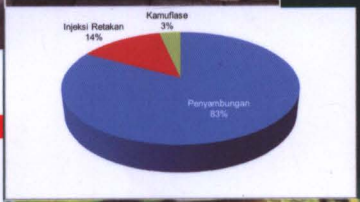
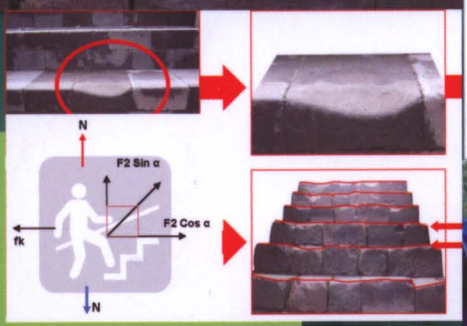
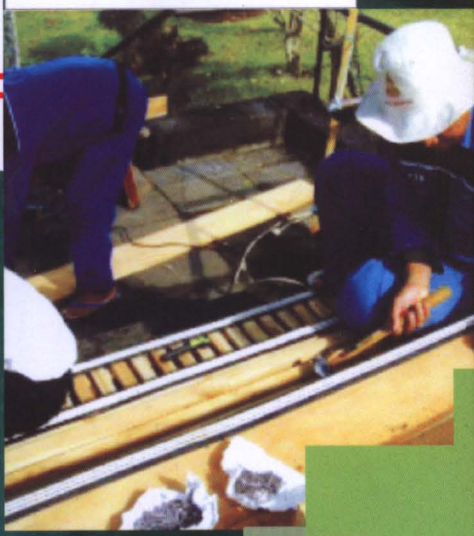
HASIL KAJIAN
BALAI KONSERVASI BOROBUDUR







Balai Konservasi Borobudur
Direktorat Jenderal Kebudayaan
Kementerian Pendidikan
dan Kebudayaan

HASIL KAJIAN
BALAI KONSERVASI BOROBUDUR

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
DIREKTUR JENDERAL KEBUDAYAAN
Balai Konservasi Borobudur

REDAKSI

Pengarah :
Drs. Marsis Sutopo, M.

Penanggung Jawab :
Iskandar Mulia Siregar, S.Si

Editor :
Prof. Dr. Inajati Adrisijanti
Prof. Dr. Pranowo, M.Pd
Agus Hendratno, M.T

Redaktur :
Iskandar M. Siregar, S.Si
Winda Diah Puspita Rini, S.S
Henny Kusumawati, S.S
Ahmad Mudzakir, A.Md

Desain Grafis :
Ihwan Nurais

Diterbitkan Oleh :
BALAI KONSERVASI BOROBUDUR
DIREKTUR JENDERAL KEBUDAYAAN
KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
Jl. Badrawati Borobudur Magelang Jawa Tengah Indonesia 56553
Telp. : (0293) 788175, 788225
Fax. : (0293) 788367
Email : balai@konservasiborobudur.org
konservasiborobudur@yahoo.com
Website : www.konservasiborobudur.org/bkborobudur
Cetakan I: 2015
ISBN: 978-602-17306-9-0

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena dengan rahmat, karunia, serta taufik dan hidayah-Nya penerbitan Buku Hasil Kajian ini dapat terselesaikan. Penerbitan buku ini merupakan salah satu sarana penyebaran informasi kepada masyarakat mengenai hasil-hasil kajian Cagar Budaya. Hal ini selaras dengan fungsi Balai Konservasi Borobudur yang salah satunya melaksanakan kajian konservasi terhadap aspek teknik sipil, arsitektur, geologi, biologi, kimia, dan arkeologi Candi Borobudur dan cagar budaya lainnya.

Buku ini merupakan kompilasi hasil kajian yang telah dilakukan Balai Konservasi Borobudur tahun 2013. Buku ini berisi 8 laporan hasil kajian yaitu: Evaluasi Penggunaan *Epoxy Resin* Pada Candi Borobudur, Kajian Perbaikan Tangga Candi Borobudur, Pengaruh Sampah Terhadap Pelapukan Batu Candi Borobudur, Efektivitas EDTA Dalam Membersihkan Lapisan Kerak Pada Cagar Budaya Berbahan Batu, Karakteristik Batu Penyusun Candi Borobudur, dan Kajian Struktur Permukaan Halaman Candi Borobudur Dan Korelasinya Dengan Keausan Batu Tangga.

Terimakasih kami ucapkan kepada Kepala Balai Konservasi Borobudur yang telah memberikan kepercayaan kepada Tim Redaksi untuk menyusun buku ini. Terima kasih juga kami ucapkan kepada para penulis dan semua pihak yang telah berkontribusi membantu dalam penyelesaian buku ini. Kami sadar buku ini masih jauh dari sempurna, untuk itu kritik dan saran terhadap penyempurnaan buku ini sangat kami harapkan. Semoga buku ini dapat memberi manfaat bagi semua pihak yang membutuhkan.

Magelang, November 2015

Tim Redaksi

DAFTAR ISI

Redaksi ii

Kata Pengantar iii

EVALUASI PENGGUNAAN *EPOXY RESIN*
PADA CANDI BOROBUDUR

oleh: Rony Muhammad, Nahar Cahyandaru, Heri Yulianto... 1

A. Pendahuluan 3

B. Tinjauan Pustaka 6

C. Metodologi Penelitian 14

D. Hasil Penelitian Dan Pembahasan 15

E. Pembahasan 22

G. Penutup 27

Daftar Pustaka 28

KAJIAN PERBAIKAN TANGGA CANDI BOROBUDUR
(PEMBUATAN MODEL PELAPIS BATU PIJAK
PADA TANGGA CANDI)

oleh: Hari Setyawan, Joni Setiyawan, Arif Gunawan 29

A. Pendahuluan 30

B. Tinjauan Pustaka 33

C. Alternatif Penyelesaian Masalah 40

D. Penutup 50

Daftar Pustaka 52

PENGARUH SAMPAH TERHADAP PELAPUKAN
BATU CANDI BOROBUDUR

oleh: Ari Swastikawati, Al. Santoso, Riyanto P. Lambang 53

A. Pendahuluan 55

B. Tinjauan Pustaka 57

C. Metode Penelitian 63

D. Hasil Dan Pembahasan 68

E. Kesimpulan Dan Saran 83
Daftar Pustaka 85
EFEKTIVITAS EDTA DALAM MEMBERSIHKAN
LAPISAN KERAK PADA CAGAR BUDAYA BERBAHAN BATU
oleh: Ari Swastikawati, Fr. Dian Ekarini, Sri Wahyuni, A.md 87
A. Pendahuluan 89
B. Metode Penelitian 92
C. Hasil Analisis Dan Pembahasan 94
D. Penutup 108
Lampiran 111
KARAKTERISTIK BATU PENYUSUN CANDI BOROBUDUR
oleh: Leliek Agung H, Rony M, Al. W. Purwoko 119
A. Pendahuluan 121
B. Tinjauan Pustaka 122
C. Metode Penelitian 123
D. Hasil Penelitian Dan Pembahasan 123
E. Penutup 139
KAJIAN STRUKTUR PERMUKAAN HALAMAN
CANDI BOROBUDUR DAN KORELASINYA DENGAN
KEAUSAN BATU TANGGA
oleh: Brahmantara, Muhsidi, Wahyudi 143
A. Pendahuluan 145
B. Tinjauan Pustaka 147
C. Landasan Teori 149
D. Metodologi Penelitian 151
E. Hasil Dan Pembahasan 155
F. Penutup 170
Daftar Pustaka 172

EVALUASI PENGGUNAAN *EPOXY RESIN* PADA CANDI BOROBUDUR

Rony Muhammad, Nahar Cahyandaru, Heri Yulianto

Abstract

Borobudur has undergone restoration twice, the second restoration by the Indonesian government in cooperation with UNESCO in 1973-1983 became popular use of several types of chemical one epoxy resin which serves as an adhesive such as Euroland, Davis Fuller, Araldit AW, and a waterproof material Araldite Tar. After all this time there is a concern the negative impact appearing against temple stones. After doing the logging application types of epoxy resin the result were 704 applications epoxy on the walls of the temple, Buddhist statues, gargoyles, and the main stupa. Of 704 applications, 585 applications were for grafting, 95 applications are injection cracks, and 24 applications are camouflage. From a number of the application 658 was applied to the walls of the temple, 15 applications at the main stupa, 12 applications at the statue of Buddha, and 19 applications in the gargoyles. Of the 672 applications a number of epoxy in good condition physically, and physically damaged 32 applications. While the application of epoxy color changes there were 36 applications and 668 epoxy application is still in color. From some point of 704, 167 applications epoxy applications are salting especially on wet wall at the temple. While the epoxy 537 aplikasi point not found salting. The growth of micro-organismsin epoxy application location algae have 68 points and 61 points while there maining 575 Moss net point of micro-organisms.

The application of epoxy for connecting and injection of cracks Borobudur stone templeis very effective, it is evident by the number of stones still applicated with epoxy in good condition especially for the injection and grafting.

The things that in itially feared that the epoxy could be a rallying point of water can cause weathering proved to be very minimal. With 575 net point of micro-organisms and there are only 61 points there is moss and algae have 68 points. Moderate salting of 167 points having location that salting mainly running water, but not concrentated salting locations in epoxy application location but evenly on a wet wall. Even at a location nearby and there are very few applications salting. There may be other factors that become the main cause of this salting. It is necessary to study further.

Keyword:epoxy resin, application, impact

Abstrak

Candi Borobudur telah mengalami dua kali pemugaran, pada pemugaran kedua oleh pemerintah Indonesia bekerjasama dengan UNESCO pada tahun 1973-1983 mulai dikenal penggunaan beberapa jenis bahankimiayang berfungsi sebagai perekatepoxy resin seperti Euroland, Davis Fuller, Araldit AW,dan sebagai bahan kedap air digunakan Araldite Tar. Setelah sekian lama digunakan ada kekhawatiran bahan ini memberi dampak negatif terhadap batu-batu candi. Setelah melakukan pendataan jenis-jenis aplikasi *epoxy resin*,diperoleh hasil bahwa terdapat 704 titik penggunaan *epoxy resin*di Candi Borobudur. Dari 704 titik penggunaan tersebut, 585 titik penggunaan *epoxy resin* adalah untuk penyambungan batu yang pecah, 95 titik penggunaan *epoxy resin* adalah injeksi retakan pada batu, dan 24 titik penggunaan *epoxy resin* adalah kamuflase permukaan batu. Berdasarkan tempat aplikasinya diketahui bahwa 658titik penggunaan *epoxy resin* pada dinding candi, 15 titik penggunaan *epoxy resin* di stupa induk, 12 titik penggunaan *epoxy resin* di arca budha, dan 19 titik penggunaan *epoxy resin* di gargoyle.

Aplikasi *epoxy resin* untuk penyambungan, injeksi retakan, dan kamuflase dibatuCandi Borobudur sangat efektif. Dari 704 titik penggunaan *epoxy resin*, 672 ti-

tik penggunaan *epoxy resin* dalam kondisi baik secara fisik, dan yang rusak secara fisik 32 titik penggunaan *epoxy resin*. Dilihat dari perubahan warna yang terjadi, 668 titik penggunaan *epoxy resin* masih tidak berubah warnanya sedangkan36 titik penggunaan *epoxy resin* ditemukanmengalami perubahan warna. Dari sejumlah 704 titik penggunaan *epoxy resin*, 537 titik penggunaan *epoxy resin* tidak ditemukan penggaraman dan 167 titik penggunaan *epoxy resin* terdapat penggaraman terutama pada dinding candi yang basah. Sedangkan jika dilihat dari munculnya pertumbuhan mikroorganisme ditemukan sebanyak 575 titik penggunaan *epoxy resin* bersih dari mikoorganisme, 68 titik penggunaan *epoxy resin* terdapat pertumbuhan algae, dan 61 titik penggunaan *epoxy resin* terdapat pertumbuhan lumut/Moss.

Hal-hal yang dikhawatirkan semula bahwa epoxy dapat menjadi titik berkumpulnya air yang menjadi penyebab pelapukan terbukti sangat minim.

