dibandingkan dengan kesebandingan terhadap medan, kenaikannya cenderung tajam hingga mencapai keadaan jenuh. Kurva J terhadap H dilukiskan pada gambar [7.30] dan disebut *kurva baru* atau *kurva perawan*. Kemudian jika kuat medan diperkecil, terlihat bahwa magnetisasi yang teramati lebih besar dibandingkan dengan magnetisasi yang terdapat pada "kurva baru", J berkurang oleh kenaikan kurva (*sloop*) yang kecil, dibandingkan dengan kurva kenaikannya. Pada harga medan $H = 0$ J tetap mempunyai harga tertentu (J_R *remanen*). Untuk membuat harga magnetisasi menjadi nol, harus diberikan medan yang berlawanan arah dengan medan sebelumnya. Kuat medan yang diperlukan untuk melakukan hal tersebut disebut *kuat medan koersitif* H_c . Jika kuat medan tersebut dinaikkan, terjadi kenaikan harga magnetisasi kembali dan dengan harga H negatif yang cukup, terjadi pula keadaan jenuh kembali yang harganya persis sama dengan harga magnetisasi jenuh pada harga kuat medan H positif. Penurunan harga kuat medan memberikan penurunan harga magnetisasi sepanjang kurva 2 melalui titik remanens negatif untuk $H = 0$. Sumbangan medan koersifitas H_c yang sama besar akan menyebabkan keadaan magnetisasi remanens hilang dan jika harga-harga H dinaikkan terus akan diperoleh kurva 2 kembali.

Apa yang diamati pada besi, yaitu tercapainya keadaan magnetisasi jenuh dan kebergantungan magnetisasi terhadap kuat medan magnet, juga diamati pada nikel dan kobalt dan unsur jarang gadolinium, disprosium, dan erbium. Selain itu, pada berbagai macam campuran, berdasarkan

Heusler, kebanyakan campuran mangan, seperti mangan-zink,



Gambar 7.30 Kurva histeresis magnetisasi.



Gambar 7.31 Suseptibilitas suatu dinamo terbuat dari logam bergantung kuat medan magnet.

mangan-al, mangan-arsen, mangan-atomonat, mangan-bismut, mangan-borium dengan campuran sedikit cuprum. *Ferromagnetisme berhubungan dengan bentuk kristal Uap besi berkelakuan seperti kebanyakan bahan-bahan paramagnetik lainnya. jadi tidak bersifat ferromagnetik.*

Magnetisasi jenuh besi dan nikel lebih kurang sama besar sedangkan untuk cobalt lebih kecil (kira-kira $1/3$).

Suseptibilitas awal diperoleh dari "kurva baru" atau kurva histeresis kurva ini bergantung pada jenis besi dan proses pembuatannya. Pada gambar[7.31] adalah kurva suseptibilitas jenis besi yang dipakai untuk dinamo sebagai fungsi kuat medan magnet. Dari kurva tersebut terlihat bahwa suseptibilitas naik sebagai fungsi H , kemudian turun setelah melampaui maksimum, kemudian mencapai daerah jenuh sampai pada harga nol, pada keadaan ini tercapai harga $j = 0$ untuk $H = 0$. Oleh karena itu, $\mu = 1$.

Istilah "magnet lunak" dan "magnet keras" dibedakan oleh tipis dan tebalnya kurva histeresis. Semakin besar medan koersitif semakin "keras" magnet tersebut.

Transisi Sifat Ferromagnetik Menjadi Paramagnetik

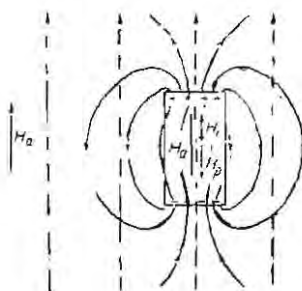
Semua bahan mempunyai sifat ferromagnetik hanya di bawah temperatur tertentu yang didefinisikan sebagai temperatur Curie T_c . Di atas temperatur

tersebut semua bahan bersifat paramagnetik, bergantung pada harga suseptibilitasnya. Demikian pula dengan kebergantungan terhadap temperatur. Jika dipandang selain pada daerah temperatur absolut, temperatur mencapai temperatur Curie pada persamaan [7.40]. Di atas temperatur Curie berlaku hukum Curie-Weiss:

$$\chi = \frac{C}{T - T_C} \quad (7.43)$$

Dari hasil percobaan diketahui bahwa

Besi T_C	=	774°C
Cobalt T_C	=	1131°C
Nikel T_C	=	372°C
Beberapa campuran T_C	<	100°C



Gambar 7.32 Demagnetisasi

Demagnetisasi

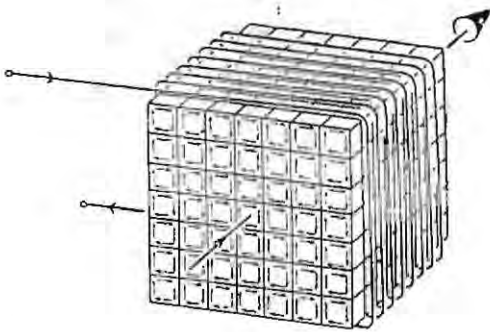
Jika di dalam cincin lilitan tertutup dimasukkan sebatang besi berbentuk selinder di dalamnya dan dialiri arus listrik, akan tercapai keadaan magnetisasi jenuh dengan lebih cepat pada medan magnet terbesar. Kuat medan magnet H_i di dalam besi tersebut ternyata lebih kecil dibandingkan

dengan medan magnet di kumparan, yang disebut medan magnet luar H_a . Peristiwa ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Dianggap bahwa permukaan selinder adalah kutub magnet, yaitu sebagai pembawa medan magnet karena dipol, seperti terlihat pada gambar[7.32]. Semua garis-garis medan di dalam selinder besi melawan medan magnet kumparan sehingga menyebabkan medan luar melemah. Selanjutnya, diperlukan karena besi tidak berbentuk cincin, jumlah lilitan yang lebih banyak sehingga diharapkan dapat diperoleh magnetisasi yang sama besar seandainya besi berbentuk cincin. Peristiwa ini persis seperti pada polarisasi listrik, yang berhubungan dengan faktor ϵ x pada persamaan[6.48] dan kuat medan listrik. Dalam kasus ini faktor tersebut adalah χ (lihat persamaan[7.37]. Pengaruh bentuk cuplikan pada harga magnetisasi di dalam medan luar H_a hanya terhadap faktor demagnetisasi N , yaitu

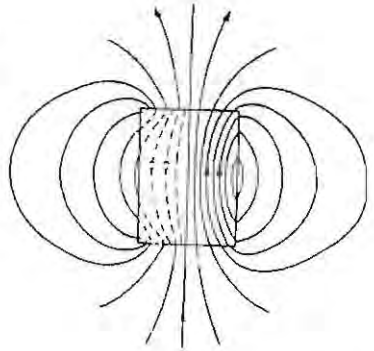
$$J = \frac{\chi}{1 + N\chi} H_a \quad (7.44)$$

Diketahui dengan jelas bahwa untuk sebuah selinder yang mempunyai ukuran diameter lebih kecil daripada ukuran panjangnya, medan magnet luar dan dalam mempunyai perbedaan yang kecil. Diharapkan bahwa $J = \chi H_a$. Kenyataannya, faktor N berpengaruh hanya untuk batang besi berbentuk elipsoida atau selinder berdiameter mendekati nol dibandingkan dengan panjangnya. Untuk bentuk bola harga $N = 4\pi/3$.

Pandangan bahwasanya momen dipol disebabkan oleh adanya arus melingkar di dalam bahan pertama kali diprakarsai oleh Ampere. Keadaan jenuh muncul jika luas permukaan arus melingkar mengalami pengembangan sedemikian sehingga luas permukaan tersebut searah dengan luas permukaan lilitan kumparan yang menimbulkan medan magnet dan "lintasan" arus elementer searah dengan arus yang mengalir di kumparan. Model skematik keadaan di atas diilustrasikan pada gambar[7.33], dengan arus elementer digambarkan berbentuk segi empat. Terlihat bahwa arus elementer di bagian dalam "menghilang", hanya arus elementer di permukaan yang tinggal. Medan magnet yang ditimbulkan oleh arus elementer di permukaan mengalami penguatan dan mempunyai



Gambar 7.33 Medan magnet arus elementer pada sebuah inti besi yang dimagnetisasi: medan tersebut timbul akibat adanya arus permukaan.



Gambar 7.34 Medan magnet di bagian dalam sebuah magnet permanen.

arah yang sama dengan medan magnet luar. Jelaslah, bahwa medan magnet di tengah-tengah (celah) sebuah kumpulan berbentuk cincin (§7.4.4) lebih besar jika diisi dengan bahan ferromagnetik.

Dalam hal itu medan magnet di bagian dalam magnet permanen tidak dapat digambarkan dengan garis-garis medan, seperti diilustrasikan gambar[7 32] dan di bagian kiri gambar[7.34]. Secara hipotetis terdapat hubungan antara kutub positif dan negatif. Pada permukaan "bungkus" magnet permanen terdapat arus permukaan yang mempengaruhi bagian dalam magnet, tanpa adanya pembalikan arah keluar kembali, seperti digambarkan pada bagian kiri gambar[7 34], kelakuan yang sama dijumpai pula pada bagian kiri dan gambar[7.32].

Secara kualitatif fenomena ferromagnetik dapat dijelaskan dengan menggunakan model arus melingkar atomik dan momen magnetiknya. Teori tentang ferromagnetik dimungkinkan didasari oleh pengetahuan bahwa setiap elektron dapat menimbulkan momen magnetik.

7.5.5 Efek Giromagnetik (Einstein-De Haas)

Jika arus melingkar disebabkan oleh elektron yang bergerak membentuk lintasan lingkaran, elektron tersebut memiliki pula momentum putar (*momentum orbital*) sebesar $L = m_o r^2 \omega$ (lihat §2.3.1), dengan m_o = massa elektron, r = jari-jari orbit lingkaran elektron, ω = adalah frekuensi sudut gerak melingkar elektron. Kuat arus melingkar adalah $e\omega 2\pi$ dan momen magnetiknya adalah $1/2 e\omega r^2$ (lihat §7.2.5). Perbandingan antara momentum orbital dengan momen magnetik elektron adalah:

$$\begin{aligned} \left| \frac{m_{\text{mag}}}{L} \right| &= \frac{\frac{1}{2} e \omega r^2}{m_o r^2 \omega} = \frac{1}{2} \frac{e}{m_o} \\ m_{\text{mag}} &= -\frac{1}{2} \frac{e}{m_o} L. \end{aligned} \quad (7.45)$$

Tanda negatif mempunyai arti bahwa arah m_{mag} dan L saling berlawanan.

Melalui magnetisasi sebuah inti magnet pada arah sumbunya, arah momen magnetik dan arus melingkar, yang sebelumnya mempunyai arah tidak beraturan, dapat berubah. Dengan demikian arah momentum orbital elektron juga turut berubah. Berdasarkan hukum kekekalan momentum orbital, perubahan momentum masing-masing elektron menyebabkan pula perubahan makroskopik momentum orbital batang magnet keseluruhan, berarti mulai terjadinya rotasi (kecepatan sudut ω').

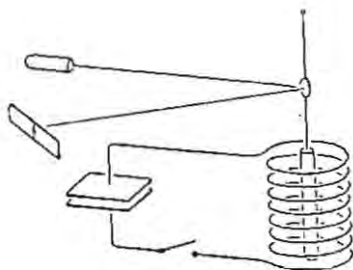
Efek ini dapat dibuktikan dengan cara menggantungkan batang magnet pada sebuah kawat halus dan ditempatkan tegak lurus di dekat sebuah kumparan yang dihubungkan dengan sebuah kondensator sehingga arus yang timbul (pelepasan muatan) dapat diamati melalui kondensator tersebut (gambar[7.35]). Setelah terjadi pelepasan muatan momen magnet besi tidak kembali nol, melainkan tetap pada arah magnetisasi karena adanya *remanens* N . Melalui *remanens* ini batang besi tersebut mengalami perubahan momentum orbital sebesar $N L$. Momentum orbital ini sama dengan momen inersia batang θ dikalikan dengan kecepatan sudut ω' , yang memutar batang dari keadaan semula. Selanjutnya, dapat diketahui dari sudut putar, hingga batang mengalami simpangan sudut terhadap

sumbu panjangnya:

$$N L = \theta \omega'$$

Kemudian, tambahkan magnetisasi *remanen* $J = N m_{\text{mag}}$, karena persamaan [7.45] didapat:

$$\begin{aligned} \frac{J}{\theta \omega'} &= \frac{m_{\text{mag}}}{L} = \frac{1}{2} \frac{e}{m_0} \\ &= 0,88 \cdot 10^{11} \text{ Ckg}^{-1} \end{aligned}$$



Gambar 7.35 Efek Einstein-De Haas

(lihat §8.2.2). Dari hasil percobaan diperoleh perbandingan di atas sebesar.

$$\frac{J}{\theta \omega'} = \frac{e}{m_0} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Ckg}^{-1}$$

persis sama dengan muatan spesifik elektron (muatan elektron/massanya), sedangkan berdasarkan hipotesis di atas adalah setengah muatan spesifiknya.

Hasil percobaan itu menunjukkan adanya kaitan antara magnet elementer dan momentum orbital sehingga menggagalkan hipotesis tentang

adanya magnet elementer pada sebuah batang magnet di dalam atom. Di samping itu, percobaan sekaligus juga menunjukkan bahwa di dalam besi yang termagnetisasi, baik momen magnetik elementer maupun momentum orbital tidak berhubungan dengan orbit elektron. Seperti telah disimpulkan pada spektrum optis, elektron-elektron tersebut juga mengalami gerak pada sumbunya, yaitu gerak melingkar dan elektron dikatakan mempunyai *spin* yang juga memberi sumbangan, baik pada momentum orbital maupun momen magnetik (§12.7.1). Harga pengamatan m_{mag}/L merupakan perbandingan kedua besaran untuk tiap elektron. Harga ini ternyata sesuai dengan hasil pengamatan yang dilakukan dengan cara lain yang berbeda. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa ferromagnetik erat hubungannya dengan *spin* elektron.

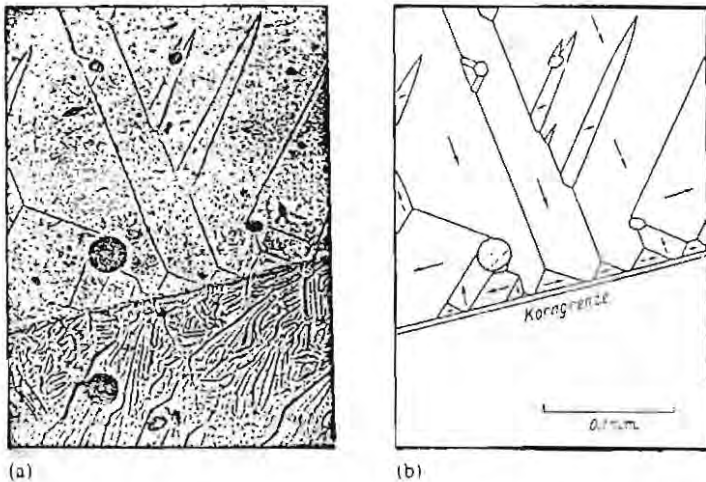
7.5.6 Struktur Bahan Ferromagnetik

Kenyataan bahwa pada bahan-bahan ferromagnetik, sebaliknya dibandingkan dengan bahan paramagnetik, dapat mencapai keadaan jenuh yang dapat dibuktikan dengan asumsi bahwa semua spin-spin elektron yang memberikan sumbangan pada magnetisasi akan terarah sesuai dengan arah medan magnet. Gerak karena pengaruh temperatur yang mengganggu keteraturan susunan momen dipol paramagnetik kecil sekali dapat dipengaruhi medan magnet luar yang diberikan. Sebaliknya, pada bahan-bahan ferromagnetik hal tersebut tidak terjadi dan tidak mengganggu keteraturannya, selama temperatur tetap di bawah temperatur Curie. Di daerah yang disebut *daerah* Weiss bahan ferromagnetik juga tidak akan terpengaruh dengan adanya medan luar, atau dengan perkataan lain arah momen dipol magnet tidak mengalami perubahan hingga bahan mencapai magnetisasi jenuh. Dengan dasar pengetahuan mekanika kuantum yang menjelaskan struktur atom dapat dijelaskan mengapa justru atom-atom Fe, Ni, dan Co dapat bereaksi demikian bahwa spin elektron yang dimiliki masing-masing atom tersebut mempunyai arah yang sama demikian (W Heisenberg).

Hal terpenting dari teori ferromagnetisme adalah kelakuan daerah

lapisan batas atau "dinding" antara tetangga daerah Weiss (F. Bloch). Dalam keadaan bebas permukaan daerah tersebut mempunyai pengaruh sebagai "sumber" atau "penerima" (kutub Utara dan Selatan) dari garis-garis gaya magnet. Jika butir-butir bahan ferromagnet dimasukkan ke dalam larutan, sebagai koloida, terlihat bahwa butir-butir tersebut terlepas dari dinding Bloch. Garis-garis lurus yang terdapat pada bubuk ferromagnetik disebut *garis-keras* (gambar[7.36]), garis-garis tersebut adalah batas antara daerah Weiss. Juga pada besi histerisis akan menunjukkan juga terjadi magnetisasi spontan yang juga terjadi pada bahan-bahan histerisis lain.

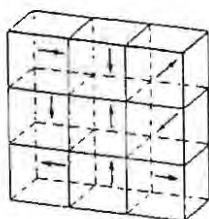
Daerah terjadinya magnetisasi yang sama pada umumnya tidak sesuai dengan ukuran bahan kristalit polikristalin. Sumbu magnet biasanya paralel terhadap sumbu kristal; pada Fe dengan struktur unit kristal kubus adalah sama dengan akan ukuran sisanya. Dalam keadaan tanpa medan magnet, masing-masing momen dipol yang terdapat pada masing-masing daerah Weiss saling kompensasi satu sama lain (gambar[7.37]). Adanya medan



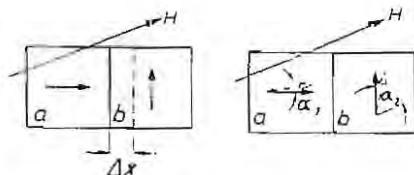
Gambar 7.36 a) dan b) *Garis-keras* pada permukaan Si-Fe [dari B. Elschner]

magnet luar menyebabkan orientasi momen dipol mengalami perubahan secara optimal sesuai dengan energi yang ada dan daerah Weiss dapat

melebar ke daerah Weiss tetangganya. Melebarnya daerah tersebut ke daerah tetangganya tidak disertai dengan pembalikan arah spin elektron-elektron atom yang berada di daerah tetangga. Apa yang terjadi adalah spin-spin atom yang terdapat di daerah batas akan saling bertukar arah dari tetangga satu ke tetangga lainnya. Dengan demikian, terjadi pergeseran dinding daerah batas menjadi daerah batas yang baru. Pergeseran "dinding" ini dapat terjadi secara reversibel atau irreversibel. Dengan menguatkan medan listrik lebih besar, terjadi perubahan arah spin (gambar[7 38]) hingga sesuai dengan arah kuat medan magnet H dan kemudian terjadi keadaan jenuh. Proses ini menyebabkan terjadinya *tegangan dalam* di sekitarnya, yang membedakan sifat magnet berbagai campuran atau senyawa besi.



Gambar 7.37 Daerah elementer Weiss pada besi yang termagnetisasi



Gambar 7.38 Pergeseran dinding batas daerah Weiss dan rotasi terhadap arah medan magnet pada proses magnetisasi hingga mencapai keadaan magnetisasi jenuh

Adanya hubungan antara pergeseran dinding irreversibel dengan perubahan medan magnet induksi dapat dibuktikan melalui percobaan sebagai berikut. Seutas kawat yang terbuat dari besi lunak diletakkan di dalam sebuah kumparan yang mempunyai banyak lilitan. Ujung-ujung kawat dihubungkan dengan penguat dan sebuah pengeras suara. Jika kawat di dekatkan dengan kumparan akan terdengar suara derau yang sangat keras pada pengeras suara. Magnetisasi kembali tidak selalu terjadi, dengan

membalikkan daerah Weiss menjadi keadaan yang baru sehingga terjadi induksi pada kumparan yang menyebabkan timbulnya suara berderau pada pengeras suara (*efek Barkhausen*).

Jika kuat medan magnet dikecilkan, terjadi pergeseran dinding kembali secara reversibel dan rotasi yang terjadi terhadap sumbu kristal kembali ke keadaan semula. Akan tetapi, pergeseran dinding tidak terjadi secara reversibel. Hal itu berarti bahwa tidak semua daerah Weiss kembali ke ukuran dan arah semula sehingga dengan meniadakan medan magnet terjadi magnetisasi *remanens*.

7.5.7 Antiferromagnetik dan Ferrimagnetik

Hingga pembahasan di sini telah dibedakan 3 sifat magnetik, yaitu berdasarkan harga suseptibilitas χ masing-masing (persamaan[7.37]) terhadap harga temperatur absolut:

Diamagnetik: $\chi < 0$, tidak bergantung pada temperatur (§7.5.2)

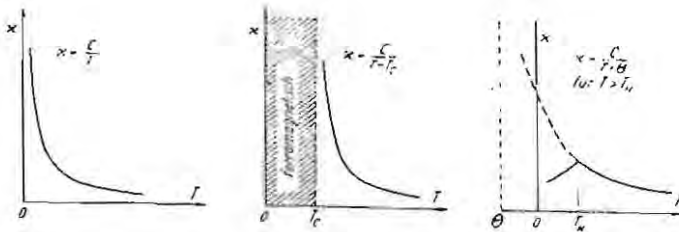
Paramagnetik: $\chi = C/T$. (§7.5.3).

Ferromagnetik: di bawah temperatur T_c harga χ tidak bergantung pada medan magnet dengan ketinggian kurva maksimum (gambar[7.43]), di bawah harga T_c $\chi = C/(T - T_c)$ (lihat persamaan[7.43])

Dengan pembagian di atas, belum diketahui dengan lengkap sifat-sifat magnetisasi untuk masing-masing tipe. Terdapat pula bahan-bahan, biasanya mengandung ion-ion paramagnetik seperti MnO, MnF₂, yang di atas temperatur kritis T_N (temperatur yang diungkap pertama kali oleh Neel, biasa disebut temperatur Neel) berlaku:

$$\chi = \frac{C}{T - T_N} \quad (7.46)$$

sementara di bawah T_N harga suseptibilitasnya menurun kembali (gambar[7.39]). Bahan-bahan seperti ini disebut *antiferromagnetik*.



Gambar 7.39 Kebergantungan suseptibilitas bahan-bahan dia-, para- ferro dan antiferromagnetik terhadap temperatur.

Penurunan harga x dengan penurunan temperatur dapat dijelaskan sebagai berikut. Keteraturan spin elektron atom-atom yang terdapat di dalam kristal yang memberikan sumbangan pada harga magnetisasi pada temperatur rendah cenderung mempunyai arah saling antiparalel sehingga tidak mempunyai pengaruh ke luar. Jumlah atom-atom yang mempunyai arah spin antiparalel ini akan semakin berkurang pada keadaan temperatur semakin meningkat dan akan terlepas sama sekali pada $T = T_N$. Di atas temperatur T_N , spin akan dipengaruhi temperatur, seperti halnya terjadi pada bahan-bahan paramagnetik.

Jika (pada beberapa struktur kisi kristal) spin dalam keadaan berbeda dibandingkan dengan harus membentuk pasangan antiparalel dan pengaruhnya hanya terkompensasi pada bagian darinya, akan muncul sifat yang hampir mirip dengan ferromagnetik, yaitu *ferrimagnetisme*. Akan tetapi, dengan magnetisasi jenuh yang jauh lebih kecil dari pada ferromagnet. Sebagai contoh bahan yang mempunyai sifat ferrimagnetik adalah magnetik besi Fe_3O_4 .

Dengan mensubstitusikan atom-atom lainnya pada posisi Fe di dalam kisi kristalnya, muncul bahan yang dinamakan *ferrite* yang mempunyai kurva magnetisasi berbeda dibandingkan dengan ferromagnetik. Selain itu, bahan-bahan ini mempunyai sifat isolator dan jika digunakan sebagai

inti transformator karena tidak menimbulkan kehilangan arus berpusar. Karena dua sifat ferrite demikian, bahan ini mempunyai arti penting untuk kepentingan teknologi sehingga bahan ini setiap tahunnya diproduksi tidak kurang dari 10^7 kg.

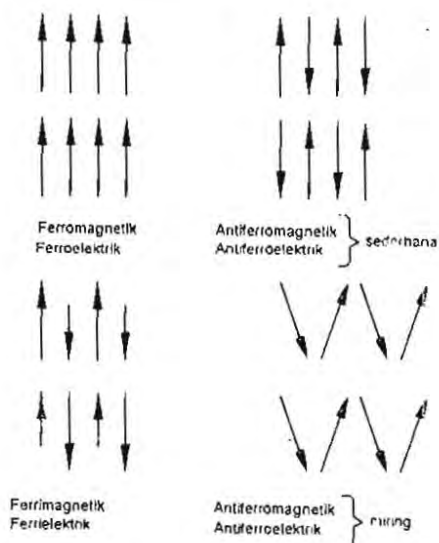
7.5.8 Paraelektrik dan Antiferroelektrik

Seperti kelakuan bahan ferromagnetik di dalam medan magnet, sederetan garam juga mempunyai kelakuan yang sama di dalam medan listrik. Dengan dasar kemiripan sifat tersebut, peristiwa ini disebut *ferroelektrik* dan *antiferroelektrik*, walaupun bahan-bahan garam tersebut tidak mengandung besi sama sekali.

Beberapa senyawa ferroelektrik penting adalah garam Seignet yaitu $\text{NaK}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6)$ (kalium-natrium-asam anggur) dan barium titanat (BaTiO_3). Konstanta dielektri bahan-bahan ini sangat tinggi (di atas 1000). Seperti halnya pada ferromagnetisme, pada bahan ini terdapat pula momen dipol listrik spontan yang mempunyai arah teratur. Dengan bertambah besarnya kuat medan, pertama-tama terjadi peningkatan polarisasi listrik sehingga mencapai harga polarisasi jenuhnya, dan kemudian keadaan polarisasi tidak lenyap dengan serta merta jika medan diadakan (keadaan ini disebut "*elektret*") dan "elektret" dapat dihilangkan dengan memberikan medan listrik yang berlawanan arah dengan medan mula-mula sebesar 10^3 V/cm. Polarisasi dalam hal ini bergantung kuat medan listrik, seperti halnya pada ferromagnetik (gambar [refg7.30]). Bahan-bahan ferroelektrik menunjukkan pula adanya fenomena temperatur Curie (lihat persamaan [7.43]). Penggunaan bahan-bahan ini dalam bidang teknik sebagai kristal vibrasi karena kenyataannya bahan-bahan ini mempunyai sifat piezoelektrik (§6.2.5).

Di samping itu, pada bahan ini dapat pula terjadi arah momen dipol listrik yang saling antiparalel, yaitu analog dengan bahan antiferromagnetik contoh antiferroelektrik adalah WO_3 . Dapat pula terjadi bahwa pasangan momen dipol elementer berbeda besarnya mempunyai arah saling

antiparalel secara spontan dan bahan ini disebut *ferrielektrik*, yaitu mirip fenomena ferrimagnetik.

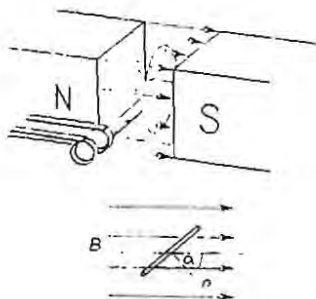


Gambar 7.40 Kemungkinan susunan momen dipol magnet dan listrik yang berbeda-beda dari masing-masing partikel bahan yang bersangkutan di dalam zat padat.

7.6 Arus dan Tegangan Bolak-balik

7.6.1 Sumber Arus Bolak-balik

Untuk membangkitkan arus bolak-balik dengan gaya yang besar pada frekuensi rendah (hingga lebih kurang 1 kHz) dibutuhkan generator listrik. Generator ini dibuat berdasarkan prinsip sebagai berikut. Di dalam medan magnet homogen indexgenerator arus bolak-balik antara dua kutub magnet permanen ditempatkan sebuah kumparan yang dililiti konduktor dengan luas permukaan kumparan S diletakkan membentuk sudut α terhadap arah normal medan magnet (gambar[7.41]). Melalui kumparan tersebut mengalir fluks sebesar $\Phi = BS \cos \alpha$



Gambar 7.41 Model sebuah generator listrik

Jika kumparan mengalami rotasi dengan kecepatan sudut konstan $\omega = d\alpha/dt$ dengan α = fluks Φ juga mengalami perubahan secara periodik. Perubahan kecepatannya adalah sama dengan tegangan induksi U_{ind} , yang dapat diukur dengan menggunakan voltmeter

$$\begin{aligned}
 U_{ind} &= -\frac{d}{dt} (BS \cos \omega t) \\
 &= BS\omega \sin \omega t = U_0 \sin \omega t
 \end{aligned}
 \tag{7.47}$$

Tegangan induksi dapat digambarkan melalui kurva sinusoidal. Kurva ini berisolasi dengan periode $T = \nu^{-1} = 2\pi / \omega$ dan frekuensinya sama dengan frekuensi rotasi kumparan. Tegangan akan mengalami deviasi di sekitar harga U_0 yaitu tegangan puncak yang besarnya sebanding dengan medan magnet B , luas permukaan kumparan S dan kecepatan sudut ω , yaitu kecepatan sudut yang sama kumparan dirotasikan.

Pada generator teknis sebagai magnet pembangkit digunakan elektromagnet, yang bekerja berdasarkan prinsip *dinamo listrik* Siemens yaitu dengan menggunakan arus induksi (rangkaiannya utama) atau bagian pengganti (rangkaiannya pengganti) sebagai "perangsang".

Untuk generator dengan daya kecil digunakan pembangkit osilasi listrik yang bekerja berdasarkan prinsip hubung-balik (lihat §8.2.8) sehingga tidak diperlukan bagian yang digerakkan secara mekanis. Generator semacam ini dijual di pasaran dengan frekuensi 0,1 hingga 10^{10} Hz

Suatu tegangan bolak-balik timbul di dalam rangkaian tertutup dengan pengaruh kapasitansi dan induksi diri sangat kecil terhadap tahanan Ohm dari hukum Ohm, arus yang lewat rangkaian tersebut adalah sebesar:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \sin \omega t$$

Kurva arus dan tegangan terhadap waktu adalah sama-sama berbentuk sinusoidal. Fase antara keduanya juga tidak mengalami perubahan.

Kurva tegangan dan juga arus bolak-balik terhadap waktu dapat diketahui dengan menggunakan *osiloskop*, yang diperlukan adalah

1. Galvanometer Kawat Lihat (§7.2.6).

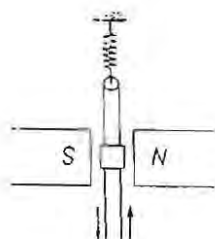
2. Osilograf Lilitan

Antara dua kutub magnet (gambar [7.42]) terdapat sebuah lilitan kecil sebesar jarum dan dihubungkan dengan sebuah roda. Pada sisi panjangnya digantungkan sebuah cermin kecil. Sebagai peredam sistem yang dapat berisilasi ini dimasukkan ke dalam minyak. Cahaya yang datang melalui

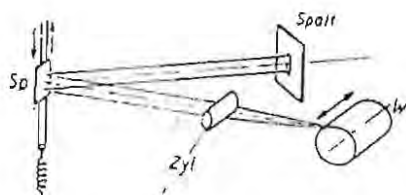
celah (gambar[7.43]) akan direfleksikan oleh cermin yang terdapat osilograf melalui sebuah lensa berbentuk selinder dan akhirnya, cahaya yang telah difokuskan kembali ini dijatuhkan pada sebuah selinder W yang juga dirotasikan dengan kecepatan sudut konstan untuk kemudian direkam dengan menggunakan alat fotografi. Jika arus dialirkan pada arah seperti terlihat pada gambar[7 42] dan [7 43] melalui lilitan, masing-masing kawat sebelah kiri dan kanan akan menyimpang ke depan dan ke belakang sedangkan cermin akan mengalami rotasi terhadap sumbu sejajar kawat. Dengan demikian, cahaya yang jatuh di permukaan selinder W akan bergeser sesuai dengan tanda panah yang ditunjukkan pada gambar. Pergeseran cahaya ini adalah sebanding dengan kuat arus yang diberikan. Hal ini berlaku juga untuk kuat arus bolak-balik, yang menyebabkan lilitan mengalami getaran dipaksakan. Frekuensi lilitan harus lebih besar dibandingkan dengan frekuensi arus bolak-balik (lihat §4.1 2).

3. Osilograf Berkas Sinar Katode

(§8.2.1) Pada alat ini sebagai penunjuk digunakan berkas elektron yang dapat dibelokkan oleh medan listrik. Alat ini tidak mengandung bagian mekanis sehingga dapat digunakan untuk frekuensi tinggi



Gambar 7.42 Osilograf lilitan



Gambar 7.43 Peralatan perekam untuk mengukur simpangan pada osilograf lilitan

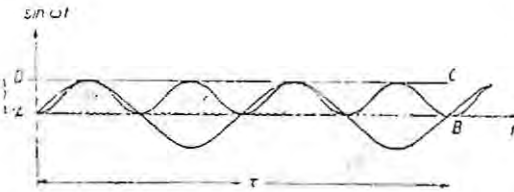
7.6.2 Harga efektif Arus dan Tegangan

Daya Joule rangkaian yang dialiri $I = I_0 \sin \omega t$ atau diberi tegangan

$U = U_0 \sin \omega t$ bolak-balik, mengandung tahanan R , tanpa kapasitansi atau induktansi adalah:

$$\begin{aligned} P &= I^2 R = R I_0^2 \sin^2 \omega t = \frac{U^2}{R} \\ &= \frac{U_0^2}{R} \sin^2 \omega t \end{aligned}$$

Daya tersebut berubah terhadap waktu sebanding dengan $\sin^2 \omega t$ (gambar[7.44]). Harga rata-rata P ditentukan oleh harga rata-rata kuadrat arus atau tegangan. Karena fungsi $\sin^2 \omega t = 1/2(1 + \sin^2 \omega t)$, sebagaimana terlihat pada gambar[7.44], mempunyai harga rata-rata $1/2$ sehingga



Gambar 7.44 Harga rata-rata terhadap waktu dari $\sin^2 \omega t$



Gambar 7.45 Arus bolak-balik searah (pulsa arus searah)

sehingga

$$\begin{aligned} \bar{P} &= R I_0^2 \overline{\sin^2 \omega t} = \frac{1}{2} I_0^2 R \\ &= \frac{1}{2} \frac{U_0^2}{R} = \frac{1}{2} I_0 U_0 \end{aligned}$$

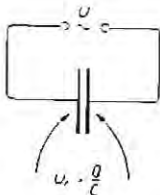
Bandingkan dengan hukum Joule arus dan tegangan searah. Diketahui bahwa arus bolak-balik dengan amplitudo arus I_0 dan amplitudo tegangan U_0 mempunyai daya yang sama seperti pada sumber arus atau tegangan

searah sehingga harga efektif arus dan tegangan adalah:

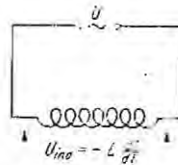
$$U_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_o \quad I_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_o$$

Dengan harga efektif arus dan tegangan di atas, daya dapat dicari sebagai berikut.

$$P = U_{ef} I_{ef} = I_{ef}^2 R = \frac{U_{ef}^2}{R}$$



Gambar 7.46 Rangkaian arus bolak-balik dengan tahanan kapasitansi.



Gambar 7.47 Rangkaian arus bolak-balik dengan tahanan induktansi

7.6.3 Tahanan pada Rangkaian Arus Bolak-balik

Perhatian sekarang sebuah rangkaian "skalar" yang terdiri atas, selain tahanan Ohm, juga kumparan (*self inductance*) dan kondensator. Untuk mengevaluasi rangkaian tersebut, juga jika digunakan arus bolak-balik, berlaku hukum Kirchhoff (§6.3.4):

1 Aturan simpul Pada setiap pencabangan arus, jumlah arus yang terbagi adalah sama dengan arus pada cabang utama. 2 Aturan pembagi rangkaian tertutup. Setiap pembagi, yaitu setiap bagian rangkaian saklar tertutup, mempunyai tegangan total sama dengan nol. Dengan perkataan lain, setiap dua titik di dalam rangkaian tersebut terdapat tegangan yang sama, berlaku sama untuk setiap pemilihan cabang; yang menghubungkan kedua titik tersebut, ditambahkan dengan harga yang sama.

Walaupun sesungguhnya kondensator memutus arus yang lewat melaluinya, pada setiap plat terdapat muatan yang sama banyaknya seperti halnya muatan mengalir di tempat yang lain. Secara keseluruhan tetap mengalir arus melalui kondensator yang dapat dinyatakan sebagai perubahan muatan terhadap waktu:

$$I = \dot{Q}$$

Berdasarkan definisi kapasitas, berarti pula terdapat perubahan tegangan U kondensator

$$I_{\text{kond}} = \dot{Q} = C \dot{U}_{\text{kond}} \quad (7.48)$$

Jika melalui kumparan mengalir arus sebesar I_{sp} , antara ujung-ujung kumparan terdapat tegangan induksi sebesar:

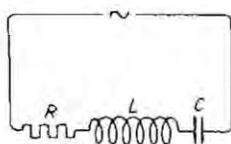
$$U_{\text{kond}} = L I_{\text{sp}} \quad (7.49)$$

Pada tahanan Ohm R , melaluinya mengalir arus sebesar I_{wid} , terdapat tegangan sebesar:

$$U_{\text{wid}} = R I_{\text{wid}}$$

Jika tahanan, induktansi dan kondensator dihubungkan seri (gambar[7.48]), tegangan total merupakan penjumlahan semua tegangan pada masing-masing elemen rangkaian:

$$U = RI + L \dot{I} + U_{\text{kond}} \quad (7.50)$$



Gambar 7.48 Rangkaian arus bolak-balik dengan tahanan Ohm R , induktif (ωL) dan kapasitansi ($1/\omega C$).

Pada rangkaian paralel tersebut, arus yang lewat pada rangkaian adalah penjumlahan semua arus yang melalui masing-masing elemennya:

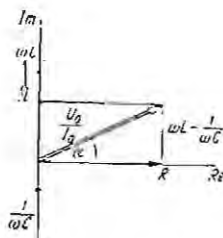
$$I = C\dot{U} + \frac{U}{R} + I_{sp} \quad (7.51)$$

I dan U_{kond} pada persamaan[7.50] dapat dinyatakan dalam I dan U dan I_{sp} pada persamaan[7.51] diganti dengan U sehingga perhitungan selanjutnya dapat dilakukan dengan menggunakan hukum Ohm. Dengan demikian, semua tahanan pada rangkaian arus bolak-balik dapat terbaca. Semua perhitungan di atas akan menjadi lebih mudah jika digunakan perhitungan bilangan kompleks.

Diasumsikan bahwa arus bolak-balik ditulis sebagai arus yang bergantung pada waktu secara harmonik: $I = I_0 \cos \omega t$, atau dalam notasi kompleks

$$I = I_0 e^{i\omega t} = I_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t) \quad (7.52)$$

Jika persamaan di atas digambarkan pada bidang kompleks Gauss, titik



Gambar 7.49 Operator kompleks tahanan.

akhir I terletak pada sebuah lingkaran berjari-jari I_0 dengan kecepatan sudut ω . Bagian *real* pernyataan ini merupakan kurva getaran harmonik. Secara fisis diasumsikan bahwa bagian ini merupakan arus yang diamati, lewat pada rangkaian. Jika terdapat perubahan fase arus $I = I_0 \cos(\omega t + \delta)$,

tanpa menemukan kesulitan, dapat pula dinyatakan dalam:

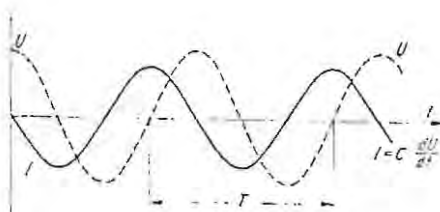
$$I = I_0 e^{i\delta} \cdot e^{i\omega t} = I_0 e^{i\omega t}$$

Dalam hal ini amplitudo $I_0 = I_0 e^{i\delta}$ menjadi bilangan kompleks. Amplitudo ini, pada bidang Gauss, diberikan sebagai berkas dengan panjang I_0 yang membentuk sudut δ terhadap sumbu *real* positif.

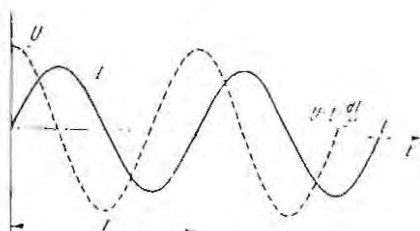
Turunan terhadap waktu dan integrasi fungsi-fungsi di atas adalah sama dengan perhitungan turunan dan integral untuk fungsi eksponensial e , biasa, yaitu

$$\dot{I} = i\omega I_0 e^{i\omega t} I$$

$$\ddot{I} = (i\omega)^2 I = -\omega^2 I$$



Gambar 7.50 Beda fase $\pi/2$ antarus dan tegangan di dalam rangkaian arus bolak-balik dengan sebuah kapasitor C . Arus lebih cepat sekitar $T/4$ dibandingkan dengan tegangannya.



Gambar 7.51 Beda fase $-\pi/2$ antarus dan tegangan di dalam rangkaian arus bolak-balik dengan sebuah kumparan L . Arus tertinggal sekitar $T/4$ dibandingkan dengan tegangannya.

$$\int I dt = \int I_0 e^{i\omega t} dt = \frac{1}{i\omega} I_0 e^{i\omega t} = \frac{1}{i\omega} I$$

diferensiasi terhadap t berarti pula sama dengan fungsi dikalikan dengan

$i\omega$ sedangkan integrasi sama dengan fungsi dibagi dengan $i\omega$. Dengan mengingat bagaimana perkalian dua fungsi atau bilangan kompleks, yaitu harga multiplikasinya, sudut fase masing-masing dijumlahkan satu sama lain. Dengan mengingat kembali persamaan [4.34], diketahui bahwa $i = e^{i\pi/2}$ sehingga:

Harga amplitudo kompleks I adalah sama dengan hasil multiplikasi I dan ω , dengan beda fase I adalah $\pi/2$ lebih awal dari pada I . Harga amplitudo f/dt sama dengan I dibagi dengan ω dengan beda fase $\pi/2$ lebih "lama" dari pada I . Demikian pula halnya untuk tegangan.

Dari pernyataan di atas maka persamaan [7.48] dan [7.51] menjadi:

$$\begin{aligned} I_{\text{kond}} &= i\omega U_{\text{kond}} \\ U_{\text{sp}} &= i\omega L I_{\text{sp}} \end{aligned} \quad (7.53)$$

Tahanan kondensator dan kumparan dapat pula ditulis dalam bentuk bilangan kompleks sebagai berikut.

$$R_{\text{kond}} = \frac{1}{i\omega C} \quad R_{\text{sp}} = i\omega L \quad (7.54)$$

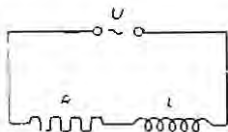
Dengan demikian, dapat diketahui bahwa tidak hanya ramalan tentang arus dan tegangan saja yang dapat diperoleh, melainkan juga didapat ramalan tentang fase keduanya. Pada kondensator perbandingan antara tegangan dan arus maksimum $U_0/I_0 = 1/\omega C$, arus lebih cepat $\pi/2$ dibandingkan dengan tegangan. Pada kumparan $U_0/I_0 = \omega L$, arus terlambat sebesar $\pi/2$ dibandingkan dengan tegangan.

Gambaran kompleks persamaan [7.50] dan [7.51] menghasilkan:

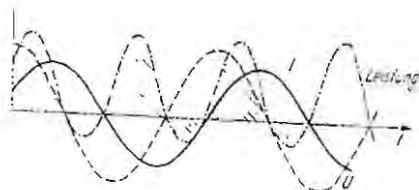
$$\begin{aligned} U &= RI + i\omega LI + \frac{1}{\omega C} I = RI \\ I &= i\omega CU + \frac{1}{R} + \frac{1}{i\omega L} U = \frac{U}{R} \end{aligned} \quad (7.55)$$

Terlihat bahwa tahanan pengganti pada rangkaian arus bolak-balik jika ditulis dalam bentuk kompleks adalah sama dengan tahanan pengganti pada rangkaian arus searah:

Pada rangkaian arus bolak-balik dengan masing-masing tahanan (R, L , dan C) dihubungkan secara seri maka tahanan pengganti adalah



Gambar 7.52 Rangkaian arus bolak-balik dengan tahanan induktif (kumparan) L dan tahanan Ohm R .



Gambar 7.53 Daya pada rangkaian arus bolak-balik dengan tahanan induktif (kumparan) L dan tahanan Ohm R

adalah penjumlahan masing-masing tahanan yang ada. Pada hubungan paralel, kebalikan (*invers*) tahanan pengganti merupakan penjumlahan dari kebalikan (*invers*) harga tahanan masing-masing. Bagian real, R_r , dari tahanan kompleks $R = R_r + iR_i$ disebut *tahanan beban*, tahanan kompleks R_i disebut *tahanan buta* dan harga tahanan total $|R| = \sqrt{R_r^2 + R_i^2}$ disebut *tahanan nyata*

Untuk rangkaian arus bolak-balik berlaku hukum Ohm sebagai berikut

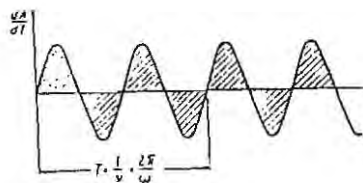
$$U = RI$$

Diartikan sebagai tegangan maksimum U_0 diperoleh dan perkalian arus maksimum I_0 dan tahanan nyata $|R|$; keduanya mempunyai perbedaan fase dengan sudut

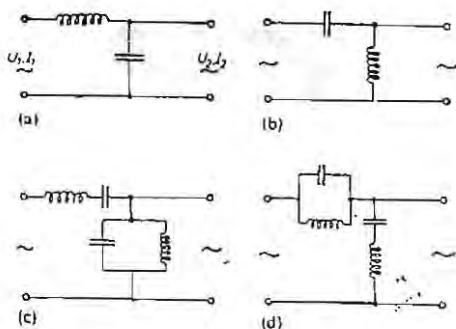
$$\delta = \arctan \frac{R_i}{R_r}$$

Daya yang terdapat pada rangkaian arus bolak-balik $I = I_0 \cos \omega t$ dengan tegangan sebesar $U = U_0 \cos(\omega t - \delta)$, diperoleh berdasarkan hukum Joule:

$$P = IU = I_0 \cos \omega t \cdot U_0 \cos(\omega t - \delta)$$



Gambar 7.54 Daya pada rangkaian arus bolak-balik dengan tahanan induktif (kumparan) L tanpa tahanan Ohm R .



Gambar 7.55 a)-d) Elemen filter tegangan dan arus bolak-balik a) *low-pass-filter*. b) *high-pass-filter*, c) *band-pass-filter* dan d) *band-block-filter*

Selanjutnya perhatikan keadaan khusus, yaitu untuk $\delta = \frac{\pi}{2}$ sehingga $P = I_o \cos \omega t \cdot U_o \sin \omega t$. Harga rata-rata $\cos \omega t \sin \omega t = 1/2 \sin 2\omega t$ berharga nol (gambar [7.54]). Pada rangkaian arus bolak-balik yang hanya mengandung kapasitas (kondensator) atau hanya kumparan saja, dengan perata-rataan terhadap waktu tidak diperlukan kerja. Pada $\delta = 0$: adalah sebaliknya, seperti telah dibahas pada §7.6.2 bahwa $P = U_{ef} I_{ef} = \frac{1}{2} I_o U_o$. Untuk daya ini yang berpengaruh hanya tahanan beban R :

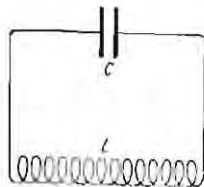
$$P = R_r I_{ef}^2 = \frac{U_{ef}^2}{R_r} = U_{ef} I_{ef} \cos \delta \quad (7.56)$$

7.6.4 Rangkaian Osilator

Pada tahun 1859 Feddersen mengungkapkan bahwa sinyal pelepasan muatan "botol Leiden" tidak hanya terdiri atas satu sinyal, melainkan mengandung sederetan sinyal beraturan yang muncul dalam urutan "jarak waktu" beraturan pula. Sinyal tersebut dapat diamati melalui cermin

yang dapat berotasi. Selain itu gambar sinyal tersebut menunjukkan pula bahwa pada saat awal pelepasan muatan terjadi perubahan polaritasnya. Peristiwa pelepasan muatan sebuah kondensator tidak terjadi secara monoton, melainkan dalam bentuk pelepasan dan permuatan kembali kondensator yang berangkutan, yaitu proses "mengisi-membuang" muatan listrik. Dengan perkataan lain, persis seperti peristiwa "getaran". Jika terdapat tahanan Ohm terlalu besar, tidak akan terjadi getaran.

Getaran seperti ini dapat dengan mudah dimengerti. Jika suatu rangkaian (gambar[7.56]) tidak mengandung sumber tegangan, jumlah penurunan tegangan pada setiap elemen pada rangkaian sama dengan nol. Digunakan hubungan $I = \dot{Q}$, $I = \dot{Q}$ dan jika seluruh tegangan yang terdapat



Gambar 7.56 Rangkaian osilator.

pada masing-masing elemen dinyatakan dalam Q :

$$U = \frac{Q}{C} + R\dot{Q} + L\ddot{Q} = 0 \quad (7.57)$$

Persamaan diferensial di atas sama persis seperti persamaan diferensial suatu getaran, lengkap mengandung suku "penggerak" dan "gesekan" (lihat §4.1.6):

$$Dx + k\dot{x} + m\ddot{x} = 0$$

Diperlukan pengertian mekanik berdasarkan "kamus istilah" dalam menerjemahkannya

$$x \rightarrow Q \quad m \rightarrow L \quad k \rightarrow R \quad D \rightarrow \frac{1}{C}$$

Semua hasil perhitungan yang telah dibahas pada §4.1.6 dapat dipakai. Dalam rangkaian tanpa tahanan Ohm, arus bolak-balik akan mengalir dengan amplitudo konstan dalam selang waktu (periode):

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (\text{Persamaan Thomson}) \quad (7.58)$$

Adanya tahanan Ohm menyebabkan penurunan frekuensi getaran menjadi:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

sehingga menghasilkan getaran teredam amplitudo:

$$I = I_0(0) e^{-\frac{R}{2L}t}$$

Jika tahanan Ohm terlalu besar, yaitu

$$R \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

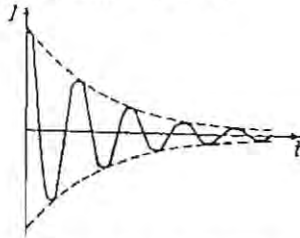
tidak akan terdapat getaran lagi (kasus "merayap").

Getaran dipaksakan yang telah dibahas pada §4.1.6 dapat langsung dipakai, yaitu jika ruas kanan (nol) persamaan [7.57] diganti dengan tegangan bolak-balik:

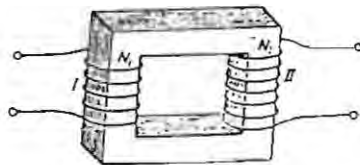
$$U_0 \cos \omega t = \frac{Q}{C} = R\dot{Q} + L\ddot{Q} \quad (7.59)$$

yang mempunyai arti bahwa rangkaian dihubungkan dengan sumber tegangan atau hubungan kapasitas rangkaian osilator sebagai pengganti gaya penggerak mekanik pada §4.1.6. Muatan kapasitor Q yang

menyebabkan adanya arus dan tegangan pada rangkaian osilator mempunyai amplitudo dan fase persis seperti yang terlihat pada gambar[4.4] dan [4.5]. Jika $R < 2 \sqrt{L/C}$, amplitudo akan bergantung pada frekuensi dan akan terjadi maksimum $\omega = 1/\sqrt{LC}$ dan bentuk kurva akan semakin tinggi dan tajam jika R semakin kecil.



Gambar 7.57 Penurunan kuat arus pada rangkaian getaran listrik (osilator) dipaksakan.



Gambar 7.58 Transformator.

7.6.5 Transformator

Sebuah transformator terdiri atas dua kumparan yang dililitkan pada inti magnet yang sama (gambar[7.58]). Inti magnet transformator harus mempunyai permeabilitas tinggi dengan daya penghantar rendah untuk mencegah terjadinya pusaran arus. Untuk transformator berdaya rendah biasanya digunakan inti *ferrie* dengan rangka besi yang dipoles tebal.

Lilitan primer ditempatkan pada tegangan U_1 . Tahanan yang terdapat padanya R_1 , lilitan indexsekunder N_2 , lilitan praktis tahanan induktif murni sehingga tegangannya sama dengan tegangan yang ditimbulkan karena induksi diri dan jumlah lilitannya, N_1 . Tegangan ini timbul karena perubahan fluks induksi yang terdapat antara magnet dan lilitan:

$$U_1 = N_1 \Phi$$

Dalam keadaan ideal terdapat fluks induksi konstan pada inti magnet dan menjalar ke kumparan kedua dengan N_2 lilitan sehingga menimbulkan tegangan:

$$U_2 = -N_2 \Phi$$

Untuk transformator ideal (tanpa kehilangan daya) tegangan yang diukur melalui pada penjepit pada kumparan sekunder adalah:

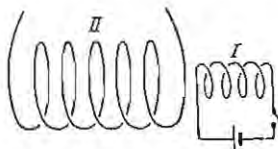
$$U_2 = -\frac{N_2}{N_1} U_1 \quad (7.60)$$

Dengan memilih perbandingan N_1/N_2 secara prinsip dapat dipilih tegangan primer sesuai dengan tegangan sekunder yang diinginkan, untuk keperluan apakah transformator untuk menaikkan tegangan (*step up*) atau untuk menurunkan tegangan (*step down*). Jika dihitung tegangan pada gambar[7 58] akan diketahui bahwa tegangan pada kedua kumparan, apakah untuk menaikkan atau menurunkan, keduanya mempunyai beda fase sebesar π karena garis-garis medan induksi pada bagian kanan "selalu tetap di kepala", yang berarti bahwa Φ dan Φ terhadap kumparan sekunder harus dihitung dengan tanda yang berlawanan, seperti halnya terhadap kumparan primer.

Hubungan keduanya akan menjadi kompleks jika dianggap bahwa pada kumparan sekunder dialirkan arus I_2 dengan tahanan Ohm R . I_2

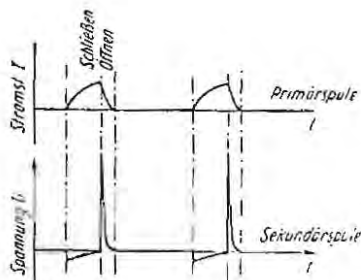


Gambar 7.59 Percobaan Elihu Thomson



Gambar 7.60 Induktor.

adalah sebanding dengan tegangan pada kumparan sekunder U_2 dan terhadap arus yang melewati kumparan primer I_1 , dengan jumlah garis-garis fluks induksi Φ_1 , akan berbeda fase sebesar $\pi/2$. Arus pada kumparan sekunder I_2 akan menghasilkan jumlah garis fluks magnetik sebesar Φ_2 dengan beda fase terhadap Φ_1 sebesar $\pi/2$. Fluks yang dihasilkan kumparan sekunder Φ_2 juga menembus kumparan primer dan akan menghasilkan beda fase $\pi/2$. Hal itu menyebabkan terjadinya beda fase antara tegangan primer dan arusnya sehingga pada kumparan primer sendiri diperlukan daya yang tanpa adanya arus yang mengganggu sebenarnya tidak harus terjadi hal demikian, (tahanan induktif murni). Dengan demikian, akan terdapat pergeseran fase antara I_1 dan I_2 , yang harganya berbeda untuk harga $R = \infty$.



Gambar 7 61 Tegangan pada kumparan sekunder sebuah induktor jika saklar sambung dan putus arus pada kumparan primer.

Dengan hubungan singkat pada kumparan sekunder terdapat beda fase sebesar π . Arus yang mengalir pada gambar[7 57] akan sama sedangkan pada gambar[7 58] akan berlawanan arah.

Fenomena seperti di atas ditunjukkan oleh percobaan Elihu Thomson (gambar[7.58]). Sebuah inti besi dililitkan (kumparan) dan cincin aluminium; cincin aluminium ini dianggap seperti kumparan sekunder pada transformator. Jika kumparan diberi arus, cincin akan terlontar dengan kencang keluar. Arus induksi yang terdapat padanya sangat besar, yaitu sebagai arus hubung-singkat. Karena tahanan cincin sangat kecil, arus yang melewati kumparan primer setiap saat mempunyai arah berlawanan dan kemudian melalui medan induksi akan "dipindahkan" ke cincin

tersebut. Jika cincin ditahan dengan kuat, cincin ini akan panas. Cara demikian dapat dipakai sebagai pencair cepat sejumlah logam.

Induktor

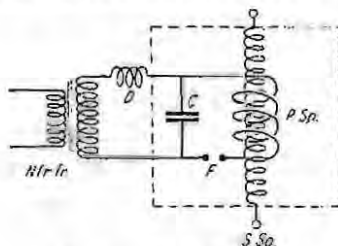
Tanpa inti magnet dua kumparan yang diletakkan indeks induktor secara sepusat menunjukkan adanya fluks induksi bersama. Setiap perubahan arus karena itu menyebabkan timbulnya tegangan pada kumparan lainnya, dapat ditentukan melalui hubungan perbandingan N_1/N_2 . Khususnya akan terjadi perubahan arus jika saklar mulai dibuka (gambar [7.59] dan [7.60]). Dengan membuat saklar otomatis, dapat menyambung dan mati (N_2 hingga 20000 lilitan). Dahulu dipakai untuk menimbulkan tegangan bolak-balik yang sangat besar (bukan tegangan sinusoida).

7.6.6 Transformator Tesla

Sebuah kondensator (misalkan dengan kapasitas $C = 1000 \text{ pF}$) mengeluarkan muatan dan sebuah lilitan tembaga berbentuk lingkaran, diameter 40 cm dengan jari-jari 2 mm ($L = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ H}$) saling dihubungkan, amplitudo akan bergetar dengan frekuensi:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} = 4,5 \cdot 10^6 \text{ det}^{-1}$$

yang merupakan getaran pelepasan muatan (lihat §7.6 4) pada saat $t = \tau = 2L/R = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ det}$. amplitudo getaran akan menurun sebesar e^{-1} [R untuk frekuensi ini diikuti adanya penurunan arus, karena efek skin (§7.6 8), kira-kira 10 kali lebih besar dibandingkan dengan tahanan pada arus searah]. Setelah 4,6 kali waktu tersebut, yaitu sama dengan $7 \cdot 10^{-4} \text{ det}$, amplitudo menjadi hanya sekitar 1% dari harga amplitudo awal sehingga



Gambar 7.62 Transformator Tesla

getaran mengalami redaman. Jika lilitan kawat tembaga dibuat kumparan primer dengan sebuah transformator sebagai kumparan sekunder dengan lebih banyak lilitan, pada saat terjadi getaran frekuensi tinggi dan karenanya terjadi perubahan fluks induksi, terdapat tegangan induksi yang sangat tinggi. Khususnya tegangan tinggi ini dapat merambat di udara bebas hingga beberapa meter, yaitu jika *frekuensi eigen* kumparan sesuai dengan frekuensi kumparan primer (*resonansi*). Gambar [7.62] melukiskan secara skematik transformator tesla. Rangka dengan garis putus-putus menggambarkan transformator tesla sebenarnya. Transformator frekuensi rendah (*N fr. Tr.*) sebagai pemasok muatan ke dalam kondensator rangkaian osilator di atas, yang melalui lilitan *P.Sp.* dan "jurang" sinyal *F* terjadi pelepasan muatan secara periodik.

Jika kumparan *P.Sp.* dibuat mengandung lilitan lebih sedikit dan menggunakan kawat tebal, akan terjadi arus yang sangat kuat dan tegangan rendah sehingga dapat digunakan pada tubuh manusia. Arus berfrekuensi tinggi ini biasanya digunakan dalam ilmu kedokteran untuk *terapi diet termis*. Sementara itu, arus searah atau arus bolak-balik berfrekuensi rendah sebesar 10 hingga 100 mA jika dikenakan pada tubuh manusia dapat mengakibatkan kematian, arus berfrekuensi tinggi dapat digunakan hingga 10A tanpa ada gangguan kerusakan pada tubuh manusia. Frekuensi ambang batas yang tidak membahayakan tubuh manusia adalah 10^5 Hz. Sementara itu, rambatan panas pada tubuh manusia hanya dapat menembus beberapa milimeter permukaan kulit, arus berfrekuensi tinggi ini dapat memberikan panas Joule untuk memanaskan organ tubuh yang paling dalam.

7.6.7 Betatron

Berdasarkan prinsip transformator dihasilkan energi elektron sangat tinggi. Elektron yang berasal dari tabung sinar katoda *G* ditembakkan secara tangensial ke dalam pipa berbentuk cincin melingkar *K* sebagai tempat isolator elektron yang terdapat di dalam lilitan sekunder *M* (gambar [7.63]). Arus bolak-balik diberikan pada kumparan primer *Psp.* Fluks induksi yang terdapat pada pipa *K* adalah $\Phi = \pi R^2 B$ (B = medan magnet induksi yang melalui permukaan cincin). Sementara itu, terjadi

perubahan fase arus bolak-balik menyebabkan harga Φ bertambah, sepanjang pipa cincin terdapat tegangan induksi $U_{\text{ind}} = -\dot{\Phi}$ sehingga terdapat medan listrik sebesar:

$$E = \frac{U_{\text{ind}}}{2\pi R} = -\frac{\dot{\Phi}}{2\pi R} = -\frac{1}{2} R \dot{B} \quad (7.61)$$

Medan listrik ini menyebabkan perubahan momentum elektron bertambah besar, yaitu:

$$\frac{d}{dt}(mv) = -eE = \frac{1}{2} eR \dot{B}$$

atau

$$mv = \frac{1}{2} eR \bar{B} \quad (7.62)$$

Rumusan di atas secara umum sama dengan prinsip aksi Newton dan berlaku untuk kecepatan relativistik, yaitu dengan menggunakan perubahan momentum, bukan gaya. Dalam hal ini kecepatan relativistik bergantung pada m , yaitu massa elektron: $m = m_0 (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$.

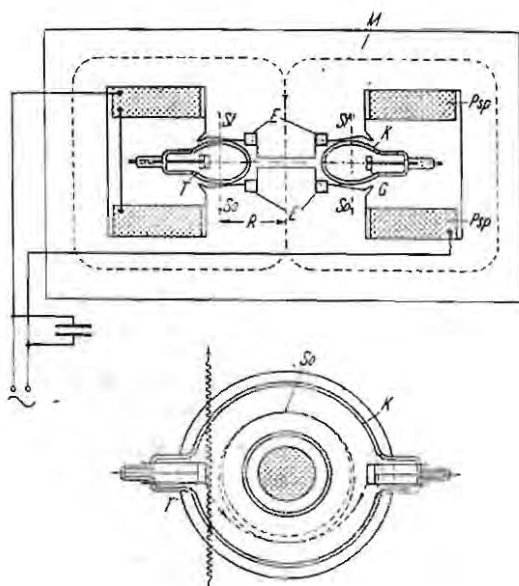
Agar elektron tetap berada pada lintasan melingkar S_0 , gaya sentrifugalnya haruslah dikompensasikan oleh gaya Lorentz:

$$\frac{mv^2}{R} = evB_{st} \quad (7.63)$$

Bandingkan persamaan di atas dengan persamaan [7.62],

$$B_{st} = \frac{1}{2} \bar{B} \quad (\text{Syarat Wideroe}) \quad (7.64)$$

Medan magnet induksi B haruslah menurun ke arah luar sehingga di dalam pipa cincin (lintasan melingkar) hanya terdapat separuh medan magnet induksi rata-rata. Hal ini dapat dipenuhi dengan cara membuat



Gambar 7.63 Betatron

lingkaran magnet sedemikian rupa, melalui pengatur kutub, sehingga diperoleh kondisi yang diinginkan. Kondisi ini dapat terpenuhi jika M tidak mencapai magnetisasi jenuh.

Pada $v \ll c$, dari persamaan [7.62], energi elektron menjadi:

$$W = \frac{1}{2} m_0 v^2 = \frac{1}{2} \frac{e^2 R^2 B^2}{m_0}$$

Jika kecepatan elektron mendekati kecepatan cahaya, energinya harus dirumuskan dalam energi relativistik yaitu energi kinetik relativistik (lihat §15.9):

$$W = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

dengan menggunakan relasi pada persamaan [7.62] diperoleh:

$$W = m_0 c^2 \left(\frac{eRB}{2m_0 v} - 1 \right)$$

Sehingga untuk $v \approx c$ berlaku:

$$W \approx \frac{1}{2} e c R B$$

Untuk harga $B = 1$ V de., $m^{-2} = 10$ G, dan $R = 0,2$ m, diperoleh energi sebesar $W = 3 \cdot 10^7$ eV. Batas maksimum energi Betatron berada di sekitar 200 Mev. Daya elektromagnetik yang terpancar pada saat elektron mengalami percepatan adalah sama dengan daya yang "diambil" dari medan pusaran. Oleh karena itu, percepatan elektron tidak akan bertambah lagi dengan baik setelah harga tersebut dicapai.

Sesaat setelah medan magnet tidak berharga nol (arus diberikan sehingga muncul medan magnet), bagian kecil periode elektron yang ditembakkan dari sumber G dan masuk ke cincin lingkaran Sol akan memenuhi persamaan [7.62]. Jika medan magnet mencapai harga tertentu sehingga dapat mempercepat elektron dengan energi yang dikehendaki, pada *kumparan ekspansi E* terdapat arus induksi yang melemahkan medan magnet pengaruh elektron. Oleh karena itu, elektron akan bergerak membentuk lintasan spiral ke arah luar hingga mencapai layar antikatode T yang selanjutnya menimbulkan gelombang sinar-x.

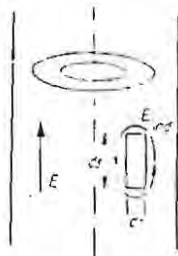
7.6.8 Skin Effect

Pada frekuensi tinggi arus tidak terdistribusi dengan kerapatan yang sama pada penampang lintang sebuah konduktor berbentuk selinder secara keseluruhan, melainkan terdapat juga di permukaan konduktor tersebut. Penyebab terjadinya *skin effect* atau *efek kulit* ini adalah induktansi diri.

Melalui permukaan $drds$ di dalam kawat (gambar [7.64]) bekerja medan magnet yang berubah-ubah sehingga menyebabkan terjadinya medan listrik pusaran E_{ind} . Arah medan E_{ind} adalah ke sisi medan listrik yang diberikan E sehingga hanya pada satu sisi keduanya akan mempunyai arah yang sama. Medan yang dihasilkan tentunya akan menurun pada

arah ke luar, demikian pula arus listrik yang terdapat karenanya. Pada frekuensi tinggi arus akan terdapat di permukaan konduktor dengan sempurna. Pada kedalaman $d \approx \sqrt{\rho / \pi \mu \mu_0 \omega}$ arus tersebut akan berkurang sebesar e^{-1} (pada μ masing-masing tahanan jenis dan permeabilitas konduktor, ω adalah frekuensi sudut). Pengaruh lain induktansi diri adalah perbedaan fase antara tegangan dan arus.

Skin effect memberikan informasi bahwa sebuah kawat yang sama digunakan untuk arus bolak-balik frekuensi tinggi mempunyai tahanan lebih besar dibandingkan dengan seandainya digunakan pada arus searah. Jika ukuran kedalaman efektif d yang dapat ditembus frekuensi tinggi lebih kecil dibandingkan dengan diameter kawat konduktor, penampang lintang tidak lagi berpengaruh, melainkan besar kisaran tahanan. Untuk itu, biasanya pada frekuensi tinggi digunakan kawat berbentuk pipa dan berdinding tipis.



Gambar 7.64 *Skin effect*. Garis-garis medan yang digambarkan konsentris terhadap sumbu konduktor berbentuk selinder menggambarkan kurva medan magnet induksi B .

Teori lengkap *skin effect* adalah sangat rumit. Dalam pembahasan ini hanya akan diberikan ringkasan teori tersebut. Pada "frekuensi tinggi" vektor D pada persamaan Maxwell tidak memberikan peran penting lagi terhadap j :

$$\nabla \times H, \quad \nabla \times E = \frac{1}{\sigma} \nabla \times j = -\mu \mu_0 \dot{H}$$

Dengan mengeliminasi H diperoleh bahwa $\nabla \times \nabla \times j = \sigma \mu \mu_0 \ddot{j}$. Perubahan terhadap waktu j adalah sama dengan j dikalikan dengan ω

dan turunan dua kali terhadap jarak ($\nabla \times \nabla$) hasilnya sama dengan perkalian dua kali dengan kebalikan ketebalan, yang berarti terjadi penurunan arus sebesar e^{-l} .

$$\frac{1}{d} \mathbf{j} \approx \omega \sigma \mu_0 \mathbf{j} \quad (7.65)$$

Persamaan ini persis sama dengan pernyataan d yang telah diberikan sebelumnya.

7.7 Gelombang Elektromagnetik

Materi yang diperkenalkan dalam pembahasan teori elektrodinamika sebelumnya mencakup tiga hal.

1. Muatan listrik diam menghasilkan medan listrik dengan garis-garis medan berawal dan berakhir di muatan yang bersangkutan.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

2. Arus atau muatan listrik yang bergerak menimbulkan medan magnet dengan garis-garis medan tertutup dan perubahan arahnya melingkup arus yang ditimbulkannya:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}$$

3. Perubahan medan magnet akan menimbulkan medan listrik induksi dengan garis-garis medan tertutup yang perubahan arahnya melingkup medan magnet induksi yang ditimbulkannya:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}}$$

Untuk memahami fenomena gelombang elektromagnetik, Maxwell merumuskan satu lagi persamaan yang disebut persamaan "pergeseran arus".

7.7.1 Pergeseran Arus

Jika sebuah kondensator (misalnya pada rangkaian osilator) dimuat, pada rangkaian seluruhnya akan mengalir arus muatan sebesar I , hanya pada bagian kondensator plat arus tidak dapat dilewatkan. Jika ruang antara dua plat kondensator diisi dengan bahan dielektrik, pada bagian tersebut akan terdapat arus yang tidak langsung dapat diukur I_1 , arus ini digambarkan sebagai pergeseran muatan yang terdapat di dalam bahan dielektrik. Misalnya, kondensator plat mempunyai luas permukaan S dan jarak antarkedua plat adalah d . Polarisasi P pada bahan dielektrik menimbulkan muatan di masing-masing permukaan kondensator sebesar $\pm PS$. Dengan demikian, adanya perubahan P menimbulkan arus $I_1 = \dot{P}S$. Dari persamaan [6.50] diketahui bahwa $D = \epsilon_0 E + P$, jumlah arus keseluruhan yang terdapat di dalam sistem adalah

$$I \underset{1}{=} \dot{Q} \underset{2}{=} C \dot{U} \underset{3}{=} C E \dot{U} d \underset{4}{=} \epsilon \epsilon_0 S \dot{E} \underset{5}{=} \dot{D} S \underset{6}{=} \epsilon_0 \dot{E} S + \dot{P} S \quad (7.66)$$

Numerisasi pada bagian bawah tanda sama dengan (1...6) mempunyai arti sebagai berikut

- 1 : arus adalah perubahan muatan,
- 2 : definisi kapasitas,
- 3 : definisi kuat medan,
- 4 : kapasitas kondensator,
- 5 : definisi vektor D ,
- 6 : definisi P , lihat keterangan di atas.

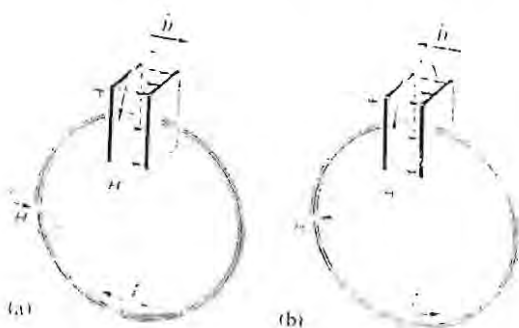
Selain ruas kanan pada persamaan [7.66], diketahui bahwa $I_1 = \dot{P}S$, yang menyatakan adanya pergeseran muatan di dalam bahan dielektrik. Maxwell juga menyimpulkan bahwa $\epsilon_0 \dot{E}S$ adalah sebagai bagian *pergeseran muatan*, yang terdapat juga di dalam vakuum. Oleh karena itu, pergeseran muatan yang terjadi keseluruhannya adalah:

$$I_v = \epsilon_0 \dot{E} S + \dot{P} S = \epsilon \epsilon_0 \dot{E} S = \dot{D} S$$

yang menyatakan bahwa rangkaian, juga termasuk ruang antarplat kondensator, adalah tertutup. *Pergeseran kerapatan arus* dapat ditulis menjadi:

$$j_v = \dot{D} \quad (7.67)$$

yang ternyata sama dengan kerapatan arus konduksi j_L , seperti kerapatan arus yang mengalir di dalam logam. Pembentukan rumusan di atas mengandung pengertian, jika terdapat pergeseran arus, karena adanya perubahan medan listrik terhadap waktu, demikian pula medan magnet yang berada di sekitarnya mirip seperti kelakuan arus pada konduktor. Dengan alasan ini maka benar adanya jika persamaan Maxwell ditulis



Gambar 7.65 a) dan b). Garis-garis medan magnet di dalam medan listrik yang berubah terhadap waktu sesaat sebelum dan setelah mencapai maksimum.

dalam bentuk $\nabla \times H = j_L$, dapat ditulis secara lengkap sebagai berikut

$$\nabla \times H = j_v + j_L = \dot{D} + j_L \quad (7.68)$$

Semua asumsi yang dibuat oleh Maxwell di atas dapat dibuktikan secara empiris.

7.7.2 Pengertian Fisis Persamaan Maxwell

Sampai pada pembahasan ini telah diperoleh persamaan lengkap untuk medan yang dapat ditulis kembali dalam bentuk diferensial dan integral sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \nabla \times \mathbf{H} &= \dot{\mathbf{D}} + \mathbf{j} & \oint_K \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} &= \int \dot{\mathbf{D}} \cdot d\mathbf{f} + I \\
 \nabla \times \mathbf{E} &= -\dot{\mathbf{B}} & \oint_K \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} &= - \int \dot{\mathbf{B}} \cdot d\mathbf{f} \\
 \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho & \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{f} &= Q \\
 \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{f} &= 0.
 \end{aligned} \tag{7.69}$$

Dari kenyataan itu ternyata bahwa ada muatan listrik, tetapi tidak terdapat



Gambar 7.66 Medan listrik yang berubah terhadap waktu dapat menimbulkan medan magnet.



Gambar 7.67 Medan magnet yang berubah terhadap waktu dapat menimbulkan medan listrik

muatan magnet. persamaan ini mengandung simetri secara sempurna antara medan listrik dan magnet sebagai berikut

Suatu medan listrik yang berubah terhadap waktu akan menimbulkan medan pusaran magnet. Sebaliknya suatu medan magnet yang berubah terhadap waktu akan menghasilkan pusaran medan listrik.

Perbandingan arah antara $\mathbf{D}$ dan $\mathbf{H}$ di satu sisi dan antara $\mathbf{B}$ dan $\mathbf{E}$ di

sisi lainnya masing-masing mengikuti *kaedah tangan kanan dan kiri* (lihat gambar [7.65], [7.66], dan [7.67]).

Setiap perubahan medan magnet terhadap waktu di dalam konduktor, akan menimbulkan tegangan. Jika konduktor berbentuk cincin, akan timbul arus pada konduktor tersebut yang juga mereproduksi medan magnet induksi (sekunder). Pada gambar [7.65b] diandaikan bahwa B adalah perubahan medan magnet primer sehingga B akan bertambah. Medan magnet sekunder selalu berlawanan arah dengan B (aturan Lenz atau aturan tangan kanan dan kiri). Persamaan Maxwell meramalkan bahwa semua hal tersebut adalah benar adanya. Jika tidak ada konduktor yang dapat mengubah perubahan medan magnet terhadap waktu, yaitu membuktikan adanya medan listrik induksi melalui arus listrik yang terdapat di dalam konduktor. Akan tetapi, terdapat hanya satu perbedaan. Dalam kasus khusus, jika medan magnet primer bertambah dengan bertambahnya waktu, dengan perkataan lain B konstan, medan magnet tersebut dapat menginduksi pusaran medan listrik yang konstan pula. Jika terdapat sebuah konduktor, akan terdapat arus searah sedangkan medan magnet sekunder juga konstan. Tanpa adanya konduktor, pusaran medan listrik tidak memberikan pengaruh apapun. Lain halnya jika medan magnet primer tidak mempunyai kecepatan perubahan yang konstan, misalnya jika medan magnet tersebut berasal dari magnet yang diberikan arus bolak-balik. Dengan B akan terdapat pusaran medan listrik induksi yang juga berubah terhadap waktu dan kemudian terdapat pula (berlaku sama: apakah terdapat konduktor atau tidak) medan magnet lain dan seterusnya.



Gambar 7.68 Pada harga B yang tidak konstan, timbul medan listrik E yang berubah terhadap waktu dan medan magnet lainnya

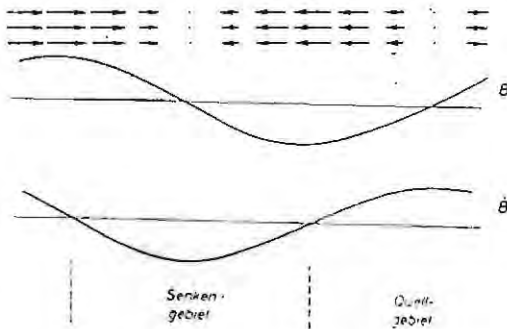
7.7.3 Permukaan Gelombang Elektromagnetik

Persamaan Maxwell berhasil menjelaskan bahwa medan magnet dan listrik sama-sama saling dapat ditimbulkan dan analog dalam kenyataan bahwa gas yang mengalami kompresi akan menimbulkan tekanan, atau dengan perkataan lain terjadi deformasi pada gas yang bersangkutan. Maxwell kemudian mempersoalkan apakah ada analogi antara gelombang elastik dan gelombang elektromagnetik dan sifat-sifat apa saja yang dijumpai kedua macam gelombang tersebut.

Dalam pembahasan ini dicoba untuk membuat "konstruksi" bentuk gelombang yaitu *gelombang harmonik permukaan*. Misalkan gelombang ini merambat pada arah sumbu- x . Dalam hal ini medan listrik E haruslah memenuhi persamaan periodik sebagai berikut.

$$E = E_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

v dan ω masing-masing adalah kecepatan rambatan gelombang dan kecepatan sudut (frekuensi sudut) dari gelombang hiptetis; $\lambda = 2\pi / \omega$



Gambar 7.69 Seandainya gelombang elektromagnetik adalah gelombang longitudinal, maka harus terdapat muatan sumber dan penerima.

adalah panjang gelombang tersebut. Bersama-sama medan listrik ini harus pula terdapat medan magnet B dengan amplitudo B_0 , yang juga sebagai fungsi harmonik terhadap jarak dan waktu karena sebagaimana diketahui bahwa medan listrik E dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya.

Dengan menggunakan persamaan Maxwell diperoleh hal-hal berikut:

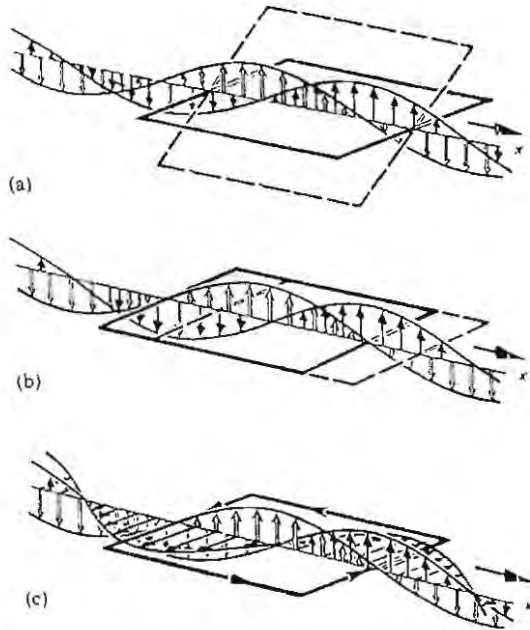
1. Gelombang elektromagnetik haruslah merupakan gelombang transversal. Seandainya D atau B terletak pada arah rambatan, atau hanya satu komponennya berada pada arah rambatan, berdasarkan gambar[7.69] yang menggambarkan ruang terdapatnya sumber dan penerima medan akan terpenuhi. Untuk kasus di dalam ruang tanpa muatan tentunya untuk D adalah tidak mungkin terpenuhi sedangkan untuk B tidak akan pernah terjadi. Oleh karena itu, D dan B haruslah terletak tegak lurus terhadap arah rambatan gelombang. Dengan demikian, diperoleh alasan mengapa *gelombang elektromagnetik adalah gelombang transversal*. Alasan tersebut secara matematik, berdasarkan persamaan Maxwell dalam bentuk diferensial yang berlaku untuk ruang bebas muatan:

$$\nabla \cdot D = \nabla \cdot B = 0$$

Persamaan Maxwell lainnya, dalam bentuk integral, yang mempunyai batas integral terhadap luas permukaan S (baik untuk medan magnet maupun listrik) yang dilewati fluks kedua medan tersebut dan tegangan (baik untuk medan magnet maupun listrik) di bagian pinggir (sisi) permukaan S tersebut. Bidang ini dapat dibayangkan melalui rangka segi empat dengan panjang permukaan sama dengan setengah panjang gelombang yang merambat dengan lebar b sembarang. Kemudian, bayangkan pula bahwa permukaan ini dapat digeser atau diputar (gambar[7.70]) Dengan demikian diketahui pula:

2. B selalu terletak tegak lurus E . Jika rangka tersebut diputar terhadap sumbu- x , akan didapat D semakin besar jika posisinya semakin tegak lurus terhadap E . Secara bersamaan didapat pula H maksimum karena adanya hubungan $\oint_K H \cdot ds = \oint_S \dot{D} \cdot df$. Hal ini dimungkinkan jika $E \perp H$.

3. E dan H adalah sefase, yaitu mempunyai maksimum pada posisi yang sama. Geser rangka tersebut sedemikian, sehingga diperoleh harga maksimum D . Hal ini yang menjadi persoalan sekarang, jika D mencapai puncak dan lembah dari E , tegangan medan magnet juga akan mencapai maksimum, yaitu H akan mencapai maksimum dan minimum pada permukaan rangka.



Gambar 7 70 a-c. Gelombang elektromagnetik (gelombang permukaan yang merambat). a) permukaan rangka sebagai bidang pengukur kebanyakan "menggambarkan" $\vec{D}$. jika $\vec{D} \perp \vec{D}$ yaitu b) bahwa $\vec{D}$ sesuai dengan setengah gelombang- $\vec{D}$; c) $\vec{H}$ juga berada tegak lurus $\vec{D}$ dan mempunyai fase yang sama $\uparrow: \vec{D}$, $\uparrow: \vec{D}$, $\nearrow: \vec{H}$.

4 Jika fluks dan tegangan-tegangan sisi untuk posisi optimal rangka, dengan persamaan Maxwell pertama diperoleh:

$$\begin{aligned}
 \int \vec{D} d\vec{f} &= b \int_{\lambda/4}^{3\lambda/4} \epsilon \epsilon_0 \vec{E} dx \\
 &= b \epsilon \epsilon_0 \omega E_0 \int_{\lambda/4}^{3\lambda/4} \cos \frac{\omega r}{v} dx \\
 &= b \epsilon \epsilon_0 \omega \frac{\omega}{v} E_0 \cdot 2 \\
 &= \oint_K \vec{H} ds = 2bH_0
 \end{aligned}$$

atau

$$H_o = \varepsilon \varepsilon_o v E_o$$

Analog persis persamaan Maxwell kedua didapat:

$$E_o = \mu \mu_o v H_o$$

Substitusikan salah satu pada persamaan lainnya, akan diperoleh kecepatan rambat gelombang:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \varepsilon_o \mu \mu_o}} \quad (7.70)$$

Keempat vektor tersebut bergantung satu sama lainnya seperti:

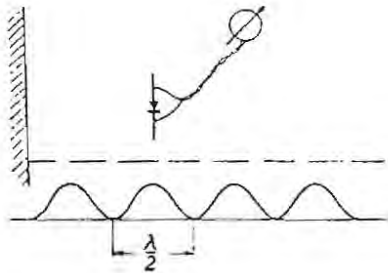
$$H_o = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_o}{\mu \mu_o}} \cdot E_o \quad B_o = \sqrt{\varepsilon \varepsilon_o \mu \mu_o} \cdot E_o \quad (7.71)$$

Tentunya

$$D_o = \varepsilon \varepsilon_o E_o$$

Di dalam ruang vakuum ($\varepsilon = 1$), gelombang elektromagnetik akan merambat dengan kecepatan:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \mu_o}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{det}^{-1}$$



Gambar 7.71 Pembuktian adanya gelombang diam elektromagnetik.

yaitu sama dengan kecepatan rambatan gelombang cahaya. Ramalan tersebut mendekati kenyataan bahwa cahaya tidak lain adalah gelombang elektromagnetik.