Kata Kunci: epoxy resin, aplikasi (penggunaan), dampak

A. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Sejak ditemukannya kembali Candi Borobudur, usaha-usaha perbaikan dan pemugaran dalam skala kecil dilakukan dan pembuatan gambar serta foto-foto. Pemugaran dalam skala yang agak besar pertama kali dilakukan oleh Theodore Van Erp pada tahun 1907 – 1911. Pemugaran pertama oleh Van Erp ini difokuskan pada stupa teras pada tingkat Arupadhatu. Pada tingkat dibawahnya hanya bagian-bagian tertentu yang dipugar denganmemperbaiki dinding-dinding lorong. Dinding lorong diperbaiki tanpa melakukan pembongkaran sehingga tetap terjadi kemiringan dinding. Lantai lorong diratakan dengan memberi penguatandengan cara menguruk dan memasang batu lantai dengan tatanan batu yang nat-natnya ditutup dengan mortar. Tujuan penutupan

dengan mortar adalah untuk meminimalkan infiltrasi air ke dalam struktur bangunan yang dapat menyebabkan tanah dasar candi tidak stabil.

Pemugaran pertama tersebut secara umum dapat mengembalikan kemegahan Candi Borobudur, namun hanya bersifat sementara. Pada tahun 1973-1983 dilakukan pemugaran II oleh pemerintah Indonesia dan UNESCO. Pemugaran yang kedua ini dilakukan pada tingkat rupadhatu karena bagian inilah terjadi kemelesakan dinding candi. Selain penanganan masalah struktural pada pemugaran kedua ini juga dilakukan penanganan material batu candi. Pekerjaan konservasi batu candi meliputi pembersihan dari mikroorganisme, pengawetan, konsolidasi, penyambungan batu, restoring, dan pekerjaan konservasi batu lainnya. Pada pemugaran tahap II ini mulai dikenal penggunaan bahan perekat *epoxy resin* untuk penyambungan material batu-candi yang patah maupun terbelah, serta untuk kamuflase permukaan batu yang rusak.

Setelah pemugaran tahap II selesai dan kemudian ditetapkan sebagai *World Culture Heritage* oleh komite warisan dunia (UNESCO) pada tahun 1991, pengelolaan dan pemeliharaan Candi Borobudur sebagai *world heritage* harus mengikuti aturan yang ditetapkan oleh UNESCO. Kegiatan pengelolaan dan pemeliharaan Candi Borobudur selalu dimonitor dan dievaluasi oleh komite warisan dunia UNESCO. Hasil dari monitoring dan evaluasi oleh komite warisan dunia UNESCO itu pada tahun 2009 khususnya point nomer 5 menyatakan *Also request the state party to* :

a. *Discontinue the practices that appaer to have a negative impact on the stone of the Borobudur temple*
b. *Continue monitoring research and testing activities to find subtitute for the epoxy resin.*

Pernyataan *State Conservation UNESCO* terhadap Candi Borobudur ini kemudian ditindak lanjuti dengan pelaksanaan kegiatan *Workshop* Evaluasi penggunaan *Epoxy resin* pada

tanggal 8 April 2010 di Balai Konservasi Peninggalan Borobudur yang merekomendasikan perlunya evaluasi penggunaan *epoxy resin* untuk konservasi benda cagar budaya dari batu. Atas dasar rekomendasi tersebut, tim kajian Balai Konservasi Peninggalan Borobudur melaksanakan kajian evaluasi penggunaan *epoxy resin* di Candi Borobudur.

2. Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari pelaksanaan studi ini adalah untuk mengetahui dan mengevaluasi dampak – dampak yang timbul dari penggunaan *epoxy resin* pada penanganan konservasi di Candi Borobudur. Sedangkan tujuan penelitian ini adalah untuk :

a. Mendeskripsikandampak dari penggunaan *epoxy resin* untuk konservasi Candi Borobudur.
b. Memperolehdata dan menentukan parameter kerusakan yang ditimbulkan oleh penggunaan *epoxy resin*.
c. Menemukan efektivitas penggunaan *epoxy resin* di Candi Borobudur.

3. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah dapat mengetahui efektifitas penggunaan *epoxy resin* dan dampak yang ditimbulkan yang bermanfaat untuk mengungkap lebih lanjut gejala pelapukan yang terjadi pada Candi Borobudur. Dengan diketahuinya efektifitas penggunaan *epoxy resin* dan dampak yang ditimbulkan dapat bermanfaat untuk memastikan adanya pengaruh penggunaan *epoxy resin* tersebut terhadap batu candi.

Saat ini pelapukan batu Candi Borobudur, terutama penggaraman (pelapukan) menuntut perhatian serius untuk segera ditangani karena populasinya yang tinggi. Hasil studi juga bermanfaat untuk memperkaya khasanah ilmu pengetahuan ten-

tang material bangunan yang bermanfaat untuk pelestarian BCB lainnya maupun bidang lain yang lebih luas.

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Candi Borobudur dan Riwayat Konservasinya

Penemuan kembali Borobudur dan usaha-usaha pelestariannya

Candi Borobuduradalahbangunan peninggalan sejarah berlatar belakang agama Buddha yang terbesar di Indonesia. Sampai sekarang belum pernah ditemukan sumber-sumber tertulis yang menyebutkan kapan Candi Borobudur dibangun, berapa lama Candi Borobudur dibangundan oleh raja siapa Candi Borobudur dibangun, sehingga secara pasti tidak dapat ditentukan usianya. Namun para ahli melakukan analisis berdasarkan paleografis terhadap tulisan pendek yang dipahatkan di atas relief Karmawibangga yaitu membandingkan tulisan atau goresan yang terdapat pada panel relief Karmawibangga dengan prasasti lain yang sudah pasti pertanggalannya, sehingga didapatkan jawaban bahwa Candi Borobudur didirikan pada sekitar abad VIII Masehi. Pada masa tersebut berkuasa raja-raja dari Wangsa Sailendra yang menganut agama Buddha Mahayana .

Sampai sekarang belum ada keterangan yang jelas mengenai berapa lama Candi Borobudur berfungsi sebagai tempat pemujaan sampai akhirnya ditemukan rusak tidak terpelihara. Pada umumnya candi-candi di Indonesia dianggap tidak berfungsi ketika rakyat memeluk agama Islam pada abad XV Masehi. Namun kemungkinan Candi Borobudur sudah tidak terpelihara lagi sejak abad X Masehi ketika pusat kegiatan berpindah dari Jawa Tengah ke Jawa Timur karena terjadinya letusan Gunung Merapi yang sangat kuat pada tahun 1006 Myang mengakibatkan candi-candi yang terdapat disekitarnya tertimbun oleh lahar dingin.

Candi Borobudur baru muncul kembali mengisi lembaran

sejarah Indonesia sejak tahun 1814 ketika Gubernur Jenderal Thomas S. Raffles menerima laporan ditemukannya reruntuhan bangunan batu di Desa Bumisegoro, Karesidenan Kedu. Setelah mendapatkan laporan tersebut, Raffles memerintahkan Cornelius untuk melakukan penelitianyang menemukan bukit yang dipenuhi batu-batu. Setelah dibersihkan,bukit tersebutmemperlihatkan sebuah reruntuhan bangunan candi yang sangat besar.

Dua puluh tahun kemudian, usaha Raffles tersebut dilanjutkan oleh Hartman yang menjadi Residen Kedu pada saat itu. Berkat usahanya, keindahan panorama di sekitar Candi Borobudur dapat dinikmati. Selain melakukan pembersihan, Hartman juga mengadakan penyelidikan terhadap stupa induk yang menjadi mahkota bangunannya. Sayangnya tidak ada laporan sama sekali mengenai hasil temuan di dalam stupa.

Untuk mengabadikan monumen tinggalan sejarah yang indah itu, maka tahun 1845 didatangkanlah seorang ahli fotografi bernama Schaefer untuk mengabadikan relief-relief Candi Borobudur. Tenyata hasil pemotretan yang dilakukan oleh Schaefer tersebut tidak memuaskan, hingga diputuskan untuk menggambar saja Candi Borobudur beserta relief-reliefnya. Tugas ini dipercayakan kepada Wilsen, seorang juru gambar Zeni Angkatan Darat. Dalam empat tahun, tugas itu dapat diselesaikan dengan pelbagai gambar bagian bangunan dan 476 lembar gambar reliefnya. Wilsen sendiri berusaha membuat risalah tentang Borobudur.Namun oleh pemerintah, tugas itu dipercayakan kepada Brumund. Terjadi kesalahpahaman antara pemerintah dengan Brumund ketika risalah tersebut akan diterbitkan. Brumund beranggapan bahwa uraiannya yang sudah siap diterbitkan akan dilengkapi dengan ilustrasi gambar-gambar yang dibuat oleh Wilsen. Sebaliknya, pemerintah berpendapat bahwa uraian dan gambaryang akan diterbitkan adalah hasil karya Wilsen, sedang uraian Brumund hanya diambil sebagian sebagai pelengkap. Oleh karena kesalahpahaman itu, membuat Brumund tidak setuju sehingga pemerintah memutuskan untuk menyerahkan kepada orang ketiga yaitu Leemans untuk diolah menjadi monografi yang

disempurnakan dengan gambar-gambar Wilsen. Akhirnya,pada tahun 1873 monografi pertama Borobudur diterbitkan.

Sampai saat terbitnya uraian Leemans itu, keadaan Candi Borobudur sudah mulai dilupakan orang. Pengelola yang diserahi tugas tidak menunjukkan minat menyelamatkan candi. Akhirnya pemerintah mendatangkan lagi fotografer yaitu Van Kinsbergen, dia diserahi mengabadikan Candi Borobudur selengkapnya. Foto-foto yang dihasilkan oleh Van Kinsbergen itu nantinya dimaksudkan untuk menggantikan lukisan tangan Wilsen.

Keadaan Candi Borobudur setelah terbitnya monografi yang ditulis oleh Leemans tidak semakin membaik, bahkan sebaliknya. Di beberapa tempat memperlihatkan gejala-gejala akan runtuh. Kondisi ini menimbulkan berbagai usulan untuk diambilnya suatu tindakan penyelamatan secara nyata. Dalam tahun 1882, diajukan sebuah usulan untuk membongkar seluruh bangunan candi dan memindahkan semua reliefnya ke dalam museum yang khusus untuk keperluan itu. Sebelum usulan itu dilaksanakan, pemerintah yang berkuasa pada saat itu menugaskan Groeneveld untuk melakukan penelitian terhadap kondisi Candi Borobudur. Hasilnya, kondisi Candi Borobudur tidak separah seperti yang dibayangkan.

Candi Borobudur semakin menarik perhatian ketika Yzerman dalam tahun 1885 mendapatkan kaki aslinya yang telah tertutup oleh kaki candi yang sekarang. Pada dinding kaki asli itu terdapat pahatan-pahatan relief yang tertutup bersama kaki aslinya. Tahun 1890 kaki tambahan itu dibongkar sebagian demi sebagian sehingga memungkinkan pemotretan relief-reliefnya dan kemudian ditutup kembali. Atas temuan itu dapat disimpulkan bahwa Candi Borobudur telah mengalami perombakan dari bentuk aslinya. Penemuan yang tidak terduga tersebut menyuburkan kembali semangat untuk menanggulangi setiap bahaya yang mengancam Candi Borobudur. Berita sangat mengejutkan ketika para ahli berusaha mencari cara untuk menyelamatkan Candi Borobudur dari keruntuhan. Pemerintah kolonial Hindia

Belanda yang berkuasa pada waktu itu memberikan hadiah kepada Raja Chulalongkorn dari Siam berupa 30 buah panel relief, 5 buah patung Buddha, 5 patung singa, sebuah pancuran makara, sejumlah kepala kala, serta sebuah arca penjaga dari bukit Dagi .

Pemugaran pertama Candi Borobudur

Pada tahun 1900 terbentuklah suatu panitia yang bertugas merencanakan penyelamatan Candi Borobudur. Gagasan seorang anggota panitia untuk melingkupi candi dengan sebuah kubah raksasa dari seng yang ditunjang oleh 40 buah batang tiang besi tidak mendapat sambutan. Demikian juga mengenai pemikiran lama untuk memindahkan relief-relief kemuseum juga tidak mendapat perhatian.

Setelah dua tahun bekerja, panitia sampai pada suatu kesimpulan bahwa ada tiga hal yang harus dilakukan untuk menyelamatkan Candi Borobdur;

1) Harus segera diusahakan penanggulangan bahaya runtuh yang sudah mendesak dengan cara memperkokoh sudut-sudut bangunannya, menegakkan kembali dinding-dinding yang miring pada tingkat pertama, memperbaiki gapura-gapura dan relung-relungnya, stupa-stupa teras, dan juga stupa induk.
2) Mempertahankan keadaan yang sudah diperbaiki itu dengan cara mengadakan pengawasan yang ketat dan pemeliharaan yang tepat, dan menyempurnakan penyaluran air dengan jalan memperbaiki lantai-lantai lorong dan pancuran-pancurannya.
3) Menampakkan candinya dalam keadaan bersih dan utuh, maka batu-batu yang lepas harus disingkirkan semua, kaki candi harus ditampakkan seluruhnya dengan membuang tanah yang masih menutupinya, dan membongkar semua bangunan-bangunan tambahan.