Terlepas dari penurunan yang jauh dari fenomena optik keseluruhan, dalam elektrodinamik gelombang elektromagnetik dapat dibuat di dalam laboratorium. Untuk pertama kalinya Heinrich Hertz (tahun 1880) berhasil membuat percobaan tersebut, setelah Maxwell pada tahun 1865 secara teoretik meramalkan hal tersebut. Bagaimana gelombang elektromagnetik dapat dihasilkan di laboratorium akan dibicarakan secara rinci pada §7.7.5 hingga §7.7.9. Jika gelombang tersebut dijatuhkan pada sebuah lempengan yang berada cukup jauh dari sumbernya (gambar[7.71]), akan diperoleh *gelombang diam*. Permukaan logam sebagai permukaan simpul untuk medan listrik E karena di dalam metal tidak bisa terdapat medan listrik. Simpul berikutnya secara paralel pada cerminan simpul pertama, pada jarak seperempat panjang gelombang. Di antara simpul tersebut terdapat perut, yaitu tempat amplitudo medan listrik maksimum. Distribusi periodik medan listrik bolak-balik ini dapat dibuktikan melalui sebuah antena, yaitu sebuah kawat lurus yang terputus melalui sebuah penyearah atau detektor yang dihubungkan dengan galvanometer. Gambar[7.71] mengilustrasikan distribusi simpangan galvanometer. Di antara kedua kawat tersebut, pada arah tegak lurus, tidak terdapat arus antena karena gelombang pengirim transversal dan mengalami polarisasi di bagian tersebut (lihat §10.3.1).

Gelombang elektromagnetik dapat merambat di dalam bahan (persamaan[7.70]) pada umumnya bergerak sangat lambat: $v = c/\sqrt{\epsilon\mu}$ atau untuk bahan yang mempunyai $\mu \approx 1$, kecepatannya adalah:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$$

Relasi Maxwell ini dalam optik dinyatakan sebagai indeks bias:

$$n = \frac{v}{c} = \sqrt{\epsilon} \quad (7.72)$$

Relasi antara besaran optik dan besaran listrik seperti di atas sering dijumpai dalam banyak persoalan-persoalan fisika (pengecualian dan dasar-dasarnya, lihat §10.5.3), yaitu yang disebut sebagai teori cahaya sebagai dasar penjelasan selanjutnya.

7.7.4 Kerapatan Energi dan Aliran Energi

Sebuah gelombang permukaan yang tidak teredam berdasarkan persamaan[7.71] mempunyai kerapatan energi sebesar:

$$w = \frac{1}{2} (ED + HB) = \epsilon\epsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2$$

(lihat persamaan[6.56]). Setengah bagian energi gelombang tersimpan di dalam medan listrik dan setengah bagian lainnya di dalam medan magnet. Energi ini secara geometri energi ini terkonsentrasi berupa paket berbentuk datar, dengan harga E dan H maksimum. Di antaranya terletak zone energi minimum. Paket energi ini merambat dengan kecepatan $v = 1/\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}$. Hal ini terdapat arus energi dengan kerapatan:

$$\begin{aligned}
 S &= w v = \epsilon \epsilon_0 E^2 \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} \\
 &= \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0}{\mu \mu_0}} E^2 = E H
 \end{aligned}$$

Arus energi ini merambat tegak lurus terhadap E dan H . Semua sifat-sifat ini dituliskan dalam bentuk *vektor poynting* sebagai berikut.

$$S = E \times H \quad (7.73)$$

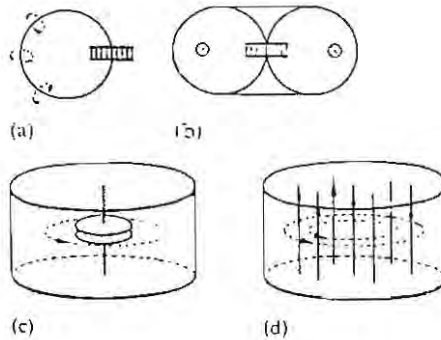
yang merupakan persamaan umum kerapatan arus energi gelombang elektromagnetik

7.7.5 Osilator Ruang Hampa

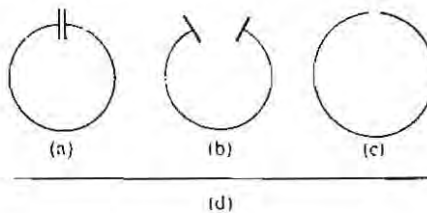
Pada rangkaian osilator untuk frekuensi hingga mencapai beberapa MHz (gbr[7.56]) medan listrik praktis tetap berada di kondensator dan medan magnet pada kumparan yang menimbulkan induktansi diri. Untuk meningkatkan frekuensi lebih tinggi lagi, harga C dan L harus dikecilkan sehingga tidak lagi diperlukan untuk membuat lilitan dan meletakkan plat di kedua ujung kawat karena kawat tersebut sebenarnya telah mempunyai kapasitansi dan induktansi yang cukup besar untuk membangkitkan osilator frekuensi tinggi. Dengan demikian, medan listrik dan magnet akan berada di sekitar kawat tersebut dan tidak lagi terpisah di dalam ruang. Dari rangkaian osilator ini kemudian dapat dikembangkan "*osilator ruang hampa*", yaitu jika medan listrik dan magnet terdapat di dalam ruang tertutup yang dapat menghantar keduanya, atau *osilator linier* jika kedua medan berada di sekitar konduktor penghantar (lihat gambar[7.72] dan [7.73]).

Perubahan rangkaian osilator menjadi osilator ruang "hampa" dapat dengan jelas dilihat pada gambar[7.72] Dari rangkaian osilator (a) dapat dirotasi terhadap sumbu kondensator (b), yaitu garis-garis medan magnet

dapat mengelilingi medan listrik kondensator. Cincin yang tergambar tersebut dapat dibayangkan berbentuk silinder (c) sehingga akhirnya plat kondensator terletak di penutup silinder. Garis-garis medan magnet (garis titik-titik) dan medan listrik silih berganti mengisi ruang hampa tersebut.



Gambar 7.72 a-d Perubahan rangkaian osilator menjadi osilator "hampa".



Gambar 7.73 a-d Perubahan rangkaian osilator tertutup menjadi terbuka dan menjadi osilator Hertz

Beranalogi dengan getaran-eigen mekanis di dalam ruang yang berisi suatu bahan tertentu (lihat §4.1.5), pada osilator hampa terdapat ruang hampa yang dikelilingi oleh selubung konduktor sehingga dapat terjadi getaran eigen elektromagnetis. Selain getaran yang diilustrasikan gambar [7.72d], terdapat pula bentuk getaran lain. Arah medan listrik dan magnet yang terdapat di dalam ruang hampa ini adalah saling tegak lurus. Jika tahanan jenis dinding dapat diabaikan, garis-garis medan listrik berakhir tegak

lurus pada dinding silinder dan gelombang dalam keadaan ini tidak akan menembus dinding silinder (*skin effect* dengan kedalaman $d \approx 0$, §7.6.8). Dalam hal ini, getaran yang terjadi tidak mengalami redaman sehingga gelombang tidak mengalami kehilangan energi.

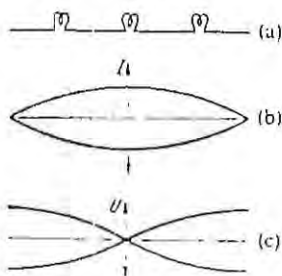
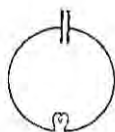
7.7.6 Osilator Linier

Gambar[7.73] menunjukkan bagaimana dari rangkaian osilator diubah menjadi osilator linier, yaitu melalui pengecilan ukuran kondensator dan kumparan direntangkan. Rangkaian osilator, seperti osilator linier ini misalnya dapat dirangsang melalui hubungan induktif melalui sebuah "pipa pengirim" gelombang (§8.2.8). Untuk membuktikan adanya getaran, misalnya digunakan sebuah bola lampu pijar (gambar[7.73]). Bola lampu ini akan menyala sangat terang jika *frekuensi eigen* getaran sesuai dengan frekuensi gelombang pada "pipa pengirim". Penyesuaian frekuensi seperti ini untuk rangkaian osilator dapat dilakukan dengan cara mengatur jarak atau mengubah ukuran kondensator plat sedangkan pada osilator linier dibuat dengan cara mengubah panjang (menarik bagian pipa sehingga pipa terentang satu sama lain). Diketahui pula bahwa *frekuensi resonansi* pada rangkaian osilator lebih "tajam" dibandingkan pada osilator linier, yang menurut §4.1.2 dibuat dengan cara memperkecil adanya redaman. Jika terdapat redaman yang besar, energi redaman tersebut tidak seluruhnya diubah menjadi panas Joule pada dinding konduktor karena tahanan Ohm untuk konduktor lurus tidaklah besar, dibandingkan seandainya pada gambar[7.73] buat melingkar dengan kumparan. Pada osilator Hertz, selain terdapat energi yang hilang menjadi panas Joule, terdapat pula karena *pancaran gelombang (pancaran teredam)*.

Sebuah osilator Hertz dengan panjang l_0 yang menunjukkan resonansi di udara, ditempatkan di dalam bahan dielektrik, air misalnya ($\epsilon = 81$), osilator ini haruslah bergetar dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi "pipa pengirim", sehingga akan lebih pendek sekitar $l_0/\sqrt{\epsilon}$. Pada pemendekan tersebut maka kapasitas dan induksi diri yang terdapat pada konduktor akan sebanding dengan panjang l_0 dan harga perkalian LC juga

harus dibagi dengan ϵ . Dengan mencelupkannya di dalam air kapasitas telah dikali dengan ϵ sebelumnya. Secara keseluruhan LC dan juga frekuensi sudut, menurut rumus Thomson tidak mengalami perubahan.

Jika osilator tersebut dihubungkan dengan sebuah lampu pijar (gambar[7.75a], lampu tersebut akan menyala semakin redup, jika lampu tersebut semakin jauh terhadap titik tengah. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa sepanjang osilator kuat arus efektif adalah tidak konstan pada bagian tengah terdapat maksimum dan di pinggir nol (gambar[7.75b]). Kuat arus mengalami getaran terhadap waktu dan mempunyai fase yang sama sepanjang batang konduktor; pada jarak setengah periode getaran,



Gambar 7.74 Pembuktian adanya getaran dengan menggunakan lampu pijar.

Gambar 7.7.5 a-c. Distribusi kuat dan tegangan pada osilator Hertz. Kuat medan yang menyebabkan adanya distribusi tegangan menunjukkan bentuk yang sama dengan b.

terdapat keadaan kuat arus di semua tempat sama dengan nol; diantaranya terletak di tempat yang terdapat maksimum getaran kuat arus pada kedua arah (gambar[7.75c]) sedemikian rupa sehingga berbeda. Demikian juga tengah batang yang paling besar. Arus dan tegangan mempunyai beda fase $\pi/2$, yang berhubungan dengan tahanan induksi. Medan listrik yang berubah terhadap ruang dan waktu adalah sebanding dengan perubahan kecepatan arus.

Gambar[7.75b] sesuai dengan gambar[4.16b] yang menggambarkan pergeseran partikel di kedua sisi batang elastik yang mengalami regangan dalam frekuensi getaran dasar. Kedua kasus di atas adalah berhubungan dengan gelombang diam, dengan panjang gelombangnya dua kali lebih besar daripada gelombang yang merambat pada batang. Gelombang diam demikian dapat merupakan hasil tumpang tindih dua gelombang yang "maju" (bergerak ke depan) dan "mundur" (bergerak pada arah sebaliknya). Jika gelombang listrik merambat dengan kecepatan $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ m det}^{-1}$, frekuensi getaran osilator linier dengan panjang f adalah:

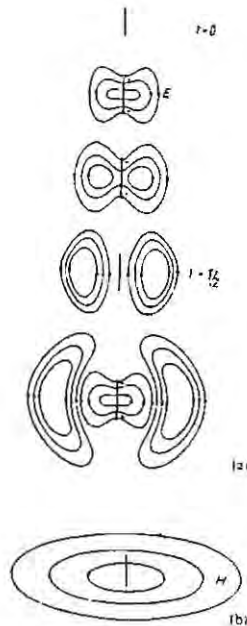
$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l}$$

Asumsi yang mengatakan bahwa gelombang dengan kecepatan c merambat sepanjang batang adalah benar. Akan tetapi, bagian esensial peristiwa ini bukan terletak pada batang, melainkan di ruang yang berada di sekitarnya (peristiwa medan transfer listrik menjadi medan magnet dan sebaliknya). Transfer medan ini merambat dengan kecepatan cahaya, menurut persamaan[7.70].

7.7.7 Pancaran Osilator Linier

Distribusi arus pada gambar[7.75b] dapat dibuat berdasarkan persamaan kontinuitas sebagai berikut. Karena arus yang mengalir di setiap tempat pada batang konduktor tidak sama, sudah seharusnya di sekitar tempat tertentu di dalam batang konduktor terdapat penumpukan muatan. Pada bagian lainnya bahkan tidak terdapat muatan sama sekali. Penumpukan muatan ini akan maksimum pada "fase" yang sama. Selain itu, tidak akan terdapat arus mengalir. Dengan demikian, batang tersebut akan mempunyai momen dipol listrik maksimum, yang selalu terbentuk secara serta merta. Osilator Hertz tidak lain adalah dipol yang berosilasi (bergerak) Medan listrik yang terdapat pada osilator ini berubah-ubah. Demikian pula dengan momen dipolnya, sesuai dengan periode getaran. Medan listrik suatu dipol konstan memenuhi ruang keseluruhan seperti

terlihat pada gambar[6.2]. Jika pada osilator Hertz terdapat momen dipol hanya dalam tempo nol detik, kemudian "menghilang", lantas terbentuk kembali dengan tanda (baca: arah polaritas) berbeda, dalam waktu yang sangat cepat tersebut tentunya medan listrik tidak akan terlalu jauh merambat karena kembali menghilang, lalu muncul dengan tanda yang berbeda. Selanjutnya misalkan bahwa medan pada saat t merambat hingga mencapai jarak $r = ct$, atau dengan perkataan lain medan pada jarak r ditentukan oleh keadaan osilator, yaitu bagaimana kelakuan osilator tersebut sebelum waktu $t - r/c$. Urut-urutan keadaan momen dipol terhadap waktu menimbulkan pula urut-urutan ("paket") medan listrik yang merambat dengan kecepatan c di dalam ruang. Dalam hal itu jarak antara dua "paket" medan listrik dengan kerapatan yang sama, tetapi mempunyai arah berbeda, sama dengan setengah periode dikalikan dengan kecepatan rambatannya, c , atau sama dengan setengah panjang gelombang. Medan magnet maksimum terjadi



Gambar 7 76 a) dan b). Medan listrik dan magnet yang terdapat di sekitar sebuah osilator Hertz

sesuai dengan fase tempat arus di osilator maksimum, yaitu setelah fase mencapai harga $\pi/2$ dari terjadinya momen dipol listrik maksimum, atau juga medan listrik maksimum. Oleh karena itu, medan magnet muncul setelah momen dipol dan medan listrik mencapai fase $\pi/2$. Di dalam ruang, "paket" garis-garis medan magnet muncul antara dua "paket" medan listrik.

Keterangan gambar[7.76]:

Medan listrik dan magnet yang terdapat di sekitar sebuah osilator Hertz. Garis-garis medan listrik yang ditimbulkan oleh momen dipol yang berosilasi merambat ke seluruh ruang tidak kembali selama terjadinya "penurunan amplitudo" momen dipol. Setelah mencapai waktu $T/2$ medan tersebut akan menghilang karena muatan dipol. Adanya medan listrik terpusat ini, dengan bentuk karakteristik garis-garis medan mirip ginjal akan menjauhi sumber dengan kecepatan cahaya. Setelah waktu $T/2$ muncul kembali garis-garis medan momen dipol, tetapi dengan arah yang berlawanan. Garis-garis medan ini akan lenyap setiap mencapai setengah periode ($T/2$). Arus yang terdapat pada osilator menimbulkan medan magnet, dengan garis-garis medan berbentuk lingkaran seperti diilustrasikan pada b). Arah medan ini juga akan berubah setiap setengah periode. Berdasarkan persamaan Maxwell diketahui bahwa kedua medan tersebut saling berhubungan satu sama lain, dan keduanya merambat secara bersamaan menelusuri ruang.

Medan yang ditimbulkan osilator hanya dapat mencapai jarak tertentu di dalam ruang, seperti halnya medan listrik yang ditimbulkan oleh momen dipol dan medan magnet yang berasal dari elemen konduktor Biot-Savart yang dialiri arus listrik. Pada jarak yang cukup besar dibandingkan dengan panjang gelombang elektromagnet yang dipancarkan osilator tersebut (pada "zone gelombang"), timbul karena induksi masing-masing medan sehingga terdapat campuran medan listrik dan magnet. Jika diamati medan magnet pada tempat tertentu, medan tersebut, sesuai dengan rambatan gelombang, mengalami perubahan terhadap waktu, kemudian akan diinduksikannya medan listrik dan sebaliknya. Perbandingan keduanya praktis sama seperti pada gelombang permukaan elektromagnetik (§7.7.3). Medan listrik dan magnet adalah sefase dan terletak saling tegak lurus satu sama lain.

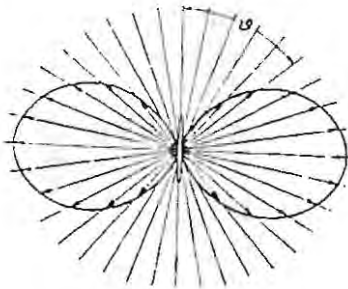
Untuk mengerti secara kuantitatif struktur pancaran medan, bayangkan sebuah bola yang diletakkan di sekitar osilator, dengan arah sumbunya sesuai dengan arah sumbu osilator (osilator berbentuk batang). Di dekat dan di “zone gelombang” terdapat garis-garis medan listrik pada daerah meridian bola dan medan magnet terletak di “rentangan lebar” bola. Vektor *Poynting* $S = E \times H$ menunjukkan rambatan gelombang pada arah radial ke luar bola; vektor *Poynting* menggambarkan pula aliran kerapatan energi yang dipancarkan gelombang. Melalui dua bola konsentris haruslah mengalir energi yang sama karena kedua bola bukan sumber energi. Vektor *Poynting* yang terdapat pada dua tempat yang bersangkutan haruslah sama dengan kebalikan harga luas permukaan masing-masing tempat yang bersangkutan. Dengan demikian, diperoleh bahwa $S \sim r^{-2}$. Karena E dan H masing-masing sebanding, masing-masing harga medan tersebut haruslah berkurang sesuai dengan pertambahan jarak r^{-1} :

$$S = EH \sim r^{-2}, \quad H \sim E \sim r^{-1}$$

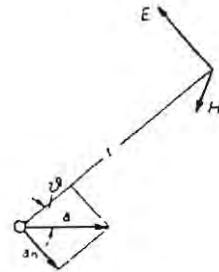
Sekarang tinggal membubuhkan kebergantungan medan terhadap jarak atau tempat di bola tersebut. Karena alasan simetri adalah tidak mungkin ada kebergantungan jarak medan terhadap posisi di bola sehingga persoalan keseluruhan adalah simetri rotasi di bola. Dengan demikian, persoalan keseluruhan adalah simetri rotasi sumbu rotasinya. Sebaliknya kebergantungan terhadap rentangan tentunya ada. Seandainya medan listrik yang berada di kutub sebesar di ekuator bola, di tempat tersebut tempat garis-garis medan datang atau menjauhi, akan terdapat penerima atau sumber muatan. Akan tetapi, kenyataannya pada tempat tersebut tidak terdapat muatan, baik sumber maupun penerima, dikatakan bahwa adalah tidak mungkin E maupun H di daerah kutub bola akan mengecil. Dengan perhitungan eksak diperoleh bahwa medan tersebut bergantung pada $\sin$ (untuk perhitungan tersebut lihat gambar [7. 77]).

Sekarang diketahui bahwa $S = A \sin \theta / r^2$. Faktor kesebandingan A dianggap tidak begitu penting, sebaiknya perhatikan hanya dimensinya. S sebagai aliran kerapatan energi mempunyai dimensi $\text{Jm}^{-2} \text{det}^{-1}$, A mempunyai dimensi $\text{Jder}^{-1} = \text{W}$. Dipol yang berosilasi dikarakteristikan

dengan momen dipolnya (dimensi C-m) dan melalui frekuensi sudutnya ω (dimensi det^{-1}). Selain itu, konstanta medan c mempunyai dimensi mdet^{-1} dan $0 \text{ CV}^{-1}\text{m}^{-1} = \text{C}^2\text{J}^{-1}\text{m}^{-1}$. Semua besaran-besaran lainnya, yang



Gambar 7. 77 Diagram pancaran gelombang sebuah osilator Hertz. Terdapat simetri rotasi terhadap sumbu dipol.



Gambar 7.7.8 Pancaran gelombang akibat muatan yang mengalami percepatan sebagai fungsi arahnya

ikut serta dalam persoalan itu ditulis dengan cara seperti di atas. Untuk membangun pengertian apa sebenarnya faktor A tersebut, berangkat dari dimensinya (Js^{-1}), konstanta ditulis ϵ_0^{-1} agar diperoleh J (Joule), kemudian untuk menghilangkan C^{-2} yang muncul karenanya, harus dikalikan dengan p^2 , agar diperoleh Jdet^{-1} dari Jm^3 , tidak lain harus dibagi lagi dengan c^3 ; selanjutnya mengalikannya dengan ω diperoleh dimensi yang dikehendaki, yaitu:

$$A = \alpha \frac{p^2 \omega^4}{\epsilon_0 c^3}$$

Faktor pembanding α berdasarkan teori sama dengan $1/4 \pi$.

Arus kerapatan energi yang berasal dari osilator Hertz dengan momen dipol p dan frekuensi sudut ω dapat ditulis menjadi:

$$S = \frac{p^2 \omega^4}{4\pi \epsilon_0 c^3} \frac{\sin^2 \vartheta}{r^2} \quad (7.74)$$

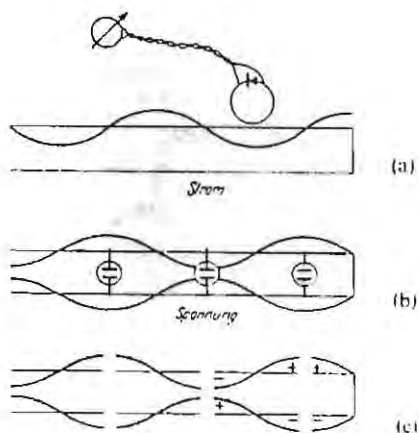
S merambat secara maksimum tegak lurus terhadap momen dipol. Akan tetapi, tidak akan pernah terpancar pada arah tersebut. Daya total yang dipancarkan adalah:

$$P = \frac{2}{3} \frac{p^2 \omega^4}{4\pi \epsilon_0 c^3} \quad (7.75)$$

Momen dipol osilator Hertz dapat ditulis $p = el$, dengan e adalah muatan efektif pada permukaan batang osilator. Dalam hal ini momen dipol bergetar secara harmonis dan kecepatan perubahannya terhadap waktu adalah $\dot{p} = e\dot{l} = e\omega l$. Pernyataan $p^2 \omega^4$ dapat diinterpretasikan sebagai $p^2 \omega^4 = e^2 \omega^4 l^2 = e^2 \dot{l}^2$. Pernyataan yang lebih umum adalah: Setiap muatan e yang dipercepat dengan percepatan $\dot{v}$ memancarkan gelombang dengan energi dan daya yang dipancarkannya sesuai dengan persamaan [7.74] dan dinyatakan melalui:

$$S = \frac{1}{4\pi} \frac{e^2 \dot{v}^2}{\epsilon_0 c^3} \frac{\sin^2 \vartheta}{r^2}, \quad P = \frac{2}{3} \frac{e^2 \dot{v}^2}{\epsilon_0 c^3} \quad (7.76)$$

Beranalogi dengan dipol listrik yang bergetar, momen magnetik mempunyai kelakuan yang serupa, misalnya dapat direalisasi melalui frekuensi tinggi arus bolak-balik dilewatkan pada lintasan melingkar ("arus cincin") (§7.2.5). Medan yang ditimbulkan arus tersebut serupa dengan apa yang terjadi pada dipol yang mengalami osilasi. Hanya tempat yang "diduduki" garis-garis medan listrik digantikan oleh garis-garis medan magnet dan sebaliknya tempat terdapatnya medan magnet digantikan oleh medan listrik (bandingkan dengan gambar [7.75a]). Diagram pancaran gelombang (gambar [7.76]) dalam kedua kasus ini adalah sama.

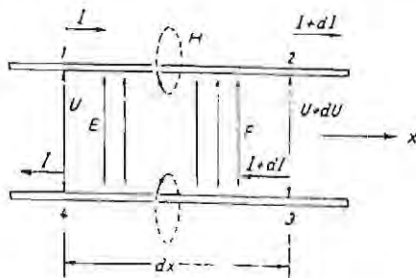


Gambar 7.79 a-c Gelombang diam kawat Lecher. Ukuran kumparan induksi (a) dibandingkan dengan ukuran λ digambarkan terlalu besar.

7.7.8 Gelombang pada Kawat

Dua buah kawat paralel (kawat Lecher) ditempatkan di dalam medan gelombang yang dipancarkan oleh sumber frekuensi tinggi maka kawat akan terangsang secara elektrik untuk bergetar. Di atas kawat Lecher tersebut ditempatkan sebuah kumparan kecil (seperti diilustrasikan gambar[7.79a]) yang dapat bergerak sepanjang kawat. Kumparan tersebut dihubungkan dengan penyearah gelombang dan sebuah galvanometer. Simpangan arus yang dapat diamati pada galvanometer menunjukkan adanya arus frekuensi tinggi yang mengalir di dalam kawat. Jarum galvanometer menunjukkan adanya simpangan ke kiri dan kanan bolak-balik melalui titik nolnya dan jarum selalu mencapai harga maksimum pada kedua arah tersebut, yaitu jika kumparan berada di tengah-tengah kawat. Distribusi arus menunjukkan periodisitas, sama seperti gerak udara di dalam pipa Kund yang dilewati gelombang suara, sebagai gelombang diam (§4 4 1 b). Pada kawat terdapat *gelombang diam listrik*. Jarak antara perut aliran muatan (arus) adalah sama dengan panjang jarak perut pada osilasi Hertz, yang ditentukan oleh pengirim gelombang, yaitu sama dengan $\lambda/2$. Di tengah-tengah antara "perut arus" ini terdapat tempat tegangan

antara kedua ujung kawat mencapai harga maksimum. Adanya "perut tegangan" ini dapat diketahui jika pada tempat tersebut ditempatkan lampu pijar (gambar[7 79b]) yang menyala jika ada kenaikan tegangan. Seperti ditunjukkan pada gambar[7 79c] Untuk mengetahui keadaan getaran yang terjadi di dalam kawat dapat disimak kejadian pada osilator Hertz kembali, dengan beda fase antara satu tetangga dan tetangga lainnya adalah π . Di tengah-tengah osilator berseberangan terdapat tegangan yang tidak berubah. Tegangan antara keduanya, di tengah-tengah kawat nol, di tempat ini terdapat *simpul tegangan*. Antara bagian ujung dan tengah osilator terjadi deviasi tegangan

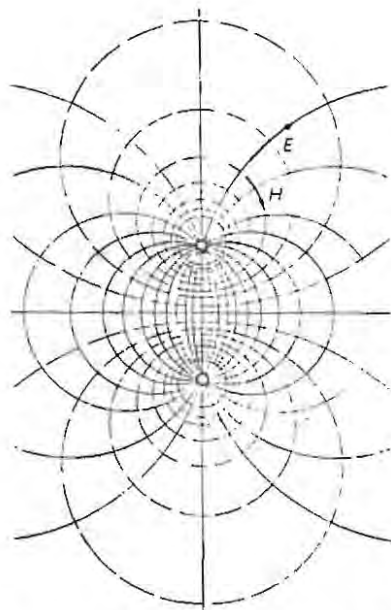


Gambar 7.80 Peragaan persamaan gelombang elektromagnetik yang merambat pada dua konduktor sejajar.

paling besar. Tegangan di bagian ujung osilator yang berseberangan mempunyai beda fase sebesar π sehingga antara kedua kawat terdapat beda tegangan yang besar. Demikian pula dengan kuat medan listriknya. Pada tempat ini terdapat pula "perut tegangan" yang dapat dibuktikan dengan menggunakan lampu pijar.

Hasil perhitungan antara frekuensi pengirim gelombang yang digunakan dan panjang gelombang λ diperoleh harga $3 \cdot 10^{10}$ cm/det, yaitu sama dengan kecepatan cahaya (§7.7.3).

Jika kedua kawat diletakkan di dalam bahan dielektrik, dengan konstanta dielektrik ϵ , panjang gelombang akan menurun dengan faktor $1/\sqrt{\epsilon}$. Hal ini sesuai dengan kelakuan gelombang elektromagnetik yang dikirimkan oleh sumber, seperti halnya yang terjadi tanpa kawat (ruang hampa). Arus yang mengalir di dalam kawat adalah bahwa arus tersebut



Gambar 7.81 Gambaran sesaat medan listrik dan magnet pada suatu permukaan tegak lurus terhadap sumbu dua konduktor paralel.

tanpa adanya gelombang tidak akan mengalami penurunan, melainkan akan meningkat

Hal ini dapat dibuktikan secara langsung, yaitu dengan menganggap dua konduktor sebagai kondensator yang sangat panjang, di antara masing-masing bagian terdapat pergeseran muatan sebagai sumber gelombang arus. Selain itu, tegangan antara kedua konduktor dapat ditentukan dengan menganggap adanya induktansi diri sistem atau melalui perubahan arus terhadap waktu

Medan listrik dan magnet, seperti halnya pada gelombang permukaan di vakuum, mempunyai fase yang sama; atau dengan tegas dikatakan bahwa antara arus yang terdapat di kawat dan tegangan antara kedua kawat konduktor tidak terdapat perbedaan fase. Gambar[7.81] menunjukkan bagaimana E dan H terdistribusi di sekitar kawat konduktor. Kerapatan energi (vektor *Poynting*) mengalir sepanjang kawat.

Pada kedua ujung kawat yang bebas haruslah $I = 0$. Hal itu sesuai dengan kelakuan gelombang diam, yang hanya dibayangkan adanya sebuah

gelombang yang direfleksikan oleh dinding pada ujung kawat dengan beda fase $\pi/2$. Gelombang medan ini mempunyai perut pada ujung kawat karena refleksi tidak terjadi perubahan fase. Jika kedua ujung kawat disambung, pada daerah tersebut haruslah tegangan $U = 0$. Peran arus dan tegangan ditentukan oleh hubungan fase antara keduanya.

7.7.9 Konduktor Koaksial dan Ruang "Kosong"

Bentuk konduktor ganda yang banyak digunakan adalah *konduktor konsentris* (gambar[7.83]). Terdiri atas sebuah silinder yang diselubungi secara koaksial dengan silinder lainnya. Jika konduktor dalam hanya berupa sebuah kawat, konduktor ganda disebut *kabel*. Ruang antara dua silinder dapat diisi dengan bahan dielektrik. Oleh karena itu, gelombang elektromagnetik tetap berada di ruang antara konduktor tersebut, garis-garis medan listrik menempati arah radial, sedangkan garis-garis medan magnet melingkari konduktor.



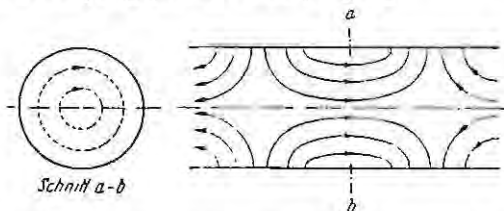
Gambar 7 82 Konduktor koaksial. — garis-garis medan listrik dan — garis-garis medan magnet

Jika konduktor mempunyai tahanan yang cukup besar, adanya panas Joule tidak dapat diabaikan, gelombang elektromagnetik yang terdapat di ruang antarkonduktor akan mengalami redaman dengan kecepatan rambat gelombang bergantung frekuensi.

Apabila konduktor di bagian dalam diambil, sistem disebut sebagai konduktor "kosong". Pada konduktor "kosong" gelombang juga dapat

merambat. Jika dinding bagian dalam mempunyai konduktifitas cukup besar, terdapat dua macam gelombang yang merambat: Gelombang- H yaitu gelombang yang mempunyai komponen vektor medan listrik E pada sumbu $-x$ "menghilang" (sumbu silinder pada arah sumbu $-x$), dan gelombang- E yang tidak mempunyai komponen kuat medan magnet H pada sumbu- x . Pada kedua macam gelombang tersebut terdapat bentuk getaran yang berbeda sebagai karakteristik masing-masing gelombang dan disimbolkan dengan notasi tertentu. Kecepatan fase gelombang pada konduktor kosong selalu lebih besar daripada kecepatan cahaya dan meningkat dengan menurunnya frekuensi, serta akan berharga tak berhingga pada frekuensi karakteristik masing-masing bentuk getaran. Di bawah frekuensi tersebut tidak terdapat kemungkinan rambatan gelombang. Ilustrasi yang dibuat pada gambar[7 83] adalah untuk gelombang E_{01} yang merambat di dalam konduktor kosong, berjari-jari d [cm] dan frekuensi batas sebesar $f_g = 0,96 \cdot 10^{10} d^{-1}$ [Hz] sehingga untuk $d = 1$ cm, harga frekuensinya menjadi 0,99 GHz. Konduktor semacam ini hanya digunakan untuk keperluan teknik frekuensi tinggi, khususnya dalam teknik ini, tidak terdapat energi yang hilang karena pancaran gelombang.

Untuk konduktor berbentuk silinder yang panjang, semua frekuensi gelombang dapat melaluinya (hingga mencapai batas harga frekuensi tertentu). Konduktor semacam ini disebut *resonator ruang kosong*, biasanya semua dinding resonator ini tertutup (lihat §7 7.5) dan hanya akan terjadi getaran pada frekuensi eigen tertentu dan diskrit. Di satu pihak terdapat gelombang beranalogi dengan gelombang elastik yang bergerak pada batang konduktor panjang, cairan, kolom gas dan (§4.1.5). Selain itu terdapat pula gelombang diam dengan frekuensi diskrit (§4.2.6), di dalam konduktor yang pendek atau panjang.



Gambar 7.83 Gelombang E_{01} di dalam konduktor kosong berbentuk silinder — — medan listrik dan ——— medan magnet

Soal-soal 7.1

7.1.1. Tentukan medan magnet di tengah-tengah sebuah konduktor berbentuk lingkaran dengan menggunakan hukum Biot-Savart. Tentukan pula arah medan magnet pada setiap titik yang berada di sumbu lingkaran (gambar [7.5]), berapa besar medan magnet tersebut? Bagaimana ketergantungan medan magnet terhadap jarak, jika jarak diambil sangat besar dan berada pada garis sumbu lingkaran? Bandingkan dengan medan listrik yang ditimbulkan sebuah dipol Rutherford dan Bohr menganggap elektron-elektron di dalam atom bergerak menurut lintasan lingkaran. Bagaimana momen dipol magnetik elektron dapat dihitung untuk model tersebut?

Soal-Soal 7.2

7.2.1. Sebatang besi tebal 5 mm dibuat rangka segi empat digerakkan dengan kecepatan $v = 20$ m/det di dalam medan magnet homogen ($B = 2$ Vdet/m²). Gambarkan kurva tegangan induksi terhadap waktu $U(t)$. Berapa temperatur besi setelah percobaan? Rangka besi tersebut dikeluarkan dari medan magnet dengan kecepatan v yang sama, berapa temperatur besi jadinya?

7.2.2. Cermin kecil yang terdapat di dalam galvanometer bergerak menurut gerak Brown. Apa keterbatasan alat ini untuk mengukur arus? Sebagian daya listrik yang terdapat pada kumparan galvanometer diubah menjadi panas Joule, sementara dan sebagian lagi dipakai untuk menggerakkan jarum penunjuk. Bergantung pada apa saja porsi panas tersebut? Perhatikan misalnya pengukuran balistik. Berapa besar energi untuk menggerakkan jarum penunjuk maksimum yang dapat disimpan? Porsi energi untuk itu haruslah lebih besar dibandingkan dengan energi yang diubah menjadi panas Joule sehingga pengukuran lebih presisi. Bagaimana dengan tahanan kumparan? Berapa besar seharusnya tahanan tersebut yang diperkenankan

dalam pengukuran arus?

7.2.3. Di dalam suatu kawat harus tetap terdapat arus mengalir karena adanya elektron-elektron termis akibat kawat dipanaskan. Arus ini tentunya tidak periodis. Bagaimana bentuk kurva transformasi *Fourier* arus tersebut? Jika "*clock*" dapat melewati lebar pita frekuensi ω , berapa besar kuadrat rata-rata *noise* kuat arus termis pada sebuah tahanan R ?

7.2.4. Elektroforesis magnetik. Pada sebuah suspensi diberikan medan listrik dan magnet saling paralel. Partikel-partikel suspensi mempunyai konduktifitas berbeda terhadap mediumnya. Bagaimana bentuk garis aliran di daerah permukaan batas? Mana yang lebih rapat? Gaya apa saja yang muncul dalam peristiwa ini dan bagaimana "reaksi" partikel karenanya

Soal-Soal §7.3

7.3.1. Koefisien induksi diri apa dan konstanta waktu bagaimana yang terdapat pada elektromagnet pada soal nomor 7.4.5?

7.3.2. Ramalkan harga induktifitas diri sebuah kumparan berbentuk lingkaran dengan diameter 10 cm. Medan magnet di dekat kawat sedikit lebih besar dibandingkan dengan di tengahnya

Soal-Soal 7.4

7.4.1. Ramalkan momen magnetik suatu arus melingkar. Anda tahu bahwa medan magnet (paling tidak di tengah lingkaran; di dekat periferi dapat dianggap tidak berubah) Dengan demikian, akan didapat fluks total dan kuat kutub. Pada jarak r di atas atau di bawah bidang lingkaran, harga medan magnet belum juga menurun, sesuai dengan harga medan sebuah kumparan yang panjangnya berapa? Gunakan hasil perhitungan lintasan elektron yang bergerak dalam orbit lingkaran (misal seperti model atom hidrogen dari Bohr) dan bandingkan dengan hasil perhitungan magneton Bohr?

7.4.2 Medan magnet bumi secara mendasar mempunyai kelakuan sebagai berikut. Sebagai pembawa materi total bumi adalah magnetisasi konstan. Apakah di luar bumi terdapat medan dipol? Petunjuk. Bayangkan terdapat dua bola homogen, masing-masing mengandung "muatan magnet" berbeda, sedemikian rupa mengalami tarik-menarik sehingga keduanya berada pada suatu jarak yang sangat kecil. Berapa besar momen magnet total antara keduanya dan berapa besar magnetisasinya, jika komponen horizontal yang membujur pada sudut 45° diukur sebesar 0,2 G? Bagaimana kebergantungan kuat medan dan arahnya terhadap sudut bujur (khususnya pada arah permukaan bumi, yaitu inklinasi)?

7.4.3 Untuk mengukur medan magnet bumi dapat digantungkan sebuah jarum magnet pada arah horizontal dan jarum akan bergetar pada arah horizontal. Apa yang diperoleh dari periode getaran jarum magnet? Alat apa lagi yang masih diperlukan selain itu?

7.4.4 Di tengah-tengah sebuah lilitan kawat yang dihubungkan dengan galvanometer diletakkan sebuah kumparan dan gerakkan perlahan-lahan lilitan tersebut hingga ke ujung kumparan. Berapa jauh dapat diukur perbedaan tegangan yang timbul dari kuat kutub kumparan? Apakah berlaku hal yang sama untuk magnet batang?

7.4.5 Diketahui sebuah inti elektromagnet, terdiri jangkar magnet dan kuk berbentuk U. Selain itu, kurva magnetisasi besi diberikan menurut harga berikut.

$$H = 1 \quad 4 \quad 10 \quad 24 \quad 10^3 \text{ A/m}$$

$$B = 1,2 \quad 1,6 \quad 1,8 \quad 1,8 \quad \text{V den./m}^2$$

Kedua kaki kuk dililiti oleh kawat tembaga dan melalui kawat akan mengalir arus I sehingga sebuah beban yang dihubungkan dengan jangkar menahan beban sebesar 1 ton. Berapa besar fluks B yang harus terdapat di dalam besi? Gambarkan kurva $B = B(H)$! Berapa besar H yang harus ditimbulkan oleh arus I sehingga B dapat mencapai harga yang sesuai dengan keadaan di atas? Untuk lilitan kawat tembaga dengan diameter 1

mm hanya dapat dibebani dengan arus tertinggi sebesar 4 A/mm^2 . Berapa panjang kawat yang dibutuhkan untuk itu? Apakah mungkin untuk meninggikan kemampuan angkat beban magnet dengan meninggikan H (apa dasar pemikiran ini)? Apa kemungkinan lain yang dapat dibuat? Pada perhitungan di atas telah diabaikan beberapa pengaruh yang mengganggu yang secara praktis harus pula diperhatikan, apa saja pengaruh tersebut?

Soal-Soal 7.5

7.5.1 Terdapat suatu analogi antara fenomena dielektrik dan magnet. Jelaskan masing-masing secara rinci. Besaran-besaran apa saja yang dapat dianalogikan satu sama lain dan hukum-hukum apa saja yang dapat diterjemahkan untuk kepentingan penjelasan analogi tersebut? "Terjemahkan" penjelasan pada §6.2 untuk fenomena magnetisme. Polarisasi terorientasi adalah analog dengan paramagnet dan polarisasi pergeseran analog dengan diamagnetik. Hingga berapa jauh berlakunya analogi demikian? Bagaimana mungkin bahwa suseptibilitas diamagnetik berharga negatif sedangkan polarisabilitas pergeseran adalah positif?

7.5.2 Apakah benar bahwa setiap atom di dalam medan magnet B akan mengalami rotasi dengan "frekuensi Larmor": eB/m ? Berapa besar momen magnetik yang timbul karenanya? Bagaimana menghitung suseptibilitas diamagnetik fenomena ini?

7.5.3 Dapatkah Anda buat aturan sederhana untuk menentukan atom atau molekul yang bersifat diamagnetik dan bersifat paramagnetik (jangan mencobanya dengan aturan yang telah diberikan atau diketahui)? Berapa besar perkiraan Anda momen magnetik suatu partikel paramagnetik dan berapa besar orde suseptibilitas gas paramagnetik dan materi terkondensasi? Apakah dapat Anda turunkan suatu aturan yang berasal dari suseptibilitas paramagnetik menjadi diamagnetik sedemikian rupa seperti halnya energi ikat sebuah elektron menjadi energi panas?

7.5.4 Logam umumnya mempunyai ketidakbergantungan suseptibilitas terhadap temperatur. Bagaimana hal itu dapat dijelaskan jika dibandingkan

dengan suseptibilitas gas yang bergantung pada T^{-1} ? Gunakan hasil perhitungan pada §14 untuk skema energi elektron konduksi dan kenyataan yang dihitung secara mekanika energi elektron konduksi, juga kenyataan yang dihitung secara mekanika kuantum bahwa momentum spin sebuah elektron hanya dapat paralel atau antiparalel di dalam medan magnet, tidak mempunyai arah selain salah satu dari dua arah di atas.

7.5.5 Bagaimana distribusi momen magnetik partikel-partikel gas terhadap arahnya di dalam medan magnet (untuk menyederhanakan persoalan dapat dianggap arah momen hanya paralel atau antiparalel)? Gunakan hukum distribusi Boltzmann. Bagaimana suseptibilitas paramagnetik bergantung terhadap medan dan temperatur (fungsi Langevin)? Apakah keadaan jenuh secara praktis dapat dicapai?

7.5.6 Mengapa justru Fe, Co, dan Ni berdasarkan bentuk bangun atomnya justru mempunyai sifat ferromagnetik? (Petunjuk. aturan Hund). Mengapa sifat ferromagnetik ini tidak terulang pada unsur-unsur dengan periode lebih tinggi?

Soal-Soal 7.6

7.6.1 Suatu pembangkit listrik tenaga air menggunakan air terjun dengan ketinggian 200 m. Air mengalir dari atas ke bawah sebanyak 5 m^3 tiap detik digunakan untuk menggerakkan turbin pembangkit listrik. Berapa besar daya listrik yang dapat dihasilkan oleh pembangkit listrik ini (anggap jika tidak ada energi yang hilang)? Di Muenchen terdapat kolam renang yang memerlukan air sekitar 1000 m^3 dan dipanaskan dari 10°C hingga 27°C dalam waktu 2 jam. Berapa daya yang diperlukan untuk itu? Untuk “mengangkut” energi listrik dari sumber di atas harus menempuh jarak sejauh 60 km ke Muenchen dan tersedia kawat penghantar dari tembaga. Diameter penghantar ke dan dari sumber adalah 1 cm^2 (secara praktis tentunya digunakan arus bolak-balik) Berapa besar tahanan penghantar tersebut? Tunjukkan bahwa tidak mungkin untuk mengangkut listrik yang

berasal dari sumber pembangkit yang kecil ini ke Muenchen jika digunakan tegangan hanya 220 V. Berapa besar tegangan yang mungkin digunakan untuk keperluan itu sehingga hanya terjadi pengurangan daya sebesar 0,4% dari daya total seluruhnya? (lakukan perhitungan arus yang dapat mengalir di dalam penghantar).

7.6.2 Bagaimana hubungan hukum Kirchhoff dan persamaan Maxwell? Apakah hukum keduanya merupakan penyimpulan atau aksioma?

7.6.3 Apakah terdapat rangkaian logik dengan tahanan nol atau tak berhingga? Pandang suatu rangkaian tanpa tahanan Ohm yang terdiri atas beberapa kapasitor dan induktor yang dihubungkan seri atau paralel.

7.6.4 Bagaimana mungkin bahwa pada suatu tahanan induktif dan kapasitif tidak diperlukan kerja arus? Apakah hal tersebut terjadi sesaat atau rata-rata terhadap interval waktu?

7.6.5 Mengapa gambaran rangkaian yang terdapat pada gambar[7.55] disebut *low pass filter*, *high pass filter* dan *band pass filter*? Bayangkan jika di kiri rangkaian dihubungkan dengan suatu sumber tegangan dan pikirkan pula berapa besar tegangan yang terukur di sebelah kanan rangkaian, yaitu tegangan yang bergantung pada frekuensi. Apakah tegangan akan berubah jika sebagian arus diambil di sebelah kiri (dengan cara menghubungkanpendekkan rangkaian dengan tahanan)?

7.6.6 Turunkan persamaan untuk getaran listrik dipaksakan dari hukum kekekalan energi. Jumlah energi medan listrik dan magnetik berubah sesuai dengan kerja sumber tegangan dan dengan timbulnya panas Joule

7.6.7 Lakukan uji ulang semua ramalan tentang rangkaian osilator, yaitu dengan menyelesaikan persamaan[7.58] dan[7.60] (dengan menggunakan bilangan kompleks atau fungsi trigonometri). Jelaskan pula darimana asal ramalan tersebut!

7.6.8 Bagaimana mengukur kapasitansi atau induktivitas dengan menggunakan jembatan Wheatstone?

7.6.9 Sebuah transformator yang digunakan untuk mencairkan logam, kumparan primer mempunyai 500 lilitan, dialirkan arus sebesar 1,5 A ke dalamnya. Kumparan sekunder terdiri atas potongan-potongan ring (cincin) terbuat dari tembaga dengan tebal 0,5 mm (dia meter luar cincin 10 cm dan diameter dalam adalah 6 cm). Setelah 15 det. timah yang terdapat di dalamnya akan mencair dan transformator diputuskan dari sumber tegangan. Berapa besar tegangan induksi, arus dan energi yang timbul selama proses berlangsung pada kumparan sekunder? Berapa besar energi yang cukup untuk memanaskan cincin tembaga (massa timah dapat diabaikan dibandingkan dengan massa cincin tembaga). Berapa besar efisiensi alat ini? Apakah terdapat energi yang hilang dalam proses tersebut? Di bagian mana menurut perkiraan Anda?

7.6.10 Mengapa dan dengan frekuensi berapa sebuah transformator mendengung? Bagaimana perubahan dengung jika transformator diberikan beban?

7.6.11 Konstruksikan sesederhana mungkin sebuah penggeser fase yang dapat menggeser fase tegangan bolak-balik sebesar $\pi/2$! Berapa besar kehilangan tegangan dalam hal itu?

Soal- Soal 7.7

7.7.1 Di dalam suatu bahan penghantar dengan tahanan jenis p mengalir arus bolak-balik dengan frekuensi ω . Apa peran relatif penting arus pergeseran D dan arus konduksi?

7.7.2 Apakah terdapat bahan kawat yang padanya *efek skin* telah berperan pada frekuensi sumber? Ramalkan pertambahan tahanan untuk kawat tembaga normal sebagai fungsi frekuensi. Lakukan pemeriksaan ulang atas hasil Anda dengan menilik kembali semua yang dijelaskan pada §7.6 6 (transformator tesla).

7.7.3 Pada suatu bola logam, tertutup dan kosong terdapat suatu benda berukuran kecil bermuatan. Bagaimana menemukan dengan cara paling

sederhana benda bermuatan tersebut bergerak, tanpa kesalahan? Apakah terdapat perbedaan jika bola logam terbuat dari bahan berbeda, misalkan besi atau aluminium?

7.7.4 Matahari menyinari bumi dengan intensitas energi $2 \text{ cal/cm}^2 \text{ det.}$ (konstanta matahari). Berapa besar intensitas medan listrik dan magnet, induksi dan vektor pergeseran cahaya matahari tersebut (harga efektif dan maksimumnya)? Apakah ada peran penting bahwa sinar matahari berwarna “putih” dan tidak mengalami polarisasi?

7.7.5 Melalui sebuah kawat mengalir arus searah sehingga mengakibatkan timbulnya medan magnet di sekitar kawat. Bagaimana letak E dan H ? Apakah terdapat vektor Poynting? Apa arti vektor Poynting tersebut? Apakah kerapatan energi medan mengalami perubahan? Bagaimana adanya keseimbangan energi secara murni dalam pengertian medan (terlepas dari sumber tegangan)?

7.7.6 Mengapa dalam elektronika harus dikembangkan prinsip baru untuk menjelaskan hal setelah melewati batas “gelombang meter”? Ramalkan kapasitansi dan induktansi suatu kawat lurus yang panjangnya beberapa cm dan tebalnya mencapai sepersepuluh mm (gunakan pernyataan energi medan). Ramalkan pula kapasitansi dan induktansi diri sebuah osilator ruang hampa dengan kebergantungan terhadap ukurannya!

7.7.7 Apakah sebuah antena batang sebuah mobil dapat menangkap gelombang radio? Mengapa penerimaan gelombang lebih baik jika antena dipanjangkan? Mengapa tiang pemancar gelombang harus dibangun tinggi (terdapat dua dasar pemikiran untuk itu)?

7.7.8 Apakah perlakuan sederhana suatu gelombang kawat (jarak kawat kecil dibandingkan dengan panjang gelombang, tahanan kawat dapat diabaikan) dapat dilakukan dengan menggunakan sebuah kapasitansi C^* dan sebuah induktansi diri L^* , keduanya per satuan panjang dan muatan λ persatuan panjang?

7.7.9 Mengapa medan elektrostatik selalu ditulis dalam $\mathbf{E} = -\nabla \phi$? Apakah adanya hubungannya dengan bebas pusaran garis-garis medan $\mathbf{E}$?

B adalah tidak bebas pusaran, tetapi bebas sumber. Oleh karena itu, **B** tidak dapat dinyatakan gradien potensial skalar, melainkan ...? Apakah dapat dikatakan bahwa definisi ini secara otomatis menyelesaikan persamaan Maxwell sekaligus atau apakah pernyataan ini terlalu berlebihan? Apakah medan listrik untuk kasus dinamis dapat dinyatakan gradien potensial?

Contoh: arus searah dan bolak-balik melalui sebuah kawat lurus. Tunjukkan adanya rumusan medan E yang berlaku secara umum, jika dihubungkan dengan potensial vektor A . Sebagai petunjuk atau untuk uji ulang: Persamaan Maxwell lainnya haruslah secara otomatis dipenuhi olehnya. Apakah menentukan φ dan A dapat dilakukan secara sempurna seperti E dan B ? Apakah terdapat keuntungan cara perhitungan? Apakah φ dan A melalui definisi ini telah ditentukan dengan sempurna, jika E dan B diketahui? Apakah $\nabla \cdot A = 0$ misalnya dapat digantikan dengan $\nabla \cdot A = \dot{\varphi}/c^2$ Bagaimana "bunyi" persamaan Maxwell lainnya ditulis dalam φ dan A , khususnya untuk vakuum dan dengan konvensi ini (bentuk kedua disebut konvensi Lorentz)? Perhatikan identitas $\nabla \times \nabla \varphi = 0$

Bab 8

Elektron Bebas dan Ion

8.1 Pembawa Muatan Bebas

Elektron-elektron yang terikat di dalam atom atau molekul atau di dalam logam yang kompak sebagai *elektron konduksi*, melalui percobaan pada umumnya hanya sedikit dapat dipengaruhi geraknya. Demikian pula dengan ion-ion yang terdapat di dalam zat cair atau padat, misalnya *ion kristal* (§14 2 3). Sebaliknya elektron dan ion-ion bebas dapat dipengaruhi medan listrik atau magnet sedemikian rupa sehingga elektron atau ion mengalami gaya, besar dan arah gaya tersebut praktis sembarang, sesuai dengan besar dan arah medan yang diberikan. Percepatan yang ditimbulkan oleh gaya tersebut dapat dihitung menurut hukum-hukum mekanika dan elektrodinamika. Dalam hal ini, berbeda dengan mekanika benda makroskopik, hukum gravitasi tidak perlu diperhitungkan. Pengaruh gravitasi pada elektron atau ion selalu lebih kecil dibandingkan dengan pengaruh medan listrik maupun magnet yang diberikan sehingga pengaruh tersebut sukar diamati secara langsung baik untuk elektron maupun ion.

Ada dua kondisi penting yang menjadi batas berlakunya hukum-hukum mekanika dan elektrodinamika pada elektron dan ion, yang hingga pembahasan di sini masih dipakai.

1. Jika elektron dan ion dipercepat dengan kuat medan yang sangat besar sehingga kecepatannya mencapai kecepatan cahaya; untuk hal ini

berlaku mekanika relativistik (§8.2.5 dan § 15).

2. Berkas partikel bebas (*korpuskel*) yang bergerak dengan kecepatan v , secara eksperimen dapat diperlakukan sebagai gelombang permukaan (*gelombang materi*) dengan panjang gelombang sama dengan $\lambda = h/mv$, h = konstanta Planck, sebagai *konstanta alamiah fundamental* (§8.1.2). Untuk kasus ini, berlaku *mekanika gelombang* atau *mekanika kuantum*. Karena λ berharga amat kecil sekali, setiap interaksi berkas dan atom atau atom-atom kisi kristal dapat mempengaruhi kelakuan keduanya. Sebuah percobaan "makroskopik" dengan memperlakukan berkas elektron sebagai gelombang, akan dibahas secara rinci pada akhir bab ini.

Energi setiap partikel kebanyakan akan dinyatakan dalam *elektronvolt* (eV). 1 elektronvolt adalah energi yang dikeluarkan atau yang diperlukan oleh satu satuan muatan elementer (elektron) $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C untuk melewati dua titik di dalam ruang bermedan listrik, dengan potensial antara dua titik tersebut sebesar 1 volt:

$$\begin{aligned} 1 \text{ eV} &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} \\ &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ &= 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ erg} \end{aligned}$$

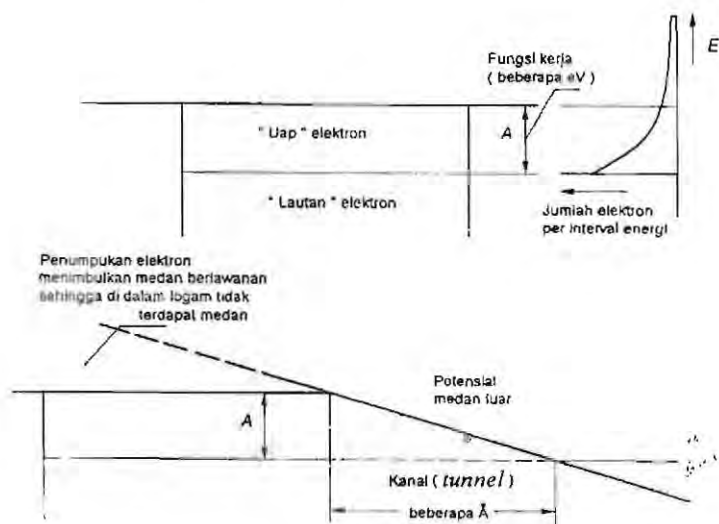
8.1.1 Efek Richardson

Di dalam logam terdapat elektron konduksi yang terikat pada inti lebih longgar dibandingkan dengan elektron-elektron lainnya. Elektron-elektron itu dapat dengan bebas digeser, tetapi di dekat permukaan logam elektron-elektron tersebut mengalami gaya sehingga untuk mengeluarkannya diperlukan kerja. Kerja itu disebut *fungsi kerja* (*energi lepas*) W . Untuk logam W berharga antara 1 sampai dengan 5 eV. Energi logam dapat dilukiskan sebagai potensial berbentuk kotak dan kebanyakan elektron menempati keadaan tingkat energi tertentu di bawah "tingkat energi" elektron bebas. Energi itu berasal dari gaya ikat elektron pada ion kisi dan dinyatakan dalam W (gambar[8.1]).

Energi termis translasi sebuah partikel pada temperatur kamar,

berdasarkan 5.2.2 adalah

$$\frac{m}{2} v^2 = \frac{3}{2} kT \approx 6 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$



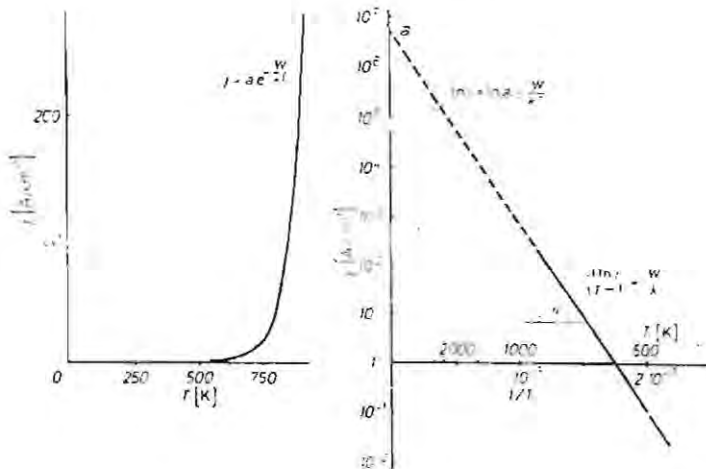
Gambar 8.1 Emisi pijar (atas) dan emisi medan (bawah) elektron logam.

$$= 3,75 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$$

$$kT \approx \frac{1}{40} \text{ eV}$$

Energi tersebut sangat kecil untuk bisa melepaskan elektron. Pada setiap temperatur umumnya, partikel mempunyai energi dalam orde 1 eV. Letak energi ini jauh dari "ekor" (ujung) kurva distribusi Maxwell (sebenarnya untuk elektron logam distribusi energi memenuhi fungsi distribusi lain, disebut distribusi Fermi, (lihat §17.3.2). Jika keadaan energi cukup besar, kedua fungsi distribusi ini saling bersesuaian). Elektron-elektron di dalam logam yang mendekati daerah di dekat permukaan logam akan mempunyai fungsi kerja W sehingga elektron-elektron tersebut mudah terlepas dari logam (*uap elektron*). Dengan bertambahnya temperatur

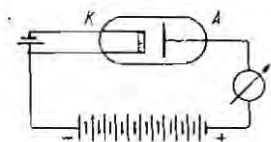
jumlah elektron tersebut akan bertambah dengan



Gambar 8.2 Arus pijar sebagai fungsi temperatur. kiri dinyatakan dalam diagram Arhenius.

cepat. Dalam keadaan setimbang termis "di permukaan" logam terdapat "atmosfir" elektron dengan kerapatan n_a dibandingkan dengan kerapatan elektron n yang terdapat di dalam logam, yang persis mengikuti distribusi Boltzmann, adalah sebanding dengan $e^{-W/kT}$. Selain itu, terdapat faktor tambahan lain yang memberikan perbandingan "berat statistik" (*statistical weight*) antara elektron di permukaan dan di dalam logam.

Secara praktis, elektron-elektron tidak dipandang dalam keadaan kesetimbangan termis, melainkan elektron-elektron yang tersapu bersih dari permukaan, seperti elektron-elektron pada tabung *sinar katode* yang menuju ke anode karena diberi medan (gambar[8.3]). Dalam keadaan tidak setimbang seperti itu, faktor Boltzmann $e^{-W/kT}$ tetap memegang peran penting. Faktor Boltzmann tersebut menyatakan kemungkinan satu elektron dengan fungsi kerja W dapat menembus permukaan logam dan mempunyai energi di atas energi rata-rata elektron-elektron lainnya. Jumlah elektron yang menembus permukaan setiap satuan waktu dan satuan permukaan diberikan dengan mengalikan faktor Boltzmann dengan faktor lain, yang



Gambar 8.3 Tabung sinar katode dengan baterai anode.

memberikan arti berapa seringnya elektron "berlomba" menembus permukaan. Faktor itu juga akan bertambah dengan meningkatnya temperatur, tetapi pertambahannya sangat kecil dibandingkan dengan faktor Boltzmann dan kebergantungannya terhadap T sangat sukar ditentukan secara eksperimen. Arus elektron yang lewat di permukaan logam dapat ditulis dalam bentuk:

$$j = en = eCT^2 e_0^{-W/kT} = C' e^{-B/T} \quad \text{(Persamaan Richardson)} \quad (8.1)$$

Gambar[8.25] menunjukkan karakteristik atau kebergantungan arus elektron terhadap tegangan pada tabung sinar katode yang diilustrasikan gambar[8.3]. Setiap kurva berhubungan dengan temperatur tabung sinar katode (katode biasanya dipanaskan dengan rangkaian pemanas). Daerah-daerah karakteristik yang berbeda-beda dibahas lebih rinci pada §8.2.6. Pokok perhatian dalam pembahasan ini adalah *arus jenuh* I_s yaitu daerah datar paling kanan pada kurva karakteristik. Gambar[8.2] menunjukkan kurva karakteristik I_s terhadap temperatur katode T ; sebelah kanan gambar ini menunjukkan kebergantungan I_s terhadap $1/T$. Bentuk kurva adalah garis lurus, dengan kenaikannya (*sloop*) sebanding dengan $-W/k$, atau sebanding dengan fungsi kerja elektron tersebut. Penentuan secara grafis ini (disebut diagram Arrhenius) sangat bermanfaat untuk berbagai bidang, khususnya jika besaran-besaran hasil pengukuran ditentukan melalui distribusi partikel pada keadaan dua tingkat energi elektron atau lebih (keadaan setimbang termis), atau jika besaran-besaran pengukuran ditentukan melalui kemungkinan kelebihan perbedaan energi elektron

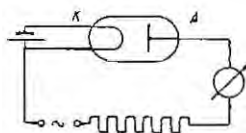
(pengukuran kinetik).

Tabel[8 1] menunjukkan fungsi kerja berbagai bahan katode. Untuk logam-logam mumi dengan permukaan emisi logam yang sama besarnya, konstanta-konstanta mendekati harga $60 \text{ A cm}^{-2}\text{K}^{-2}$.

Dalam praktiknya katode yang dipakai untuk pemanasan langsung atau tidak adalah berupa plat logam nikel atau platina, biasanya plat ini dipoles dengan pasta BaO dan oksida alkali tanah lain. Oksida tersebut telah memberikan emisi pada saat plat belum memerah benar ketika dipanaskan (katode seperti ini disebut katode Wehnelt).

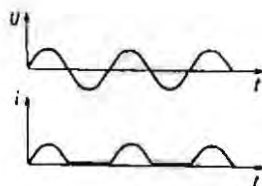
Tabel 8.1 FUNGSI KERJA BERBAGAI LOGAM

Logam	B [K]	W [eV]
W	52560	4,54
Mo	48200	4,16
Ag	47000	4,05
Cu	51000	4,39
BaO (pasta)	11500	0,99
Cs-Film pada W	15800	1,36



Gambar 8.4 Dioda sebagai penyearah

Tabung vakuum seperti diilustrasikan pada gambar[8.4] disebut *diode*. Di dalamnya hanya mengalir arus, jika katode negatif dan anode positif; diode ini menghambat keluarnya arus jika polaritas kutub berubah, karena "suap" elektron yang ekeluar dari katode yang dipanaskan tidak akan bergerak menuju elektrode negatif (gambar[8.5]). Oleh karena itu, dalam penggunaan teknis diode ini berfungsi sebagai penyearah atau "ventil" (lihat §8.2.7 dan §8.2.8).

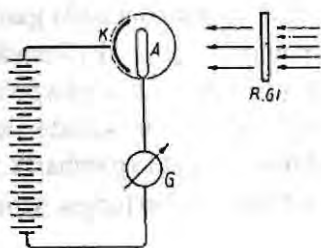


Gambar 8.5 Kurva arus berarah sama terhadap waktu pada tegangan bolak-balik anode U

8.1.2 Efek Fotolistrik

Jika sebuah plat logam yang dihubungkan dengan kutub negatif elektromotor (diberi muatan negatif) disinari dengan cahaya ultraviolet, misalnya plat seng (zinkum), plat akan kehilangan muatannya. Jika diberi muatan positif (dihubungkan dengan kutub positif), muatan akan tetap berada pada plat. Melalui cahaya muatan-muatan negatif, bukan positif, akan terlepas dari plat (W. Hallwachs, 1888). Umumnya cahaya dengan panjang gelombang pendek dapat melepaskan pembawa muatan negatif (elektron) dari permukaan plat.

Dalam hal itu muncul muatan negatif dengan energi kinetik E dari permukaan logam. Jumlah muatan yang keluar tersebut dapat diukur dengan memberikan tegangan $-U$ untuk melawan muatan-muatan yang sedang bergerak (gambar[8.8]). Dengan asumsi bahwa pembawa muatan adalah elektron, dengan muatan sama dengan satuan muatan elementer e maka energi kinetik pembawa muatan tersebut dapat dihitung menurut



Gambar 8.6 *Sel foto*. Sel foto digunakan untuk mengukur absorpsi cahaya yang dijatuhkan melalui gelas *R.Gl.*. Perbandingan antara intensitas cahaya datang dan yang diteruskan adalah sebanding dengan skala simpangan jarum galvanometer dengan dan tanpa gelas.

persamaan sebagai berikut.

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = eU$$

Berdasarkan persamaan di atas dapat diramalkan bahwa semakin tinggi frekuensi cahaya yang digunakan, semakin besar pula energi elektron keluar dari permukaan logam.

$$E = h\nu - W \quad (\text{Persamaan Einstein}). \quad (8.2)$$

h adalah konstanta Planck:

$$h = (6,62620 \pm 0,00005) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{det} \quad (8.3)$$

W adalah energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron dari logam (*energi lepas* atau *fungsi kerja*). Sebaliknya, intensitas cahaya yang diberikan mempunyai pengaruh kecil terhadap energi elektron; intensitas hanya berpengaruh terhadap jumlah partikel per cm^2 per det.

Berdasarkan teori elektromagnetik tentang cahaya, harus diasumsikan bahwa intensitas turut memberikan kontribusi pada energi elektron. Semakin banyak energi per satuan luas per satuan waktu yang jatuh, semakin banyak elektron yang terkumpul karenanya. Sebaliknya, hasil percobaan menunjukkan, walaupun tanpa penjelasan rinci, berdasarkan hipotesa Plack bahwa cahaya dengan frekuensi ν akan diemisikan atau diabsorpsi sesuai dengan paket (*kuantum*) energinya sebesar $h\nu$ (lihat §11.2.6). Energi sebesar $h\nu$ yang terdapat pada persamaan [8.2] digunakan untuk melepaskan elektron sedangkan sisanya ($h\nu - W$) adalah sama dengan energi kinetik elektron yang terlepas dari permukaan logam.

Percobaan tersebut dilakukan di dalam ruang vakuum, elektron-elektron biasanya dibebaskan secara *fotoelektris*.

Untuk mengukur intensitas cahaya digunakan *sel foto* (gambar [8.6]). Sebuah tabung vakuum tinggi terbuat dari gelas, biasanya gelas kuarsa, setengah bagian dalamnya terbuat dari lapisan logam, biasanya logam yang dipakai adalah kalium atau cesium bahkan kadang-kadang cadmium, dan berfungsi sebagai cermin. Katode foto yang diletakkan di depan cermin tersebut berbentuk cincin. Katode foto yang diletakkan di depan cermin tersebut berbentuk cincin, yaitu berfungsi sebagai anode A dan "cermin" logam dihubungkan dengan galvanometer G melalui kutub positif baterai. Jika cahaya dijatuhkan pada "cermin" logam, elektron-elektron akan terlepas dari permukaannya dan akan terkumpul pada anode; elektron-elektron akan terlepas dari permukaannya dan akan terkumpul pada anode; elektron-elektron tersebut mengalir sesuai dengan *arus foto*, sebanding dengan intensitas cahaya yang diberikan dan di atas *tegangan jenuh* jumlah elektron tidak lagi bergantung pada tegangan pada sel yang diberikan.

Pada sel foto yang diisi gas, arus elektron-elektron yang terlepas dari permukaan "cermin" logam akan diperbanyak karena terjadi ionisasi karena tumbukan (§8.3.1). Pada saat sekarang ini peran sel foto digantikan dengan elemen foto semikonduktor (misalnya *diode foto*, lihat §14.3.3).

8.1.3 Emisi Medan Listrik

Jika sebatang logam berada dalam keadaan potensial lebih negatif

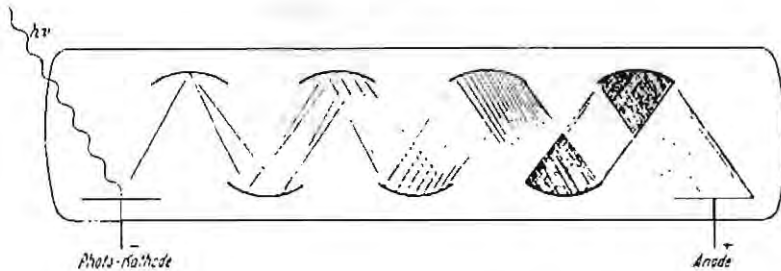
dibandingkan dengan keadaan sekelilingnya, medan listrik yang terdapat di sekitar logam akan "mengungkit" energi potensial elektron-elektron logam dengan kuatnya sehingga elektron yang keluar dari logam tidak lagi melewati tingkat-tingkat energinya, melainkan "melompat" seketika; semakin tipis logam tersebut maka pengaruh medan pada elektron akan semakin kuat (gambar[8.1]). Khususnya, jika salah satu ujung logam dibuat sangat runcing, medan listrik di ujung logam dapat mencapai 10^7 V/cm atau bahkan lebih. Pada medan semacam itu, khususnya jika ruang dibuat vakuum, terdapat emisi elektron terus menerus (emisi elektron karena medan listrik).

Dari pengukuran efek fotolistrik (persamaan Einstein, persamaan[8.2]) diketahui bahwa fungsi kerja W elektron hanya beberapa eV. Dengan medan listrik yang besarnya mencapai 10^7 V/cm, menyebabkan elektron dapat melompat dari tingkat energinya menembus ketebalan $1 \text{ V}/10^7 \text{ V/cm} = 1 \text{ \AA}$. Dengan medan demikian, besar elektron menjadi mudah untuk "melompat" menembus ketebalan tersebut atau bahkan elektron dapat melewati "dinding" lebih tebal lagi, tanpa penambahan energi (lihat §16.3.2). Terjadinya emisi elektron karena medan listrik ini adalah efek yang dapat dijelaskan secara mekanika kuantum.

8.1.4 Elektron Sekunder

Selain energi panas, optik dan energi medan listrik, dapat pula digunakan energi kinetik elektron atau ion yang terpental dari permukaan logam, agar elektron dapat terlepas dari logam. Emisi sekunder didefinisikan sebagai: Jumlah elektron yang terlepas dari permukaan logam dibandingkan dengan jumlah partikel yang jatuh ke permukaan logam; umumnya, untuk ion positif, elektron sekunder sangat bergantung dari kecepatan partikel yang menumbuk permukaan logam. Dalam hal itu fungsi kerja dapat berasal dari energi yang dikerluarkan sebuah ion karena melepaskan satu elektron, yaitu jika proses tumbukan sebagai proses netralisasi muatan yang terjadi di permukaan logam.

Kenyataannya, satu elektron yang menumbuk permukaan



Gambar 8.7 Pengali fotoelektron sekunder (secara skematik: tegangan yang terdapat pada *dynode* tidak digambarkan).

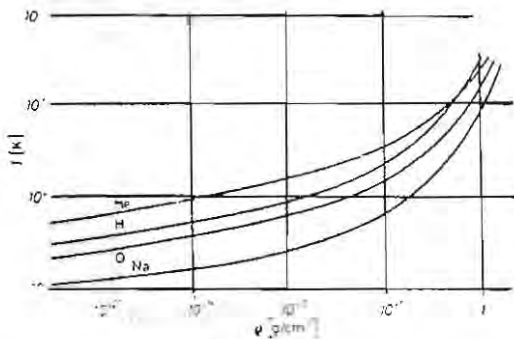
logam dapat membebaskan sejumlah elektron lain yang terdapat di permukaan yang sama, dan apabila elektron-elektron yang baru terlepas dipercepat menuju permukaan logam lainnya *dynode*, dari permukaan tersebut akan keluar elektron-elektron sekunder, dan seterusnya, sesuai dengan urutan *dynode* sehingga dapat digunakan sebagai pengali elektron sekunder *foto elektorn multiplier*. Perbesaran jumlah elektron sekunder ini dapat mencapai 10^{10} . Umumnya *multiplier* seperti itu digunakan untuk memperkuat intensitas cahaya yang terlalu lemah. Jika dihubungkan dengan katode-foto, jumlah foton yang menumbuk permukaan dapat dihitung sesuai dengan jumlah elektron sekunder (arus) yang terdapat pada alat ukur (gambar[8 7]).

8.1.5 Ion Bebas

Atom atau molekul gas dapat mengalami ionisasi yaitu apabila atom mengalami tumbukan sesamanya sehingga elektron pada atom bersangkutan akan terlepas. Hukum-hukum tentang ionisasi ini akan dibahas lebih rinci pada §13.3.1. Elektron yang terbebaskan pada umumnya

akan ditarik oleh partikel-partikel netral sehingga setelah tumbukan, di samping terdapat ion-ion positif terdapat pula ion-ion negatif. Jumlah pasangan ion, terjadi karena tumbukan, dalam setiap 1 cm jalan yang ditempuhnya rata-rata setelah tumbukan, pada tekanan 1 torr disebut *ionisasi diferensial*. Ionisasi diferensial yang besar khususnya terdapat pada elektron-elektron atau ion-ion cepat (sinar katode, sinar $-\alpha$ atau $-\beta$)

Molekul-molekul gas dapat pula mengalami ionisasi. Pada temperatur yang cukup tinggi selalu terdapat beberap partikel, yang energinya cukup untuk mengalami ionisasi. Distribusi partikel serupa ini terletak di ujung (ekor) fungsi distribusi Maxwell. Ukuran ionisasi termis ini, di samping bergantung pada temperatur, bergantung pula pada energi ionisasi E_i partikel-partikel gas yang bersangkutan. Pada kesetimbangan termis terdapat *derajat ionisasi*, yaitu sebagai perbandingan antara kerapatan ion n_i terhadap jumlah partikel keseluruhan n fungsi distribusi Boltzmann. Jumlah ion n_i [partikel/cm³] yang mengalami ionisasi terdapat di dalam tingkat energi yang paling tidak lebih tinggi daripada harga E_i dibandingkan dengan sejumlah partikel lainnya $n_0 = n - n_i$ [partikel/cm³], yang masih memiliki elektron (paling tidak mempunyai energi E_i karena elektron dan ion masih memiliki energi kinetik).



Gambar 8.8 Batas antara keadaan netral dan ionisasi pada diagram T - p untuk H, He, Na berdasarkan persamaan Egger-Saha

Dari persamaan [5.28] n_i/n_0 sebanding dengan $e^{-E_i/2kT}$, dikalikan dengan sebuah faktor yang disebut *berat statistik (statistical weight)* perbandingan

elektron-pasangan ion dan dari partikel netral (lihat §5.2.7), di dapat persamaan Eggert-Saha sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\frac{n_i}{n_o} &= \frac{(2\pi mkT)^{3/4}}{n_o^{1/2} h^{3/2}} e^{-E_i/2kT} \\ &= 4,91 \cdot 10^{10} \frac{T^{3/4}}{n_o^{1/2}} e^{-E_i/2kT}\end{aligned}\quad (8.4)$$

(n dalam m^{-3}). Pada temperatur yang sama dengan temperatur bintang gas-gas akan mengalami ionisasi.

Sebatang logam yang diberi muatan (jarum pelacak) yang dihubungkan dengan elektromotor, akan mengeluarkan muatan dengan menyala. Pelepasan muatan tidak bergantung pada apakah logam diberi muatan positif atau negatif, pelepasan muatan terjadi karena adanya ion-ion yang bermuatan berlawanan pada nyala api tersebut. Dari percobaan diketahui, nyala api tersebut mengandung ion-ion positif atau negatif. Kerapatan ion dapat diketahui dengan menggunakan atau memberikan garam, seperti garam-garam alkali halogenida atau Na_2CO_3 pada nyala api untuk menambah peningkatan yang lebih besar.

Ion-ion positif dapat juga terdapat, jika atom-atom netral yang mempunyai energi kecil di permukaan sebatang logam mendapatkan energi sebesar fungsi kerja elektron yang besar. Fungsi kerja elektron Wolfram adalah 4,5 eV (lihat tabel [8.1]); sejumlah energi yang sama akan dilepaskan jika terdapat sebuah elektron yang berasal dari luar, menumbuk permukaan Wolfram (*efek Langmuir-Taylor*). Jika sebuah atom Cesium yang mempunyai fungsi kerja elektron sebesar 3,9 eV mengenai permukaan Wolfram, akan mengeluarkan sebuah elektronnya dan energi untuk mengeluarkan elektron tersebut diperolehnya dari energi sebuah elektron yang terlepas dari atom Wolfram. Jika di dalam sebuah wadah yang berisi gas Cesium terdapat dua elektrode Wolfram dan kedua elektroda diberi muatan dengan cara menghubungkannya dengan kutub positif dan negatif baterai, akan terdapat arus ion Cesium positif dari kutub anode Wolfram (positif) ke katode Wolfram (negatif), walaupun tanpa media ionisasi. Dalam hal itu, temperatur Wolfram harus dijaga tetap tinggi, untuk

mencegah terjadinya lapisan logam Cesium yang mengendap di permukaannya; karena adanya kemungkinan menurunnya fungsi kerja elektron-elektron sehingga kondisi seperti disebutkan di atas tidak akan terpenuhi. Efek ini dipakai untuk mengukur intensitas berkas atom Cesium, dengan mengukur arus ion positif Cesium.

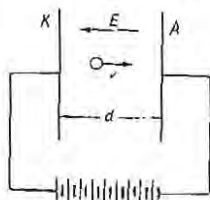
8.2 Gerak Pembawa Muatan Bebas

8.2.1 Elektron di dalam Medan Listrik Homogen

Antara dua plat di ruang vakuum, misalnya sebuah plat katode pijar (katode Wehnelt) dan sebuah plat anode dasar (gambar[8.9]) masing-masing dipisahkan dengan jarak d diberi tanda potensial U . Jika di sekeliling kedua elektroda hanya terdapat sedikit pembawa muatan seperti itu sehingga muatannya tidak cukup untuk dapat mempengaruhi medan yang ada, akan terdapat medan homogen sebesar $E = U/d$. Jika antara kedua elektrode terdapat muatan sebesar e , muatan akan mengalami gaya sebesar eE dan karena tidak ada muatan lain, berdasarkan persamaan gerak Newton muatan akan mengalami percepatan konstan sebesar:

$$m a = e E = e \frac{U}{d} \quad (8.5)$$

Muatan akan jatuh ke anode, seperti halnya sebuah batu jatuh ke bumi karena percepatan gravitasi. Waktu yang diperlukan muatan untuk menempuh jarak dari katode U/d dengan kecepatan v hingga mencapai anode dapat dicari melalui persamaan jatuh bebas (lihat §1.4.1), dengan anggapan bahwa kecepatan awal muatan di katode $v = 0$:



Gambar 8.9 Kelakuan elektron di dalam medan listrik homogen

maka

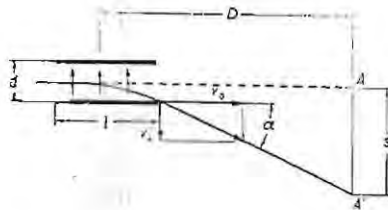
$$d = \frac{a}{2} t_d^2 = \frac{e U l}{2 m d} t_d^2$$

dan

$$t_d = \sqrt{\frac{2 m d}{e U}}$$

$$v_d = a t_d = \sqrt{\frac{2 e U}{m}} \quad (8.6)$$

Dari harga kecepatan ini, secara sederhana dapat diperoleh energi kinetik sebesar $1/2 m v_d^2 = eU$. Dalam hal itu, kecepatan tidak bergantung pada jarak yang ditempuh, melainkan hanya bergantung pada besar potensial antara dua elektroda. Dari perhitungan energi dapat disimpulkan bahwa kecepatan juga tidak bergantung pada distribusi kuat medan pada saat muatan menempuh jarak dari katode ke anode; persamaan [8.6] tidak dibatasi berlaku untuk harga kuat medan tertentu, tetapi perlu diingat bahwa



Gambar 8.10 Pembelokan berkas elektron di dalam medan listrik homogen pada arah vertikal dan arah geraknya

di dalam ruang antarkedua elektroda tidak terdapat materi lain yang dapat mengurangi kecepatan muatan.

Jika elektron ditembakkan pada arah tegak lurus di dalam medan listrik homogen (gambar [8.10]), elektron akan membentuk lintasan parabola, seperti halnya gerak benda yang dilemparkan horizontal di dalam medan gravitasi bumi. Jika kecepatan awalnya v_0 , untuk menempuh jarak horizontal l diperlukan waktu selama $t = l / v_0$. Tegak lurus terhadap gerak horizontal tersebut, searah dengan medan listrik, beranalogi dengan gerak

benda di dalam medan gravitasi, elektron akan mengalami kecepatan sebesar:

$$v_{\perp} = at = \frac{e}{m} E \frac{l}{v_0} \quad (8.7)$$

Komponen kecepatan pada arah horizontal tetap tidak berubah $v' = v_0$. Dengan demikian arah gerak akan mengalami penyimpangan dengan sudut α , yang diperoleh sebagai berikut.

$$\tan \alpha = \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} = \frac{e}{m} E \frac{l}{v_0^2} \quad (8.8)$$

Jika medan berakhir pada jarak l , α adalah sudut simpangan berkas elektron tersebut. Sebuah layar ditempatkan pada jarak $D > l$ di belakang kondensator pembelok, menyebabkan arah berkas elektron (gambar[8.10]) tidak jatuh pada titik A , melainkan pada jarak s dari titik tersebut:

$$s = D \tan \alpha = \frac{e}{m} E \frac{l}{v_0^2} D \quad (8.9)$$

atau, jika dinyatakan dalam beda potensial yang terdapat pada kondensator U_k , sebagai potensial pembelok arah berkas, dan beda potensial U_e yang menyebabkan elektron dipercepat sebelum ditembakkan:

$$e U_e = \frac{m}{2} v_0^2; \quad U_k = E d$$

atau

$$s = D \frac{1}{2} \frac{l}{d} D \frac{U_k}{U_e} \quad (8.10)$$

Penyimpangan (defleksi) berkas elektron yang diukur pada layar bergantung pada hanya pada geometri sistem dan beda potensial yang digunakan. Sifat-sifat partikel tidak berperan sama sekali (selain tanda muatannya: positif atau negatif).

8.2.2 Elektron di dalam Medan Magnet Homogen (Pengukuran Harga Muatan Spesifik e/m)

Jika sebuah muatan e dengan kecepatan v melintasi ruang bermedan magnet H , muatan akan mengalami gaya:

$$\mathbf{F} = e \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (8.11)$$

disebut sebagai gaya Lorentz. Gaya ini akan sama dengan nol jika arah v sejajar terhadap B . Jika v terletak tegak lurus v , muatan akan mengalami gaya maksimum sebesar evB ($v \perp B$). Dalam pembahasan ini akan dibatasi untuk kasus $B \perp v$ dan akan dianalisis gerak muatan tersebut.

Sebuah gaya yang mempunyai arah selalu tegak lurus terhadap gerak partikel, berdasarkan 1.1.5 tidak memerlukan kerja. Dengan perkataan lain, kecepatan maupun energi partikel tidak akan meningkat. Gerak seperti ini adalah gerak beraturan dengan besarnya kecepatan selalu konstan dan gerak dipercepat dengan percepatan selalu pada arah tegak lurus lintasannya. Gerak seperti itu merupakan ciri gerak melingkar beraturan (§1.4.2). Gaya Lorentz bekerja pada partikel sebagai gaya *sentripetal*, sementara gaya yang mengarah ke dalam, ke pusat acuan sistem disebut gaya sentrifugal sehingga terjadi keseimbangan dinamis antara kedua gaya tersebut pada partikel:

$$\frac{mv^2}{r} = evB \quad (8.12)$$

Partikel bergerak dengan frekuensi sudut:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{e}{m} B \quad (8.13)$$

yang disebut *frekuensi Larmor*. Frekuensi Larmor memegang peranan penting untuk berbagai efek-efek di dalam fisika, seperti *efek Faraday*,

efek Zeeman (§10.5.4 dan §12.7.10), dan efek elektromagnetik seperti resonansi paramagnetik, resonansi nuklir dan resonansi siklotron, serta efek De Hass Van Alphen. Lintasan melingkar mempunyai jari-jari:

$$r = \frac{mv}{eB} \quad (8.14)$$

Jika medan hanya berpengaruh membentuk tali busur, atau dengan perkataan lain membentuk lintasan $l < r$, simpangan lintasan akan membentuk sudut α :

$$\alpha \approx \frac{l}{r} = \frac{leB}{mv} \quad (8.15)$$

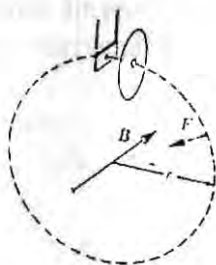
Dari energi kinetik partikel (diberikan dalam tegangan yang mempercepat partikel U , yaitu $1/2mv^2 = eU$), diperoleh kecepatan partikel sebesar $v = \sqrt{2eU/m}$ sehingga dari persamaan[8.13] harga muatan spesifik e/m dapat ditulis menjadi:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{eB} = \frac{1}{rB} \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

atau

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2 B^2} \quad (8.16)$$

Pada ruas kanan persamaan[8.16] hanya terdapat besaran-besaran yang dapat diukur secara langsung, misalnya jika dipilih kondisi sebagai berikut. Di dalam sebuah tabung bertekanan paling tidak 10-3 torr terdapat sepasang kumparan Helmholtz yang dapat menimbulkan medan magnet homogen, dan dari katode pijar keluar berkas selektron menuju anode bercelah sempit (biasanya digunakan silinder Wehnelt) karena berkas diberi kuat medan magnet tertentu (biasanya dengan mengatur besar medan magnet) akan diperoleh lintasan berkas elektron benar-benar berbentuk lingkaran (gambar[8.11]). Untuk mengetahui atau melihat langsung Gambar



8.11 Lintasan elektron berbentuk lingkaran di dalam medan magnet homogen

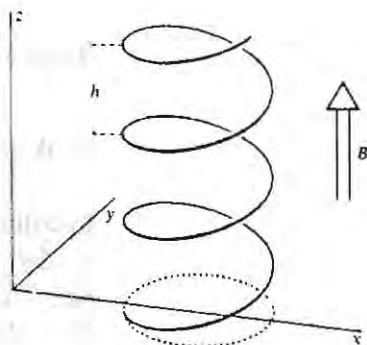
lintasan elektron tersebut, biasanya digunakan gas yang gampang terionisasi oleh elektron.

Di dalam fisika atom kasus yang juga penting adalah jika sebuah muatan dapat dipengaruhi oleh medan lain dan membentuk lintasan lingkaran (misalnya: medan listrik). Di dalam sistem tersebut biasanya ditempatkan juga medan magnet, misalnya arah medan magnet diatur tegak lurus terhadap permukaan lintasan muatan sehingga pada muatan akan bekerja gaya Lorentz dan gaya-gaya lain seperti gaya sentrifugal dan sentripetal, bergantung pada bentuk lintasan muatan nantinya. Lintasan dapat membesar atau menjadi sempit, bergantung pada apakah frekuensi semakin rendah atau tinggi, dan kesebandingan lintasan dan frekuensi tersebut sesuai dengan perbandingan $e B/m$: Lintasan akan berbentuk lingkaran jika $\omega B = \omega_0 \pm e B/m$, seandainya pada saat awal tidak terdapat medan magnet berfrekuensi ω_0 .

Jika medan magnet tidak terletak tegak lurus terhadap permukaan lintasan, dapat dibuat alasan sebagai berikut. Muatan yang bergerak membentuk lintasan menghasilkan "arus melingkar"¹⁾, yang menurut §7.2 5 akan terdapat momen magnetik karenanya. Momen magnetik itu mempunyai arah tegak lurus terhadap permukaan lintasan muatan, yaitu agak sedikit bergeser dari arah medan magnet (dengan perkataan lain

¹⁾Telah diketahui bahwa jika muatan bergerak, terdapat arus.

terdapat lengan, jarak antara momen magnetik dan medan). Selanjutnya, medan magnet ini akan menyebabkan momen putar pada momen magnetik sehingga muatan akan mengalami gerak presisi, seperti halnya sebuah gasing (§2.4.2)²⁾. Frekuensi gerak presisi ini adalah sama dengan eB/m . Kenyataannya, Kenyataannya, elektron dapat membentuk lintasan sembarang. Di dalam medan magnet elektron selalu membentuk lintasan melingkar dengan frekuensi eB/m (frekuensi Larmor).



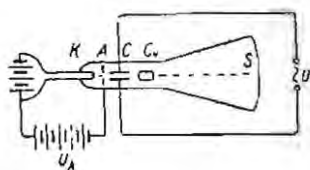
Gambar 8.12 Sebuah muatan membentuk lintasan spiral di sekitar medan magnet. Komponen vektor kecepatan pada arah tegak lurus $v_{\perp}$ menentukan jari-jari $r = v_{\perp} / \omega$ "selinder" yang dibentuk oleh lintasan spiral muatan; komponen vektor kecepatan pada arah horizontal $v_{\parallel}$ menentukan tinggi atau panjang silinder $h = v_{\parallel} / \omega$.

Frekuensi Larmor tidak lagi bergantung pada arah vektor kecepatan [dari G. Falk dan W. Ruppert].

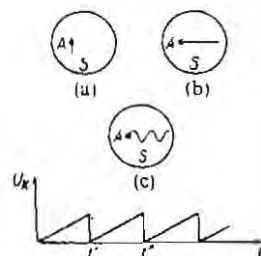
Sebuah elektron bebas dengan kecepatan $\mathbf{v}$ yang tidak tegak lurus terhadap medan magnet $\mathbf{B}$, akan membentuk lintasan berupa spiral di sekitar medan magnet. Komponen kecepatan yang paralel ($v_{\parallel}$) tidak akan berpengaruh karenanya sedangkan komponen kecepatan lainnya, muncul

²⁾Pada gerak presisi gasing sumbu rotasi gasing mengalami rotasi terhadap sumbu tegak; atau dengan perkataan lain, selain gasing mengalami rotasi terhadap sumbunya, sumbu juga mengalami rotasi terhadap sumbu yang tegak lurus terhadap lantai, jika gasing dimainkan di atas lantai. Untuk lebih jelas lihat §2.4.2.

dalam persamaan jari-jari lintasan, menggantikan v dan frekuensi Larmor. Tinggi atau panjang h lintasan spiral adalah $h = 2\pi m v_{\parallel} / e B$.



Gambar 8.13 Gambaran skematik berkas elektron



Gambar 8.14 a-c. Penggunaan osilograf "tegangan ungkit" untuk melukiskan tegangan bolak-balik periodis pada layar osilograf

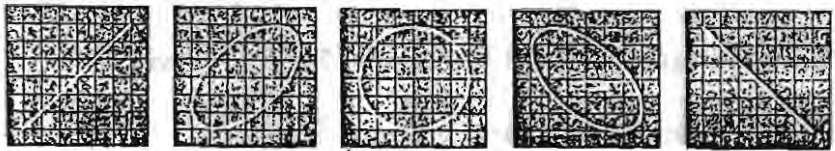
8.2.3 Osilografi Berkas Elektron dan Tabung Televisi

Penyimpangan lintasan berkas elektron di dalam medan listrik vertikal mula-mula digunakan oleh Ferdinand Braun untuk mengukur perubahan tegangan yang cepat. Tabung yang dibuatnya disebut juga sebagai *tabung Braun* atau tabung sinar katode atau juga *osilograf elektronik* dan pada saat sekarang ini telah "diperhalus" menjadi alat ukur yang sangat diperlukan dalam berbagai bidang. Cara kerja alat tersebut adalah sebagai berikut (gambar[8.13]):

Elektron-elektron yang muncul dari katode pijar K dipercepat menuju anode bercelah A karena diberi beda tegangan UA (dalam orde hingga beberapa kV) antara K dan A . Elektron-elektron yang diteruskan melalui celah A akan membentuk berkas yang lebih terfokus dan melewati kondensator pembelok arah berkas C , yang selanjutnya dijatuhkan pada layar S . Jika diberikan tegangan bolak-balik, *noktah* (titik berkas) berkas elektron yang jatuh pada layar akan membentuk garis vertikal (gambar[8.14a]). Jika ingin diamati kurva yang bergantung pada waktu berkas elektron, di belakang C ditempatkan kondensator lainnya CK untuk memutar berkas sebesar 90° dari arahnya setelah melewati C . Tegangan

yang diberikan pada C_k disebut *tegangan ungkit* U_k dan kurva tegangan horizontal bergantung pada waktu diilustrasikan pada gambar[8.14b]]. Melalui tumpang tindih kedua kurva di atas, pada layar akan terbentuk kurva yang ditunjukkan pada gambar[8.14c]. Dengan memilih *frekuensi ungkit* sesuai, diketahui bahwa tegangan periodis yang dianalisis selalu mempunyai fase yang sama, yaitu jika *tegangan ungkit* "terputus-putus", masing-masing untuk waktu t' , t' dan berkas yang jatuh pada A akan berbalik. Dengan demikian, akan diperoleh kurva yang saling tumpang tindih membentuk "gambar statik".

Sistem optis elektron sebuah televisi bekerja dengan cara yang hampir sama, berbeda hanya pada pengendalian tingkat terangnya (intensitas) gambar (pengendalian jumlah elektron yang terdapat di dalam berkas); pada osilograf hanya dibuat secara manual. Akan tetapi, pada televisi gambar yang diberikan secara berulang-ulang tersebut dibuat secara



Gambar 8.15 Pada raka x dan y plat pembelok arah osilograf terdapat tegangan bolak-balik berfrekuensi, amplitudo sama, tetapi fase berbeda.



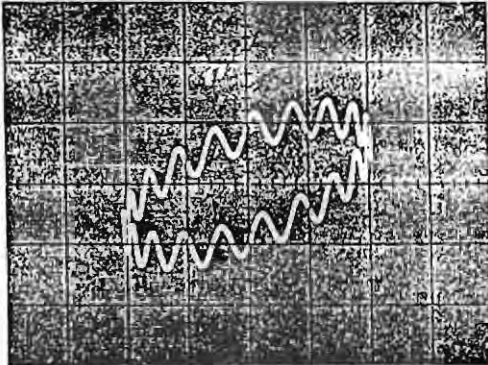
Gambar 8.16 Pada plat x dan y osilograf terdapat tegangan bolak-balik beramplitudo sama, tetapi frekuensi berbeda.

otomatis. Cara termudah untuk merealisasi pengendalian intensitas adalah dengan membuat tegangan pemanas pada katode pijar sangat sensitif terhadap temperatur (bergantung temperatur, 8.11). Akan tetapi, sayangnya katode tersebut tidak dapat memberikan gambar yang ditranfer secara yang amat cepat (berlangsung dalam waktu sekitar 10^{-7} detik).



Gambar 8.17 Frekuensi dan fase sinyal pada plat x dan y osilograf berbeda. Apakah sinyal akan tetap beebentuk sinusoidal? Apakah dapat digambarkan bentuk kurva parabola sempurna? [dari H.-U. Harten]

Untuk mengatasi hal ini digunakan media elektron optis (selinder Wehnelt) untuk menangkap bagian variabel misi elektron.

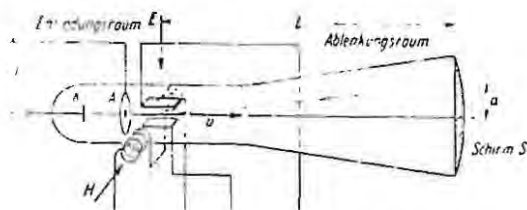


Gambar 8.18 Frekuensi y sangat tinggi dibandingkan dengan frekuensi x . Selain itu, pada plat y terdapat sinyal yang mempunyai frekuensi sama dengan frekuensi dasar dengan fase mengalami pergeseran dibandingkan sinyal x [dari H.-U. Harten]

Pada osilograf, seperti halnya pada televisi, bagian dalam layar diberikan lapisan bahan *luminisen* (biasanya digunakan bahan campuran sulfida-silikat dari seng dan cadmium yang dapat mengubah energi elektron yang jatuh pada layar menjadi warna yang bersesuaian dengan energinya, lihat §12.2.4).

8.2.4 Percobaan Thomson: Spektroskopi Massa

Derajat pembelokan sebuah partikel bermuatan di dalam medan magnet (pembelokan lintasan partikel menjadi lintasan melingkar, yaitu satu



Gambar 8.19 "Pipa osilograf" dengan medan listrik dan magnet pembelok untuk menentukan harga muatan spesifik e/m [dari W. Finkelburg].

per jari-jari lintasan) adalah:

$$\frac{l}{r} = \frac{eB}{mv} \quad (8.17)$$

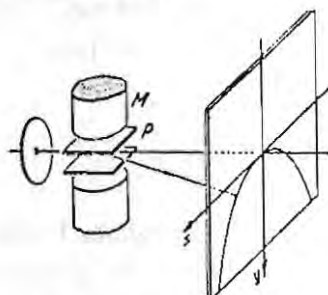
(bandingkan dengan persamaan[8.15]. Di dalam dalam medan listrik derajat pembelokan partikel (tangen sudut pembelokan per satuan lintasan, persamaan[8.8])"

$$\frac{\tan \alpha}{l} = \frac{eE}{mv^2} \quad (8.18)$$

"Ketegaran" berkas partikel dalam medan magnet bergantung pada $m \cdot v$ sedangkan pada medan listrik bergantung pada energi kinetik $1/2 mv^2$.

Dari sebuah sumber muncul berkas partikel bermuatan yang tidak diketahui. Secara mendasar massa m dan kecepatan v tidak dapat ditentukan hanya dengan menggunakan medan listrik atau medan magnet semata. Jika muatan dianggap sama dengan muatan elementer sekalipun, akan diperoleh derajat pembelokan untuk kedua medan yang digunakan mengandung kombinasi m dan v . Dengan menggunakan kedua medan

tersebut maka faktor kebergantungan derajat pembelokan terhadap m dan v dapat dipisahkan. Pemikiran *elegant* ini berasal dari J.J Thomson dan kemudia Aston memodifikasi peralatan tersebut lebih sempurna menjadi *spektograf massa* (lihat §13.1.4).



Gambar 8.20 Gambaran skematik peralatan yang digunakan J.J. Thomson untuk menentukan massa ion-ion berdasarkan metode parabola. P adalah kondensator pembelok berkas, M kutub magnet [dari W. Finkelburg].

Berkas partikel berdiameter kecil dapat ditimbulkan melalui kondensator pembelok yang terdapat antara kutub-kutub elektromagnet. Dengan demikian, medan magnet dan listrik akan saling paralel satu sama lain; misalkan keduanya terletak secara vertikal. Tanpa medan tidak terdapat berkas yang dibelokkan (lintasan nol). Misalkan titik itu merupakan titik nol sumbu x (horizontal) dan y (vertikal). Kedua medan mempengaruhi berkas saling tidak bergantung satu sama lain: misalnya medan listrik vertikal berada di sekitar:

$$y = \frac{eElD}{mv^2} \quad (8.19)$$

sedangkan medan magnet yang lebih lemah, menyebabkan berkas hanya membentuk lintasan tali busur / secara horizontal di sekitar:

$$x = \frac{eBlD}{mv} \quad (8.20)$$

E , B , I , dan D adalah konstanta alat. Dalam hal itu, berkas dapat terdiri atas partikel dengan muatan, massa dan kecepatan yang berbeda. Misalkan terdapat berkas yang sejenis (e dan m sama), tetapi berbeda kecepatan. Partikel-partikel ini akan jatuh pada koordinat (x, y) , yang didapat jika semua harga v diperbolehkan. Dari persamaan[8.20] v dapat dieliminasi dan substitusikan ke persamaan[8.19] sehingga diperoleh:

$$x^2 = \frac{e B^2 I D}{m v} \quad \text{sehingga} \quad y = \frac{m E}{B^2 I D} x^2 \quad (8.21)$$

Persamaan[8.21] adalah persamaan parabola. Partikel yang mempunyai kecepatan terbesar akan samapi di puncak parabola (lihat persamaan[8.20]). Puncak parabola tersebut terletak di titik nol dan jika partikel jatuh di titik tersebut, partikel seharusnya mempunyai kecepatan tak terhingga.

Suatu berkas partikel lainnya yang mempunyai harga muatan spesifik (e/m) lain, akan membentuk lintasa parabola yang berbeda. Lintasan tersebut akan semakin sempit (bentuk parabol akan sempit) jika harga e/m semakin kecil. Dengan demikian, akan diperoleh harga massa yang lebih presisi (telah dibuktikan untuk memisahkan berbagai isotop, molekul-molekul, bahan-bahan kimia, khususnya radikal-radikal organik). Kombinasi medan listrik dan magnet yang digunakan dalam spektograf massa telah dikembangkan dengan lebih baik presisi pada saat ini, guna mengetahui massa zat-zat atau perbandingan massa zat-zat yang belum diketahui secara akurat.

8.2.5 Massa Elektron Bergantung pada Kecepatan

Elektron-elektron cepat misalnya partikel-partikel radioaktif (partikel β , elektron umumnya yang mempunyai energi di bawah 100 keV) pada percobaan Thomson tidak menunjukkan perbedaan lintasan parabola lagi. Kurva yang diperoleh sangat lemah dan khususnya terdapat noktah di dekat bagian dalam puncak parabola (gambar[8.22]). Titik-titik yang terdapat di dekat puncak parabola berkaitan dengan partikel berenergi tinggi, parabola yang sempit menunjukkan harga m/e yang besar. Titik untuk partikel

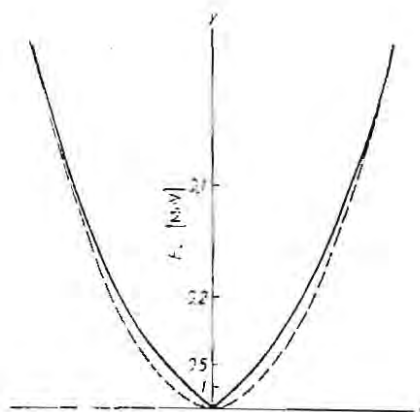
berenergi 500 keV terletak masih di kurva parabola, berhubungan dengan dua kali harga m_e . Dalam hal itu, terdapat dua kemungkinan: pertama, muatan elektron akan semakin kecil dengan bertambahnya energi (hingga saat ini masih belum dapat dibuktikan apakah terjadi demikian) atau kedua, massanya bertambah; pertambahan massa ini disebabkan energi sebesar 500 keV massa elektron akan bertambah menjadi dua kali massa semula. Hal itu khususnya dapat ditunjukkan oleh hubungan massa dan kecepatan sebagai berikut.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

dengan m_0 massa elektron normal; (untuk kecepatan yang kecil dibandingkan dengan kecepatan cahaya) dan c adalah kecepatan cahaya di dalam vakuum. Penemuan ini sekaligus membuktikan postulasi penting dalam teori relativistik (lihat §15.2.6).



Gambar 8.21 Pemisahan campuran ion-ion organik dengan metode parabola dari J.J. Thomson. Diketahui adanya perbedaan homologi parafin: bawah Methana dan produk dehidrasinya, di bagian atas adalah untuk ethana dan seterusnya. [berdasarkan Conrad, dari W. Finkelburg].



Gambar 8.22 Jika terdapat elektron berenergi tinggi, parabola Thomson mengalami deformasi karena adanya penambahan massa relativistik.

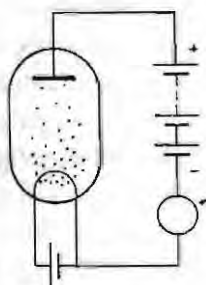
8.2.6 Tabung Elektron: Kurva Karakteristik Arung-Tegangan; Pengaruh Muatan Ruang

Transpor arus di dalam vakuum dan di dalam zat padat (kabel semikonduktor) dibedakan seperti gerak benda jatuh bebas dan gerak benda di dalam larutan viskon. Kecepatan pembawa muatan di dalam vakuum, berdasarkan hukum kekekalan energi, menghubungkan energi kinetik dan potensial dengan yang diberikan:

$$\frac{1}{2} m v^2 = eU \quad \text{sehingga} \quad v = \sqrt{\frac{2e}{m}} U \quad (8.22)$$

kecepatan pembawa muatan di dalam zat padat sebanding dengan gaya penggerak, atau sebanding dengan kuat medan:

$$v = \mu E \quad (8.23)$$



Gambar 8.23 Di dalam vakuum arus mengalir hanya melalui dua kutub yang diberikan beda tegangan dan elektron hanya berasal dari katode yang dipanaskan dan akan bergerak menuju oleh anode; kerapatan muatan yang dipercepat, terdapat di dalam ruang, berdasarkan persamaan kontinuitas muatan akan mengalami penurunan [dari H.-U. Harten].

(ν adalah *mobilitas* pembawa muatan, §6.4.2). Pada kedua kasus di atas kerapatan arus j (jumlah muatan yang lewat setiap satu satuan luas dalam satu satuan waktu) diberikan dalam kerapatan pembawa muatan n , muatan e , dan kecepatan v :

$$j = e n v \quad (8.24)$$

Di dalam *medan listrik homogen*, di ruang vakuum, mengalir kerapatan arus sebagai berikut.

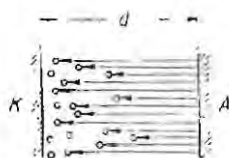
$$j = e n \sqrt{\frac{2e}{U}} U \quad (8.25)$$

di dalam zat padat berlaku hukum Ohm sebagai berikut.

$$j = e n \mu E = e n \mu \frac{U}{d} \quad (8.26)$$

Arus total I dapat dinyatakan dalam j dikali dengan luas penampang lintang ruang yang "diisi" medan.

Kebergantungan arus I , yang mengalir di dalam suatu sistem karena diberi tegangan disebut *kurva karakteristik arus-tegangan* sistem. Persamaan [8.26] menunjukkan kesebandingan atau kurva karakteristik Ohm. Medan yang terdapat di ruang vakuum mempunyai kurva sebanding dengan UI^2 , jika hanya terdapat muatan yang sedikit. Sekarang pandang realitas yang ada: Paling tidak jika tidak terdapat materi di dalam tabung, misalnya gas, menyebabkan gerak muatan tidak mengalami hambatan; hal ini direalisasi dengan cara mengosongkan udara di dalam tabung sehingga diperoleh vakuum yang cukup tinggi dan muatan diberikan dari luar, kebanyakan sebagai sumber muatan digunakan katode (misalkan katode pijar, katode foto). Kemudian muatan dilewatkan di dalam medan homogen yang diberikan di dalam tabung. Gerak muatan akan mengalami perubahan karena *muatan ruangnya* dan medan akan mengalami peningkatan. Hal itu akan mengakibatkan di tempat timbulnya muatan, yaitu katode, tidak terdapat lagi medan, karena telah "ditangkap" sebelumnya oleh muatan ruang (gambar [8.24]). Kasus seperti ini disebut arus terbatas karena muatan ruang. Di dalam tabung vakuum praktis selalu terdapat arus sedangkan di dalam zat padat kadang-kadang (khususnya di dalam semikonduktor) terdapat arus terbatas karena muatan ruang. Dalam kasus serupa itu (di dalam zat padat, semikonduktor) kerapatan muatan bergantung tempat (posisi pembawa muatan). Kerapatan muatan



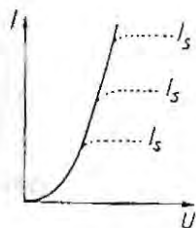
Gambar 8.24 Pengaruh muatan ruang pada medan yang terdapat antara katode dan anode.

tersebut sesuai dengan kondisi yang ada di sekeliling ruang tempat pembawa muatan, atau dengan perkataan lain kerapatan pembawa muatan sama di semua tempat. Jika tidak terjadi demikian, harga j yang besar akan menurun. Dengan perkataan lain, terdapat penumpukan (akumulasi) muatan di tempat yang bersangkutan. Muatan ruang tersebut akan melindungi medan yang terdapat di bagian lain di dalam ruang sehingga

menyebabkan harga j akan menurun hingga mencapai harga tertentu. Proses kesetimbangan demikian terjadi hingga $j = \text{konstan}$ atau disebut sebagai *kesetimbangan arus semu* (arus kuasi *stasioner*). $j = env = \text{konstan}$ berarti bahwa $j - 1/v$, di tempat yang terdapat sedikit pembawa muatan, pembawa muatan akan bergerak lebih cepat.

Di samping itu, di daerah yang mempunyai kerapatan muatan tinggi garis-garis medan akan "terserap" lebih banyak. Di daerah itu medan akan mengalami perubahan secara drastis (gbr[8.26]). Hubungan itu ditulis dalam persamaan Poisson sebagai berikut.

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{d^2U}{dx^2} = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} n\epsilon \quad (8.27)$$



Gambar 8.25 Kebergantungan arus emisi terhadap tegangan anode di dalam tabung berkas elektron pada keadaan temperatur katode yang berbeda-beda.

Sekarang kasus jika terdapat muatan ruang seperti itu, sehingga tidak terdapat medan di katode: $E_{kat} = 0$ sedangkan medan di anode mencapai harga tertinggi $E_{an} = U/d$, atau bahkan berharga lebih besar lagi. Jika medan itu mengalami penurunan pada jarak d , perubahan medan terhadap jarak adalah $E_{an} - U/d^2$. Secara pendekatan persamaan Poisson menjadi:

$$\frac{U}{d^2} \approx \frac{n\epsilon}{\epsilon\epsilon_0} \quad (8.28)$$

atau dengan menggunakan persamaan[8.24]:

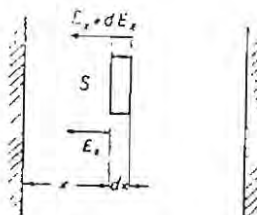
$$\frac{U}{d^2} \approx \frac{j}{v\epsilon\epsilon_0} \quad (8.29)$$

Untuk tabung vakuum, berdasarkan persamaan[8.22] diperoleh sebagai berikut.

$$\frac{U}{d^2} \approx \frac{1}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{I^{1/2}}{d^2} \quad (8.30)$$

Perhitungan lebih eksak menghasilkan persamaan muatan ruang Schottky-Langmuir, yang berbeda hanya dengan faktor 9/4 dengan persamaan[8.30]. Persamaan itu menjelaskan kurva karakteristik tegangan rata-rata di dalam tabung elektron (lihat gambar[8.25]).

Di dalam zat padat berlaku persamaan yang beranalogi dengan persamaan[8.20] dan [8.23]:



Gambar 8.20 b Penurunan persamaan potensial

dan [8.23]:

$$\frac{U}{d^2} \approx \frac{j}{\epsilon \epsilon_0 \mu E_s^2}$$

atau

$$j \approx \epsilon \epsilon_0 \mu \frac{U}{d^3} \quad (8.31)$$

Persamaan di atas disebut hukum Child dan berlaku untuk arus karena adanya muatan ruang di dalam semikonduktor. Persamaan tersebut khususnya berlaku untuk semikonduktor yang hanya mengandung pembawa muatan sedikit dan hanya dihasilkan karena pembawa muatan diinjeksi dari elektrode.

Persamaan[8.30] untuk tabung elektron belum menggambarkan semua kurva karakteristik arus-tegangan. Berdasarkan persamaan[8.30], untuk $U = 0$ seharusnya tidak terdapat arus. Kenyataannya adalah tidak seluruhnya benar, bahkan pada keadaan medan penghambat (medan yang melawan medan listrik yang ada karena muatan ruang) yang sangat lemah (tegangan sekitar 1 V) masih terdapat arus, yang semakin besar jika katode pijar semakin panas (pada persamaan Schottky-Langmuir sebaliknya, tidak terdapat pengaruh temperatur pada katode). Arus yang disebut *arus awal* ini berhubungan dengan elektron karena elektron-elektron yang terlepas dari katode mempunyai energi termis cukup tinggi maka dapat melewati medan penghambat yang lemah. Kurva karakteristik *arus awal* ini menunjukkan gambaran energi tinggi dari bagian ujung (ekor) kurva distribusi Maxwell dan ditulis sebanding dengan faktor $e^{-U/kT}$

$$I(U) = I(0) e^{-|U|/kT} \quad (8.32)$$

Dengan pertolongan persamaan ini dapat diketahui atau diukur temperatur katode. Adanya kecepatan elektron yang tidak sama dengan nol pada keadaan awal mempunyai dampak bahwa tempat terdapat medan $E = 0$ yang dianggap sebagai titik minimum kurva potensial, tidak terletak persis di muka permukaan katode, melainkan agak sedikit bergeser ke muka permukaan tersebut.

Untuk tegangan anode yang besar, bagian horizontal kurva karakteristik $I^{1/2}$ akan mengalami perubahan, yaitu akan terletak lebih tinggi jika temperatur katode semakin tinggi. Terdapatnya *arus jenuh* yang tidak bergantung pada tegangan ini timbul karena medan yang relatif besar [da katode akan "terserap" oleh muatan ruang, tanpa terbentuk muatan ruang yang menyebabkan hambatan di muka katode. Kebergantungan arus jenuh terhadap temperatur berhubungan dengan hukum Richardson (§8.1.1) dan arus akan semakin besar, tetapi kurva semakin landai, jika fungsi kerja pembawa muatan pada katode semakin kecil. Keadaan transisi antara daerah berlakunya persamaan Schottky-Langmuir dan daerah jenuh adalah garis-garis medan di dalam ruang, di muka katode selalu melemah, menyebabkan arus bertambah, hingga terbentuk muatan ruang di depan

katode dan semua elektron-elektron yang terlepas akan menuju ke anode.

8.2.7 Tabung Elektron sebagai Penguat

Pada daerah Schottky-Langmuir kuat medan di katode "menghilang". Di muka katode terdapat muatan total Q , yang berdasarkan tegangan anode U_a dan kapasitas C_{ak} karena susunan anoda-katode dinyatakan sebagai $Q = C_{ak}U_a$. Jika di antara katode-anode ditempatkan sebuah kisi G , kapasitannya terhadap katode C_{gk} dan kisi ini diberi potensial U_g , muatan katode akan menangkap kedua medan yang ada:

$$Q = C_{ak}U_a + C_{gk}U_g = C_{gk}(U_g + DU_a)$$

dengan $D = C_{ak}/C_{gk}$ adalah *jujukan pengaruh* garis-garis medan yang keluar dari anode dan bekerja pada ruang antara anode-kisi. Untuk arus katode I_k terdapat karena adanya tegangan "pengarah" $U_g + DU_a$; dalam kasus ini persamaan Schottky-Langmuir tetap berlaku dan arus katode I_k akan mengalir sebagian menjadi arus kisi I_g dan sebagian lagi menjadi arus anode I_a :

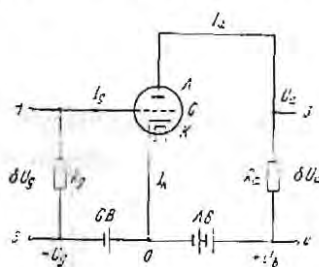
$$I_k = I_a + I_g = C(U_g + DU_a)^{3/2} \quad (8.33)$$

C adalah konstantan alat.

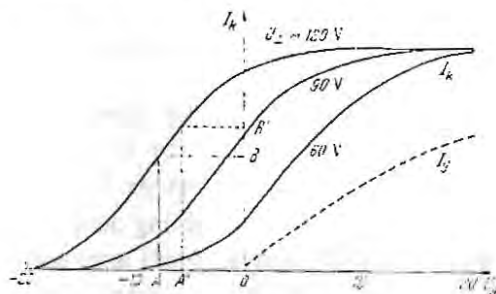
Dengan U_g arus katode akan diarahkan dengan tegangan anode konstan. Penjelasan di atas tidak lain merupakan cara kerja *triode* yang dipakai sebagai penguat (amplifier). Gambar[8.27] menunjukkan secara skematik rangkaian yang dimaksud dan gambar[8.28] adalah kurva kebergantungan arus katode dan kisi terhadap tegangan kisi dan anode, yang merupakan kurva karakteristik tabung triode. Pada harga tegangan anode U_a yang cukup tinggi, telah mengalir arus pada anode I_a , yaitu jika kisi diberikan tegangan negatif baterai GB . Dalam hal itu tidak akan terdapat arus kisi I_g (elektron tidak akan menuju ke kutub negatif) maka $I_k = I_a$ dan baterai kisi tidak akan mengalami pembebanan. Tahanan kisi R_g yang besar akan menyebabkan tegangan baterai pada kisi ditransfer

hanya ke kisi Tahanan pada anode R_a akan menyebabkan adanya penurunan tegangandi anode sebesar $I_a R_a$, agar tegangan kerja U_b dari baterai pada anode dipilih lebih tinggi daripada tegangan yang telah ada U_a .

Dengan mengatur tegangan kisi demikian, titik kerja A tabung dapat digeser ke titik A' . Untuk perubahan kecil tegangan kisi U_g akan terdapat perubahan yang sebanding dari arus anode I_a dari B ke B' .



Gambar 8.27 Triode dengan pemanasan katode "tidak langsung" dalam rangkaian penguat. Tabung pada saat sekarang ini secara luas diganti dengan transistor karena mempunyai kemampuan tinggi.



Gambar 8.28 Kurva karakteristik triode. Kebergantungan arus katode terhadap arus kisi dan anode. Untuk tegangan kisi positif terdapat arus kisi I_g .

yang juga menimbulkan perubahan tegangan anode U_a . Perhitungan pendekatan dapat dibuat dengan menurunkan persamaan [8.33] dalam bentuk deret.

$$\delta I_a = S (\delta U_g + D \delta U_a) \quad (8.34)$$

dengan

$$S = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_g} \right)_{U_a}, \quad D = - \left(\frac{\partial U_a}{\partial U_g} \right)_{I_a}$$

S disebut kemiringan kurva karakteristik $I_g(U_a)$. Dengan tahanan dalam $R_i = (\partial U_a / \partial I_a)_{U_g}$ sehingga berlakupersamaan tabung Barkhusen sebagai berikut.

$$S D R_i = 1 \quad (8.35)$$

Dengan memperbesar arus anode I_a akan menyebabkan penurunan pada tahanan anode R_a yang besar dan penurunan tegangan anode $-U_a$, sehingga diperoleh:

$$\delta U_a = -R_a \delta I_a = -S R_a (\delta U_g + D \delta U_a) \quad (8.36)$$

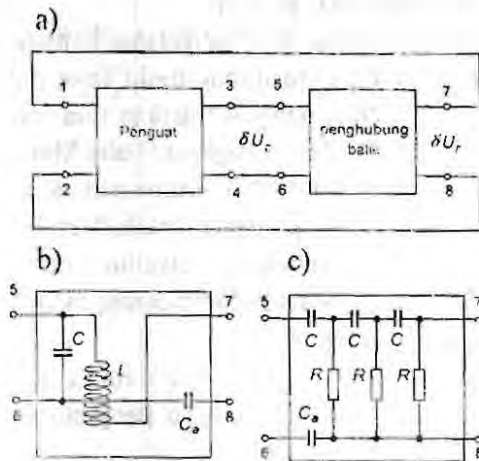
dan penguatan tegangan $V = U_a / U_g$ menjadi:

$$V = - \frac{S R_a}{1 + S R_a} = - \frac{1}{D} \frac{R_a}{R_i + R_a} \quad (8.37)$$

Tanda negatif mempunyai arti bahwa sinyal masukan (input) dan keluaran (output) mempunyai arah yang berlawanan. Besarnya penguatan tabung semacam itu tidak akan melampaui harga $1/D$. Untuk memperoleh penguatan tinggi, biasanya digunakan tabung dengan harga D kecil, yaitu dengan cara menambah kisi lainnya antara anode dan katode (disebut *pentode*). Dengan cara demikian dapat diperoleh sederetan tingkat-tingkat penguatan.

8.2.8 Percobaan Getaran Listrik Tidak Teredam dengan Tabung Elektron

Dengan menggunakan triode dapat dibuat getaran listrik tidak teredam, seperti yang telah dibahas pada §7.6.4. Untuk keperluan itu, salah satu



Gambar 8.29 a) Rangkaian balik umum; b) dan c) komponen rangkaian balik yang dapat memenuhi kondisi "rangsangan diri". C_a berfungsi mencegah adanya hubungan pendek baterai.

tegangan keluaran (*output*) $\mathcal{E} U_a$ dari rangkaian penguat (amplifier, gambar[8.27] dibalikkan menjadi tegangan masukan (*input*) melalui suatu rangkaian tertentu (lihat penjelasan di bawah), disebut komponen *rangkaian balik*, seperti ditunjukkan oleh gambar[8.29a] Dengan memisahkan hubungan 7-1 maka tegangan U_a akan melemah menjadi U_r . $U_a U_r = K$ disebut *faktor rangkaian balik*. Dengan memilih faktor rangkaian balik demikian hingga memenuhi *persamaan rangsangan diri*:

$$\operatorname{Re}(KV) = 1 \quad (8.38)$$

sehingga getaran yang didapat pada permulaan akan tetap bertahan karena tegangan keluaran rangkaian penguat menjadi tegangan masukan, sehingga harga tegangan kembali mencapai harga semula. Jika $\operatorname{Re}(KV) < 1$, getaran akan lenyap Apabila $\operatorname{Re}(KV) > 1$ akan menimbulkan getaran kembali hingga dibatasi suatu mekanisme yang tidak dibahas disini. Diambilnya bagian *real KV* mempunyai alasan bahwa U_a , U_r dan U_g dapat mempunyai

posisi fase yang berbeda (lihat §8.2.7).

Dari persamaan [8.38] dan [8.37] diketahui bahwa harga K berharga negatif. Dengan demikian, terdapat beda fase antara U_a dan U_r . Gambar [8.29b] dan [8.29c] mengilustrasikan dua contoh yang dipakai sebagai rangkaian balik, b) adalah rangkaian balik Meissner dan c) adalah *osilator pengecer fase* (generator RC). Rangkaian balik terakhir pada saat sekarang ini digunakan secara komersil untuk daerah frekuensi dari 0,1 Hz hingga 10 MHz. Kedua rangkaian tersebut hanya memenuhi syarat rangkaian balik pada satu frekuensi dan menampilkan getaran sinusoidal pada frekuensi yang bersangkutan.

Kasus penurunan daya muatan (*input*) atau rangkaian berlawanan sangat diperlukan secara teknis. Kehilangan penguatan yang diperolehkan adalah:

1. Untuk memperbesar sifat-sifat kemampuan transfer (frekuensi *input* dilinierkan, menurunkan faktor deret [*noise*] dan gangguan tegangan).
2. Untuk mengamankan stabilitas rangkaian karena adanya *rangsangan diri* yang tidak diinginkan atau perubahan terhadap waktu dari aktifitas elemen rangkaian balik akan mengakibatkan perubahan harga K dan V .
3. Untuk mendapatkan kebergantungan penguatan terhadap tegangan masukan (*input*) (*operational amplifier* sebagai komponen dasar komputer analog, penguat logaritmus).

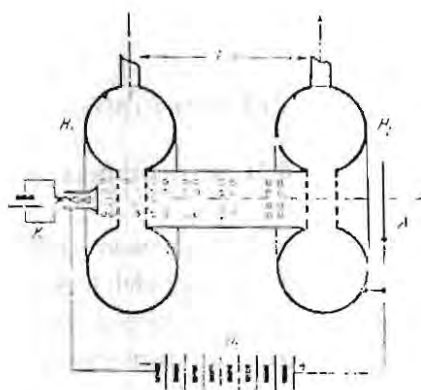
Rangkaian tersebut pada saat sekarang ini direalisasi dengan basis semikonduktor dan dibuat dalam kemasan modul miniatur untuk diperdagangkan sehingga modul-modul yang mengandung lebih dari ribuan rangkaian dapat diperkecil volumenya dan lebih memenuhi kebutuhan yang diinginkan dibandingkan dengan rangkaian-rangkaian tabung berukuran besar tersebut.

8.2.9 Penguat dan Percobaan Getaran Frekuensi Tinggi

Dalam daerah frekuensi tinggi (daerah frekuensi GHz) paling tidak

terdapat dua efek gangguan dalam penggunaan tabung elektron:

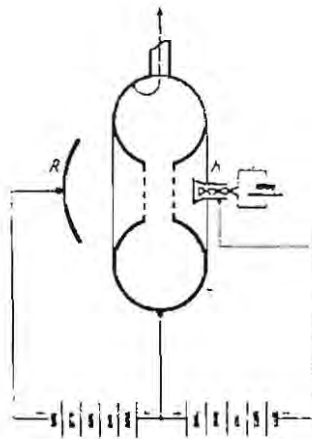
- (a) kapasitas dan induktifitas elektroda tidak dapat diabaikan lagi;
- (b) waktu yang diperlukan oleh elektron untuk melintasi katode dan anode adalah dalam orde yang sama dengan periode tegangan bolak-balik yang diperkuat; hal itu menyebabkan terjadinya pergeseran fase antara tegangan dan arus anode yang akan meningkat jika frekuensi semakin tinggi.



Gambar 8.30 Klystron

Fenomena yang digambarkan pada b) di atas (gambar[8.30]) justru digunakan pada rangkaian penguat frekuensi tinggi. Elektron-elektron yang berasal dari katode K akan dipercepat dengan tegangan searah U_0 . Pada lintasan antara kisi resonator ruang hampa berbentuk toroida $H1$ (§7.7.5), elektron mengalami medan bolak-balik longitudinal karena adanya tegangan bolak-balik berfrekuensi tinggi yang diperkuat. Oleh karena itu, kecepatan arus elektron akan mengalami modulasi.

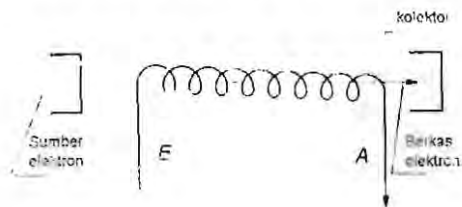
Arus elektron akan mengalami perlambatan atau percepatan bergantung pada harga sesaat tegangan. Di dalam ruang yang dilintasi elektron / kecepatan arus elektron termodulasi akan berubah menjadi kerapatan termodulasi: elektron tercepat akan diperlambat karena adanya deviasi periodis kerapatan elektron "Paket" elektron yang melewati resonator ruang hampa $H2$ tersendat-sendat di daerah tersebut karena pengaruh



Gambar 8.31 Klystron refleksi.

getaran. Tegangan bolak-balik yang diberikan pada H_1 dapat diperkuat dari H_2 . Penerimaan A tidak dipengaruhi oleh frekuensi tinggi.

Untuk membuat osilator frekuensi tinggi digunakan *klystron refleksi* (gambar[8.31]) yang bekerja dengan prinsip yang sama sebagai berikut. Arus elektron yang mengalami modulasi kecepatan melintas melalui reflektor R yang diberi potensial negatif, menyebabkan gerak elektron-elektron tersebut berbalik arah. Dengan membuat dimensi yang sesuai elektron akan mengalami osilasi sesuai dengan getaran eigen dari H . Resonator diisolasi: ukurannya tidak perlu diubah. Oleh karena itu, daerah frekuensi klystron refleksi akan terbatas ($\pm 5\%$).



Gambar 8.32 Penguat medan berubah

Kelemahan tersebut terdapat pada *tabung penguat medan berubah* yang mempunyai daerah kerja frekuensi hingga 10 GHz (gambar[8.32]). Arus bolak-balik diperkuat melalui kumparan panjang yang diberikan medan listrik E sehingga menimbulkan perubahan medan; perubahan medan bergantung pada ukuran kumparan. Di dalam kumparan dilewatkan berkas elektron dengan kecepatan harus lebih besar sedikit dibandingkan dengan kecepatan gelombang medan bolak-balik. Karena interaksi antara medan dan elektron, gelombang medan bolak-balik akan diperkuat dengan mengambil energi kinetik elektron. Daya yang dapat diperoleh pada A dapat mencapai beberapa kilowatt.

8.2.10 Konduktifitas Gas Terionisasi

Gas akan menjadi isolator sempurna jika tidak mengandung ion. Harga konduktifitas yang kecil berbagai gas dapat dijelaskan karena jumlah ion yang kecil di dalam gas. Jumlah ion-ion itu dapat bertambah karena pengaruh sinar radioaktif yang dapat mengionisasi gas, misalnya sinar-X atau sinar yang berasal dari zat radioaktif. Pada gas terjadi keadaan sebaliknya dibandingkan dengan lautan elektrolit; ion-ion di dalam gas tidak tetap. Pada saat di jumlah ion di dalam gas dapat berkurang sejumlah dn karena adanya *rekombinasi* antara ion positif dan negatif atau karena adanya penumpukan elektron bebas di dekat ion-ion positif.

a) Waktu Hidup Ion di dalam Gas. Jika kerapatan ion positif dan negatif masing-masing n^+ dan n^- , terjadinya rekombinasi dalam cm^3 yang menyebabkan pengurangan jumlah ion adalah:

$$\beta n^+ n^- = -i_{\text{rek}} \quad (8.39)$$

Dasar: Lihat misalnya ion positif. Pada lintasan bebas rata-rata sebesar $l = 1/Sn^+$, terdapat ion positif yang "tertangkap" ion negatif (S =penampang lintang tangkapan: lihat §5.2.5). Jika terdapat ion positif dalam cm^3

sebanyak n^+ dan rata-rata ion tersebut hidup dalam waktu $T = 1/v$, terjadi rekombinasi dalam setiap cm^3 setiap saat sebanyak $n^+T = n^+ 1/v = Sv n^+ n^-$.

Koefisien rekombinasi $\beta = Sv$. Kebergantungan β terhadap tekanan dan temperatur dapat dipelajari dengan model sederhana pada soal 8.2.9.

Sepasang ion yang muncul dan selanjutnya karena rekombinasi akan "menghilang" umumnya memenuhi $n^+ = n^- = n$. Dari persamaan [8.39] diketahui bahwa

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n_0} + \beta\tau \quad \text{atau} \quad n = \frac{1}{\frac{1}{n_0} + \beta\tau} \quad (8.40)$$

dengan n_0 adalah jumlah kerapatan ion pada saat $t = 0$. Setelah mencapai waktu

$$\tau = \frac{1}{\beta n_0} \quad (8.41)$$

jumlah ion n_0 berkurang menjadi setengahnya. T adalah waktu hidup rata-rata harganya akan semakin kecil jika n_0 semakin besar karena kemungkinan terjadinya rekombinasi adalah besar.

Keadaan stasioner kerapatan ion konstan hanya dapat diperoleh jika terdapat produksi ion secara terus menerus. Jumlah ion yang muncul setiap saat, misalnya laju munculnya ion adalah $\dot{n}_{\text{erz}}$. Dalam keadaan stasioner laju munculnya ion harus sama dengan laju terjadinya rekombinasi (bertanda negatif):

$$\dot{n}_{\text{erz}} = -\dot{n}_{\text{rek}} = \beta n_0^2 \quad (8.42)$$

Kerapatan ion stasioner dapat ditulis menjadi:

$$n_0 = \sqrt{\frac{\dot{n}_{\text{erz}}}{\beta}} \quad (8.43)$$

Waktu hidup rata-rata dapat diartikan sebagai waktu yang diperlukan oleh sumber pengion untuk dapat menghasilkan kerapatan ion sebanyak n_0 ion/cm³:

$$\dot{n}_{\text{erz}} \tau = n_0 = \sqrt{\frac{\dot{n}_{\text{erz}}}{\beta}}$$

sehingga didapat

$$\tau^2 = \frac{1}{\beta \dot{n}_{\text{erz}}} = \frac{1}{\beta^2 n_0^2}$$

yang ternyata identik dengan persamaan [8.41].

Di udara di dekat permukaan bumi, terdapat kerapatan ion sekitar $n_0 = 10^3 \text{ cm}^{-3}$. Sinar kosmik dan radioaktif yang terdapat di permukaan hingga ke udara di bumi minimal menghasilkan laju pembentukan ion sekitar $1 \text{ cm}^{-3} \text{ det}^{-1}$. Dengan demikian akan diperoleh waktu hidup dan koefisien rekombinasi ion sebagai berikut.

$$\beta = \frac{\dot{n}_{\text{erz}}}{n_0^2} \approx 10^{-6} \text{ cm}^{-3} \text{ det}^{-1}$$

dan

$$\tau = \frac{1}{\beta n_0} \approx 10^3 \text{ det}$$

Ionisasi yang terjadi di udara dan konduktifitas yang disebabkan nya (lihat penjelasan di bawah) dapat digunakan untuk menentukan intensitas sinar radioaktifitas. Dalam bidang *dosimetri* dibuat istilah 1 r (1 Roentgen) yaitu jumlah sinar yang terdapat setiap 1 cm³ udara bebas dapat menghasilkan ion negatif dan juga ion-ion positif, atau dalam satuan muatan C dan dihitung untuk 1 kg udara sebagai berikut.

$$\begin{aligned} 1r &\approx 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg} \\ &\approx 1,61 \cdot 10^{15} \text{ pasangan ion/kg} \\ &\approx 2,08 \cdot 10^9 \text{ pasangan ion/cm}^3. \end{aligned}$$

Satuan *kemampuan dosis*, 1 r/j (Roentgen/jam) berhubungan dengan $2,08 \cdot 10^9$ pasangan ion/cm³ j, atau sama dengan $5,8 \cdot 10^5$ pasangan ion/cm³ det. Dosis untuk 10^4 r/j pada saat sekarang ini bukan merupakan hal yang jarang (di dekat preparat yang diberi sinar radioaktif kuat). Laju munculnya ion adalah 10^9 lebih besar dibandingkan dengan "*background alamiah*" (lihat keterangan di atas), atau *no* menjadi 10^4 lebih besar dan *T* lebih dari 10^4 kali lebih kecil (§13.3.4).

b) Transport Arus di dalam Gas Terionisasi

Sebuah bilik (kamar) ionisasi dihubungkan dengan rangkaian seperti diilustrasikan gambar[8.9]. Jika ruang antara kedua plat elektroda dibuat vakuum, sehingga partikel-partikel pembawa muatan "jatuh" dalam medan dengan bebas, sebuah elektron atau ion tidak akan melintasi kamar ionisasi lebih jauh, yaitu hanya dalam order lintasan sekitar harga lintasan bebas rata-rata (§5.2.5), hingga ia menumbuk molekul lain. Dalam kasus seperti ini, adalah beranalogi dengan kasus di dalam zat padat bahwa terdapat kesebandingan kecepatan dengan kuat medan listrik yang diberikan:

$$v = \mu E \quad (8.44)$$

dengan μ adalah mobilitas pembawa muatan. Asal hukum ini dan harga mobilitas yang diharapkan akan dibicarakan di sini.

Antara dua tumbukan dengan dua molekul gas, partikel pembawa muatan di dalam medan listrik mempunyai kelakuan persis seperti gerak jatuh bebas, yang masih ditambah dengan adanya gerak random karena pengaruh termis. Setelah mengalami tumbukan pembawa muatan tidak mempunyai kecepatan yang sama dengan kecepatan rata-ratanya sehingga pembawa muatan dapat bergerak ke sembarang arah. Gerak setelah partikel mengalami tumbukan haruslah mempunyai $v = 0$.

Waktu rata-rata antara dua tumbukan T_f , yaitu *waktu bebas rata-rata* adalah $T_f = l/v_{th}$ (l = lintasan bebas rata-rata; v_{th} = kecepatan termis rata-rata). Dalam waktu ini partikel akan mengalami percepatan sebesar $a = eE/m$ dan akan mencapai kecepatan akhir sebesar $v = T_f eE/m$ sesuai dengan arah medan listrik. Secara efektif pembawa muatan hanya mempunyai

kecepatan setengahnya, yaitu:

$$v_E = \frac{eE}{2m} \tau_I = \frac{eEl}{2mv_{th}} \quad (8.45)$$

Kecepatan di atas adalah *kecepatan drift* yang dicari dan arahnya sama dengan arah medan listrik. Gerak karena pengaruh termis cenderung mempunyai kemungkinan yang sama pada semua arah (isotrop) dan karenanya tidak mempengaruhi transport pembawa muatan (arus). Hanya kecepatan v_E mempunyai arah sesuai dengan arah medan. Dalam hal itu v_E sendiri untuk mencapai medan yang diinginkan adalah kecil dibandingkan dengan v_{th} .

Berdasarkan definisi mobilitas, persamaan[8.45], sebagai faktor pengali E diperoleh:

$$\mu = \frac{cl}{2mv_{th}} \quad (8.46)$$

atau jika dinyatakan dengan persamaan[5.25] dalam l , $l = 1/nS$ (n = kerapatan partikel gas; S = penampang lintang tumbukan).

$$\mu = \frac{c}{2nnSv_{th}} \quad (8.47)$$

Untuk udara normal ($n = 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $S = 3 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$) didapat harga ramalan untuk μ sebagai berikut.

$$\mu \approx 3 \frac{\text{cm}^2}{\text{V det}}$$

Pengukuran langsung, masing-masing untuk pembawa muatan positif dan negatif diperoleh $\mu^+ = 1,3 \text{ cm}^2/\text{V det}$, $\mu^- = 2,1 \text{ cm}^2/\text{V det}$.

Di dalam kurva karakteristik kamar ionisasi sekrang diketahui terdapat dua daerah;

- 1 Selama kuat medan kecil, terdapat kehilangan ion karena arus, jika

perpindahan pembawa muatan ke elektrode dapat diabaikan dibandingkan dengan jumlah yang mengalami rekombinasi, keadaan stasioner akan tercapai berdasarkan persamaan [8.43] sehingga kerapatan arus menjadi:

$$\begin{aligned} j &= en_0(\mu^+ + \mu^-) E \\ &= e \sqrt{\frac{n_{\text{erz}}}{\beta}} (\mu^+ + \mu^-) E \end{aligned} \quad (8.48)$$

Dalam keadaan ini, untuk transpor arus di dalam gas, berlaku pula hukum Ohm. Faktor $en_0(\mu^+ + \mu^-)$ disebut *konduktifitas awal*.

Konduktifitas ini akan bertambah sebanding dengan akar kuat sumber ion atau daya dosis. Konduktifitas awal udara diperoleh dari aktifitas "background" dan tingginya tingkat daya dosis sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{awal}} &\approx 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^{-3} \cdot 3,1 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{det} \\ &\approx 5 \cdot 10^{-9} \Omega \text{ cm}^{-1} \end{aligned}$$

dan

$$\sigma_{\text{awal}} \approx 5 \cdot 10^{-5} \Omega \text{ cm}^{-1}$$

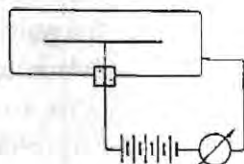
2. Pada keadaan medan listrik yang besar ion-ion akan mengalami pemisahan demikian cepat, ion-ion akan sampai ke elektroda dengan cepat sehingga hanya sedikit ion mengalami rekombinasi. Kerapatan arus jenuh ini diberikan menurut persamaan sebagai berikut.

$$j = en_{\text{erz}} d \quad (8.49)$$

d = jarak antarelektroda. Semua ion-ion yang ditimbulkan pada setiap "pipa" sepanjang d dengan penampang lintang 1 cm^2 akan sampai ke elektrode dalam waktu tersebut. Untuk kasus itu, hukum Ohm tidak lagi berlaku: peningkatan kuat medan listrik selanjutnya tidak akan menambah besarnya arus.

Di dalam kamar ionisasi umumnya tidak digunakan kondensator plat, melainkan kondensator silinder (gambar [8.33]). Galvanometer biasanya

diganti oleh elektrometer untuk mengukur muatan secara langsung yang sampai pada elektrode. Tentunya waktu elektrometer mengakumulasi muatan juga harus diukur. Dari pelepasan muatan dan waktu akan didapat laju timbulnya ion secara langsung dalam daerah jenuh, misalnya diperoleh pula dosis.

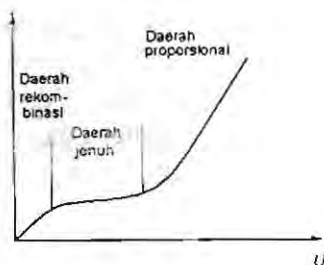


Gambar 8.33 Kamar ionisasi

Pada keadaan tegangan yang sangat tinggi arus akan meningkat dalam *daerah proporsional*. Terjadi ionisasi karena tumbukan (§8.3.1). Pada umumnya kamar ionisasi digunakan dalam daerah jenuh karena pada daerah lainnya arus tidak hanya bergantung pada dosis, melainkan masih terdapat faktor lainnya (lihat pembahasan di atas).

8.3 Pelepasan Muatan Gas

Di dalam bilik ionisasi akan mengalir arus tertentu yang tidak melalui suatu proses langsung berhubungan dengan transpor arus karena timbulnya ion-ion yang tetap. Pelepasan muatan di dalam bilik ionisasi *tidak berlangsung dengan sendiri* (mandiri). Apa yang menjadi pokok perhatian pada pembahasan berikut adalah proses pelepasan muatan pada gas, yaitu bahasan tentang mekanisme timbulnya arus, baik yang terjadi di dalam ruang berisi gas pada umumnya atau di dekat elektrode, hingga mencapai arus jenuh.



Gambar 8.34 Karakteristik pelepasan muatan yang tidak mandiri (tidak berlangsung dengan sendiri).

8.3.1 Teori Townsend

Sebuah tabung pelepas muatan yang mengandung dua elektrode plat misalnya diisi gas Argon (Ar) dengan tekanan beberapa *torr*. Dengan menggunakan cahaya gas akan terionisasi dan apabila kedua elektrode diberi tegangan akan mengalir arus, seperti ditunjukkan pada gambar[8.34]. Arus tersebut akan meningkat sebanding dengan kenaikan perbedaan potensial kedua elektrode. Sampai dengan kondisi demikian semua peristiwa yang terjadi di dalam persis sama dengan peristiwa di dalam bilik ionisasi. Apabila tegangan ditingkatkan lebih lanjut, arus meningkat lebih besar lagi dan akan mencapai harga tertingginya.

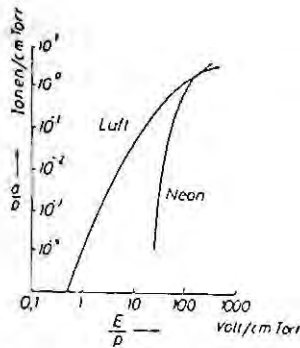
Meningkatnya arus terjadi jika pembawa muatan (elektron atau ion) yang ditimbulkan oleh cahaya dan diberi medan listrik akan mencapai kecepatan sedemikian rupa sehingga kemungkinan terjadinya tumbukan antarpartikel-partikel gas (pembawa muatan) akan lebih besar. Adanya tumbukan antarpembawa muatan menyebabkan terjadinya ionisasi lebih lanjut. Jumlah ion sekunder ini juga akan semakin meningkat jika kuat medan antarkedua elektrode semakin besar, sehingga memberikan sumbangan pula untuk transpor arus. Ion-ion ini menyebabkan pertambahan aliran (pelepasan muatan yang tidak berlangsung dengan sendiri; §8.1.3). Juga pada keadaan tekan tinggi, sekitar 1 atm., seperti halnya terjadi di bilik ionisasi, kembali terjadi kenaikan arus lebih jauh. Akan tetapi, jika medan listrik yang diberikan sangat besar (hal ini akan dijelaskan segera) selalu diikuti timbulnya peristiwa lain (*penembusan*).

Derajat ionisasi α , yaitu jumlah ion sekunder yang ditimbulkan oleh ion primer setelah bergerak mencapai lintasan sejauh 1 cm melalui gas di dalam ruang, sebagai fungsi tekanan p dan kuat medan listrik E . Fungsi kebergantungan tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$\alpha = p f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (8.50)$$

Perbandingan α/p disebut derajat ionisasi diferensial (§8.1.5). (p umumnya dinyatakan dalam *torr*). Gambar[8.35] menunjukkan besaran ini sebagai fungsi E/p untuk udara dan neon.

Hubungan seperti itu secara sederhana dapat dilihat dengan mudah. Sebuah ion yang berada di dalam medan listrik E akan mendapatkan energi dari medan yang bersangkutan, tetapi setelah ion mengalami tumbukan dengan molekul gas, energi ini akan diberikannya kembali, atau dapat diartikan bahwa setelah ion melewati lintasan l energinya akan berkurang. Apabila terdapat energi sebesar $\varepsilon = eEl$ (gaya c E , lintasan l), tumbukan akan menyebabkan ionisasi. Lintasan bebas rata-rata akan berbanding terbalik dengan kerapatan molekul, atau dengan perkataan lain berbanding terbalik



Gambar 8.35 Ionisasi gas yang terjadi pada tekanan 1 torr dari elektron di Udara dan Neon sebagai fungsi kuat medan listrik.

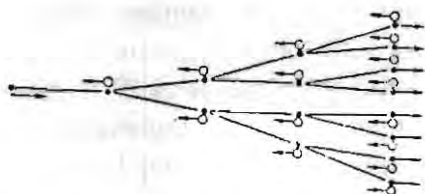
dengan tekanan gas (§5.2.5): $I = 1/Sn, p = nkT$. Oleh karena itu,

$$\varepsilon = \frac{c k T}{S} \frac{E}{p} \quad (8.51)$$

Probabilitas ion yang bergerak dalam lintasan bebas rata-ratanya untuk mengalami ionisasi haruslah fungsi ε atau haruslah fungsi E/p . Di samping itu, probabilitas ion untuk menumbuk partikel lain dalam lintasan 1 cm akan semakin besar jika lintasan bebas rata-rata semakin kecil, yaitu sebesar $1/l$ kali. Dalam hal itu $1/l$, seperti dinyatakan pada persamaan [8.30], sebanding dengan tekanan.

Lihat suatu berkas yang mengandung N ion atau elektron yang dipercepat di dalam medan listrik. Pada lintasan sebesar Δx terdapat ion sekunder sebanyak:

$$\Delta N = \alpha N \Delta x$$



Gambar 8.36: Gambaran skematik terjadinya ionisasi karena tumbukan

Karena tumbukan masing-masing ion sekunder akan menyebabkan terjadinya ionisasi lagi, apabila terjadi deretan peristiwa seperti dijelaskan di atas, di dalam gas akan terdapat partikel "ion anak" "ion cucu", "ion cicit", dan seterusnya sehingga di elektrode akan terdapat semua generasi ion-ion tersebut (gambar[8.36]). Jumlah total ion N_d yang timbul dapat diperoleh dengan mengintegrasikan persamaan di atas terhadap seluruh lintasan d :

$$dN = \alpha N dx \quad \text{atau} \quad \int_{N_0}^{N_d} \frac{dN}{N} = \int_0^d \alpha dx$$

atau

$$\ln \frac{N_d}{N_0} = \alpha d \quad \text{atau} \quad N_d = N_0 e^{\alpha d} \quad (8.52)$$

Keluaran (*output*) semua proses di atas akan menghasilkan muatan (ion-ion) yang dapat diamati baik di seluruh ruang yang berisi gas maupun di elektrode. Selanjutnya, lihat peristiwa pelepasan muatan, muatan yang dilepaskan berupa elektron yang keluar dari katode foto secara foto listrik. Jika pada katode muncul N_0 elektron setiap saat, pada saat yang sama di anode akan terdapat sebanyak:

$$N_d = N_0 e^{\alpha d} \quad (8.53)$$

partikel-partikel negatif. Jumlah itu tentunya belum tercakup semua pembawa muatan yang ada. Pada setiap ionisasi karena tumbukan, di samping terdapat elektron atau ion negatif, terdapat pula peristiwa sebaliknya yang disebut "degradasi", yaitu adanya ion positif yang bergerak ke katode. Setiap "elektron induk" sepanjang lintasan sebesar $e^{\alpha d} - 1$ akan membentuk ion positif (angka 1 dapat diabaikan, karena $e^{\alpha d}$ menyatakan jumlah "elektron induk" dan bukan ion positif). Ion-ion katode akan mengeluarkan elektron sekunder (§8.1 4). Jika setiap ion yang menumbuk menghasilkan sebanyak λ elektron sekunder, akan terdapat

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1)$$

elektron sekunder. Elektron-elektron itu juga berfungsi sebagai "elektron induk" dalam melintasi gas karena akan menghasilkan

$$\gamma N_0 (e^{\alpha d} - 1)$$

ion-ion negatif, dan seterusnya.

Dengan demikian, jumlah ion negatif seluruhnya menjadi

$$N = N_0 e^{\alpha d} + N_0 \gamma (e^{\alpha d} - 1) e^{\alpha d} + N_0 \gamma^2 (e^{\alpha d} - 1)^2 e^{\alpha d} + \dots$$

Jumlah deret geometris di atas dapat dicari dengan membuat $\lambda (e^{\alpha d} - 1)$ sebagai faktor pembagi dan jika faktor pembagi ini berharga lebih kecil dari pada 1, diperoleh:

$$N = N_0 e^{\alpha d} \frac{1}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (8.54)$$

Ion-ion negatif itu akan membawa arus total sebesar:

$$N = N_0 c \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (8.55)$$

Sesuai dengan faktor ionisasi α arus akan meningkat dengan meningkatkan medan listrik E . Akan tetapi, pelepasan muatan akan terhenti jika terdapat pelepasan elektron dari katode, proses ini tidak akan terjadi dengan sendirinya.

Persamaan[8.55] akan kehilangan artinya jika

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \quad \text{atau} \quad \alpha \geq \frac{1}{d} \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (8.56)$$

Jika terdapat medan yang cukup besar, selalu muncul faktor kebergantungan jenis gas ($f(E/p)$) dan bahan (λ). Pada daerah mulai terdapatnya medan itu, terdapat arus tanpa elektron primer sehingga pelepasan muatan berjalan dengan sendirinya. Kondisi yang dinyatakan oleh persamaan[8.56] mempunyai arti bahwa sebuah elektron yang terlepas dari elektroda, sepanjang lintasannya menuju anode karena tumbukan dengan partikel-partikel gas, menyebabkan terjadinya ion-ion. Ion-ion jika menumbuk katode paling tidak akan menimbulkan satu elektron. Dengan demikian, proses pelepasan elektron tidak lagi bergantung pada pemberian cahaya pada katode.

Di dalam gas, karena pengaruh radiasi sinar-sinar kosmis atau pancaran radioaktif akan muncul ion-ion dan elektron, yang apabila mempunyai derajat ionisasi tertentu dapat menyebabkan terjadinya pelepasan muatan kembali. Atau dengan perkataan lain, di atas suatu *tegangan* menurut persamaan[8.50] akan memberikan harga α yang cukup besar, dimungkinkan terjadinya proses pelepasan muatan yang tidak bergantung pada pembentukan ion buatan (pelepasan ion dengan sendirinya). Proses semacam ini terjadi, bergantung baik pada *tegangan perangsang* maupun dari *tegangan pembakar*, macam gas dan tekanan.

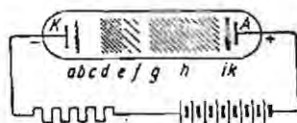
Keadaan stasioner suatu proses pelepasan muatan yang terjadi dengan sendirinya adalah setiap pembawa muatan harus menjaga miliknya masing-masing.

8.3.2 Pembagian Pelepasan Muatan pada Gas

Pelepasan muatan yang dibahas pada §8.3.1 adalah peristiwa pelepasan *muatan gelap*, hanya terdapat arus yang kecil dan tidak disertai dengan munculnya cahaya pada pelepasan muatan tersebut.

Peristiwa pelepasan muatan dengan arus yang besar, tetapi masih dalam keadaan tekanan yang rendah, disebut *pelepasan muatan disertai kilatan cahaya*. Prosesi itu biasanya disertai dengan terjadinya kilatan cahaya yang sangat intensif. Peristiwa serupa juga terjadi pada proses *pelepasan muatan busur* yang terjadi pada keadaan tekanan tinggi (§8.3.4).

Pada proses pelepasan muatan disertai kilatan cahaya dan busur kenaikan potensial yang terdapat antara katode dan anode tidak selalu linier. Hal itu dapat terjadi dalam kondisi tanpa arus. Kesamaan dan perbedaan mobilitas ion-ion pembawa muatan positif dan negatif akan menyebabkan terjadinya muatan ruang lebih besar (§8.2.6), dan karakteristik perubahan medan listrik terhadap tempat (jarak) sangat

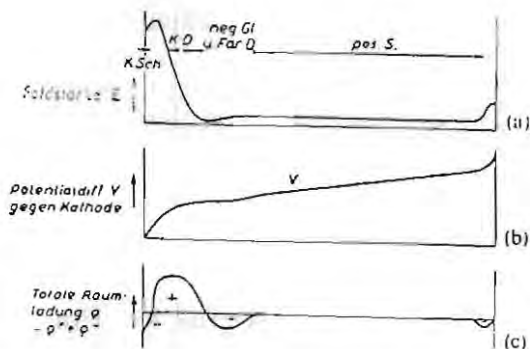


Gambar 8.37 Timbulnya cahaya pada peristiwa pelepasan muatan kilatan. Timbulnya cahaya digambarkan secara fotografis (negatif), daerah yang terdapat kilatan cahaya ditandai dengan garis-garis lebih rapat dan lebih renggang dan daerah yang tidak diarsir adalah ruang gelap. *a*: ruang gelap Aston; *b*: lapisan katode; *c*: ruang gelap Hittor; *d*: ruang kilatan; *e*: cahaya kilatan negatif; *f*: ruang gelap Faraday; *g*: pertengahan kolom ion positif; *h*: kolom ion positif; *i*: cahaya kilatan anode; *k*: ruang gelap anode.

dominan. Dalam hal ini berlaku definisi kuat medan listrik: yaitu turunan pertama potensial terhadap jarak, dan kerapatan muatan ruang sebanding dengan turunan kedua potensial. Jika terdapat penumpukan muatan negatif di anode, muatan tersebut adalah sama dengan "tumpukan" muatan ruang dan menyebabkan kenaikan potensial sehingga kurvanya akan naik ke arah sumbu positif. Hal sebaliknya terjadi jika pembawa muatan, setelah dilepaskan dari elektrode, tidak cepat berpindah. Di dalam daerah yang bebas muatan ruang terdapat kuat medan listrik yang konstan. Oleh karena itu, kurva potensial akan meningkat secara linier.

8.3.3 Bentuk Bangun bilik Pelepas Muatan

Gambar[8.38] menggambarkan distribusi kuat medan listrik pada proses pelepasan muatan disertai dengan kilatan cahaya di dalam sebuah pipa berbentuk silinder. Di depan katode, pada jarak beberapa lintasan bebas rata-rata, terdapat daerah dengan medan listrik yang sangat tinggi. Daerah itu disebut *daerah kejadian* (lapisan katode, $KSch$), dan tegangan yang terdapat pada daerah tersebut disebut *tegangan katode*. Elektron-elektron akan dibebaskan dari katode karena tumbukan ion-ion positif, dan akan mengambil energi dari membangkitkan kilatan cahaya. Adanya keadaan yang disebut daerah gelap (*ruang gelap katode*, KD) karena



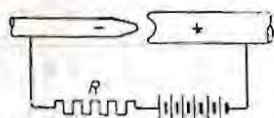
Gambar 8.38 a-c. Kuat medan, kenaikan tegangan dan muatan ruang antara katode dan anode di dalam peristiwa pelepasan muatan dengan kilatan.

menurunnya intensitas kilatan cahaya dan pada keadaan ini kemampuan ionisasi akan mencapai harga maksimumnya. Sejumlah besar ion-ion yang timbul pada keadaan ini ion-ion positif menuju ke katode menyebabkan terdapatnya muatan ruang positif, yang paralel dengan munculnya elektron, tidak akan mengalami penurunan jumlah. Karena elektron mempunyai massa yang lebih kecil akan bergerak lebih cepat di dalam medan dan energi yang diambilnya dari daerah *teg. ran katode*, melalui rangsangan cahaya, akan menurun di daerah kilatan negatif (*neg.gl*). Pada daerah ini, ruang tempat terdapatnya ruang Faraday *Far. D*, medan listrik akan mengecil. Medan ini dapat berharga nol atau bahkan negatif, yang memberikan arti bahwa arahnya berbalik. Selanjutnya, transpor arus terjadi karena adanya difusi pembawa muatan dan bukan lagi karena adanya medan listrik. Pada daerah yang dibatasi ruang gelap Faraday terdapat kolom ion positif *pos. S*; pada daerah ini medan listrik konstan. Ion-ion positif dan elektron-elektron terdapat dalam jumlah yang sama; daerah terdapatnya jumlah ion-elektron yang sama banyak disebut daerah kuasi plasma netral (§8.3.6). Kolom ion positif memaksa arus untuk terus menuju anode. Karena harga mobilitasnya yang besar, praktis hampir semua elektron bergerak lebih cepat. Ion-ion dan elektron yang keluar dari daerah plasma tersebut akan terakumulasi di dinding, diikuti dengan terjadinya peristiwa rekombinasi ion-elektron dan pada kolom ion positif seharusnya terdapat ion-ion yang baru. Energi yang diperlukan untuk peristiwa tersebut berasal dari medan. Kenaikan tegangan yang terdapat di depan anode disebut *tegangan anode*; tegangan ini umumnya terletak lebih tinggi sedikit di atas tegangan ionisasi.

Tegangan perangsang U Tegangan ini menyebabkan terjadinya pelepasan muatan antara dua permukaan elektrode. Tegangan *U* bergantung hanya pada perkalian tekanan dan jarak kedua elektrode (Paschen).

8.3.4 Pelepasan Muatan Disertai kilatan Cahaya dan Pancaran Bunga Api

Pada peristiwa pelepasan muatan berarus besar elektrode mengalami



Gambar 8.39 Pelepasan muatan cahaya busur dengan gambar busur

pemanasan yang sangat tinggi (panas Joule akibat tumbukan pembawa muatan) sehingga emisi pijar memegang peran penting pada proses penangkapan elektron dan katode. Kemudian terjadi pelepasan muatan dengan kilatan menjadi *pelepasan muatan busur* (cahaya busur). Diikuti dengan penurunan tegangan pembakar dengan drastis. Pada peristiwa pelepasan muatan berarus besar timbul muatan ruang positif (penumpukan ion-ion positif di depan katode) sehingga terdapat medan listrik yang amat kuat bahwa emisi medan katode adalah mungkin terjadi (seperti halnya *medan busur* yang dapat terbakar melalui penyearah dengan pertolongan elektrode air raksa). Daerah terjadinya pelepasan muatan busur terentang dari daerah vakuum busur (tekanan dalam beberapa torr) hingga ke daerah busur bertekanan tinggi (10 hingga 100 atm, seperti terjadi pada lampu Hg dan Xe). Peran praktis peristiwa seperti itu, sebagai contoh, adalah pada lampu yang berisi gas air raksa (Hg) dan busur karbon (gambar[8.39]) yang dapat terbakar di udara bebas.

Dua batang karbon dihubungkan dengan tahanan R dan baterai (110 atau 220 V). Setelah arus mengalir, dengan menyentuhkan kedua batang karbon tersebut, keduanya akan saling menjauh satu sama lain. Antara kedua puncak batang akan timbul cahaya busur berwarna biru-violet karena terbakar. Puncak karbon akan berpijar berwarna putih. Elektrode positif karbon yang akan memanaskan ($t > 4000^{\circ}\text{C}$) akan terbakar seperti kawah, elektrode negatif karbon ($t > 3500^{\circ}\text{C}$) bentuknya menjadi seperti kerucut. Jika busur terbakar dalam keadaan tekanan tinggi, temperatur elektrode positif dapat mencapai temperatur matahari ($t > 6000^{\circ}\text{C}$). "Kawah" elektrode positif dapat dipakai sebagai sumber cahaya dalam peralatan proyeksi. Dalam penggunaan normal, tegangan pembakar mempunyai harga antara 30 hingga 40 V. Tegangan ini akan berkurang dengan

Tabel 8.2: JANGKAUAN JARAK KONTAK

s [cm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Tegangan	4,8	8,1	11,4	14,5	17,5	20,4	23,2	26,0
s [cm]	0,9	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	
Tegangan	28,6	30,8	39,3	47,0	57,0	64,0	69,0	

peningkatan kuat arus (karakteristik). Untuk penggunaan yang *stasioner* dalam rangkaian harus diletakkan sebuah tahanan R (30 hingga 50 Ω).

Pancaran bunga api terjadi setelah peristiwa pelepasan muatan busur. Dengan bentuk elektrode dan pemberian tekanan tertentu, tegangan yang digunakan untuk merangsang terjadinya bunga api harus diatur secara presisi. Untuk itu, biasanya digunakan elektrode bola (*jarak jangkauan bunga api*) dengan jarak kedua elektrode dapat dibuat sekecil mungkin dengan menggunakan mikrometer, agar tegangan dapat diukur. Tabel[8.2] mengandung data jarak jangkauan bunga api s antara kedua elektrode bola berjari-jari 1 cm di udara pada tekanan 760 *torr* dan temperatur 18°C.

8.3.5 Pelepasan Muatan busur

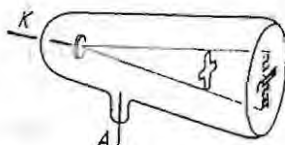
Jika tekanan di dalam tabung pelepas muatan kilatan dikurangi hingga tekanan menjadi 1 *torr* (gambar[8.37]), semua daerah batas munculnya cahaya akan berbalik dari katode. Ruang gelap membesar karena cahaya memudar. "Lapisan katode" yang terdapat di depan katode akan timbul nyala berbentuk pensil didekatnya pada arah sumbu yang berasal dari ruang gelap Hittorf. Bersamaan dengan itu, ruang Faraday dan kolom ion positif lenyap. Semakin lemah nyala gas terjadi, dinding gelas akan semakin mengalami fluoresensi bercahaya biru atau hijau. Dengan terjadinya penurunan tekanan, terjadi pula kenaikan tegangan di dalam tabung. Peristiwa ini terjadi, terlepas pula letak atau posisi anode, dapat dijelaskan

sebagai berikut. Ion-ion yang menumbuk katode akan melepaskan elektron dan hanya dapat menjangkau daerah *tegangan katode* tanpa gangguan akibat adanya ionisasi tumbukan (lintasan bebas rata-rata sekitar 1 cm akan tercapai jika tekanan antara 10^{-1} hingga 10^{-2} torr). Elektron-elektron ini akan mempunyai energi yang sama; kecepatannya adalah:

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m} U}$$

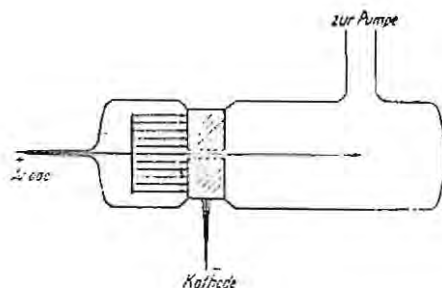
Dalam hal ini plasma (sisa "kolom" ion positif) praktis tanpa gangguan medan dan akan terus bergerak dengan lintasan garis lurus dan akan merangsang terjadinya pelepasan muatan di dinding gelas tabung pelepas muatan sehingga timbul cahaya fluoresensi berwarna biru atau hijau. Elektron-elektron itu disebut berkas katode.

Berkas katode yang merambat menurut garis lurus tersebut dapat didemonstrasikan dengan cara menjatuhkannya di layar sehingga pada layar akan terbentuk bayangan (lihat gambar[8.40]). Bayangan itu seolah-olah berasal dari sebuah sumber cahaya berbentuk titik yang terdapat di tengah-tengah katode. Jika tabung didekatkan dengan sebuah magnet batang, posisi bayangan tersebut hampir tidak mengalami perubahan akan bergerak ke bawah atau ke atas, bergantung pada posisi kutub Utara dan Selatan magnet ditempatkan. Dari kelakuan pembelokan bayangan tersebut di dalam medan magnet dapat disimpulkan bahwa berkas yang dipancarkan katode tidak lain mengandung muatan negatif. Perhitungan harga e/m dari pembelokan arah berkas itu menunjukkan bahwa muatan spesifik tersebut sama dengan muatan spesifik elektron. Dengan cara yang sama



Gambar 8.40 Pembuktian bahwa lintasan berkas katode adalah linier

J.J. Thomson pada tahun 1897 adalah orang pertama yang menentukan harga muatan spesifik e/m elektron dalam sejarah penemuan.



Gambar 8.41 Gambaran skematik tabung berkas kanal

Berkas Kanal

Goldstein, 1886. Sebagai katode di dalam tabung pelepas muatan digunakan plat logam berlubang (gambar[8.41]) sehingga munculnya cahaya akan terdapat di lubang tersebut atau "kanal". Di belakang katode akan terdapat berkas yang selanjutnya disebut *berkas kanal*. Karena kelembamannya ion-ion positif akan tertumbuk di katode dan sebagian akan melalui lubang tersebut dengan kecepatan tetap di dalam ruang tanpa medan. Beberapa sifat berkas kanal yang merupakan aplikasi penting dalam fisika atom terdapat pada soal 12.2.4

8.3.6 Plasma

Suatu gas yang karakteristikkan dengan adanya ion-ion positif dan negatif, juga elektron-elektron bebas, disebut *plasma*. Jika jumlah kerapatan ion-ion positif dan negatif yang terdapat di dalam ruang sama, disebut *plasma kuasi netral*. Seperti diilustrasikan gambar[8.38c], kolom ion-ion positif yang terdapat di dalam tabung pelepas muatan kilatan adalah salah satu contoh plasma kuasi netral. Bahan atau zat pada temperatur hingga beberapa ribu Kelvin, misalkan materi yang terdapat

di bintang-bintang, selalu berada dalam keadaan plasma. Fisika plasma pada saat ini berkembang dan menjadi media pembantu dalam bidang astrofisika, khususnya dalam membantu memecahkan persoalan-persoalan yang dapat dipandang mempunyai analogi dengan peristiwa fusi inti.