Pekerjaan pemugaran besar dilakukan pada tahun 1907-1911 yang dipimpin oleh Theodore van Erp. Pemugaran besar ini secara garis besar meliputi pekerjaan sebagai berikut: :

a) Pembenahan stupa induk dan stupa teras (bagian Arupadhatu)

Pembenahan bagian Arupadhatu pada pemugaran van Erp ini merupakan bagian penting dari pemugaran. Batu-batu stupa teras yang berserakan dapat disusun kembali dan stupa induk juga dapat dibentuk kembali secara utuh. Hal menarik dalam penyusunan kembali stupa ini adalah dipasangnya catra pada puncak stupa induk. Lantai dasar teras juga mendapat perhatian penting dengan penyusunan kembali secara rapi. Lantai teras tersebut selanjutnya ditutup nat-natnya dengan mortar untuk meminimalkan penetrasi air ke dalam struktur candi.

b) Pembenahan dinding-dinding lorong dan pagar langkan (bagian Rupadhatu)

Pembenahan bagian Rupadhatu bersifat parsial karena tidak membongkar susunan batu-batunya. Dinding lorong dan pagar langkan yang miring dibiarkan tetap miring. Pada beberapa tempat dipasang kayu penyangga dan pagar langkan yang dipindahkan dari posisi aslinya untuk mengurangi beban. Van Erp menyadari sepenuhnya bahwa kemiringan-kemiringan yang terjadi terutama disebabkan air yang masuk ke dalam struktur bukit sehingga tanah dasarnya menjadi tidak stabil. Dengan kondisi seperti itu, berbagai upaya dilakukan untuk meminimalisasi penetrasi air. Cara yang paling menonjol adalah pemasangan mortar pada sela-sela batu (nat) pada hampir semua lantai. Demikian juga pada bagian Rupadhatu ini, lantai lorong yang tidak rata diratakan dengan tanah uruk dan lapisan batu-batu yang natnya berlubang, diisi dengan mortar.

c) Pembenahan selasar

Pembenahan selasar dilakukan dengan menyusun kembali batu-batu yang berserakan dan memasangnya kembali dengan rapi. Nat-nat batu yang cukup lebar pada bagian ini juga ditutup dengan mortar.

Sampai dengan saat ini hasil pemugaran van Erp pada bagian Arupadhatu dan selasar masih menunjukkan hasil yang membanggakan. Bagian teras stupa masih tetap stabil dan hanya mendapatkan sedikit perbaikan pada pemugaran kedua. Demikian pula bagian selasar yang tidak banyak diperbaiki pada pemugaran kedua masih terlihat cukup baik, hanya beberapa bagian yang menunjukkan adanya deformasi. Sedangkan bagian Rupadhatu yang tidak dibenahi secara total mengalami kerusakan lebih lanjut, dan telah disempurnakan kembali pada pemugaran kedua.

Pemugaran kedua Candi Borobudur

Pemugaran kedua dianggap perlu karena Borobudur mengalami permasalahan sirius karena kemiringan dinding lorong yang semakin membahayakan. Pemugaran pertama oleh van Erp tidak membongkar bagian Rupadhatu, melainkan hanya membenahi dan meratakan lantai. Kemiringan dinding dan langkan pada dasarnya telah terjadi pada saat penemuan kembali Borobudur dan belum diperbaiki. Kemiringan terutama terjadi karena tanah dasar yang tidak stabil karena terlalu banyak infiltrasi air yang masuk. Pada musim penghujan bahkan air dapat mengucur keluar dari sela-sela batu dinding, sehingga sebagian tanah akan terbawa keluar. Terlalu banyaknya air yang masuk menyebabkan tanah menjadi lembek dan sebagian terbawa keluar sehingga dasar dinding tidak mampu menahan beban.

Pemugaran kedua difokuskan pada penanganan bagian Rupadhatu. Pembongkaran total dilakukan untuk membersihkan batu-batu, dan memasang struktur penguat sebagai dasar

dinding lorong. Secara garis besar, pemugaran kedua meliputi pekerjaan-pekerjaan sebagai berikut:

1. Pembongkaran total dinding lorong dan pagar langkan hingga dasar lantai. Batu-batu yang dibongkar ditandai terlebih dahulu dan ditempatkan pada palet yang diregistrasi agar dapat dikembalikan ke tempat semula dengan tepat.
2. Batu-batu yang telah dibongkar dibawa ke workshop untuk dikonservasi. Konservasi meliputi pembersihan, perbaikan (injeksi retakan/penyambungan yang pecah), dan *treatment* dengan bahan kimia.
3. Pada bagian yang telah dibongkar dipersiapkan lantai kerja untuk pembuatan lapisan beton bertulang. Selanjutnya beton bertulang ditempatkan pada lantai kerja ini sesuai tahapan konstruksi beton bertulang. Lapisan beton bertulang nantinya juga akan berfungsi sebagai drainase, sehingga perlu dibuat saluran-saluran drainase antarlantai.
4. Setelah beton terpasang, batu-batu yang dibongkar dipasang kembali ke tempat semula. Pada saat pemasangan kembali ini juga dipasang lapisan kedap air dibelakang batu-batu kulit (relief) yang disebut sebagai layer B. Pada bagian bawah dan atas dinding dipasang lapisan timbal (*Lead*) yang terutama berfungsi untuk meratakanbeban dan meminimalkan retakan akibat permukaan batu yang tidak rata.
5. Pada bagian lantai dipasang dua lapis batu diatas lapisan beton. Bagian bawah dipasang dengan sela yang cukup untuk aliran air, dan bagian atas rapat sekaligus sebagai lantai lorong.

Pemugaran kedua ini telah mampu menghasilkan struktur dinding lorong dan langkan yang kokoh. Lapisan beton bertulang dapat berfungsi sebagaimana mestinya untuk menahan beban

susunan batu candi yang sangat berat. Sehingga dari segi stabilitas struktur dapat dikatakan telah dapat terselesaikan.

Permasalahan berikutnya yang masih dihadapi oleh Candi Borobudur adalah masih terjadinya pelapukan. Pelapukan yang paling dominan dan terus terjadi adalah penggaraman (*efflorescene*). Penggaraman telah terjadi sebelum pemugaran kedua, dan hingga saat ini masih terjadi. Berbagai faktor terus dikaji untuk mencari penanganan terbaik dan komprehensip untuk menghentikan proses terjadinya dan membersihkan endapan yang telah timbul.

2. *Epoxy resin* dan Aplikasinya pada Bangunan Bersejarah

Dengan ditemukannya *epoxy resin* sebagai hasil rekayasa ilmu dan teknologi telah memberi alternatif lain dalam konservasi benda cagar budaya khususnya batu. *Epoxy resin* yang berfungsi sebagai bahan perekatmempunyai banyak sekali kegunaan dalam penanganan cagar budaya, misalnya untuk penyambungan benda yang patah, injeksi retakan/lubang,dan juga untuk restorasi arca atau artefak-artefak lainnya.

Epoxy adalah *kopolimer*, yaitu terbentuk dari dua bahan kimia yang berbeda. Ini disebut sebagai resin. Pengeras resin-terdiri atas monomer atau polimer rantai pendek dengan kelompok epoksida di kedua ujung. *Epoxy resin* umum diproduksi dari reaksi antara epiklorohidrin dan bisphenol-A, meskipun yang terakhir ini mungkin akan digantikan dengan bahan kimia yang serupa.Pengeras terdiri atas monomer polyamine, misalnya Triethylenetetramine (Teta). Ketika senyawa ini diramu, kelompok amina bereaksi dengan gugus epoksida untuk membentuk ikatan kovalen. Setiap kelompok NH dapat bereaksi dengan grup epoksida, sehingga polimer yang dihasilkan sangat silang sehinggakaku dan kuat.

Upaya komersial pertama untuk menyiapkan resin dari epiklorohidrin dibuat pada tahun 1927 di Amerika Serikat. Kredit untuk sintesis pertama dari A-*epoxy resin* berbasis bisphe-

nol-dibagi oleh Dr.Pierre Castan dari Swiss dan Dr.SO Greenlee Amerika Serikat pada tahun 1936. Castan pekerjaan Dr. ini dilisensikan oleh Ciba , Ltd dari Swiss, yang kemudian menjadi salah satu dari tiga produsen *epoxy resin* utama di seluruh dunia. *Epoxy* Ciba bisnis itu berhenti dan kemudian dijual pada akhir 1990-an dan sekarang menjadi unit usaha dari Huntsman Corporation dari Amerika Serikat.Karya Dr. Greenlee adalah untuk perusahaan dari Devoe-Reynolds dari Amerika Serikat. Devoe-Reynolds yang aktif pada hari-hari awal industri resin epoxy, dijual kepada Shell Chemical (sekarang Hexion, sebelumnya Resolusi Polimer dan lain-lain).

C. METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian yang dilaksanakan dalam kegiatan ini adalah studi literatur atau studi pustaka, pengamatan dan pencatatan langsung di lapangan terhadap obyek yang dikaji. Sebagai langkah persiapan beberapa keperluan penelitian dipersiapkan sebagai berikut.

1. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

- Alat tulis dan alat gambar
- Bahan penunjang lainnya

2. Alat

Peralatan yang dipergunakan adalah sebagai berikut:

- Alat ukur (meteran/penggaris)
- Kamera
- Alat-alat lain yang relevan

3. Cara Kerja Penelitian

Dalam studi Evaluasi Penggunaan *Epoxy resin* pada Candi Borobudur, tim kajian melakukan langkah-langkah sebagai berikut :

a. Penelusuran literatur, dokumen pemugaran, dan catatan

pemeliharaan untuk melakukan identifikasi dan mengumpulkan data penggunaan *epoxy*, jenis-jenis *epoxy* dan lokasi penggunaan *epoxy*. Selain itu peneliti juga melakukan penelusuran melalui internet yang berkaitan dengan hal-hal yang dikaji.

b. Observasi lapangan bertujuan untuk melihat langsung penggunaan *epoxy resin* pada batu candi sesuai data penggunaan *epoxy resin* pada konservasi batu di Candi Borobudur. Penggunaan (aplikasi) yang dipakai diidentifikasi kemudian dilihat dampak-dampak yang ditimbulkan terhadap batu-batu candi. Pengamatan dilakukan pada bagian dinding candi, gargoyle (makara), dinding stupa induk, dan arca Buddha di langkan. Dampak yang ada dicatat baik itu perubahan fisik batu, perubahan warna,timbulnya penggaraman maupuntumbuhnya mikro organisme. Dari data tersebut kemudian dianalisis mengenai dampak penggunaan *epoxy resin*.

D. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Pengamatan

Candi Borobudur dalam sejarahnya telah dipugar dua kali yaitu pada masa kolonial (selesai tahun 1911) yang dipimpin oleh Theodore van Erp dan pemugaran kedua oleh pemerintah Indonesia dan UNESCO (pada tahun 1973 – 1983). Pada pemugaran kedua, teknologi konservasi memperkenalkan *epoxy resin* sebagai salah satu bahan konservan untuk batu-batu Candi Borobudur.

Setelah sekian lama dipakai baru diketahui bahwa epoxy resin dapat mempercepat kerusakan cagar budaya. Hal ini disebabkan sifat dari bahan *epoxy* ini yang kedap air, sehingga air dari luar baik itu air hujan maupun air dari kelembaban udara tertahan dan terakumulasi dibagian yang tertutup *epoxy resin* sehingga menimbulkan efek lain terhadap cagar budaya, misalnya tumbuh-

nya mikroorganismedan penggaraman sehingga mengakibatkan material cagar budaya menjadi rapuh dan rusak.