Di dalam plasma, ion-ion karena kelebamannya bergerak lebih lamban dibandingkan dengan elektron-elektron. Oleh karena itu, elektron-elektron akan bergerak praktis tidak mengalami gangguan di sela-sela kisi ion yang tidak beraturan. Plasma seperti itu cenderung mudah mengalami vibrasi diri (*vibrasi eigen*) dan peristiwa vibrasi tersebut dapat dipandang secara sederhana sebagai berikut. Diasumsikan bahwa elektron-elektron terdapat di dalam bagian (elemen) ruang yang diisi plasma yang berada dalam keadaan setimbang antara ion-ion positif dan negatif, hanya mempunyai perbedaan yang dapat dipandang kecil. Kemudian terjadi kelebihan sedikit muatan ruang positif dan selanjutnya akan terbentuk dengan sendirinya muatan ruang negatif. Di antara keduanya akan terdapat medan listrik yang cenderung mengarah pada keadaan setimbang yang baru, yaitu mendorong elektron-elektron, karena kelebamannya yang relatif kecil, elektron-elektron akan tersudut dan bergerak menjauhi kumpulan ion-ion positif dan negatif. Gerak seperti itu dapat diandaikan gerak bandul yang mempunyai frekuensi, disebut *frekuensi plasma* (Langmuir, 1925):

$$\nu_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n e^2}{\epsilon_0 m}} \quad (8.57)$$

n adalah kerapatan elektron bebas. Jika n ditulis dalam cm^{-3} , dalam angka ditulis:

$$\nu_p = 8980 \sqrt{n} \text{ Hz} \quad (8.58)$$

Dasar: Misalkan di dalam satuan volume terdapat n^+ ion-ion sejenis dan $n = n_1 + n_0$ elektron ($n_1 < n_0$). Kerapatan muatan ruang $\rho = -en^1$ akan

menyebabkan medan mengalami pergeseran yang berdasarkan persamaan Poisson dapat ditulis sebagai berikut.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (8.59)$$

Di dalam medan E praktis hanya elektron yang mengalami percepatan yaitu:

$$\dot{v} = -\frac{e}{m} E \quad (8.60)$$

karena ion-ion lebih "berat" dibandingkan dengan elektron. Dengan demikian, akan terdapat kerapatan arus $j = -ev(n_0 + n_1) \approx -evn_0$. Divergensi kerapatan arus menyebabkan adanya perubahan muatan ruang $p = -\nabla \cdot j$. Persamaan ini diturunkan sekali lagi terhadap waktu t dan gunakan persamaan gerak dan persamaan Poisson sehingga didapat:

$$\begin{aligned} \ddot{p} &= -\nabla \cdot \dot{j} = en_0 \nabla \cdot \dot{j} \\ &= -\frac{e^2 n_0}{m} \nabla \cdot E \\ &= -\frac{e^2 n_0}{m \epsilon_0} \rho \end{aligned} \quad (8.61)$$

atau

$$\ddot{p} = -\frac{e^2 n_0}{m \epsilon_0} \rho \quad (8.62)$$

Persamaan[8 62] adalah persamaan getaran dengan frekuensi getaran seperti ditulis persamaan[8.57].

Penurunan lebih jelas sebagai berikut. Jika muatan elektron yang mengisi elemen volume segiempat digeser sejauh x yang kecil dibandingkan dengan panjang sisi segi empat d , akan terdapat muatan ruang positif dan negatif, yang harga totalnya adalah sama dengan $Q = enFx$, seperti halnya muatan yang timbul pada plat kondensator yang berada di

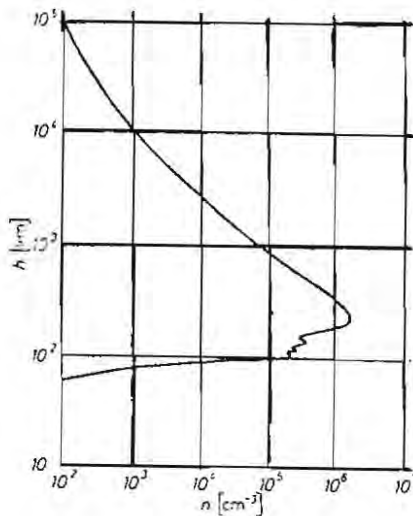
seberang plat lainnya. Tegangan yang terdapat di dalam "kondensator" tersebut tentunya $U = Q/C$. Dalam hal itu kapasitas $C = \epsilon_0 F/d$ sehingga $U = enFx/d$; $\epsilon_0 F = enxd/\epsilon_0$. Gaya yang bekerja pada setiap elektron

$$F = -eE = \frac{e^2 n}{\epsilon_0} x = -Dx \quad (8.63)$$

adalah sebanding dengan simpangan x , atau dengan perkataan lain disebut keadaan *kuasi elastik*. Getaran ini merupakan getaran harmonik dengan frekuensi sudut $\omega = \sqrt{D/m}$ atau frekuensi seperti dinyatakan persamaan [8.57].

Pada plasma yang mengalami ionisasi dengan baik dalam keadaan tekanan 10^{-2} torr n mempunyai harga sekitar 10^{10} cm^{-3} dan frekuensi plasma dapat mencapai sekitar 100 GHz. Dalam daerah ini dapat diamati adanya getaran plasma yang selalu disertai derau (*noise*), dan bahwa plasma tidak dapat dianggap sebagai generator frekuensi tinggi.

Getaran plasma seperti itu berguna untuk mempelajari *ionosfir* dan berperan mempelajari rambatan gelombang radio di ionosfir. Panjang gelombang pendek cahaya matahari (pada daerah pertengahan panjang gelombang ultraviolet hingga ke daerah sinar Roentgen lemah) kandungan atom atau molekul-molekul udara (O_2 , O, N_2 , dan di atas terdapat pula NO) akan mengalami ionisasi dan disosiasi dan adanya zone yang relatif mempunyai kerapatan lebih kecil (renggang) disebut lapisan D, E, F₁ dan F₂ dengan konsentrasi elektron dan ion n_e dan n_i . Setiap lapisan ini, yang mengamati proses ionisasi masing-masing, mempunyai kerapatan elektron n_e maksimum yang tajam terhadap distribusi ketinggian (gambar [8.42]). Adanya puncak maksimum dan ketajaman puncaknya disebabkan bahwa semakin tinggi hingga mencapai beberapa ribu km tempat tersebut, tidak terdapat atom atau molekul yang dapat mengalami ionisasi lagi (kerapatan partikel berkurang secara eksponensial terhadap tinggi), sementara beberapa puluh kilometer di bawahnya, komponen cahaya matahari yang dapat mengionisasi atom atau molekul telah melemah. Dengan demikian, pada siang hari khususnya, kerapatan elektron dapat mencapai 10^7 cm^{-3} dan pada malam hari, karena terjadinya proses rekombinasi, kerapatan elektron hanya tinggal 10^5 hingga 10^6 cm^{-3} . Kedua maksimum yang terdapat pada



Gambar 8.42 Kerapatan elektron di atmosfer sebagai fungsi dari ketinggian pada saat mengalami ionisasi "kual".

gambar[8.42] tentunya berhubungan dengan konsentrasi elektron-elektron tersebut. Sehubungan dengan persamaan[8.57], akan terdapat frekuensi plasma hingga mencapai beberapa MHz, tetapi harga frekuensi yang terletak di bawahnya dapat pula direalisasikan pada ketinggian tertentu.

Hal tersebut berpengaruh sangat drastis pada lalu-lintas gelombang radio (gelombang panjang, tengah, dan pendek) seandainya tanpa ionosfir hal ini tidak mungkin terjadi. Suatu gelombang radio dengan frekuensi f menjalar ke atas (ionosfir), dengan frekuensi plasma mempunyai harga yang mirip, yaitu dalam keadaan resonansi dengan elektron-elektron ionosfir. Akibatnya terjadi dispersi dan absorpsi (§10.5.2). Gelombang radio jika datang pada sudut yang besar akan mengalami refleksi total, persis dalam daerah frekuensi resonansi, yaitu pada $f = f_p$, bahkan juga jika jatuh secara tegak lurus yang memungkinkan terjadinya "echo dugaan" ionosfir. Gelombang panjang dan pendek (pada ketinggian 5 hingga 30 km yang masing-masing mempunyai panjang gelombang 10 hingga 20

m) mencapai daerah jangkauannya. Gelombang panjang melalui efek ruang hampa (§ 7.7.9) dan gelombang panjang melalui refleksi berkali-kali pada ionosfir. Sementara gelombang panjang dan tengah (20 hingga 5000 m) akan mengalami absorpsi kuat dan karena adanya interferensi antara gelombang yang direfleksikan secara langsung dan tidak langsung akan mengalami pelemahan. Hanya gelombang yang mempunyai frekuensi di sekitar maksimum, seperti gelombang ultra pendek, gelombang televisi radar akan menembus tanpa gangguan pada ionosfir sehingga komunikasi antara kendaraan angkutan (pesawat, mobil) dimungkinkan, kecuali jangkauan gelombang ultra pendek dan televisi dibatasi karena adanya "horizon optis".

Melalui percepatan listrik plasma dapat dihasilkan temperatur yang sangat tinggi. Dapat pula terjadi bahwa energi kinetik partikel bermuatan tidak "mengikutsertakan" energi kinetik partikel tidak bermuatan. "Keterikatan energetik" antarpartikel bermuatan adalah melalui medan sebagai media, yang lebih kuat dibandingkan dengan energi interaksi antara partikel bermuatan dan tidak bermuatan, yaitu energi yang timbul karena adanya tumbukan antarkeduanya. Plasma dapat menjadi beberapa bagian gas dengan temperatur yang berbeda-beda. Dalam hal ini pengertian temperatur harus diinterpretasikan secara hati-hati. Misalnya pada partikel *synchrotron* 30 GeV mempunyai energi yang sama dengan energi kinetik molekul-molekul gas pada 10^{14} K. Jika energi ini terdistribusi pada seluruh molekul-molekul gas atau hanya pada partikel-partikel bermuatan saja, energi ini akan menurun dengan drastis hingga beberapa orde pangkat sepuluh. Kepentingan penggunaan *plasma panas* secara teknis dalam merancang pembangkit tenaga melalui fusi nuklir akan dibicarakan dengan rinci pada § 13.1.8. Pada saat sekarang ini telah dapat diciptakan temperatur demikian tinggi hanya bisa diperoleh dalam waktu yang amat sangat singkat dan pada plasma yang "dicairkan" (kira-kira 10^{16}) partikel/cm³.

Soal-Soal § 8.1

8.1.1 Bagaimana bentuk persamaan Richardson karena sifat elektron di dalam zat padat tidak seperti yang dijelaskan mekanika klasik (distribusi Maxwell)?

8.1.2 Diagram Arrhenius merupakan "media" terpenting untuk mengevaluasi persoalan, mulai fisika hingga biologi, mengapa? Apa artinya titik potong garis lurus dengan sumbu ordinat pada diagram itu? Bagaimana titik tersebut dapat ditentukan jika hanya dilakukan pengukuran untuk daerah T yang sempit dan dengan ketepatan berapa? Bagaimana energi aktivasi dapat dibaca dengan cepat? Bergantung pada apa saja ketepatan pengukuran?

8.1.3 Dalam banyak proses yang dapat dijelaskan menurut hukum Arrhenius $Ae^{-E/RT}$, harga A dan E akan berubah jika menggunakan bahan dan kondisi yang bervariasi, bahkan sering dijumpai sedemikian, bahwa semua kurva garis lurus Arrhenius akan melalui satu titik, yaitu "titik inversi" (efek kompensasi). Bagaimanakah perubahan A dan E saling bergantung satu sama lain, agar ditemukan kasus seperti itu? Apa arti koordinat titik inversi? Bagaimana dapat dijelaskan asal titik tersebut?

8.1.4 Dalam berbagai reaksi kimia kecepatan reaksi kimia sering digambarkan sebagai fungsi yang sebanding dengan $e^{S/R}e^{-E/RT}$ (S , E , masing-masing adalah energi aktivasi dan energi per Mol). Berikan dasar pemikiran kinetis hal itu! Jika suatu atom dapat berada dalam dua keadaan (misalnya dalam keadaan bebas dan terikat) seringkali perbandingan konsentrasi atom dalam dua keadaan tersebut dituliskan melalui persamaan $\beta e^{S'/R}e^{-E'/RT}$. Mengapa? Apakah S dan S' , E dan E' masing-masing identik? Jika tidak dapatkah dikatakan besaran yang sama mempunyai harga terbesar?

8.1.5 Bagaimana efek fotolistrik dapat ditentukan konstanta Planck h dengan ketepatan yang baik? Bagaimana pula prosedur dan peralatan percobaan harus dirancang?

8.1.6 Dari frekuensi berapa semua bahan yang dinyatakan pada tabel[8.1] memungkinkan untuk efek fotolistrik?

8.1.7 Buatlah suatu "sistem lemari cahaya" untuk keperluan membuat pintu otomatis yang dapat dipakai untuk mencegah adanya pencurian di rumah Anda. Pilihlah sumber cahaya, geometri berkas cahaya, bahan katoda, tegangan anoda, galvanometer dan juga saklar pemberitahu (misalnya sirine).

8.1.8 Bagaimana kebergantungan tebal suatu pengembangan potensial di depan suatu permukaan logam kuat medan yang diberikan? Berapa besar probabilitas *tunneling* dan arus medan emisi yang terjadi? Pada medan apa efek tersebut dapat dilihat dengan jelas? Bagaimana bentuk mikroskop medan emisi dan apa saja yang dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop ini? Penyebab dan bagaimana mikroskop seperti ini dapat mencapai kemungkinan harga perbesaran terbesar yang dapat dicapai hingga saat ini?

8.1.9 Berapa besar tegangan yang harus diberikan antara dinoda-dinoda suatu multiplier sehingga dengan delapan tingkat dapat dicapai perbesaran hingga 10^8 (ramalkan)? Bagaimana cara terbaik untuk mengetahui arus anoda? Bagaimana bentuk saklar total? Peralatan apa yang diperlukan?

8.1.10 Ionisasi termis untuk kasus sederhana dapat dituliskan dalam reaksi $A = A^- + e^-$, Hukum pengaruh massa untuk reaksi ini adalah sesuai dengan persamaan Eggert-Saha, agar diperoleh relasi yang lebih baik dari persamaan[8.4] (yang hanya berlaku untuk ionisasi lemah) Dapatkah Anda berikan relasi yang lebih baik tersebut? Dalam hal tersebut akan Anda dapatkan mengapa reaksi sebanding dengan $E_i / 2kT$ bukan E_i / kT . Apakah terdapat aturan umum untuk itu? "Faktor berat" $(2\pi kT)^{3/2} h$ secara kuantum statistik dapat dimengerti dengan baik. Untuk dapat menjelaskan hal itu dengan baik, pelajari dengan seksama semua yang dijelaskan pada §17. Apakah peristiwa rekombinasi sesungguhnya tidak hanya mungkin dengan proses tiga tumbukan? Apakah hingga saat ini peristiwa tersebut telah mendapat perhatian?

8.1.11 Derajat ionisasi berdasarkan persamaan[8.4] bergantung pada T

dan p . Bagaimana bentuk diagram p , T batas antara keadaan netral dan ionisasi dari atom-atom? Sifat-sifat atom apa saja yang memegang peran penting untuk menentukan keadaan tersebut? Apakah akan diperoleh diagram yang mirip untuk menjelaskan peristiwa disosiasi molekul? Diskusikan peristiwa disosiasi dan ionisasi pada bintang-bintang, berkas cahaya, sinyal, kilatan (*blitz*), materi antarbintang.

Soal-Soal § 8.2

8.2.1 Pada persamaan [8.10] tidak terdapat massa dan muatan partikel. Walaupun demikian, proton dan elektron akan dibelokkan pada arah yang berbeda. Bagaimana hal tersebut dapat dijelaskan?

8.2.2 Roket ion. Menggunakan ion positif (ion apa?), ion dipercepat (dengan cara bagaimana) dan setelah disatukan dengan elektron-elektron (mengapa?) terjadi ledakan. Diskusikan kecepatan pancaran aliran keluar roket, penggunaan energi, jalur penerbangan, dan lain sebagainya. Apakah energi matahari dapat diambil sebanyak mungkin dan perlukah dibangun reaktor nuklir? Buatlah rencana penerbangan ruang angkasa. Bandingkan dengan roket termis dan roket nuklir?

8.2.3 Dari sumber radiasi muncul partikel bermuatan, semuanya mempunyai sifat yang sama. Untuk mempelajarinya gunakan sebuah kondensator plat dengan jarak 0,3 cm dan panjang sisi 3 cm dan berikan tegangan sebesar 10 kV. Dalam hal itu partikel bermuatan dapat dibelokkan dengan sudut sekitar 1° . Kemudian buat lilitan dari kawat tembaga dengan tebal 0.5 mm pada sebuah benda berbentuk silinder, dengan diameter bagian tengah 3 cm dan bagian luar 5 cm, tanpa menggunakan inti besi. Pada kumparan alirkan arus searah sebesar 8 A dan tempatkan sebuah kutub sangat dekat dengan kondensator maka partikel akan bergerak dengan lintasan membentuk garis lurus kembali melalui kondensator. Berapa besar tegangan pada kumparan? Apa yang dapat diramalkan tentang partikel (jenis partikel)? Apakah harus dilakukan perhitungan

secara relativistik?

8.2.4 Apakah massa, muatan, dan kecepatan partikel dapat ditentukan hanya dari pembelokannya di dalam medan listrik saja atau magnet? Atau harus dilakukan kombinasi keduanya atau diperlukan sesuatu yang lain? Buatlah ramalan tersebut untuk partikel α , β bahwa partikel λ tidak terdiri atas partikel tersebut!

8.2.5 Pada suatu osilograf tegangan penyangga pada plat pembelok x ditentukan berharga tertentu. Berapa besar tegangan pada plat pembelok x dan y untuk menggambarkan pola lingkaran, elips dengan eksentrisitas berbeda dan garis miring? Apakah dapat digambarkan pola dengan perbesaran 8 hingga ∞ ? Bagaimana gambar pola akan berubah jika tegangan anoda dibuat sama pada plat x dan y ?

8.2.6 Apa yang diperlukan pada tabung pesawat televisi (*pixel* gambar, frekuensi *pixel*, pengaturan terang gelap atau kontras gambar) dan apakah optika elektron untuknya dapat direalisasi? Apakah terdapat batasan elektron untuk dapat jatuh pada layar dengan baik? Berapa jauh jarak layar harus ditempatkan untuk itu?

8.2.7 Bagaimana bentuk parabola Thomson yang tergambar, jika berkas yang digunakan; a) berkas sinar katoda, b) berkas sinar β , yang berasal dari unsur radioaktif?

8.2.8 Sebuah "parabola" Thomson yang tergambar berkat medan E dan B yang sangat cepat dan di dekat daerah lengkungan (puncak parabola) tidak begitu bundar seperti bentuk lengkungan parabola sebenarnya, melainkan mempunyai kecenderungan membentuk puncak yang tajam. Bagaimana hal tersebut dapat terjadi dan apa yang dapat disimpulkan dari bentuk tersebut?

8.2.9 Teori koefisien rekombinasi β . Berikan dasar hubungan $\beta = v S$ ($v \equiv$ kecepatan termis $S \equiv$ penampang lintang "penangkapan"). Jelaskan dengan lebih rinci interaksi karakteristik yang digambarkan melalui besaran S . Berapa jarak terdekat paling tidak jarak antara dua ion bermuatan saling berlawanan agar masing-masing saling menangkap sehingga dapat terjadi

netralisasi muatan? *Keyword:* Hubungan antara E_{kin} dan E_{pot} . Bagaimana hubungan S dan β terhadap temperatur dan tekanan? Apakah harga β yang disebutkan pada §8.2.10 dapat dicapai? Apakah semua pengandaian teori sederhana ini selalu terpenuhi, khususnya tentang berlangsungnya proses penangkapan?

Soal-Soal § 8.3

8.3.1 Diskusikan persamaan karakteristik pada persamaan[8.55] untuk berbagai kasus ($\lambda > 1$, $\lambda < 1$). Nyatakan I dalam α , kemudian dengan menggunakan persamaan[8.35] hitungan dalam E . Perhatikan pula syarat atau kondisi berlakunya penambahan.

8.3.2 Berikan penjelasan atomik aturan Paschen, untuk kasus wadah berisi gas penuh dan bahan elektroda diketahui, tegangan pembangkit bilik pelepas muatan hanya bergantung pada hasil kali tekanan dan jarak antar-elektroda. Gunakan pengertian kuat medan dan jalan bebas rata-rata.

8.3.3 Bagaimana bentuk mekanisme proses pelepasan muatan kilat? Apakah merupakan percikan api, suatu proses pelepasan muatan nyala api dalam pengertian yang telah dijelaskan di atas? Bagaimana proses terjadinya cahaya yang terjadi di dalam kamar gelap jika dilihat di balik baju nilon? Pengaruh apa yang terjadi pada rambut karena cuaca, seperti halnya bahan kemeja? Sol sepatu tertentu (misalnya dibungkus dengan kain *kreps*) mempunyai sifat bahwa pemakainya setelah beberapa saat menari-nari solo dapat menyala jika dialirkan gas (jika diberi gas pada jarak 1 cm). Jelaskan mengapa hal ini dapat terjadi? (Jelaskan secara kuantitatif berikut dasar-dasarnya).

8.3.4 Mengapa terjadi *kilatan cahaya polar* pada ketinggian sekitar 100 km?

8.3.5 Bagaimana dapat Anda turunkan ukuran tegangan "pemutus" melalui lapisan tipis udara (tebal dalam order mm hingga cm)? (Petunjuk. Dalam penurunan harus muncul pengertian kuat medan dan jalan bebas rata-rata). Untuk keperluan praktis apa tegangan "pemutus" berguna? Bagaimana dapat dijelaskan bahwa aliran lampu listrik 220 V mengalami hubung-singkat menyebabkan terjadinya nyala api yang cukup lama di udara (jika suatu kawat tipis terkena olehnya bahkan dapat menjadi cair hampir sepanjang 1 cm, sebelum proses pelepasan muatan terhenti).

8.3.6 Apa yang terjadi, jika sebuah tahanan depan suatu rangkaian yang mengandung kurva karakteristik pelepasan muatan yang menurun salah dibaca atau salah mengartikan ukuran dimensinya atau jika dihubungkan paralel? Apakah dapat diberikan penjelasan secara kualitatif untuk kasus penurunan kurva karakteristik?

8.3.7 Diketahui sebuah tabung sinar katoda. Buatlah rumusan perhitungan harga e/m yang cukup tepat untuk menyimpulkan ion apa yang terdapat (sedapat mungkin dengan ketepatan yang baik). Apakah muatan dapat dibelokkan secara elektris atau magnetis? Atau mungkinkah melalui kombinasi keduanya? Besaran penolong apa saja yang harus Anda ketahui dan mengukurnya?

8.3.8 Berapa derajat ionisasi yang sesuai dengan konsentrasi elektron $n \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ pada tekanan 10^{-2} torr ? Berapa frekuensi plasma di fotosfir matahari, yang terdapat kerapatan gas sekitar 10^{-2} g/cm^3 (hidrogen) untuk keadaan ionisasi sempurna? Berapa frekuensi plasma yang akan diperoleh pada semikonduktor (n antara 10^{12} hingga 10^{20} cm^{-3}) dan logam (n antara 10^{21} hingga 10^{23} cm^{-3})? Apakah terdapat hubungannya dengan optik?

8.3.9 Tempatkan suatu tabung sinar katoda misalkan pada layar klasik (gambar[8 40]) di dalam medan magnet. Dengan demikian, tidak hanya pola gambar lingkaran yang mengalami pergeseran, juga menjadi kabur, walaupun di dalam medan homogen. Apa yang dapat Anda jelaskan tentang hal itu?

8.3.10 Sinar katoda dapat menggerakkan sebuah kipas angin mini, bandingkan dengan cahaya. Apakah hal itu terjadi karena pengaruh langsung sinar katoda atau tidak langsung, misalnya karena efek termis?

8.3.11 Roket foton Berapa ukuran temperatur plasma yang mungkin agar dapat menimbulkan tenaga dorong dalam ukuran yang menarik sebuah roket foton? Diskusikan sejauh mana hal ini dapat dicapai, pencerminan dan pelindung radiasi seperti sumber energi.

titik dapat difokuskan pada satu titik; persis seperti kejadian berkas cahaya pada lensa (cembung). Dengan adanya pengetahuan tentang kelakuan berkas elektron di dalam medan listrik dan magnet demikian, muncul

Bagian IV

Optika Geometri dan

Gelombang

Bab 9

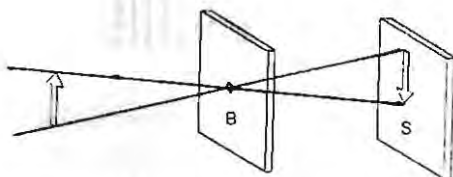
Optika Geometri

9.1 Refleksi dan Pembiasan

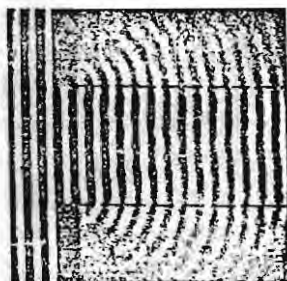
9.1.1 Lintasan Cahaya: Garis Lurus

Analog dengan ion dan elektron, gelombang cahaya tampak mempunyai panjang gelombang lebih pendek. Oleh karena itu, merupakan fenomena ukuran mikro. Pada semua percobaan terbukti bahwa cahaya cenderung merambat membentuk lintasan garis lurus. Kenyataan itu membuat pengukuran besaran-besaran astrofisika dan geodesi lebih eksak. Di dalam laboratorium peristiwa rambatan cahaya dengan lintasan garis lurus dapat dibuktikan dengan menggunakan *bilik berlubang*. Pada sebuah dinding dibuat lubang β dan di belakang dinding diletakkan berturut-turut dari dinding sebuah sumber cahaya dan sebuah benda, misalnya berbentuk panah (gambar[9.1]). Setelah cahaya dilewatkan pada benda dan diteruskan lewat lubang, bayangan yang jatuh layar S adalah terbalik. Bayangan tersebut akan semakin jelas jika lubang dibuat semakin sempit. Pada setiap titik P pada benda berhubungan dengan "noktah" melingkar, yaitu sebagai potongan permukaan "kerucut cahaya" yang berasal dari titik P , melintasi celah terbatas B dan akhirnya menuju ke S . Berdasarkan sifat geometri, "noktah" melingkar ini akan semakin kecil jika ukuran B semakin kecil. Suatu percobaan yang mengacu untuk membuat noktah-noktah menjadi

titik, yaitu dengan cara mengecilkan ukuran B , menunjukkan bahwa jika harga B telah melampaui suatu ukuran terkecil, bayangan di S kan menjadi kabur kembali. Hal ini terjadi bukan karena alasan intensitas cahaya yang melemah, melainkan karena kerucut cahaya setelah melewati B akan melebar. "Hamburan" cahaya ini (lihat §10.2) adalah karena sifat alamiah gelombang cahaya sendiri. Jika ingin didefinisikan apa sebenarnya cahaya, orang tidak akan mengatakan "kerucut cahaya dengan sudut puncak tertentu" karena kenyataannya cahaya demikian tidak ada. Apa yang terdapat sebenarnya hanya bundel cahaya dengan ukuran tertentu. Berkas cahaya adalah energi yang merambat, dibawa oleh gelombang cahaya yang terdapat di dalam bundel. Lintasan cahaya selalu tegak lurus di mana saja, selain di dalam medium kecepatan rambat cahaya tidak bergantung pada arah rambatannya (lihat pada hamburan ganda, §10.3.3.).

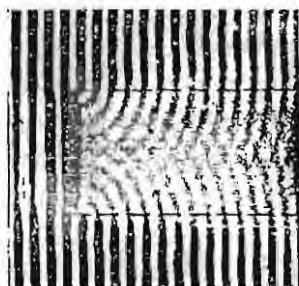


Gambar 9.1 Efek bilik berlubang



Gambar 9.2 Sebuah lubang memotong gelombang cahaya datar menjadi bundel cahaya; semakin kecil ukuran lubang, semakin kecil pula panjang gelombang cahaya yang lewat celah tersebut. Jika panjang gelombang cahaya tidak lebih kecil dari ukuran celah, hamburan akan semakin besar. Oleh karena itu, dapat terlihat adanya bayangan. [R.W. Pohl, dari H.-U. Harten]

Untuk keperluan yang luas rambatan gelombang cukup digambarkan melalui bentuk lintasannya dan pada jarak cukup jauh dari sisi celah, di dalam medium homogen, cahaya membentuk lintasan garis lurus. Daerah bahasan yang dapat memenuhi gambaran tentang rambatan cahaya seperti di atas disebut *optikal geometri* atau optikal berkas cahaya.



Gambar 9.3 Sebuah celah berukuran besar dibandingkan dengan panjang gelombang cahaya, akan terjadi bayangan gelap yang tajam. Gambaran hamburan dapat diamati di belakang celah, juga dapat diamati adanya interferensi gelombang yang datang dan yang direfleksikan [R.W. Pohl, dan H.-U Harten].

9.1.2 Hukum Refleksi: Pembentukan Bayangan pada Cermin

Seberkas cahaya datang pada sebuah permukaan datar (cermin) yang memisahkan dua medium (gambar[9.4]), sebagian cahaya atau bahkan seluruhnya akan mengalami refleksi pada permukaan tersebut. Berkas cahaya yang direfleksikan bersama-sama berkas cahaya datang akan terletak pada satu bidang datar beserta "garis" normal N bidang datar. Garis normal tersebut melalui titik O , titik tempat cahaya datang dan direfleksikan, yaitu terletak di permukaan cermin S . Cahaya datang membentuk sudut $\angle AON = \alpha$ dan direfleksikan melalui sudut yang sama besar, yaitu $\angle NOA' = \alpha'$ maka berlaku:

$$\alpha' = \alpha' \quad (\text{Hukum Refleksi}) \quad (9.1)$$

sehingga sudut $AOA' = 2\alpha'$.

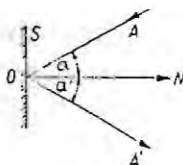
Jika cermin dirotasikan hingga membentuk sudut β terhadap sudut berkas cahaya datang (gambar[9.5]), sudut berkas cahaya datang juga akan mengalami rotasi sebesar β sehingga sudut antara AOA_2' menjadi:

$$2(\alpha + \beta) = 2\alpha + 2\beta$$

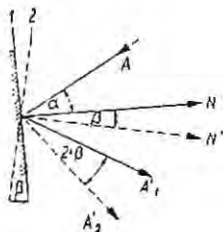
Hal ini berarti bahwa cahaya yang direfleksikan akan mengalami rotasi terhadap cahaya datang sebesar dua kali *sudut rotasi* β . Cara seperti itu berguna untuk mencari besarnya sudut yang kecil, misalkan pada *galvanometer cermin*.

Hukum refleksi mengatakan bahwa semua berkas adalah *bundel cahaya* yang berasal dari sumber titik L (*bundel homocentris*) yang setelah mengalami refleksi di permukaan cermin datar seolah-olah berasal dari titik L' yang terdapat di belakang cermin dan berjarak sama dengan jarak benda terhadap L (gambar[9.6]) Apabila berkas yang direfleksikan tertangkap oleh mata, berkas ini seolah homocentris dan berasal dari sebuah titik L' yang terdapat di belakang cermin. Titik L' ini dapat diperoleh dengan cara memperpanjang "garis" berkas cahaya yang direfleksikan ke belakang cermin. Dengan demikian, pengamat akan melihat *bayangan sumber cahaya virtual* di L' atau disebut juga bayangan virtual.

Refleksi cahaya pada cermin dengan permukaan cekung: cahaya yang berasal dari sumber titik juga akan mengalami hal yang serupa, yaitu jika berkas cahaya datang berjarak tidak terlalu jauh.

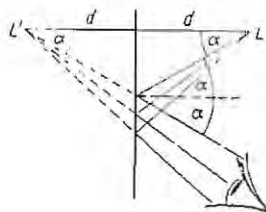


Gambar 9.4 Refleksi berkas cahaya pada cermin datar



Gambar 9.5 Dengan merotasikan cermin berkas cahaya yang direfleksikan akan mengalami rotasi sebesar dua kali sudut rotasi

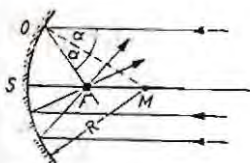
Cermin yang paling banyak gunanya adalah *cermin cekung berbentuk bola* (gambar[9.7]). M adalah titik pusat bola cermin; titik S disebut *puncak busur*; MS adalah *sumbu utama*. Paralel terhadap sumbu utama terdapat berkas cahaya paralel pada cermin. Semua berkas cahaya yang datang paralel dan mengenai permukaan cermin akan direfleksikan



Gambar 9.6 Bayangan yang dibentuk oleh cermin datar

sedemikian rupa sehingga melewati titik antara M dan S (pendekatan) yaitu di titik F , yang disebut titik api atau *fokus*.

Dasar: Jari-jari MO merupakan garis tegak lurus terhadap titik O ; sudut cahaya datang α adalah sama dengan sudut refleksi MOF dan sama dengan sudut OMF yaitu sebagai sudut dalam berseberangan dari dua garis sejajar. Menurut hukum refleksi seharusnya segitiga MOF adalah segitiga samakaki sehingga $FO = MF$. Jika terdapat titik F pada sumbu utama,



Gambar 9.7 Titik fokus sebuah cermin cekung (gambar terletak jauh tak berhingga dari pada sumbu cermin).

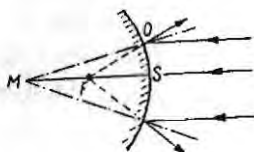
melaluinya semua berkas cahaya yang direfleksikan dilewatkan, titik tersebut haruslah memotong dua bagian sama besar MS sehingga untuk berkas yang hampir aksial berlaku $FO = FS$. Perhitungan lebih eksak adalah sebagai berikut.

Dari segitiga samakaki MOF diketahui bahwa

$$\cos \alpha = \frac{OM/2}{FM} = \frac{R/2}{FM}$$

berarti

$$FM = \frac{R}{2 \cos \alpha} = \frac{R}{2 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} \quad (9.2)$$



Gambar 9.8 Titik fokus cermin cembung

Jika α berharga kecil, berdasarkan rumusan binomial dapat dibuat deret sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 FM &= \frac{R}{2} (1 - \sin^2 \alpha)^{1/2} \\
 &= \frac{R}{2} \left(1 + \frac{\sin^2 \alpha}{2} + \frac{3}{8} \sin^4 \alpha + \dots \right) \\
 &\approx \frac{R}{2} \left(1 + \frac{\alpha^2}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{9.3}$$

Jarak SF disebut titik api atau fokus f cermin cekung.

$$f = \frac{R}{2} \tag{9.4}$$

Untuk *cermin cembung* (gambar[9.8]) berlaku pula definisi-definisi pada cermin cekung, seperti titik puncak busur, titik pusat lengkungan bola cermin, dan titik fokus. Jika dua berkas cahaya paralel jatuh di permukaan cermin cembung, berkas-berkas tersebut akan direfleksikan seolah berasal dari titik M , S , dan F yang terdapat di belakang cermin. Titik fokus yang tidak pernah tersentuh berkas cahaya tersebut disebut sebagai titik *fokus virtual* dan ditulis dengan tanda negatif $f = -R/2$.

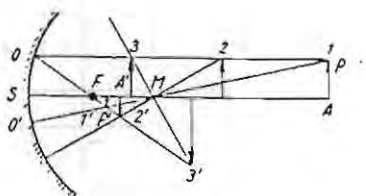
Dua berkas cahaya paralel dapat dianggap berasal dari suatu sumber titik berjarak tak terhingga. Titik fokus merupakan "bayangan" titik tersebut, bahkan pada cermin cembung merupakan bayangan virtual titik tersebut. Cahaya yang datang akan direfleksikan pada titik fokus, berlaku sebagai "layar" untuk menangkap bayangan gambar.

Jika berkas cahaya datang tidak persis paralel, berkas-berkas tersebut, sebagai pendekatan, dapat dianggap berpotongan pada suatu titik.

Hukum Pembentukan Bayangan pada Cermin Cekung

Untuk menggambarkan bayangan sebuah anak panah yang terletak di titik A cukup dibuat dua berkas cahaya dari puncaknya (gambar[9.9])

1. berkas cahaya yang sejajar sumbu utama akan direfleksikan melalui titik fokus F ;
2. berkas cahaya yang melalui titik pusat cermin bola M , yaitu berkas



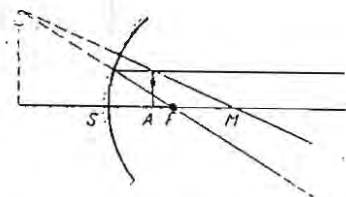
Gambar 9.9: Bayangan real yang terbentuk pada cermin cekung 1', 2' dan 3' yaitu masing-masing merupakan bayangan dari 1, 2 dan 3.

PM. Berkas ini akan jatuh tegak lurus di permukaan cermin, di titik O' dan akan direfleksikan melalui lintasan yang sama. Titik P terdapat pada benda, juga sebagai titik potong dua garis OF dan $O'M$

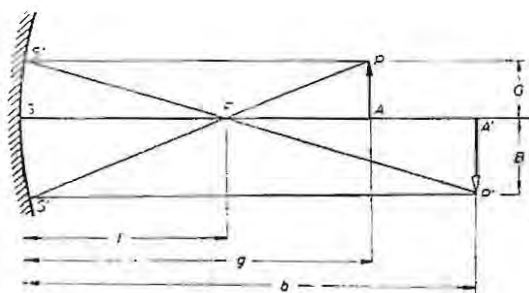
3. selain itu, dapat pula dibuat berkas ketiga, yaitu berkas yang melalui PF . Berkas ini akan direfleksikan oleh cermin sejajar sumbu utama. Dengan demikian, bayangan dapat dibuat melalui setiap titik antara A dan P . Dari titik yang berada di seberang AP pada posisi 1 (berkas melalui titik pusat M) akan diperoleh bayangan terbalik dan diperkecil $A'P'$ yang terletak antara titik fokus F dan titik pusat M . Jika benda AP didekatkan ke titik M , bayangan yang terbentuk juga akan mendekati titik M , seperti terlihat pada gambar[9.9]. Akan tetapi, bayangan menjadi diperbesar. Jika benda diletakkan di tempat yang cukup jauh, bayangannya akan terletak di titik fokus F . Jika benda diletakkan antara puncak busur cermin S dan titik fokus F , bayangan akan terletak di balik cermin atau dengan perkataan lain disebut *bayangan virtual*. (lihat gambar[9.10]).

Hubungan jarak benda $A'S = b$, jarak bayangan $AS = g$ dan fokus f dapat ditulis sebagai:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (\text{Persamaan bayangan}) \quad (9.5)$$



Gambar 9.10 Bayangan virtual yang terbentuk pada cermin cekung dan terdapat antara cermin dan titik fokus



Gambar 9.11 Gambaran untuk mendapatkan bayangan pada cermin cekung

Selanjutnya terdapat pula hubungan antara $A'P' = B$ dan $AP = G$ yang disebut *perbesaran*:

$$\frac{B}{G} = \frac{f}{g - f} \quad (9.6)$$

Hubungan itu akan diperoleh jika bayangan dicari dengan menggunakan berkas cahaya PFS' yang direfleksikan menjadi berkas $S'P'$ (gambar[9.11]). Kesamaan segitiga APF dan $SS'F$ akan menghasilkan relasi persamaan[9.6]. Di samping itu, berkas paralel P yang berubah menjadi

berkas $S''FP'$, dengan mencari kesamaan segitiga $SS''F$ dan $A'P'F$ akan menghasilkan hubungan:

$$\frac{B}{G} = \frac{b-f}{f} \quad (9.7)$$

Dengan membandingkan persamaan [9.6] dan [9.7] didapat

$$\frac{f}{g-f} = \frac{b-f}{f}$$

atau

$$f^2 = (g-f)(b-f) = gb - (g+b)f + f^2$$

sehingga

$$gb = (g+b)f$$

atau

$$\frac{1}{f} = \frac{g+b}{gb} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

Persamaan terakhir tidak lain adalah persamaan bayangan (persamaan [9.5]).

Jika selain g dan b diambil jarak lain g' terhadap puncak busur cermin dan b' terhadap titik fokus, diperoleh bahwa:

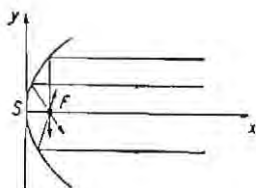
$$g = g' + f \quad b = b' + f$$

dan persamaan [9.5] dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$g'b' = f^2 \quad \text{Persamaan bayangan Newton} \quad (9.8)$$

Peran cermin dalam menayangkan bayangan suatu titik yang terdapat pada benda adalah merefleksikan semua berkas cahaya yang melalui setiap titik pada benda seperti itu sehingga semua berkas refleksi akan saling memotong pada suatu titik, yaitu titik bayangan. Dari hukum refleksi diketahui bahwa sudut cahaya datang dan sudut cahaya yang direfleksikan tidak dapat dibedakan sehingga dengan dasar kedua sudut tersebut interpretasi tentang arah rambatan gelombang cahaya tidak dapat dilakukan. Dengan dasar tersebut dapat dikatakan bahwa berkas lintasan cahaya dapat dibalik. Hal ini berarti pula bahwa posisi benda dan bayangannya dapat saling dipertukarkan. Berdasarkan persamaan bayangan dapat pula dikatakan bahwa jarak benda dan bayangan dapat saling dipertukarkan. Selanjutnya, dapat dibuktikan bahwa jarak bayangan adalah sama dengan titik fokus cermin tersebut, yaitu jika benda terletak di tempat tak berhingga ($g = \infty$). Bayangan benda yang terletak di tempat tak berhingga akan terdapat di titik fokus. Jika sumber cahaya terletak di titik fokus, berkas cahaya setelah direfleksikan cermin akan sejajar terhadap sumbu utama.

Lensa cekung sferis (bola) hanya akan menghasilkan bayangan berupa titik, yaitu jika digunakan berkas cahaya yang jatuh sangat dekat dengan sumbu optik dan sudut divergensi berkas cahaya tersebut, β berharga sangat kecil. Untuk berkas yang terletak di luar ("berkas pinggir") fokus akan mempunyai harga lebih kecil dari $R/2$; dengan bundel cahaya yang cukup lebar akan dapat diperoleh "bayangan titik" juga, yaitu sebagai bayangan sebuah sumber cahaya berbentuk titik yang terletak di tempat berhingga. Kesalahan bayangan *aberasi sferis* ini dapat ditingkatkan dengan menghilangkan perlahan-lahan berkas pinggir.



Gambar 9.12 Cermin parabola

Cermin berbentuk parabola kosong (gambar[9.12]) yang memenuhi persamaan parabola $y = 2px^2$,¹⁾ berkas sejajar yang jatuh pada cermin tidak bergantung pada jarak bayangan di titik fokus F , sementara jarak puncak parabola sama dengan parameter parabola, yaitu $p/2$.

9.1.3 Hukum Pembiasan

Cahaya jatuh pada bidang batas vakuum-medium dengan *sudut datang* α_1 terhadap "garis" normal bidang batas; sebagian cahaya direfleksikan kembali ke vakuum dan sebagian lagi akan diteruskan (*dibiaskan*) ke dalam medium dengan sudut bias α_2 terhadap "garis" normal (gambar[9.13]). Untuk ini berlaku hukum Snellius²⁾:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n \quad (9.9)$$

n disebut *indeks bias* (bilangan bias) medium. Untuk cahaya dengan warna (panjang gelombang) tertentu indeks bias tersebut merupakan harga konstanta.

Jika cahaya datang pada bidang batas antara medium 1 (indeks bias n_1) dan dibiaskan ke dalam medium 2 (indeks bias n_2), berlaku hukum pembiasan:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (9.10)$$

¹⁾Dalam matematika diketahui bahwa jika persamaan parabola dirotasi, akan terdapat paraboloida.

²⁾Rumusan ini berasal dari W. Snel Van Royen (1581-1626), dinamakan juga hukum Rene Descartes yang juga menemukan rumusan serupa di samping Snel.

atau

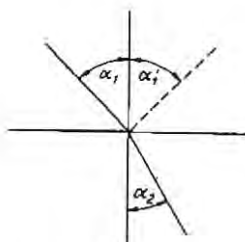
$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

Indeks bias vakuum adalah sama dengan 1.

Pada §4.3.3 telah ditunjukkan adanya hubungan antara pembiasan cahaya di dalam dua medium dengan kecepatan cahaya pada masing-masing medium c_1 dan c_2 :

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (9.11)$$

Berarti pula bahwa indeks bias suatu medium adalah sama dengan perbandingan antara indeks bias cahaya di dalam vakuum dengan medium yang bersangkutan: $n = c \text{ cm}$.



Gambar 9.13 Pembiasan berkas cahaya pada dua medium

Tabel[9 1] menunjukkan harga indeks bias beberapa bahan pada temperatur 20°C untuk cahaya yang berasal dari lampu natrium ($\lambda = 5890 \text{ \AA}$).

Medium yang mempunyai indeks bias besar dibandingkan dengan medium lainnya masing-masing disebut sebagai medium *optis lebih rapat* dan medium *optis lebih renggang*.

Di dalam medium yang mempunyai indeks bias berubah-ubah di setiap tempat di dalamnya, medium akan membelokkan cahaya dengan lintasan melengkung (bergantung pada distribusi indeks biasnya terhadap jarak).

9.1.4 Prinsip Fermat

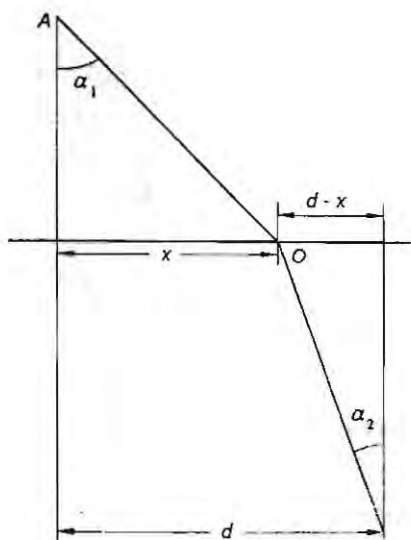
Hukum pembiasan cahaya dapat pula diturunkan dengan menggunakan prinsip ekstrimal (mencari harga ekstrim maksimum atau minimum) sebagai berikut. Cahaya merambat dari titik A ke B cenderung akan melintasi AB terpendek (gambar[9.14]).

TABEL 9.1 INDEKS BIAS BEBERAPA BAHAN PADA TEMPERATUR 20°C UNTUK $\lambda = 5890 \text{ \AA}$

Bahan	n
Udara pada 760 torr	1,000272
Air	1,33
Bensol	1,501
Hidrogen Sulfida	1,628
Intan	2,417
Garam Batu	1,544
Gelas Kron (BK 1)	1,510
Gelas Flint (F3)	1,501

Misalkan cahaya merambat dari titik A ke O mempunyai kecepatan c_1 dari O ke B merambat dengan kecepatan c_2 waktu total yang diperlukan cahaya untuk melintasi jarak AOB adalah $T = OA/c_1 + OB/c_2$. Titik pertengahan O terletak pada sejauh x dari titik acuan (gambar[9.14]) sehingga waktu total dapat ditulis kembali sebagai fungsi x , yaitu:

$$T(x) = \frac{OA}{c_1} + \frac{OB}{c_2} = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(d-x)^2 + b^2}}{c_2}$$



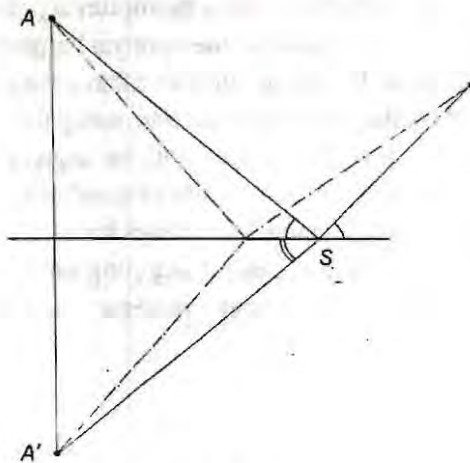
Gambar 9.14 Penurunan hukum Snellius dengan menggunakan prinsip Fermat dan mempunyai harga minimum jika

$$\frac{dT(x)}{dx} = 0$$

atau

$$\begin{aligned} & \frac{x}{c_1 \sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{d-x}{c_2 \sqrt{(d-x)^2 + b^2}} = 0 \\ & = \frac{x}{c_1 AO} - \frac{d-x}{c_2 OB} \\ \text{atau} & = \frac{\sin \alpha_1}{c_1} - \frac{\sin \alpha_2}{c_2} = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$



Gambar 9.15 Cahaya yang dibiaskan di dalam suatu medium cenderung akan melintasi lintasan terpendek antara titik A dan B

Hukum refleksi juga memenuhi pernyataan bahwa berkas cahaya yang merambat dari A ke B melewati cermin akan menempuh waktu tersingkat (karena baik cahaya datang maupun cahaya yang direfleksikan terletak pada medium yang sama maka akan mempunyai lintasan terpendek) ditunjukkan gambar[9.15]. Lintasan ASB adalah persis sama dengan $A'SB$. Lintasan $A'SB$ mempunyai harga minimal jika merambat menurut garis lurus dan jika semua sudut yang ada pada gambar[9.15] adalah sama.

Hasil kali antara indeks bias medium dan lintasannya di dalam medium disebut *lintasan cahaya* (lintasan optis).

Kedua hal yang dibahas di atas menghasilkan pernyataan yang berlaku untuk kasus khusus prinsip Fermat.

Paling tidak terdapat satu lintasan cahaya yang merambatkan antara dua titik di dalam medium yang sama ataupun berbeda, dibandingkan dengan lintasan cahaya lainnya, mempunyai harga ekstrimum.

Dari sudut pandang optika gelombang, prinsip Fermat mempunyai arti

bahwa lintasan yang ditempuh cahaya mempunyai jumlah harga panjang gelombang ekstrimum (kebanyakan mempunyai harga ekstrim minimum).

Pada pembentukan bayangan, berkas cahaya yang datang dari suatu titik yang terletak pada benda dan setelah mengalami pembiasan atau refleksi akan bertemu di suatu titik, yaitu titik bayangan dan menurut prinsip Fermat lintasan yang dibentuk berkas cahaya tersebut haruslah berlangsung dalam waktu sama atau panjang lintasannya haruslah sama. Pada setiap berkas cahaya terdapat panjang gelombang yang sama, berarti pula bahwa gelombang cahaya yang membentuk bayangan pada suatu titik haruslah mempunyai fase yang sama.

9.1.5 Refleksi Total

Cahaya yang datang dari medium optis lebih rapat ke medium optis kurang rapat ($n_2 < n_1$ (lihat gambar[9.16])) akan dibelokkan menjauhi bidang normal. Jika sudut cahaya datang adalah α_T dan cahaya yang dibiaskan membentuk sudut 90° , berlaku hukum pembiasan sebagai berikut.

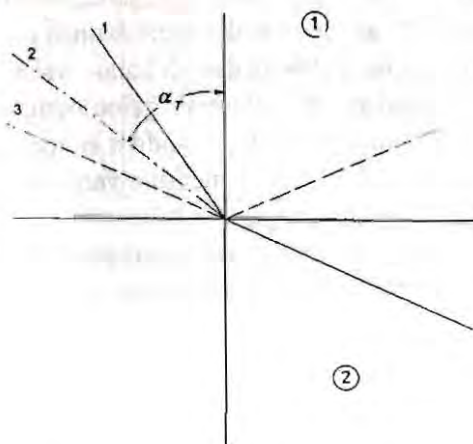
$$\frac{\sin \alpha_T}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$$

atau

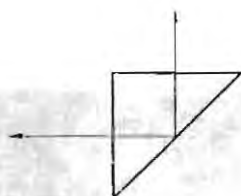
$$\sin \alpha_T = \frac{n_2}{n_1} \quad (9.12)$$

Apabila harga sudut batas α_T terlampaui, pembiasan cahaya pada medium kurang rapat tidak lagi dimungkinkan. Oleh karena itu, semua cahaya akan direfleksikan pada permukaan batas (*refleksi total*). lihat §9.1.6.

Misalkan berkas cahaya dari ruang vakuum jatuh pada permukaan hipotenusa (alas) sebuah prisma sama sisi (gambar[9.17]) dengan sudut datang 45° . Indeks bias gelas $n = 1,5$, $\sin \alpha_T = 1/1,5$ atau $\alpha_T = 41^\circ$. Dalam hal itu sudut datang lebih besar dari sudut batas refleksi total. Oleh karena



Gambar 9.16 Refleksi total. Berkas 2 jatuh pada sudut batas refleksi total



Gambar 9.17 Prisma sama sisi sebagai refleksi total

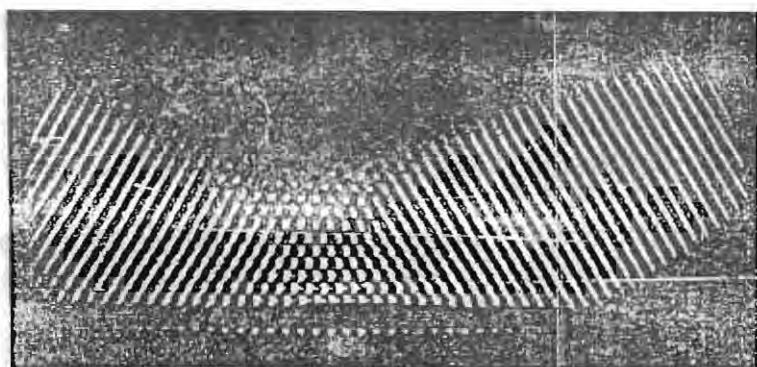
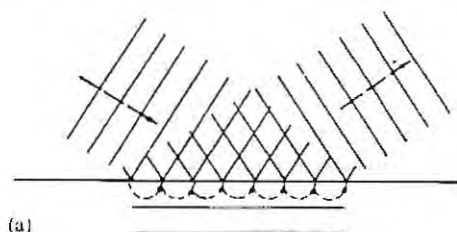
itu, cahaya tidak mungkin diteruskan melewati permukaan hipotenusa prisma; semua cahaya akan diteruskan melewati dua sisi prisma lainnya. Prisma perrefleksi total ini berguna untuk berbagai peralatan optik.

Pengukuran sudut batas refleksi total berguna untuk peralatan optis, misalnya pada *reflektometer total* yang berguna menentukan indeks bias suatu bahan, khususnya zat cair, dengan cara melewatkan cahaya dari medium gelas yang telah diketahui indeks biasnya ke cairan.

9.1.6 Rambatan Gelombang Cahaya di dalam Medium Reflektor Total

Pada metode pengamatan yang lebih presisi dapat diketahui

keterbatasan optika berkas sinar. Cahaya dilewatkan melalui gelas dan masuk ke dalam medium optis lebih renggang, misalkan dari gelas ke larutan yang dapat berfluoresensi maka dapat diamati peristiwa fluoresensi, berarti pula cahaya dapat melewati daerah batas, walaupun hanya sedikit. Fenomena ini merupakan sifat alamiah gelombang cahaya. Di dalam medium optis lebih renggang terdapat sedikit energi cahaya datang dan cahaya yang digunakan tidak untuk medium yang dapat berfluoresensi). Gambar[9.18a] mengilustrasikan lintasan cahaya pembawa energi; amplitudo cahaya akan mengalami penurunan secara eksponensial sebanding dengan kedalaman (jarak) dalam orde panjang gelombang



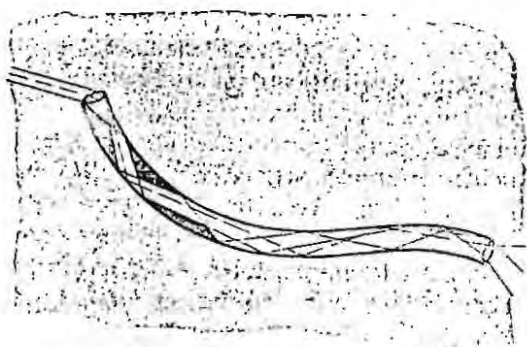
Gambar 9.18 a) dan b). Penembusan gelombang ke dalam medium yang dapat merefleksinya secara total (reflektor total) a) Skematik; b) Pengambilan foto dengan stroboskop gelombang suara ultra; [dari Rshvkin dan Makarov, Societ Physics Acoustic].

cahaya yang bersangkutan. Pemikiran ini berlaku pula untuk gelombang suara yang melewati permukaan batas dua medium: gelombang suara akan direfleksikan oleh medium yang dikarakteristikkan mempunyai kecepatan suara lebih besar³⁾. Fenomena hamburan gelombang suara oleh medium (lihat §4.3.4) dapat diamati lebih jelas melalui pembuktian gelombang cahaya. Pembuktian ini diilustrasikan pada gambar[9.18b]: Gelombang suara ultra merambat dari kiri atas pada permukaan horizontal antara medium kurang rapat (atas) dan medium lebih rapat (bawah) yang dikarakteristikkan mempunyai kecepatan gelombang suara lebih besar. Gelombang akan direfleksikan secara total ke kanan. Sebagian gelombang akan melewati medium bagian bawah dan mencapai lapisan setebal panjang gelombangnya.

Jika medium yang mempunyai sifat optis kurang rapat dengan ketebalan sangat tipis digandengkan dengan medium dengan sifat optis lebih rapat (misalkan lapisan film air yang terdapat antara dua gelas datar), hanya sebagian intensitas gelombang yang dapat menembus medium kurang rapat diteruskan ke medium ketiga. Lapisan tipis disebut transparan jika dapat ditembus cahaya dan sifat dapat tembus cahaya seperti ini menjadi semakin besar jika medium semakin tipis. Efek ini adalah analog dengan efek tunnel dalam mekanika kuantum (§16.3 2). akan terlihat lebih jelas, khususnya jika dilihat hubungan antara potensial dan indeks bias pada §9 4.1. Berdasarkan optika geometri atau mekanika klasik diketahui bahwa tidak ada satu partikel pun yang dapat menembus medium dengan indeks bias lebih besar atau berpotensi tinggi. Akan tetapi, bertitik tolak pada pandangan optika gelombang dan juga mekanika gelombang (mekanika kuantum), terdapat kemungkinan partikel menembus daerah tersebut, probabilitas gelombang dapat menembus medium optis lebih rapat adalah sebanding dengan $e^{-\lambda d}$, yaitu bergantung pada panjang gelombang dan ketebalan medium d .

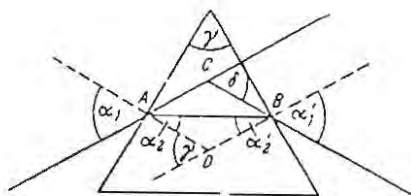
Jika suatu bundel cahaya menembus penampang lintang serat optik yang sangat tipis, cahaya dapat terhindari dari adanya refleksi total berkali-kali. Apabila cahaya meninggalkan serat optik dan masuk ke penampang

³⁾Jika gelombang suara dilewatkan pada medium ini, kecepatannya menjadi lebih besar.



Gambar 9.19 Serat optik sebagai penghantar cahaya. Bagian-bagian yang terdapat dalam berkas cahaya karena refleksi pada dinding serat optik akan hilang. Untuk menayangkan sebuah gambar diperlukan banyak serat optik.

lintang serat lainnya, cahaya akan melemah karena adanya absorpsi. Serat optik, jika cukup tipis, praktis dapat melengkung membentuk lengkungan sembarang. Interferensi antara cahaya yang datang dan direfleksikan hanya dapat merambat di dalam serat pada sudut tertentu terhadap sumbu serat optik (mode rambatan) sedangkan cahaya yang merambat pada arah lainnya akan mengalami pelemahan. Serat optik seperti ini dapat



Gambar 9.20 Pembiasan berkas cahaya pada prisma. pembiasan semetri

menghantarkan informasi (data dan gambar) yang dengan cara biasa tidak dapat dilakukan. Pada masa sekarang ini serat optik dipakai luas di berbagai bidang, seperti bidang telekomunikasi digunakan sebagai media sinyal telepon, informatika, dan khususnya dalam bidang kedokteran penyakit dalam memerlukan penyampaian informasi gambar organ bagian dalam

tubuh manusia secara langsung. Dalam penggunaan praktis seperti itu tentunya serat optik harus diatur sedemikian rupa sehingga informasi yang diambil melalui penampang lintang harus sama dengan gambar yang ditayangkan pada penampang lintang lainnya.

9.1.7 Pembiasan Cahaya Melalui Prisma

Cahaya yang menembus prisma segitiga akan dibiaskan melalui sudut δ terhadap sisi prisma (gambar[9.20]). Sudut pembiasan ini akan sangat kecil jika sudut datang cahaya dipilih seperti itu, sehingga cahaya yang menembus prisma (di bagian dalam) tegak lurus terhadap permukaan simetri (pembiasan simetri).

Berdasarkan gambar[9.20] λ adalah sudut luar dari segitiga ABD :

$$\text{Umum : } \gamma = \alpha_1 + \alpha_2'$$

$$\text{Pembiasan simetri : } \gamma = 2\alpha_2$$

δ adalah sudut luas segitiga ABC :

$$\text{Umum : } \delta = \alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_1' - \alpha_2'$$

$$\text{Pembiasan simetri : } \delta = 2(\alpha_1 + \alpha_2)$$

Dengan demikian, diperoleh:

$$\text{Umum : } \gamma + \delta = \alpha_1 + \alpha_1'$$

$$\text{Pembiasan simetri : } \gamma + \delta = 2\alpha_1 \quad (9.13)$$

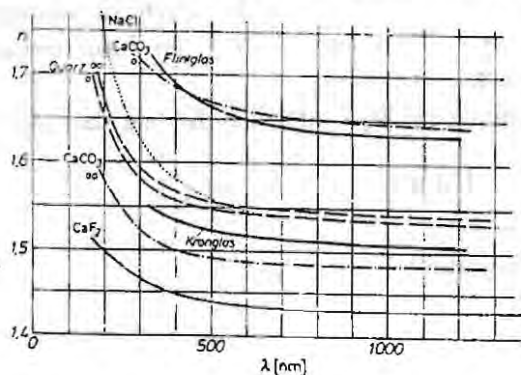
Hukum pembiasan untuk kasus pembiasan simetri adalah

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n = \frac{\sin(\gamma + \delta)/2}{\sin \gamma/2}$$

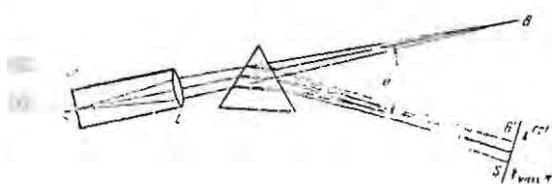
atau

$$\sin \frac{\gamma + \delta}{2} = n \sin \frac{\gamma}{2} \quad (9.14)$$

Indeks bias suatu bahan pada umumnya mempunyai harga berbeda untuk berbagai warna cahaya berbeda. Dengan perkataan lain, n bergantung pada panjang gelombang cahaya. Peristiwa ini dikenal sebagai *dispersi* cahaya. Pembiasan cahaya oleh prisma sangat ditentukan oleh harga n dari bahan prisma dibuat; prisma dapat memisahkan cahaya polikromatik



Gambar 9.21 Kurva dispersi $n(\lambda)$ dari berbagai bahan prisma



Gambar 9.22 Pemisahan cahaya polikromatik melalui prisma

menjadi semua spektrum yang terdapat di dalam cahaya tersebut. Dalam banyak hal cahaya dengan panjang gelombang lebih panjang akan dibiaskan

lebih "lemah" dibandingkan dengan cahaya yang mempunyai panjang gelombang pendek. Dengan demikian, harga n akan meningkat jika panjang gelombang semakin pendek.

Dari celah Sp dilewatkan cahaya *monokromatik* melalui lensa, sehingga terdapat bayangan benda di B (gambar[9.22]). Sebuah prisma yang salah satu sisi pembiasnya paralel terhadap celah akan menggeser bayangan benda di B' . Jika **prisma** diletakkan seperti itu, sehingga terjadi pembiasan cahaya minimal (simetris), berdasarkan persamaan[9.14], sudut pembias δ akan bergantung pada harga indeks bias n bahan prisma. Jika cahaya yang digunakan mempunyai panjang gelombang berbeda, akan diperoleh harga n yang berbeda sehingga bayangan benda di layar akan jatuh di tempat yang berbeda pula. Apabila diperhatikan di layar diperoleh bahwa cahaya merah akan dibelokkan pada sudut pembiasan lebih kecil dibandingkan dengan cahaya biru. Semua deretan bayangan celah yang terdapat pada layar, untuk semua warna, disebut spektrum cahaya.

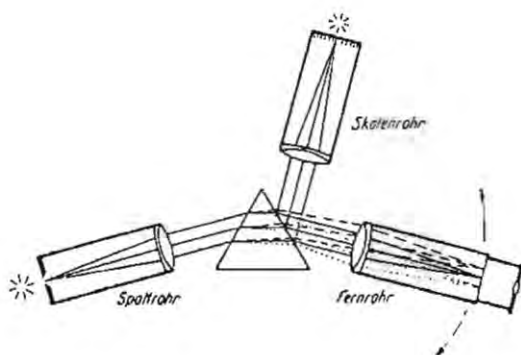
Susunan skematik yang diilustrasikan gambar[9.23] secara prinsip menggambarkan susunan *spektrograf*. Celah pada spektograf diletakkan di titik fokus sebuah *lensa akromatik* sehingga cahaya yang berasal dari sumber yang terletak di depan lensa akan jatuh secara paralel pada prisma. Selanjutnya, cahaya yang dibiaskan tersebut dijatuhkan pada sebuah lensa untuk diteruskan menjadi berkas paralel pada layar fotografis di belakang prisma. Pada *spektroskop* (gambar[9.24]) cahaya yang dibiaskan prisma (pada jarak "tak berhingga") dijatuhkan pada sebuah lensa (berfungsi mirip teropong) sehingga garis-garis spektral dapat diamati. Pada permukaan lensa fokus objektif yang terdapat pada teropong dibuat skala (skala bayangan gambar yang diproyeksikan oleh lensa berskala) sehingga garis-garis spektral dapat disusun dalam harga yang beraturan.

Dalam penggunaan, praktis sumber cahaya tidak ditempatkan seperti diilustrasikan gambar[9.22] dan [9.24], yaitu di depan celah, melainkan diletakkan bersama sebuah lensa dengan perbandingan ukuran celah tertentu

Jika prisma pada gambar[9.23] digantikan oleh *kristal kisi* (lihat §10.2.5), di layar akan diperoleh pula garis-garis spektrum. Urut-urutan spektrum dalam kondisi ini adalah terbalik dibandingkan jika memakai



Gambar 9.23 Spektrograf



Gambar 9.24 Spektroskop

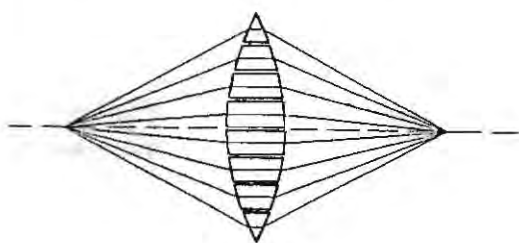
prisma, karena cahaya merah dibiaskan dengan sudut terbesar dibandingkan dengan cahaya biru. Untuk kristal kisi yang mempunyai konstanta kisi cukup besar, sebaliknya dibanding dengan prisma, pembiasan cahaya sebanding dengan panjang gelombangnya; spektrum yang dihasilkan oleh pembiasan seperti ini disebut *spektrum normal*.

9.2 Lensa dan Perkakas Optik

Benda yang dapat ditembus cahaya, dibentuk oleh dua permukaan bola disebut *lensa*. Garis penghubung antara titik M_1 dan M_2 , masing-masing sebagai titik pusat permukaan bola pertama dan kedua disebut sumbu lensa. Bergantung pada bentuknya, lensa dapat sebagai "pengumpul" atau "penyebar" cahaya. Lensa dipakai, seperti halnya cermin cekung dan cembung, untuk memperoleh bayangan benda. Berkas cahaya yang datang dari suatu titik di sumbu lensa akan dilewatkan pada permukaan lensa dan diteruskan dengan sudut kecil, berkas cahaya yang keluar dari lensa akan terkumpul pada satu titik yang disebut titik *bayangan real* atau dapat pula terletak di belakang lensa, sebagai perpotongan perpanjangan garis yang dibiaskan dan disebut *bayangan virtual* (semu).

9.2.1 Pembiasan pada Permukaan Bola

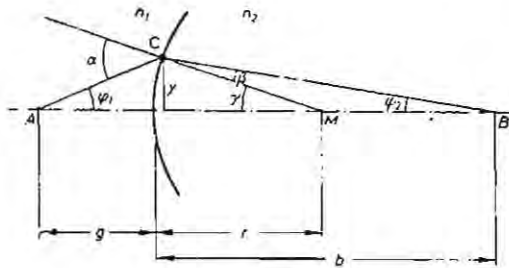
Semua lensa dibatasi oleh permukaan bola. Bentuk serupa itu, walaupun mengandung kekurangan (lihat §9.2.5), tetapi secara teknis pembuatan permukaan bola melalui penggosokan, jauh lebih mudah dibandingkan untuk membentuk permukaan lain.



Gambar 9.25 Sebuah susunan prisma seperti ini dapat membelokkan berkas cahaya yang datang dari suatu titik di depannya, menjadi bayangan pada satu titik di belakang lensa. Pada gambar itu diilustrasikan berkas yang diteruskan adalah simetris, yaitu benda titik dan bayangannya terletak pada titik fokus. Sudut pembiasan prisma haruslah bertingkat-tingkat dan sebanding dengan jaraknya terhadap sumbu. Pembiasan cahaya pada kondisi ini sebagai pendekatan untuk pembiasan cahaya yang terjadi pada permukaan berbentuk bola.

Dalam pembahasan ini secara umum akan dianalisis sifat-sifat pembiasan cahaya pada lensa atau permukaan batas berbentuk bola yang membatasi dua medium dengan indeks bias masing-masing n_1 dan n_2 . Semua sudut datang dan sudut bias cahaya dianggap sangat kecil sehingga harga sinusnya akan sama atau mendekati harga sudut yang bersangkutan.

Suatu berkas yang berasal dari titik A yang terletak di sumbu optis akan memotong kembali sumbu optis di titik B (gambar[9.26]). Akan ditunjukkan bahwa posisi di B tidak bergantung pada sudut terhadap sumbu, selama sudut tersebut kecil, berarti pula bahwa B dengan berkas cahaya yang paralel terhadap sumbu tidak lain adalah bayangan A .



Gambar 9.26 Pembiasan cahaya pada permukaan batas berbentuk bola yang memisahkan dua medium berbeda indeks bias.

Selanjutnya dapat dicari hubungan antara jarak benda g dan bayangan b . Terhadap CM yang terletak di permukaan pembias, terhadap berkas datang AC dan berkas yang diteruskan CB . Sudut masing-masing berkas tersebut adalah α dan β . Berdasarkan hukum pembiasan, hubungan kedua sudut tersebut dapat ditulis dalam bentuk:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \approx \frac{\alpha}{\beta} \quad (9.15)$$

Sudut α dan β terhadap sumbu optis, seperti halnya sudut (gambar[9.26]),

dapat dinyatakan dengan jarak CM terhadap sumbu optis, y :

$$\begin{aligned}\varphi_1 &\approx \tan \varphi_1 = \frac{y}{g}; \\ \varphi_2 &\approx \tan \varphi_2 = \frac{y}{b}; \\ \gamma &\approx \tan \gamma = \frac{y}{r}.\end{aligned}\tag{9.16}$$

Dari gambar[9.26] didapat pula hubungan sebagai berikut.

$$\alpha - \varphi_1 = \beta + \varphi_2 = \gamma$$

Dengan menggunakan persamaan[9.15] dan [9.16] persamaan di atas dapat dinyatakan dalam y , g dan b sebagai berikut.

$$\alpha - \frac{y}{g} = \frac{n_2}{n_1} \alpha + \frac{y}{b} = \frac{y}{r}$$

Dari persamaan ini α dapat dinyatakan dalam besaran-besaran yang diketahui:

$$\alpha = \frac{y}{r} + \frac{y}{g} \quad \text{dan} \quad \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{y}{r} + \frac{y}{g} \right) + \frac{y}{b} = \frac{y}{r}$$

atau jika persamaan di atas dibagi dengan y dan dikali dengan n_2 :

$$\frac{n_1}{g} + \frac{n_2}{b} = \frac{n_2 - n_1}{r}\tag{9.17}$$

Dari persamaan[9.17], y dapat dieliminasi sama sekali dan semua berkas cahaya yang paralel terhadap sumbu lensa, akan berlaku hal yang sama,

apakah cahaya dibiaskan pada sudut atau dengan harga y lainnya, akan bersatu kembali di titik B . Dari persamaan[9.17], untuk jarak bayangan di $b = \infty$, (cahaya dibiaskan paralel terhadap sumbu lensa, cahaya datang diteruskan melalui titik fokus sisi muka lensa):

$$\text{Fokus depan: } g = F = r \frac{n_1}{n_2 - n_1}$$

dan untuk $g = \infty$ (cahaya datang paralel sumbu dan cahaya yang dibiaskan bersatu di titik fokus)

$$\text{Fokus belakang: } b = f = r \frac{n_2}{n_2 - n_1}$$

Dengan menggunakan f dan F , persamaan[9.17] dapat pula ditulis menjadi:

$$\frac{F}{g} + \frac{f}{b} = 1 \quad (9.17a)$$

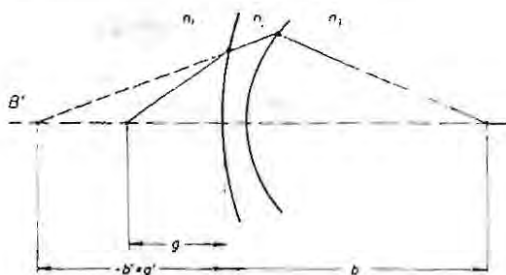
Jika jarak benda yang terdapat di depan dan jarak bayangan di belakang lensa dicampurkan (g' dan b' , lihat persamaan[9.8]), diperoleh persamaan bayangan Newton sebagai berikut

$$g' b' = f F \quad (9.17b)$$

Jika permukaan pembias konkav, bayangannya terletak di depan lensa atau sebagai cerminan bayangan yang diilustrasikan gambar[9.26], yaitu merupakan bayang virtual. Dalam hal ini pengertian n_1 dan n_2 , g dan b dapat dipertukarkan. Dengan demikian, akan diperoleh hasil perhitungan yang sama dibandingkan jika perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan[9.17], tanpa mengganti tanda r . Permukaan pembias konkav mempunyai jari-jari bertanda negatif.

9.2.2 Kombinasi Beberapa Permukaan Pembias

Setiap sistem lensa terdiri atas beberapa permukaan bola, untuk sistem lensa paling sederhana terdiri atas dua permukaan bola. Berdasarkan ketebalannya lensa dapat dikategorikan dalam dua bentuk. lensa tipis dan tebal. Tebal tipisnya lensa dipandang dari jarak antardua permukaan bola dan jarak lainnya, apakah dapat diabaikan atau tidak.



Gambar 9.27 Pembiasan cahaya pada dua permukaan bola

Bagaimana kelakuan dua permukaan bola dalam membiaskan cahaya, dapat diamati kasus khusus yang diilustrasikan gambar[9.27]. Permukaan pertama tidak membiaskan cahaya yang datang dari benda berjarak g dengan kuat. Cahaya yang dibiaskan hanya mengalami sedikit divergensi dan kelihatannya seolah datang dari titik B' yang berjarak $-b'$ terhadap permukaan ($b' < 0$; berdasarkan persamaan[9.17b], karena $g < F$)

$$\frac{n_1}{g} + \frac{n_2}{b'} = \frac{n_2 - n_1}{r_1} \quad (9.18)$$

Permukaan kedua "menangkap" bayangan pada jarak $-b'$ sebagai benda $g' = -b'$. Dengan demikian, persamaan bayangannya dapat ditulis menjadi:

$$\frac{n_2}{g'} + \frac{n_3}{b} = -\frac{n_2}{b'} + \frac{n_3}{b} = \frac{n_3 - n_2}{r_2} \quad (9.19)$$

Dengan menambahkan persamaan [9.18] dan [9.19] didapat:

$$\frac{n_1}{g} + \frac{n_3}{b} = \frac{n_2 - n_1}{r_1} + \frac{n_3 - n_2}{r_2} \quad (9.20)$$

yaitu jika jarak permukaan bias kecil dibandingkan dengan b dan g . Pada pendekatan ini sifat kedua permukaan bias seluruhnya, yang dinyatakan dalam perbandingan $n r$ (perbandingan indeks bias terhadap jari-jari permukaan) dapat saling ditambahkan. Perbandingan $n r$ disebut *daya bias lensa*. Daya bias sistem dua lensa merupakan penjumlahan masing-masing daya bias lensa yang bersangkutan. Daya bias mempunyai dimensi [panjang]⁻¹. Jika r dinyatakan dalam m , daya bias lensa dinyatakan dalam *dioptri* m^{-1} .

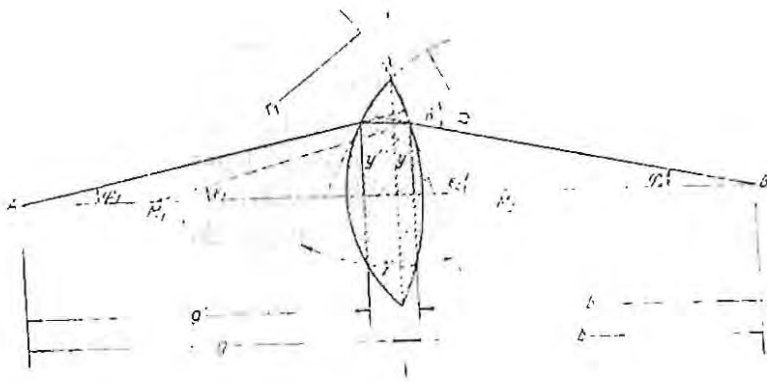
9.2.3 Lensa Tipis

Sebuah lensa terbuat dari bahan tertentu dengan indeks bias $n_2 = n$ dan jari-jari masing-masing lensa bagian depan dan belakang adalah r_1 dan r_2 . Lensa ditempatkan di udara $n_1 = n_3 = 1$ dan berdasarkan persamaan [9.20], daya bias lensa adalah

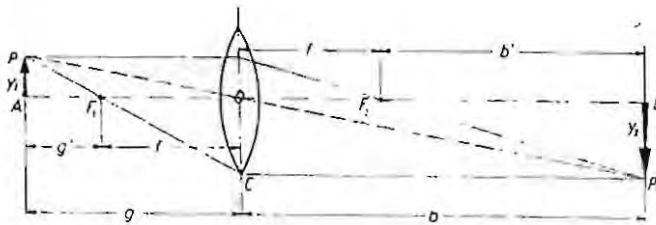
$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (9.21)$$

(tanda $1/r_2$ dianggap minus).

Permukaan bola yang terbuka ke arah sebelah kanan, jari-jarinya dianggap positif dan sebaliknya permukaan lensa yang terbuka ke arah sebelah kiri, jari-jari bertanda negatif. Jika permukaan kedua, seperti halnya permukaan pertama terbuka ke kiri, tanda $1/r_2$ harus tetap dianggap negatif, karena $n_3 - n_1 = -(n - 1)$. Jika kedua permukaan saling terbuka dan berlawanan (misalnya pada *lensa bikonveks*), tanda masing-masing jari-jarinya haruslah saling dipertukarkan dan suku penambah kebalikan jari-jari masing-masing dapat saling ditambahkan. Jika permukaan kedua lebih cembung dibandingkan dengan permukaan pertama, indeks bias dinyatakan berharga negatif (*lensa penghambur*). Umumnya jika bagian



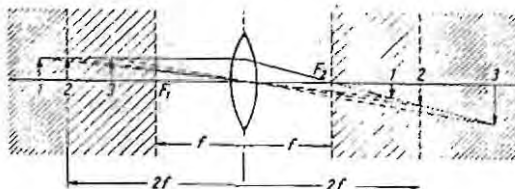
Gambar 9.28 Gambaran untuk menurunkan persamaan bayangan pada lensa



Gambar 9.29 Konstruksi bayangan yang dihasilkan oleh sebuah lensa pengumpul

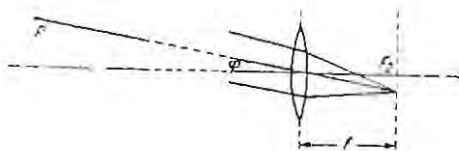
tengah lensa lebih tebal dari bagian pinggirnya, lensa akan mempunyai daya bias berharga positif (*lensa pengumpul*) dan sebaliknya.

Pada gambar[9.28] kembali dapat dirumuskan kembali persamaan

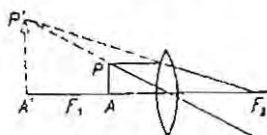


Gambar 9.30 Susunan antara benda dan bayangannya pada lensa pengumpul

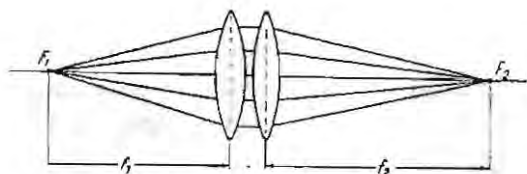
bayangan pada persamaan[9.21]. Gambar[9.29] hingga [9.32] adalah contoh pembentukan gambar pada *lensa pengumpul*. Kelakuan bayangan dari susunan beberapa lensa diilustrasikan pada gambar[9.33], yaitu untuk kasus khusus jika berkas cahaya berasal dari suatu titik akan membentuk lintasan cahaya paralel di dalam ruang antara lensa. Daya bias sistem lensa seperti ini sama dengan penjumlahan daya bias masing-masing lensa. Oleh karena itu, perhitungan dengan menggunakan daya bias lebih sederhana.



Gambar 9.31 Bayangan sebuah benda yang terletak pada jarak tak berhingga



Gambar 9.32 Bayangan virtual sebuah benda yang terletak di dekat titik fokus

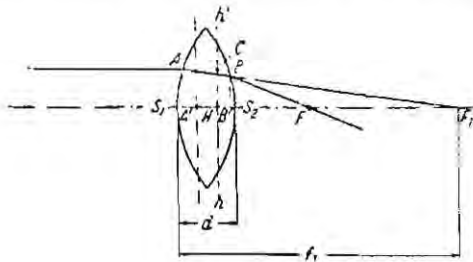


Gambar 9.33 Kebalikan titik fokus (titik fokus total) dari dua lensa di atas adalah sama dengan penjumlahan kebalikan jarak titik fokus masing-masing lensa

9.2.4 Lensa Tebal

Pada lensa tipis, secara pendekatan, pembiasan cahaya dibolehkan

melalui dua permukaan batas udara-gelas dan hanya bergantung pada salah satu permukaan saja; cahaya yang menembus lensa dapat digambar melalui kedua sisi lensa hingga ke permukaan di bagian tengah kedua permukaan lensa. Jika cahaya menembus suatu medium (lensa misalnya) melebihi jarak tertentu, pendekatan yang dibuat pada §9.2.2 tidak berlaku. Dengan demikian, harus dicari rumusan lain. Untuk kasus demikian perhitungan harus dilakukan untuk masing-masing permukaan bias, atau dengan perkataan lain perhitungan bergantung pada arah datangnya cahaya. Untuk semua cahaya yang datang dari arah kiri digambarkan pada bidang hh' yang terletak tegak lurus terhadap sumbu optis lensa, tidak persis di tengah-tengah lensa, melainkan agak bergeser ke kiri (gambar[9.34]). Dalam hal itu hanya terdapat satu pembiasan cahaya, seharusnya terdapat dua pembiasan yang harus dianalisis. Permukaan yang terdapat di bagian



Gambar 9.34 Lensa tebal. Permukaan utama dan titik utama

tengah lensa terbagi menjadi dua *bidang utama*. Titik potong permukaan utama terhadap sumbu utama disebut *titik utama*. Sebagai titik fokus, dalam kasus ini, adalah jarak titik fokus dari titik-titik utama yang berdekatan. Juga jarak benda dan bayangan diukur dari bidang utama.

Posisi titik utama suatu lensa tebal bikonveks simetris dengan jari-jari keduanya adalah $r_1 = r_2 = r$, ketebalannya dapat diukur dengan cara sebagai berikut. Misalkan adalah $HS_2 = vd$ dan cari harga v yang merupakan perbandingan antara HS_2 dan d . Jarak titik fokus permukaan pemisah pertama (sebelah kiri), berdasarkan persamaan[9.17] adalah:

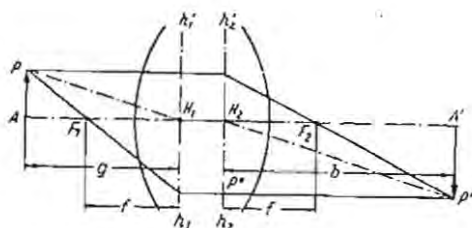
$$A'F_1 = f_1 = \frac{n}{n-1} r \quad (9.22)$$

Jarak titik fokus total lensa, berdasarkan persamaan [9.20] adalah

$$HF = f = \frac{1}{2(n-1)r} \quad (9.23)$$

Dari kesamaan segitiga $AA'F_1$ dan $BB'F_1$ didapat hubungan:

$$\frac{AA'}{BB'} = \frac{A'F_1}{B'F_1} = \frac{f_1}{f_1 - d}$$



Gambar 9.35 Pembentukan bayangan dengan pertolongan bidang utama dan titik utama.

Dan dari kesamaan segitiga CHF dan $BB'F$

$$\frac{CH}{BB'} = \frac{HF}{B'F} = \frac{f}{f - \nu d}$$

Ruas kiri kedua persamaan di atas adalah identik, sehingga didapat bahwa $AA' = CH$ sehingga

$$\frac{f_1}{f_1 - d} = \frac{f}{f - \nu d}$$

atau

$$f_1(f - \nu d) = f_1 f - \nu d f_1 = f(f_1 - d) = f_1 f - f d \quad (9.24)$$

selanjutnya dengan menggunakan persamaan[9.22] dan [9.23] diperoleh:

$$\nu = \frac{f}{f_1} = \frac{1}{2n}$$

Untuk gelas dengan indeks bias $n = 1,5$, bidang utama akan terbagi menjadi tiga bagian.