Dari pengamatan yang sudah dilakukan, berikut tabel penggunan *epoxy resin* untuk konservasi batu dan pengaruh yang ditimbulkan:

Tabel 1.1 Penggunaan *Epoxy resin* pada stupa induk

No	Lokasi / Kuadran	Identifikasi			Kondisi Fisik		Warna		Peng-garaman		Mikro-biologi	
		PY	IR	KM	B	TB	T	B	A	TA	Al	MS
1	Yasti	4			4			4	4		4	
2	Lis Ojief	6				6	6		6		6	
3	Dinding		5		5			5		5	5	5
	Jumlah	10	5	-	9	6	6	9	10	5	15	5

Keterangan :

PY	: Penyambungan	B	: Baik	A	: Ada
IR	: Injeksi Retakan	TB	: Tidak Baik	TA	: Tidak Ada
KM	: Kamuflase	T	: Tetap	AL	: Algae
		B	: Berubah	MS	: Moss/Lumut

Tabel 1.2 Penggunaan *epoxy resin* pada dinding tingkat I

No	Lokasi / Kuadran	Identifikasi			Kondisi Fisik		Warna		Penggaram-an		Mikrobiologi	
		PY	IR	KM	B	TB	T	B	A	TA	AI	MS
1	Barat/I/a	3			3			3	3			
2	Barat/I/c		1		1			1	1			
3	Barat/I/c	5			5			5	5			
4	Barat/I/e	1			1			1	1			
5	Utara/I/a	2				2		2	2			
6	Utara/I/a			2		2		2	2			
7	Utara/I/c		1			1		1	1		1	
8	Utara/I/c		1		1			1	1			
9	Utara/I/f		1		1			1	1			
10	Timur/I/a		1		1			1		1		
11	Timur/I/a			1	1			1		1		
12	Timur/I/c		1		1			1		1		
13	Timur/I/c			3	3			3		3		
14	Timur/I/h			2	2			2	2			
15	Timur/I/j			1	1			1	1			
16	Selatan/I/a			3	3			3	3			
17	Selatan/I/d			1	1			1	1			
18	Selatan/I/e		1		1			1	1			
19	Selatan/I/e			1	1			1		1		
20												
	Jumlah	11	7	14	27	5	-	32	25	7	1	-

Keterangan :

PY	: Penyambungan	B	: Baik	A	: Ada
IR	: Injeksi Retakan	TB	: Tidak Baik	TA	: Tidak Ada
KM	: Kamuflase	T	: Tetap	AL	: Algae
		B	: Berubah	MS	: Moss/Lumut

Tabel 1.3 Penggunaan *epoxy resin* pada dinding tingkat II

No	Lokasi / Kuadran	Identifikasi			Kondisi Fisik		Warna		Penggaraman		Mikrobiologi	
		PY	IR	KM	B	TB	T	B	A	TA	Al	MS
1	Barat/II/a	10			10		10			10		
2	Barat/II/b	7			7		7			7		
3	Barat/II/c	15			15		15			15		1
4	Barat/II/d	3			3		3			3		2
5	Barat/II/e	5			5		5			5		
6	Barat/II/f	3			3		3			3		
7	Barat/II/g	5			5		5			5		1
8	Barat/II/h	35			35		35			35		1
9	Barat/II/i	9			9		9			9		
10	Barat/II/j	12			12		12			12		
11	Selatan/II/a	15		2	17		17		6	11		1
12	Selatan/II/b	7	2	1	10		10		2	8		
13	Selatan/II/c	45			45		45		16	29	1	2
14	Selatan/II/d	1			1		1			1		
15	Selatan/II/e	3	1		4		4			4		
16	Selatan/II/f	4		1	5		5		1	4		
17	Selatan/II/g	1			1		1		1	0		
18	Selatan/II/h	6			6		6			6		1
19	Selatan/II/i	11		1	12		12			12	2	3
20	Selatan/II/j	19	1		20		20		6	14	4	4
21	Timur/II/a	11		1	12		12		2	10		1
22	Timur/II/b	5			5		5			5		1
23	Timur/II/c	13			13		13		2	11	1	
24	Timur/II/d	5			5		5		2	3		
25	Timur/II/e	5		1	6		6		2	4		
26	Timur/II/f	1			1		1			1		2
27	Timur/II/g	8			8		8			8		
28	Timur/II/h	18			18		18		1	17		
29	Timur/II/i	5			5		5		3	2	3	
30	Timur/II/j	21			21		21			21		
31	Utara/II/a	9			9		9			9	2	
32	Utara/II/b	10			10		10		3	7	2	3
33	Utara/II/c	34	1	1	36		36		5	31		2
34	Utara/II/d	9			9		9		3	6		
35	Utara/II/e	9			9		9		4	5		1
36	Utara/II/f	17			17		17		7	10		
37	Utara/II/g	12			12		12		8	4		
38	Utara/II/h	20	1		21		21			21	3	
39	Utara/II/i	7			7		7		1	6		1
40	Utara/II/j	20	2		22		22		10	212		3
	Jumlah	455	8	8	471	-	471	-	85	386	18	30

Tabel 1.4 Penggunaan *epoxy resin* pada dinding tingkat III

No	Lokasi / Kuadran	Identifikasi			Kondisi Fisik		Warna		Penggaraman		Mikrobiologi	
		PY	IR	KM	B	TB	T	B	A	TA	AI	MS
1	Barat/III/a		4		4		4		4			
2	Barat/III/c			1	1			1	1			
3	Barat/III/c		5		5		5			5		
4	Barat/III/h		2		2		2			2		
5	Barat/III/i		2		2		2			2		
6	Barat/III/j		4		4		4		4			
7	Utara/III/a			1	1		1		1			
8	Utara/III/b	2			2		2		2			
9	Utara/III/c	1			1		1		1			
10	Utara/III/h	2				2	2		2			2
11	Utara/III/i		1		1		1		1		1	
12	Utara/III/j	3			3		3		3			
13	Timur/III/a	2			2		2		2			2
14	Timur/III/b	1			1		1		1			
15	Timur/III/c	2			2		2		2		2	
16	Timur/III/h	1	1		1	1	2			2		
17	Timur/III/j	1	2		3		3			3		
18	Selatan/III/b		1			1		1	1			
19	Selatan/III/c	1			1		1		1			
20	Selatan/III/d	1				1	1		1		1	
21	Selatan/III/h	1				1	1			1		1
22	Selatan/III/j		1			1	1		1			1
	Jumlah	18	23	2	36	7	41	2	28	15	4	6

Keterangan :

PY : Penyambungan
IR : Injeksi Retakan
KM : Kamuflase

B : Baik
TB : Tidak Baik
T : Tetap
B : Berubah

A : Ada
TA : Tidak Ada
AL : Algae
MS : Moss/Lumut

Tabel 1.5 Penggunaan *epoxy resin* pada dinding tingkat IV

No	Lokasi / Kuadran	identifikasi			Kondisi Fisik		Warna		Penggaraman		Mikro-biologi	
		PY	IR	KM	B	TB	T	B	A	TA	Al	MS
1	Timur/IV/a	2	3		5			5	5			
2	Timur/IV/b		4		4			4		4		
3	Timur/IV/c	2			2			2	2		2	
4	Timur/IV/d		3		3			3		3		
5	Timur/IV/e	3	4		3	4		7	2	5		
6	Timur/IV/f	5			5			5		5	5	
7	Utara/IV/a	4	2		6		6			6		
8	Utara/IV/b	6			6		6		2	4		1
9	Utara/IV/c	3	5		8		8		3	5	2	
10	Utara/IV/d		3		3		3			3		
11	Utara/IV/e	6			6		6		1	5		3
12	Utara/IV/f		4		0	4	2	2		4		
13	Barat/IV/a	3			3		3			3	1	
14	Barat/IV/b	1			1		1			1		1
15	Barat/IV/c	4	3		7		7		2	5		
16	Barat/IV/d		2		2		2		1	1		
17	Barat/IV/e	5	3		8		8			8	2	1
18	Barat/IV/f	2			2		2			2		
19	Selatan/IV/a		4		4		4			4		
20	Selatan/IV/b	6			5	1	6			6		2
21	Selatan/IV/c		5		5		5			5	1	3
22	Selatan/IV/d	5	2		7		7			7	3	
23	Selatan/IV/e	3	3		6		6			6	2	1
24	Selatan/IV/f		2		2		2			2		
	Jumlah	60	52	-	103	9	84	18	18	94	18	12

Keterangan :

PY : Penyambungan
IR : Injeksi Retakan
KM : Kamuflase

B : Baik
TB : Tidak Baik
T : Tetap
B : Berubah

A : Ada
TA : Tidak Ada
AL : Algae
MS : Moss/Lumut

Tabel 1.6 Penggunaan *epoxy resin* dilokasi patung Buddha (pagar langkan)

No	Lokasi / Kuadran	Identifikasi			Kondisi Fisik		Warna		Penggaraman		Mikrobiologi	
		PY	IR	KM	B	TB	T	B	A	TA	Al	MS
1	Barat/II/d	1			1		1			1		
2	Barat/II/h	1			1		1			1		
3	Utara/II/a	1				1	1			1		1
4	Utara/II/a	1			1		1			1	1	
5	Utara/II/a	1				1	1			1		
6	Timur/II/e	2				2	2			2		
7	Utara/III/c	1			1		1			1	1	
8	Utara/III/j	1			1		1			1		
9	Selatan/III/h	1			1		1			1	1	
10	Barat/III/c	1			1		1			1		
11	Utara/V/a	1			1		1			1		
	Jumlah	12	0	0	8	4	12	0	0	12	3	1

Keterangan :

PY	: Penyambungan	B	: Baik	A	: Ada
IR	: Injeksi Retakan	TB	: Tidak Baik	TA	: Tidak Ada
KM	: Kamuflase	T	: Tetap	AL	: Algae
		B	: Berubah	MS	: Moss/Lumut

Tabel 1.7 Penggunaan *epoxy resin* pada Jaladwara

No	Lokasi / Kuadran	Identifikasi			Kondisi Fisik		Warna		Penggaraman		Mikrobiologi	
		PY	IR	KM	B	TB	T	B	A	TA	Al	MS
1	Barat/I/f	1			1		1			1	1	1
2	Barat/I/h	1			1		1			1	1	
3	Barat/I/j	1			1		1		1	0	1	1
4	Utara/I/f	1			1		1			1	1	
5	Utara/I/j	1				1	1			1	1	1
6	Selatan/I/e	1			1		1			1		1
7	Utara/II/a	1			1		1			1		
8	Utara/II/j	1			1		1			1	1	1
9	Barat/III/h	1			1		1			1		
10	Utara/III/b	1			1		1			1		
11	Utara/III/h	1			1		1			1		
12	Barat/IV/b	1			1		1			1		
13	Barat/IV/d	1			1		1			1	1	
14	Barat/IV/e	1			1		1			1	1	
15	Selatan/IV/c	1			1		1			1	1	
16	Utara/IV/c	1			1		1			1		1
17	Utara/IV/f	2			2		2			2		
18	Timur/IV/i	1			1		1			1		1
	Jumlah	19	0	0	18	1	19	0	1	18	9	7

Keterangan :

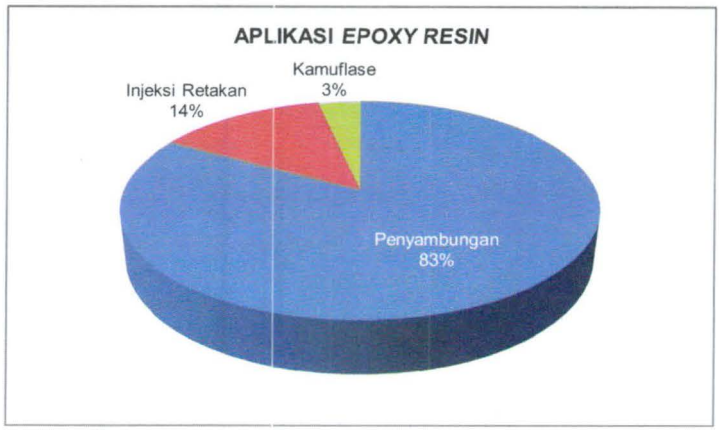
PY	: Penyambungan	B	: Baik	A	: Ada
IR	: Injeksi Retakan	TB	: Tidak Baik	TA	: Tidak Ada
KM	: Kamuflase	T	: Tetap	AL	: Algae
		B	: Berubah	MS	: Moss/Lumut

E. PEMBAHASAN

Dari hasil pengamatan dalam tabel dihalaman sebelumnya, telah tergambar penggunaan *epoxy resin* yang begitu banyak dalam konservasi batu Candi Borobudur. Bahkan sampai sekarang ini masih digunakan walaupun sudah dikurangi atau dibatasi penggunaannya.

Dari jumlah 704 penggunaan *epoxy resin* sebagai bahan konservan, 585 (83%) diantaranya adalah untuk penyambungan-sedang injeksi retakan hanya 95 (14%), aplikasi dan kamuflase sebanyak 24 (3%) aplikasi.

Berikut tampilan dalam bentuk grafik.