Dari gambar[9.35] dapat diturunkan, meskipun definisi jarak benda g , jarak bayangan g dan jarak titik fokus f berubah, pendekatan dapat digunakan persamaan bayangan sebagai berikut.

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

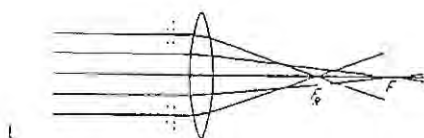
Juga untuk sistem lensa yang terdiri atas beberapa lensa dapat diketahui dari dua sumbu utama yang menghubungkan jarak dua titik fokus sistem. Pembentukan bayangan sistem seperti itu adalah analog dengan persamaan[9.35].

9.2.5 Kesalahan Bayangan pada Lensa

Sebuah lensa sferis (bola) hanya akan membentuk bayangan pada sebuah titik jika memenuhi kondisi sebagai berikut. Berkas yang berasal dari benda dapat memotong sumbu utama melalui sudut yang kecil dan sudut datang, juga sudut bias pada saat berkas memasuki permukaan lensa harus sekecil mungkin sehingga harga sinus dan tangen sudut tersebut mendekati harga busur sudut (arkus) tersebut

Aberasi Sferis

Gambar[9.36] menunjukkan lintasan berkas datang sejajar sumbu utama pada jarak cukup jauh dari sumbu utama (berkas pinggir) jatuh pada lensa. Berkas ini akan memotong F_2 yang berjarak lebih dekat dibandingkan



Gambar 9.36 Aberasi sferis dan cara menghindarkannya melalui penikisan

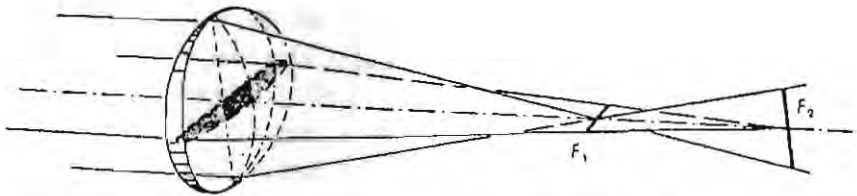
dengan titik fokus lensa F . Jika berkas yang dibiaskan dibelokkan semakin dekat ke sumbu utama, semakin dekat pula titik F_R ke titik F . Kenyataan itu menunjukkan bahwa pada setiap *zone* lensa terdapat pula titik fokus lain. Fenomena itu, seperti kasus khusus disebutkan di atas, Jarak $F_R F$ disebut *aberasi sferis*. Jika titik-titik fokus berbagai *zone* lensa tidak jatuh pada satu titik, bayangan yang dibentuknya juga titik terfokus pada satu titik. Bayangan yang cukup jelas akan diperoleh jika berkas yang digunakan diatur dengan cukup perlahan. Kesalahan aberasi ini juga dijumpai pada lensa konkav.

Aberasi Astigmatis

Sebuah lensa mempunyai permukaan, selain berbentuk lengkung (bola), permukaan sisi lainnya adalah datar, atau kedua permukaan lensa mempunyai kelengkungan yang berbeda (misalnya salah satu mempunyai kelengkungan selinder). Pada lensa seperti itu, cahaya datang paralel terhadap sumbu utama tidak dibiaskan melalui satu titik, melainkan berbentuk garis. Gambar[9.37] mengilustrasikan kejadian tersebut bahwa dengan mengabaikan aberasi sferis semua berkas paralel akan bersatu di bidang vertikal di F_1 dan semua berkas yang jatuh pada bidang horizontal akan bertemu di titik F_2 . Pengaruh berkas pada bidang jika dirotasi akan terbentuk gambar yang lebih kompleks.

Kesalahan Astigmatis Berkas yang bergeser

Suatu astigmatis berkas yang bergeser terjadi pada lensa yang mempunyai permukaan bola. Kesalahan itu muncul pada bayangan berbentuk titik yang terletak jauh dari sumbu utama sehingga berkas cahaya yang berasal dari benda akan jatuh dibelokkan sangat tajam dari sumbu lensa. Bayangan

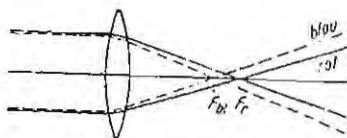


Gambar 9.37 Lensa astigmatis tidak mempunyai titik fokus, melainkan dua *garis fokus*, yang bergantung pada kelengkungan utama kedua permukaan lensa [H. U.-Harten].

jelasnya membentuk dua garis yang berbeda jarak dari lensa. Kedua garis terletak saling tegak lurus, salah satu garis terletak paralel sumbu lensa, garis itu berasal dari berkas yang datang dari benda dan mengalami rotasi.

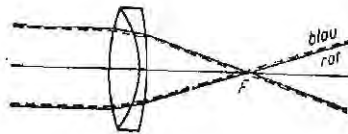
Aberasi Kromatis

Adanya peristiwa pembiasan cahaya berbeda untuk masing-masing panjang gelombang berbeda (dispersi §9.1.7) titik fokus untuk cahaya biru yang dibelokkan dengan tajam akan berada lebih dekat ke lensa dibandingkan dengan titik fokus untuk cahaya merah (gambar[9.38]). Untuk membuat koreksi aberasi sferis oleh lensa, secara sederhana dapat diatasi tidak menggunakan cahaya "putih", melainkan digunakan cahaya berwarna sehingga bayangan yang terbentuk akan menjadi lebih tajam. Untuk cahaya dengan panjang gelombang lainnya bayangan akan berada di sekitarnya. Apabila menggunakan cahaya yang mengandung beberapa panjang gelombang, koreksi aberasi kromatis diatasi dengan menggabungkan lensa konveks dengan konkav (gambar[9.39]) (lensa konkav terbuat dari bahan gelas dengan sifat dispersi yang besar) sehingga hamburan karena panjang gelombang lain dapat diatasi, paling tidak akan

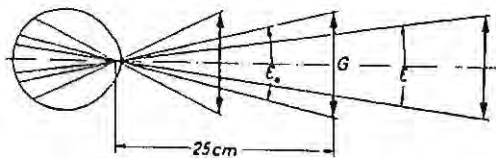


Gambar 9.38 Aberasi Kromatis

diperoleh bayangan untuk dua panjang gelombang berbeda dari cahaya yang digunakan: misalnya untuk cahaya hijau dan merah atau biru dan violet. Dengan menggunakan susunan (gabungan) lensa yang lebih kompleks akan diperoleh bayangan tajam untuk tiga, empat dan seterusnya. panjang gelombang berbeda. Sistem lensa serupa itu disebut *akromatik*. Kesalahan pada lensa itu umumnya dapat diatasi dengan menggunakan berbagai susunan lensa berbeda.



Gambar 9.39 Cara menghindari aberasi kromatis melalui kombinasi penggabungan dua lensa, yaitu lensa konveks dan konkav yang terbuat dari gelas dengan indeks bias berbeda



Gambar 9.40 Definisi perbesaran benda.

9.2.6 Ukuran Bayangan dan Perbesarannya

Perbandingan antara tinggi B dari bayangan real yang dihasilkan lensa atau sistem lensa dan tinggi G benda disebut *ukuran bayangan*. Ukuran bayangan hanya bergantung jarak titik fokus dan jarak benda dan tidak bergantung pada jarak pengamat (gambar[9.40]).

$$\beta = \frac{B}{G} = \frac{y_2}{y_1} = \frac{b}{g} = \frac{f}{g'} = \frac{b'}{f} \quad (9.25)$$

g' dan b' masing-masing adalah jarak bayangan dan benda terhadap titik fokus (lihat persamaan[9.8]) yang terdapat di dalam "ruang" yang sama.

Berbeda halnya jika tinggi benda tersebut dipandang dari pandangan pengamat. Tingginya bergantung pada jarak mata dan benda (gambar[9.40]). Melalui jarak ini dapat ditentukan *sudut penglihatan*. Sudut penglihatan adalah sudut yang dibentuk oleh dua berkas cahaya yang masuk ke mata pengamat (lebih tepat lagi berkas yang jatuh di layar yang terdapat di belakang lensa mata). Kemudian dapat didefinisikan perbesaran bayangan yang dilihat oleh pengamat sama dengan 1 jika benda berjarak 25 cm di depan mata, yaitu benda terletak pada jarak *jangkauan penglihatan* atau *jangkauan penglihatan terjelas*. Misalkan, sudut penglihatan untuk jangkauan penglihatan adalah ε_0 . Semakin besar jarak benda maka G akan semakin kecil dan jika jarak benda kecil G akan semakin besar. Misalkan, sudut penglihatan untuk jarak benda sembarang adalah ε . Perbesaran v sama dengan perbandingan sudut penglihatan jarak sembarang ε terhadap sudut penglihatan pada jarak jangkauan penglihatan terjelas ε_0 .

$$v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (9.26)$$

Pada jarak 10 cm (titik terdekat) akomodasi mata seorang anak muda sekalipun tidak dapat lagi berfungsi dengan baik. Untuk melihat benda atau bayangannya lebih dekat, sudut penglihatan harus diperbesar, untuk itu diperlukan alat optik, misalnya kaca pembesar (*lup*), mikroskop, teropong. Untuk dua peralatan optik yang disebutkan di atas (*lup* dan mikroskop), menurut persamaan[9.26] berlaku:

$$\text{Perbesaran} = \frac{\text{Sudut penglihatan dengan alat}}{\text{Sudut penglihatan pada jarak 25 cm tanpa alat}} \quad (9.27)$$

Penglihatan yang tajam pada daerah kornea mata normal masih dapat membedakan dua titik dengan baik jika sudut penglihatannya sebesar 1 menit. Pernyataan ini timbul dari teori resolusi (daya pisah) penglihatan (§10.2.3). Semakin besar perbesaran benda, semakin terlihat detail atau rincian yang terdapat pada benda.

9.2.7 Kaca Pembesar (*Lup*)

Dengan menggunakan lensa cembung (konveks) yang memiliki titik fokus pendek f diamati sebuah benda (tinggi G) yang terletak di titik fokus lensa. Benda diamati melalui *lup* dengan mata yang tidak mengalami akomodasi atau mata terletak sangat jauh tak berhingga; bayangan virtual akan terbentuk di tempat tak berhingga (gambar[9.41]). Jika mata terletak sangat dekat dengan lensa, bayangan akan muncul dengan sudut penglihatan $\varepsilon = G/f$; dalam batas "jangkauan penglihatan" benda terletak pada jarak $s_o = 25$ cm dan sudut penglihatan tanpa *lup* adalah $\varepsilon_o = G/s_o$. Berdasarkan persamaan[9.27] perbesaran bayangan benda dapat ditulis menjadi:

$$v_L = \frac{G}{f} : \frac{G}{s_o} = \frac{s_o}{f} \quad (9.28)$$

Jika posisi benda di titik fokus digeser lebih dekat ke lensa, bayangan virtual akan mengalami pergeseran pula ke jarak berhingga. Kaca pembesar sering digunakan dengan cara seperti itu, sehingga bayangan virtual akan terdapat pada jarak s (misalkan pada jarak "jangkauan penglihatan" s_o). Dalam keadaan demikian, mata akan mengalami akomodasi. Oleh karena itu, perbesaran menjadi:

$$v_L = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} = \frac{G}{s} : \frac{G}{s_o} = \frac{s_o |b|}{sg}$$

Berdasarkan persamaan bayangan ⁴⁾ persamaan[9.17a], maka

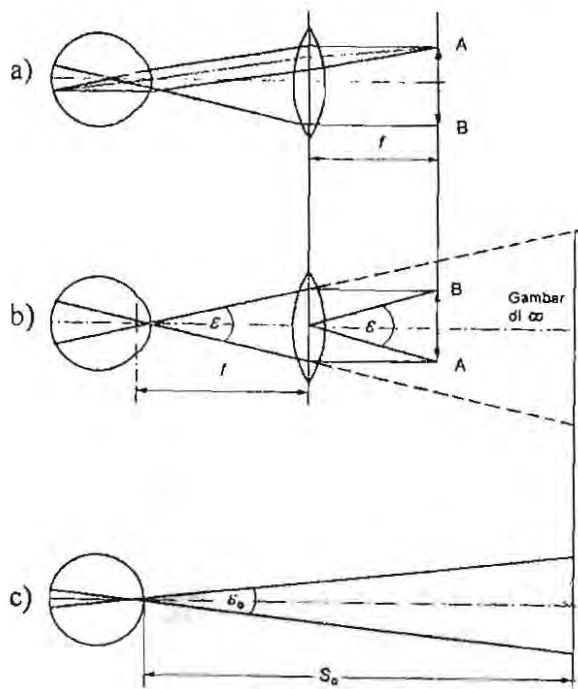
$$\frac{1}{g} = \frac{1}{b} - \frac{1}{f} = \frac{1}{f} + \frac{1}{s}$$

atau

$$v_L = \frac{s_o}{f} + \frac{s_o}{s} \quad (9.29)$$

⁴⁾Persamaan bayangan sering juga disebut persamaan pembuat lensa.

husus untuk $s = s_o$ maka $v = s_o f + 1$. Untuk jarak bayangan yang pendek, persamaan [9.28] tidak mengalami perubahan berarti. Dengan menggunakan *lup*, perbesaran bayangan benda dapat diperoleh dari 20 hingga 30 kali ukuran benda.



Gambar 9.41 a-c. Kaca pembesar (*lup*)

9.2.8 Mikroskop

Perbesaran bayangan lebih besar dapat diperoleh dengan menggunakan *mikroskop* (gambar [9.42]). Benda diletakkan di depan sebuah *lensa objektif*, berada pada jarak tertentu, tidak jauh dari titik fokus f_i , praktis sama dengan jarak antara lensa objektif dan okuler l , dari lensa objektif akan terbentuk bayangan real ZB. Ukuran bayangan tergantung pada jarak titik fokus lensa objektif f_i . Dari persamaan [9.25] diketahui

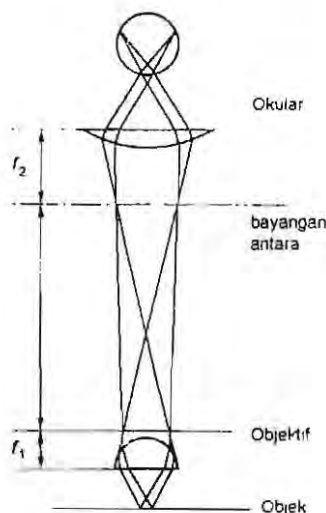
bahwa

$$\beta = \frac{b'}{f_1} = \frac{l}{f_1}$$

Jika bayangan *real* lensa objektif *ZB* diamati pengamat di belakang lensa okuler yang berfungsi sebagai *lup*, bayangan akan diperbesar lagi yaitu $v_l = s_o/f_2$. Perbesaran total mikroskop v_M adalah sama dengan ukuran bayangan β dari lensa objektif dikalikan dengan perbesaran dari lup (lensa okuler) v_l (persamaan[9.28]):

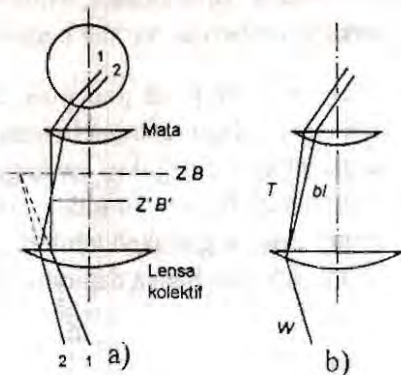
$$v_M = \frac{l \cdot s_o}{f_1 f_2} \quad (9.30)$$

Lensa objektif dan okuler yang digunakan pada mikroskop harus dikoreksi



Gambar 9.42 Lintasan berkas cahaya pada mikroskop

dari aberasi sferis dan kromatis. Jika lensa okuler (gambar[9.42]) dibuat hanya dapat meneruskan berkas cahaya yang sempit, koreksi terhadap aberasi tidak begitu memuaskan.



Gambar 9.43 a. dan b. Aberasi sferis (a) dan aberasi chromatis (b) pada okuler Huygens.

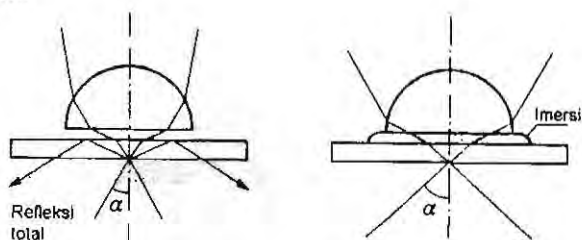
Biasanya digunakan beberapa lensa *okuler* Huygens. Terdiri atas dua lensa yang berfungsi sebagai *lensa kolektif* berkas cahaya (lensa konveks) dan disebut *lensa mata* (gambar[9.43]). Lensa kolektif membuat berkas cahaya konvergen, sebelum bertemu di suatu titik (gambar[9.43a]) dan antara keduanya diletakkan *lensa plan-konveks* okuler Huygens sehingga pengamat akan melihat bayangan $Z'B'$ dengan lensa mata sebagai okuler. Kelebihan okuler itu adalah:

1. Diperoleh saupan sudut penglihatan yang besar,
2. Berkas cahaya 2 akan diteruskan lebih "keluar" dibandingkan dengan berkas 1 oleh lensa kolektif, sedangkan lensa mata terletak lebih "ke dalam" dibandingkan dengan berkas 1 sehingga bayangan akan bebas dari aberasi sferis.
3. Berkas cahaya polikromatik atau cahaya "putih" (w) yang karena adanya aberasi kromatik akan terpisah menjadi berkas cahaya berbagai panjang gelombang (warna) oleh lensa okuler (gambar[9.43b]) sehingga cahaya berwarna merah (r) akan dibiaskan lebih kecil dibandingkan dengan cahaya berwarna biru bl, (r) dan (bl) menembus mata pengamat sebagai berkas paralel

sehingga aberasi kromatik dapat diatasi. Mata yang terletak pada jarak ∞ dapat menangkap berkas paralel bersatu pada satu titik.

Pada bidang $Z'B'$ yang terletak pada plat glas dapat dibuat skala pembagi (*skala okuler*). Skala itu dapat diamati bersama-sama bayangan lensa objektif dan berfungsi sebagai pengukur bayangan.

Koreksi terhadap pelebaran berkas (bundel cahaya) amat sukar dilakukan. Untuk kepentingan itu, digunakan lebih dari 10 macam lensa yang ditempatkan secara berbeda dan hanya dapat mengurangi pelebaran hingga 1 mm.

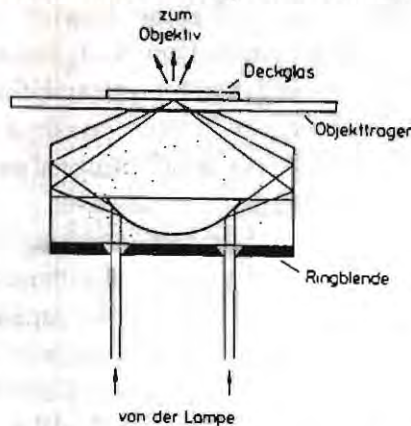


Gambar 9.44 a. dan b. Objektif "pancaran" dan perbesaran yang dihasilkan dari pancaran dari apertur numeris

Dibedakan antara *sistem kering* dan *sistem immersi* untuk lensa objektif. Pada gambar[9.44] diilustrasikan lintasan cahaya melalui suatu preparat mikroskopik yang ditempatkan di atas plat gelas dan menembus permukaan lensa objektif a) pada sistem kering dan b) pada sistem immersi. Pada sistem terakhir, antara lensa objektif dan plat gelas ditempatkan lapisan tipis minyak ($n = 1,5$) sehingga adanya refleksi total pada permukaan plat gelas dapat diatasi. Pada sistem immersi di samping sudut sapuan cahaya yang masuk ke dalam lensa objektif menjadi lebar, kuat (intensitas) cahaya yang masuk juga besar. Misalkan, α adalah sudut antara sumbu lensa dan berkas pinggir kerucut cahaya yang berasal dari satu titik preparat mikroskopik menuju ke lensa objektif dan $n \sin \alpha$ disebut *apertur numeris*. Pengertian apertur numeris berhubungan dengan resolusi (daya pisah) sebuah mikroskop dan akan dibicarakan lebih rinci pada §10.2.7.

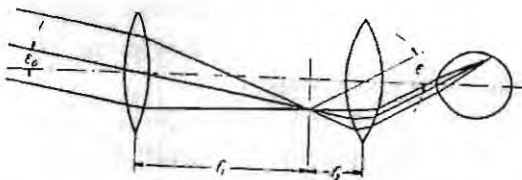
Kemampuan mengenal preparat biologis berukuran sangat kecil

bergantung pada daya pisah dibandingkan dengan *kontras*. Cara klasik untuk meninggikan kontras adalah menggunakan cahaya monokromatik,



Gambar 9.45 *Kondensator gelap* tidak terdapat cahaya langsung, melainkan hanya cahaya yang dihamburkan objek pada lensa objektif [dari R.W. Pohl dan H.U. Harten].

yaitu menggunakan adanya *afinitas* dan kemampuan absorpsi berbagai macam organ atau organel sel preparat terhadap zat pewarna. Zat pewarna ini biasanya adalah racun bagi sel preparat sehingga tidak terdapat warna penting, tetapi untungnya berbagai bagian preparat mempunyai indeks bias berbeda. Bagian-bagian itu menghamburkan cahaya primer yang dapat dikenal dengan menggunakan *kondensator gelap*. Dengan cara yang mirip terdapat *kontras fase*, yaitu jika terdapat cahaya yang diabsorpsi oleh bagian preparat dibandingkan dengan bagian sekelilingnya. Dengan demikian, tidak akan timbul kontras terang (§4.2.7).



Gambar 9.46 Lintasan berkas cahaya di dalam teropong

9.2.9 Teropong

Teropong astronomis (refraktor, Kepler, 1611), mirip dengan mikroskop, terdiri atas dua lensa konveks (gambar[9.46]). Akan tetapi, pada teropong, lensa objektif mempunyai jarak fokus yang besar. Lensa itu membentuk bayangan benda yang jaraknya sangat jauh menjadi bayangan *real* di "bidang" fokusnya dan dalam hal ini lensa okular berfungsi sebagai *lup* penangkap bayangan *real* tersebut.

Perbesaran bayangan benda pada teropong dapat dipastikan akan berbeda dari persamaan[9.27] karena perbandingan antara sudut sapuan penglihatan dengan teropong dengan sudut sapuan berkas cahaya dari benda yang berjarak sangat jauh tanpa teropong ϵ_0 , misalnya melihat menara mesjid dengan dan tanpa teropong, berbeda. Besar bayangan *real* G pada bidang fokus lensa objektif adalah $B = f_1 \epsilon_0$. Melalui lensa okuler bayangan ini akan tampil dengan sudut sapuan $\epsilon = B/f_2$, akan diperoleh:

$$v = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{B}{f_2 \epsilon_0} = \frac{f_1 \epsilon_0}{f_2 \epsilon_0} = \frac{f_1}{f_2} \quad (9.31)$$

Dalam prakteknya selalu terdapat hal yang mirip, seperti halnya pada mikroskop, misalnya di samping digunakan lensa okuler, lensa mata juga berlaku sebagai lensa okuler.

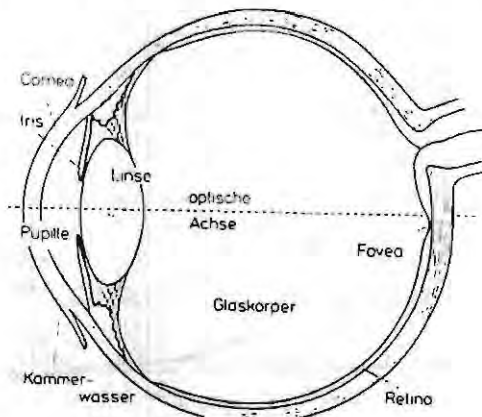
Untuk mengamati objek yang jauh di angkasa luar biasanya bayangan yang diamati adalah terbalik. Hal itu tentunya tidak nyaman dalam penglihatan pengamat. Untuk membalikkan bayangan terbalik menjadi bayangan nyaman terlihat oleh mata, dapat dilakukan dua cara: pertama menggantikan lensa okuler dengan *prisma pembalik bayangan*, teropong seperti ini disebut *teropong prisma*; kedua dengan cara menggantikan lensa okuler konveks dengan lensa konkav dan teropong demikian disebut *teropong teristial* atau teropong Holland (Galilei, 1609); okular itu ditempatkan di titik fokus lensa objektif.

Teropong astronomis (di Indonesia umumnya disebut teropong bintang) terbesar adalah terdiri atas reflektor-reflektor. Pada teropong itu, cermin cekung menimbulkan bayangan dan kemudian bayangan dapat diamati dengan lensa okuler. Cermin yang digunakan biasanya berdiameter

besar sehingga mempunyai daya pisah (resolusi) yang besar dibandingkan dengan lensa. Dasar pertimbangan hal tersebut adalah bahwa gelas dapat dianggap sebagai zat cair. Lensa yang besar mempunyai massa sangat besar dan secara optis tidak berfungsi dengan baik. Untuk lensa berdiameter 1 m saja massa lensa akan menimbulkan kesukaran yang lain.

9.2.10 Mata

Helmholz mengatakan bahwa ia akan melempar seorang optiker yang tidak dapat membuat perkakas seperti lensa mata manusia, dan memang tidak ada seorang optiker pun yang dapat membuat perkakas tersebut. Karena pada lensa mata manusia terdapat perkakas pembentuk bayangan dan pemusatan permukaan bayangan (selaput tanduk dan lensa mata) yang sangat jelek dibandingkan dengan yang terdapat pada kamera fotografi, kesalahan bayangan tidak cukup baik terkoreksi. Akan tetapi, semua kelemahan yang terdapat pada mata manusia ini dapat dikompensasikan melalui sistem pengatur mekanis yang sangat mengagumkan. Dalam hal ini lensa mata manusia mengandung daerah pendaran sangat rapat dibandingkan dengan semua peralatan optik yang pernah dibuat manusia (lebih kurang 10^{15} kali) dan lapisan yang sangat peka terhadap cahaya selalu siap menerima

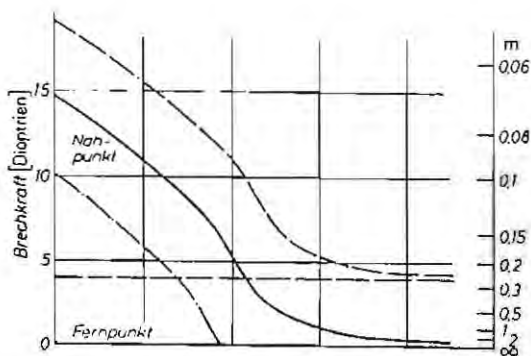


Gambar 9.47 Penampang lintang mata manusia [dari H.U.-Harten].

cahaya, karena sensitifitasnya dapat berubah secara otomatis, mirip seperti film polaroid yang dapat merekam gambar dalam waktu milidetik, otomatis dapat berubah dari 10 hingga 40 DIN.

Selaput tanduk dan lensa mata terdapat antara bilik yang mengandung cairan dan bahan gelas yang terdapat di belakang lensa adalah seperti organ lainnya, mengandung cairan dan mempunyai perbedaan indeks bias kecil. Sumbangan utama daya bias (lebih dari 40 dioptri) adalah selaput tanduk yang dapat melengkung dan terbatas dengan udara. Tanpa adanya pelengkungan selaput tanduk, seandainya selaput tanduk berbentuk bola maka indeks bias organ bagian dalam mata haruslah sama dengan 2 agar sebuah objek di tempat yang jauh dapat diamati dengan baik. Sisanya 15 dioptri disebabkan oleh adanya otot berbentuk cincin yang dapat mengubah, mengatur bentuk lensa mata secara otomatis. Jika mata bekerja untuk melihat sebuah objek berjarak dekat, bentuk lensa mata adalah paling bulat, sedangkan untuk objek berjarak jauh bentuknya menjadi paling datar. Akomodasi seperti ini diatur oleh *iris* dan *pupil*; diameter pupil dapat berubah dari 1 hingga 8 mm.

Selain pengaturan cahaya yang kecil tersebut terdapat pula sumbangan adanya pengaturan arus cahaya masuk sehingga mata dapat mengalami adaptasi hingga sekitar 10^2 kali. Organ mata yang bertanggung jawab untuk itu adalah *retina*. Proses adaptasi terang (pada keadaan banyak



Gambar 9.48 Lebar daya akomodasi terhadap umur. --- mata normal; ----; rabun dekat (+5dp.). Untuk memperoleh daya bias mata harus ditambahkan 40-45 dp.

cahaya) *sel pasak* pada retina akan maju ke depan. Pada adaptasi gelap *sela batang* akan maju ke depan. Sensitifitas kedua macam sel tersebut dapat demikian besar terhadap cahaya maupun sebaliknya, adalah sistem pengaturan kerja dari kesetimbangan redoks (reduksi-oksidasi) bahan-bahan yang terdapat pada sel-sel organ penglihatan tersebut. Kerusakan sejumlah sel-sel batang dapat menyebabkan meningkatnya rangsangan cahaya melebihi harga batas yang diperbolehkan dan hal ini tentunya akan merusak kemampuan penglihatan seseorang.

Bayangan gambar yang sangat tajam pada retina dapat mengganggu, berdasarkan fisiologis makanan dan teknik pengaturan di atas sel-sel yang sensitif terhadap cahaya masih terdapat lapisan sel lainnya. Hanya pada bagian pusat, yaitu *fovea*, dan lapisan sel ini dapat digeser ke bagian pinggir. Dalam hal ini, khususnya pada foveola (diameter 0,3 mm), terdapat sel-sel pasak lebih rapat sehingga ketajaman bayangan maksimum sel pasak ini, terdapat syaraf-syaraf penglihatan. Pada bagian luar lainnya terdapat sel-sel pasak lebih banyak dan berhubungan dengan jaringan syaraf

Daya bias cahaya pada mata dapat diukur secara objektif sedangkan *ketajaman penglihatan* tidak, karena banyak bergantung pada besaran-besaran fisik luar lainnya. *Ketajaman penglihatan* didefinisikan sebagai kebalikan sudut (atau menit) tempat bayangan objek masih jelas terlihat. Harganya adalah berbeda bergantung pada titik atau garis yang masih dapat dipisahkan oleh mata (*minimum perceptibile*) atau untuk membaca huruf atau teks (*minimum legibile*).

Mata yang tidak mempunyai titik terjauh pada jarak tak berhingga disebut *rabun jauh* (*myopi*) sedangkan sebaliknya disebut *rabun dekat* (*hipermyopi*), yaitu jika terletak pada batas akomodasinya. Dengan bertambahnya umur, lensa mata akan kehilangan elastisitasnya. Titik terdekat berubah menjadi titik terjauh, khususnya setelah mencapai umur antara 40 hingga 50 tahun. Hal itu disebabkan oleh kehilangan daya akomodasi.

9.3 Kecepatan Cahaya

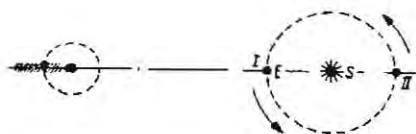
9.3.1 Metode Astronomi

Metode astronomi pertama kali ditemukan oleh Ole Rømer pada tahun

1676. Ia menyimpulkan bahwa kecepatan cahaya terbatas dan diperolehnya pengukuran harga kecepatan cahaya dengan benar.

Bulan Jupiter menjadi gelap (terlindung), persis seperti bulannya bumi pada saat memasuki bayangan planetnya (gambar[9.49]). Waktu antara keadaan gelap bulan Ganymed dapat diperoleh, jika bumi diamati berada paling dekat dengan matahari ("jupiter berada di sebalik matahari", *I* pada gambar[9.49], yaitu $T = 171,99$ jam. Terdapat 25 keadaan gelap bulan jupiter dalam waktu setengah tahun. Keadaan gelap ke-26 haruslah muncul dalam waktu 25.177,99 jam. Akan tetapi, di dalam kenyataannya keadaan gelap tersebut muncul setelah 1000 detik kemudian. Di antara waktu tersebut bumi terhadap Jupiter berada di sekitar jarak orbit bumi, yaitu sekitar $3 \cdot 10^8$ km (ada gambar[9.49] ditunjukkan dari posisi *I* ke *II*). Pergeseran waktu keadaan gelap adalah sama dengan waktu yang diperlukan cahaya untuk melintasi jarak tersebut maka diperoleh kecepatan cahaya sebesar:

$$c = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ km}}{1000 \text{ detik}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{det.}}$$

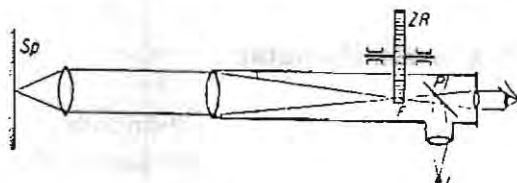


Gambar 9.49 Metode astronomi dari Ole Rømer untuk menghitung kecepatan cahaya

9.3.2 Metode Roda Gigi

Galilei sekitar tahun 1600 membuat percobaan untuk menghitung kecepatan cahaya, yaitu dengan menggunakan dua orang laki-laki yang membawa lampion masing-masing berada di atas bukit yang berbeda. Salah seorang dari keduanya harus membuka lampion dengan tiba-tiba

sedangkan yang lainnya harus melakukan hal yang sama, segera setelah ia melihat laki-laki pertama membuka lampionnya. Percobaan pertama ini dapat meramalkan kecepatan cahaya pengamatan pergeseran celah lampionnya dan kilauan lampion lainnya. Fizeau menggantikan orang kedua dengan sebuah cermin dan celah lampion digantikannya dengan roda gigi sehingga cahaya yang berasal dari lampu, dipantulkan cermin akan dapat diamati terputus-putus secara periodik (gambar[9.50]). Jika berkas cahaya yang dibalikkan cermin tepat mengenai sebuah gigi roda, pengamat tidak akan dapat melihat sumber cahaya tersebut. Dengan menambah kecepatan roda gigi hingga dua kalinya, bayangan gambar sumber cahaya kembali dapat diamati karena cahaya yang derefleksikan



Gambar 9.50 Metode roda gigi dari Fizeau untuk mengukur kecepatan cahaya

cermin dapat melewati celah antara gerigi roda. Agar celah berada pada posisi semula diperlukan waktu sebesar $\tau = 1/\nu z$, yaitu jika roda gigi diputar sebanyak ν kali dalam 1 detik dan z adalah jumlah gerigi roda. Jika roda berada pada jarak s , akan diperoleh kecepatan cahaya sebesar:

$$c = \frac{2s}{\tau} = 2\nu s z$$

Untuk pengukuran yang lebih presisi pada saat sekarang ini, sebagai roda gigi digunakan sel Kerr sehingga berkas cahaya berhubungan dengan modulasi tegangan listrik (lihat §10.4.4). Frekuensinya dapat diukur secara eksak dan apa yang sulit dilakukan adalah untuk memperoleh ketepatan yang sama agar harga s tetap.

Percobaan yang dibuat Fizeau ini dapat pula dikembangkan dengan menggantikan cahaya dengan gelombang radar (panjang gelombang dalam cm) dan dengan jarak yang tidak terlalu jauh, gelombang radar yang

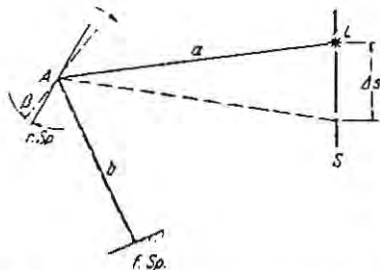
mengalami refleksi dapat diukur. Dengan menggunakan jarak bulan atau planet-planet yang berdekatan refleksi gelombang radar atau laser melalui benda-benda langit tersebut dapat diukur dan akan diperoleh hasil yang lebih tepat dibandingkan dengan metode astronomis. Dengan mengetahui jarak reflektor akan diperoleh kebalikan waktu lintas gelombang sama dengan impuls (momentum) gelombang.

Dengan pertolongan efek Doppler, melalui refleksi gelombang radar maupun laser sebuah benda bergerak, tidak hanya akan diperoleh kecepatan benda, melainkan juga kecepatan partikel-partikel yang terdapat pada berkas molekuler atau berkas neutron partikel yang mengambang di dalam zat cair yang mengalir.

9.3.3 Metode Cermin Berputar

Berkas cahaya berasal sumber L dilewatkan pada sebuah cermin yang dapat berputar r . Sp (misalkan jarak cermin dari sumber cahaya a) dan akan dibelokkan oleh cermin tetap f . Sp . jarak cermin ini dari r . Sp adalah b gambar[9.51]). Cermin akan merefleksikan cahaya seperti itu sehingga cahaya dapat kembali dengan menempuh lintasan yang sama, jika mengenai r . Sp . Cermin yang diputar dengan kecepatan sudut ω pada saat cahaya menempuh jarak $2b$ dalam waktu ΔT akan membentuk sudut $\beta = \omega \Delta T$ maka

$$\Delta \tau = \frac{2b}{c}; \quad \beta = \frac{2b\omega}{c}$$



Gambar 9.51 Metode cermin berputar dari Facoult untuk mengukur kecepatan cahaya

Kemudian cahaya dijatuhkan pada layar yang terdapat di dekat sumber cahaya L dan mengalami pergeseran sebesar Δs , $\Delta s = a \cdot 2\beta$; Dengan demikian, didapat bahwa

$$c = \frac{2b\omega}{c} = \frac{4ab\omega}{\Delta s}$$

Metode Focault ini relatif mempunyai ketepatan yang baik di samping hanya memerlukan jarak lintasan cahaya relatif pendek dibandingkan dengan metode Fizeau. Dengan metode Focault ini menjadi mudah untuk mengukur kecepatan cahaya dengan menggunakan medium lain selain udara. Untuk itu, antara cermin berputar dan cermin tetap diletakkan pipa dengan sisi penutup dilapisi kaca datar dan di dalam pipa ini diisi suatu medium lain. Dari hubungan indeks bias dan kecepatan cahaya di medium/kecepatan cahaya di vakuum, akan diperoleh harga kecepatan cahaya di medium tersebut.

Bagaimana kecepatan cahaya berubah di dalam medium yang bergerak, Fizeau membuat perhitungan dengan metode interferensi. Percobaan ini mempunyai arti penting dalam pembuktian teori relativitas khusus. Juga percobaan Michelson-Morley yang terkenal itu dapat mengukur adanya perbedaan kecil kecepatan cahaya di dalam medium (§15.1.2).

9.3.4 Metode Resonator

Dua percobaan untuk mengukur kecepatan cahaya di atas berlandaskan pada panjang lintasan cahaya dan waktu tempuh cahaya. Selain dengan cara tersebut, tentunya terdapat pula kemungkinan lain, yaitu kecepatan cahaya dapat diperoleh berdasarkan perkalian antara frekuensi dan panjang gelombang. Karena frekuensi cahaya tampak tidak dapat diukur secara langsung, percobaan harus dilakukan dengan menggunakan gelombang elektromagnetik yang ditimbulkan oleh peralatan elektroteknik, yaitu gelombang elektromagnetik yang mempunyai panjang gelombang dalam orde cm atau lebih panjang lagi. Cara ini dapat dilakukan dengan mencontoh prosedur percobaan Kundt (§4.4.1), yaitu mengukur panjang gelombang dari

gelombang diam (§7.7.3), atau mengukur frekuensi resonansi pada resonator "hampa"; panjang gelombang dapat diperoleh dari ukuran ruang "hampa" (ukurannya dalam orde dm). Prosedur percobaan seperti itu mempunyai keuntungan yang besar, karena resonator dapat diisolasi sehingga kecepatan cahaya di vakuum dapat diperoleh secara langsung.

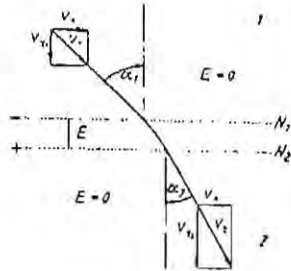
Dalam beberapa puluh tahun terakhir ini ketiga metode yang telah dibahas di atas, melalui modifikasi penyempurnaan ketelitian, selalu dilakukan kembali sehingga diperoleh batas kesalahan kecepatan cahaya yang makin lama semakin kecil. Hingga saat ini kecepatan cahaya yang paling tepat yang pernah diperoleh manusia sehingga merupakan salah satu konstanta alamiah adalah sebesar:

$$c = (2,9979250 \pm 0,000001) \frac{\text{m}}{\text{det}}$$

9.4 Geometri Optika Elektron

9.4.1 Hukum Pembiasan Berkas Elektron

Suatu lapisan tipis yang diberi medan listrik dapat membelokkan berkas elektron persis seperti peristiwa pembiasan cahaya dari dua medium dengan indeks bias berbeda. Dalam kedua kasus ini, pembelokkan berkas dapat dijelaskan dengan hukum pembiasan Snellius. Dengan "geometri" medan listrik tertentu berkas elektron yang datang dari satu titik dapat difokuskan pada satu titik, persis seperti kejadian berkas cahaya pada lensa (cembung). Dengan adanya pengetahuan kelakuan berkas elektron di dalam medan listrik dan magnet demikian, muncul konsep-konsep *optika elektron*. Lebih tepat lagi (tanpa memperhatikan sifat-sifat gelombang partikel elektron) dapat dikatakan optika elektron pertama kali diperkenalkan oleh H. Busch, 1926. Ia mengatakan bahwa berkas elektron mempunyai sifat yang mirip berkas cahaya, bahkan dalam banyak kasus, berkas elektron akan menghasilkan bayangan yang lebih baik lagi. Berdasarkan penemuannya, optika elektron mempunyai arti penting dalam berbagai bidang.



Gambar 9.52 Hukum pembiasan optika elektron

Sebuah elektron mempunyai kecepatan v_1 datang dengan sudut α_1 pada tali logam halus N_1 . Antara tali tersebut dan tali N_2 diberi tegangan sebesar U ; di luar (di dalam bagian I dan 2) tidak terdapat medan (lihat gambar[9 52]). Elektron kemudian akan dipercepat oleh medan listrik antara N_1 dan N_2 . Komponen kecepatan transversal v_x tetap konstan, tetapi kecepatan longitudinal v_y bertambah: $v_{y2} > v_{y1}$. Harga kecepatan v_2 dapat dicari dari hukum kekekalan energi sebagai berikut.

$$\frac{m}{2} v_2^2 = \frac{m}{2} v_1^2 + eU \quad (9.32)$$

Dari gambar[9 52] dapat ditentukan bahwa

$$\sin \alpha_1 = \frac{v_x}{v_1} \quad \text{dan} \quad \sin \alpha_2 = \frac{v_x}{v_2}$$

sehingga

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (9.33)$$

Dengan memberi kecepatan awal elektron v_1 dan tegangan U maka ruas kanan persamaan[9 33] merupakan konstanta, atau dengan perkataan lain bahwa v_1 dan v_2 tidak bergantung pada sudut datang α_1 . Untuk elektron

yang memasuki daerah bermedan listrik berlaku hukum pembiasan dan ternyata sesuai dengan hukum pembiasan seperti dirumuskan oleh Snellius. Dengan demikian, ruas kanan persamaan [9.33] dapat diperlakukan sama dengan perbandingan "indeks bias" dari ruang 1 dan 2

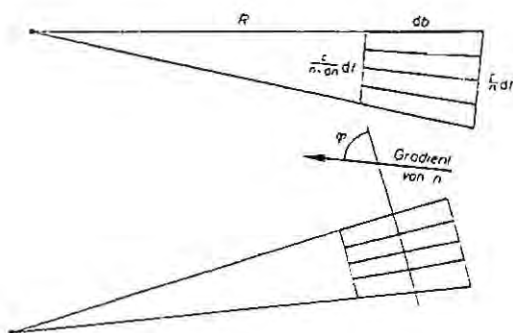
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_2}{v_1} \quad (9.34)$$

jika potensial U di dalam ruang 2 lebih besar dari ruang 1. Jika elektron yang berasal dari ruang 1 mempunyai energi $\frac{1}{2} m v_1^2 = e U_0$ dan di ruang 2 akan mempunyai energi $\frac{1}{2} m v_2^2 = e(U_0 + U)$, maka

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{U_0 + U}{U_0}} = \sqrt{1 + \frac{U}{U_0}} \quad (9.35)$$

Berkas Cahaya Melengkung

Jika di dalam medium indeks bias selalu bergantung tempat, berkas cahaya akan dibelokkan. Hal itu dengan secara sederhana dapat ditunjukkan melalui gambaran gelombang. Sebuah muka gelombang dengan lebar db menjalar dan satu ujung gelombang ("kanan") terdapat di dalam medium berindeks bias n dan ujung lainnya ("kiri") di dalam medium dengan indeks bias $n+dn$. Dalam waktu sesaat dt bagian kanan dan kiri gelombang



Gambar 9.53 Bundel cahaya yang dibelokkan di dalam medium dengan indeks bias bervariasi terhadap tempat (gradien indeks bias). Rambatan tegak lurus (atas) dan menyudut terhadap gradien indeks bias (bawah).

masing-masing akan menjalar sejauh

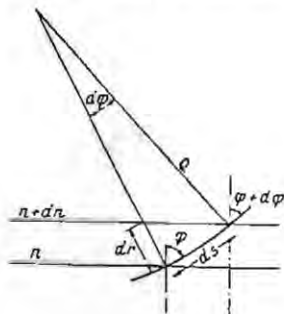
$$\text{kanan: } \left(\frac{c}{n}\right) dt$$

$$\text{kiri: } \frac{c}{n + dn} dt \approx \frac{c dt}{n} \left(1 - \frac{dn}{n}\right)$$

Muka gelombang cenderung miring ke kiri. Pertambahan panjang muka gelombang diilustrasikan pada gambar[9.53] dan akan sampai pada suatu titik berjarak R . Berdasarkan gambar[9.53] tersebut dapat diperoleh bahwa $db/R = dn/n$ atau

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{n} \frac{dn}{db} \quad (9.36)$$

Persamaan itu menyatakan ukuran pembelokkan berkas cahaya yang tegak lurus di setiap tempat, terdapat muka gelombang. Pembelokkan maksimum akan diperoleh jika berkas terletak persis tegak lurus terhadap *gradien indeks bias*. Jika terdapat sudut φ antara berkas cahaya dan gradien indeks bias, terdapat pembelokkan yang lebih kecil sebanding dengan faktor $\sin \varphi$ terhadap harga pembelokkan maksimum.



Gambar 9.54 Bundel cahaya yang dibelokkan atau lintasan elektron di dalam medium (medan) yang mempunyai indeks bias berubah-ubah terhadap tempat

Pengamatan yang sama dapat berlandaskan hanya dari hukum pembiasan cahaya, walaupun seperti diketahui bahwa keadaan berkas $\perp$ terhadap gradien indeks bias merupakan kondisi batas yang diperlukan,

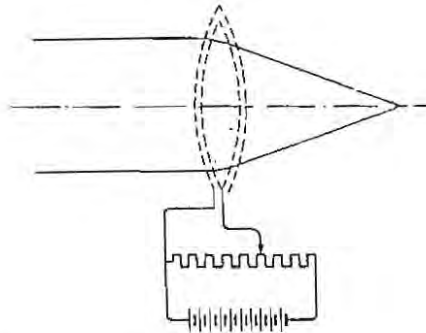
tetapi kasus serupa dapat dipakai untuk menerangkan fenomena pembelokkan pada berkas elektron. Dari persamaan [9.35] diketahui bahwa harga n dapat diganti dengan $\sqrt{U_0 + U}$. Dengan demikian, $n^{-1} dn \cdot n$ ekuivalen dengan:

$$\frac{1}{\sqrt{U_0 + U}} = \frac{1}{2} \frac{dU}{db} \frac{1}{\sqrt{U_0 + U}} = \frac{1}{2} \frac{1}{U_0 + U} \frac{dU}{db}$$

dan ukuran pembelokan menjadi:

$$\frac{j}{R} = \frac{1}{2} \frac{1}{U_0 + U} \frac{dU}{db} = \frac{e}{m v^2} \frac{dU}{db} \quad (9.37)$$

Dalam hal itu, dU/db dapat diartikan sebagai komponen medan yang tegak lurus terhadap lintasan elektron dan gaya sentripetal yang dialami elektron



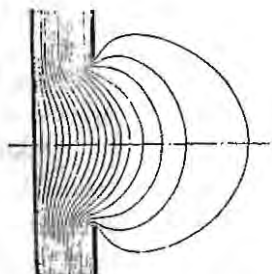
Gambar 9.55 lensa elektron lapisan ganda

$m v^2/R$ sehingga membentuk lintasan yang dibelokkan. Dengan demikian, persamaan [9.37] tidak lain merupakan persamaan gerak Newton untuk lintasan partikel yang mengalami pembelokkan.

9.4.2 Lensa Elektron Listrik

Di dalam daerah bebas medan lintasan berkas elektron akan berbentuk

garis lurus. Jika berkas elektron memasuki ruang antara bebas medan dan ruang yang mempunyai potensial berbeda, berkas akan dibelokkan



Gambar 9.56 Permukaan ekuipotensial antara dua plat elektroda dan sebuah celah berbentuk lingkaran dan antara kedua plat diberikan tegangan tertentu

Apabila daerah antara relatif tipis terdapat medan, berlaku hukum pembiasan Snellius. "Indeks bias" suatu daerah bergantung pada energi awal elektron dan potensial U yang terdapat pada daerah tersebut. Apabila daerah yang diilustrasikan gambar[9.55] dibatasi dua buah kawat halus berbentuk permukaan bola, "lensa elektron" akan membiaskan berkas



Gambar 9.57 Lapisan-lapisan dengan indeks bias yang sama pada lensa mata

elektron persis seperti pembiasan berkas cahaya oleh sebuah lensa. Daya bias "lensa lapisan ganda" ini diperoleh berdasarkan §9 2.3 sebagai berikut.

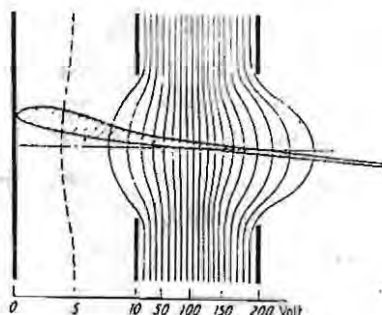
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

atau dari pers[9.35]

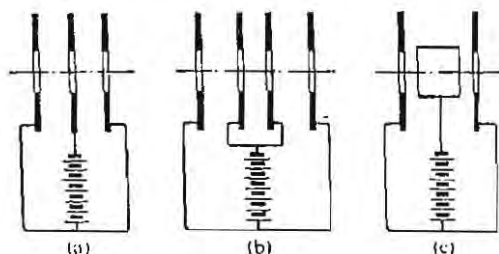
$$\frac{1}{f} = \left(\sqrt{1 + \frac{U}{U_0}} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (9.38)$$

Lensa elektron ini mempunyai kelebihan dibandingkan dengan lensa biasa yaitu bahwa indeks biasanya dapat divariasi sesuai dengan perubahan potensial antara kedua kawat halus tersebut. Selain itu, kelengkungan jari-jari r_1 dan r_2 juga dapat divariasi sesuai dengan keinginan kita. Akan tetapi, untuk membuat kawat halus yang lebih bersih dari gangguan medan listrik yang dapat ditimbulkan oleh masing-masing kawat adalah amat sukar. Untuk mengatasi kesulitan tersebut, biasanya kedua elektroda lengkungan kawat tersebut digantikan dengan elektroda yang dapat menimbulkan permukaan ekuipotensial, yaitu dua elektroda yang dapat berotasi secara simetri sehingga dapat menimbulkan permukaan ekuipotensial berbentuk bola dilengkapi dengan celah, seperti diilustrasikan gambar[9.56]. Terdapat berbagai cara untuk menciptakan permukaan lengkung ekuipotensial sehingga berkas elektron dapat terkumpul pada satu titik. Rumusan matematik paling sederhana sekalipun tidak harus dipakai untuk mencari permukaan ekuipotensial, melainkan harus dicari secara eksperimen, yaitu dengan melakukan pengukuran melalui jarum penduga (sonde). Lensa elektron lapisan ganda seperti diilustrasikan gambar[9.55] persis seperti lensa biasa dan dibuat dengan bahan yang homogen sedangkan dengan elektroda plat bercelah lingkaran adalah lensa yang mempunyai lapisan rotasi simetri yang masing-masing lapisan mempunyai "indeks bias" berbeda, yaitu mirip dengan cahaya yang masuk di dalam lensa mata manusia (gambar[9.57])

Pada gambar[9.56] diilustrasikan potongan melalui sumbu elektroda plat bercelah dan menunjukkan garis-garis bidang ekuipotensial celah melingkar di depan elektroda lainnya. Plat elektroda bercelah harus dibumikan dan plat elektroda lainnya dihubungkan dengan kutub positif. Di sekitar garis putus-putus permukaan potensial adalah berbentuk bola. Dari sudut pandang optika elektron permukaan tersebut menggambarkan lintasan elektron. Berkas elektron yang datang dari kanan dibuat konvergen dan titik-titik yang memotong lintasan elektron adalah titik fokus *lensa bercelah* ini



Gambar 9.58 Suatu garis bekas lensa pendar untuk membentuk elektron dari emisi katode



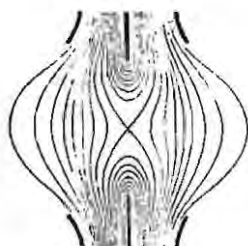
Gambar 9.59 a-c Masing-masing lensa celah (a. dan b) dan silinder (c)

Jika kutub potensial plat dibalik, elektron akan dipercepat, tetapi arahnya tidak menentu. Divergensi bundel elektron ini dapat dihindari jika plat datar yang tidak bercelah digantikan dengan plat bercelah (lihat gambar[9.58]), yang lebih positif dibandingkan dengan plat bercelah pertama.

Lensa seperti yang digambarkan pada gambar[9.56] dan gambar[9.58], terdiri atas (satu atau) beberapa plat bercelah. berseberangan dengan ruang luar (juga di samping elektron terdapat objek yang dapat mengemisi) terdapat potensial berbeda-beda, disebut *lensa*

pendar Seperti halnya pada lensa objektif pendar pada optika gelombang timbulnya berkas adalah seketika terbentuknya bayangan objek pada sistem pembias. Di samping celah digunakan pula selinder yang dikombinasi dengan plat bercelah atau beberapa selinder koaksial (*lensa selinder*) dengan potensial yang berbeda-beda (gambar[9.61]). Jika beberapa plat bercelah dikombinasi seperti itu, sehingga pada kedua sisi sistem, pada jarak yang jauh, terdapat ruang tanpa medan, sistem demikian disebut *lensa tunggal*. Umumnya kedua celah luar mempunyai potensial yang sama. Gambar[9.59] mengilustrasikan lensa yang digunakan. Lensa tersebut dapat digunakan sebagai deretan lensa-lensa pendar. Gambar[9.60] menunjukkan kurva potensial lensa tunggal sederhana.

Pada lensa selinder yang digambarkan pada gambar[9.61a] terdapat medan yang bersifat mengumpulkan berkas elektron, dengan permukaan potensial cekung ke kanan, tetapi terhambur pada daerah permukaan ekuipotensial ke kanan. Walaupun kecepatan elektron akan bertambah ke arah kanan, tetapi pengaruh hamburan tersebut kecil dibandingkan dengan sifat konvergensi medan. Di bawah lensa selinder pada gambar[9.61a] dilukiskan pula lensa gelas yang mempunyai pengaruh sama pada berkas cahaya.

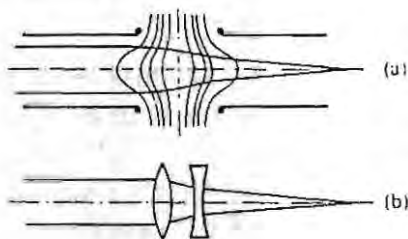


Gambar 9.60 Permukaan ekuipotensial di dalam medan pada lensa tunggal tipe pada gambar[9.59a].

Lensa elektron juga mempunyai kesalahan yang mirip dengan lensa gelas, dengan membuat bentuk lingkaran berkas tertentu kesalahan dapat diatasi walaupun tidak seluruhnya dapat diatasi.

Jika perbedaan tegangan-tegangan yang terdapat pada masing-masing

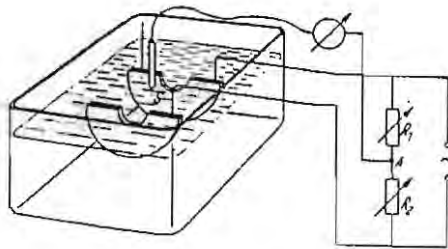
daerah dibuat dalam perbandingan yang sama dengan tegangan percepatan elektron semula, misalkan semua tegangan digandakan maka daya bias $1/f$ lensa ini tidak mengalami perubahan. Bentuk permukaan ekuipotensial, khususnya jari-jari kelengkungan r tidak mengalami perubahan juga. Hal ini mempunyai arti pula bahwa lintasan elektron tidak mengalami perubahan sama sekali, walaupun berkas elektron tersebut bergerak dengan kecepatan yang sama sekali berbeda. Kesimpulan yang sama akan diperoleh pula dari persamaan [9.38].



Gambar 9.61 a. dan b. Lensa selinder (a) dan lensa optis analognya

Dalam pernyataan indeks bias persamaan [9.35] atau indeks bias pada persamaan [9.38] tidak terdapat suku yang bergantung terhadap massa maupun muatan. Berarti pada distribusi tegangan yang sama lintasan elektron tidak bergantung pada muatan maupun massanya. Secara prinsip mikroskop elektron dapat dikoreksi dengan menggunakan berkas partikel lain proton ataupun deutron, yaitu jika energi partikel yang masuk adalah sama.

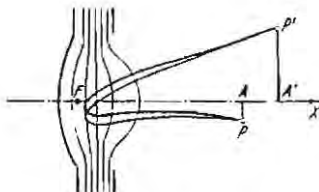
Potensial di sekitar elektroda yang dapat dirotasi secara simetri dapat ditentukan dengan menggunakan *palung elektrolit*. Distribusi medan atau bentuk permukaan ekuipotensial yang terdapat di antara dua atau lebih elektrode yang diberi tegangan tertentu tidak mengalami perubahan jika elektrode-elektrode tersebut terdapat di dalam larutan elektrolit yang dapat menghantar muatan listrik (misalkan digunakan air ledeng). Hal ini dapat diketahui dari adanya hubungan antara kerapatan arus dan kuat medan. Untuk menghindari adanya polarisasi (lihat §6.5.3) harus dihindarkan penggunaan tegangan bolak-balik. Karena di bagian tengah (permukaan



Gambar 9.62 Larutan palung elektrolit untuk menentukan distribusi potensial

meridian) dalam medan rotasi simetri tidak terdapat "arus", distribusi medan akan tetap. Jika sebagian atau seluruh bagian elektroda-elektroda tersebut, atau dengan menggunakan model elektrode berukuran sama atau lebih kecil, dicelupkan di dalam cairan, dan diketahui bahwa permukaan meridian distribusi medan adalah berimpit dengan permukaan cairan (gambar[9.62]). Palung harus lebih besar dari model yang sama. Pada keadaan lebih dari dua sistem elektroda perbandingan tegangan antara sistem harus persis sama dengan keadaan sebenarnya.

Jika potensial di permukaan diberi ujung *jarum penduga* (sonde), harga potensial akan sama dengan tegangan yang terdapat antara R_1 dan R_2 , dan alat monitor arus tidak menunjukkan adanya arus. Jika ujung jarum di permukaan digeser sedemikian rupa, hingga alat penunjuk arus tetap tidak menunjukkan adanya arus, dikatakan bahwa jejak yang dideteksi oleh ujung jarum tersebut adalah bidang ekuipotensial.



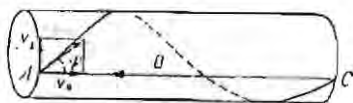
Gambar 9.63 Cermin elektron

Cermin Elektron

Pada sistem yang diilustrasikan gambar[9.63] berkas elektron mengalami refleksi, persis seperti cahaya direfleksikan oleh cermin cekung. Permukaan ekuipotensial dibentuk oleh elektroda yang terhadap plat bercelah mempunyai potensial negatif

9.4.3 Lensa Magnet Panjang

Di dalam medan magnet, misalnya di dalam sebuah kumparan yang dialiri arus listrik, terdapat elektron dengan kecepatan v pada arah sumbu kumparan dan garis-garis medan magnet membentuk sudut φ terhadap sumbu kumparan sesuai dengan aturan tangan kanan (gambar[9.64]). Komponen v pada arah medan magnet adalah $v_{||} = v \cos \varphi$ dan komponen tegak lurus adalah $v_{\perp} = v \sin \varphi$. Gerak elektron merupakan superposisi gerak melingkar pada bidang yang tegak lurus terhadap arah gaya yang bekerja padanya dan gerak tersebut di satu sisi mempunyai kecepatan sudut ω dan gerak lainnya merupakan gerak lurus beraturan pada arah gaya sehingga gaya total yang berkerja pada muatan tersebut selalu sama dengan nol



Gambar 9.64 Lensa magnet yang terdiri atas sebuah kumparan panjang yang dialiri arus listrik. Kumparan tidak digambarkan, melainkan hanya lintasan elektron yang bergerak di dalam medan magnet homogen di kumparan

Kecepatan sudut ω berdasarkan persamaan[8.13] hanya ditentukan oleh muatan spesifik dan kuat medan. Sebaliknya, kecepatan sudut ini tidak bergantung pada kecepatan:

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} = \frac{e}{m} B$$

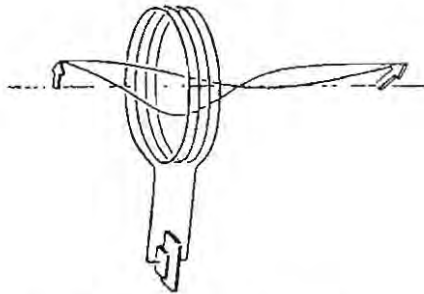
Berarti pula bahwa waktu T yang diperlukan elektron untuk memotong garis-garis medan tidak bergantung pada sudut

$$\tau = \frac{2\pi}{eB/m}$$

Selanjutnya bahwa semua elektron yang terdapat di dalam bundel yang berasal dari titik A dan bergerak dengan sudut yang berbeda-beda dan memotong garis-garis medan pada waktu yang sama. Jarak antara dua titik potong C dan A terjadi dalam waktu T dengan kecepatan $v \cos \varphi$ adalah:

$$AC = \frac{v \cos \varphi 2\pi}{eB/m}$$

Jarak lintasan ini bergantung pada φ , tetapi jika sudut kecil, $\cos \varphi \approx 1$. Dengan ketelitian ini elektron-elektron yang berasal dari titik A



Gambar 9 65 Kurva lensa magnet

dengan sudut yang kecil terhadap arah gaya akan bertemu di titik C kembali dan jarak titik tersebut dari A adalah

$$AC = \frac{2\pi v}{eB/m} \quad (9.39)$$

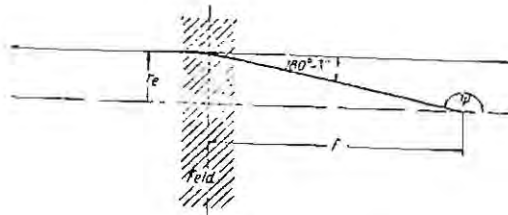
C adalah bayangan gambar di A. Kumparan magnet ini dapat dianggap lensa elektron dengan daya bias $1/f = eB/m\pi v$.

9.4.4 Lensa Magnet Pendek

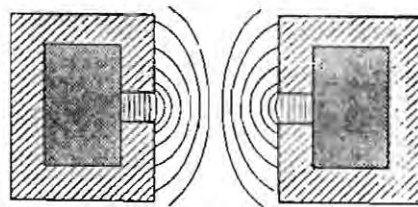
Juga medan magnet yang tidak homogen dapat dipakai sebagai lensa magnet, jika medan tersebut mengalami rotasi secara simetris, misalkan medan yang ditimbulkan oleh sebuah kumparan pendek yang dialiri arus listrik (gambar[9.65]).

Gaya Lorentz yang bekerja pada elektron selalu mempunyai arah tegak lurus terhadap arah kecepatan elektron yang masuk ke dalam medan magnet tersebut akan tetap konstan. Dalam hal itu, setiap lensa magnet berbeda dari lensa listrik. Sementara pada lensa listrik dapat ditimbulkan gambar *real*, bayangan pada lensa magnet akan mengalami rotasi (seperti pada lensa optik) sehingga bayangan menjadi *real* dan terbalik karena lintasan gerak elektron di dalam medan magnet berbentuk spiral. Pada kumparan panjang lintasan elektron akan mengalami rotasi sebesar 360° , sehingga bayangan tetap pada posisi seperti halnya benda. Sementara itu, pada kumparan pendek sudut rotasi tidak 360° karena kurva lintasan yang berbentuk lingkaran tidak selalu mempunyai besar yang sama (ingat medan magnet inhomogen) sehingga tinggi bayangan benda tidak secara sederhana sebanding dengan tinggi (baca jari-jari) lintasan spiral elektron.

Pada kumparan panjang berkas yang sejajar terhadap sumbu kumparan akan tetap mempunyai lintasan paralel terhadap sumbu. Pada saat berkas elektron masuk dan keluar sebaliknya pada kumparan pendek, elektron yang sejajar terhadap sumbu kumparan akan mengalami gaya Lorentz karena garis-garis medan yang konvergen maupun divergen tidak lagi paralel terhadap kecepatan elektron. Gaya ini memaksa elektron bergerak pada arah azimut sehingga muncul komponen kecepatan azimut elektron dan menyebabkan gerak elektron pada arah radial karena adanya gaya Lorentz tersebut, yaitu arahnya selalu dibelokkan terhadap sumbu kumparan. Perhitungan kuantitatif menghasilkan daya bias lensa magnet sebagai berikut.



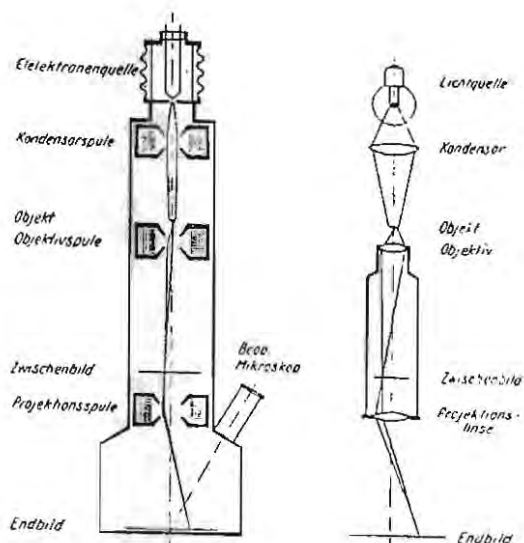
Gambar 9.66 Perhitungan jarak titik fokus pada lensa magnet pendek



Gambar 9.67 Kumparan berbungkus besi dengan celah sebagai lensa dengan titik fokus

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{8U} \int_{-\infty}^{+\infty} B^2 dx \quad (9.40)$$

Penggunaan praktis lensa magnet untuk *mikroskop elektron* selalu digunakan lensa magnet dengan titik fokus pendek. Oleh karena itu, panjang lensa hanya diperbolehkan kecil. Untuk itu, harus digunakan medan magnet yang amat kuat. Untuk itu digunakan kumparan yang terbungkus besi dengan sebuah celah sempit dengan garis-garis gaya medan magnet dilukiskan gambar[9.67].



Gambar 9 68 Mikroskop elektron dengan lensa magnet; di samping adalah gambaran berkas cahaya masuk pada mikroskop optik

9.4.5 Peralatan Optik Elektron

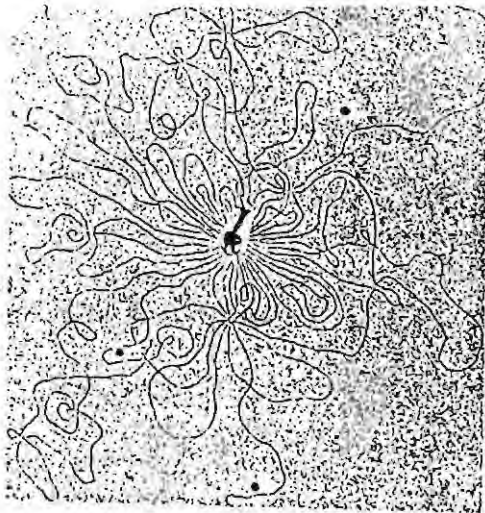
Jumlah peralatan yang menggunakan optika elektron pada saat ini telah dikembangkan dalam jumlah yang sangat besar. Salah satunya adalah osilograf elektron (§8.2.3), dengan perbaikan demi perbaikan metode optika elektron telah dikembangkan menjadi mikroskop elektron. Pada alat ini berkas muatan yang sangat intensif berasal dari katoda masuk melalui sebuah celah di tengah-tengah dan akan difokuskan pada sebuah layar (misalkan televisi) sehingga terbentuk gambar yang sangat intensif di layar tersebut.

Sukses besar di bidang optika elektron adalah diciptakan *mikroskop elektron* yang bekerja berdasarkan prinsip-prinsipnya. Bergantung pada objek yang akan dibuat bayangan gambarnya, elektron-elektron yang digunakan dapat berasal dari elektron emisi atau elektron pancaran yang

dikumpulkan di dalam tabung katoda pijar. Oleh karena itu, dibedakan antara *mikroskop elektron emisi* dan *mikroskop elektron pancaran*.

Mikroskop elektron berbeda dengan mikroskop cahaya biasa untuk keperluan *mikrofotografi*, pada mikroskop elektron lensa okular digantikan dengan lensa proyeksi. Gambar[9.68] menunjukkan bentuk bangun mikroskop elektron secara skematik. Objek yang digunakan misalnya bakteri, kristal ditempatkan di atas sebuah foile seluloid dan ditembak oleh berkas elektron dengan energi hingga 100 keV. Bayangkan gambar akan dijatuhkan pada layar berpendar (*fluoresens*) atau plat fotografi. Untuk bahan *amorf* bayangan gambar akan diperoleh karena elektron melalui ketebalan yang berbeda atau kerapatan bahan yang berbeda dan banyak sedikitnya bergantung pada berkas datang yang dihamburkan sebanding dengan massa objek yang dibombardir elektron. Oleh karena itu, bayangan gambar yang dibentuk oleh mikroskop elektron harus diterjemahkan dengan cara yang berbeda dibandingkan dengan mikroskop optik karena kemampuan absorpsi cahaya dan elektron pada objek berbeda.

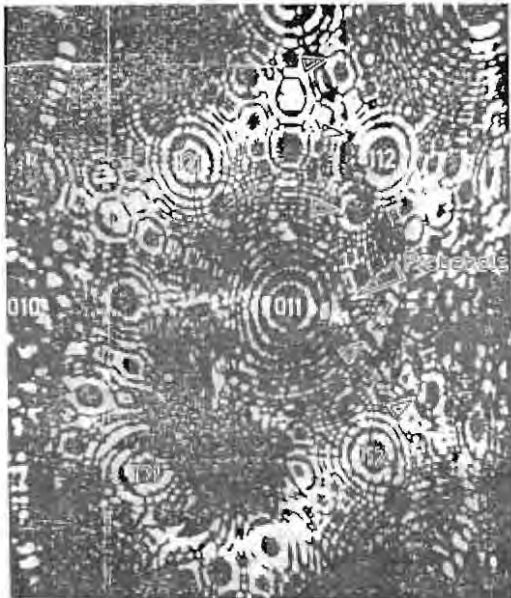
Gambar[9.69] adalah suatu *Bakteriophage* (T2) mengandung kepala



Gambar 9.69 *Bakteriophage* (T2)

(sampul protein yang biasanya terbungkus oleh lapisan DNA) dan ekor. T2 termasuk hewan pemakan dan ukurannya lebih kurang 1000 kali bakteri yang terdapat di dalam usus *Eschericia coli* dapat menginjeksi DNA pada mangsanya melalui ekor sebagai jarum suntiknya. DNA yang masuk di dalam pabrik biokimia bakteri akan dikopi sehingga terbentuk protein kulit. E coli yang dirusak akan mati, sebagai gantinya akan terbentuk 100 virus. Pada gambar [dari Kleinschnidt] kulit akan pecah melalui kejutan osmotis (larutan hipotonis) dan paket rantai DNA yang terlepas akan bergerak ke luar. Panjang virus lebih kurang $0,2 \mu\text{m}$ dan panjang rantai DNA-nya adalah $34\mu\text{m}$. Sebaliknya DNA E. coli mempunyai DNA rantai tunggal dan panjangnya sekitar 1,2 mm, merupakan molekul terpanjang yang pernah diketahui.

Perbesaran bayangan pada mikroskop elektron secara teoretis adalah tidak terbatas. Faktor perbesaran dapat mencapai orde sepuluh pangkat

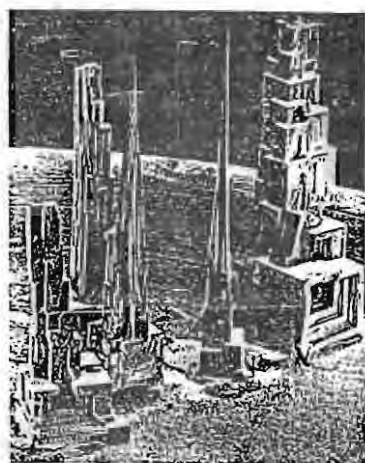


Gambar 9 70 Pengambilan bayangan gambar dengan mikroskop medan ion: Atom-atom gas akan mengalami ionisasi melalui jarum yang ujungnya sangat runcing dan diberi medan (di sini dipakai logam Wolfram) dan bayangan gambar yang dibuat adalah berukuran atomik dan probabilitas ionisasi yang berbeda adalah maju ke depan dari permukaan layar monitor [dari E.W. Mueller]

sekian kali perbesaran pada mikroskop optik. Dengan ditemukannya mikroskop elektron ini, semua peristiwa atau objek mikro yang tadinya tidak dapat diamati, sekarang dapat diteliti dengan baik. Lensa objektif elektron yang digunakan dalam praktiknya secara prinsip masih mengandung kesalahan, yaitu kesalahan aberasi sferis yang belum dapat diatasi dengan sempurna.

Dengan mikroskop elektron emisi bahkan dapat diamati molekul-molekul super (*supermolekul*) atau bentuk bangun kristal dalam skala atomik

Mikroskop elektron perunut (scanning electron microscope [SEM]) dapat merekam peristiwa yang tadinya hanya ilusi belaka. Bayangan yang dibentuk mikroskop ini bukanlah bayangan gambar dalam pengertian biasa, melainkan dibentuk oleh titik demi titik, seperti halnya bayangan gambar pada televisi. Sebuah sumber elektron yang difokuskan dengan baik menyentuh objek, bagian demi bagian dirunut (*scanning*) sehingga emisi sekunder masing-masing titik dapat direkam untuk disatukan dalam bentuk bayangan gambar.



Gambar 9.71 Bukan pemandangan di planet Mars, melainkan gambar kristal Whisker yang dikembangkan di atas lapisan semikonduktor Pb-Zn-Te [gambar stereo micrograph Allan Clark Research Lab. Co. Ltd. Agustus 1972 perbesaran lemah relatif 40 kali]

Soal-Soal § 9.1

9.1.1 Matahari menggambarkan bulatan di atas tanah di tengah hutan. Bagaimana hal tersebut dapat terjadi? Apakah matahari melukiskan kembali sela-sela daun atau sesuatu yang lain? Apakah bergantung pada perbandingan jarak apa yang dilukiskannya?

9.1.2 Winnetou dan Old Sutherhand berlomba kembali melewati tempat yang disenangi mereka, yaitu jurang dengan dinding yang tingginya 200 kaki. Tiba-tiba Winnetou mengangkat ikat pinggang perakunya ke atas, lalu menembakkan pistolnya ke arah titik merah yang mengintai di pinggir atas jurang dan peluru menembus titik tersebut sebelum jeritan kematian menembus telinga mereka. Tidak seorang pun selain Winnetou melihat bayangan yang muncul di jalan setapak. Apakah ada sesuatu yang tidak benar dalam cerita itu?

9.1.3 Jawablah pertanyaan berikut secara grafis ataupun melalui perhitungan berbagai kombinasi jarak, misalnya jarak minimal matahari-bumi, jarak rata-rata bumi-bulan. Berapa besar daerah gelap pada keadaan gerhana matahari total? Berapa lama paling tidak waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya keadaan gelap tersebut? Berapa besar bagian yang tertutup matahari (permukaan matahari yang "tertutup" dalam %) pada jarak 1000-2000 km dari zone total (perkiraan dari sketsa yang logis). Dapatkah terjadi bahwa seseorang dari suatu titik di bumi mengalami gerhana matahari total, sementara di tempat lain tidak? Berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya gerhana bulan (bayangan inti)? Berapa besar lama waktu total yang dibutuhkan selama terjadinya gerhana bulan (dari bayangan inti ditambah dengan bayangan setengah)? Aristarch dari Samos (300 tahun sebelum Masehi) mengetahui, bahkan diameter bumi, tetapi bukan diameter bulan. Ia menentukan diameter tersebut dari keadaan gerhana bulan total. Dapatkah Anda bayangkan bagaimana ia menentukannya?

Jarak [km]	Matahari- Bumi	Bulan- Permukaan Bumi
minimum	$146,6 \cdot 10^6$	356.400
menengah	$149,5 \cdot 10^6$	378 060
maksimum	$152,6 \cdot 10^6$	406.700

9.1.4 Apakah di mars juga dapat dinikmati gerhana matahari satu bulannya?

9.1.5 Mengapa kiri dan kanan akan tertukar jika dilihat dari cermin?

9.1.6 Apakah api dapat ditimbulkan dari cermin yang biasa digunakan untuk mencukur? Kertas harus dipanaskan hingga 500°C agar dapat terbakar. Gunakan hukum radiasi (bab 11).

9.1.7 Archimedes harus menaruh cermin cekung di bagian tertinggi menara di Sirakus agar dapat membakar kapal musuh. Apakah Anda percaya akan hal tersebut?

9.1.8 Dari mana asal pola terang "berbentuk jantung" yang selalu diamati terjadi pada cangkir kopi atau cincin?

9.1.9 Berapa jauh titik potong dua berkas cahaya yang direfleksikan oleh cermin cekung (kelengkungan bola) yang terletak pada sumbu utama "titik fokus"? Untuk berbagai jarak sumbu cahaya yang dijatuhkan padanya digunakan persamaan [9.2] dan sebagai pendekatan persamaan [9.3] kemudian bandingkan (khususnya untuk $\alpha = 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}$ dan 90°). Apakah terdapat berkas yang direfleksi menuju titik tengah S dari cermin?

9.1.10 Suatu bundel cahaya yang "sempit" jatuh miring pada permukaan logam. Bagaimana refleksi cahaya tersebut pada layar yang terletak tegak lurus terhadap permukaan logam? Bagaimana perubahan lintasan cahaya jika terdapat sedemikian banyak batang logam dengan permukaan paralel

dan dengan permukaan tidak paralel? Apakah hal demikian dapat digunakan dalam bidang teknik atau meteorologi?

9.1.11 Apakah persamaan pembentukan gambar bayangan dapat digunakan secara langsung untuk kepentingan astronomi? Perlukah dibuat pengembangan lebih lanjut atau penyederhanaan? Apa yang harus diperbuat agar gambar bayangan antara teropong jarak jauh (reflektor) dapat diperbesar? Berapa gambar bayangan antara dari teropong Kopernikus dari Krater ($f = 10$ m) dapat diperbesar untuk bulan (diameter 100 km)? Mengapa gambar bayangan seluruh bintang tidak dapat "dilelehkan" di titik fokus, walaupun bintang-bintang tersebut dapat dianggap terletak di tempat tak berhingga?

9.1.12 Pada sebuah satelit bumi stasioner, terdapat sebuah cermin cekung berdiameter 600 m, satelit diletakkan di orbitnya mengelilingi bumi. Satelit ini dibuat untuk menerangi sebagian permukaan bumi, khususnya di malam hari, yaitu dengan membuat gambar bayangan matahari. Berapa jarak cermin tersebut harus ditempatkan dari titik pusat bumi, agar satelit tetap berada pada titik yang sama di sepanjang ekuator? Berapa ketinggian yang harus dicapainya dari permukaan bumi? Lukiskan susunan letak satelit, bumi, dan matahari! Berapa besar titik fokus dan ukuran jari-jari kelengkungan cermin yang harus dibuat? Berapa pula ukuran daerah permukaan yang dapat diteranginya? Berapa besar penurunan intensitas cahaya matahari yang dihasilkan oleh cermin dibandingkan dengan ukuran intensitas matahari sebenarnya di siang hari. Adanya difraksi oleh cermin pada bayangan gambar matahari akan terdapat cincin terang dan gelap. Berapa besar jarak cincin gelap sisi lingkaran bayangan matahari yang dihitung di atas? Apakah karena adanya difraksi daerah terang dapat diperbesar (diperluas)? Dari saat mana ke mana terjadi cincin gelap (waktu setempat)? Dari jarak berapa jauh cermin dapat digunakan oleh seorang astronom untuk mencukur, atau apakah tidak berguna sama sekali?

9.1.13 Berapa terang akan terlihat sebuah satelit bumi berbentuk bola berdiameter d (misalkan $d = 1$ m, 30 m) dari logam tidak berwarna? Bandingkan dengan sebuah bintang. Ukuran bintang didefinisikan sebagai berikut. Matahari mempunyai ukuran besar 27. sebuah bintang $n + 5$ kali

lebih besar terlihat 100 kali lebih gelap dibandingkan dengan bintang berukuran n . Petunjuk: Hubungan apa yang terdapat antara kerapatan penerangan suatu bayangan gambar dan gambar sebenarnya?

9.1.14 Apakah cermin parabola secara optik ideal? Apa yang terjadi untuk cahaya yang tidak paralel terhadap sumbu cermin tersebut?

9.1.15 Proyek pembuatan sebuah teropong raksasa astronomi. Di dalam sebuah laboratorium dibuat sebuah cermin dengan permukaan sebuah parabola ideal, dilapisi oleh air raksa. Diskusikan proyek tersebut, apa keuntungan yang akan didapat untuk cermin demikian dan kesulitan teknis apa saja yang Anda temukan dalam proyek ini?

9.1.16 Berapa besar kontras bayangan gambar yang dibentuk oleh cermin cekung? Bagaimana mendefinisikan kontras gambar dengan cara yang lebih baik untuk seorang pengamat yang melihat bayangan gambar dengan mata telanjang atau dengan fotografi? Bagaimana cara meningkatkannya?

9.1.17 Hans, Fritz, dan Franz duduk di pinggir pantai yang datar sempurna, tanpa ada lekukan ketinggian dan hanya beberapa cm dari "cermin air". Hans, "Seandainya kita berada di perut gelombang, maka ikan tidak akan melihat kita." Fritz, "Ah, tentu saja tidak, ikan tetap dapat melihat kita, jika ia berada pada arah yang benar." Hans, "Tidak kita harus berada selangkah lebih jauh dari pantai sehingga kita tetap berada di bawah sudut refleksi total." Franz, "Tentu saja hanya berlaku untuk ikan yang berenang tidak benar-benar di dekat permukaan air." Fritz, "Tidak, setiap ikan tentu benar-benar di dekat permukaan air." Fritz, "Tidak, setiap ikan tentu akan melihat kita. Jika mereka tidak berada di dekat pantai." Siapa yang benar? Bagaimana ikan melihat "dunia" dari balik "cermin air"?

9.1.18 Pada reflektor Abbe sebuah tetesan cairan yang akan diamati menyentuh perlahan-lahan permukaan sebuah prisma gelas, persis di atas plat gelas yang berhubungan dengan lensa okular. Dengan sebuah pemutar, sistem diputar sedemikian rupa, hingga pada okular terlihat batas terang-gelap. Skala pada alat pemutar menunjukkan secara langsung harga indeks bias cairan (kadang-kadang terdapat pula skala kedua, yang menentukan

kadar gula dalam cairan). Dapatkah Anda bayangkan bagaimana alat tersebut bekerja?

9.1.19 Suatu berkas cahaya jatuh tegak lurus pada permukaan sebuah prisma bersisi segitiga dan dikeluarkan kembali melalui sisi lainnya dengan sudut . Berapa besar sudut pembelokkan berkas cahaya? Apakah pembelokkan selalu lebih besar dibandingkan dengan pembiasan simetri dari cahaya yang keluar dari prisma?

9.1.20 Tanpa perhitungan dapat pula ditunjukkan bahwa pembelokan yang terjadi pada pembiasan simetri adalah kecil. Apa yang diperlukan untuk ini hanya pembalikan lintasan cahaya?