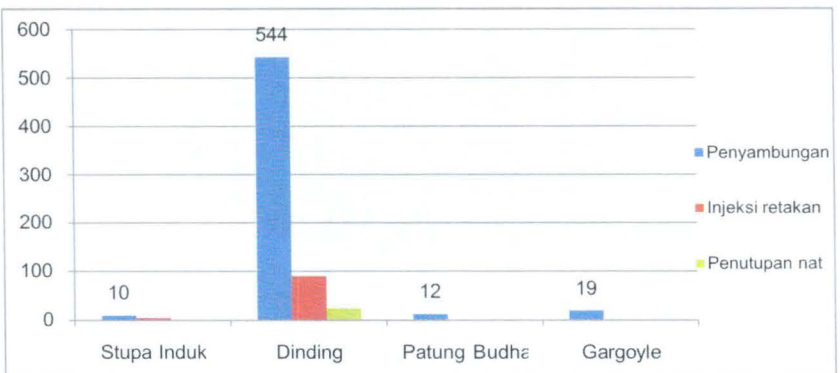


Grafik 1.1. Aplikasi *Epoxy resin*

Penggunaan *epoxy* untuk penyambungan merupakan aplikasi yang terbanyak. Hal ini dikarenakan banyaknya batu yang patah, permukaan batu yang tidak rata dan sisi satu dengan yang lain saling menempel menjadikan distribusi tekanan beban tidak merataatau terakumulasipada satu titik saja. Selain itu,faktor iklim makro dan mikro juga dapat menyebabkan berkurangnya kekuatan batu (menjadi rapuh) dan pada bagian tertentu dari bangunan candi memikul beban yang berat dari susunan batu diatasnya sehingga batu tidak kuat menerima beban batu diatasnya dan bisa menyebabkan batu patah.Selain patah, banyak juga batu-batu yang retak. Jenis kerusakan seperti ini biasanya yang dilakukan adalah penginjeksian retakan dan dikamuflase. Retakan pada batu candi yang terjadi setelah pemugaran karena adanya tekanan yang berat dari batu diatasnya dan posisi batu candi sudah tersusun sebagaimana mestinya sehingga untuk meminimalisir kerusakan pada batu lebih lanjut diambil langkah penginjeksian pada batu yang retak. Cara ini merupakan cara termudah untuk menangani batu candi yang retak. Langkah penanganan dalam melakukan konservasi juga harus melihat kondisi fisik

batu dan pengambilan keputusan untuk melakukan konservasi harus didasari analisis yang dapat dipertanggungjawabkan untuk meminimalisasi pengaruh negatif yang timbul.

Berikut data-data pengaplikasian *epoxy resin* berdasar lokasi penggunaannya di Candi Borobudur:



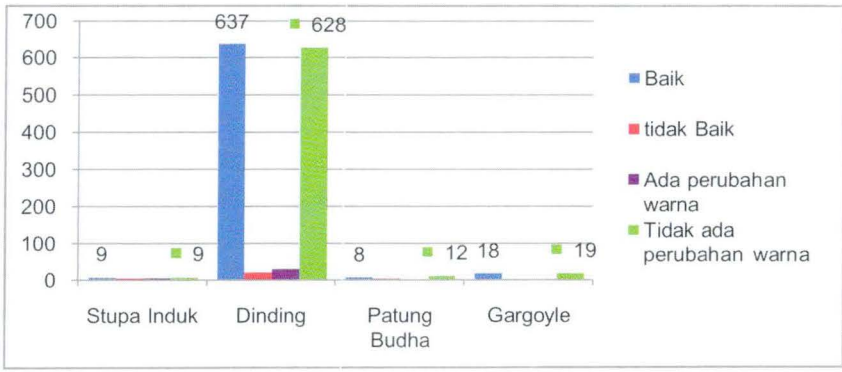
Grafik 1.2. Penggunaan *Epoxy resin* Berdasarkan Lokasi di Candi Borobudur

Dari data yang ditampilkan aplikasi *epoxy resin* untuk konservasi paling banyak adalah di lokasi dinding candi, sebanyak total 658 penggunaan *epoxy*. Selain karena memiliki area yang luas, dinding candi juga merupakan struktur yang rentan terhadap kerusakan terutama pada dinding relief. Dinding Candi Borobudurmengelilingi candi dan sisi-sisinya langsung berhubungan dengan faktor dari luar seperti sinar matahari langsung, hujan, kelembaban udara, fluktuasi suhu udara siang malam dan lain - lain. Selain itu, dilihat dari struktur/susunan batu pada dinding candi, dinding candi memikul beban susunan batupagar langkan dan relung yang berada di atasnya.Keadaan ini menambah beban batu – batu pada dinding dan membuatnya semakin rentan rusak.

Sedang kerusakan/patahnya batu – batu pada arca Buddha (12 aplikasi *epoxy*) dan *jaladwara* (19 aplikasi *epoxy*) lebih sedikit karena dilokasi candi posisinya tidak terbebani terlalu berat

walaupun menerima pengaruh iklim makro dan mikro yang hampir sama dengan batuan di dinding.

Aplikasi *epoxy resin* mempunyai dampak terhadap batu. Berikut kondisi fisik dari aplikasi *epoxy* yang telah dipakai di Candi Borobudur. Kondisi fisik ini meliputi baik atau tidak baik (sudah rusak)setelah dilakukan aplikasi dan juga terjadinya perubahan warnapadabatu. Kondisi fisik aplikasi *epoxy* yang baik belum menjamin tidak terjadinya perubahan warna, begitu pula kondisi fisik aplikasi *epoxy* yang rusak belum tentu warnanya juga memudar.

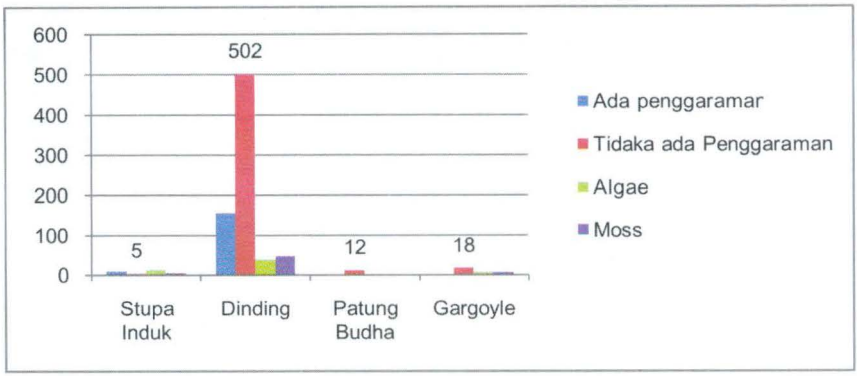


Grafik 1.3. Kondisi Fisik Aplikasi *Epoxy*

Berdasarkan tabel diatas, dari 704 penggunaan *epoxy resin,* 672 penggunaan *epoxy* masih dalam kondisi fisik baik, sedangkan yang rusak sebanyak 32 penggunaan *epoxy*. Dari jumlah 704 penggunaan *epoxy*, 668 penggunaan *epoxy* masih tetap warnanya sedang yang mengalami perubahan warna sebanyak 36 penggunaan *epoxy*.

Salah satu sifat bahan *epoxy resin* adalah kedap air. Hal ini menyebabkan terkumpulnya air pada daerah sekitar area aplikasi *epoxy*. Begitu pula, pada batu yang mengalami penggaraman sejumlah 182 blok berbanding 450 blok batu yang tidak mengalami penggaraman. Adapun pertumbuhan mikroorganisme untuk *moss* (lumut) sejumlah 54 titik dan *algae* (ganggang) sejumlah

56 titik. Hal ini menunjukkan bahwa *epoxy resin* tidak membahayakan dalam arti bisa menimbulkan kerusakan seperti panggaraman. Karena dari pengamatan langsung dilapangan, daerah yang cenderung basah dan dilewati oleh air lebih banyak penggaraman dan ditumbuhi mikroorganisme.



Grafik 1.4. Dampak Penggunaan *Epoxy resin*

Selain patah, banyak juga batu-batu yang retak. Untuk jenis kerusakan seperti ini biasanya yang dilakukan adalah penginjeksian retakan dan dikamuflase. Retakan pada batu candi yang terjadi setelah pemugaran karena adanya tekanan yang berat dari batu diatasnya dan posisi batu candi sudah tersusun sebagaimana mestinya. Untuk meminimalisasi kerusakan pada batu lebih lanjut diambil langkah penginjeksian pada batu yang retak. Cara ini merupakan cara termudah untuk menangani batu candi yang retak.

Pada kamuflase yang berjumlah 24 titik aplikasi tidak ditemukan adanya perubahan warna. Begitupun penginjeksian yang berjumlah 71 titik masih dalam kondisi bagus. Begitu pula pada batu yang mengalami penggaraman sejumlah 182 blok dari 450 blok batu yang tidak mengalami penggaraman. Pertumbuhan mikroorganisme untuk *moss* sejumlah 54 titik dan *algae* sejumlah 56 titik. Hal ini menunjukan bahwa *epoxy resin* tidak membahayakan, dalam arti bisa menimbulkan kerusakan seperti panggara-

man. Dari pengamatan langsung dilapangan, daerah yang cenderung basah dan dilewati oleh air lebih banyak penggaraman dan ditumbuhi mikroorganisme.

G. PENUTUP

1. Kesimpulan

a. Penggunaan *epoxy resin* sebagai bahan perekat, bahan pengisi dalam injeksi retakan dan juga sebagai bahan kamuflase di Candi Borobudur masih sangat baik.

b. Penggaraman dan tumbuhnya mikroorganisme cenderung pada lokasi yang sering basah / teraliri air.

c. Perlunya pengawasan/*monitoring* penggunaan *epoxy* secara terus menerus dan mencatat perubahan yang terjadi pada aplikasi *epoxy*.

d. Membuat data yang berkaitan dengan penggunaan *epoxy* bisa berupa tanggal aplikasi, bahan *epoxy* yang digunakan, campuran yang dipakai dan sebagainya yang dianggap perlu.

2. Saran

a. Perlu kajian lanjutan untuk memetakan penggunaan *epoxy resin* di Candi Borobudur.

b. Perlunya kajian lebih lanjut mengenai kerusakan batu candi yang diaplikasi *epoxy resin*.

c. Perlu dilanjutkan untuk mengidentifikasi dampak negatif yang timbul dan membuat *data base* dampak tersebut.

d. Perlunya kajian mengenai aliran air pada batuan Candi Borobudur.

DAFTAR PUSTAKA

"Epoksi Kimia" . *http://www.csuchico.edu/ ~ jpgreene/m247/ m247_ ch02/sld023.htm.*

May, Clayton A. 1987-12-23.*Epoxy Resins: Chemistry and Technology* (Second ed.). New York: Marcel Dekker Inc. p. 794. ISBN0824776909.

Norm Lambert. "Chips Flooring", *Epoxy*.com .http://www.*epoxy*.com/chip.htm. Retrieved 2010-07-24. Diunduh: 2010/07/24.

Norman L. Lambert. "Quartz Flooring", *Epoxy*.com. http://www.*epoxy*.com/15.htm. Retrieved 2010-07-24. Diunduh: 2010/07/24.

Morena, John J. 1988.*Advanced Composite Mold Making*, New York: Van Nostrand Reinhold Co. Inc. pp. 124–125. ISBN9780442264147.

Soekmono. R. 1972. *"Riwayat Usaha Penyelamatan Candi Borobudur"* - PELITA BOROBUDUR, Seri A, No. 1. Jakarta: Proyek Pelita Restorasi Tjandi Borobudur, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Torraca. G. 1982.*Porous Building Material – Materials Science for Architectural Conservation.*Rome: ICCROM.

Selwitz, Charles. Tahun... *Epoxy resin in stone Conservation.* USA: The Getty conservation institute.

KAJIAN PERBAIKAN TANGGA CANDI BOROBUDUR

(Pembuatan Model Pelapis Batu Pijak pada Tangga Candi)

Hari Setyawan, Joni Setiyawan, Arif Gunawan

Abstract

The erroded stone structure of Borobudur Temple stairways need an immediate measure because it is related to the historical and cultural value of Borobudur Temple.

By completition of restoration project in 1983 and recognition of Borobudur Temple as World Cultural Heritage No. 592 by UNESCO in the year of 1991, the number of tourist visiting the temple continues to rise. This is the main causes of erroded stone structure of Borobudur Temple Stairways.

The efforts to prevent further errotion on stairways stone structure is already done by the placement of rubber mats before the stairways. Moreover it is also done through the study of making the cover model for the Borobudur Temple stairways. The aim of the study is to protect the stairways from errotion. The model characterized is to cover the surface of stairways stone structure, so that the tourist who is walking through the stone surface of the stairways, is not directly stepped to the stone surface. Few materials which are used to make the model are teak wood board, acrillic board, mortar with epoxy adhesive sikadur 31 CF and EP-IS AW 2101.

Keywords: *Borobudur Temple, erroded stairways structure, stairways cover model, material covering the stairways.*

Abstrak

Keausan batu penyusun struktur tangga Candi Borobudur merupakan hal yang perlu segera ditanggulangi, karena menyangkut nilai-nilai kesejarahan dan kebudayaan yang melekat pada Candi Borobudur.Setelah selesai dipugar tahun 1983 dan dengan ditetapkannya Candi Borobudur sebagai Warisan Budaya Dunia No. 592 oleh UNESCO tahun 1991, kunjungan para wisatawan terus meningkat. Hal inilah yang merupakan penyebab utama keausan pada batu penyusun struktur tangga Candi Borobudur.

Usaha untuk mengurangi keausan struktur tangga candi sudah dilakukan dengan penempatan alas dari karet pada mulut tangga.Selain itu juga dilakukan melalui kajian pembuatan model pelapis batu pijak pada tangga Candi Borobudur.Kajian tersebut dimaksudkan untuk melindungi batu tangga dari keausan.Model yang dibuat berfungsi sebagai pelapis dataran pijak tangga candi, sehingga pengunjung yang naik ke candi tidak langsung menginjak permukaan struktur batu tangga, melainkan hanya menginjak pelapisnya saja. Beberapa bahan yang digunakan untuk pembuatan model, antara lainkayu reng jati, papan kayu jati, papan akrilik, mortar dengan perekat epoxy sikadur 31 CF dan EP-IS AW 2101.

Kata kunci*: Candi Borobudur, keausan struktur tangga, model pelapis tangga, bahan pelapis tangga.*

A. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Candi Borobudur berada pada posisi 7°36′29″ LS, 110°12′14″ BT, tepatnya di Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah.Candi Borobudur merupakan sebuah candi tanpa bilik dan tanpa atap dengan bahan dasar batu andesit, berarah hadap Timur dengan denah yang simetris. Candi Borobudur mempunyai

tinggi 42 m sebelum dipugar dan 35,4 m setelah dipugar dengan panjang sisi 121,70 m dan lebar sisi 121,40 m. Luas permukaan keseluruhan 21893 m^2 dengan luas lantai undag hingga teras III 8420,5 m^2, serta sepuluh tingkatan dari bawah ke atas dengan teras pertama sampai teras ketujuh berbentuk persegi dan teras selanjutnya berbentuk lingkaran (Balai Konservasi Peninggalan Borobudur,1991). Candi Borobudur merupakan *stupa prasada* dengan sepuluh tingkat yang secara vertikal terdiri atas tiga bagian yaitu, *kamadhatu* (dunia nafsu), *rupadhatu* (dunia bentuk), dan *arupadhatu* (dunia tanpa bentuk) (Stuterheim,1950:198).

Candi Borobudur adalah situs purbakala yang termasuk dalam situs purbakala warisan dunia nomor C. 592 yang ditetapkan oleh UNESCO. Candi Borobudur sebagai monumen dengan batu andesit sebagai struktur utamanya adalah alasan utama mengapa Candi Borobudur saat ini masih dapat kita saksikan kemegahannya. Banyaknya orang yang berkunjung dan menaiki candi ternyata meninggalkan jejak-jejak kerusakan pada batu struktur candi. Jejak-jejak kerusakan tersebut antara lain berupaadanya keausan batu khususnya pada tangga candi, stupa teras, lantai stupa teras, dan stupa induk. Aktivitas pengunjung candi yang bermacam-macam ternyata telah menyebabkan beberapa batu yang sering dilalui atau sering bersentuhan (kontak dengan pengunjung) menjadi aus atau rusak. Dalam hal ini, struktur batu paling rentan rusak adalah struktur batu penyusun tangga candi di keempatsisinya.

Penyebab keausan yang paling dominan adalah manusia. Pengunjung yang berjalan pada tubuh candi melakukan aktivitas berjalan dan berinteraksi dengan manusia lain dan dengan struktur batu. Aktivitas berjalan dengan alat bantu berupa alas kaki secara tidak disadari dan berangsur-angsur akan merusak struktur batu candi. Sedangkan interaksi dengan manusia lain atau dengan struktur batu maksudnya adalah aktivitas memanjat pada stupa teras atau stupa induk dengan maksud tertentu.

2. Maksud dan Tujuan

Maksud kajian ini adalah untuk mengidentifikasi dan membuat beberapa model penanganan keausan batu tangga dengan cara membuat pelapis struktur batu tangga candi. Model pelapis tangga candi tersebut dibuat menggunakan berbagai variasi bahan dan metode pengerjaan. Tujuan dari kegiatan ini adalah agar diperoleh model yang dapat dijadikan sumber acuan dalam memutuskan model penanganan keausan batu khususnya pada stuktur tangga candi Borobudur.

3. Manfaat

Manfaat dari "Kajian Perbaikan Tangga Candi Borobudur (Pembuatan model pelapis batu pijak pada tangga candi untuk penentuan metode penanganan)" adalah mendapatkan model pelapis struktur batu penyusun tangga Candi Borobudur. Beberapa model yang diajukan akan dibahas dari beberapa sisi menyangkut kelayakannya apabila diaplikasikan pada Candi Borobudur. Dengan dibuatnya model pelapis tangga candi diharapkan kerusakan tangga karena keausan yang diakibatkan aktivitas pengunjung dapat ditanggulangi.

4. Ruang Lingkup Kajian

Ruang lingkup kajian akan menentukan arah dan batasan kajian sehingga kajian yang dilakukan dapat mencapai tujuan. Ruang lingkup kajian ini adalah sebagai berikut.

a. Pengamatan keausan struktur batu penyusun tangga Candi Borobudur di keempat sisinya.
b. Pembuatan model pelapis tangga candi dari berbagai bahan.
c. Analisis fisik dan uji bahan pelapis.
d. Evaluasi model pelapis tangga candi.

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Hasil Kajian Kondisi Tangga Candi Borobudur

Salah satu bentuk kerusakan material yang secara langsung disebabkan oleh banyaknya pengunjung adalah keausan batu candi. Keausan batu banyak terjadi pada tangga dan lantai lorong maupun teras stupa Candi Borobudur. Secara teori keausan terjadi akibat gesekan alas kaki pengunjung dengan permukaan batu. Kebanyakan alas kaki memiliki kekerasan yang lebih rendah dari batu, namun keberadaan pasir/tanah pada alas kaki menyebabkan gesekan yang dapat menyebabkan keausan. Pengaruh keausan sebenarnya terjadi secara lambat, namun karena tingginya jumlah pengunjung maka saat ini keausan sudah sampai pada taraf yang mengkhawatirkan.

Muhammad Taufik (2009:119) dalam tesisnya menyampaikan bahwa keausan pada Candi Borobudur tersebar di lantai dan tangga candi. Sementara Sutantio (1985) menyampaikan bahwa di Candi Borobudur ditemukan 801 blok batu yang mengalami keausan. Hasil pengamatan di tahun 2000 jumlah batu yang mengalami keausan menjadi 1.383 blok batu, hal ini berarti terjadi peningkatan sebesar 582 blok batu. Jika dirata-rata, keausan yang terjadi setiap tahunnya adalah 36 blok batu. Apabila keausan batu-batu Candi Borobudur mulai terjadi ketika pertama kali dimanfaatkan sebagai objek wisata, keausan tangga sisi Timur adalah antara 0,2 – 1,8 cm sedangkan tangga di ketiga sisi lainnya antara 0,2 – 1,3 cm (Taufik,2005:120).

Apabila keausan batu penyusun struktur tangga Candi Borobudur diasumsikan telah terjadi sejak pertama kali candi ini dibuka untuk kegiatan pariwisata, dengan jumlah pengunjung 35.766.820 orang mengakibatkan keausan sebesar 1,2-1,5 cm. Dengan demikian, dapat diperkirakan 20 tahun kemudian dengan jumlah pengunjung yang sama, batu-batu tersebut mengalami keausan yang sudah membahayakan, yaitu 3 cm. keausan batu akan lebih cepat lagi jika pengunjung candi mencapai 3.000.000 orang per tahun, dengan jumlah itu berarti setiap tahun batu-batu

pada tangga atau lantai akan mengalami keausan sebesar 0,1 – 0,32 cm (Taufik, 2005:156).

Selain itu melalui "Kajian Struktur Permukaan Halaman Candi Borobudur dan Korelasinya dengan Keausan Batu Tangga", Brahmantara, dkk (2008:35) juga menyampaikan bahwa keausan yang terbesar disebabkan karena aktivitas manusia. Material pasir yang terbawa pada alas kaki pengunjung candi, dapat memberikan gaya gesekan yang cukup signifikan pada lantai dan tangga candi sehingga menimbulkan keausan pada permukaan batu. Pada tangga naik dari tahun 2003 sampai 2007 terjadi tingkat keausan sebesar 0,7 cm,dan untuk tangga turun (sisi Utara, Selatan, dan Barat) dari tahun 2003 sampai 2007 kenaikan tingkat keausan pertahunnnya sebesar 0,8 cm.

Sementara itu, berdasarkan pengamatan terhadap keausan batu penyusun struktur tangga candi yang dilakukan diawal tahun 2010 disampaikan bahwa persentase keausan mencapai tingkat yang mengkhawatirkan. Dari hasil pengamatan tersebut dapat disampaikan bahwa persentase keausan rata-rata batu penyusun struktur tangga pada sisi Timur adalah 74,40%. Persentase keausan rata-rata batu penyusun struktur tangga pada sisi Barat dan Utara adalah 63,39% dan 27,84%. Sedangkan persentase keausan rata-rata batu penyusun struktur tangga pada sisi Selatan adalah 30,96% (Setyawan, dkk 2010:50-51).

Dari beberapa kajian seperti disebutkan di atas, diketahui bahwa faktor aktivitas manusia memegang peranan penting terhadap keausan khususnya pada tangga dan lantai Candi Borobudur. Mengenai langkah-langkah penangananya, Taufik (2008:156) menyarankan untuk mengganti batu yang aus dengan batu yang baru. Sedangkan Brahmantara, dkk (2008:35) melalui kajiannya mengajukan saran menyangkut penataan dan pengendalian pasir halaman, pengaturan jumlah pengunjung, penggunaan alas kaki khusus untuk naik ke candi, dan pembuatan lapisan pelindung pada tangga candi dengan beberapa bahan yang dapat melindungi dari keausan.

2. Kondisi Keausan Batu Penyusun Struktur Tangga Candi Borobudur

a. Penyebab Keausan

Penyebab utama keausan pada batu penyusun struktur tangga pada Candi Borobudur adalah karena aktivitas manusia yang naik ke candi.Pengunjung yang menggunakan alas kaki yang bervariasi secara tidak sengaja telah menyebabkan keausan pada batu candi.

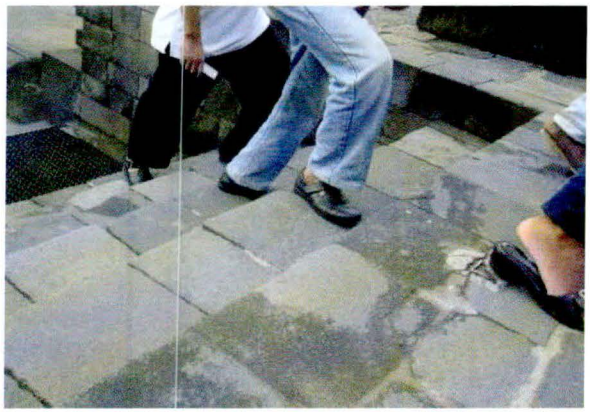


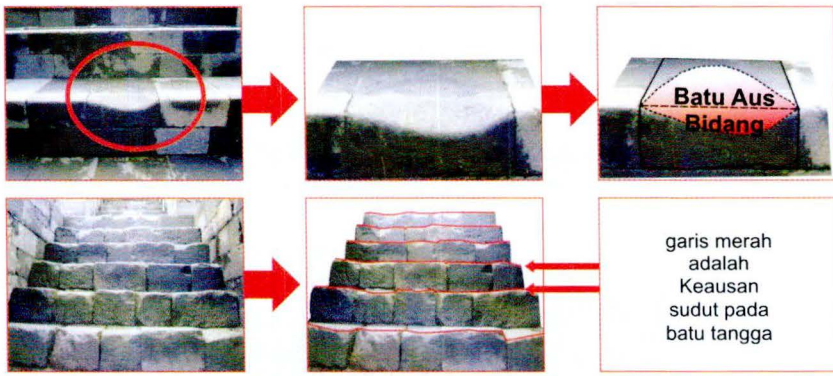
*Foto 2.1. K*ondisi Tangga Undag – Selasar pada Sisi Timur dan Aktivitas Pengunjung yang Melewati Tangga

(Dok:penulis, 2010).

b. Identifikasi Keausan

Keausan batu penyusun struktur tangga Candi Borobudur terjadi hampir merata pada tangga di keempat sisinya.Dalam kajian ini, keausan tangga candi akibat aktivitas manusia dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu aus sudut dan aus bidang.Aus sudut pada struktur batu tangga adalah keausan batu candi pada bagian sudut luar yang langsung membentuk sisi tangga untuk

berpijak.Sedangkan aus bidang pada struktur batu tangga adalah keausan batu candi pada bagian datar atau bidang datar yang dapat menjadi pijakan (dataran pijak).