9.1.21 Pada sebuah prisma bersisi tiga (permukaan sisi berbentuk segitiga sama kaki) dijatuhkan dua berkas cahaya paralel sehingga cahaya akan dibelokkan pada sudut minimum dan diteruskan ke kedua sisi prisma lainnya. Pada sebuah layar yang terletak tidak begitu jauh di belakang prisma, cahaya yang melintasi prisma, yang dibiaskan dan yang direfleksikan oleh permukaan alas prisma dapat ditangkap. Dapatkah diamati pola bayangan yang berbentuk garis-garis terpisah pada layar? Berapa jumlahnya? Di mana terletak sisi garis yang berwarna?

9.1.22 Mengapa selalu digunakan prisma bersisi tiga untuk mengamati spektrum dan bukan prisma beralas segi empat?

9.1.23 Arah berkas cahaya yang dibelokkan oleh cermin adalah sangat sensitif terhadap rotasi cermin yang bersangkutan. Hal ini merupakan suatu keuntungan yang dapat digunakan (di mana?) dan sekaligus merupakan kelemahan. Bagaimana kelakuan cahaya yang dibelokkan oleh dua cermin (cermin saling membentuk sudut satu sama lain)? Mengapa cermin demikian tidak digunakan untuk membelokkan arah berkas cahaya, melainkan selalu digunakan prisma? Apa yang dibalikkan cermin selain itu? Apa peran pembiasan dan dispersi pada prisma pembalik? Haruskah sebuah benda yang dilihat dengan prisma tidak mempunyai sisi tegak? Bagaimana cahaya dapat dibalikkan kembali tanpa bergantung pada kemiringan dan sistem refleksi? ("mata kucing")

Soal-Soal § 9.2

9.2.1 Kebanyakan tukang kebun tidak menyarankan menyiram bunga tatkala terkena sinar matahari karena tetesan air yang berada di daun dan terkena sinar mempengaruhi hal tersebut, mengapa?

9.2.2 Bagaimana sifat gambar lensa berbentuk silinder (permukaan pembias adalah permukaan selimut silinder)? Dapatkah sebuah titik dibentuk oleh dua lensa silinder? Apakah lensa ini juga ekuivalen dengan lensa berbentuk bola? Berikan penjelasan mengapa para ahli optik (optiker) selalu membicarakan kesalahan selinder selain astigmatisme?

9.2.3 Bola mata normal seorang dewasa mempunyai diameter 2,4 cm. Indeks bias lensa mata dan cairan yang terdapat di dalam bola mata masing-masing 1,5 dan 1,3. Berapa besar daya pisah mata normal tersebut jika benda berada di tempat tak berhingga dan diukur di udara? Dengan jari-jari kelengkungan berapa akan dapat dilihat bayangan gambar? Lensa mata anak kecil dapat terakomodasi hingga 7 cm, seorang remaja 20 tahun hingga berapa? (Cobalah!). Daya akomodasi menjadi berkurang. Bagaimana pengaruh daya pisah terhadap jari-jari kelengkungan?

9.2.4 Dapatkah seseorang melihat dengan jelas di dalam air (tanpa kacamata penyelam)? Mana yang menguntungkan, apakah penglihatan jauh atau dekat? Apakah kacamata plus atau minus dapat menolong keadaan tersebut? Berapa dioptri ukuran lensa kacamata tersebut? Prinsip apa yang digunakan untuk kaca mata penyelam? Seseorang membawa sebuah kamera biasa (kamera tidak diletakkan di dalam bilik kaca) ke dalam air. Terlepas dari konsekuensi mekanis: dapatkah kamera tersebut mengambil gambar dengan jelas? Apakah dapat pengambilan gambar yang baik dengan kamera tersebut dapat dikoreksi melalui pengaturan jarak objek yang akan difoto?

9.2.5 Titik fokus lensa objektif sebuah kamera foto adalah 2,8 cm dan dapat digunakan untuk benda berjarak 50 cm. Bagaimana harus dibuat pengaturan secara teknis untuk mengatur penglihatan dekat dan jauh?

Bagaimana perubahan kontras bayangan gambar dalam hal itu? Gunakan data-data yang terdapat pada kamera Anda dan cari kunci untuk mencari jawaban ini!

9.2.6 Mengapa hewan dengan penglihatan dekat dapat lebih baik mengenal sesuatu? Berapa jauh efek ini bermanfaat?

9.2.7 Pada permukaan mana lensa tebal cahaya harus dijatuhkan agar terjadi pembiasan tunggal untuk a) dua berkas paralel dari arah kanan; b) berkas cahaya melalui titik fokus kiri; c) berkas cahaya melalui titik fokus kanan; d) berkas cahaya yang tidak paralel maupun melalui titik api.

9.2.8 Mengapa dua berkas cahaya paralel yang dijatuhkan pada lensa konveks akan disatukan di suatu titik sedangkan untuk berkas yang melalui sumbu lensa tidak? Bagaimana kelakuan cahaya untuk lensa konkav?

9.2.9 Lensa mata kita telah terkoreksi dengan baik secara kromatis. Akan tetapi, agar cahaya merah dibiaskan lebih lemah dibandingkan dengan cahaya biru otot mata haruslah terakomodasi sehingga menyembung untuk menggerakkan lensa mata dibandingkan untuk cahaya biru, walaupun untuk objek yang berada pada jarak permukaan yang sama. Bagaimana hal itu dapat terjadi? Seperti para pelukis mengatakan bahwa warna merah adalah "agresif datang ke mata kita" dan warna biru "datang menyenangkan sanubari?" Jika garis-garis jendela sebuah mesjid diamati, sering terlihat adanya berbagai garis-garis dengan warna berbeda pada permukaan yang berbeda pula. Jika diamati bendera Prancis yang mempunyai tiga warna, garis berwarna merah terlihat lebih lebar (37%) dibandingkan dengan warna putih (33%) dan biru (30%), mengapa?

9.2.10 Berapa besar detail suatu gambar dapat diamati dalam kondisi penerangan yang cukup memadai (penerangan macam apa?) dengan mata telanjang pada titik terjauh yang dapat terlihat oleh mata; dengan mata telanjang pada titik terdekat yang dapat terlihat oleh mata; pada pembesaran tertentu yang diketahui dengan menggunakan perkakas optik dapat dipisahkan? Mengapa para ahli grafik (grafiker) selalu rabun dekat?

Mengapa dan bagaimana benda yang kecil kadang-kadang dapat terlihat? Berapa ukuran debu matahari? Apa sebabnya mikroskop pada perbesaran hingga $\nu = 2000$ tidak lagi mencapai kontras gambar (penglihatan detail gambar) seperti hasil perhitungan?

9.2.11 Mengapa kaca pembesar (*loop*) tidak dapat lagi memperbesar gambar 20 hingga 30 kali?

9.2.12 Titik fokus perangkat lensa okuler sebuah mikroskop adalah 50; 25, 17 mm, perangkat lensa objektif 10, 5, 3; 1,5 mm. Panjang selongsong (pipa teropong pada mikroskop) adalah 20 cm. Berapa perbesaran dapat diperoleh melalui kombinasi berbagai ukuran lensa di atas? Berapa jauh masing-masing lensa objektif dapat didekatkan ke objek?

9.2.13 Minyak pemendar dengan indeks bias $n \approx 1,5$ dapat mengurangi panjang gelombang cahaya yang jatuh pada lensa objektif dan menyebabkan daya pisah penglihatan menjadi lebih baik (sudut pisah terkecil adalah $-\lambda/a$, a adalah diameter celah pupil) Adakah hal lain yang memberikan keuntungan dengan sistem pendar demikian atau apakah sistem tersebut ekuivalen dengan hal yang dijelaskan pada §9.2.8?

9.2.14 Apakah teori Abbe untuk daya pisah berlaku juga untuk mikroskop elektron? Terdapat suatu hal yang pada mikroskop optik terbatas, tetapi untuk mikroskop elektron bahkan dapat digunakan lebih luas untuk meningkatkan daya pisah. Apakah itu?

9.2.15 Apakah terdapat hubungan antara perbesaran dan perbandingan ukuran diameter cahaya yang masuk dan keluar pada teropong jarak jauh? Bagaimana perbesaran dapat diukur dari penggeseran pipa penglihatan pada teropong jarak jauh?

9.2.16 Mengapa pada cincin pengatur sebuah kamera foto terdapat ∞ , setelah angka 10, 0,55 dan 0,5 yang diletakkan lebih jauh lagi?

9.2.17 Bagaimana cara mengukur (tanpa pertolongan alat) untuk menentukan ukuran lensa (dioptri) yang diperlukan seseorang?

9.2.18 Penglihatan normal seseorang setelah tua menjadi penglihatan jauh. Dan diikuti dengan penglihatan dekat akan menjadi semakin baik setelah tua, apakah itu hanya gurauan para optiker? Jika kakek Anda menggunakan kaca mata +6 dan Anda menggunakan -6, apakah Anda harapkan bahwa apabila kakek Anda telah lebih tua penglihatannya menjadi 0 kembali?

9.2.19 Seorang sejarawan seni psikologi telah membuat suatu thesa El Greco dahulu mustilah seorang yang mengidap astigmatis karena jika tidak ia tidak dapat menggambarkan wajah dan tubuh orang berukuran panjang. Apakah pernyataan tersebut berlaku secara fisiologis, psikologis, atau logis?

9.2.20 Berdasarkan teori hampa alam semesta kita hidup *di sisi bagian dalam* sebuah bola yang menutupi alam semesta keseluruhannya. Bahwa pada keadaan cuaca yang cerah kita tidak dapat melihat hingga ke benua Australia, hal itu disebabkan oleh cahaya merambat mengikuti garis lengkung. Pernyataan ini memang agak berbau lelucon, tetapi lebih baik dari astrologi atau pelajaran alam semesta menurut kepercayaan. Buktikan keadaan sebaliknya dari pernyataan di atas! Anda harus mencari alasan menentang pernyataan di atas, baik secara optis maupun astronomis, sehingga pernyataan yang Anda buat tidak dapat dipungkiri sama sekali. Apakah terdapat dasar penjelasan yang Anda buat? Bagaimana seharusnya lintasan cahaya melintasi alam semesta, hingga semua alasan menjadi benar? Apakah penjelasan tersebut dapat dijelaskan melalui indeks bias dan bagaimana indeks bias bergantung pada tempat? Petunjuk: Pencerminan pada lingkaran atau bola. Berikan model matahari, bulan, dan bintang-bintang (ukuran, lintasan, dan lain sebagainya) secara kuantitatif. Bagaimana menghitung waktu hari dan tahun, gerhana, dan lain sebagainya. Apakah terdapat suatu paralaksis untuk suatu gerakan di permukaan bumi dengan berjalannya waktu setahun? Apakah bagian lain fisika memberikan alasan sebaliknya yang dipaksakan?

9.2.21 Fenomena berbentuk cincin sering terjadi di dekat matahari dan bulan dengan jari-jari 22° dengan bagian dalam cincin berwarna merah

"lemah" Indeks bias es adalah 1,31. Kristal es yang berbentuk jarum seperti yang terbentuk di troposfir tertinggi, mempunyai bentuk mirip prisma dengan sisi segitiga sama sisi. Bagaimana orang menghitung jari-jari 22° tersebut?

Soal-Soal § 9.3

9.3.1 Dapatkah pengamatan yang dilakukan bangsa Romawi tentang pergeseran gerhana bulan planet Jupiter dapat dijelaskan menurut hukum Doppler? Berikan penjelasan secara kuantitatif?

9.3.2 Perkiraan suatu percobaan untuk menentukan kecepatan cahaya berdasarkan Fizeau. Perhatikan pula keadaan bahwa sebuah plat terbuat dari logam harus dirotasikan dengan kecepatan 100 m/det. Anggap bahwa Anda dapat memfokuskan berkas cahaya hingga berukuran 1 mm. Berapa seharusnya lintasan cahaya, jika berkas yang pada awalnya melewati celah gerigi, pada saat melintas balik justru mengenai gerigi?

9.3.3 Ramalkan ketelitian harga c dari pengukuran yang dilakukan oleh Foucault dengan menggunakan metode cermin rotasi, yaitu dengan menyusun semua peralatan di dalam sebuah ruangan berukuran besar. Apakah ketelitian tersebut dapat digunakan untuk mencari harga indeks bias udara dengan benar? Misalkan kecepatan rotasi yang dapat dicapai hingga 1000 Hz. Mengapa tidak dapat lebih cepat lagi? Bagaimana dapat dicapai ketelitian c yang diberikan pada §9.3.4

Soal-Soal § 9.4

9.4.1 Walaupun cahaya dan elektron secara geometris mengikuti hukum pembiasan yang sama, secara fisis keduanya mempunyai perbedaan yang

amat jauh. Misalnya dapat diketahui jika diamati kecepatan yang bergantung pada indeks bias. Cahaya macam apa yang dikatakan Newton untuk menjelaskannya?

9.4.2 Turunkan ukuran kelengkungan cahaya yang berada di dalam medium berindeks bias berubah secara tetap terhadap jarak secara geometris-optis murni. Lakukan untuk kasus di mana cahaya jatuh secara tegak lurus terhadap gradien indeks bias n (mengapa?); pandang kasus tersebut melalui daerah batas tertentu?

9.4.3 Sebuah elektron melintasi suatu ruang yang terdapat potensial berbeda-beda, bergantung tempat. Berapa besar jari-jari kelengkungan lintasannya? (kasus ini secara sederhana dapat dipandang jika $v \perp \nabla U$).

9.4.4 Di waktu musim panas di suatu kejauhan tertentu jalan kelihatan basah. Jelaskan efek tersebut! Apakah hal ini berhubungan dengan *fata morgana* di padang pasir? Mengapa efek tersebut hanya timbul pada waktu musim panas? Apa yang dapat disimpulkan kejadian tersebut dari kejauhan tersebut di atas?

9.4.5 Fatamorgana dan "jalan yang basah" berhubungan dengan refleksi total atau pembelokan cahaya?

9.4.6 "Jika sisi bagian bawah matahari menjelang terbenam terlihat seolah menyentuh horizon, secara geometris matahari telah terbenam". Apakah pernyataan ini benar? (patut dicatat bahwa hal tersebut tidak berhubungan dengan waktu yang diperlukan cahaya matahari untuk sampai ke bumi). Berapa lama siang dapat diperpanjang karena efek ini? Dapatkah Anda bayangkan seandainya atmosfer sebuah planet seperti itu, sehingga matahari sama sekali tidak akan terbenam? Diskusikan terlihatnya matahari di Venus (tekanan udara di permukaan Venus kurang lebih 90 atm. (CO_2), ketinggiannya kurang lebih mencapai 13 km] a) dengan mengandaikan adanya lapisan awan pada ketinggian 20 km, b) seandainya tidak terdapat awan, berapa ukuran "atmosfir matahari" (adalah atmosfer hidrogen dengan temperatur 6000 K) sehingga sesuai dengan hukum gravitasi Einstein yang mengatakan bahwa cahaya yang lewat di pinggir matahari mengalami

pembelokan lebih kurang $2'$ (lihat § 15.4 2)? Berapa seharusnya kerapatan chromosfir diperoleh agar ukuran "atmosfir matahari" yang diperoleh dapat dikoreksi?

9.4.7 Dapatkah dibuat suatu cermin datar atau konveks menurut gambar[9.63]?

9.4.8 Apakah pada gambar[9 64] dapat diartikan bahwa lintasan spiral elektron dan sumbu kumparan saling berhimpit satu sama lain?

Bab 10

Optika Gelombang

10.1 Interferensi Cahaya

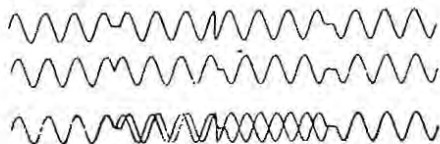
Semua yang dibahas pada bab 9 tentang fenomena optik cahaya yang merambat digambarkan sebagai "berkas". Sifat gelombang cahaya, seperti telah diketahui adalah sama dengan sifat alamiah gelombang elektromagnetik. Sifat-sifat ini telah diabaikan dalam pembahasan optika geometri. Sifat-sifat gelombang hanya muncul pada anggapan bahwa cahaya merupakan suatu kumpulan (bundel) dari dua atau lebih berkas gelombang yang mengalami tumpang tindih satu sama lain. Dalam hal pertama disebut sebagai hamburan sedangkan dalam kesempatan yang akan dibicarakan pada bab ini disebut sebagai interferensi. Kedua sebutan tersebut sebenarnya berhubungan dengan fenomena yang sama.

10.1.1 Gelombang Cahaya Koheren

Agar dua atau lebih sumber cahaya dapat saling mengalami interferensi stasioner, kedua sumber cahaya haruslah *koheren*. Gelombang disebut koheren jika amplitudonya yang bergantung waktu mempunyai perbedaan fase sama. Pada gelombang harmonik sempurna hal itu mempunyai arti bahwa frekuensi kedua gelombang sama; fase dapat

berbeda satu terhadap lainnya.

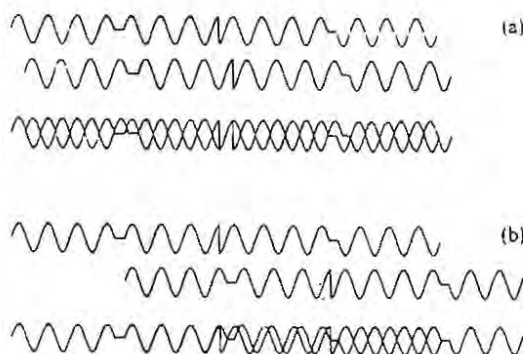
Jika cahaya berasal dari emisi atom-atom suatu bahan yang dipanaskan, yang satu sama lain saling tidak bergantung, tertutup kemungkinan akan terdapat dua atom sebagai sumber cahaya secara kebetulan bergetar dengan frekuensi yang sama. Sumber cahaya (atom) seperti itu tidak akan memancarkan gelombang koheren. Gelombang yang menyebabkan terjadinya interferensi umumnya berasal dari sumber yang sama (dapat diingat kembali prinsip Huygens-Fresnel yang mengatakan bahwa suatu gelombang yang merambat merupakan interferensi gelombang-gelombang lainnya). Pada cemin, pembiasan, hamburan, atau difraksi gelombang-gelombang tersebut berasal dari sumber yang sama dan sebelum mengalami tumpang tindih satu sama lain, mempunyai beda *lintasan optis* atau dengan perkataan lain antaranya terdapat *perbedaan fase*. Dalam kasus hamburan dapat diamati bahwa gelombang-gelombang tersebut haruslah koheren, atau dengan perkataan



Gambar 10.1 Pada gelombang cahaya tersembunyi sejumlah besar "perut lembah" dan grup gelombang yang tidak beraturan. Tumpang tindih peristiwa yang saling tidak bergantung tersebut akan memberikan gambaran interferensi dengan perubahan "perut lembah" yang diamati sebagai bentuk terang rata-rata [dari H.U. -Harten]

lain antara gelombang yang datang dan yang dihamburkan tidak ada suatu peristiwa yang menyebabkan bentuk getaran gelombang mengalami perubahan (tidak terdapat proses).

Juga jika gelombang yang merambat "dibagi" dan masing-masing bagian diinterferensi kembali, maka perbedaan fase antara keduanya tidak boleh melewati *batas panjang koheren L* . Batas panjang koheren ini sama dengan panjang rata-rata gelombang yang dipancarkan oleh sebuah atom.



Gambar 10.2 a dan b. Dua bundel berasal dari gelombang yang sama. jika beda fase keduanya tidak terlalu besar akan memberikan sinyal interferensi "bergantung fase" (a) Jika beda fase besar, masing-masing merupakan grup gelombang reguler. sifat koherensi keduanya lenyap (b) [dari H.U.-Harten]

$L = c\tau$ (τ adalah waktu rata-rata terjadinya emisi) Jika beda fase terlalu besar dibandingkan L , berarti akan terdapat beda waktu yang besar dibandingkan τ , sehingga dua gelombang yang berasal dari atom berbeda, yang satu sama lain tidak berhubungan, akan menimbulkan fase gelombang dengan hubungan yang tidak pasti τ untuk atom terisolasi berharga sekitar 10^{-8} det, pada keadaan kerapatan dan temperatur yang besar, umumnya harga τ lebih kecil (lihat §12.2 2) dan harga L umumnya hingga beberapa meter

Gelombang yang diemisikan oleh atom dan mengalami redaman dengan "waktu hidup" τ tidak menimbulkan garis spektral yang tajam, karena lebarnya hanya sekitar $\Delta\omega \approx \tau^{-1}$. Jika digunakan potongan spektral (lebar $\Delta\omega$) yang lebih besar, waktu dan panjang lintasan koheren akan semakin berkurang, yaitu $\tau \approx \Delta\omega^{-1}$. Untuk membuat percobaan interferensi cahaya sebaiknya cahaya tidak berasal dari sumber demikian. Pelebaran cahaya b berhubungan dengan sudut sapuannya, yaitu $\sigma \approx b/\lambda$. Sudut sapuan σ tidak boleh lebih besar daripada "garis bias" pada layar, yaitu jika sumber cahaya berasal dari hamburan sebuah celah (§10.2 2). Apabila hal ini terjadi, pola-pola interferensi akan saling bercampur satu sama lain, atau dengan perkataan lain masing-masing

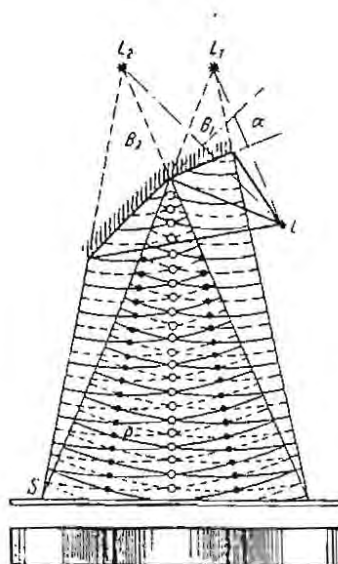
bagian (gelombang-gelombang) yang berasal dari sumber cahaya akan mengganggu koherensi.

Lain halnya pada *emisi dipaksakan*. Pada keadaan itu gelombang datang mempunyai frekuensi tertentu dan merangsang atom untuk mengeluarkan energinya. Dengan demikian, terdapat perbedaan fase yang tetap antara gelombang cahaya datang dan cahaya yang diemisikan, juga antara gelombang-gelombang yang dipancarkan oleh masing-masing bagian medium. Sebagai contoh, cahaya laser lebih koheren dibandingkan dengan cahaya biasa. Lamanya koherensi pada sinar laser dapat bertahan selama dicapai pulsa laser; panjang koherensinya dapat mencapai beberapa km.

10.1.2 Interferensi Dua Sumber Cahaya

Pada percobaan cermin Fresnel sebagai sumber cahaya koheren digunakan dua buah cermin yang membentuk bayangan sumber cahaya virtual L_1 dan L_2 ; kedua cermin disusun membentuk sudut α satu sama lain dan ditempatkan di depan sebuah sumber cahaya L (gambar[10.3]). Dari kedua sumber cahaya koheren "virtual" tersebut masing-masing merambat bundel cahaya B_1 dan B_2 , yang saling tumpang tindih atau mengalami interferensi.

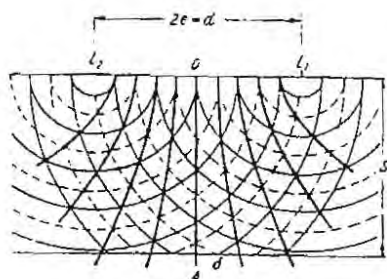
Gambar[10.3] menunjukkan gambar sesaat rangsangan cahaya. Garis-garis melingkar menggambarkan "perut" (puncak) gelombang, dan garis terputus-putus melambangkan "lembah" (cekungan) gelombang masing-masing berasal dari L_1 dan L_2 yang merupakan gelombang bola. Jika dua puncak yang berasal dari L_1 dan L_2 bertemu di satu titik, akan terbentuk gelombang yang saling menguatkan, pertemuan antara puncak dan lembah akan saling menghilangkan. Gelombang yang saling menguat terdapat pada setiap titik P , yang menyatakan perbedaan lintasan optis, perbedaan fase, yaitu kelipatan bulat panjang gelombang λ : $PL_1 - PL_2 = z\lambda$ (z bilangan bulat). Pada bidang yang terdapat L , L_1 , dan L_2 , semua titik-titik tersebut terdapat pada hiperbola yang mempunyai fokus di titik L_1 dan L_2 (gambar[10.4]). Pada hiperbola tersebut perbedaan lintasan optis terdapat



Gambar 10.3 Cara menimbulkan bundel cahaya koheren dengan cermin ganda Fresnel (Sudut antara kedua cermin di dalam percobaan divariasi hanya beberapa menit dari 180°)

titik fokus hiperbola adalah konstan, yaitu sama dengan dua kali jarak setengah sumbu:

$$2a = z\lambda \quad (10.1)$$



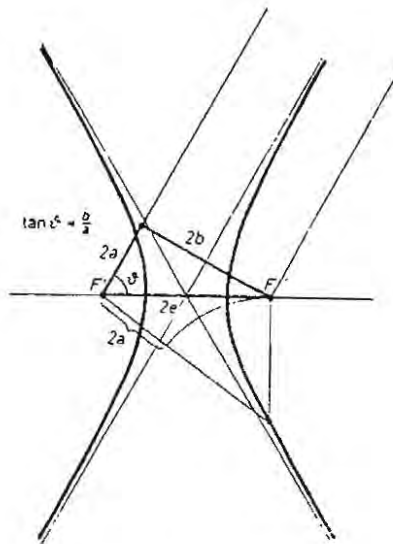
Gambar 10.4 Hiperbola konfokal. gelombang cahaya berasal dari titik L_1 dan L_2 mengalami interferensi saling menguatkan

Di dalam ruang terlihat bahwa penguatan gelombang terjadi pada sebuah hiperboloida konfokal ¹⁾.

L terletak pada jarak l di depan cermin (jarak tersebut sebenarnya tidak mempunyai peran apa pun, karena sudut α sangat kecil). Dari segitiga LL_1L_2 , yang terhadap L mempunyai berbagai sudut α yang banyak, dapat diperoleh bahwa jarak antara L_1 dan L_2 adalah $2/l\alpha$. Eksentrisitas kedua hiperbola tersebut adalah:

$$e = l\lambda \quad (10.2)$$

Untuk harga $\alpha \ll$ berlaku $e \ll \lambda$



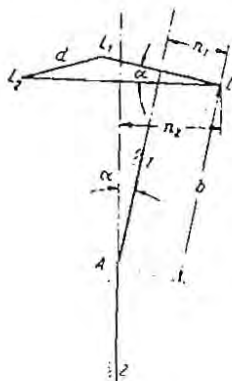
Gambar 10.5 Geometri hiperbola. Jika sumber cahaya koheren ditempatkan di kedua titik fokusnya, setiap titik yang terdapat di kedua garis hiperbola tersebut mempunyai perbedaan fase yang sama

¹⁾Dua hiperbola konfokal jika dirotasi terhadap garis yang tegak lurus kedua sumbunya akan diperoleh hiperboloida (bentuk geometri ruang hiperbola konfokal).

Untuk jarak layar yang amat besar $D > e$, hiperbola terdapat persis di asimtotnya. Kemiringan (*sloop*) terhadap garis tengahnya, berdasarkan gambar [10.5] didapat sebagai:

$$\tan \varphi = \frac{a}{b} = \frac{a}{\sqrt{e^2 - a^2}} \approx \frac{a}{e} = \frac{z\lambda}{2l\alpha}$$

Jarak antara dua garis terang $\delta = \lambda D / 2l\alpha$ maka diperoleh panjang



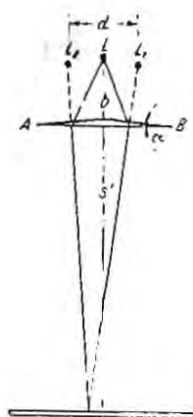
Gambar 10.6 Perhitungan jarak bayangan gambar virtual pada cermin Fresnel

gelombang

$$\lambda = \frac{2l\alpha}{D} \delta \quad (10.3)$$

Di dalam praktik, misalkan digunakan $\alpha = 10'$, $D = 2$ m. Untuk garis 1) spektrum kuning uap natrium, jarak antara dua garis terang diamati sekitar 2 mm dan diperoleh panjang gelombang $\lambda = 580$ nm.

Kedua sumber cahaya virtual dapat pula diilustrasikan dengan

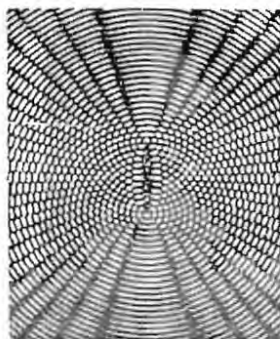


Gambar 10.7 Biprisma Fresnel

gambar[10.7], dengan menggunakan biprisma Fresnel yang mempunyai sudut sangat kecil pada bidang pembias A dan B , yaitu sama dengan α maka berlaku

$$\lambda = 2(n-1)\alpha \frac{b}{s' + b + l/n} \delta \quad (10.4)$$

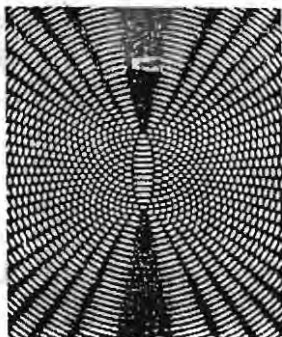
n adalah indeks bias prisma ganda, l adalah tebalnya, b dan s dapat dicari dari gambar.



Gambar 10.8 Interferensi gelombang dua sumber cahaya, di sini diilustrasikan pola Moiré, dengan menggunakan dua plat gelas yang digambarkan dengan garis-garis hitam konsentris [dari H.U.-Harten].

Interferensi Cahaya "Putih" (Polikromatik)

Garis-garis orde pertama (harga $z \approx 10$) mempunyai jarak yang mendekati



Gambar 10.9 Di samping gambar[10.8] jika jarak pusat gelombang diubah sebesar setengah panjang gelombang, hasilnya Pola interferensi terbalik [dari H.U.-Harten]

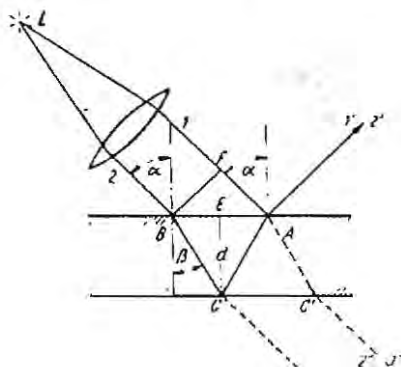


Gambar 10.10 Pada gelombang air pola interferensi tidak dapat diamati dengan jelas seperti pada prosedur Moiré dengan pola hitam putih. Dianggap bahwa pada gelombang air pengaruh lensa gelombang datang tidak harus tetap sempurna [dari H.U.-Harten].

sama. Jika digunakan cahaya putih (polikromatik), hanya akan terdapat garis-garis interferensi terang berwarna putih yang hanya garis orde ke nol. Semua garis-garis interferensi orde lebih tinggi berwarna dan pada garis orde ke nol hanya bagian pinggirnya berwarna violet kebiruan dan pada garis gelap berorde kecil terdapat pula warna yang samar. Orde garis maksimum berhubungan dengan gelombang pendek (cahaya biru) dan selanjutnya untuk orde yang lebih tinggi, akan bergeser ke gelombang panjang (cahaya merah).

10.1.3 Interferensi pada Lapisan Tipis Datar

Sumber cahaya koheren dapat mengalami interferensi jika dilewatkan pada dua permukaan cermin datar, misalnya direfleksikan oleh permukaan batas lapisan datar paralel (gambar [10.10]). Berkas cahaya I jatuh pada permukaan sebuah lapisan tipis dengan sudut α di titik A dan sebagian akan mengalami refleksi, sebagian lagi akan dibiaskan ke dalam lapisan tersebut, sampai di titik C'. Pada titik B jatuh berkas 2 yang paralel terhadap



Gambar 10.11 Interferensi pada lapisan tipis paralel datar

berkas 1. Diamati bagian berkas yang mengalami pembiasan di dalam lapisan tipis, yang sampai di permukaan lain lapisan, yaitu di titik C. Di

titik C ini sebagian cahaya akan diteruskan, keluar lapisan dan sebagian lagi akan direfleksikan kembali ke titik A yang juga mengalami pembiasan kembali menjadi berkas $2'$ yang keluar dari lapisan sampai di titik A dan bertemu dengan berkas 1 yang direfleksikan sebagai $1'$. Perbedaan-perbedaan fase antara $2'$ dan $1'$ adalah:

$$\Delta = n(BC - CA) - PA = 2nBC - PA$$

karena lintasan optik pada lapisan berindeks bias n adalah $n(BC + CA)$:

Dari gambar [10.11] dan dengan menggunakan hukum pembiasan $\sin \alpha = n \sin \beta$ diperoleh

$$PA = BA \sin \alpha = 2BC \sin \beta \sin \alpha = BC \frac{\sin^2 \alpha}{n}$$

dan

$$BC = \frac{d}{\cos \beta} = \frac{d}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} = - \frac{nd}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}$$

maka

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{2n^2 d}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} - \frac{nd}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \\ &= 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \end{aligned} \quad (10.5)$$

Di samping beda fase geometri terdapat pula beda fase $\lambda/2$ yang berhubungan dengan fase antara cahaya $1'$ dan $2'$, yaitu sebesar π karena cahaya direfleksi pada medium lebih rapat. Dalam hal ini disebabkan oleh permukaan bagian atas (lihat §4.4.4 dan §10.3.4):

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} \quad (10.6)$$

Bergantung pada apakah kelipatan genap atau ganjil $\lambda/2$, masing-masing akan berhubungan dengan apakah gelombang setelah mengalami interferensi akan diperkuat atau melemah:

Gelombang akan diperkuat jika:

$$\lambda = \frac{1}{2z-1} d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}; \quad z = 1, 2, 3, \dots \quad (10.7)$$

Gelombang akan diperlemah jika:

$$\lambda = \frac{2d}{z} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}; \quad z = 1, 2, 3, \dots \quad (10.8)$$

Syarat yang diberikan di atas untuk ketebalan dan panjang gelombang tertentu dan hanya berlaku untuk sudut cahaya datang tertentu pula. Beda fase akan semakin kecil jika sudut datang α semakin besar. z disebut *bilangan pola* interferensi.

Untuk sudut datang yang tegak lurus permukaan, berdasarkan persamaan [10.7] untuk pola interferensi pertama $z = 1$.

$$\lambda = 4nd \quad \text{atau} \quad d = \frac{\lambda}{4n}$$

Terdapat garis-garis interferensi maksimum pada $d = 3\lambda/4n, 5\lambda/4n, 7\lambda/4n, \dots$ yaitu setiap kenaikan d sekitar $\lambda/2$

Dari persamaan [10.8], pola interferensi melemah, untuk $z = 1$ didapat.

$$\lambda = 2nd \quad \text{atau} \quad d = \frac{\lambda}{2n}$$

Berdasarkan persamaan [10.8] terdapat interferensi saling melemah juga pada $d = 0$; jarak antara dua interferensi saling melemah juga sebesar $\lambda/2n$, berarti pula sama dengan setengah panjang gelombang di dalam medium dengan indeks bias n .

Pembahasan di atas secara praktis berguna untuk membuat lapisan tipis (film) yang mempunyai kemampuan refleksi kecil.

10.1.4 Warna Lapisan Tipis

Lapisan tipis (gelombang sabun, lapisan minyak di atas air, lapisan udara di pinggir gelas, dan lain sebagainya) dapat merefleksikan atau melewatkan cahaya "putih" (polikromatik) dan akan menunjukkan warna berkilau tertentu. Perbedaan fase cahaya yang direfleksikan permukaan batas pada lapisan tersebut bergantung pada besarnya sudut cahaya datang dan ketebalan lapisan bahwa beberapa warna yang terdapat di dalam cahaya "putih" setelah melewati atau mengalami refleksi akan melemah dan sebagian lagi akan terlihat jelas.

Jika cahaya "putih" jatuh pada permukaan lapisan tipis, warna-warna spektrum yang terdapat di dalamnya, yang panjang gelombangnya memenuhi kondisi ini, setelah mengalami refleksi akan melemah. Semua gelombang yang mempunyai perbedaan panjang gelombang kecil satu sama lain, yang menyebabkan pelemahan, akan menghilang. Tumpang tindih karena interferensi sehingga gelombang mengalami perubahan, intensitasnya merupakan campuran berbagai intensitas gelombang yang ada, yang selanjutnya disebut warna lapisan tipis. Secara pendekatan dengan ketebalan lapisan sekitar 20 nm dapat diperoleh sekitar 1000 nm.

Perbedaan lintasan optik cahaya yang masuk ke dalam lapisan 2" dan 1" diilustrasikan pada gambar [10.11], yaitu perbedaan antara lintasan berkas $BCAC'$ dan AC' , seperti dinyatakan persamaan [10.5]

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}$$

Dalam hal ini kedua berkas yang mengalami refleksi 2" pada medium lapisan menyebabkan berkas 2" tidak mengalami "lompatan" fase dan pola maksimum akan muncul jika:

$$z\lambda = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}; \quad z = 1, 2, \dots$$

dan minimum pada

$$(2z + 1)\frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}; \quad z = 1, 2, \dots$$

Pada interferensi gelombang demikian warna lapisan bergantung pada cahaya yang dilewatkan. Dari cahaya yang dilewatkan ini akan terdapat nyala yang lebih redup dibandingkan dengan pola interferensi cahaya yang direfleksi karena intensitas berkas yang mengalami dua kali refleksi hanya sebagian kecil intensitas cahaya yang berasal dari cahaya "putih".

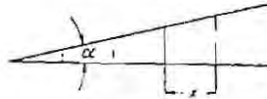
Pada pembahasan selanjutnya akan diamati lebih jauh bahwa baik pada interferensi cahaya yang direfleksikan maupun cahaya yang diteruskan dari lapisan tipis, tidak hanya terdapat satu atau dua berkas, melainkan sejumlah besar berhubungan dengan sebagian kecil cahaya yang masih terdapat.

10.1.5 Pola Garis Interferensi Sama Tebal

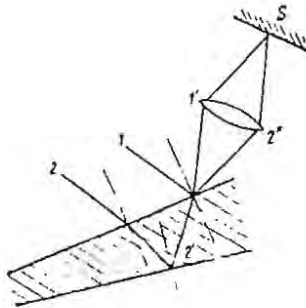
Jika lapisan tipis berbentuk segitiga (permukaan atas dan bawah tidak saling paralel, melainkan membentuk sudut lancip), perbedaan fase gelombang yang direfleksikan lapisan bawah dan atas akan bergantung pada tempat cahaya dijatuhkan. Juga berkas yang datang dari permukaan bagian atas karena adanya kemiringan permukaan yang merefleksi berkas, maupun permukaan yang meneruskannya, menyebabkan berkas yang mengalami refleksi dan juga pembiasan tidak lagi paralel (gambar [10.12]). Jika ingin mengamati adanya interferensi berkas cahaya tersebut, berkas yang mengalami divergensi harus disatukan kembali. Hal itu dapat diamati pada "kulit" permukaan, yaitu mengamati dengan mata yang terakomodasi,

atau dapat pula menggunakan lensa sehingga berkas divergen dapat dijatuhkan pada layar. Dengan kedua cara tersebut akan didapat pola garis interferensi yang disebut *pola garis interferensi sama tebal*. Pada semua pola garis yang mempunyai ketebalan yang sama, dikatakan bahwa garis-garis tersebut mempunyai syarat interferensi yang sama, dalam hal ini dapat diamati bahwa pola garis tersebut dapat terang atau gelap.

Pada permukaan yang tidak paralel, berindeks bias n , jatuh secara tegak lurus cahaya monokromatik dengan panjang gelombang λ (gambar[10.13]). Cahaya yang direfleksikan akan terlihat pada sisi lapisan



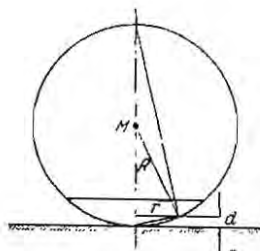
Gambar 10.12 Interferensi pada lapisan berbentuk segitiga. 1 dan 2 adalah berkas koheren yang berasal dari satu sumber cahaya, seperti pada gambar[10.11]



Gambar 10.13 Lebar pola garis interferensi pada lapisan berbentuk segitiga

berupa pola gelap karena refleksi oleh permukaan bagian atas akan menyebabkan beda fase $\lambda/2$. Pola gelap lainnya akan terdapat pada jarak $\lambda/n, 2\lambda/n, \dots, z\lambda/n$. Antara pola gelap terdapat pola terang. Lebar pola garis, yaitu jarak antara dua pola garis minimum bertetangga lapisan adalah $x = \lambda/2n\alpha$, dengan α adalah sudut kemiringan lapisan.

Jika cahaya yang digunakan tidak monokromatik, melainkan terdiri atas dua macam warna dengan panjang gelombang λ yang tidak jauh berbeda satu sama lainnya ($\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$), lebar pola garis menjadi $\lambda/2n\alpha$. Jika jumlah pola garis pada sisi lapisan dihitung, akan diperoleh pola garis terang berkas dengan panjang gelombang terpanjang,



Gambar 10.14 Percobaan cincin Newton

dengan bilangan pola z , akan terdapat di daerah pola garis gelap dengan panjang gelombang pendek. Dua pola terang dengan bilangan pola z dan $z + 1$ akan terpisah jika memenuhi,

$$z \frac{\Delta\lambda}{2n\alpha} = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{2n\alpha} \quad \text{atau} \quad z = \frac{\lambda}{2\Delta\lambda} \dots \quad (10.9)$$

Pola garis akan lenyap jika intensitas kedua gelombang yang digunakan adalah sama. Untuk harga z yang besar akan terdapat kembali pola maksimum terang. Pola garis akan muncul kembali dan menunjukkan pola yang kontras jika bilangan z dua kali lebih besar, yaitu

$$Z = 2z = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \dots \quad (10.10)$$

Demikian lenyap dan munculnya pola garis interferensi dengan semakin

besarnya panjang lapisan tidak paralel.

Sebagai contoh adanya interferensi dengan tebal pola garis sama dapat digunakan sebuah *lensa plankonveks* dengan jari-jari yang besar R dan ditempatkan di atas sebuah plat gelas, kemudian disinari cahaya pada bagian atasnya (gambar[10.14]). Interferensi cahaya yang direfleksikan umumnya disebut *cincin Newton*. Pada cahaya yang direfleksikan, karena adanya perbedaan fase sebesar π akibat refleksi di permukaan plat gelas, pola yang terdapat di bagian tengah cincin menjadi gelap. Pola cincin gelap pertama akan terdapat pada jarak lapisan udara $\lambda/2$, cincin gelap kedua pada $d = 2\lambda/2$ dst. Dari gambar[10.14] diperoleh bahwa ketebalan lapisan udara d di tempat yang berjarak r dari titik sentuh dan jari-jari kelengkungan lensa R memenuhi persamaan: $r^2 = (2R - d)d$ (tinggi segitiga lancip sama dengan jarak potongan hipotenusanya). Jika $d < R$ berlaku:

$$d = \frac{r^2}{2R}$$

Cincin gelap ke- z yang memenuhi kondisi $d = z\lambda/2$ mempunyai jari-jari sebesar:

$$r_z = \sqrt{2zR\lambda} \quad (10.11)$$

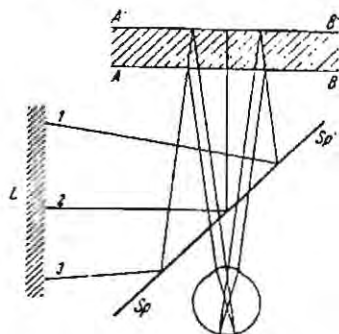
Panjang gelombang cahaya akan diperoleh dari jari-jari cincin gelap ke- z sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{r_z^2}{zR} \quad (10.12)$$

Untuk cahaya "putih" pola cincin yang terjadi lebih redup dari pada pola lapisan tipis.

10.1.6 Interferensi dengan Kemiringan Sama

Dari sebuah sumber cahaya yang mengalami pelabaran (gambar[10 15]) cahaya diatuhkan melalui sebuah cermin $SpSp'$ yang dapat merefleksikan dan membiaskan sebagian cahaya pada plat paralel dan akan direfleksikan oleh permukaan AB dan $A'B'$. Dari plat paralel tersebut dapat diamati pola-pola interferensi melalui akomodasi mata atau dengan menggunakan teropong pada jarak yang cukup jauh. Tebal plat tersebut haruslah sehingga berkas 2 yang direfleksikan permukaan AB dan $A'B'$ (perbedaan fase pada cahaya yang direfleksikan permukaan AB mempunyai adalah $\lambda/2$) akan mempunyai perbedaan fase kelipatan bilangan bulat, yaitu $z\lambda$. Kemudian, berdasarkan persamaan[10.6], semua berkas cahaya jatuh yang direfleksikan terhadap permukaan normal, yaitu berkas 1, 3, ..., setelah direfleksikan oleh permukaan AB dan $A'B'$ akan mempunyai perbedaan fase yang kecil, yang harganya semakin kecil jika sudut jatuh semakin besar. Berkas 1 dan 3 setelah mengalami refleksi akan mempunyai beda fase sebesar $(z - 1)\lambda$ (pembiasan cahaya yang masuk dan keluar dari permukaan AB untuk penyederhanaan gambar tidak ditunjukkan). Semua berkas yang paralel terhadap berkas 1 dan 3, yaitu seluruh bundel cahaya yang jatuh, setelah direfleksikan oleh bidang AB dan $A'B'$ akan mempunyai perbedaan fase yang sama pada "kulit permukaan" atau pada tempat yang sama yang terdapat titik fokus lensa objektif teropong yang digunakan untuk mengamati. Semua berkas

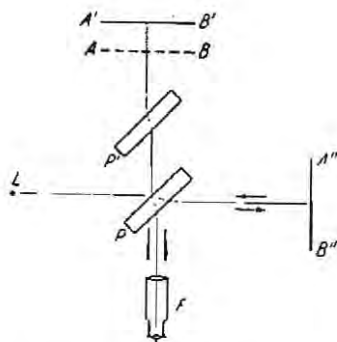


Gambar 10 15 Percobaan untuk mendapatkan interferensi dengan kemiringan yang sama

yang berlawanan terhadap normal adalah simetri rotasi dan muncul sebagai *berkas dengan kemiringan yang sama* pada "kulit permukaan", dengan sudut jatuh yang sama (atau di titik fokus lensa objektif teropong). Suatu pola interferensi terang berbentuk lingkaran akan dapat diamati dan terhadap pusat pola, dua pola terang tersebut dipisahkan oleh satu pola gelap. Dari pola terang ini, berturut-turut akan terdapat pola gelap, terang dan seterusnya secara konsentris, sesuai dengan penurunan bilangan pola interferensi, yang selanjutnya disebut *pola garis dengan kemiringan sama* atau disebut pula *cincin Haidinger*, yang bentuknya merupakan bentuk lingkaran pada plat paralel. Deviasi paralelitas berkas dalam orde beberapa panjang gelombang akan menyebabkan "deformasi" pola cincin interferensi, menjadi lebih tajam; bentuk lingkaran cincin merupakan ukuran paralelitas permukaan plat.

10.1.7 Interferometer MICHELSON

Cahaya yang datang dari L membentuk sudut 45° jatuh pada permukaan plat datar paralel P dan pada permukaan atas plat sebagian akan direflesi dan sebagian lainnya diteruskan (gambar [10 16]). Cahaya yang diteruskan oleh permukaan bawah P diteruskan ke cermin datar $A'B'$, dan dibalikkan kembali ke P sedangkan cahaya yang direfleksikan oleh permukaan bawah diteruskan ke cermin $A''B''$ untuk dikembalikan lagi ke P , cahaya yang direflesi oleh cermin $A'B'$ dan $A''B''$ selanjutnya direfleksikan kembali untuk diamati pada teropong F . Cahaya yang direfleksikan oleh cermin $A'B'$ dan $A''B''$ akan disatukan di titik fokus lensa objektif teropong dan perbedaan fase keduanya dapat diketahui seolah bayangan L datang dari permukaan cermin AB (garis putus-putus) sejajar dengan cermin datar $A'B'$. Agar kedua bundel cahaya mempunyai panjang lintasan di dalam gelas yang sama, antara P dan $A'B'$ diletakkan sebuah plat gelas P' sejajar dengan P . Pola garis interferensi dengan kemiringan yang sama dapat diamati pada "lapisan udara" yang terdapat antara $ABA'B'$. Karena cahaya direflesi oleh cermin yang sama, antara cahaya datang dan yang direfleksikan terdapat perbedaan fase sebesar π . Cermin $A'B'$ dapat digeser-geser dengan menggunakan *mikrometer sekrup*. Dengan



Gambar 10.16 Interferometer Michelson

demikian, tebal lapisan udara dapat diatur pada posisi nol. Pola garis dengan kemiringan yang sama dapat diatur sehingga dapat diamati dengan jelas tebal lapisan udara jauh dekat pola cincin. Agar diperoleh perbedaan fase yang sama, kemiringan berkas haruslah diperbesar. Berdasarkan persamaan [10.5] perbedaan fase akan menurun sebanding dengan membesarnya sudut α . Diperoleh bahwa untuk setiap pertambahan tebal $\lambda/2$, terdapat pola cincin yang terletak semakin keluar dari pusatnya dan sistem keseluruhannya akan bergeser keluar. Dengan mengecilkan ketebalan, pola-pola cincin tersebut akan mengecil, seolah tertelan oleh pusatnya.

Dengan menghitung jumlah pola cincin, dapat dihitung pergeseran cermin dalam setengah gelombang cahaya yang digunakan. Dengan peralatan sederhana tersebut, dalam optika teknik dapat dipakai untuk pengukuran panjang gelombang cahaya (§11.4) atau untuk memeriksa apakah permukaan yang dihaluskan telah memenuhi permintaan atau belum.

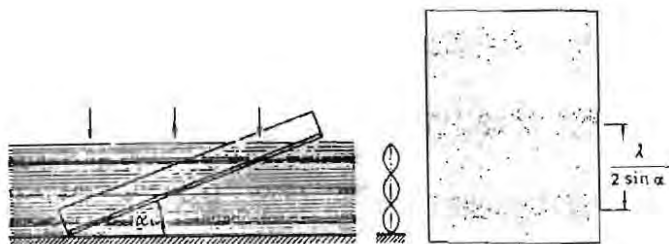
10.1.8 Gelombang Cahaya Diam

Pada §7.7.3 telah dibahas gelombang diam elektromagnetik yang jatuh tegak lurus pada sebuah cermin. Dengan cara yang sama menurut Wiener,

dapat dilakukan hal yang sama untuk gelombang cahaya (gambar[10.17]).

Sebuah lapisan fotografi tipis yang tebalnya hanya $\lambda/30$ diletakkan membentuk sudut α di atas sebuah cermin logam dengan permukaan datar yang dibuat sangat baik dan mempunyai kemampuan refleksi yang baik pula. Di bagian atas cermin logam dan lapisan fotografi diletakkan sebuah sumber cahaya monokromatik. Setelah dilakukan pencucian lapisan fotografi diketahui bahwa pada setiap jarak $1/2 \lambda/\sin\alpha$ terdapat pola garis gelap, yang terhadap cermin diketahui mempunyai jarak $\lambda/4$.

Dalam hal ini gelombang listrik akan direfleksikan dengan beda fase π oleh permukaan logam (medium optis rapat) sehingga terjadi interferensi antara gelombang yang direfleksikan dan gelombang datang, membentuk gelombang diam. Gelombang diam itu mempunyai simpul di permukaan logam. Hal itu seharusnya terjadi karena gelombang kuat medan listrik transversal di permukaan logam mempunyai harga nol. Pada gelombang diam ini, medan listrik E dan H selalu mempunyai fase yang sama, yaitu



Gambar 10.17 Percobaan membuktikan gelombang diam dari Wiener pada sebuah lapisan fotografi. Kanan: menggambarkan pola garis gelap pada sisi plat, yang disentuh cermin

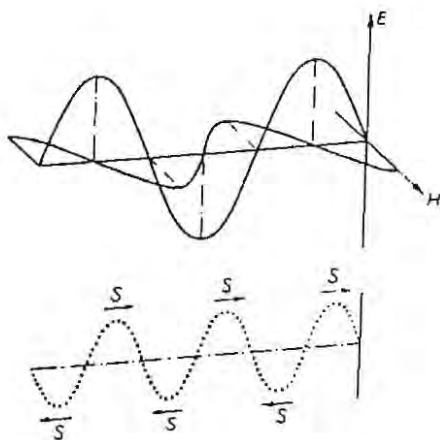
seperti pada gelombang berjalan. Akan tetapi, di dalam ruang, bundel gelombang H dan E mempunyai perbedaan fase sebesar $\pi/2$. H mempunyai perut di permukaan logam (berarti pula bahwa H tidak mengalami perbedaan fase setelah direfleksi permukaan logam).

Pola garis gelap gelombang E membuktikan pula bahwa medan listrik sangat berperan pada proses fotokimia.

10.2 Hamburan Cahaya

10.2.1 Hamburan Fresnel: Hologafi

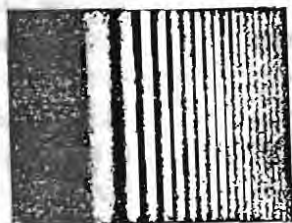
Dasar optika geometri dalam mengamati bentuk bayangan yang ditimbulkan sebuah sumber cahaya titik diberikan melalui proyeksi geometris benda. Kenyataannya di belakang sisi tajam yang dibatasi objek



Gambar 10.18. Gelombang cahaya diam di depan sebuah cermin. Bawah Aliran energi yang terdapat di dalam medan berkas

tidak terdapat batas "bayangan geometris". Pada batas bayangan geometris intensitas hanya dapat diamati sekitar 50%, yang tentunya tidak terdapat gambar benda yang menimbulkan bayangan. Untuk itu, pada daerah bayangan terdapat pula cahaya (gambar[10.19]).

Sebagai benda digunakan seutas kawat halus maka pola hamburan juga akan terdapat di dalam daerah bayangan dan di tengah-tengahnya dapat diamati adanya pola terang. Jika cahaya dilewatkan pada celah, baik di dalam, maupun di luar proyeksi geometrisnya akan diamati adanya

geometrische Schattengrenze

Gambar 10.19 Pola garis hamburan di dekat batas gelap suatu sisi tajam. layar disinari cahaya monokromatik



Gambar 10.20 Dari sebuah lubang berukuran lebih kecil dari panjang gelombang cahaya yang digunakan lewat gelombang bola Huygens. Gelombang ini juga merambat "terbalik" di depan "setengah ruang". seperti halnya rimpel (kerutan) gelombang primer diamati rapat pada lubang. Dengan tegas lagi: terjadi interferensi antara gelombang primer dan sekunder di sebelah lubang. hanya fase gelombang sekunder yang berbeda. bergantung pada apakah gelombang direfleksikan oleh layar berlubang atau langsung melewati lubang [sumber: R.W. Pohl; dari H U.-Harten].

pola berbentuk celah yang digunakan. Semakin kecil celah, pola hamburan akan semakin lebar. Hal ini lebih jelas dapat diamati jika menggunakan celah segi empat.

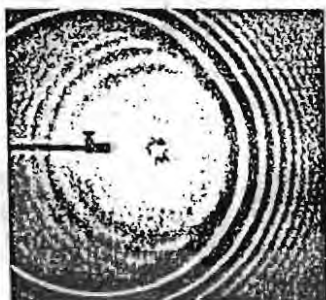
Peristiwa hamburan yang sering diamati terjadi jika cahaya dilewatkan pada layar bercelah lingkaran adalah sebagai berikut.

Terlepas dari ukuran dan jarak sumber cahaya yang ditempatkan terhadap layar bercelah, di tengah-tengah bayangan geometris terdapat pola terang. Pada poros (sumbu) celah berbentuk lingkaran sebaliknya diamati, adanya pola terang atau gelap pada jarak yang berbeda-beda di belakang celah. Hal sebaliknya diamati pula jika ukuran celah diubah dan layar berada pada jarak yang tetap. Di belakang layar terjadi pola terang dan gelap, hal ini dapat dianalisis berdasarkan penjelasan Fresnel sebagai berikut.

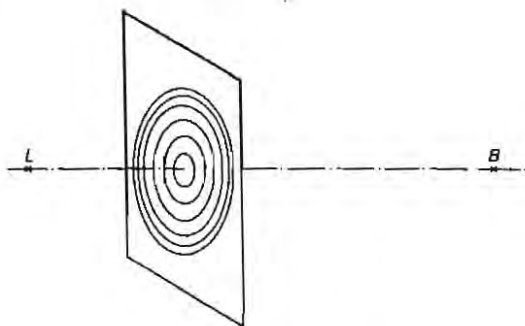
Bayangkan antara sumber cahaya L dan pengamat B (gambar[10.22]), tegak lurus terhadap keduanya terdapat permukaan penghubung, di dekat celah atau berbatasan dengan sebuah layar bercelah, terletak pada zone berbentuk lingkaran, dan semua titik tengahnya terletak pada LB . Semua gelombang cahaya yang melewati cincin serupa dan diikuti dengan terjadinya hamburan pada B akan mempunyai lintasan dan fase yang sama ketika sampai di B . Lebar zone dipilih sedemikian rupa sehingga gelombang yang datang di zone ke n akan mempunyai beda fase sebesar 180° terhadap zone tetangganya, yaitu zone ke $(n+1)$ dan ke $(n-1)$. Dengan demikian, lebar zone juga bergantung pada posisi titik B . Sumbangan masing-masing zone terhadap pola interferensi akan saling menghilangkan jika amplitudonya sama.

Jika celah dibuat tajam, cincin-cincin di bagian pinggir pola akan lenyap dan pola yang tinggal hanya dengan intensitas terbatas di B . Berapa jumlah pola cincin yang ada, bergantung pada diameter celah tajam dan jarak antara celah dan B . Bergantung pada apakah jumlah pola cincin genap (*gerade*) atau ganjil (*ungerade*) maka di B akan terdapat pola terang atau gelap.

Apabila pada sistem ditambahkan sebuah layar berbentuk lingkaran, sejumlah pola cincin yang terdapat di zone tengah akan menghilang dan bergeser ke pinggir secara bebas. Jumlah masing-masing zone yang bergeser keluar akan tetap mempunyai amplitudo yang semakin ke luar semakin berkurang; pasangan pola yang lenyap tidak lagi sempurna. Oleh karena itu, semua titik yang terdapat di garis hubung titik tengah layar dengan B akan bersinar, atau di tengah-tengah bayangan geometri selalu terdapat sebuah noda terang yang disebut noda Poisson. Hal ini terjadi



Gambar 10.21 Sebuah pola kecil (di tengah-tengah gambar) merambatkan gelombang bola Huygens. Untuk dapat melihat pola dengan jelas, digunakan sebuah batang kecil yang digetarkan (kiri) sesaat sebelum pengambilan gambar dilakukan. Gelombang sekunder terakhir menyentuh gelombang primer terakhir [sumber: R. W. Pohl; dari H.U.-Harten].



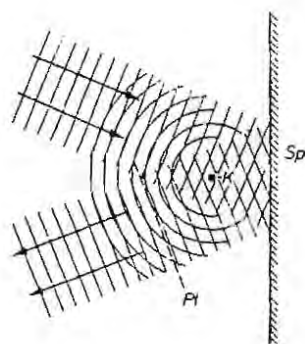
Gambar 10.22 Perhitungan "isi permukaan" zone Fresnel.

jika jarak B besar dibandingkan dengan diameter celah

Efek yang serupa, tetapi lebih tajam lagi akan muncul, jika pada posisi celah atau layar ditempatkan sebuah plat gelas sehingga zone pola cincin terdapat di permukaannya dan diamati bahwa setiap pola cincin kedua akan gelap, karena cahaya dapat menembusnya (*zone plat* Fresnel). Semua gelombang yang dilewati oleh plat gelas mempunyai perbedaan fase yang

tetap sebesar 2π , berarti pula gelombang mengalami interferensi saling menguatkan. Plat zone bersifat seperti halnya lensa yang mempunyai banyak titik fokus. Akan tetapi, titik fokus tersebut bergantung pada panjang gelombang cahaya yang digunakan.

Secara prinsip akan selalu terbentuk sistem pola cincin zone plat di semua tempat dan gelombang bola tumpang tindih dengan gelombang datar koheren; sebagian contoh terjadi pada sistem optik (gambar[10.23]) sebagai berikut. Gelombang datar cahaya yang datang dari kiri pertamanya mengenai



Gambar 10.23 Konstruksi zone Fresnel

benda berukuran kecil dibandingkan dengan panjang gelombang K yang dapat menghamburkan kembali gelombang bola. Gelombang datar terus merambat dan akan direfleksikan oleh cermin datar Sp dan akan mengalami tumpang tindih dengan gelombang bola yang dihamburkan benda. Kedua gelombang itu akan saling berinterferensi di zone seperti disebutkan di atas sebagai zone plat Fresnel. Jika ditempatkan sebuah plat fotografi (P') di depan benda (lihat gambar[10.23]), setelah dicuci akan diperoleh gambaran zone Fresnel dan apabila disinari dengan sumber cahaya paralel, akan terdapat daerah konsentrasi gelombang berbentuk titik yang menggambarkan bayangan benda penghambur tersebut.

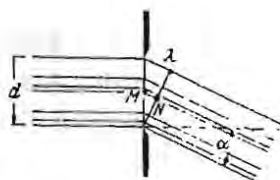
Prosedur itu dikenal sebagai *holografi* dan bayangan gambar hasil interferensi cahaya yang dibentuk disebut *hologram*. Dengan cara itu tidak

ada kemungkinan lain untuk menggunakan benda selain berbentuk mendekati titik karena jika digunakan benda yang lebih besar mengisi ruang, gelombang datar primer akan mengalami tumpang tindih sehingga terbentuk gelombang interferensi yang kompleks. Oleh karena itu, akan dapat diamati bahwa bayangan gambar benda menjadi tidak beraturan (acak) dengan munculnya garis-garis hitam. Kejadian itu, tidak dapat diatasi kecuali menggantikan benda dengan benda berbentuk mendekati titik, walaupun dengan menyinari benda dengan gelombang datar akan terdapat bayangan yang mengambang di dalam ruang.

Gambar holografi praktis dapat dibuat dengan menggunakan *sinar laser* (§12 2 9) Hal sebaliknya dari peristiwa interferensi dan hamburan yang telah dibahas di atas dalam hal ini gelombang mengalami interferensi, yang mempunyai lintasan berbeda-beda. Kegunaan cahaya koheren disadari sangat banyak, dan hanya akan dipenuhi oleh sinar Laser (*Light Amplification by Stimulating Emission Resonance*).

10.2.2 Hamburan Fraunhofer

Peristiwa hamburan ini dapat diamati dengan menggunakan cahaya paralel (sejajar) Dalam hal itu, sumber cahaya maupun layar yang digunakan pada percobaan hamburan Fresnel dijauhkan dari bayangan benda. Selain itu, digunakan cahaya yang datang melalui lensa dan diamati paralel pada titik fokusnya di belakang bayangan hamburan atau ditempatkan sebuah lensa pada celah penghambur. Pada hamburan Fresnel sebaliknya, jarak sumber cahaya dan layar dibuat tidak terlalu besar dibandingkan dengan ukuran benda penghambur.



Gambar 10 24 Hamburan Fraunhofer pada celah. Syarat keadaan minimum antara maksimum utama dan maksimum tetangganya.

a) Hamburan pada Celah

Bayangkan sebuah permukaan celah, lebar d , terpisahkan satu sama lain menjadi "garis-garis" sempit dengan sisi saling paralel (gambar [10.24]). Berdasarkan prinsip Huygens (§4.4.3), cahaya yang dilewatkan pada celah tidak hanya berkas yang melewati sumbunya, juga berkas-berkas gelombang tetangganya. Berkas-berkas tersebut akan dihamburkan membentuk sudut α terhadap normal celah sehingga terdapat beda fase MN antara berkas pinggir dan berkas yang lewat di titik tengah celah, yaitu sebesar $1/2 d \sin \alpha$. Demikian pula beda fase semua berkas cahaya yang mengenai celah, yang berjarak $d/2$ satu sama lain, misalkan terhadap v berkas (bundel gelombang), beda fase berlaku pula antara berkas pertama dan ke $v/2 + 1$, berkas ke 2 dan $v/2 + 2$, berkas ke 11 dan $v/2 + 11$. Jika terdapat beda fase sebesar $\lambda/2$, semua berkas, jika disatukan di titik fokus lensa, akan hilang. Pola yang terbentuk disebut pola gelap, yaitu

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{d}{2} \sin \alpha_1 \quad \text{atau} \quad \lambda = 2d \sin \alpha_1$$

berarti jika terdapat beda fase berkas pinggir sebesar λ .

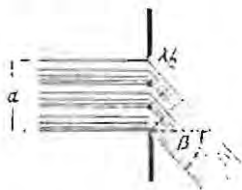
Didapat juga pola gelap jika beda fase antara berkas pertama dan berkas ke $v/4 + 1$ sebesar $\lambda/2$, yaitu jika jarak ke berkas pinggir sebesar $d/4$. Dengan demikian, terdapat beda fase yang sama antara pola garis ke $v/4 + 1$ dan $v/2 + 1$ dari gelombang yang diteruskan dan seterusnya sehingga kondisi yang memenuhi persamaan

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{d}{4} \sin \alpha_2 \quad \text{atau} \quad 2\lambda = 2d \sin \alpha_2$$

juga menimbulkan pola gelap. Syarat yang disebutkan di atas dapat ditulis lebih umum untuk sudut yang dibentuk berkas hamburan dan menyebabkan terjadinya pola gelap sebagai berikut.

$$n\lambda = d \sin \alpha_n \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (10.13)$$

Gelombang yang merambat di belakang celah, sesuai dengan arah



Gambar 10.25 Kondisi timbulnya pola maksimum pertama pada hamburan Fraunhofer dari celah.

gelombang datang, setelah menyatu tidak mempunyai perbedaan fase dan setelah menyatu haruslah jatuh di titik fokus lensa pada daerah pola terang maksimum. Pola garis maksimum haruslah terdapat antara pola minimum pertama dan kedua, atau pola minimum ke n dan $n + 1$. Arah munculnya pola maksimum akan diperoleh jika celah terbagi dalam angka ganjil. Dengan penjelasan yang mirip seperti di atas, diperoleh bahwa jika celah terbagi menjadi tiga (gambar [10.25]), gelombang yang berasal dari dua celah akan saling meniadakan apabila memenuhi kondisi

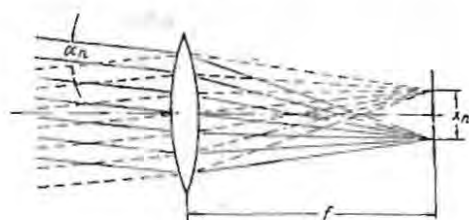
$$\frac{\lambda}{2} = \frac{d}{3} \sin \beta_1 \quad \text{atau} \quad \frac{3}{2} \lambda = d \sin \beta_1$$

Intensitas gelombang yang dihamburkan pada sudut β_1 dari celah ketiga akan membentuk maksimum tetangga pertama pola hamburan. Maksimum selanjutnya timbul pada arah β yang memenuhi kondisi sebagai berikut

$$\frac{5}{2} \lambda = d \sin \beta_2; \quad \text{atau} \quad \frac{7}{2} \lambda = d \sin \beta_3; \dots$$

secara umum dapat ditulis menjadi:

$$(z + \frac{1}{2})\lambda = d \sin \beta_z \quad (z = 1, 2, \dots) \quad (10.14)$$



Gambar 10.26 Perhitungan jarak pola hamburan pada peristiwa hamburan Fraunhofer

Jika λ sangat kecil dibandingkan dengan lebar celah d , sudut α_1 dan β_1 akan berharga kecil pula sehingga pernyataan dengan sinus dapat diganti dengan sudut. Dari persamaan [10.13] dan [10.14] diperoleh

$$\alpha_n = \frac{n\lambda}{d} \quad \text{dan} \quad \beta_z = \frac{(2z+1)\lambda/2}{d} \quad (z = 1, 2, \dots) \quad (10.15)$$

Misalkan bahwa f adalah jarak titik fokus lensa konveks yang ditempatkan di belakang celah maka jarak minimum dihitung dari maksimum orde pertama, yaitu maksimum utama (gambar [10.26]):

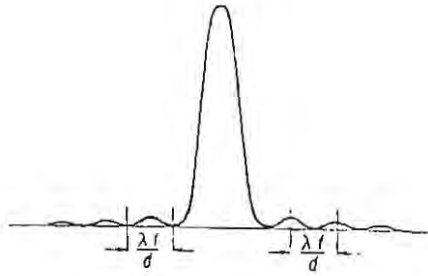
$$x_n = f\alpha_n = n \frac{\lambda f}{d}$$

Jarak antardua minimum adalah sama dengan

$$x_{n+1} - x_n = \Delta x = \frac{\lambda f}{d}$$

Demikian juga jarak antardua maksimum:

$$\Delta x = \frac{\lambda f}{d}$$



Gambar 10.27 Distribusi intensitas pada hamburan celah Fraunhofer

Distribusi intensitas pada pola gambar hamburan celah dalam pembahasan sederhana ini tidak diturunkan. Dari distribusi tersebut hanya dapat dikatakan bahwa intensitas-intensitas maksimum akan berkurang semakin besar ordenya. Distribusi intensitas yang diperoleh berdasarkan teori tertera pada gambar[10.27]

Jika dalam percobaan hamburan Fraunhofer tidak digunakan cahaya monokromatik, melainkan cahaya polikromatik (cahaya "putih"), hanya dua pola minimum paling dalam yang berwarna hitam. Karena adanya beda panjang gelombang yang besar pada spektrum cahaya polikromatik, maksimum cahaya berpanjang gelombang kecil akan terdapat pada di posisi minimum spektrum berpanjang gelombang pendek sehingga akan diperoleh pola hamburan beraneka warna.

b) Hamburan pada Celah Lingkaran

Dari alasan simetris seharusnya pola hamburan celah berbentuk lingkaran akan berbentuk cincin konsentris. Jika α adalah sudut hambur gelombang yang menyebabkan pola hamburan saling meniadakan, pola cincin gelap akan bergantung pada sudut ini dan memenuhi persamaan:

$$\sin \alpha = \frac{n}{2\pi} \frac{\lambda}{r} \quad (10.16)$$

dengan n bilangan sebagai berikut.

$$n = 1, 22\pi; n = 2, 23\pi; n = 3, 24\pi; n = 4, 24\pi; \dots$$

r adalah jari-jari celah. Gambar[10.28] menunjukkan distribusi intensitas pada seluruh luas pola gambar. Maksimum intensitas cincin-cincin maksimum adalah kecil jika dibandingkan dengan intensitas "garis" hamburan di celah dan pola hamburan utama (orde ke nol). Jika jari-jari celah r , jarak titik fokus lensa konveks adalah f , diameter pola hamburan orde ke nol pada layar, berjarak f di belakang lensa adalah:

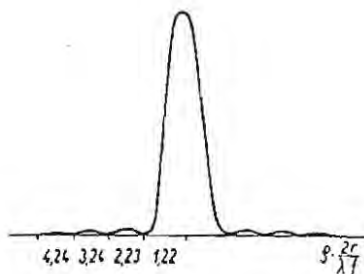
$$d = 2f \frac{1, 22\pi}{2\pi} = 1, 22 \frac{f\lambda}{r};$$

untuk $f = 100$ cm, $r = 1$ cm, $\lambda = 5,8 \cdot 10^{-5}$ cm diperoleh harga $d = 7 \cdot 10^{-3}$ cm.

10.2.3 Resolusi Perangkat Optik

Lensa konveks juga berfungsi seperti celah penghambur. Bayangan gambar yang dibiaskan olehnya, berasal dari benda pada titik tak berhingga tidak akan terdapat pada bidang tempat titik fokus lensa terdapat, melainkan hanya berupa "lempengan"²⁾ pola bayangan yang dikelilingi oleh pola cincin gelap dan terang. Karena hamburan, sebuah benda berbentuk titik tidak akan mempunyai bayangan hamburan berbentuk titik pula. Oleh karena itu, gambar bayangan sebuah bintang terlihat dengan teropong astronomis akan berbentuk "lempengan", karena bayangan gambar diamati melalui lensa okuler. Apakah bayangan gambar dua bintang yang berdekatan dapat dilihat terpisah, bergantung pada apakah "lempengan" hamburan kedua bintang tersebut, yang dibentuk oleh lensa objektif saling tumpang tindih di titik fokusnya atau tidak. Dalam kasus itu tidak hanya sudut hamburan

²⁾Bayangan tidak terfokus pada titik fokus akan melebar dan berbentuk seperti "lempengan" di permukaan layar.



Gambar 10.28 Distribusi intensitas hamburan Fraunhofer pada celah berbentuk lingkaran (jari-jari bayangan hamburan pada layar diukur berada pada jarak λ/f $2r$)

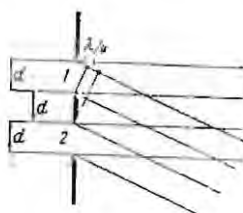
berkas cahaya yang berasal dari kedua bintang, jatuh di teropong, juga ukuran bayangan gambar "lempengan hamburan" Gambar bayangan "lempengan hamburan" itu akan semakin kecil ukurannya jika jari-jari r , jarak titik fokus f lensa dan λ cahaya yang digunakan semakin kecil. Berdasarkan pengalaman, dua gambar bayangan dapat dipisahkan (*resolusi*) satu sama lain, jika pola cincin terang maksimum dari salah satu gambar bayangan terdapat pada pola cincin gelap gambar bayangan lainnya. Resolusi atau harga kebalikan dari sudut pandang terkecil, dapat diperbesar jika permukaan masuknya cahaya pada lensa objektif lebih besar. *Efek hamburan dapat diamati bergantung daya pisah gambar perkakas optik yang digunakan, yaitu perkakas yang digunakan untuk memperbesar gambar bayangan*

Juga pupil mata manusia, berfungsi persis seperti celah tajam, dengan diameter kira-kira 4 mm dan dapat menghamburkan cahaya. Di belakang sisi tajam itu cahaya akan merambat melalui cairan mata berindeks bias 1,33 sehingga panjang gelombang cahaya akan diperkecil menjadi $1/1,33 = 3/4$ kali panjang gelombang semula. Diameter gambar bayangan yang jatuh pada retina, untuk cahaya dengan panjang gelombang $\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ cm dan jarak titik fokus bagian dalam lensa mata manusia sekitar 1,7 cm,

adalah

$$d = 1,22 \frac{f\lambda}{r} = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

Sudut yang dibentuk oleh cahaya yang jatuh dan menyebabkan terjadinya pola cincin terdalam terhadap sumbu penglihatan mempunyai harga sebesar $1,47'$. Hal itu berarti bahwa sebuah gambar bayangan bintang yang diamati pengamat merupakan pola cincin dengan sudut pengamatan sebesar $1'$. Ukuran gambar bayangan yang jatuh di retina adalah $5 \mu\text{m}$ ukuran itu sama dengan jarak antardua sel pasak yang terdapat pada retina. Dengan demikian, dapat disadari bahwa struktur yang terdapat

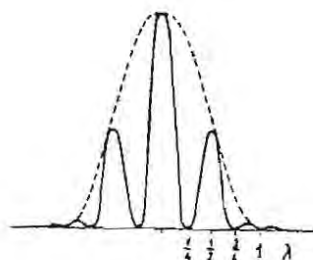


Gambar 10.29 Hamburan Fraunhofer pada celah ganda

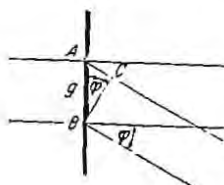
di retina seperti itu sehingga dapat memenuhi resolusi gambar secara optimum

10.2.4 Hamburan Fraunhofer pada Celah Ganda

Dua celah ganda dengan lebar celah sama, d dipisahkan pada jarak yang sama dengan lebarnya (gambar [10.29]). Semua bundel cahaya yang melewati celah mengalami hamburan persis seperti dibahas pada §10.2.2. dan diilustrasikan dengan garis putus-putus pada gambar [10.30]. Sebagai absis adalah beda fase yang dinyatakan dalam panjang gelombang. Beda fase berkas cahaya pinggir pada celah 1 dan berkas paling atas pada celah 2 yang dihamburkan sebesar $\lambda/2$. Pada susunan yang sesuai bagian berkas



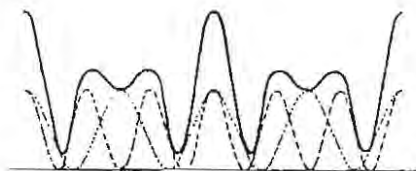
Gambar 10.30 Distribusi intensitas pada maksimum utama hamburan pada celah ganda. Pola-pola terang tersebut dipisahkan oleh empat pola gelap



Gambar 10.31 Perhitungan beda fase cahaya yang dihamburkan dua celah. jarak keduanya lebih besar daripada lebar celah

cahaya yang dihamburkan oleh kedua celah pada arah tersebut akan saling menghilangkan. Hal yang sama berlaku pula untuk arah berkas dengan beda fase sebesar $3\lambda/4$ karena kemudian pada susunan berkas yang sesuai terdapat beda fase berkas yang dihamburkan kedua celah sebesar $3\lambda/2$. Untuk masing-masing celah akan dihasilkan kurva yang digambarkan dengan garis putus-putus pada gambar [10.30], sebagai distribusi intensitas pola hamburan terang yang terdapat di tengah-tengah pola. Pola tersebut timbul dari kedua celah dan dipisahkan oleh empat pola gelap

Jika jarak antara dua celah semakin diperkecil, pola garis yang terdapat di bagian tengah akan semakin "mengembang" (kurva garis putus-putus pada gambar [10.30]) ke arah luar. Pola ini dipisahkan, seperti halnya pada pembahasan sebelumnya, oleh pola maksimum dan minimum.



Gambar 10.32 Gambar bayangan hamburan dua celah tidak dapat digunakan untuk menentukan panjang gelombang cahaya.

Misalkan jarak AB pada gambar[10.31] sama dengan g dan sudut yang dibentuk oleh berkas cahaya yang dihamburkan terhadap berkas yang tidak dihamburkan adalah ϕ , beda fase keduanya diperoleh sebesar $AC = AB \sin \phi = g \sin \phi$. Jika harga AC bukan kelipatan $\lambda/2$, terdapat pola hamburan yang saling menghilangkan (pola gelap). Selain itu, jika AC kelipatan bilangan bulat α akan terdapat pola terang yang tajam dibandingkan dengan tetangganya:

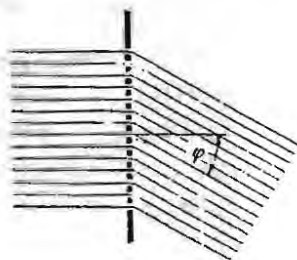
$$z\lambda = g \sin \phi \quad (z = 1, 2, 3, \dots) \quad (10.17)$$

Jika $\lambda < g$, tetapi $\lambda > d$, tinggi pola maksimum tidak lagi dapat dibedakan dengan pola tengah. Gambar[10.32] menunjukkan pola hamburan dua panjang gelombang (kurva yang digambarkan dengan garis adalah untuk cahaya merah dan garis putus-putus untuk cahaya violet). Tumpang tindih kedua pola (kurva) hamburan memberikan distribusi intensitas kembali, seperti halnya jika pola diamati pada layar. Analisis pola untuk menghitung panjang gelombang tidak mungkin dilakukan.

Untuk mengukur panjang gelombang cahaya yang digunakan kurva pola, hamburan, haruslah mempunyai maksimum untuk kedua panjang gelombang terpisah. Untuk itu, biasanya digunakan dua celah yang terpisah pada jarak cukup jauh satu sama lain.

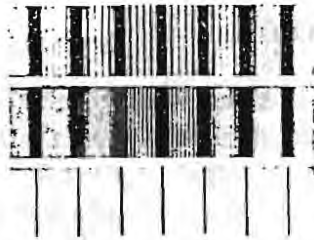
10.2.5 Hamburan Kisi

Pada plat gelas paralel, datar, dibuat "goresan" dengan mesin berjarak sama satu dan lainnya dan disebut *konstanta kisi g*. Antara garis-garis "goresan" tanpa cacat itu terdapat bagian celah yang dapat ditembus cahaya, lebar celah itu dibuat kecil dibandingkan dengan konstanta kisi. Posisi pola hamburan maksimum sesuai dengan syarat yang ada pada persamaan [10.17]. ϕ pada gambar [10.33] adalah sudut antara berkas yang dihamburkan dan berkas yang tidak mengalami hamburan (garis normal permukaan kisi) sehingga menyebabkan beda fase kelipatan bilangan bulat λ . Pola terang yang terjadi pada layar antara pola maksimum utama (orde ke nol) dan orde pertama terdiri atas tumpang tindih berkas cahaya dengan beda fase antara 0 dan λ . Pandang arah $\lambda/4$ yang mempunyai beda fase sebesar $\lambda/4$ sehingga beda fase antara suatu berkas dan berkas tetangganya adalah sama dengan $\lambda/2$. Semua cahaya yang berasal dari seluruh celah kisi akan dihamburkan pada arah ini sehingga dapat disimpulkan bahwa semua intensitas berkas cahaya yang mengalami interferensi setelah

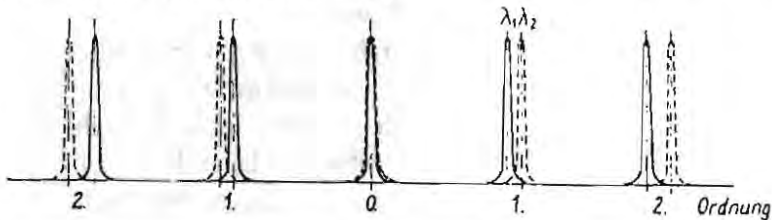


Gambar 10.33 Kisi penghambur

dihamburkan dan merambat pada arah tersebut akan saling menghilangkan. Pada arah ini terdapat interferensi saling menghilangkan sehingga akan diamati pola gelap. Arah $\lambda/6$ mempunyai beda fase $\lambda/6$. Semua berkas dengan arah sama, melewati celah dan yang masing-masing dipisahkan oleh dua celah yang berjarak $3g$, mempunyai beda fase sebesar $\lambda/2$. Semua berkas akan saling tumpang tindih, mengalami interferensi yang saling menghilangkan sehingga diperoleh pola garis gelap, dan seterusnya. Jika



Gambar 10.34 Hamburan bundel cahaya paralel dan monokromatik pada kisi-kisi. masing-masing mempunyai celah sebanak 6, 10, dan 250 (difoto negatif oleh R. W. Pohl). Kisi dengan celah terbanyak akan menghasilkan garis-garis lebih sedikit; pola garis menggambarkan struktur kisi yang mengalami transformasi Fourier [dari H.U. - Harten]



Gambar 10.35 Spektrum yang ditimbulkan oleh hamburan cahaya melalui kisi jumlah celah pada kisi sangat besar, daerah pola hamburan maksimum yang dinyatakan oleh persamaan [10.17] akan sangat rapat berimpit dengan pola garis gelap sehingga terlihat garis gelap. Intensitas total yang dihamburkan bersatu menjadi garis interferensi terang yang sangat sempit (gambar [10.35]) dengan posisi dapat ditentukan berdasarkan pers [10.17].

10.2.6 Resolusi Spektral

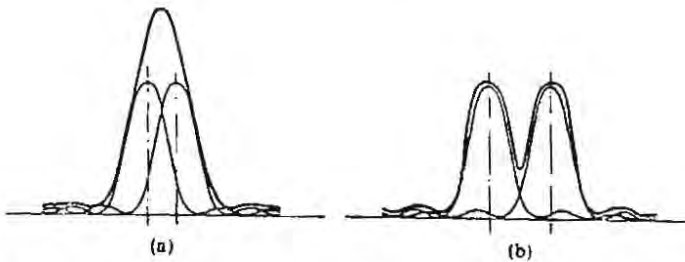
Jika sebuah spektrograf masih dapat memisahkan dua panjang gelombang antara λ dan $\lambda + \Delta\lambda$ dikatakan bahwa spektrograf mempunyai resolusi sebesar $\lambda / \Delta\lambda$. Agar peralatan seperti itu disebut "dapat memisahkan", tentu harus memenuhi beberapa kriteria:

Kemampuan memisahkan adalah keberadaan minimum relatif superposisi kurva pola terang kedua bagian bundel cahaya.

Resolusi celah ganda (gambar[10.29]) diberikan secara sederhana berdasarkan kriteria Rayleigh sebagai berikut.