Gambar dan foto 2.2. Contoh keausan batu candi pada tangga sisi Barat penghubung lorong I – lorong II
(Dok: penulis,2010).

Berdasarkan data laporan pengamatan keausan batu struktur candi pada bagian tangga, stupa teras, dan lantai stupa teras yang dilakukan oleh Balai Konservasi Peninggalan Borobudur tahun 2010 didapatkan data keausan pada tangga candi di keempat sisinya. Pada gambar dan foto II.2 di atas, adalah struktur batu penyusun tangga candi pada sisi Timur, yaitu tangga penghubung Selasar I-Selasar II/tangga penghubung undag dengan selasar. Dari gambar tersebut dapat disampaikan bahwa bagian tangga yang berwarna abu-abu adalah blok batu yang aus karena aktivitas manusia. Sedangkan bagian yang berwarna hitam adalah bagian yang rusak atau nat-nat batu yang mengalami kerontokan karena sudah rapuh.Sedangkan secara lebih mendetail, kondisi keausan dan persentase keausan batu penyusun struktur tangga Candi Borobudur dapat dilihat pada tabel no.II.1.di bawah ini.

*Tabel 2.1.*Persentase keausan rata-rata keseluruhan tangga.

Posisi Tangga	Jumlah Batu Pijakan	Jumlah Keausan Batu Pijak		Persentase Keausan	
		Aus Sudut	Aus Bidang	Aus Sudut	Aus Bidang
Timur	512	512	377	100%	74,40%
Barat	528	528	342	100%	63,39%
Utara	456	456	133	100%	27,84%
Selatan	537	537	176	100%	30,96%
Jumlah	**2033**	**2033**	**1028**		
Rata - Rata Keausan				**100%**	**49,15%**

Dari hasil pengamatan keausan tangga candi (tabel no.11.1) pada awal tahun 2010, hasil yang didapatkan dapat dikatakan memprihatinkan kondisinya.Dalam hal keausan sudut seperti yang telah disampaikan di atas, semua anak tangga pada keempat sisi candi telah mengalami keausan.Sudut yang terbentuk karena pertemuan dua bidang sisi batu yang seharusnya membentuk sudut 90° ternyata tidak bisa ditemukan lagi, baik pada batu lama maupun batu pengganti.Hal ini menunjukkan bahwa keausan karena aktivitas manusia begitu tinggi.Masih menjadikan sebuah pertanyaan, adalah mengenai aus sudut, apakah sudah terjadi pada masa lalu dimana candi masih digunakan, ataukah karena aktivitas pengunjung pada saat ini.

Sedangkan dalam hal keausan bidang, tidak semua batu mengalami keausan. Hal ini dikarenakan langkah dan tapak kaki manusia saat berpijak pada tangga candi cenderung membentuk pola yang sama. Sehingga keausan yang terjadi pada tangga dapat diketahui polanya dari aktivitas pengunjung yang melaluinya.

Selain persentase keausan pada bidang tangga Candi Borobudur, secara mendetail Brahmantara, dkk (2008) telah mengidentifikasi laju keausan tangga yang berbanding lurus dengan jumlah kunjungan. Laju keausan pada tangga naik adalah sebesar ± 0,175 cm pertahun. Adapun laju keausan pada tangga turun adalah ± 0,2 cm pertahun.

3. Kerangka Dasar Berpikir

Kerangka pemikiran dimaksudkan untuk mempertegas dan menunjukkan bahwa "Kajian Perbaikan Tangga Candi Borobudur" ini layak untuk dilakukan.Melalui kerangka pemikiran juga disampaikan ketentuan internasional berupa piagam-piagam internasional, maupun undang-undang yang menjadi dasar pelaksanaan kajian ini.Pada intinya kajian ini adalah untuk mempertahankan keotentikan dari batu andesit penyusun struktur tangga candi agar tidak mengalami kerusakan yang lebih parah dikarenakan aktivitas manusia.

Selain itu, kajian ini juga didasari kriteria yang belum begitu jelas mengenai pernyataan menyangkut kerusakan batu sehingga pada saat blok batu yang rusak akan diganti masih belum ada kriteria yang pasti. Hal ini biasanya didasari pendapat mengenai daya dukung batu terhadap monumen. Selain itu, juga faktor keamanan pengunjung. Namun, keadaan di lapangan, blok batu pada tangga Candi Borobudur masih mempunyai daya dukung yang kuat walaupun kerusakan akibat keausannya dinilai parah. Secara sederhana kerangka dasar berpikir dalam kajian ini adalah sebagai berikut.

a. Undang-Undang No. 11 Tahun 2010 Tentang Cagar Budaya Pasal 77

Pada pasal 77 Undang-Undang No.11 tahun 2010 tentang Cagar Budaya juga disampaikan bahwa upaya pemugaran mencakup rekonstruksi, konsolidasi, rehabilitasi, dan restorasi. Pasal 77 point yang kedua juga mengatur adanya upaya konsolidasi. Yang dimaksud dengan "konsolidasi" adalah perbaikan terhadap bangunan cagar budaya dan struktur cagar budaya yang bertujuan memperkuat konstruksi dan menghambat proses kerusakan lebih lanjut. Konsolidasi merupakan salah satu pekerjaan pada proses pemugaran. Hal ini dianggap sesuai dengan upaya yang akan dila-

kukan pada kajian ini, yaitu pembuatan model pelapis tangga candi sebagai upaya untuk menghambat proses kerusakan karena keausan batu akibat aktivitas pengunjung di atasnya.

Selain itu, seperti yang diatur pada point ketiga pasal 77 yang menyatakan bahwa pemugaran juga tetap harus mempertimbangkan keamanan masyarakat dan keselamatan cagar budaya.Hal ini juga dianggap sesuai dengan maksud dan tujuan dari kajian ini.Pembuatan pelapis tangga sebenarnya diharapkan mampu menutup dataran pijak batu tangga sehingga terhindar dari keausan.Selain itu, pengunjung yang naik ke candi juga bisa merasa nyaman karena tangga yang dipijak tidak berlubang maupun licin.Sehingga dalam hal ini keselamatan pengunjung saat naik dan turun candi bisa lebih terjamin.

b. Piagam ICOMOS Mengenai Prinsip untuk Analisis, Konservasi dan Restorasi Struktur Warisan Arsitektur (Diratifikasi oleh Majelis Umum ICOMOS 14 di Victoria Falls, Zimbabwe, pada tahun 2003)

Beberapa pernyataan dari piagam ICOMOS yang berhubungan dengan tindakan-tindakan perbaikan pada monumen bersejarah intinya menyatakan bahwa, terapi dan perbaikan yang dilakukan adalah untuk menyelesaikan akar masalah dan bukan akibat yang ditimbulkannya.Apabila kita selidiki lebih dalam pada akar permasalahan kerusakan pada batu tangga yang aus adalah aktivitas pengunjung. Namun, aktivitas pengunjung yang naik ke candi tidak mungkin dikendalikan, karena dalam keadaan normal tidak mungkin melarang orang naik ke candi (dalam keadaan normal). Hal inilah sebenarnya yang menjadi maksud dari kajian ini.

Pada pernyataan selanjutnya, intervensi dan pembuatan struktur yang melindungi dan memperkuat harus teruji terlebih dahulu dan tidak mengurangi nilai monumen sebagai warisan budaya.Intervensi struktur baru sebagai penguat harus dapat diperbarui dan diganti apabila ada struktur pengganti yang lebih baik dari pada yang sudah dilakukan.

Hal yang sesuai dengan maksud dan tujuan kajian ini, juga dijumpai pada pernyataan mengenai penggantian struktur bersejarah yang rusak.Pernyataan tersebut mengandung maksud bahwa mengganti dan mengubah suatu struktur bersejarah harus sedapat mungkin dihindari.Pada struktur yang rusak juga sedapat mungkin harus diperbaiki bukan di ganti.

Selain itu setelah intervensi atau penambahan struktur yang memperkuat hendaknya dilakukan monitoring untuk mengetahui keefektifannya. *Monitoring* juga dimaksudkan untuk mengetahui dampak dari intervensi suatu struktur.

C. ALTERNATIF PENYELESAIAN MASALAH

1. Alternatif Model

Salah satu alternatif yang diajukan dalam kajian ini adalah dengan membuat pelapis batu tangga candi dari beberapa material. Dalam hal menentukan material pelapis, tim kajian akan mempertimbangkan beberapa hal utama dalam menentukannya yaitu dengan mempertimbangkan keaslian bentuk, keaslian tata letak, keaslian pengerjaan, dan keaslian bahan.

Beberapa material dapat menjadi alternatif untuk mengatasi keausan batu penyusun tangga tersebut, namun belum dapat diputuskan kesepakatan yang dapat menjadi acuan. Hal ini karena belum adanya model eksisting yang dapat dilihat dan dipertimbangkan bersama dalam pengambilan keputusan. Oleh karena itu, dalam kegiatan ini diusulkan pembuatan beberapa model penanganan batu tangga. Model-model tersebut selanjutnya dianalisis dan didiskusikan bersama dengan para ahli dan

pemangku kepentingan lainnya agar diperoleh kesepakatan yang dapat dijadikan acuan penanganan.

Pelaksanaan kegiatan ini adalah dengan membuat beberapa model pelapis tangga pada tangga lerengsisi Barat Candi Borobudur.Tahap yang pertama adalah pemilihan bahan dan pemasangan model pelapis. Pada pemilihan bahan dan metode pengerjaan didasarkan pada pertimbangan sebagai berikut :

a. Tidak bersifat merusak keaslian batu penyusun sturktur tangga atau struktur asli lain di sekitarnya.
b. Mengutamakan prinsip keaslian bentuk, tata letak, pengerjaan, dan bahan.
c. *Reversible* (dapat dihilangkan kembali tanpa menyebabkan kerusakan).
d. Efektif (dapat langsung digunakan untuk melapisi struktur tangga candi tanpa menggunakan alat bantu apapun).
e. Estetis atau selaras (tidak mengganggu pandangan dan selaras arsitektur candi).
f. Aman dan nyaman bagi pengunjung.

Dari berbagai pertimbangan tersebut, telah diajukan beberapa model yang akan dibuat percobaannya sebagai berikut :

Tabel 2.2. Bahan-bahan yang akan digunakan sebagai pelapis tangga Candi Borobudur.

No	Jenis Model Pelapis Struktur Batu Tangga	Bahan Utama
1.	Pembuatan model dengan papan kayu	Papan kayu jati
2.	Pembuatan model dengan kayu reng	Kayu reng jati
3.	Pembuatan model dengan papan akrilik	Papan akrilik
4.	Pembuatan model dengan mortar berpori (EPIS)	Mortar berpori (EPIS)
5.	Pembuatan model dengan mortar berpori (SIKA)	Mortar berpori (SIKA)

Pemasangan atau pembuatan model tidak dilakukan pada tiap anak tangga di lereng Barat candi, melainkan hanya 1 sampai 9 anak tangga yang bisa dianggap mewakili. Dalam hal pemasangan model, tim kajian juga tidak akan melakukan perubahan ataupun perusakan struktur tangga lereng, pemasangan akan sangat berhati-hati dan saksama. Beberapa model yang dipasang akan diletakkan pada tangga di lereng sisi Barat candi. Pada saat pembuatan model, tangga lereng Barat candi akan ditutup untuk beberapa hari, setelah pelapis di rasa kuat untuk digunakan, barulah pengunjung diperbolehkan melewati. Alasan pemilihan lokasi yang berada di lereng Barat candi dimaksudkan untuk menjaga keamanan pengunjung dan model yang diajukan. Hal ini karena model yang diajukan belum melewati tahap studi dampak pemasangan atau kelayakan.

Tahap yang paling akhir adalah tahap evaluasi pada beberapa model yang di aplikasikan. Evaluasi dimaksudkan untuk mencari dampak-dampak yang dirasa tidak sesuai dari segi arkeologis, teknis, keamanan, dan estetika. Pada tahap ini akan dihadirkan para ahli dan praktisi konservasi yang akan memberikan penilaian menyangkut kelayakan beberapa model yang diajukan.