Maksimum orde ke- m untuk panjang gelombang λ_1 terletak pada sudut $m\lambda_1/d$, minimum orde yang sama untuk panjang gelombang λ_2 terdapat jika sudut sama dengan $(m+1/2)\lambda_2/d$. Kemampuan memisah atau berarti pula sebagai perbedaan panjang gelombang dua berkas, $\lambda_1 - \lambda_2 = \lambda/\Delta\lambda$. resolusi celah ganda dapat diberikan sebagai berikut.

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 2m$$



Gambar 10.36 a dan b Syarat pemisahan "garis" spektral yang tumpang tindih. Jarak dua maksimum harus lebih besar daripada lebar setengah tinggi kurva.

Pelemahan cahaya pada orde yang lebih tinggi menunjukkan adanya peningkatan A tidak terbatas.

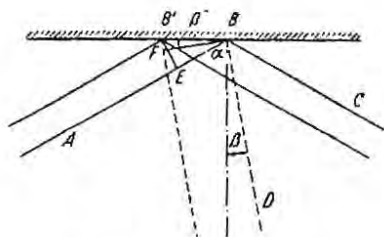
Sekarang perhatikan sebuah kisi terdiri atas q celah, jarak antara adalah d dan disinari secara keseluruhan sehingga semua bundel cahaya mengalami interferensi. Pada arah $m = m\lambda/d$ semua bundel cahaya mengalami interferensi saling menguatkan sedangkan pada arah $m' = (m+1/2)\lambda/d$ terjadi interferensi saling menghilangkan antara bundel cahaya bertetangga. Akan tetap, pada pembelokan bundel cahaya yang sangat kecil dari m terdapat bagian bundel cahaya, masing-masing dengan bundel tetangganya mengalami interferensi saling menghilangkan pula, dan jika tidak sesama bundel cahaya tetangganya, bahkan sampai dengan bundel cahaya yang berjarak setengah dari lebar kisi seluruhnya mengalami interferensi saling menghilangkan. Celah pada perbedaan arah ini terdapat pola gelap terdapat pula pola maksimum

terang jika semakin tinggi jumlah celah atau jumlah goresan q , semakin terang pula pola tersebut. Terlihat bahwa muncul q di 2 pada celah ganda dan resolusi kisi menjadi:

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = qm \quad (10.18)$$

Dapat diamati bahwa kedua faktor q dan m secara fisis berasal dari pengertian yang berbeda: q menggambarkan ketajaman dan m menyatakan pemisahan pola-pola maksimum untuk panjang gelombang yang berbeda. Persamaan [10.18] secara umum dapat diartikan sebagai berikut.

Resolusi adalah sama dengan perbedaan fase berkas cahaya pinggir untuk seluruh kisi yang dinyatakan dalam panjang gelombang. Hal itu mempunyai arti bahwa seolah kisi keseluruhannya "lenyap" dan hanya terdapat sebuah kisi dengan lebar yang sama. Akan tetapi, kisi akan memberikan pola maksimum pada arah tersebut dengan faktor q berorde kecil dan intensitas maksimumnya lebih tajam dibandingkan dengan maksimum yang berasal dari satu celah



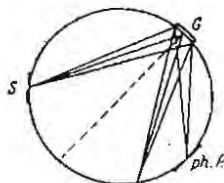
Gambar 10.37 Refleksi pada kisi (konstanta kisi $g = B'B$)

Terdapat kisi yang mempunyai lebih dari 100.000 goresan, dalam pemakaian orde ketiga resolusi dapat mencapai 300.000, atau dengan perkataan lain kisi ini masih dapat memisahkan panjang gelombang 6000 Å jika hanya terdapat perbedaan panjang gelombang sekitar $\lambda = \lambda/zn = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Å}$.

Disamping digunakan kisi yang dapat melewatkan cahaya, digunakan pula *kisi refleksi* (kisi cermin), yaitu kisi yang mempunyai goresan berjarak

sama satu dan lainnya dan dilapisi dengan lapisan logam yang dapat mereflesi cahaya (lihat gambar [10.37]). Misalkan AB adalah arah cahaya yang datang di permukaan kisi dan membentuk sudut α terhadap garis normal permukaan kisi. BC adalah arah cahaya yang direflesi dan tidak mengalami hamburan. Cahaya yang dihamburkan membentuk sudut β terhadap garis normal permukaan, yaitu arah BD dan datang dari celah bertetangga B dan B' , mempunyai beda fase sebesar $EB - FB'$.

$$EB - FB' = g \sin \alpha - g \sin \beta$$



Gambar 10.38 Posisi kisi konkav pada lingkaran Rowland

Akan terdapat pola interferensi saling menguatkan jika:

$$z\lambda = g(\sin \alpha - \sin \beta) \quad (10.19)$$

atau jika cahaya yang datang dan dihamburkan terletak pada sisi yang sama terhadap garis normal

$$z\lambda = g(\sin \alpha + \sin \beta) \quad (10.20)$$

Untuk menghindari adanya absorpsi cahaya dengan panjang gelombang panjang (infra merah) atau cahaya berpanjang gelombang pendek (ultraviolet) pada gelas kisi atau lensa kuarsa, pada kisi datar yang berfungsi sebagai pembentuk bayangan gambar, yaitu sebagai pembentuk spektrum di bidang fokus, digunakan *kisi konkav*. Permukaan kisi itu dipoles sangat halus dengan logam cekung dan terdapat goresan-goresan.

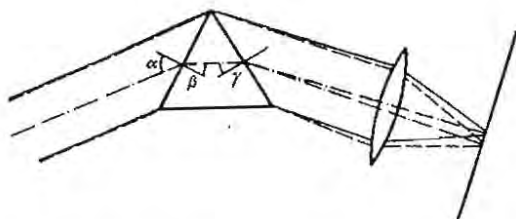
Gambaran skematik posisi kisi konkav yang ditempatkan di permukaan lingkaran diilustrasikan oleh gambar [10.38]. Lingkaran ini biasanya disebut *lingkaran Rowland*. Celah S dan kisi G terdapat pada sebuah lingkaran, dengan diameter sama dengan jari-jari kelengkungan cermin cekung. Selanjutnya, pola-pola interferensi atau difraksi terang spektrum-spektrum berbagai orde dapat diamati pada permukaan lingkaran itu, dan untuk mendokumentasikan spektrum-spektrum ini digunakan plat fotografi $ph P$.

Resolusi Sebuah Spektrograf Prisma

Dua bundel cahaya dengan beda panjang gelombang $\Delta\lambda$ dibiaskan oleh prisma melalui sudut $\Delta\varphi$ menjadi spektrum dengan panjang gelombang yang berbeda (gambar [10.39]). Setelah mengalami pembiasan, masing-masing gelombang tidak membentuk berkas bias konvergen, melainkan divergen dengan sudut bias $\Delta\psi$. $\Delta\psi$ akan semakin kecil jika bidang di permukaan prisma yang dilalui cahaya (celah) semakin kecil. $\Delta\psi$ akan berharga minimum jika lebar total prisma b disinari jika $\Delta\psi \approx \lambda/d$. Kedua bundel cahaya dengan perbedaan panjang gelombang $\Delta\lambda$ masih dapat dipisahkan melalui prisma jika $\Delta\psi \approx \Delta\varphi$.

Sekarang akan dibahas bagaimana menentukan harga $\Delta\psi$. Dua bundel cahaya tersebut haruslah datang dari arah yang sama, keduanya praktis simetris melalui prisma sehingga terjadi pembiasan dan pemisahan panjang gelombang maksimum untuk kedua bundel cahaya tersebut. Dalam hal itu $\beta = \gamma$ sehingga berdasarkan hukum Snellius diperoleh $\sin \beta = \sin \gamma n$ pembiasan dapat dinyatakan hanya dalam β :

$$\begin{aligned} \frac{d\beta}{d\lambda} &= \frac{d\beta}{d \sin \beta} \frac{d \sin \beta}{d\lambda} \\ &= -\frac{1}{\cos \beta} n^{-2} \sin \alpha \frac{dn}{d\lambda} \\ &= -\frac{1}{\cos \beta} n^{-1} \sin \beta \frac{dn}{d\lambda} \\ &= -\frac{1}{n} \frac{dn}{d\lambda} \tan \beta \end{aligned}$$



Gambar 10 39 Spektrum prisma dapat menimbulkan pola hamburan jika memenuhi susunan tertentu (dalam hal itu dianggap pola berada pada jarak yang sangat jauh) Lebar prisma menentukan lebar pola hamburan atau dengan perkataan lain menentukan kemampuan memisahkan diri dari celah untuk panjang gelombang yang berbeda-beda (resolusi).

Sudut pemisah sama dengan dua kali lebih besar daripada perbedaan β sendiri.

$$\Delta\varphi = -\frac{2}{n} \frac{dn}{d\lambda} \tan \beta \cdot \Delta\lambda$$

Dengan demikian, syarat resolusi diperoleh

$$\frac{\lambda}{b} = \frac{2}{n} \frac{dn}{d\lambda} \tan \beta \cdot \Delta\lambda$$

atau

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \tan \beta \frac{dn}{d\lambda}$$

Diperoleh kesimpulan sederhana sebagai berikut Resolusi (daya pisah) spektrograf prisma sama dengan tebal basis prisma $2d$ dikalikan dengan faktor dispersi $dn/d\lambda$ gelas (bahan yang dipakai untuk membuat prisma). Karena dispersi selalu berhubungan dengan absorpsi, tidak ada gunanya

menambah ketebalan prisma karena hanya akan menyebabkan kehilangan intensitas cahaya. Untuk cahaya kuning, dispersi gelas Flint berdasarkan gambar[9 21] sekitar $dn/d\lambda \approx 0,001/100 \text{ nm} = 10^{-3} \text{ cm}$. Dengan tebal gelas $d = 10 \text{ cm}$ akan diperoleh resolusi teoritis $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-4}$. Cahaya kuning Natrium D-doublet ($\lambda = 589,0$ dan $589,6 \text{ nm}$) dapat terjadi pemisahan pola interferensi.

10.2.7 Teori Abbe: Resolusi Mikroskop

Agar bayangan benda dapat terbentuk tanpa gangguan pada mikroskop, berdasarkan teori Abbe dapat dimungkinkan timbulnya banyak pola maksimum pada mikroskop yang ditimbulkan oleh cahaya yang berasal dari kondensor dilewatkan pada benda serta mengalami hamburan. Terjadinya hal itu merupakan peran asal bayangan tersebut. Jika tidak terdapat cahaya hamburan, melainkan hanya cahaya paralel yang berasal dari kondensor mikroskop dan masuk ke lensa objektif, akan muncul bayangan benda yang tidak terstruktur dengan baik.

Sebagai objek digunakan sebuah kisi yang mengandung celah sangat halus (gambar[10.40]) dan disinari oleh cahaya secara tegak lurus dari bawah. Cahaya yang dihamburkan oleh benda akan sampai di lensa objektif mikroskop, yaitu pola hamburan orde ke nol dan pertama M_0 , M_1 dan M_1' pada bidang fokus lensa objektif. Orde lebih besar lainnya tidak cukup dapat ditangkap oleh permukaan lensa objektif.

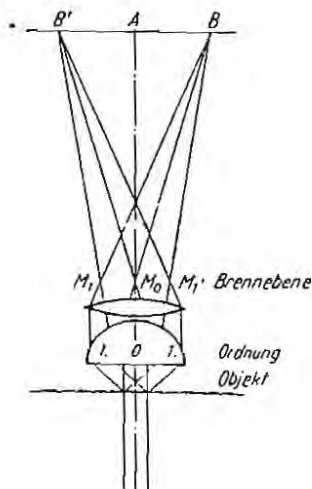
Cahaya yang diteruskan melalui M_0 , M_1 , dan M_1' akan menjadi bayangan sementara (benda lensa okuler) B dan B' . Bayangan gambar pada B dan B' berasal dari interferensi cahaya yang terjadi dari M_0 , M_1 , dan M_1' . Bayangan gambar celah kisi adalah garis-garis interferensi cahaya, yang semakin tajam jika semakin banyak jumlah pola-pola maksimum M yang ikut serta, atau semakin banyak orde pola maksimum diterima oleh lensa objektif (lihat gambar[10 18]).

Semakin kecil konstanta kisi g maka semakin besar sudut α , yaitu sudut hamburan cahaya yang membentuk orde pertama pola interferensi terhadap sumbu. Agar pola-pola tersebut masih dapat diterima lensa

objektif, α tidak boleh lebih besar daripada sudut yang dibentuk berkas pinggir terhadap sumbu optis yang masuk ke permukaan lensa objektif; bergantung pada konstanta kisi g dan panjang gelombang persamaan [10.17]:

$$g = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$$

Besaran itu sama dengan jarak terkecil antara dua titik pada benda yang dibolehkan sehingga bayangan benda dapat terlihat dengan baik di mikroskop. Harga besaran tersebut dapat dibuat semakin kecil, jika antara benda (gelas wadah) dan objektif terdapat medium dengan indeks bias n



Gambar 10.40: Perhitungan resolusi pada mikroskop

(sistem seperti itu disebut sistem immersi, lihat §9.2.8) Dalam hal itu, panjang gelombang menjadi "diperkecil" sebesar λ/n . Dengan demikian,

λ pada persamaan dapat diganti dengan

$$g = \frac{\lambda}{n \sin \alpha} \quad (10.21)$$

$n \sin \alpha$ disebut *apertur numeris* (§9.2.8). $1/g =$ apertur numeris dibagi dengan panjang gelombang dan disebut *resolusi mikroskop* (di udara). Dua titik yang terdapat pada objek berjarak g akan dapat diamati dengan jelas melalui mikroskop atau dengan perkataan lain masih dapat dipisahkan. Dengan mikroskop tidak dapat diamati struktur dengan baik jika jarak titik tersebut lebih kecil daripada panjang gelombang (λ) cahaya yang digunakan.

10.3 Polarisasi Cahaya

10.3.1 Polarisasi Linier dan Eliptik

Bahwa gelombang cahaya adalah transversal, diketahui dari polarisabilitasnya. Pengertian transversal gelombang cahaya diartikan bahwa vektor medan listrik dan magnet saling tegak lurus terhadap arah rambat gelombang.

Jika pada gelombang cahaya vektor medan listrik selalu mempunyai satu arah (atau arahnya berubah menjadi sebaliknya), gelombang dikatakan mengalami *polarisasi linier*. Arah medan listrik disebut *arah polarisasi*. Bidang yang tegak lurus pada arah tersebut, tempat vektor medan magnet dan arah rambat gelombang terletak walaupun mengandung kesalahan pengertian, disebut *bidang polarisasi*. Cahaya yang berasal dari benda pijar (cahaya temperatur) mempunyai seluruh arah polarisasi yang sama dan tidak teratur. Cahaya yang dihasilkan dari peristiwa emisi sebuah atom umumnya adalah cahaya terpolarisasi, tetapi pada berkas cahaya temperatur tidak tersusun secara keteraturan. Cahaya demikian disebut cahaya yang tidak mengalami polarisasi.

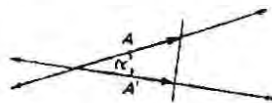
Apabila medan listrik bergetar sedemikian rupa sehingga puncak vektor medan berada pada sebuah elips di sekitar arah rambatannya, cahaya

yang mengalami peristiwa demikian disebut cahaya *polarisasi eliptik*. Keadaan khusus yang penting dari polarisasi eliptik adalah *polarisasi lingkaran*: pada polarisasi itu medan listrik mengitari lingkaran (§4.1.3). Sebuah gelombang yang mengalami polarisasi eliptik atau lingkaran dapat dibagi menjadi dua komponen gelombang yang saling tegak lurus satu sama lain, dengan beda fase antara keduanya sebesar 0 dan $\pi/2$. Pada gelombang terpolarisasi lingkaran terdapat beda fase sebesar $\pi/2$ dan amplitudo kedua gelombang adalah sama. Pada beda fase 0 elips akan "berubah" mengalami degenerasi menjadi garis lurus. Dalam hal itu, cahaya yang terpolarisasi linier juga dapat dipisahkan menjadi dua komponen yang saling tegak lurus satu sama lainnya sesuai dengan amplitudo masing-masing.

10.3.2 Polarisasi: Perkakas Polarisasi

Sesuatu, dengannya peristiwa polarisasi cahaya dapat ditimbulkan secara umum disebut *polarisator*. Perkakas yang dipakai untuk mengetahui polarisasi pada cahaya disebut *analisisator*. Setiap polarisator dapat digunakan untuk mendapatkan *bidang getar* cahaya yang mengalami polarisasi (sebagai analisisator).

Dua polarisator P_1 dan P_2 yang menimbulkan polarisasi linier, misalnya karena polarisator tersebut bidang getar gelombang akan

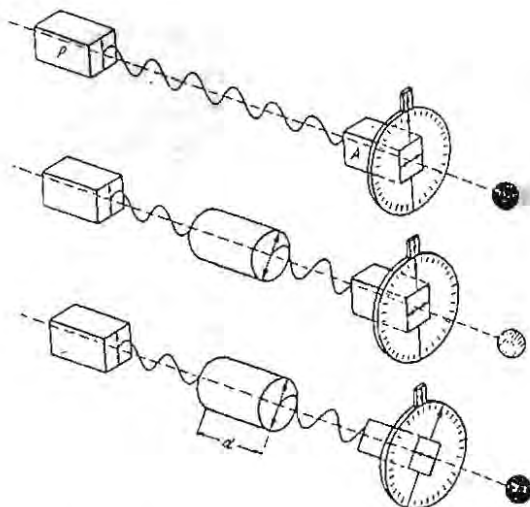


Gambar 10.41 Penentuan intensitas cahaya yang mengalami polarisasi karena dilewatkan pada analisisator

membentuk sudut α terhadap sebuah sumbu. Pada arah sumbu jatuh bundel cahaya yang tidak mengalami polarisasi pada P_1 . Di belakang P_1 akan diamati cahaya terpolarisasi linier dengan amplitudo A . P_2 hanya dapat melewati suatu komponen medan cahaya yang terletak pada arah getarnya, yaitu sumbu gelombang dengan amplitudo.

$$A' = A \cos \alpha$$

A' akan berharga nol jika $\alpha = 0$. *Polarisator saling* tidak akan melewatkan cahaya, kecuali terjadi suatu peristiwa yang dapat mengubah arah polarisasinya.



Gambar 10-42 Perkakas polarisasi. Atas: susunan pembalik Nicols. Tengah: polarisasi cahaya yang berasal dari vektor komponen medan listrik melewati suatu bahan yang dapat merotasiannya. Bawah: Pengukuran sudut putar dengan memutar analisator sehingga diperoleh keadaan gelap yang baru.

Perkakas Polarisasi

Dari perkakas polarisasi muncul cahaya yang tidak terpolarisasi (gambar [10-42]) di P . Analisator A dilengkapi dengan lempengan lingkaran pengukur skala untuk menentukan arah polarisasi. Analisator serupa itu juga dapat dipakai jika cahaya mengalami polarisasi karena sebuah benda (bahan) yang ditempatkan antara P dan A .

Susunan peralatan yang sama juga dapat dipakai untuk mengukur perubahan intensitas bundel cahaya secara presisi. Karena intensitas gelombang cahaya sebanding dengan amplitudo kuadrat, intensitas I , yaitu intensitas cahaya yang dilewatkan pada perkakas polarisasi, akan bergantung pada sudut α yang dibentuk antara analisator dan

polarisator:

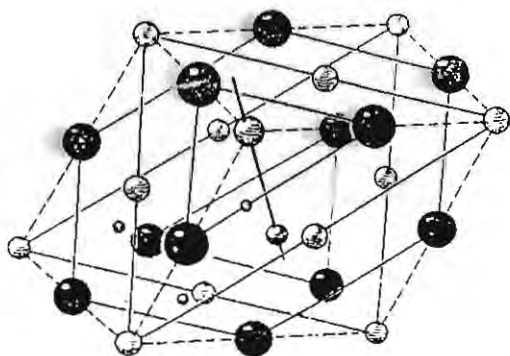
$$I' = I \cos^2 \alpha$$

I adalah intensitas pada $\alpha = 0$. Peralatan semacam itu banyak digunakan pada berbagai peralatan *fotometer*.

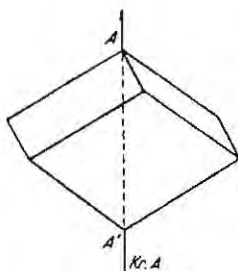
10.3.3 Polarisasi Melalui Pembiasan Ganda

Hukum-hukum optik yang telah dibahas pada bab ini, misalkan hukum pembiasan Snellius hanya berlaku jika kecepatan cahaya di segala arah di dalam medium sama, atau berlaku untuk *medium isotropik*. Gas dan kebanyakan zat cair homogen, benda padat, selama mempunyai struktur *amorf* (misalnya gelas) atau mempunyai struktur teratur berbentuk kubus, (misalnya intan) adalah bahan isotrop optis. Bahan-bahan itu dapat kehilangan sifat isotropiknya jika mengalami deformasi (perubahan bentuk) atau diberi medan listrik atau magnet atau juga jika bahan memiliki struktur lapisan halus. Struktur halus itu dimungkinkan, misalkan bahan dimasukkan ke dalam larutan yang mengandung rantai-ikat molekul-molekulnya jika larutan mengalir.

Kebanyakan kristal tidak hanya bersifat optis, melainkan mempunyai sifat lainnya, seperti *anisotropik*, misalnya mempunyai sifat panas, sifat-sifat listrik, konduktifitas, konstanta dielektrisitas untuk arah pada kristal yang berbeda-beda pula. Dari struktur atom kristal, hal tersebut mudah dimengerti. Contoh klasik sebuah kristal anisotropik adalah kapur (CaCO_3) yang strukturnya diilustrasikan gambar [10 43]. Mudah dimengerti bahwa pada sumbu yang digambarkan terdapat simetri (struktur segitiga dan segi enam masing-masing grup atom Ca dan molekul CO_3). Untuk arah kristal lainnya terdapat hal yang sama, yaitu mempunyai dua simetri. Dalam kristal berbentuk kubus sebaliknya jumlah simetri akan lebih banyak lagi. Sumbu simetri kristal demikian disebut *sumbu utama*. Patut pula diperhatikan bahwa sumbu utama kristal digambarkan tidak melalui sudut-sudut kisi. Untuk kristal dikarakteristikan oleh sudut bukan panjang sisi



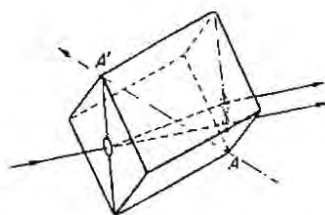
Gambar 10.43 Kisi kristal kapur CaCO_3 Bola hitam, C. bola putih: Ca, bola putih kecil, O. Atom-atom lainnya berada di sekitar 1 atom Ca



Gambar 10.14 Kristal kapur rhombohedral

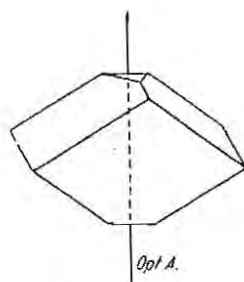
Postur (bentuk perkembangan kristal) lainnya dan bentuk celah kristal kapur tersebut adalah *rhombohedral*, sebagai permukaan paralelogram, salah satunya mempunyai sudut 102° dan lainnya adalah 78° . Sumbu utama terletak dari sudut, sebagai perpanjangan garis yang dibentuk oleh sudut 102° , simetri terhadap ketiga sisinya (gambar [10.45])

Semua sifat-sifat fisis untuk kristal pada gbr [10.45] akan mengakibatkan kecepatan cahaya (tepatnya kecepatan-kecepatan cahaya) pada semua permukaan, terletak tegak lurus terhadap sumbu utama



Gambar 10.45 Pembiasan ganda pada kristal kapur. Permukaan uang melalui berkas jatuh dan sumbu $A-A'$ adalah "potongan utama" dari berkas cahaya

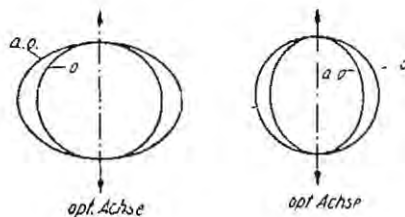
(misalnya pada permukaan yang dihaluskan, diilustrasikan gambar[10.46]). Akan tetapi, pada arah ini, seperti umumnya pada arah lainnya yang tidak persis berimpit pada sumbu utama, kecepatan cahaya akan bergantung pada arah polarisasi. Pada arah *sumbu optis* kecepatan cahaya tidak bergantung pada arah polarisasi, yaitu mempunyai harga sama dengan c_0 , yang disebut *kecepatan utama cahaya dalam kristal*. Tegak lurus terhadap sumbu optis, cahaya merambat dengan kecepatan c_o , yaitu jika vektor medan magnet terletak sesuai dengan sumbu optis atau tegak lurus vektor medan listrik. Cahaya dengan arah polarisasi demikian disebut *cahaya biasa* (ordiner). Cahaya yang merambat pada arah lainnya di dalam kristal kapur disebut *cahaya luar biasa* (ekstraordiner), dengan kecepatan lebih besar daripada $c_{oo} = 1,116 c_0$. Untuk arah jatuh yang terletak di antara keduanya, untuk cahaya biasa



Gambar 10.46 Definisi kristal bersumbu tunggal. Sumbu optis dan kristalograf saling bertumpukan

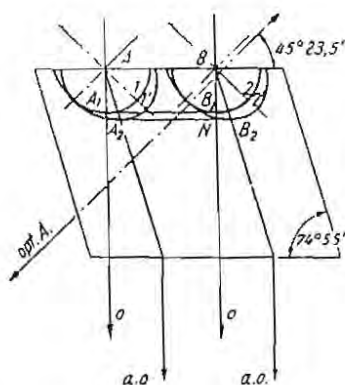
selalu mempunyai kecepatan sama dengan c_0 sedangkan untuk cahaya luar biasa berharga antara c_0 dan c_{ao} . Permukaan gelombang cahaya biasa yang merambat dari satu titik berbentuk bola sedangkan untuk cahaya luar biasa berbentuk elipsoida datar dengan sumbu rotasinya terletak persis pada sumbu optis. Kristal yang mempunyai sifat demikian disebut *kristal bersumbu tunggal negatif*. Kristal *kuarsa* sebaliknya *kristal bersumbu tunggal positif* karena permukaan cahaya luar biasa merupakan elipsoida yang mengalami rotasi (gambar[10.47]).

Cahaya yang tidak terpolarisasi jatuh secara tegak lurus pada permukaan rhombohedral akan bergeser ke sumbu optis (gambar[10.48]). Untuk kedua arah polarisasi terlihat konstruksi gelombang elementer Huygens, terdapat secara berbeda pada setiap titik di dalam kristal yang "terisi" cahaya. Untuk cahaya biasa (*ordiner*) berlaku gelombang bola sedangkan untuk gelombang luar biasa (*elektroordiner*) permukaan gelombang adalah elipsoida, dengan sumbu kecilnya (sumbu optis) terletak



Gambar 10.47 a dan b. Permukaan gelombang cahaya di dalam kristal bersumbu tunggal negatif (a) dan positif (b)

pada permukaan yang terpisah. Permukaan gelombang sebenarnya sebagai permukaan tangensial gelombang elementer. Sementara rangsangan yang diakibatkan cahaya pada gambar[10.48] untuk gelombang biasa terletak tegak lurus terhadap permukaan pemisah berpindah dari A ke A_1 sedangkan untuk gelombang luar biasa merambat lebih jauh melewati lintasan ke AA_2 dengan arah sedikit mengalami pergeseran.



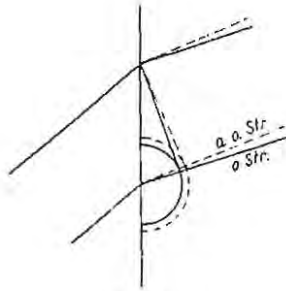
Gambar 10 48 Terjadinya pemisahan pada cahaya biasa dan luar biasa pada cahaya yang jatuh tegak lurus pada permukaan rhombohedral berdasarkan prinsip Huygens.

Arah berkas cahaya luar biasa mengalami pembiasan (pembelokan) dan mengalami pemisahan dengan cahaya biasa. Dari permukaan yang berada di seberang permukaan rhombohedral kedua berkas saling paralel satu dan lainnya.

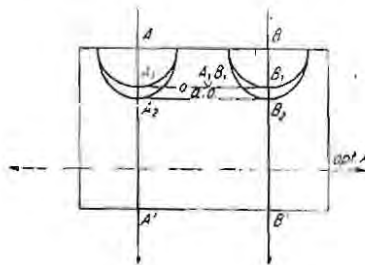
Cahaya yang jatuh dan mengalami pergeseran sedikit pada permukaan pemisah, berkas cahaya biasa mengikuti hukum pembiasan Snellius sedangkan berkas cahaya luar biasa tidak karena selalu terdapat berkas-berkas yang mengalami pembiasan lebih besar terhadap sumbu optis. Oleh karena itu, tidak lagi memenuhi hukum Snellius, kecuali cahaya jatuh mempunyai arah tegak lurus terhadap sumbu optis atau sesuai dengan arahnya (lihat gambar [10.49]).

Penggunaan selanjutnya perhatikan berkas cahaya yang jatuh tegak lurus pada sebuah plat yang dipotong paralel terhadap sumbu optis. Potongan permukaan gelombang cahaya luar biasa dengan bidang gambar pada gambar [10.50] di sini digambarkan sebagai elips dengan sumbu panjangnya terletak tegak lurus pada permukaan plat.

Selanjutnya, tidak terjadi pemisahan cahaya biasa maupun luar biasa,



Gambar 10.49 Berlakunya hukum Snellius untuk cahaya biasa dan luar biasa jika arah cahaya datang tegak lurus terhadap sumbu optis



Gambar 10.50 Rambatan permukaan gelombang berkas cahaya biasa dan luar biasa pada plat yang dipotong paralel terhadap sumbu optis

tidak satu pun dari keduanya mengalami pembiasan. Akan tetapi gelombang cahaya luar biasa merambat lebih cepat karena kecepatannya yang besar, dibandingkan dengan cahaya biasa. Setelah kedua berkas meninggalkan plat, masing-masing berkas akan mempunyai fase berbeda. Jika tebal plat d , untuk gelombang cahaya biasa terdapat beda fase sebesar d/λ_o sedangkan berkas luar biasa d/λ_{eo} . Setelah keduanya meninggalkan plat, karena berkas luar biasa lebih cepat merambat dibandingkan dengan berkas cahaya biasa, cahaya luar biasa akan meninggalkan cahaya biasa sejauh

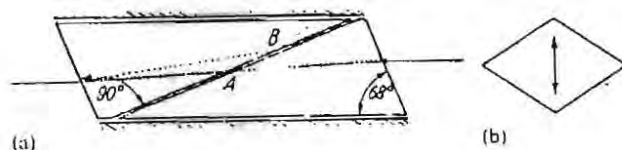
$$d \left(\frac{1}{\lambda_o} - \frac{1}{\lambda_{eo}} \right) = \frac{d}{\lambda_{eo}} (n_e - n_{ao}) \quad (10.22)$$

dan panjang gelombang vakuum.

Untuk mendapatkan cahaya terpolarisasi linier di luar kristal, haruslah salah satu bagian cahaya, cahaya biasa atau luar biasa, dihilangkan. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan prisma Nicols (dinamakan juga Nicols pendek, gambar[10.51]):

Pada ujung potongan kristal kapur yang memanjang yang dihaluskan dengan baik dibandingkan dengan celah biasa dipotong secara diagonal dan kedua potongan dihubungkan kembali dengan bahan perekat tertentu sehingga kedua potongan menjadi satu kembali. Indeks bias bahan perekat haruslah lebih kecil sedikit dibandingkan dengan indeks bias kristal kapur ($n = 1,66$). Berkas jatuh pada B pada sudut yang lebih besar daripada sudut total refleksinya dan akan mengalami refleksi ke arah dinding yang dihitamkan dan pada bagian tersebut cahaya diabsorpsi. Karena indeks biasnya yang relatif lebih kecil, cahaya luar biasa akan jatuh pada titik A di lapisan perekat dengan sudut datang yang lebih kecil. Bahan perekat dipilih seperti itu, bahwa indeks biasnya lebih kecil mendekati cahaya luar biasa. Oleh karena itu, hampir tidak akan terdapat kehilangan karena refleksi. Bidang getar cahaya luar biasa itu adalah bidang gambar[10.51a]. Pada gambar[10.51b] terlihat prisma digambarkan pada arah panjangnya. Arah tanda panah pada gambar menunjukkan arah getar cahaya luar biasa dan juga arah getar cahaya yang keluar dari prisma Nicols dan mengalami polarisasi, bidang itu disebut *bidang getar prisma*.

Selain kristal bersumbu tunggal, terdapat pula kristal pembias bersumbu ganda yang mengandung dua arah dan pada kristal ini hanya terjadi satu rambatan gelombang cahaya. Kristal itu mengandung dua sumbu optis dan disebut *kristal bersumbu ganda*. Kristal tersebut umpamanya *argonit*, yaitu kristal CaCO_3 dengan struktur lain dan



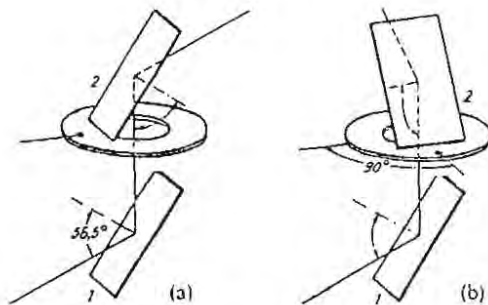
Gambar 10.51 a. dan b Prisma Nicols

glimmer Pada kristal-kristal sumbu ganda itu kedua macam cahaya (cahaya biasa dan luar biasa) tidak mengikuti hukum Snellius, yang berarti pula bahwa kedua berkas cahaya bersifat di luar biasanya.

Diskhroisme

Kristal bersumbu tunggal yang melemahkan berkas cahaya biasa dan luar biasa disebut *diskroisme*. Sebuah plat *turmalin* yang mempunyai sumbu optis sejajar dengan berkas datang akan dapat mengabsorpsi cahaya luar biasa hampir sempurna pada ketebalan hanya 1 mm. Plat ini hanya melewatkan sebagian kecil cahaya luar biasa sehingga seolah tidak perlu menggunakan polarisator.

Filter polarisasi atau lapisan tipis pada submikroskopik dikroisme atau pada kristal berbentuk jarum diletakkan secara paralel satu dan lainnya, pada saat ini berguna dan disebut "polarisator klasik".



Gambar 10.52 a dan b Pembuktian polarisasi cahaya melalui refleksi

10.3.4 Polarisasi Melalui Refleksi dan Pembiasan

Dan sebuah plat gelas (tidak dilapisi logam, atau bukan cermin) cahaya mengalami refleksi dengan sudut $56,5^\circ$ dan jatuh pada plat gelas kedua yang terletak paralel dengan plat gelas pertama (gambar[10.52a]). Selanjutnya, plat gelas kedua dirotasi terhadap sebuah sumbu yang paralel

terhadap berkas yang direfleksi plat gelas pertama. Diperoleh bahwa cahaya yang direfleksikan dua kali menjadi lebih “gelap” dan setelah dirotasi pada sudut 90° tidak akan terdapat cahaya sama sekali. Pada sudut rotasi 180° , yaitu posisi bidang jatuh kedua plat gelas saling berhimpit, didapat intensitas cahaya sama dengan pada posisi a), pada sudut rotasi 270° kembali diperoleh keadaan gelap.

Fenomena itu dapat membuktikan bahwa cahaya yang direfleksikan oleh plat gelas pertama mengalami polarisasi sempurna, yaitu pada arah yang terletak tegak lurus terhadap bidang jatuh. Vektor medan listrik gelombang cahaya mengalami getaran paralel terhadap bidang gelas. Pada posisi a), plat gelas kedua dapat merefleksikan cahaya yang mengalami polarisasi tersebut karena syarat refleksi akibat identitas dari bidang jatuh adalah sama. Pada keadaan b) (90°) plat kedua tidak dapat lagi merefleksikan cahaya terpolarisasi karena cahaya terpolarisasi yang datang padanya tidak mempunyai komponen pada arah yang dapat direfleksikan permukaan plat (vektor medan listrik bergetar ke dalam plat). Pada sudut jatuh (untuk gelas $56,5^\circ$) cahaya yang datang akan terpolarisasi dan sudut ini dinamakan sebagai sudut Brewster atau *sudut polarisasi*. Jika sudut datang lebih besar atau lebih kecil daripada sudut Brewster, pada sembarang rotasi, baik pada a) dan b), intensitas cahaya tidak akan mencapai harga nol, tetapi akan mempunyai harga minimum tertentu. Cahaya yang direfleksikan oleh plat pertama masih mengandung komponen yang bergetar di bidang jatuh plat pertama dan cahaya yang sampai di plat kedua (keadaan b).) juga akan mengalami refleksi.

Gelombang yang direfleksikan, berdasarkan prinsip Huygens-Fresnel mengandung tumpang tindih gelombang-gelombang elementer dengan titik transisinya bertemu dengan gelombang jatuh pada permukaan. Secara fisis untuk gelombang elektromagnetik muatan “titik di permukaan” pada suatu lapisan dengan ketebalan tertentu di dekat permukaan, berasal dari medan listrik gelombang datang terangsang untuk bergetar. Getaran ini timbul pada arah medan listrik perangsang. Bayangkan sebuah muatan yang bergetar (dipol Hertz) pada arah getarnya tidak mengalami emisi

(§7.7.7) sehingga tidak akan terdapat penyebab gelombang dapat mengalami refleksi, jika arah sesaatnya terdapat pada arah getar dipol. Hal itu pada jatuhnya sebuah gelombang di permukaan jatuh akan mengalami polarisasi, persis seperti pada kasus, seandainya berkas yang dibiaskan dan direfleksi terletak saling tegak lurus. Dengan demikian, berdasarkan gambar [10.53] $\beta_p = 90^\circ - \alpha_p$ sehingga $\sin \beta_p = \cos \alpha_p$. Dari hukum pembiasan cahaya $\sin \alpha_p / \sin \beta_p = n$, dalam hal ini

$$\tan \alpha_p = n \quad (10.23)$$

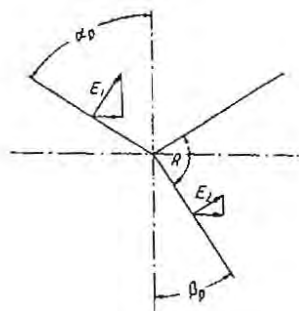
Persamaan [10.23] adalah hukum Brewster untuk sudut jatuh cahaya terpolarisasi yang tidak direfleksikan. Jika arah polarisasi terletak tegak lurus terhadap bidang jatuh (paralel terhadap permukaan), tidak akan terdapat kesukaran emisi. Apabila cahaya jatuh tidak mengalami polarisasi, maka pada sudut Brewster hanya akan direfleksi gelombang yang terpolarisasi.

Kenyataan yang sama terjadi pula dari pengamatan yang berbeda sama sekali.

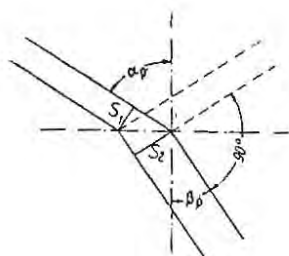
Agar gelombang terpolarisasi sempurna yang bergetar di permukaan jatuh tidak mengalami refleksi, maka sudut jatuh α_p harus memenuhi syarat sebagai berikut.

1. Amplitudo komponen medan listrik E gelombang (komponen tangensial) harus tetap dapat "menembus" bidang batas (lihat §6 I.4d):

$$E_1 \cos \alpha_p = E_2 \cos \beta_p \quad (10.24)$$



Gambar 10.53 Kondisi untuk menimbulkan cahaya yang dapat terpolarisasi sempurna melalui refleksi (hukum Brewster)



Gambar 10.54 Penggunaan hukum kekekalan energi untuk menghitung sudut polarisasi

2 Energi yang dibawa oleh gelombang jatuh dan berasal dari vakum pada permukaan batas harus mengalir seluruhnya di dalam medium pembias. Dari gambar [10.54] energi yang mengalir pada permukaan batas 1 $S_1 F_1$, yang berasal dari permukaan F_2 adalah $S_2 F_2$, dengan S_1 dan S_2 masing-masing vektor Poynting (§7.7.4) di vakum dan di dalam medium pembias.

$$S_1 F_1 = S_2 F_2$$

Dalam hal itu, $F_2/F_1 = \cos \alpha_p / \cos \beta_p$ dan berlaku pula bahwa

$$S_1 \cos \alpha_p = S_2 \cos \beta_p \quad (10.25)$$

Dari persamaan [10.24] diketahui bahwa $E_2^2/E_1^2 = \cos^2 \alpha_p / \cos^2 \beta_p$. Jika persamaan ini dibagi dengan pers [10.25] dengan persamaan [7.74] didapat:

$$\frac{\cos \alpha_p}{\cos \beta_p} = \frac{1}{n}$$

Bersamaan dengan itu berlaku pula hukum pembiasan Snellius: $\sin \alpha_p = \sin \beta_p \cdot n$. Dengan multiplikasi kedua relasi di atas akhirnya diperoleh

$$\frac{\cos \alpha_p \sin \alpha_p}{\cos \beta_p \sin \beta_p} = \frac{\sin 2\alpha_p}{\sin 2\beta_p} = 1$$

Persamaan itu akan terpenuhi jika $\beta_p = \alpha_p$ atau $\beta_p = 90^\circ - \alpha_p$. Hanya penyelesaian kedua yang mempunyai pengertian fisis karena $\beta_p \neq \alpha_p$.

Juga kemampuan refleksi (*koefisien refleksi*) suatu bahan dielektrik (suatu cermin listrik) dapat diperoleh dengan pengamatan energinya, seperti telah dibicarakan pada §4.4.4. Pada logam karena sifat absorpsi yang kuat relasinya akan lebih kompleks lagi. Pandang peristiwa refleksi cahaya jatuh pada arah tegak lurus dan berasal dari medium 1 dan ke medium 2 seperti yang telah dibahas pada §4.4.4, dalam hal ini berlaku syarat berikut

1. Amplitudo, yaitu komponen tangensial vektor medan listrik harus kontinu di permukaan batas

$$E_1 + E_1' = E_2 \quad (10.26)$$

(E_1 , E_1' , E_2 , masing-masing kuat medan gelombang cahaya jatuh, refleksi dan yang diteruskan).

2 Dari hukum kekekalan energi dapat diperoleh hubungan intensitas sebagai berikut.

$$\sqrt{\frac{\epsilon_2 \epsilon_0}{\mu_2 \mu_0}} E_2^2 = \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_0}{\mu_1 \mu_0}} (E_1^2 - E_1'^2)$$

Untuk kasus $\mu_1 \approx \mu_2 \approx 1$, yang pada umumnya berlaku untuk bahan dielektrik, persamaan di atas dapat ditulis menjadi:

$$n_2 E_2^2 = n_1 (E_1^2 - E_1'^2) = n_1 (E_1^2 - E_1'^2) (E_1^2 + E_1'^2) \quad (10.27)$$

Dari persamaan [10.26] dan [10.27] didapat hubungan

$$E_1' = E_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (10.28)$$

Jika $n_2 > n_1$, E_1' akan berharga negatif dan apabila $n_2 < n_1$, E_1' akan berharga positif. Berarti bahwa refleksi yang terjadi pada medium lebih rapat ($n_2 > n_1$) terdapat beda fase antara gelombang datang dan gelombang yang direfleksikan sebesar π sebaliknya, jika refleksi terjadi pada medium yang lebih renggang, tidak akan terdapat beda fase

Intensitas cahaya yang direfleksikan I_r dibandingkan dengan intensitas cahaya datang dapat ditulis sebagai berikut.

$$\frac{I_r}{I_o} = \frac{E_1'^2}{E_1^2} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (10.29)$$

Untuk susunan vakuum-gelas harga indeks bias $n_1 = 1$ dan $n_2 = 1.5$ sehingga koefisien refleksi dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\frac{I_r}{I_o} = \left(\frac{0,5}{2,5} \right)^2 = \left(\frac{1}{5} \right)^2 = \frac{1}{25}$$

Jika cahaya jatuh tegak lurus pada permukaan gelas, 4% dari cahaya datang akan mengalami refleksi dan 96% lainnya akan diteruskan ke dalam plat gelas. Hal itu hanya berlaku untuk cahaya terpolarisasi, juga untuk cahaya alamiah (biasa). Cahaya akan kehilangan intensitas yang sama untuk susunan medium gelas-udara.

Syarat 1 dan 2 dapat dinyatakan secara umum, agar dapat dipakai untuk gelombang yang bergetar sejajar permukaan plat maupun gelombang yang bergetar sejajar permukaan plat maupun gelombang yang bergetar pada arah tegak lurus, amplitudo gelombang yang direfleksikan, maupun yang ditransmisikan dapat dicari berdasarkan persamaan Fresnel untuk kasus sebagai berikut.

1. Bidang getar tegak lurus terhadap bidang jatuh:

$$R_s = -E_s \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}; \quad G_s = E_s \frac{2 \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (10.30)$$

2. Permukaan getar paralel terhadap permukaan jatuh

$$R_p = -E_p \left(\frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \right);$$

$$G_p = E_p \left(\frac{2 \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta) \cos(\alpha + \beta)} \right) \quad (10.31)$$

Pada sudut datang yang mengalami deviasi terhadap sudut polarisasi, cahaya yang direfleksikan, seperti diilustrasikan pada gambar [10.54], cahaya hanya akan terpolarisasi "parsial". Semakin sempurna polarisasi terjadi, semakin tegak lurus bidang getar terhadap bidang jatuh. Dari $\alpha + \beta = 90^\circ$, $\tan(\alpha + \beta) = \infty$, harga $R_p = 0$ sehingga terjadi sudut Brewster kembali.

Gelombang yang menembus medium akan mempunyai bidang getar di permukaan jatuh dan untuk cahaya alamiah tidak terdapat sudut jatuh

karena adanya gelombang yang dibiaskan akan mengalami polarisasi sempurna. Pada setiap pembiasan, komponen-komponen cahaya yang bergetar di bidang jatuh, berlawanan dengannya terdapat pula pada arah tegak lurus, tidak bergantung pada apakah cahaya masuk ke atau keluar dari medium pembias, akan diperoleh sekumpulan cahaya paralel terhadap plat yang mengalami polarisasi lebih dari 99%.

10.3.5 Penurunan Refleksi

Melalui sebuah permukaan cermin bahan peredam dengan suatu lapisan, tebal $\lambda/4$, berdasarkan §10.1 3 akan diperoleh penghilangan intensitas cahaya yang direfleksikan oleh permukaan atas dan bawah, yaitu jika amplitudo gelombang sama. Karena pada kedua permukaan batas dua medium, yaitu medium optis lebih renggang ke medium optis lebih rapat, untuk kedua refleksi akan terdapat perbedaan fase sebesar π . Dalam

$$n_s = \sqrt{n_1 n_2}$$

hal ini, perbedaan lintasan optis tidak dapat diamati. Dari persamaan [10 29] dapat diturunkan bahwa indeks bias bahan peredam n_s harus memenuhi kondisi: n_1 adalah indeks bias medium bahan peredam (pada umumnya udara $n_1 = 1$) dan n_2 indeks bias bahan yang redaman (misalnya gelas). Untuk mengurangi refleksi cahaya “putih”, dibuat berbagai lapisan yang mempunyai indeks bias berbeda-beda.

Pengurangan refleksi cahaya banyak digunakan untuk lensa kacamata, teropong, kamera foto atau video, mikroskop, dan lain sebagainya untuk mengurangi gangguan akibat refleksi cahaya.

10.4 Interferensi

10.4.1 Interferensi Cahaya Terpolarisasi Linier

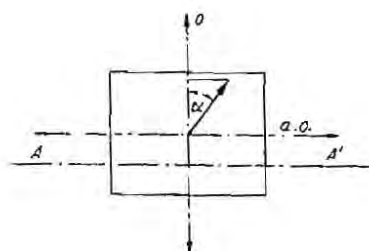
Sebuah plat yang terbuat dari kristal pembias ganda dan dipotong paralel terhadap sumbu optisnya, pada bidang potong tidak ganda terlihat karena cahaya yang tidak terpolarisasi akan terpisah menjadi berkas gelombang biasa (*ordiner*) dan luar biasa (*ekstraordinar*). Cahaya biasa bergetar pada arah tegak lurus sedangkan cahaya luar biasa bergetar sejajar (paralel) terhadap sumbu optis. Arah rambat keduanya tidak berubah. Akibat adanya perbedaan indeks bias, setelah kedua berkas meninggalkan plat antara keduanya akan terdapat beda lintasan optis, yang berdasarkan persamaan [10.22] beda lintasan optis dapat dinyatakan dalam panjang gelombang, yaitu

$$z = \frac{d}{\lambda_{\text{vac}}} (n_o - n_{no})$$

Panjang lintasan optik ini sebanding dengan tebal plat d .

Jika cahaya biasa diganti dengan cahaya terpolarisasi linier dan jika gelombang bergetar pada arah $o - o$ dan $ao - ao$ pada kristal (posisi normal), arah getar dan intensitas cahaya tidak mengalami perubahan (dianggap bahwa intensitas yang hilang karena refleksi dan absorpsi adalah sangat kecil). Jika plat ditempatkan pada posisi normal di antara prisma Nicols, di belakangnya akan terdapat pola gelap. Jika plat diputar sehingga membentuk sudut α (gambar [10.55]), dari berkas yang keluar plat diperoleh bagian berkas biasa dan luar biasa. Jika amplitudo gelombang di muka plat A , berkas yang keluar akan mempunyai amplitudo $A \cos \alpha$, sebagai berkas biasa dan $A \sin \alpha$ sebagai berkas luar biasa (dalam hal ini refleksi dan pembiasan cahaya diabaikan). Pada $\alpha = 45^\circ$ (*posisi diagonal*) kedua amplitudo atau juga kedua intensitas berkas akan mempunyai harga yang sama.

Hal penting dan sering dijumpai secara praktis adalah kedua komponen



Gambar 10.55 Penyinaran pada arah tegak lurus pada plat pembias ganda yang dipotong paralel terhadap sumbu optis. Arah berkas adalah tegak lurus terhadap bidang gambar.

berkas satu sama lain mempunyai beda lintasan optis sebesar $\lambda/4$. Lempengan kristal yang digunakan (*lapisan seperempat gelombang*), berdasarkan persamaan [10.22], haruslah mempunyai tebal sebesar:

$$d_{\frac{1}{4}} = \frac{\lambda_{\text{vac}}}{4} \frac{1}{n_o - n_{eo}}$$

Untuk cahaya kuning pada kristal kapur diketahui bahwa $n_o = 1,6584$ dan $n_{ez} a_o = 1,4864$ sehingga $n_o - n_{ez} a_o = 0,172$. Dengan demikian, didapat:

$$d_{\frac{1}{4}} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{4} \frac{1}{0,172} = 0,856 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

Lapisan yang sangat tipis demikian secara teknis tidak mudah dibuat. Karena perbedaan indeks bias yang sangat kecil antara *gibs* dan *mika*, keduanya mempunyai *sumbu ganda* yang agak kompleks. Secara umum, keduanya dapat dipakai sebagai lapisan, yaitu *lapisan seperempat gelombang*. Untuk *mika* diperlukan ketebalan sebesar 0,0030 cm.

Dua gelombang terpolarisasi linier yang keluar dari sebuah lapisan

seperempat gelombang, akan membentuk gelombang *sirkular*, yaitu sebuah gelombang dengan komponen vektor medannya di setiap tempat bergetar di dalam lingkaran (lihat §4.1.3), yaitu jika intensitas keduanya sama dan mempunyai beda lintasan optik sebesar $\lambda/4$, atau mempunyai beda fase sebesar $\lambda/2$. Dalam hal itu cahaya pada setiap tempat di analisator tidak akan "menghilang". Pada setiap tempat sembarang di analisator, semua gelombang terpolarisasi linier dengan amplitudo sama akan diteruskan sehingga pola terang tidak lagi bergantung pada posisi atau keadaan analisator. Jika posisi plat atau lapisan diubah sedemikian, sehingga mempunyai beda lintasan optik sebesar $3\lambda/4, 5\lambda/4, \dots, (2z + 1)\lambda/4$, akan dihasilkan pula gelombang terpolarisasi melingkar (*sirkular*). Dalam hal ini, yang berubah hanya arah sirkulasinya. Pada lintasan optik sebesar $\lambda/2$ atau beda fase $\pi/2$, gelombang cahaya yang keluar dari lapisan dengan tebal dua kali $\lambda/4$ akan mengalami polarisasi linier kembali. Gelombang bergetar pada suatu bidang yang terletak tegak lurus terhadap cahaya datang. Gelombang ini akan saling menghilangkan jika prisma Nicols terletak saling paralel. Hal yang sama terjadi pula untuk beda lintasan sebesar $3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots, (2z + 1)\lambda/2$.

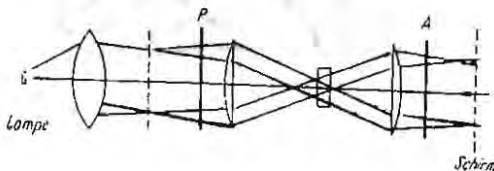
Jika beda lintasan optik $\lambda, 2\lambda, \dots, z\lambda$ dan lapisan (plat) tetap berada paralel terhadap prisma Nicols, muka gelombang akan membentuk pola terang. Untuk memperoleh pola gelap, prisma Nicols harus saling "disilangkan" satu dan lainnya.

Benda optis isotrop diletakkan di antara dua polarisator yang saling bersilangan, akibatnya tidak akan terdapat pola gelap interferensi. Hampir semua benda yang dapat membiaskan ganda cahaya akan menimbulkan pola terang dan apabila digunakan cahaya "putih" maka pola terang hanya akan berhungan dengan satu komponen warna saja. Pembiasan ganda bukan hanya karakteristik sifat bahan yang mengalami kristalisasi semata, melainkan juga pada bahan-bahan yang mempunyai struktur halus, dibentuk oleh berbagai lapisan. Juga pada bahan-bahan dapat alir, sifat seperti itu diamati pula. Pembiasan ganda cair serupa itu juga ditemukan pada bahan-bahan yang berasal dari tumbuh-tumbuhan dan hewan. Mempelajari pembiasan ganda cahaya terpolarisasi linier berguna sebagai alat bantu dalam menentukan keadaan tegangan dan struktur suatu bahan untuk mengatasi

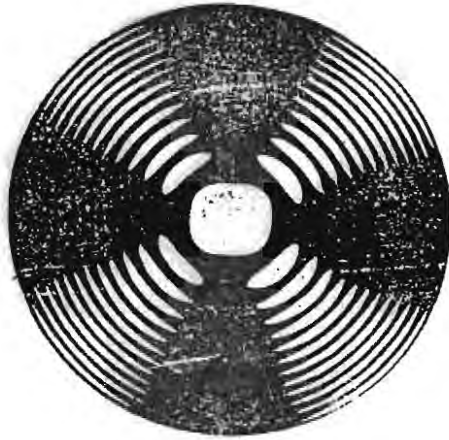
daya pisah (resolusi) mikroskop yang terbatas.

10.4.2 Interferensi Cahaya Konvergen Terpolarisasi

Intensitas yang lemah dari cahaya divergen dan terpolarisasi dapat diatasi dengan menggunakan sebuah lensa yang mempunyai jarak titik fokus $f \approx 2$ cm sehingga intensitas bundel gelombang cahaya menjadi "kuat" dan konvergen. Pada titik fokus lensa ditempatkan sebuah lapisan (plat) planparalel pembias ganda yang dipotong paralel terhadap sumbu optis (gambar[10.56]) Berkas cahaya divergen yang keluar dari lapisan dijatuhkan kembali pada sebuah lensa dengan jarak titik fokus pendek sehingga cahaya akan mejadi konvergen atau paralel, untuk kemudian cahaya ditangkap oleh analisator atau langsung kemata pengamat, atau dengan menggunakan sebuah layar dapat pula diamati pola interferensi yang terjadi Pola interferensi yang terjadi pada kristal kapur yang dipotong tegak lurus terhadap sumbu optisnya diilustrasikan gambar[10.57]. Jika pengamat menggunakan prisma Nicols untuk mengamati pola interferensi, diperoleh bahwa pada bagian tengah muka gelombang (medan) terdapat pola gelap Pada arah bidang getar prisma Nicols akan diamati "lengan" pola yang melebar ke arah luar Sektor yang berada di antaranya diisi oleh pola terang konsentris dan cincin pola gelap yang melebar ke luar dengan jarak antaranya semakin ke luar semakin sempit. Apabila cahaya yang digunakan adalah cahaya "putih" (polikromatik), akan dapat diamati jumlah pola-pola yang lebih sedikit, akan tetapi cincin pola yang tadinya gelap menjadi berwarna-warni.

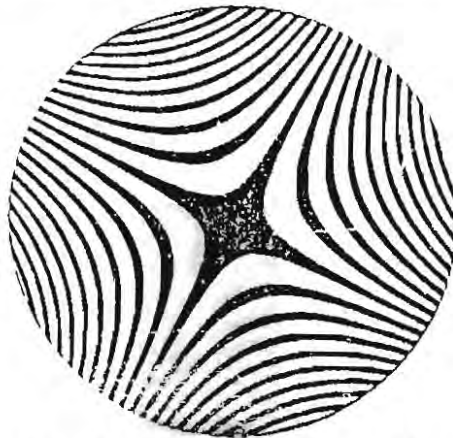


Gambar 10.56 Susunan perkakas untuk mengamati interferensi cahaya konvergen terpolarisasi



Gambar 10.57 Gambar pola interferensi cahaya yang dijatuhkan tegak lurus pada lapisan tipis kristal kapur

Jika lapisan diganti dengan kristal yang sama, tetapi dipotong sejajar (paralel) terhadap sumbu optisnya dan ditempatkan pada posisi diagonal terhadap cahaya konvergen dan terpolarisasi yang saling berlawanan, yaitu persis kurva hiperbola yang diputar 90° (gambar[10.58])



Gambar 10.58: Gambar pola interferensi cahaya yang dijatuhkan paralel pada lapisan tipis kristal kapur.

10.4.3 Rotasi Permukaan Polarisasi: Optis Aktif

Antara prisma Nicols ditempatkan sebuah plat planparalel terbuat dari gelas kuarsa dan dipotong sesuai dengan arah sumbu optis kristalnya maka muka gelombang akan membentuk pola terang. Jika digunakan cahaya monokromatik dan analisator diputar hingga membentuk sudut α , akan diperoleh pola gelap kembali

Dalam hal itu gelas kuarsa dapat memutar bidang polarisasi cahaya dengan sudut sebesar α (secara umum dan persisnya adalah sebesar $\alpha + z \cdot 180^\circ$, dengan $z = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) Fenomena seperti itu dinamakan *optis aktif*. Secara eksperimen diperoleh hubungan sudut putar α dengan ketebalan plat kuarsa d sebagai berikut.

$$\alpha = \gamma d \quad (10.32)$$

Tabel 10.1 DISPERSI ROTASI KRISTAL KUARSA

λ [Å]	γ [°]	λ [Å]	γ [°]
2750	121,10	6560	17,32
3730	58,86	10400	6,69
4360	41,55	17700	2,28
5090	29,72	21400	1,55

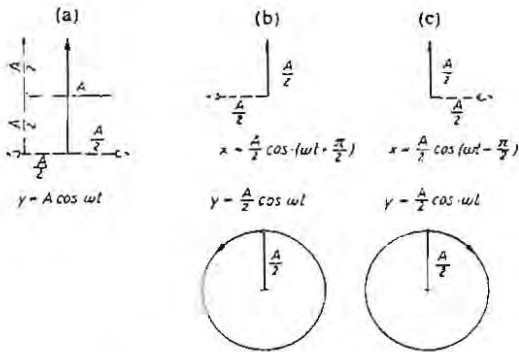
γ disebut *sudut putar spesifik*. Untuk cahaya Natrium kuning harga $\gamma = 21,728^\circ/\text{mm}$. Penentuan apakah harga $z = 0, 1, 2, 3, \dots$ dapat diperoleh dengan melakukan percobaan dengan ketebalan kristal kuarsa yang berbeda-beda, sebagaimana diketahui bahwa sudut putar α bergantung pada tebal kristal kuarsa.

Terdapat dua macam kristal kuarsa dengan masing-masing arah putar berbeda, yaitu putar kanan dan kiri. Jika cahaya dijatuhkan di muka kristal, pemutaran pertama mempunyai arah sama dengan putaran jarum jam sedangkan kristal lainnya mempunyai arah putar berlawanan dengan arah putaran jarum jam. Rotasi sangat bergantung pada warna cahaya; harga sudut putar akan semakin besar jika digunakan cahaya dengan panjang gelombang semakin kecil (*dispersi rotasi*) §10.5.2 dan tabel[10.1].

Dari hal itu diketahui bahwa untuk cahaya polikromatik tidak terdapat pola gelap interferensi di analisator. Pola gelap hanya terdapat untuk salah satu komponen warna cahaya polikromatik; intensitas untuk panjang gelombang komponen cahaya tetangganya akan melemah. Intensitas suatu komponen warna cahaya dengan bidang getar sesuai dengan analisator tidak akan melemah. Jika analisator diputar, warna pola akan berubah. Pada *bahan putar kanan* terdapat berturut-turut deretan warna mulai dari warna kemerahan, kekuningan, kehijauan, violet, dan terdapat warna "amplop" violet hingga merah, jika pola diamati dari arah yang berlawanan arah cahaya datang dan dianalisator diputar sesuai arah putaran jarum jam. Untuk memperoleh deretan warna yang sama seperti bahan putar kanan, untuk *bahan putar kiri* arah putar analisator haruslah berlawanan arah jarum jam.

Di samping kristal kuarsa terdapat pula bahan-bahan lain yang dapat memutar bidang getar gelombang, seperti zinnober (HgS), yaitu mineral berwarna merah yang lebih kurang 20 kali lebih kuat dibandingkan dengan kuarsa untuk cahaya kuning, *Natriumchlorat*, dan lain sebagainya. Kemampuan rotasi terikat dalam bentuk kristal dan secara umum dapat lenyap jika kristal mencair atau menjadi cairan.

Dua grup lain dari bahan yang dapat memutar bidang getar gelombang adalah dalam bentuk cairan atau larutan. Untuk kepentingan tertentu kemampuan putar ikatan karbon, yang mengandung atom C asimetri (misalnya gula kasar $C_{12}H_{22}O_{11}$). Sudut putar larutan bahan tersebut sebanding dengan konsentrasi larutan. Pengukuran sudut putar dilakukan dengan menggunakan perkakas polarisasi merupakan cara penting untuk menentukan konsentrasi larutan yang terdapat di dalam bahan-bahan yang langsung diambil dari organ tanpa harus memisahkan terlebih dahulu

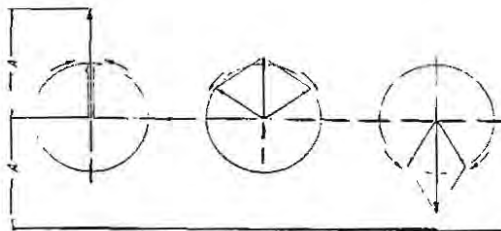


Gambar 10.59 a-c. Gambaran getaran linier yang berasal dari dua getaran melingkar (sirkular)

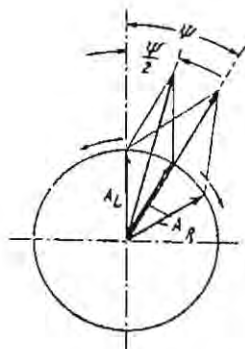
(penentuan kadar gula di dalam air seni). Bahan yang dapat memutar bidang getar gelombang cahaya demikian disebut *zat optis aktif*.

Penyebab rotasi tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

Tumpang tindih dua getaran melingkar yang saling berlawanan. *berfrekuensi sama* akan menghasilkan getaran linier (lihat §4 I.3). Sebaliknya, sebuah gelombang yang terpolarisasi linier dapat dipisahkan menjadi dua getaran melingkar yang merambat dengan kecepatan fase dan frekuensi sama (gambar[10.59])



Gambar 10.60 Tumpang tindih dua getaran melingkar menghasilkan getaran linier



Gambar 10.61 Putaran bidang polarisasi dari suatu gelombang terpolarisasi linier sebagai hasil dari beda kecepatan fase gelombang terpolarisasi melingkar yang menimbulkan polarisasi linier

Pemutaran bidang polarisasi gelombang dianggap sebagai pemisahan gelombang terpolarisasi linier dalam dua gelombang terpolarisasi melingkar dengan frekuensi sama, tetapi mempunyai kecepatan fase yang berbeda. Gelombang yang mengalami putar kanan akan mempunyai kecepatan yang lebih besar dibandingkan dengan gelombang putar kiri. Jika vektor A_L dari gelombang putar kiri setelah bergetar beberapa kali kembali ke keadaan semula, vektor gelombang putar kanan pada tempat yang sama telah mengalami lintasan rotasi terlebih dahulu (gambar [10.61]). Gelombang yang dihasilkan keduanya terletak pada bidang dengan sudut sebesar setengah sudut antara A_L dan A_R . Dengan sudut $\alpha/2$ ini gelombang terpolarisasi linier mengalami rotasi. Jika dengan bilangan getar yang sama, atau setelah waktu mencapai dua kali waktu yang diperlukan di atas, vektor gelombang putar kiri kembali mencapai keadaan semula, dengan sudut

sedangkan vektor gelombang putar kanan bertemu dengan A_L , tetapi besarnya menjadi dua kali semula. Gelombang terpolarisasi linier kembali mengalami rotasi sebesar $\alpha/2$. Demikian gelombang terpolarisasi linier yang lewat medium optis aktif mengalami rotasi pada bidang putarnya. Sudut bertambah sesuai setiap getaran dan haruslah sudut putar sebanding dengan ketebalan bahan atau medium yang bersangkutan.

Karena pengaruh orientasi medan magnet yang terletak paralel terhadap arah berkas datang, kebanyakan zat menunjukkan sifat optis aktif (§10.5.4).

10.4.4 Efek Elektro-optik (Efek Kerr)

Gas dan cairan tertentu (bukan monoatomik) akan menjadi pembias ganda jika padanya diberikan medan listrik tegak lurus terhadap arah berkas. Kecepatan rambat suatu gelombang bergantung pada letak arah polarisasinya terhadap arah medan listrik. Fenomena ini mempunyai arti sebagai berikut.

Di dalam medan listrik luar molekul-molekul yang terdapat di dalam medium paling tidak mengalami orientasi, khususnya jika molekul-molekul tersebut mempunyai momen dipol yang besar. Cahaya datang dan mengalami interaksi dengan molekul, menyebabkan terjadinya dispersi, adalah berbeda-beda, bergantung pada apakah arah medan listrik terletak paralel atau tegak lurus terhadap arah orientasi molekul. Hal yang sama juga terjadi jika polarisasibilitas molekul pada semua arah molekul tidak sama, yang terjadi di dalam medium anisotrop.

Sebuah wadah yang diisi dengan bahan elektro-optis aktif (misalnya *nitrobenzol*), kemudian disinari cahaya dengan vektor medan listrik tegak lurus, disebut *sel Kerr*. Antara dua polarisator bersilangan dapat diamati ritme perubahan medan listrik dengan memberi beda potensial

10.5 Absorpsi, Dispersi, dan Hamburan Cahaya

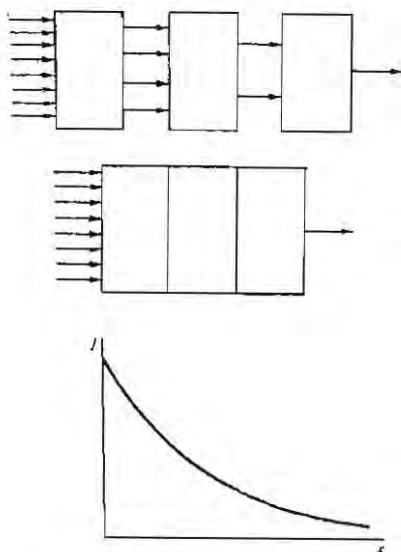
10.5.1 Absorpsi

Energi cahaya yang menembus materi sedikit banyaknya akan berkurang dan diubah menjadi bentuk energi lain. khususnya menjadi energi panas (berbeda dengan hamburan, energi cahaya tidak berubah, hanya arah rambatnya yang mengalami perubahan). Di dalam lingkup lapisan yang sangat tipis dan intensitas cahaya akan mengalami pelemahan, yaitu.

$$dI = -\alpha I dx \quad (10.33)$$

Koefisien absorpsi α adalah konstanta materi dan mempunyai satuan cm^{-1} . Dengan mengintegrasi persamaan [10.33] akan diperoleh penurunan intensitas untuk ketebalan x :

$$I(x) = I(0) e^{-\alpha x} \quad (\text{Hukum Beer}) \quad (10.34)$$



Gambar 10.62 Hukum absorpsi. Setiap lapisan bahan menyerap cahaya yang datang padanya dalam bagian yang sama. Berlaku untuk lapisan terpisah (atas) atau juga untuk lapisan yang bersatu (tengah). Bawah: Distribusi intensitas cahaya yang diperoleh pada peristiwa absorpsi.

Peristiwa itu berhubungan dengan bahan yang dilarutkan di dalam medium cair transparan (air) dan sumbanan absorpsi cahaya pada bahan adalah sebanding dengan konsentrasi larutan:

$$\alpha = \epsilon c$$

c adalah konsentrasi bahan dalam g/l , mol/l atau dalam satuan konsentrasi lainnya dan ϵ adalah *koefisien ekstingsi* jika konsentrasi dalam satuan g/l .

Istilah-istilah penting lainnya adalah.

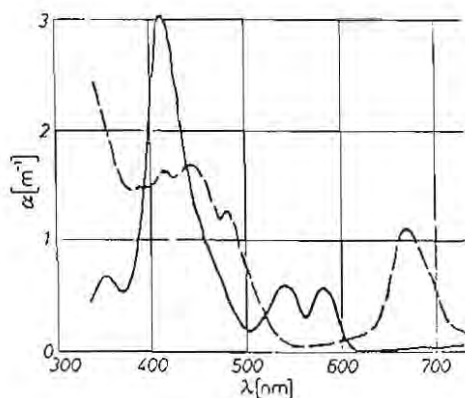
Derajat transmisi suatu lapisan: bagian cahaya yang dilewatkan pada lapisan atau

$$e^{-\alpha x}$$

Kerapatan optis: logaritma dari bagian cahaya yang diabsorpsi lapisan bahan.

$$^{10}\log (1 - e^{-\alpha x})$$

Teori lengkap tentang absorpsi sangat kompleks. Koefisien absorpsi umumnya fungsi frekuensi. *Spektrum absorpsi* $\propto (\nu)$ adalah media yang paling berguna untuk menentukan karakteristik bahan, khususnya dalam kimia organik. Dibedakan antara absorpsi linier sederhana dan absorpsi kontinu. Keduanya berhubungan dengan pergeseran muatan, daya yang



Gambar 10.65 Spektrum absorpsi dua macam bahan penting: garis putus-putus: Chlorofil *a* dan garis tebal: Haemoglobin (Oksihaemoglobin manusia). Diketahui bahwa daun berwarna hijau dan darah berwarna merah (sebagai lapisan yang sangat tipis berwarna kuning). dalam hal itu segera dapat diketahui mengapa maksimum spektrum absorpsi harus terletak demikian, pada Chlorofil hanya sebagian, sedangkan pada Haemoglobin hampir tidak dapat diamati.

dibawa oleh gelombang elektromagnetik ke sistem yang diubah menjadi panas Joule. Absorpsi linier bersangkut paut dengan pergeseran muatan akibat getaran dipaksakan (lihat §10.5.3). Absorpsi kontinu berhubungan dengan tinggi-rendahnya absorpsi muatan-muatan *kuasi bebas* yang timbul akibat terabsorpsinya gelombang elektromagnetik oleh muatan (misalnya elektron-elektron di dalam logam).

Di dalam bahan dengan koefisien konduktifitas σ yang ditempatkan di dalam kuat medan listrik E , akan terdapat arus persatuan luas (kerapatan arus) sebesar $j = \sigma E$. Di dalam setiap cm^3 akan dibebaskan daya Joule sebesar $jE = \sigma E^2$, berasal dari arus energi yang dibawa cahaya atau intensitas. Intensitas ini ($\text{energi}/\text{cm}^2 \text{ det}$) adalah $I = n\epsilon_0 c E^2$ (lihat §7.7.4). Pada jarak dx akan terdapat penurunan intensitas dengan harga di sekitar daya Joule dalam satuan penampang lintang: 1 cm^2 sebesar:

$$dI = -\sigma E^2 dx = -\frac{\sigma}{n\epsilon_0 c} I dx \quad (10.35)$$

Bandingkan dengan pers[10.33] sehingga akan didapat

$$\alpha = \frac{\sigma}{n\epsilon_0 c} \quad (10.36)$$

10.5.2 Dispersi dan Pengertian Polarisabilitas Bergantung pada Frekuensi

Fenomena "terurainya" warna spektrum cahaya tampak (secara umum tidak lain merupakan gelombang berbeda frekuensi dan panjang gelombang) yang masing-masing dibiaskan dengan sudut bias berbeda-beda disebut *dispersi*. Indeks bias untuk cahaya biru dan merah umumnya berbeda lebih kecil dari pada 0,03

Jika indeks-indeks bias bertambah secara tetap dari cahaya merah hingga violet (ujung akhir spektrum), fenomena itu disebut *dispersi nor-*

mal. Peristiwa itu umumnya terjadi pada bahan-bahan transparan (bahan tembus cahaya).

Hal yang jarang dan sulit diamati adalah peristiwa indeks bias untuk cahaya dengan panjang gelombang pendek lebih kecil daripada indeks bias cahaya dengan panjang gelombang panjang; peristiwa ini disebut *dispersi anomali*. Kelakuan ini, berdasarkan daerah kisaran spektrum, diikuti dengan tingginya absorpsi cahaya. Di dalam daerah kisaran spektrum "garis-garis" absorpsi menjadi sangat tajam untuk penurunan harga indeks bias n , yaitu sesuai dengan menurunnya panjang gelombang dan harga n untuk panjang gelombang terkecil bahkan sering mencapai harga di bawah 1 (gambar [10.65]). Bahan yang mempunyai sifat seperti ini misalnya adalah *Fuchsin* padat; pada bahan ini diamati adanya kenaikan dan penurunan indeks bias sesuai dengan kenaikan dan penurunan panjang gelombang dari 600 hingga 450 nm.

Jika percobaan dilakukan hingga melebar ke daerah panjang gelombang cahaya ultraviolet, pada semua daerah bahan akan dapat diamati peristiwa absorpsi yang berhubungan dengan dispersi anomali. Sinar Roentgen "kuat" menunjukkan peristiwa dispersi normal, tetapi dengan $n < 1$. Gelombang-gelombang radio dan radar juga menunjukkan adanya peristiwa dispersi khusus, khususnya di dalam daerah yang terdapat elektron-elektron bebas (misalnya di *ionosfir*; lihat §8.3.6).

Semua sifat-sifat dispersi suatu bahan yang digambarkan pada *kurva dispersi* dapat dijelaskan berdasarkan kelakuan elektron-elektron yang terdapat di dalam bahan tersebut. Bahkan harga indeks bias berubah berdasarkan warna, berarti kecepatan fase gelombang bergantung pada frekuensinya. Jika relasi Maxwell (§7.7.3) yang menyatakan hubungan antara indeks bias dan konstanta dielektrik

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon} \quad (10.37)$$

pada umumnya berlaku (karena tidak dibatasi), berarti pula bahwa semua sifat-sifat dispersi dapat dinyatakan sebagai kebergantungan konstanta dielektrik ϵ terhadap frekuensi.

10.5.3 Pengertian Atomik Dispersi

Konstanta dielektrik hingga pembahasan di sini hanya didefinisikan untuk medan statik. Untuk mengembangkan pengertian tersebut dalam medan yang berubah-ubah (medan bolak balik) gelombang elektromagnetik digunakan penjelasan yang telah dibahas pada §6.2.2. Pada bagian tersebut polarisasi P dari bahan di dalam medan elektromagnetik dengan kuat medan E dinyatakan melalui persamaan:

$$P = (\epsilon - 1) \epsilon_0 E \quad (10.38)$$

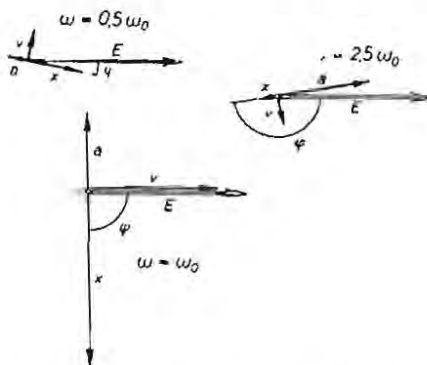
Selanjutnya, akan dibahas secara rinci dari mana polarisasi terjadi. Telah diketahui bahwa medan E mempengaruhi setiap muatan e yang terdapat di dalam atom bahan dengan gaya sebesar eE , menyebabkan muatan mengalami pergeseran sehingga pada setiap atom terdapat momen dipol listrik (ingat elektron bermuatan negatif dan inti atom bermuatan positif). Jumlah semua momen-momen dipol listrik yang terdapat di dalam satu elemen volume makroskopik menyebabkan adalah sama dengan P . Apabila medan adalah medan bolak balik (medan elektromagnetik), muatan atom akan mengalami getaran dipaksakan. Berdasarkan §4.1.2 dapat diketahui adanya hubungan kesebandingan pernyataan persamaan [10.38] terhadap simpangan x dapat menentukan harga P dan gaya atau medan E , masing-masing berlaku untuk setiap frekuensi. Dalam hal ini harus pula diperhatikan peristiwa resonansi. Simpangan x tidak selalu sefase dengan medan E dan bergantung pada frekuensi. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa *kurva dispersi* tidak lain merupakan kurva resonansi; pada setiap resonansi, yaitu pada setiap kemungkinan *getaran eigen* muatan yang terdapat di dalam bahan yang disinari, berhubungan dengan garis absorpsi pula.

Secara kuantitatif peristiwa ini dapat dibayangkan sebagai berikut. Pandang bahwa simpangan gaya kuasi elastis F terletak pada arah yang berlawanan, sebanding dengan simpangan x terhadap titik setimbangnya, yaitu $F = Dx$. Dengan dasar matematika umum, gaya yang terdapat pada arah berlawanan arah gerak serupa ini disebut gaya kuasi elastik, jika

simpangan cukup kecil. Pada sistem demikian suatu saat akan terdapat frekuensi eigen sebesar $\omega_0 \approx \sqrt{D/m}$; Frekuensi eigen ini, jika terdapat keadaan redaman yang besar, akan menurun dari harga tersebut di atas (lihat §4.1.2).

Dasar sistem demikian, medan listrik statik dapat diganti dengan medan listrik berubah-ubah $E = E_0 \cos \omega t$ dan gaya menjadi $F = e E_0 \cos \omega t$. Dengan frekuensi ω yang jauh di bawah harga ω_0 , keadaan resonansi belum dapat terjadi. Simpangan, karena adanya perubahan medan listrik yang lambat tersebut, tidak mengalami perubahan (keadaan kuasi statik gambar [10.64]). Pergeseran fase adalah nol. Jika frekuensi medan diubah sehingga mendekati harga ω_0 , simpangan semakin lama akan semakin bertambah besar dan pada $\omega = \omega_0$, misalnya, akan terdapat beda fase persis sebesar $\pi/2$. Dalam keadaan ini, *kecepatan* muatan, atau arus, mempunyai fase yang sama dengan medan. Amplitudo simpangan pada keadaan itu mencapai maksimum negatif (pada posisi berlawanan dengan amplitudo maksimum). Pada keadaan rangsangan yang besar ($\omega > \omega_0$) muatan akan mengalami percepatan yang sefase dengan medan, berarti pula bahwa terdapat beda fase simpangan terhadap medan sebesar (keadaan bebas kuasi).

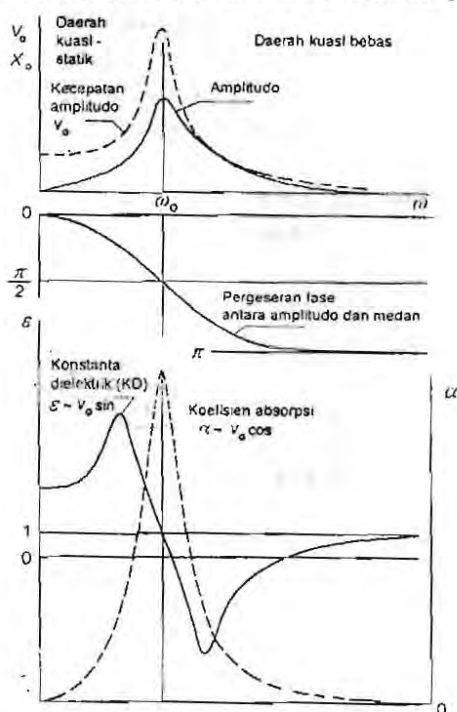
Dari "kelakuan" fase kecepatan muatan dan kerapatan arus j relatif terhadap medan perangsang, akan siap terjadi absorpsi. Sistem yang



Gambar 10.64 Diagram penunjuk dari kuat medan listrik dan simpangan. Kecepatan dan percepatan dari muatan yang terikat di dalam atom untuk tiga frekuensi yang berbeda

mengalami getaran "mengambil" energi yang dibawa oleh medan sebagai panas Joule, yaitu Ej . Jika E dan j mempunyai beda fase sebesar $\pi/4$ sistem akan menerima energi dan dalam hal ini dapat pula dibuktikan bahwa setelah tercapai beda fase sebesar $\pi/4$ energi sistem akan pulih seperti semula. Daya yang diterima sistem (absorpsi) akan maksimal jika E dan j mempunyai fase sama dan dalam keadaan ini j juga mencapai harga maksimum. Keadaan demikian terjadi pada $\omega = \omega_0$.

Hubungan dengan indeks bias dapat diperoleh dengan menggunakan pers[10.38] dan relasi Maxwell, persamaan[10.37] polarisasi P . Pada daerah kuasi statik ($\omega < \omega_0$) simpangan muatan disebabkan oleh medan. Momen dipol tetap searah dan dari persamaan[10.38] diperoleh harga konstanta dielektrik normal $\epsilon < 1$. Selanjutnya dari $\epsilon < 1$ dan relasi Maxwell didapat bahwa $n < 1$. Keadaan transisi dari $n < 1$ ke $n > 1$ terdapat di sekitar daerah frekuensi resonansi. Hal ini tidak hanya menggambarkan



Gambar 10.65 Kurva absorpsi dan dispersi (bawah) adalah hanya modifikasi dari kurva resonansi

menggambarkan daerah frekuensi terjadinya absorpsi, tetapi juga keadaan dispersi anomali, harga n berkurang sebanding dengan frekuensi. Dalam daerah kuasi bebas statik bahkan harga $n < 1$, tetapi deviasinya dari harga 1 dengan bertambahnya frekuensi semakin kecil sehingga mengakibatkan simpangan dan polarisasi mengecil sebanding dengan ω^{-2} (gambar [10.65]).

Sekarang perhatikan bahwa resonansi yang diamati sepantasnya bukan merupakan satu-satunya resonansi yang terjadi di dalam sistem. Setiap bahan mempunyai beberapa frekuensi resonansi, dengan frekuensi tertinggi terletak di daerah sinar Roentgen. Sumbangan semua resonansi-resonansi ini terhadap simpangan muatan, atau berarti pula pada polarisasi P , menyebabkan terjadinya tumpang tindih harga ϵ . Daerah kuasi bebas statik suatu resonansi terjadi pada keadaan kuasi statik selanjutnya. Simpangan yang terjadi pada daerah kuasi statik mempunyai harga tetap berhingga, tetapi pada daerah kuasi bebas sebaliknya, mengecil menuju nol, sebanding dengan ω^{-2} , sehingga jarang terjadi suatu pelebaran daerah spektrum untuk $n < 1$. Hanya di atas resonansi tersebut, yaitu di atas absorpsi tinggi sinar Roentgen akan sesuai dengan aturan $n < 1$.

Peristiwa dispersi secara sederhana mudah diamati pada lapisan tipis suatu bahan, yaitu pada gas yang mempunyai tekanan tidak terlalu tinggi. Dalam kasus ini praktis polarisasi P dipengaruhi oleh medan gelombang elektromagnetik, sementara pengaruh-pengaruh yang berlawanan dari molekul-molekul yang mengalami polarisasi karena adanya "medan internal", dapat diabaikan. Pada kristal-kristal ion patut pula diperhatikan pengaruh frekuensi ion-ion.

Polarisasi yang terdapat di dalam satu satuan volume adalah

$$P = N \sum_i e_i x_i,$$

dengan N adalah kerapatan atom, $e_i x_i$ menyatakan pergeseran muatan e_i sejauh x_i karena medan yang menimbulkan momen dipol listrik dan adalah jumlah semua momen dipol listrik yang terdapat di dalam atom, atau momen dipol total atom.

Jika redaman diabaikan, dari gambar[10.64] diperoleh:

$$\begin{aligned} P &= N \sum_i \frac{e_i e_i E}{\sqrt{m_i^2 (\omega_{i0}^2 - \omega^2)}} \\ &= N \sum_i \frac{e_i^2}{\sqrt{m_i^2 (\omega_{i0}^2 - \omega^2)}} E \end{aligned} \quad (10.39)$$

m_i adalah massa muatan ke i dan ω_{i0} adalah frekuensi resonansi masing-masing. Jika terdapat muatan, massa dan frekuensi yang sama (e_α , m_α dan ω_α) dan atom mempunyai bilangan atom z_α , maka di samping persamaan[10.39], dapat pula ditulis persamaan sebagai berikut.

$$P = N \sum_\alpha \frac{e_\alpha^2 z_\alpha}{\sqrt{m_\alpha^2 (\omega_\alpha^2 - \omega^2)}} E \quad (10.40)$$

Bersama dengan persamaan[6.48] didapat rumusan dispersi sebagai berikut.

$$(\varepsilon - 1)\varepsilon_0 = N \sum_\alpha \frac{e_\alpha^2 z_\alpha}{\sqrt{m_\alpha^2 (\omega_\alpha^2 - \omega^2)}} E$$

atau

$$n^2 = 1 + \frac{1}{\varepsilon_0} N \sum_\alpha \frac{e_\alpha^2 z_\alpha}{\sqrt{m_\alpha^2 (\omega_\alpha^2 - \omega^2)}} \quad (10.41)$$

Rumusan ini untuk berbagai peristiwa relevan dapat dibuktikan kebenarannya, khususnya jika dimasukkan adanya peristiwa redaman

Pengalaman mengajarkan bahwa dispersi dapat juga terjadi pada bahan bukan gas, di luar garis-garis absorpsi, melalui persamaan yang

analog dengan pers[10 41] dan dapat dijelaskan dengan baik menurut persamaan

$$n^2 = A_0 + \sum_{\alpha} \frac{A_{\alpha} \lambda^2}{\sqrt{\lambda^2 - \lambda_{\alpha}^2}} \quad (10 42)$$

Dalam hal ini λ_{α} adalah panjang gelombang pada daerah absorpsi. Pada bahan-bahan transparan (tembus cahaya), diandaikan terdapat dua daerah absorpsi, yaitu daerah absorpsi pada daerah panjang gelombang ultra merah dan lainnya pada daerah ultraviolet. Daerah frekuensi eigen masing-masing sesuai dengan frekuensi ion dan elektron (lihat §14.2 3).

Efek dispersi yang dibahas disini, berdasarkan teori dasar, merupakan perhitungan sederhana, yaitu merupakan gabungan "kompromis" antara teori kontinu Maxwell, yang menggambarkan bahan sebagai suatu konstanta, yaitu konstanta dielektrik dan teori atom sederhana yang diperlukan untuk menurunkan konstanta dielektrik dari sifat-sifat bahan yang bersangkutan. Dalam teori atom "mumi", gelombang elektromagnetik yang mempunyai kecepatan rambat tidak sama dengan kecepatan cahaya di vakuum tidak akan dapat menembusnya. Kecepatan cahaya di dalam bahan, misalnya di dalam kristal dijelaskan sebagai berikut.

Antara dua bidang batas (§12.5.2) cahaya akan mempunyai kecepatan yang sama dengan kecepatan di vakuum c , tetapi pada setiap bidang batas terdapat "perubahan fase", umumnya dapat pula disebut pergeseran fase. Hal ini terjadi karena adanya lintasan cahaya yang mengalami "keterlambatan" di bidang batas menyebabkan kecepatan fase gelombang lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan fase di vakuum.

10.5.4 Pengertian Efek Faraday

Pada §10.4 3 telah dibahas percobaan Faraday untuk membuktikan bahwa cahaya adalah gelombang elektromagnetik alamiah. Diletakkan suatu bahan yang umumnya tidak bersifat optis aktif (bidang polarisasi cahaya tidak mengalami rotasi) di antara dua polarisator sehingga tidak

ada cahaya yang masuk di dalam bahan tersebut. Kemudian sumber medan magnet diletakkan pada arah paralel cahaya datang, akan terjadi pola terang dan setelah analisator diputar dengan sudut α pola tersebut menghilang kembali. α diketahui berbanding lurus dengan ketebalan bahan l dan kuat medan magnet B :

$$\alpha = V l B \quad (10.43)$$

V adalah konstanta Verdet yang harganya untuk bahan yang berbeda adalah berbeda. Umumnya V bergantung pada panjang gelombang, yaitu:

$$V = V' \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

Efek Faraday terjadi semakin besar pada daerah di dekat garis absorpsi. Tandanya bergantung pada apakah dispersi normal atau anomali. Pada dispersi normal terdapat rotasi ke kanan (arah pengamatan berlawanan dengan datangnya cahaya dan medan magnet; dengan membalik arah medan magnet tentunya terjadi pula pembalikan arah tanda aktifitas).

Pengertian atomik dapat dijelaskan bahwa muatan-muatan yang mengalami getaran pada peristiwa dispersi, dengan adanya medan magnet akan mengalami gerak tambahan, yaitu gerak prosesi terhadap sumbu medan magnet. Frekuensi gerak prosesi ini, secara umum dapat dinyatakan sebagai frekuensi Larmor

$$\omega' = \frac{e}{m} B$$

e dan m adalah muatan dan massa partikel yang mengalami getaran (lihat §8.2.2). Relatif terhadap muatan yang berpresisi ini gelombang terpolarisasi melingkar ke kanan dan kiri mempunyai frekuensi yang berbeda.

Seorang pengamat yang mengalami gerak presisi bersama-sama

muatan akan mengamati perbedaan frekuensi antara gelombang yang terpolarisasi melingkar putar kanan dan kiri dibanding dengan seorang pengamat yang diam (efek Doppler rotasi). Pengamat itu mendapatkan harga frekuensi lebih besar daripada ω' sedangkan untuk putar kiri lebih kecil daripada ω' . Hal ini berlaku untuk komponen-komponen gelombang cahaya yang sama dan mengalami polarisasi putar kanan dan kiri dengan frekuensi ω . Relatif terhadap muatan yang terdapat pada peristiwa dispersi, mempunyai frekuensi masing-masing sebesar $\omega + \omega'$ sedangkan lainnya $\omega - \omega'$ dengan indeks bias dan kecepatan fase masing-masing bagian gelombang berbeda, adalah dapat dihubungkan dengan pengertian peristiwa optis aktif seperti yang dijelaskan pada §10.4.3.

Seandainya penjelasan di atas masih terlalu jauh dari apa yang diharapkan, maka penentuan konstanta Verdet selain dengan $dn/d\lambda$ dan e/m untuk elektron dinyatakan sebagai berikut.

$$V = \frac{e}{m} \frac{\lambda}{2c} \frac{dn}{d\lambda} \quad (10.44)$$

e/m dalam hal ini dapat dihitung. Pernyataan itu, untuk berbagai daerah spektrum, dapat dibuktikan kebenarannya (misalnya untuk hidrogen pada daerah frekuensi cahaya tampak), tetapi di dekat daerah garis-garis spektrum "efek Zeeman normal" (§12.7.10), tidak akan diperoleh jika perhitungan didasarkan oleh penjelasan di atas. Di dekat daerah garis-garis spektrum Zeeman anomali konstanta Verdet mempunyai harga yang berbeda.

10.5.5 Mengapa Langit Biru ?

Tiada seorang pun heran melihat langit cemerlang di siang hari, bercahaya terang benderang dan bukan berasal dari cahaya matahari langsung ke mata pengamat. Peristiwa itu terjadi karena keberadaan molekul-molekul udara sedangkan langit di siang hari bagi para astronot terlihat hitam pekat dengan bintang-bintang gemerlap bercahaya terdapat



Gambar 10.66 Pembuktian cahaya di langit merupakan cahaya yang dihamburkan partikel-partikel udara (dalam hal ini pembiasan cahaya di atmosfer diabaikan)

di sekeliling matahari dan jika pengamat berada di puncak Himalaya ia akan melihat langit berwarna violet gelap. Cahaya di langit yang terlihat di permukaan bumi adalah hasil hamburan molekul-molekul udara. Dapat pula dibuktikan bahwa cahaya yang terlihat di langit mengalami polarisasi tegak lurus terhadap bidang yang terletak antara pengamat, arah penglihatannya dan matahari.

Penjelasan atomik untuk warna dan polarisasi cahaya di langit adalah sebagai berikut.

Pengamat *B* pada gambar [10 66] mengamati berkas cahaya yang berasal dari matahari dan dihamburkan ke segala arah dengan sudut yang berbeda-beda, misalnya di titik *A* sudut hamburannya adalah 90° . Cahaya matahari yang jatuh di permukaan bumi dibayangkan terpecah menjadi dua komponen berintensitas sama. Komponen pertama bergetar pada bidang *SAB* sedangkan lainnya tegak lurus terhadap bidang tersebut. Setiap komponen cahaya ini merangsang elektron-elektron yang terdapat di molekul-molekul udara untuk mengalami getaran dipaksakan. Karenanya molekul-molekul menjadi osilator Hertz dan akan mengeluarkan gelombang sekunder, yang paling kuat adalah pada arah tegak lurus arah getar. Arah polarisasi cahaya yang dihamburkan sesuai dengan arah getaran. Oleh karena itu, arah polarisasi yang tegak lurus terhadap bidang *SAB* selalu lebih kuat dibandingkan dengan lainnya, yaitu semakin terbatas jika arah pengamatan semakin jauh dari matahari. Pada 90° arah polarisasi yang terletak di permukaan *SAB* jatuh secara langsung. Suatu orientasi filter polarisasi yang bersangkutan akan menimbulkan keadaan gelap di langit.

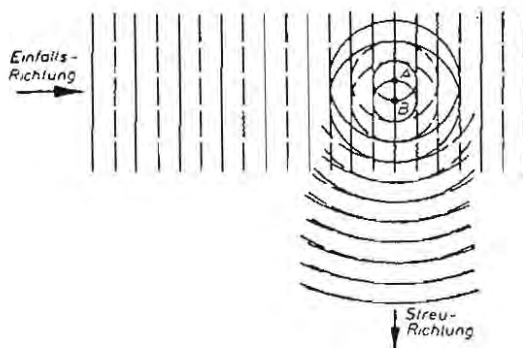
Hal yang menentukan untuk warna cahaya yang dihamburkan adalah daya yang terhadap pada osilator Hertz, berdasarkan §7.7.7 adalah sebanding dengan frekuensi osilator pangkat empat, yaitu

$$S \sim \frac{1 + \cos^2 \varphi}{r^2} \omega^4 p_0^2$$

p_0 adalah amplitudo momen dipol listrik yang disebabkan oleh medan listrik E yang terletak di dalam cahaya jatuh. Jika dihitung dengan polarisabilitas statik α , yaitu $p_0 = \alpha E$ (α bergantung dari volume molekul) dan jika diamati bahwa intensitas cahaya jatuh adalah $S_0 = E^2 \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0}$, intensitas cahaya yang dihamburkan adalah:

$$S \sim \frac{1 + \cos^2 \varphi}{r^2} \omega^4 S_0 r^2 \quad (10.45)$$

Hingga kini penjelasan tersebut sangat tepat untuk air murni dan gelas. Seluruh atmosfer mengandung lapisan air dengan ketebalan 6 m dan tidak



Gambar 10.67 Suatu pusat sistem yang teratur praktis tidak menghamburkan cahaya tampak, untuk setiap berkas sekunder terdapat sesuatu lainnya, bahwa gelombang sekunder mengalami interferensi (pada cahaya Roentgen setiap arah kasusnya tidak demikian). Pada gas pasangan ini umumnya tidak terdapat. Hanya karena adanya deviasi kerapatan partikel udara langit akan terlihat terang, berwarna biru.

tidak ada alasan yang tepat untuk mengatakan bahwa lapisan berwarna biru sangat intensif seperti halnya warna langit. Sesungguhnya dapat dimengerti dengan baik bahwa zat cair murni atau padat tidak menghamburkan cahaya. Misalnya dilakukan pengamatan untuk cahaya monokromatik (gambar[10.67]: untuk sembarang sudut, lihat §14.1.3). Pada setiap molekul A terdapat molekul B yang terletak sejauh $\lambda/2$ dari molekul A dalam pengamatan si pengamat. Interferensi keduanya akan saling menghilangkan. Hal ini berlaku (untuk molekul A dan B lainnya) untuk semua λ dan juga untuk semua sudut hambur hingga $\theta = 0$, arah berkas langsung yang mempunyai sudut satu-satunya, tempat terjadi interferensi konstruktif (saling menguatkan) sehingga tidak akan terjadi cahaya yang dihamburkan. (Untuk suatu kisi ideal harus pula memenuhi syarat sc Bragg, lihat §14.1.3 dan §12.5.2, yang pada harga λ besar tidak ada arah yang memenuhi).

Langit kelihatan terabng karena di dalam gas terjadi keadaan sebaliknya dibandingkan dengan zat padat dan zat cair, bahwa *tidak selalu* molekul berada pada jarak $\lambda/2$. Lebih tepat lagi dapat dikatakan: Di setiap tempat yang diisi gas terdapat banyak sekali molekul, tetapi kerapatannya mengalami deviasi yang tidak beraturan (acak). Pandang misalnya dua volume berukuran sama yang terletak pada jarak tertentu, walaupun dengan kandungan molekul secara eksak sama, yaitu N , tetapi terjadi interferensi cahaya yang saling menghilangkan (jarak $\lambda/2$ pada $\theta = 90^\circ$). Di dalam kenyataan antara kedua volume yang dipandang tersebut terdapat deviasi jumlah molekul sekitar N , yang menurut distribusi Poisson (lihat §13.2.7) diketahui bahwa $N = N$. Salah satu dari volume yang dipandang tentunya mempunyai medan listrik hamburan total $E = NE_1$ lebih besar dibandingkan dengan volume lainnya (E_1 adalah medan listrik gelombang terhambur untuk tiap molekul). Volume yang sama yang mempunyai pada suatu saat mengandung molekul lebih banyak, untuk mengamati intensitas tidaklah penting: hal yang penting hanya sebagian medan sebesar NE_1 tidak mengalami interferensi saling menghilangkan. Dengan demikian, intensitas cahaya yang dihamburkan hanya tinggal sebesar $I - NE_2 = NE_1^2$. Dalam hal ini E_1^2 sebanding dengan daya cahaya yang dihamburkan, yaitu S dan berdasarkan persamaan[6.52a] untuk daya cahaya yang dihamburkan

oleh volume pada jarak r dan mengandung molekul sebanyak N

$$\begin{aligned} \left(\frac{S}{S_0} \right) &\sim \left(\frac{1 + \cos^2 \varphi}{r^2} \right) \omega^4 \alpha^2 N \\ &= \left(\frac{1 + \cos^2 \varphi}{r^2} \right) \omega^4 \alpha^2 \frac{n^2 - 1}{N} \epsilon_0^2 \end{aligned} \quad (10.46)$$

Karena daya sebanding dengan ω^4 , yang terlihat lebih banyak pengaruh cahaya berfrekuensi tinggi (biru) dibandingkan dengan cahaya berfrekuensi rendah (merah). Semakin murni udara, semakin redup cahaya hamburan sehingga yang terlihat lebih gelap dan tentu juga warna biru menjadi samar. Pada saat matahari terbit dan terbenam, apabila lintasan cahaya melalui udara adalah panjang, cahaya biru pada sudut hamburan yang besar. Bagi pengamat matahari, akan menghilang, sehingga hanya cahaya merah yang dominan. Efek ini akan semakin besar jika partikel-partikel yang mengambang di atmosfer memperkuat hamburan. Hal yang sama terjadi pula pada cairan emulsi, susu di dalam air yang mengandung partikel-partikel lemak sangat kecil maka lapisan yang tertimbun partikel lemak akan berwarna biru sedangkan lapisan yang relatif transparan cenderung berwarna merah. Apabila cahaya yang akan terdapat warna biru paling dominan, jika terlihat dari arah penglihatan yang tegak lurus terhadap arah polarisasi, tetapi hampir tidak terlihat pada arah polarisasi.

10.6 Gelombang dan Partikel

10.6.1 Gelombang Materi

Pada sepuluh tahun pertama permulaan abad ini telah diketahui bahwa gambaran "klasik" partikel, yaitu penjelasan tentang atom yang dianggap mirip seperti bola bilyar berukuran kecil tidak sesuai lagi. Kenyataannya, setiap atom hanya memiliki garis-garis spektrum karakteristik dalam

mengemisi dan mengabsorpsi gelombang. Dengan dasar-dasar teori fisika "klasik" pembuktian analitis garis-garis spektrum atom yang diamati berdasarkan eksperimen tetap tidak mencapai penjelasan yang memadai. Penjelasan yang cukup membantu untuk ini adalah penjelasan yang dibuat oleh Planck tentang radiasi panas (lihat §11.2.6) dan Einstein tentang efek foto listrik (lihat §8.1.2). Cahaya di samping mempunyai sifat sebagai gelombang yang dapat menjelaskan peristiwa polarisasi, hamburan, dan interferensi, juga mempunyai sifat sebagai partikel, yang berlaku untuk menjelaskan peristiwa emisi dan absorpsi. Gelombang cahaya tersusun oleh rambatan partikel cahaya (foton) pada interaksi gelombang cahaya dengan materi hanya foton akan "terjadi" atau "menghilang". Mengapa objek semacam itu, yang hingga kini dipandang sebagai partikel tidak mempunyai sifat gelombang sekaligus? Demikian De Broglie pada tahun 1923 mempertanyakan hal ini. Karena sifat-sifat gelombang dari cahaya pada awalnya tidak dibuktikan melalui eksperimen, gelombang haruslah mempunyai panjang gelombang yang luar biasa sangat pendek. Jika terdapat analogi antara cahaya dan elektron, energi haruslah sebanding dengan frekuensi, sesuai dengan rumus yang dikemukakan oleh Einstein-Planck $E = h\nu$. Dalam pembahasan ini belum dikatakan berapa besar kecepatan fase gelombang materi yang merambat? Misalkan kecepatan rambat gelombang dianggap sama dengan c (walaupun secara umum ternyata tidak benar; lihat §15.3.4), panjang gelombang haruslah sesuai dengan $\lambda = c/\nu = hc/E$. Sebuah partikel yang sangat cepat mempunyai momentum sebesar $p = E/c$. Dari hubungan panjang gelombang energi dan momentum energi, diperoleh pula hubungan panjang gelombang momentum sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (10.47)$$

De Broglie kemudian menganggap rumusan itu sebagai dasar untuk penjelasan sifat gelombang sebagai partikel (lihat §15.3.4).

Jika diasumsikan bahwa mekanika partikel atomik dibedakan dari "mekanika bola bilyar", seperti halnya optika gelombang dan optika

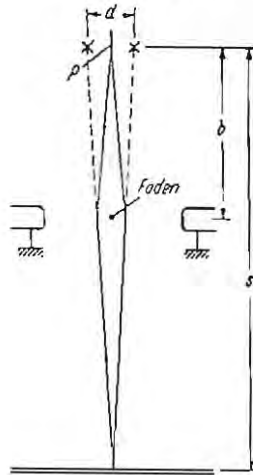
geometri, akan diperoleh kesimpulan mengapa atom mempunyai sifat dualisme. Jika elektron dapat dianggap sebagai gelombang, tidak mengherankan apabila elektron-elektron terkurung di dalam medan gaya atom hanya mempunyai harga frekuensi tertentu saja, yaitu persis seperti udara yang terdapat di dalam trompet, hanya mempunyai frekuensi eigen tertentu. De Broglie muncul dengan idenya yang didasari kenyataan, bahwa menurut teori atom Bohr elektron yang terdapat di dalam atom hanya mempunyai keadaan tertentu yang dinyatakan dalam bilangan bulat. Akhirnya, fisika mengenal peristiwa yang mirip dengan peristiwa frekuensi eigen getaran. De Broglie mengatakan sendiri, "Harus ada sebuah mekanika yang dapat menggantikan keterbatasan mekanika klasik dan secara bersamaan dikembangkan, seperti dikembangkannya optika gelombang dan optika-optika geometri."

10.6.2 Hamburan elektron

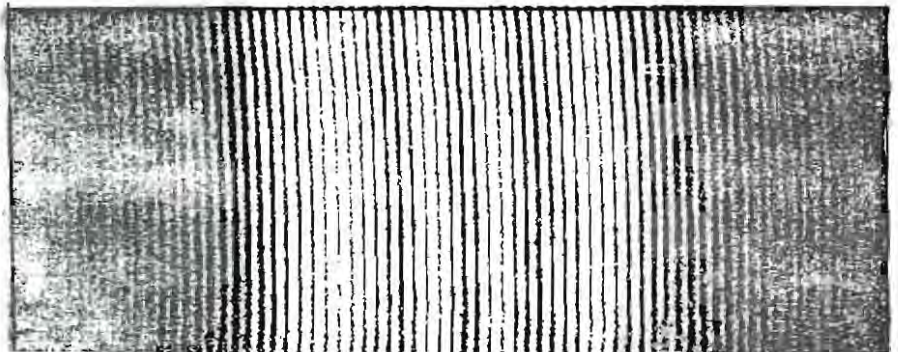
Jika rambatan partikel dinyatakan dalam gelombang materi, tentunya harus pula dapat diamati peristiwa hamburan dan interferensi. Misalkan untuk memisahkan dua berkas elektron bebas, berasal dari sumber yang sama, analog seperti pada percobaan cermin Fresnel atau biprisma, tempat kedua berkas hampir paralel kemudian disatukan kembali, (gambar [10.68]). Sebagai sumber elektron digunakan perkakas optika elektron yang dapat memperkecil bayangan gambar hingga 50 nm. Elektron bergerak melewati kawat logam yang diberi muatan positif karenanya dibelokkan ke tengah. Medan listrik yang terdapat pada kawat adalah sebanding dengan r^{-1} (r : jarak elektron terhadap kawat). Sebuah elektron yang melewati dan berada di dekat kawat akan mengalami sebuah komponen gaya yang cukup kuat ke samping, tetapi hanya dalam waktu sangat pendek, kemudian komponen gaya ke samping yang membelokkan elektron akan berkurang, tetapi tetap memberikan pengaruhnya dalam waktu yang cukup lama. Di dalam medan yang timbul dari kawat lurus ini (bukan medan yang ditimbulkan oleh muatan titik) ternyata sudut pembelokkan total elektron terhadap kawat tidak bergantung pada jarak, melainkan hanya bergantung pada energi (lihat soal 6.1.19). elektron-elektron yang mempunyai energi homogen (*elektron monoenergetik*)

berkelakuan persis cahaya monokromatik pada cermin ganda atau biprisma Fresnel.

• Apabila kawat diberi muatan, di depan sebuah plat fotografi akan terdapat dua berkas bersilangan dengan sudut sangat kecil dan tipe interferensi yang terjadi adalah seperti diilustrasikan gambar[10.69]. Pada plat diamati adanya daerah yang dikenai elektron membentuk pola yang jelas terlihat dan ada pula daerah pola-pola menjadi hilang (gelap). Hal serupa ini tentunya diketahui hanya terjadi pada gelombang. Analog dengan



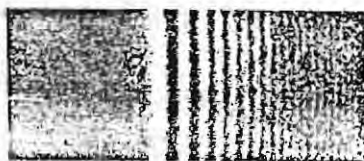
Gambar 10.68 "Biprisma" untuk menimbulkan pola interferensi elektron dari Moellenstedt dan Dueker



Gambar 10.69 Interferensi elektron dengan menggunakan "Biprisma" [dari Dueker dan Moellenstedt]

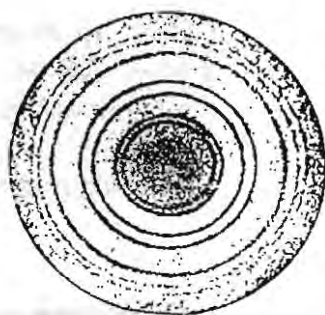
perhitungan yang dilakukan Fresnel (§10.1.2), panjang gelombang elektron dapat ditentukan. Untuk elektron berenergi 1 eV, berdasarkan perhitungan $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-9}$ m. Hal ini persis seperti persamaan yang dikemukakan De Broglie: $\lambda = h/p =$

Untuk elektron berenergi tinggi akan diperoleh panjang gelombang yang lebih pendek dibandingkan dengan sinar Roentgen "kuat".

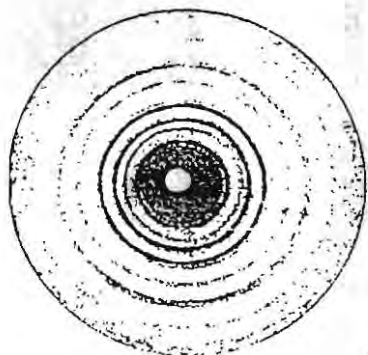


Gambar 10.70 Peristiwa hamburan elektron pada sebuah permukaan setengah (elektron 34 kV, fotografis positif.) [Dari T.W. Pohl dan Y.-U. Harten]

Dengan menggunakan susunan bahan makroskopik sembarang interferensi demikian sulit diperoleh. Hanya partikel yang dilewatkan melalui kristal dengan susunan kisi yang hampir sempurna akan menghasilkan interferensi tersebut. Seperti dibuktikan oleh Davidson dan Germer pada tahun 1927, dapat diperoleh pola-pola interferensi kisi kristal yang mirip dengan hamburan (difraksi) sinar Roentgen pada kristal (lihat §12.5.2). Thomson berhasil memperoleh pola-pola difraksi bubuk kristal (analog dengan metode yang dikembangkan Debye-Scherrer). Dalam hal interferensi dan difraksi elektron, elektron-elektron dan kisi kristal akan berinteraksi dengan kuat. Oleh karena itu, pada saat ini orang lebih sering menggunakan berkas neutron dibandingkan elektron. Di samping massanya lebih besar, neutron-neutron juga bergerak lebih lambat dibandingkan elektron. Dengan demikian, panjang gelombangnya tidak terlalu kecil. Dalam mikroskop elektron panjang gelombang De Broglie juga membatasi daya pisah bayangan gambar yang sama seperti pada kasus mikroskop optik karena menggunakan cahaya dengan panjang gelombang tertentu. Akan tetapi, keuntungan yang dapat diperoleh pada mikroskop elektron adalah panjang gelombang dapat dibuat bervariasi dan dapat mencapai harga yang kecil (lihat §9.4).



(a)



(b)

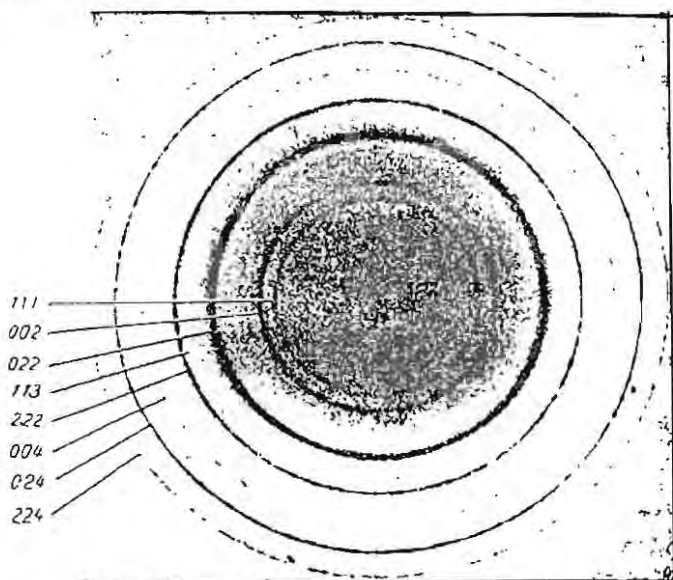
Gambar 10.71 a). dan b). Pola difraksi elektron dan Roentgen untuk lapisan tipis (*folie*) perak. a) Digunakan elektron dengan energi 36 kV dan b). sinar Roentgen dengan menggunakan berkas sinar $K\alpha$, $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ [dari Mark dan Wels. dikutip dari W. Finkelburg]

10.6.3 Hamburan Elektron pada Celah

Percobaan interferensi dan difraksi untuk gelombang cahaya dan partikel memiliki banyak kesamaan. Prosedur percobaan berikut ini, berdasarkan alasan teknis, hanya dapat dilakukan secara langsung untuk cahaya, tetapi seharusnya prosedur yang sama dapat pula berlaku untuk partikel.

Pandang dua berkas elektron melewati sebuah celah berisi "tajam" yang dibuat sangat halus. Seperti halnya cahaya (§10.2.2), elektron-elektron yang keluar dan terhambur oleh celah akan mengenai layar dan terlihat

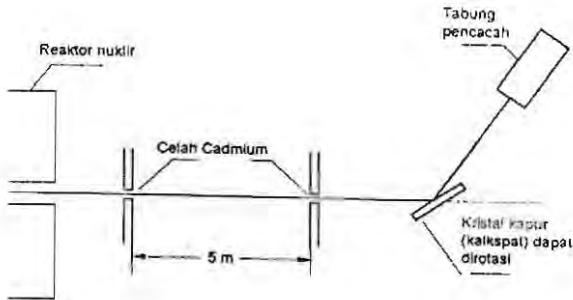
adanya pola-pola yang tidak begitu jelas sesuai dengan bentuk celah, seperti "lempengan" berdiameter $d = 1,22a\lambda/r$ (lihat gambar[10.28]), tanpa memandang pola-pola berorde lebih tinggi yang melingkupi lempengan tersebut. Terbukti bahwa elektron-elektron yang melewati celah akan bergerak ke layar dengan lintasan yang tidak lagi paralel dibandingkan dengan lintasan berkas sebelum melewati celah, beberapa elektron akan dibelokkan dengan sudut $\alpha \approx \lambda/r$. Sebelumnya, momentum total $p = h/\lambda$ terletak tegak lurus terhadap layar, tetapi sekarang terdapat beberapa elektron yang mempunyai komponen momentum transversal (tegak lurus) $p_r = \alpha p = h/r$. Pembelokkan berkas elektron ini adalah akibat adanya interaksi elektron dengan bagian pinggir celah. Dalam hal itu, diharapkan adanya ketergantungan terhadap bahan tameng (bahan lempengan bercelah) dan juga lebar celah. Akan tetapi, ketergantungan seperti itu tidak dapat dibuktikan keberadaannya. Hanya ukuran celah satu-satunya yang berpengaruh pada peristiwa pembelokkan elektron, atau dengan perkataan lain berpengaruh terhadap perubahan momentum. Juga adanya gerak atau tumbukan sesama elektron tidak berpengaruh terhadap



Gambar 10.72 Difraksi elektron pada MgO, energi 80 kV. Bandingkan pola difraksi di atas dengan hasil difraksi sinar Reontgen untuk kristal yang sama, gambar[12.32].

perubahan harga momentumnya. Jika intensitas terlalu kecil sehingga dalam waktu tertentu hanya sebuah elektron yang dapat melewati celah, tidak seorang pun dapat meramalkan koordinat yang akan dicapai elektron di layar. Ketidakpastian itu akan semakin besar, jika lebar celah semakin kecil. Berdasarkan kenyataan yang ada, sebuah elektron akan mempunyai ketidaktepatan tertinggi sama dengan r , momentumnya akan mempunyai ketidakpastian sebesar $p = h/r$ (perhitungan ini didasari oleh prinsip ketidakpastian Heisenberg).

Kesimpulan ini bertentangan dengan pemikiran logis dan dapat dibuktikan dengan percobaan berikut, bahkan menghasilkan kesimpulan yang justru memperkuat hubungan ketidakpastian antara jarak dan momentum tersebut. Buat dua celah pada suatu lempengan sedemikian rupa sehingga elektron akan menembusnya pada arah tegak lurus. Pada percobaan *A* biarkan kedua celah terbuka selama 1 detik sedangkan pada percobaan *B* hanya satu celah yang dibiarkan terbuka selama 1 detik; kemudian coba lagi dalam waktu yang sama untuk celah lainnya. Lakukan pengamatan di layar selama 2 detik untuk masing-masing percobaan. Pola gambar yang dibentuk kedua percobaan adalah berbeda sama sekali, yaitu: dua pola gambar yang saling tumpang tindih, berasal dari percobaan *B* dan pola difraksi celah ganda sesuai dengan apa yang dibahas pada §10.2.4, untuk percobaan *A*. Sebuah elektron dianggap sebagai partikel hanya dapat melewati celah 1 dan 2. Jika ia melewati celah 1, tentu terserah baginya, apakah celah 2 ada dan terbuka atau tidak. Akan tetapi, sesuai dengan pola yang diamati, ternyata tidak terjadi demikian. Seolah elektron "mengetahui" dengan baik, bahwa terdapat dua celah dan hal ini dapat diketahui secara langsung dari kelakuannya. Penjelasan peristiwa ini dalam gambaran gelombang telah jelas diketahui, sedangkan dari sudut pandang partikel masih kabur. Oleh sebab itu, pula anggapan Newton yang menganggap bahwa cahaya terdiri dari atas korpuskel-korpuskel oleh percobaan Fresnel dan Young dianggap selesai. Kesimpulan itu dibuat terlalu terburu-buru, sama halnya dengan kesimpulan yang menganggap bahwa elektron adalah gelombang. Dalam interaksi elektron dan materi kelakuan elektron dan cahaya praktis seperti partikel berbentuk titik. Dalam percobaan celah ganda dengan intensitas berkas rendah, seandainya terdapat hanya 1 elektron yang sampai pada layar pendar, pada layar akan diamati pendaran berbentuk titik. Hal yang persis sama, seperti telah



Gambar 10.73 Spektrometer neutron untuk analisa kristal

dibahas sebelumnya, terjadi pula untuk difraksi gelombang cahaya. Kedua gambaran peristiwa yang sama, sebagai akibat gelombang materi memang sulit untuk dicari alasan logis dan dipikirkan dengan seksama. Akan tetapi, keberadaan peristiwa tersebut tidak dapat disangkal. Materi gelombang adalah sama.

10.6.4 Relasi Ketidakpastian

Setiap partikel berenergi E dan momentum p adalah juga gelombang dengan frekuensi $\nu = E/h$ dan panjang gelombang $\lambda = h/p$. Jika hal ini benar, hasil percobaan yang telah dilakukan di atas dapat dirumuskan sebagai berikut.

Adalah tidak mungkin untuk menentukan posisi dan momentum sebuah partikel secara bersamaan dengan ketelitian sembarang. Misalkan celah terletak pada bidang $x-y$. Sebuah celah berjari-jari r yang terletak pada koordinat x dan y akan menyebabkan elektron yang lewat padanya mempunyai kesalahan besar $\Delta x = \Delta y = r$. Seperti terlihat bahwa komponen momentum pada arah sumbu x maupun y akan mempunyai ketidaktepatan masing-masing sebesar $\Delta p_x = \Delta p_y = h/r$. Pada ketidakpastian posisi yang kecil (misalkan ukuran celah dibuat sangat sempit) ketidakpastian akan lebih besar lagi dan sebaliknya. Kedua relasi ketidakpastian antara posisi dan momentum dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut.

$$\Delta x \Delta p \approx h. \quad (10.48)$$

Rumusan ini dikenal sebagai *relasi ketidakpastian* Heinsenberg dan dengan relasi ini nantinya dipakai dalam membangun penjelasan fisika atom, nuklir dan zat padat dan dasar-dasar penting tentang hal ini akan dijelaskan lebih rinci pada §16. Secara mendasar rumusan ini hanya berdasarkan pada kenyataan yang ada bahwa materi mempunyai sifat gelombang juga, yang dijelaskan dengan rumusan Planck, Einstein dan De Broglie. Dengan rumusan-rumusan tersebut, penjelasan-penjelasan dan juga pengembangan rumusan atomik lebih mudah dimengerti pada saat sekarang ini karena gelombang tidak lagi muncul secara eksplisit, tanpa mengurangi pengertian ketidak pastian tersebut.

Relasi yang serupa, seperti relasi koordinat dan momentum, terdapat pula relasi antara waktu dan energi. Jika sebuah sistem hanya diamati sepanjang waktu Δt , atau misalnya eksistensi sistem hanya terdapat sepanjang waktu tersebut, tidak mungkin untuk memperoleh harga energi sistem secara tepat hingga mencapai harga kesalahan ΔE yang diberikan melalui persamaan:

$$\Delta t \Delta E \approx h \quad (10.49)$$

Rumusan ini lebih mudah dipahami dalam gambaran gelombang. Mengukur harga energi suatu partikel berarti mengukur frekuensi gelombang yang bersangkutan. Pengukuran frekuensi selalu berlangsung penghitungan puncak-puncak gelombang (atau lembah gelombang) yang ditemui Suatu gelombang harmonik dengan frekuensi ν dalam waktu Δt akan membentuk puncak-puncak gelombang sebanyak $\nu \Delta t$. Misalkan, terdapat tujuh puncak dan tidak diketahui apakah terdapat puncak ke delapan "di ambang pintu" atau tidak. Kesalahan dari $\nu \Delta t$ mempunyai orde, maka kesalahan $\Delta \nu \approx 1/\Delta t$, maka kesalahan energi $E = h\nu$ adalah $\Delta E \approx h/\Delta t$, yang sesuai dengan pers[10.49]. Analisis Fourier (§4.16) juga menunjukkan adanya keterbatasan, bahkan untuk sebuah gelombang berbentuk sinusoidal murni, yang hanya mempunyai tenggang waktu sebesar Δt , akan menyebabkan pelebaran frekuensi spektrum sebesar $\Delta \nu \approx 1/\Delta t$.

Soal-Soal § 10.1

10.1.1 Dengan sebuah lensa berdiameter 1 cm dan sebuah plat gelas dengan tebal 1 mm Anda ingin mencoba membuat percobaan interferensi cahaya. Jelaskan dengan rinci apa yang Anda amati, seandainya sudut α dari 0 serta merta diubah ke harga maksimumnya?

10.1.2 Diskusikan peristiwa interferensi untuk cahaya monokromatik atau cahaya "putih" yang dijatuhkan pada plat plan paralel. Apakah akan diperoleh sebuah titik atau cahaya yang melebar?

10.1.3 Di atas sebuah permukaan yang mengandung air ditetaskan minyak misin dan dilewatkan berkas cahaya paralel dengan arah paralel permukaan tersebut (berapa paling tidak ukuran tetesan yang diberikan?). Sementara tetesan mengalir, meluap di permukaan (mengapa terjadi demikian?), terdapat kilapan cahaya berwarna-warni (bagaimana cara untuk dapat melihat kilapan cahaya warna-warni tersebut?), kemudian lenyap. Mengapa? Apakah minyak akan menutupi seluruh permukaan air? Jika tidak mengapa? Mengapa tidak selalu terjadi pola cincin?

10.1.4 Bagaimana cara meramalkan kekuatan dinding bahan sabun?

10.1.5 Cincin Newton di bias film: Bagaimana menimbulkannya? Mengapa pola interferensi awal sangat rapat? mengapa cincin Newton untuk susunan percobaan seperti terlihat pada gambar [10.14] (percobaan Hooke) selalu semakin besar ke arah luar?

10.1.6 Apa yang harus diubah pada gambar [7.70] agar sistem terdapat gelombang elektromagnetik datar yang diam. Apa yang harus berubah pada hubungan fase antara E dan H ? Bagaimana dengan perubahan kerapatan energi pada gelombang seperti ini?

10.1.7 Sebuah gelombang datar dijatuhkan tegak lurus di permukaan cermin, apakah a) tidak terdapat perubahan fase antara gelombang datang dan dipantulkan?, b) akan direfleksikan dengan perubahan fase π . Apa pengaruh perubahan fase terhadap distribusi simpul dan perut pada

gelombang diam tersebut? Arah medan E dan H dan rambatan selalu mempunyai hubungan di dalam ruang (hubungan apa?) Apakah mungkin bahwa E dan H akan direfleksikan dengan fase yang sama?

10.1.8 Berkas cahaya hanya merupakan abstraksi matematis sehingga di dalam optika geometri secara keseluruhan dengan meninggalkan istilah "berkas" dan menggunakan istilah lain lebih mudah direlasir secara realistik. Jelaskan program ini dengan menggunakan cermin, prisma dan lensa. Apa keuntungan dan kelemahan yang diperoleh dari masing-masing sudut pandang dua istilah tersebut? Khususnya: teori daya pisah, bayangan gambar berbentuk titik sebagai pola difraksi dari "celah" lensa. Apakah pernyataan ini terlalu berlebihan, jika dikatakan, bahwa untuk suatu bayangan gambar adalah lebih penting "celah" (lubang) dibanding lensa sendiri?

Soal-Soal § 10.2

10.2.1 Babinet membuktikan secara jenius pernyataan sebagai berikut. Suatu bayangan gambar berbentuk sembarang yang ditimbulkan pada dinding kasat mata (tidak tembus cahaya) melalui berkas cahaya paralel merupakan pola gambar yang sesuai dengan bentuk bendanya, dengan bentuk yang sama dengan bentuk celah. Dengan perkataan lain, suatu bayangan gambar yang terdapat pada fotografi negatif mempunyai bentuk yang sama dengan bendanya (positifnya). Melalui "pola difraksi" dalam hal ini bagian pola gambar yang terdapat di layar dapat dimengerti, justru bukan berasal dari cahaya langsung. Cari pembuktiannya! Kenyataan bahwa celah-celah memberikan peran tambahan pada pola gambar difraksi. Apakah kedua pola difraksi mempunyai fase yang sama pula?

10.2.2 Mengapa pada plat fotografi yang diperoleh dari teropong bintang pola bayangan bintang selalu berbentuk empat segi? Apa yang harus dilakukan agar pola gambar suatu bintang tetap mempunyai bentuk mirip dengan aslinya, yaitu seperti lempengan bundar yang kecil? Apakah hal ini dapat dicapai secara teknis?

10.2.3 Berapa ukuran benda yang masih dapat diamati dengan menggunakan teropong bercelah 50 mm, sebuah refraktor 50 cm, 5 m refraktor yang terdapat di bulan Palomar dengan mata telanjang (misalkan pula benda berada di permukaan bulan, Mars pada posisi sebaliknya, di matahari, pada jarak Sirius yang berjarak kurang lebih 10 tahun cahaya, di awan Andromeda berjarak kurang lebih $2 \cdot 10^6$ tahun cahaya)?

10.2.4 Pada *fava centralis* sel batang dipisahkan oleh jarak kurang lebih 5 μm . Apakah hal ini hanya kebetulan atau merupakan ukuran yang sesuai pada mata manusia!

10.2.5 Terdapat empat metode yang disarankan untuk menyimpulkan bahwa sebuah bintang tetap mempunyai planet: a) pengamatan perubahan posisi secara periodik dari bintang tetap; b) efek Doppler cahaya yang dipancarkan bintang tetap yang bergerak secara periodik; c) memisahkan secara langsung cahaya yang dipantulkan dari planet-planet yang mengelilingi benda pusat (bintang tetap); d) pemisahan cahaya secara tidak langsung dengan menggunakan efek Doppler. Berapa jauh jarak bintang tetap seharusnya agar keberadaan planet-planetnya dapat ditentukan dengan keempat metode di atas? (misal bagaimana mengetahui bahwa matahari mempunyai planet Jupiter?)

10.2.6 "Spektrometer Fourier": Pada spektrometer Morley sebuah cermin (misalnya *A'B'* pada gambar [10.16]) dapat digeser perlahan-lahan dengan menggunakan motor sehingga cermin dapat bergeser secara beraturan. Cahaya paralel dijatuhkan pada cermin. Pada sebuah teropong jarak jauh (teropong bintang, lihat gambar [10.16]) diletakkan sebuah sel fotografi. Bagaimana pola gambar yang terbentuk di atas sel fotografi terhadap waktu? Diskusikan misalnya untuk kasus cahaya monokromatik, suatu campuran dari dua garis spektral, suatu cahaya alamiah yang berasal dari berbagai sumber pemancar radiasi panas maksimal (berbagai partikel mengemisikan cahaya inkoheren terendam) Mengapa alat ini disebut sebagai spektrometer Fourier atau lebih tepat lagi sebagai spektrometer transformasi Fourier?

10.2.7 Jika lebar celah suatu spektrograf digandakan, kadang-kadang

akan muncul intensitas cahaya menjadi dua kali lipat Bergantung apa saja peristiwa tersebut?

10.2.8 Pada spektrum prisma spektrum violet dan biru lebih lebar dibanding spektrum merah, sedangkan pada spektrum difraksi terjadi hal sebaliknya. Mengapa?

10.2.9 Di langit atau di mana saja tempat orang-orang seperti Newton, Goethe, Huygens terkumpul:

- Goethe, "Hallo Sir Isaac yang baik, sekarang saya berkesempatan berdiskusi dengan anda dan lainnya: Warna rupanya tidak berawal dari cahaya putih, melainkan ditimbulkan oleh benda-benda berwarna."
- Newton, "Sekarang izinkan saya menjelaskan susunannya. Susunan tersebut bukan berasal dari saya, karena saya tidak dapat mempunyai kelakuan seperti prisma. Akan tetapi saya mempunyai pegas yang saya peroleh dari malaikat Jibril dan pegas ini dapat pula mempunyai kelakuan yang sama dengan prisma. Lihatlah di sana! Ada cahaya putih yang jatuh di lantai bukan? Sekarang coba anda lihat dengan seksama! Apa yang terjadi!"
- Goethe, "Ya, saya melihatnya! berwarna kehijau-hijauan!"
- Newton, "Nah, apa kata saya!"
- Goethe, "Sekarang katakanlah pada saya, kalau demikian apa sebenarnya cahaya hijau tersebut?"
- Huygens, (mendeheh, mencari perhatian)
- Newton, "Baiklah teman-teman! Baru saja saya pelajari. Warna hijau yang baru saja Anda lihat adalah gelombang harmonis dengan panjang gelombang $0,5 \mu\text{m}$ "
- Goethe, "Anda pastikan bahwa panjang gelombang cahaya hijau adalah $0,5 \mu\text{m}$; apakah harga tersebut gukan akibat adanya sesuatu

yang juga turut berperan serta dalam alat tersebut?"

- Newton, "Demikianlah, saya jamin!"
- Goethe, "Ha?! Sobatku, sekarang perhatikan dengan seksama dari terangnya cahaya dapat dilakukan renormalisasi kesalahan. Pada cahaya tersebut tentunya terdapat berkas-berkas periodik yang sangat halus, jauh lebih halus dari bulu-bulu yang terdapat di sayap burung di bumi bukan?"
- Newton, "Tentu saja, tetapi seperti yang Anda bayangkan, berkas berukuran $0,5 \mu\text{m}$."
- Goethe, "Yah, kalau demikian saya menyerah. Akan tetapi, berdasarkan apa yang Anda jelaskan pada saya, setiap berkas terletak persis pada jarak $0,5 \mu\text{m}$ dibandingkan berkas lainnya yang berada jauh lebih jauh. Anda katakan pula bahwa alat Anda mempunyai periodisitas juga sebesar $0,5 \mu\text{m}$. Tidak mengherankan memang, jika alat tersebut mengeluarkan cahaya berukuran demikian."

Siapa yang benar? Dapatkah Anda bayangkan seandainya Newton menemukan prisma lebih dahulu?

10.2.10 Jika bulan atau matahari berada di balik awan tipis, homogen, maka di sekitarnya terlihat adanya daerah terang (*aureole*). Jika seorang pengamat melihat matahari dari bayangan pada dinding, atau di lantai, maka bayangan kepala pengamat seringkali juga dikelilingi oleh aureole. Apa sebab terjadi demikian? Bagaimana distribusi warna untuk kasus tersebut? Berapa ukuran objek yang menyebabkan terjadinya aureole tersebut? Apa bedanya dengan halo (lihat soal 9.2 21)?

10.2.11 Mata serangga terdiri dari sejumlah *faset* atau disebut *Ommatidium* yang tersusun di kulit bola. Sebuah Ommatidium tidak mengandung lensa dan juga tidak berbentuk. Ommatidium berfungsi sebagai penghantar cahaya, sehingga semua objek dapat disampaikan ke sistem syaraf yang berhubungan dengannya, yaitu jika cahaya jatuh persis di sumbunya.

Serangga hanya melihat bayangan berupa titik-titik gelap dan terang, sesuai dengan arah orientasi Ommatidium bersangkutan. Apakah serangga dapat melihat bayangan objek semakin jelas seandainya ia memiliki Ommatidium lebih banyak dan berukuran semakin kecil? Atau apakah terdapat suatu keadaan optimum? Apakah seekor lalat memenuhi kondisi optimal ini?

10.2.12 Diberikan sebuah layar penyekat dengan dua celah paralel yang berada pada jarak sangat dekat satu sama lainnya. Pada percobaan *A* cahaya dilewatkan melalui celah tersebut selama 1 detik, kemudian layar ditutup kembali. Pada percobaan *B* salah satu celah dibiarkan terbuka dalam waktu yang sama. Sebagai layar penangkap bayangan digunakan plat fotografi. Bagaimana perbedaan kedua opname yang dibuat di atas?

Soal-Soal § 10.3

10.3.1 Mengapa pada siang hari pada jarak tertentu seorang normal tidak lagi dapat melihat, apa yang terjadi di balik jendela tertutup? Bagaimana kaca jendela menggambarkan objek dalam "gambar alamiahnya" yang berada di luar? Dalam kondisi bagaimana kaca jendela dapat digunakan sebagai cermin? Jelaskan sedapat mungkin secara kuantitatif. Keadaan harti, kondisi penerangan dls.

10.3.2 Berapa jumlah cahaya yang dapat melintasi *N* plat gelas? Terdapat bayangan gambar pencerminan dan bagaimana? Apakah bahan, tekanan yang digunakan untuk menekan masing-masing plat gelas dan juga kelembahan memegang peran penting dalam peristiwa ini? Apakah terdapat perbedaan jika susunan plat gelas diganti dengan balok gelas berukuran sama?

10.3.3 Suatu berkas cahaya terpolarisasi datang pada medium yang tidak jernih (misalkan udara penuh asap, air kotor). Lintasan cahaya tersebut mudah diamati, apalagi diamati dari samping. Apabila diamati dari arah atas atau bawah, tidak akan terlihat. Bagaimana hal tersebut terjadi? Di mana letak arah polarisasi? Apa yang terlihat jika cahaya yang digunakan

tidak terpolarisasi? Petunjuk: arah pancaran radiasi gelombang dari dipol Hertz.

10.3.4 Dapatkah dua getaran eliptis ditimbulkan dari dua getaran linier saling tegak lurus satu sama lain, dengan beda fase $\pi/2$?

10.3.5 Suatu berkas cahaya tidak terpolarisasi yang sangat sempit dijatuhkan pada kristal kapur (kalkspat) dengan permukaan rhombohedral. Kristal secara perlahan-lahan diputar dengan sumbu putar sesuai dengan berkas cahaya. Apa yang akan terlihat di permukaan rhombohedral yang berada di sebarang permukaan yang dikenai cahaya? Bagaimana arah polarisasi cahaya dan bagaimana perubahannya dengan memutar kristal?

10.3.6 Dari data pada gambar [10.48] $C_{40} = 1,16 c_0$ hitung atau gambarkan sudut antara berkas ordiner (biasa) dan berkas ekstra-ordiner (luar biasa). Berapa seharusnya tebal kristal agar satu berkas cahaya yang berdiameter 2 mm dapat dipisahkan menjadi dua bagian setelah melewati kristal ini? Bagaimana jika cahaya diganti dengan cahaya terpolarisasi?

10.3.7 Dua prisma tiga permukaan dengan penampang lintang berbentuk segitiga samakaki, bersudut sama, dipotong dari kristal bersumbu tunggal (kebanyakan dari kuarsa), yaitu dengan cara mengatur agar salah satu sumbu optik terletak persis pada penampang lintang kristal, sedangkan sumbu lainnya berada tegak lurus. Kedua prisma saling direkatkan dengan permukaan hipotenusa satu sama lain (kebanyakan dengan menggunakan air sebagai perekat). Apa yang diperoleh jika seberkas sinar terpolarisasi berukuran sempit dijatuhkan tegak lurus pada permukaan sambungan? Berapa besar sudutnya untuk kristal kalkspat?

10.3.8 Pada "laser gelas" sering digunakan sebuah cermin yang diletakkan di "jendela" atau celah keluar, sehingga cahaya dapat dipantulkan kembali secara bolak balik, akan tetapi terdapat sebagian cahaya yang hilang karena refleksi pada permukaan batas antara gelas udara yang tidak dapat diatasi sehingga menyebabkan kehilangan intensitas. berapa besar intensitas yang hilang untuk 100 kali pemantulan? Dapat dibuat suatu "jendela kaca" yang hanya dapat menahan hingga

50% kehilangan intensitas cahaya? (kata kunci: jendela BREWSTER).

Soal-Soal § 10.4

10.4.1 Suatu berkas cahaya terpolarisasi dijatuhkan pada arah memanjang di dalam pipa sempit yang diisi air. Apa yang terlihat dari sisi lain pipa. Jika air dicampur dengan gula akan terlihat cincin terang, apa sebabnya?

10.4.2 Apa hubungan logis yang terdapat antara enam istilah berikut: efek Faraday, efek Kerr, optis aktif, polarisasi linier difraksi ganda, polarisasi sirkular? Apakah terdapat batasan korespondensi semuanya dalam pengertian atomik?

10.4.3 Apakah $n < 1$ bertentangan dengan teori relativitas?

Soal-Soal § 10.5

10.5.1 Binatang menyusui tidak mempunyai pigmen biru. Bagaimana dapat dijelaskan bahwa terdapat manusia bermata biru?

10.5.2 Apakah bir hitam mempunyai buih hitam dibanding dengan bir biasa? Mengapa susu, garam, gula, salju dan kertas berwarna putih?

10.5.3 Kapan bahan suspensi akan terlihat berwarna putih, biru dan kapan berwarna merah? Contoh, susu segar dan *yoghurt*

10.5.4 Asap yang berasal dari korek api kayu berwarna putih jika dilihat dengan dasar berwarna gelap (malam hari misalnya), terang jika dilihat dengan dasar kelabu tua. Jika seandainya masih terdapat arang dapur, asap tipisnya akan berwarna kebiruan jika dilihat dengan dasar berwarna

hitam dan di depan langit cerah akan berwarna merah. Mengapa?

10.5.5 Mengapa orang yang mau membuat foto awan menggunakan filter berwarna kuning?

10.5.6 Apakah kebiasaan karena cuaca (sarapan pagi hingga makan malam) dapat dijelaskan secara fisis?

10.5.7 Bayangan di atas salju kadang-kadang terlihat berwarna kebiruan. Kapan dan mengapa?

10.5.8 Mengapa gunung di kejauhan terlihat berwarna biru?

10.5.9 Seseorang menghembuskan nafas ke permukaan kaca dan kaca diamati dengan menggunakan lampu. Apa yang terlihat di permukaan kaca? Mengapa?

10.5.10 Anda ingin mengetahui kandungan bahan yang dapat mengabsorpsi cahaya yang terdapat di dalam objek mikroskopis secara fotometris. Anda telah mengukur ketebalan objek dan koefisien ekstingsinya dalam daerah panjang gelombang cahaya yang digunakan dan anda mengetahui pula bahwa bahan lain yang juga mengabsorpsi cahaya tidak terdapat di dalam objek tersebut. Anda mengukur cahaya seluruhnya yang melewati bahan di belakang objek. Bahan absorber yang ingin diketahui tersebut dapat pula tersebar tidak homogen di dalam objek, misalkan dapat diamati pula keadaan tidak homogen tersebut untuk subskala mikroskop. Dalam pengamatan dianggap bahwa bahan tersebut terdistribusi secara homogen. Berapa besar kesalahan yang muncul dari adanya efek distribusi tidak homogen dari bahan tersebut? Bandingkan hasil yang diperoleh antara objek yang mengandung bahan secara homogen dan objek lain yang tidak homogen, di mana pada setengah luasnya mempunyai konsentrasi justru dua kali lipat besar, sedangkan setengah permukaan lainnya tidak terdapat sama sekali. Apakah kesalahan tersebut merupakan kesalahan maksimum? Apakah akan diperoleh angka kandungan yang lebih besar atau lebih kecil dari harga kandungan seandainya bahan terdistribusi homogen, atau apakah tanda dari kesalahan akan berbeda bergantung pada kondisi yang ada dalam melakukan

percobaan? Berikan harga kesalahan untuk kasus masing-masing absorpsi lemah dan absorpsi kuat. Kenyataan bahwa setiap bahan pada dasarnya terdistribusi tidak homogen, yaitu terdistribusi secara molekuler. Apakah terdapat pula kesalahan distribusi?

Soal-Soal § 10.6

10.6.1 Dalam percobaan Dueker dan Moellensted (gambar[10.68] dan gambar[10.69]) untuk elektro berenergi 1 eV diperlukan jarak garis sebesar $\delta = 1 \mu\text{m}$. Berapa besar muatan yang terkandung di dalam kawat pembelok elektron? Misalkan tebal kawat $5 \mu\text{m}$ dan komponen lain dari aparatur terletak 20 cm dari kawat. Berapa besar tegangan harus diberikan pada kawat? Apakah gerak elektron dapat dibuat menjadi pelan dan keadaan mana yang terbaik?

10.6.2 Bandingkan difraksi sinar Roentgen dan elektron pada kristal MgO (gambar[12.37] dan gambar[10.72]) Ramalkan panjang gelombang yang digunakan pada difraksi sinar Roentgen! Apakah perbedaan intensitas memberikan arti?

10.6.3 Berapa besar energi neutron yang harus digunakan untuk mendapatkan pola difraksi suatu kristal dengan menggunakan difraksi neutron? Diskusikan gambar[10.73]! Perlukan sebuah reaktor? Untuk apa diperlukan celah yang terbuat dari Cd? Apakah dari susunan gambar yang ada akan diperoleh neutron berenergi monokromatis? Jika tidak, bagaimana seharusnya? Apakah neutron harus monokromatis?

10.6.4 Sebuah partikel haruslah dapat dijelaskan sebagai gelombang, dengan amplitudo dan probabilitas kerapatan partikel pada suatu tempat diketahui. Apa yang dapat diramalkan tentang posisi sebuah partikel yang digambarkan melalui gelombang harmonik (dengan panjang gelombang λ tertentu)? Bayangkan dua gelombang harmonik ($\lambda_1 + \lambda_2$) yang saling tumpang tindih, akan tetapi mempunyai kecepatan fase sama. Berapa besar perbedaan momentum keduanya, khususnya untuk kasus $\lambda_1 \approx \lambda_2$? Berapa

besar frekuensi modulasi yang muncul? Berapa besar amplitudo maksimum dari keadaan termodulasi? Jika antara gelombang λ_1 dan $\approx \lambda_2$ ditambahkan gelombang lain dengan panjang gelombang λ , yang juga saling menguatkan satu keadaan modulasi maksimum, apa yang terjadi dengan keadaan maksimum modulasi lainnya? Pada daerah Δx maka di dalam ruang paket gelombang terlokalisasi? Hubungan apa yang terdapat antara Δx dan Δp ?

10.6.5 Apakah relasi ketidakpastian juga berperan untuk objek makroskopik? Anda melakukan pengukuran posisi sebuah batu, butir pasir, bakteri dengan ketelitian sangat tinggi, yang dimungkinkan dengan menggunakan mikroskop sekalipun dan memastikan bahwa semua objek kelihatannya tetap berada dalam keadaan diam. Tidak ada gaya luar, juga bakteri tidak bergerak dengan aktif. Berapa ketepatan posisi masing-masing objek setelah 1 hari, 30 tahunan 10^{10} tahun yang dapat diramalkan? Misalkan melalui temperatur amat rendah dipastikan, bahwa bakteri masih tetap ada!

10.6.6 Relasi ketidakpastian merupakan alat ampuh untuk menyatakan gaya yang belum diketahui secara pasti, yaitu dengan menggunakan kata-kata "paling rendah" atau "paling tinggi". Jika posisi sebuah partikel belum dapat dipastikan sebesar Δx , maka harga momentum tertinggi haruslah $\Delta p = h/\Delta x$. Jika momentum seperti itu "tenggelam", seharusnya pula terdapat energi kinetik tertentu (energi titik nol). Gunakan rumusan tersebut untuk sebuah partikel, jika diketahui bahwa partikel berada di dalam sebuah empat persegi dengan sisi berukuran d . Penggunaan idea ini dipakai dalam pembahasan pada bab berikut. Relasi ketidakpastian ini juga berlaku untuk hubungan antara sudut putar dan momentum angular. Pandang suatu objek sembarang yang mengalami rotasi. Berapa kesalahan tertinggi yang akan diperoleh untuk posisi (sudut)? Berapa besar harga terendah momentum angular yang sesuai dengan posisi tersebut? Berapa ketidakpastian energinya?

Index

- Abbe
 teori, 571
- Ampere
 arus melingkar, 211
- Arrhenius
 diagram, 315
- Aston, 340
- Barkhausen
 efek, 226
 persamaan tabung, 354
- Bloch
 F., 224
- Braun
 tabung, 335
- Brewster
- Child
 hukum, 349
- Claussius-Mosotti
 relasi, 55
- Curie-Weiss
 hukum, 217
- Curie
 hukum, 209
 temperatur, 211
- Debye-Hueckel
 panjang, 107
- Debye-Scherer
 metode bubuk, 634
- Doppler
 efek, 469

- hukum, 588
- sudut, 587
- rumus, 630
- Einstein
 - efek foto listrik, 629
- Facoult
 - metode, 470
- Faraday
 - efek, 331
 - gelas, 26
 - sangkar, 26
- Ferdinand Braun, 335
- Fermat
 - prinsip, 420
- Fizeau
 - metode, 467, 468
 - pengukuran kec. cahaya, 467
- Fourier
 - analisis, 641
- Fraunhofer
 - hamburan celah, 550
 - hamburan celah lingkaran, 555
 - rotasi, 622
- Einstein-Planck
 - hamburan dua celah, 558
- Fresnel
 - biprisma, 525
 - hamburan, 542
 - percobaan cermin, 521
 - persamaan, 592
 - zone plat, 547
- Galilei
 - 1609, 461
 - pengukuran kec. cahaya, 467
- Galvani
 - elemen, 114
- Haidinger
 - cincin, 538
- Hallwachs
 - W., 1888, 317
- Hall
 - konstanta, 185
- Heisenberg
 - W., 224
 - relasi ketidakpastian, 640

- Helmholtz
 kumparan, 332
- Hertz
 dipol, 588
 osilator, 275, 277, 625
- Hittorf
 bilangan, 98
- Huygens
 okuler, 456
- Kerr
 efek, 607
 sel, 468, 607
- Kirchoff
 timbangan, 33
- Langmuir-Taylor
 efek, 325
- Langmuir
 1925, 386
- Laplace
 operator, 20
- Larmor
 frekuensi, 331, 334, 622
 persamaan, 15
- Poynting
 vektor, 590
- Lenz
 kaidah, 188
 kaidah. lih. kaidah tangan
 kanan, 265
- Lorentz
 gaya, 330
- Maxwell
 relasi, 273, 613
- Michelson
 interferometer, 539
- Newton
 cincin, 535, 536
 pers. bayangan, 416
- Ohm
 tahanan, 233
- Peltier
 koefisien, 129
- Planck
 radiasi panas, 629
- Poisson
 distribusi, 627
 noda, 547
 katode, 315, 326
- Wiener
 lapisan fotografi, 541

- Rayleigh
 kreteria, 564
- Rowland
 lingkaran, 567
- Schottky-Langmuir
 persamaan muatan ruang,
 348
- Snellius
 hukum, 419
- Thomson
 G.P., pola difraksi elektron,
 634
 J.J., 340
 metode parabola, 342
- Verdet
 konstanta, 621
- Waltenhofen
 bandul, 188
- Wehnelt
 amorf, 491, 577
 amperemeter, 66
 analísator, 574
 anion, 90
 anisotropik, 577
 anoda, 89
- Zeeman
 efek, 331
- De Broglie
 Louis, 1923, 630
- De Haas Van Alphen
 efek, 331
- aberasi
 sferis, 417, 447
- absorpsi
 koefisien, 608
 spektrum, 610
- adaptasi mata, 463
- adsorpsi, 111
- akomodasi mata, 463
- akromat
 sistem lensa, 450
- akromatik
 lensa, 433
 akumulator timah, 120
 pada semikonduktor, 346
 searah, 65
- arus melingkar, 207
 Ampere, 211
- arus termis, 123
- astigmatik

- anti-dipol, 59
- antiferroelektrik, 230
- antiferromagnetik, 228
 - bahan, 228
- apertur numeris, 458, 572
- argonit, 585
- arus
 - di dalam vakuum, 346
 - foto, 320
 - frekuensi tinggi, 254
 - harga efektif, 236
 - induksi 233
 - jenuh, 315, 350
 - kerapatan, 77
 - kuat, 65
 - listrik, 65
- bundel cahaya, 409
- cahaya
 - bundel, 409
 - monokromatik, 432
 - polikromatik, 431
 - spektrum, 433
- cermin
 - elektron, 482, 484
 - kesalahan, 448
- aturan pembagi rangkaian
 - tertutup, 238
- aturan simpul, 237
- aturan tangan kanan, 172
- bahan
 - putar kanan, 603
 - putar kiri, 603
- band-block-filter, 244
- band-pass-filter, 244
- bayangan
 - ukuran, 451
- berat statistik, 313
- betatron, 255
- bidang getar, 574
- bilangan pola, 530
- dikroisme, 585
- dinamo listrik, 233
- dioptri
 - satuan daya bias, 441
- dipol. 36
- dipol listrik, 14
- dispersi, 431, 611
 - anomali, 612

- cermin, 408
 - cekung, 411
 - cembung, 412
 - elektron, 485
 - perbesaran bayangan, 415
- daerah WEISS
 - daerah, 224
- daya bias lensa, 440
- derajat dissosiasi, 102
- derajat transmisi, 609
- deret potensial, 115
- diamagnetik, 206
- dielektrik
 - bahan, 47
- ekuivalen elektrokimia, 92
- elastik
 - kuasi, 387
- elektroforesis, 109
- elektrolisa, 89
- elektrolit
 - zat, 89
- elektrometer
 - kapiler, 122
 - kawat, 35
- elektron
 - faktor, 570
 - kurva, 613, 614
 - medium, 110
 - normal, 612
 - rotasi, 602
- dosimetri, 363
- drift
 - kecepatan, 365
- dynode, 322
- efek kulit, 258
- ekstingsi
 - koefisien, 609
- ekuipotensial
 - bidang, 19
 - dipaksakan, 521
- energi
 - gelombang elektromagnetik
 - kerapatan, 274
 - lepas elektron, 318
- fase
 - perbedaan, 518
- fase dispersi, 110
- ferromagnetisme, 229
 - contoh, 229
 - sifat 229

- Hamburan, 632
- konduksi, 309
- monoenergetik, 632
- optika, 472
- uap, 312
- elektoradiografi, 180
- elektrorestriksi, 60
- elemen konstan, 120
- elemen sekunder, 120
- elemen tidak konstan, 119
- emisi
 - eigen, 277
 - resonansi, 277
- frekuensi eigen, 254
- fungsi kerja
 - lih. energi lepas, 318
- galvanis
 - akumulasi, 89
- galvanometer, 66
 - balistik, 48, 182
 - cermin, 181, 409
 - kawat, 180
- garis gaya medan, 13
- gaya
 - LORENTZ, 330
 - ferrite
 - bahan, 229
 - ferroelektrik, 230
 - ferromagnetik, 206, 212
 - fokus, 411
 - virtual, 412
 - fotoelektris, 319
 - fotometer, 577
 - foton, 7
 - fovea, 464
 - frekuensi
 - harmonik permukaan, 267
 - materi, 310
 - permukaan, 267
 - sirkular, 597
 - gelombang elektromagnetik
 - arus kerapatan, 274
 - generator
 - listrik, 232
 - generator termis, 125
 - getaran
 - eigen, 614
 - glimmer, 585
 - heteropolar, 89
 - hidrasi, 90

- gambaran, 42
- sentrifugal, 330
- sentripetal, 330
- gaya termis, 124
- gelombang
 - diam, 272
 - diam listrik, 289
 - elektromagnetik, 267
 - gradien, 475
- induksi
 - medan magnet, 171
- induktivitas, 190
- interferrikum, 202
- ion, 89.309, 323
 - kristal, 309
- ionisasi
 - derajat, 323
 - diferensial, 323
 - energi, 323
 - kamar, 364
 - molekul, 323
 - termis, 323
 - tumbukan, 323
- ionisfir, 388
- iris, 463
- hidrosol, 110
- high-pass-filter, 244
- hipermyopi, 465
- hologafi, 548
- hologram, 548
- homosentris
 - bundel, 409
- indeks bias, 56, 273, 419
- kaedah
 - LENZ, 188
- kaedah tangan kanan, 265
- kaedah tangan kiri, 185, 265
- kapasitas, 29
- karakteristik
 - kurva arus-tegangan, 346
 - kurva triode, 352
 - kurva OHM, 346
- kation, 90
- katoda, 89
- kecepatan
 - cahaya
 - di dlm kristal, 579
- kerapatan muatan
 - permukaan, 11
 - volume, 11

- isotropik
 - medium, 51, 577
- jangkauan penglihatan, 452, 453
- jangkauan penglihatan terjelas
 - 452
 - hamburan, 561
 - konkav, 567
 - konstanta, 561
 - refleksi, 566
- koefisien
 - rekombinasi, 361
- koefisien temperatur tahanan,
 - 75
- koersitif
 - kuat medan, 214
- koheren
 - batas panjang, 519
 - panjang, 521
 - sumber cahaya, 518
- koloida
 - larutan, 110
- kondensator
 - gelap, 459
 - pembelok, 329, 340
- kerapatan optis, 609
- ketajaman penglihatan, 465
- kisi
 - cermin
 - lih. kisi refleksi, 566
 - listrik, 71
- konduktifitas ekuivalen, 101
- konduktor konsentris, 292
- konstanta
 - Hall, 185
 - induksi, 174
 - influenzia, 8
 - medan magnet, 174
 - permitivitas, 8
 - waktu, 192
- kontras
 - bayangan pada mikroskop,
 - 458
 - fase, 459
- korpuskel, 310
- kristal
 - bersumbu ganda, 585
 - bersumbu tunggal
 - negatif, 580

- kondensator plat, 30
- konduktifitas
 - awal, 367
 - sumbu optis, 579
 - sumbu utama, 578
- kromatis
 - aberasi, 449
- kuat kutub magnet, 199
- kuat medan
 - listrik, 10
- lapisan
 - seperempat gelombang, 596
- laser
 - sinar, 549
- lensa, 549
 - akromatik, 433
 - bercelah, 480
 - bikonveks, 442
 - elektron, 478
 - kolektif, 456
 - magnet panjang, 485
 - magnet pendek, 487
 - objektif, 454
 - okuler, 455
 - pendar, 481
 - positif, 580
 - kapur rhombohedral, 579
 - kuarsa, 580
 - penghambur, 442
 - pengumpul, 442
 - plan-konveks, 456
 - plankonveks, 535
 - selinder, 481
 - tebal, 444
 - tipis, 441
 - tunggal, 481
- lintasan
 - cahaya, 423
- lintasan optis, 518
- logam
 - medium optis rapat, 541
- low-pass-filter, 244
- luminisen
 - bahan, 338
- magnet
 - elementer, 211
 - medan, 151
 - medan induksi, 171
 - permanen, 156
- magnetisasi

- momen, 205
- magnetisasi total
 - momen, 205
- mata manusia, 462
- medan
 - listrik, 9
 - magnet, 151
 - induksi, 171
 - sentral, 17
- medium
 - optis rapat, 420
 - optis renggang, 420
- mikrometer okuler, 35
- mikroskop, 454
 - elektron, 489, 490
 - emisi, 491
 - pancaran, 491
 - scanning, 494
- mobilitas
 - elektroferesis, 109
 - pembawa muatan, 345
- mobilitas elektron, 87
- multiplier
 - foto elektron, 322
- myopi, 465
- molaritas, 101
- momen
 - dipol listrik, 38
 - dipol listrik permanen, 57
 - magnetisasi, 205
 - magnetisasi total, 205
- momen gaya, 40
- momen putar, 40
- momentum
 - orbital, 220
- monokromatik
 - cahaya, 432
- muatan
 - cermin, 42
 - elementer, 5
 - induksi, 41
 - negatif, 4
 - pergeseran, 262
 - positif, 4
 - ruang, 346
 - spesifik, 83
- muatan test, 10
 - berkas sinar katode, 235
 - elektron, 335
 - lilitan, 234

- natriumchlorat, 603
- nitrobensol, 607
- nuklir magnetik
 - resonansi, 331
- okuler
 - Huygens, 456
 - skala, 457
- operational amplifier, 357
- optika
 - geometri, 408
- optis aktif, 601
 - zat, 604
- osilasi
 - rangkaian, 233
- osilator
 - linier, 275, 276
 - pengeser fase, 356
 - ruang "hampa", 275
- osilograf
- plasma. 384
 - frekuensi, 386
 - getaran, 388
 - kuasi netral, 385
 - panas, 391
- polarsabilitas, 54
- osiloskop, 234
- osmose listrik, 109
- palung elektrolit, 483
- parabola
 - lintasan, 328
- paramagnet, 206
- paramagnetik, 209
 - resonansi, 331
- pembiasan
 - hukum, 418
- pentode, 354
- pergeseran
 - kerapatan arus, 263
- permeabilitas relatif, 174
- permitivitas
 - konstanta, 8
- piezoelektrik
 - efek, 62
- piezoelektrisitas, 61
- pompa termis, 129
- potensial
 - elektrokimia, 105
 - perbedaan, 16
- potensiometer, 73
- presesi

polarisasi

Galvani, 119

arah, 573

bidang, 573

cahaya, 573

linier, 573

elektrolit, 119

eliptik, 574

filter, 568

lingkaran, 574

sudut, 587

vektor, 51

polarisator, 574

klasik, 586

polikromatik

cahaya, 431

hukum, 408, 409

koefisien, 590

total, 424, 425

reflektometer

total, 426

rekombinasi, 361

ion positif-negatif, 361

relaksasi dipol, 56

resistensi, 70

gerak elektron, 622

prisma pembalik bayangan, 461

rabun dekat, 465

rabun jauh, 465

radikal, 89

rangkai

 R, L, C , 244arus bolak-balik, C , 238arus bolak-balik, L , 238arus bolak-balik, R , 236

rangkai balik, 355

Meissner, 356

faktor, 355

real

bayangan pd lensa, 435

refleksi

katode, 313

skala okuler, 457

skin effect, 258

sol, 110

spektograf

massa, 340

prisma, 568

susunan peralatan, 433

spektroskop, 433

- resolusi, 556
 - mikroskop, 572
- resonansi, 254
- resonator
 - ruang kosong, 294
- retina, 463
- rheostat, 73
- sel
 - bahan bakar, 127
- siklotron
 - resonansi, 331
- simpul tegangan, 289
- sinar
- suseptibilitas
 - dielektrik, 52
 - magnetik, 205
- tahanan, 70
 - Ohm, 233
 - beban, 244
 - bolometer, 76
 - buta, 244
 - geser, 73
 - jenis, 71
 - kisi, 73
 - negatif, 71
 - spektrum
 - cahaya, 433
 - normal, 434
 - spin
 - elektron, 223
 - spiral
 - lintasan, 334
 - sudut penglihatan, 451
 - sudut putar
 - spesifik, 602
 - sudut rotasi, 409
 - superkonduktor, 76
 - supermolekul, 493
 - tegangan kontak, 123
 - tegangan larutan, 113
 - tegangan penguraian, 119
 - termoelemen, 123
 - teropong, 459
 - holland, 461
 - prisma, 461
 - teristial, 461
 - titik api
 - lihat fokus, 411
 - torsi elastik, 160
 - transformator, 249

INDEX

- nyata, 244
- termometer, 75
- tutup, 73
- tahanan putar, 73
- tegangan, 16
 - frekuensi tinggi, 253
 - harga efektif, 236
 - induksi, 232
- tegangan absolut
 - pengukuran, 34
- virtual
 - bayangan pd. cermin, 410, 414
 - bayangan pd. lensa, 435
- voltmeter, 68
- waktu bebas rata-rata, 365
- waktu hidup
 - ion rata-rata τ , 362
- zinnober, 603
- step down, 250
- step up, 250
- tesla, 253
- triode, 352
- ultrasonik
 - pemancar gelombang, 60
- vektor
 - pergeseran listrik, 52
- vektor poynting, 274
- vibrasi eigen, 385

Satuan Energi dan Satuan Ekuivalen

	J	erg	mkp	cal	eV	T [K]	$\frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$	ν [Hz]	λ [m]	m [AMU]
1 J	1	10^7	0,1020	0,2389	$6,242 \cdot 10^{18}$	$7,244 \cdot 10^{22}$	$1,439 \cdot 10^{26}$	$1,599 \cdot 10^{23}$	$1,986 \cdot 10^{-15}$	$6,601 \cdot 10^9$
1 erg	10^{-7}	1	$1,020 \cdot 10^{-8}$	$2,389 \cdot 10^{-8}$	$6,242 \cdot 10^{11}$	$7,244 \cdot 10^{15}$	$1,439 \cdot 10^{19}$	$1,599 \cdot 10^{26}$	$1,986 \cdot 10^{-18}$	$6,701 \cdot 10^2$
1 mkp	9,807	$9,807 \cdot 10^3$	1	2,343	$6,121 \cdot 10^{19}$	$7,103 \cdot 10^{23}$	$1,411 \cdot 10^{21}$	$1,480 \cdot 10^{24}$	$1,023 \cdot 10^{16}$	$6,571 \cdot 10^{10}$
1 cal	4,186	$4,186 \cdot 10^7$	0,4269	1	$2,613 \cdot 10^{19}$	$3,032 \cdot 10^{23}$	$6,023 \cdot 10^{26}$	$6,218 \cdot 10^{23}$	$4,745 \cdot 10^{-16}$	$2,805 \cdot 10^{10}$
1 eV	$1,602 \cdot 10^{19}$	$1,602 \cdot 10^{12}$	$1,634 \cdot 10^{-20}$	$3,827 \cdot 10^{-20}$	1	11600	23,05	$2,418 \cdot 10^{14}$	$1,240 \cdot 10^{-6}$	$1,073 \cdot 10^9$
1 K	$1,381 \cdot 10^{23}$	$1,381 \cdot 10^{16}$	$1,408 \cdot 10^{-24}$	$3,298 \cdot 10^{24}$	$8,617 \cdot 10^5$	1	$1,986 \cdot 10^3$	$2,084 \cdot 10^{10}$	$0,0149$	$9,250 \cdot 10^{11}$
$\frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$	$6,951 \cdot 10^{21}$	$6,951 \cdot 10^{14}$	$7,088 \cdot 10^{22}$	$1,660 \cdot 10^{21}$	0,0434	503,47	1	$1,040 \cdot 10^{13}$	$2,858 \cdot 10^{-5}$	$4,657 \cdot 10^{11}$
ν [Hz]	$6,626 \cdot 10^{34}$	$6,626 \cdot 10^{27}$	$6,756 \cdot 10^{-35}$	$1,583 \cdot 10^{34}$	$4,136 \cdot 10^{13}$	$4,799 \cdot 10^{11}$	$9,532 \cdot 10^{14}$	1	$2,998 \cdot 10^{-8}$	$4,440 \cdot 10^{24}$
λ [m]	$1,986 \cdot 10^{25}$	$1,986 \cdot 10^{18}$	$2,025 \cdot 10^{-26}$	$4,745 \cdot 10^{26}$	$1,240 \cdot 10^{-6}$	0,0149	$2,858 \cdot 10^{-5}$	$2,998 \cdot 10^8$	1	$1,331 \cdot 10^{15}$
m [AMU]	$1,492 \cdot 10^{10}$	$1,492 \cdot 10^{-3}$	$1,522 \cdot 10^{-11}$	$3,565 \cdot 10^{11}$	$9,315 \cdot 10^8$	$1,081 \cdot 10^{13}$	$2,147 \cdot 10^{10}$	$2,252 \cdot 10^{25}$	$1,331 \cdot 10^{-15}$	1

Contoh penggunaan:

Jika satu satuan massa atom (SMA) meluruh, dapat terjadi sebuah foton dengan frekuensi $2,252 \cdot 10^{23}$ Hz λ atau $= 1,331 \cdot 10^{-15}$ m; energi ini sesuai dengan $T = 1,081 \cdot 10^{13}$ K atau sekitar $2,147 \cdot 10^{23}$ kcal/mol.

Pada temperatur 11600 K sebuah partikel kira-kira akan mempunyai energi sebesar 1 eV, sebuah foton kira-kira bernergi $2 \cdot 10^{14}$ Hz dan $\lambda \approx 10^{-6}$ m = 1000 Å. Sebuah foton dengan $\lambda = 1 \text{ Å} = 10^{-10}$ m mempunyai energi 12400 eV sesuai dengan $1,49 \cdot 10^8$ K dan $1,331 \cdot 10^{-15}$ SMA (dalam hal ini digunakan rumusan $E = hc/\lambda$ karena cukup untuk membagi besaran konstanta hc dengan λ).

Konstanta-konstanta Penting

Nama	Lihat	Simbol	Besar
Konstanta Gravitasi	\$ 1.7.1	\$ G	\$ (6,673 \pm 3) \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2\text{kg}^{-2}
Konstanta AVOGADRO	\$ 5.2.1	\$ L	\$ (6,02241 \pm 4) \cdot 10^{23} \text{ Mol}^{-1}
Volume Mol (standard)	\$ 5.2.1	\$ V_{\text{mol}}	\$ (0,0224136 \pm 4) \text{ m}^3\text{Mol}^{-1}
Konstanta BOLTZMANN	\$ 5.2.1	\$ k	\$ (1,38062 \pm 6) \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}
Konstanta Gas	\$ 5.1.7	\$ R = kL	\$ (8,3142 \pm 3) \text{ JK}^{-1} \text{ Mol}^{-1}
Kecepatan cahaya di vakuum	\$ 9.3.1	\$ c	\$ (2,997925 \pm 1) \cdot 10^8 \text{ m det}^{-1}
Konstanta permittivitas (vakuum)	\$ 6.1.1	\$ \epsilon_0	\$ 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ A det V}^{-1}\text{m}^{-1}
Konstanta permeabilitas magnetik (vakuum)	\$ 7.2.3	\$ \mu_0 = 1/\epsilon_0 c^2	\$ 1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ V}^{-1}\text{A}^{-1}
Muatan Elementer	\$ 6.1.2	\$ e	\$ (1,6022192 \pm 1) \cdot 10^{-27} \text{ kg}
Konstanta FARADAY	\$ 6.4.3	\$ F = eL	\$ (9,64867 \pm 5) \cdot 10^4 \text{ C Mol}^{-1}
Massa diam Proton	\$ 13.1.3	\$ m_p	\$ (1,67261 \pm 1) \cdot 10^{-27} \text{ kg}
Massa diam Neutron	\$ 13.4.2	\$ m_n	\$ 1,67482 \cdot 10^{-27} \text{ kg}
Massa diam Elektron	\$ 6.1.2	\$ m_e	\$ (9,10956 \pm 5) \cdot 10^{-31} \text{ kg}
Muatan spesifik Elektron	\$ 6.1.2	\$ e/m_e	\$ (1,758803 \pm 5) \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}
Energi diam Elektron	\$ 12.5.8	\$ m_e c^2	\$ 0,51100 \text{ MeV}
Pertandingan massa Proton/elektron	\$ 13.1.3	\$ m_p/m_e	\$ 1836,10
Satuan massa atom	\$ 13.1.3	\$ m(\text{C}^{12})	\$ 166055 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 931,48 \text{ MeV}
Konstanta PLANCK	\$ 8.1.2	\$ h	\$ (6,62062 \pm 5) \cdot 10^{-34} \text{ J det}
Konstanta STEEAN-BOLTZMANN	\$ 11.2.8	\$ h = h/2\pi	\$ 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ J det}
Jari-jari BOHR	\$ 12.3.4	\$ r_1 = 2\pi^2 k^4 / 15 c^2 h^3	\$ (5,6696 \pm 10) \cdot 10^{-8} \text{ m}
Konstanta RYDBERG	\$ 12.3.3	\$ R_{\infty} = 4\pi e^2 / 15 m_e c^2	\$ 0,529166 \cdot 10^{-10} \text{ m}
Parang gelombang COMPTON	\$ 12.1.3	\$ \lambda_c = h/m_e c	\$ (2,4263 \pm 3) \cdot 10^{-12} \text{ m}
untuk elektron			
Magneton BOHR	\$ 12.7.1	\$ \mu_B = e h e / 2 m_e	\$ 1,1654 \cdot 10^{-29} \text{ V det m}