Dalam melakukan pemilihan lokasi percobaan, diusahakan tangga yang akan digunakan sebagai percobaan memiliki karakteristik fisik bahan, bentuk, dan morfologi yang hampir mirip dengan tangga Candi Borobudur. Tangga lereng Barat Candi Borobudur mempunyai kemiripan dengan tangga candi, walaupun tidak 100%. Dari segi karakteristik fisik bahan, tangga ini mempunyai bahan yang sama dengan tangga candi yaitu batu andesit. Batu andesit yang digunakan sebagai penyusun struktur tangga lereng Barat memiliki karakteristik bahan dan warna yang mirip dengan tangga candi. Batu andesit pada struktur tangga di lereng Barat candi disusun berjajar satu *layer*/lapis. Tiap satu lapisbatu pijak tangga lereng terdiri atas 4 blok batu andesit yang disusun sejajar. Satu blok batu andesit pada tangga lereng Barat candi berukuran panjang 50 – 52 cm dengan lebar 30 cm dan

tinggi 17 cm dengan lebar nat sekitar 1 cm. Suhu permukaan batu tangga lereng Barat adalah 22 – 35°C. Sedangkan kemiringan tangga kurang lebih 45° dengan warna abu-abu HUE 7,5 Y 5/1 pada skala *muncell*.

Mengenai konstruksi kerangka kayu yang akan direncanakan agaknya tidak bisa disamakan, antara konstruksi kayu pelapis pada tangga lereng Barat dengan tangga candi yang nantinya akan dikerjakan apabila telah disetujui. Hal ini dikarenakan keletakan dan elemen struktur bangunan yang berada di sekitar tangga candi sangat berbeda dengan tangga lereng candi.

2. Model Pelapis Tangga Candi

Pembuatan model pelapis tangga candi dikerjakan secara bertahap oleh tim kajian yang dibantu oleh staff konservasi Candi Borobudur. Pelaksanaan pengerjaan model pelapis tangga candi tersebut dikerjakan dalam 3 tahap.

Tahap I adalah yang dikerjakan pertama kali. Hal ini berdasarkan pertimbangan bahwa pada tahap I dibutuhkan lebih banyak tenaga apabila dibandingkan pada tahap II. Tenaga yang memahami pengerjaan kayu sangat dibutuhkan pada tahap I. Sedangkan tahap II tidak dibutuhkan banyak tenaga, tetapi memerlukan proses yang cermat dan teliti dalam melakukan pencampuran bahan kimia.

Dalam pembuatan model pelapis tangga candi, juga diperhatikan dari aspek estetikanya. Hal ini supaya model yang dibuat tidak kelihatan mencolok apabila dilihat dari kejauhan. Usaha untuk melakukan kamuflase adalah dengan cara memberikan warna hitam pada kerangka model maupun dataran pijaknya. Pemberian warna dilakukan menggunakan cat semprot warna hitam. Namun demikian tidak semua bagian dari model pelapis tangga diberi warna hitam. Hal ini dimaksudkan agar bisa dilihat perbedaannya antara yang dicat dengan warna hitam dan yang tidak.

a. **Kerangka Kayu**

Pembuatan kerangka kayu dimaksudkan untuk menyangga model pelapis tangga. Sehingga material pelapis tangga, tidak langsung bersentuhan dengan batu struktur tangga. Bahan yang digunakan sebagai kerangka adalah dari bahan kayu reng jati.

Kerangka untuk model percobaan pelapis tangga menggunakan bahan kayu reng dengan jenis kayu jati. Kerangka yang dibuat dari kayu jati ini berfungsi utama sebagai dudukan atau penyangga model pelapis dari bahan kayu. Dengan demikian, kerangka ini bersinggungan langsung dengan batu. Hal ini menjadi penting bagi kerangka tersebut untuk tidak bersifat permanen pemasangannya. Model yang di rancang bentuknya sangat sederhana, hal ini untuk menghindari kerusakan pada batu strukturnya.

Model kerangka kayu jati, dibuat tidak permanen. Artinya kerangka tersebut hanya diletakkan di atas batu tangga tanpa dikaitkan pada batu. Kerangka kayu dipasang pada batu tanpa menggunakan paku atau sekrup yang dapat merusak batu. Untuk melakukan penyambungan antar kerangka, digunakan paku dan sekrup.

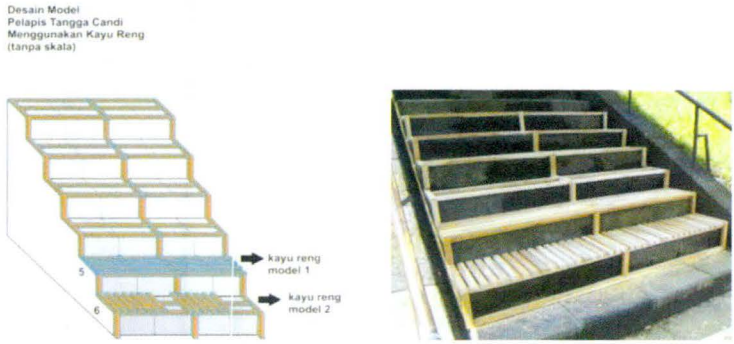
b. Model Percobaan Pelapis Tangga dari Bahan Kayu Reng Jati

Model pelapis menggunakan kayu reng jati adalah yang dibuat pertama kali pada trap percobaan 5 dan 6. Kayu reng bukan digunakan untuk membuat kerangka melainkan untuk membuat dataran pijak yang melapisi tangga.

Kayu reng yang akan dibuat sebagai dataran pijak dirancang menjadi 2 pola yang berbeda. Pola yang pertama adalah pola vertikal dan pola yang kedua adalah pola horizontal. Pembuatan pola yang berlainan terse-

but dimaksudkan untuk melihat, apakah ada dampak yang berbeda dari kedua pola tersebut.

Model pelapis kayu reng jati hanya akan dibuat pada sisi dataran pijak tangga saja. Sementara pada sisi vertikal tangga batu yang membentuk sudut 90° dengan dataran pijak, tidak akan dibuatkan pelapis. Hal ini dimaksudkan untuk menjaga kelembaban batu sehingga tidak ditumbuhi lumut, jamur atau organisme lain.



Gambar 2.3. Detil model pelapis tangga candi dari bahan kayu reng jati pada tangga lereng Barat Candi Borobudur

(dok: penulis).

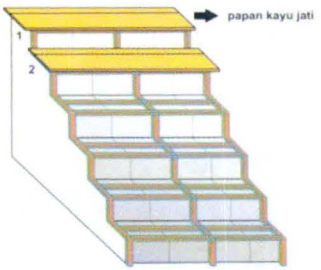
c. Model Percobaan Pelapis Tangga dari Bahan Papan Kayu Jati

Model pelapis menggunakan papan kayu jati dicobakan pada anak tangga nomor 3 dan 4 pada tangga lereng Barat Candi Borobudur.Papan kayu yang dibuat untuk melapisi adalah papan jati yang sudah dihaluskan terlebih dahulu menggunakan pasah listrik. Kemudian diukur dan dipasangkan pada kerangka.

Seperti halnya pada model pelapis menggunakan kayu reng jati, pemasangan model pelapis papan kayu jati juga hanya pada dataran pijaknya saja. Hal ini dimaksudkan untuk menjaga kelembaban batu struk-

tur tangga agar tidak ditumbuhi organisme yang dapat merusak batu. Adapun teknik pemasangan papan jati pada kerangka kayu adalah mengunakan paku dan sekrup.

Desain Model
Pelapis Tangga Candi
Menggunakan Papan Kayu Jati
(tanpa skala)



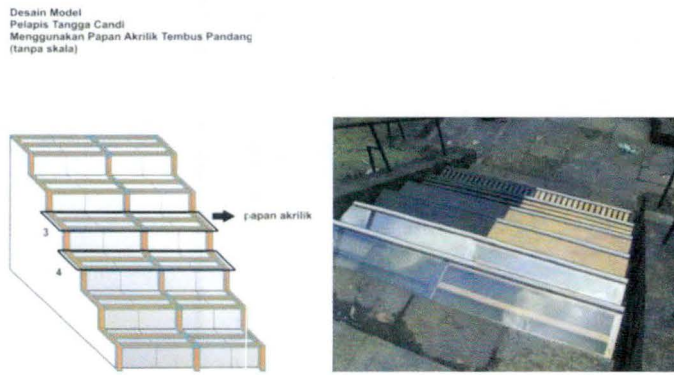
Gambar 2.4. Detil model pelapis tangga candi dari bahan papan kayu jati pada tangga lereng Barat Candi Borobudur

(dok: penulis).

d. Model Percobaan Pelapis Tangga dari Bahan Akrilik Tembus Pandang

Pembuatan model pelapis tangga candi dari bahan papan akrilik tembus pandang dimaksudkan agar batu asli pada struktur tangga masih dapat terlihat walaupun tertutup. Papan akrilik yang digunakan memiliki ketebalan 0,5 cm. Model pelapis berbahan papan akrilik dipasang pada anak tangga 1 dan 2 tangga lereng barat Candi Borobudur. Pada pembuatan model pelapis dengan papan akrilik, dibuat 2 model pelapis. Model yang pertama adalah pada anak tangga 1, hanya satu papan akrilik yang dijadikan dataran pijak. Sedangkan model yang kedua adalah pada anak tangga 2, dimana 2 papan akrilik disatukan sehingga total ketebalannya adalah 1 cm. Hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan daya tahan dan kekuatan akrilik supaya tidak pecah

saat dilalui. Pada permukaan akrilik juga diberikan lubang supaya batu dibawahnya dapat bernafas.



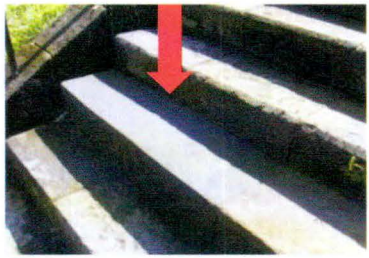
Gambar 2.5. Detil model pelapis tangga candi dari bahan akrilik tembus pandang pada tangga lereng Barat Candi Borobudur

(dok: penulis).

e. Model Percobaan Pelapis Tangga dari Bahan Mortar Berpori, Menggunakan Epoxy Resin, Sikadur 31 CF dengan Campuran Bubukan Batu dan Pasir

Beberapa epoxy yang digunakan untuk membuat mortar berpori dari bubukan batu dan pasir diantaranya adalah Sikadur 31 CF. Mortar yang akan dibuat nantinya akan langsung ditempelkan di atas batu struktur tangga. Hal ini dimaksudkan agar mortar mengisi bidang-bidang yang rusak karena aus. Permukaan batu yang telah dilapisi mortar akan rata pada dataran pijaknya. Mortar yang akan digunakan untuk melapisi struktur tidak bersifat rigid atau tidak menyatu dengan batu struktur tangga.

Sikadur 31 CF + bubukan batu



Sikadur 31 CF + pasir

Foto 2.2 Pembuatan mortar menggunakan epoxy sikadur 31 CF pada tangga lereng Barat Candi Borobudur *(dok: penulis)*.

f. Model Percobaan Pelapis Tangga dari Bahan Mortar Berpori, Menggunakan Epoxy Resin, EP-IS AW 2101 dengan Campuran Bubukan Batu dan Pasir

Epoxy resin yang digunakan setelah Sikadur 31 CF adalah EP-IS AW 2101. Epoxy ini berbentuk cairan yang terdiri atas resin dan hardener. Pembuatan mortar berpori dengan perekat EP-IS juga menggunakan bahan campuran berupa bubukan batu dan pasir. Setelah tercampur dengan sempurna, mortar kemudian dioleskan ke permukaan batu. Pengolesan dilakukan hingga seluruh permukaan batu struktur tangga yang merupakan dataran pijak dapat terlapisi mortar dengan perekat EP-IS.

EP-IS AW 2101+ bubukan batu

EP-IS AW 2101 + pasir

Foto 2.3 Pembuatan mortar menggunakan epoxy EP-IS AW 2101 pada tangga lereng Barat Candi Borobudur *(dok: penulis)*.

3. Analisis Bahan

a. Kuat Lentur

Bahan yang akan dihitung kuat lenturnya adalah papan kayu jati, kayu reng jati, dan papan akrilik dengan ketebalan 0,5 cm. Pengujian analisis bahan dilakukan oleh tim kajian menggunakan fasilitas laboratorium fisik Balai Konservasi Peninggalan Borobudur di Magelang, Jawa Tengah. Sedangkan alat yang digunakan adalah alat UTM (*Universal Testing Machine*). Penghitungan lentur tarik :

Dari hasil pengujian yang dilakukan diperoleh sebagai berikut :

1) Papan kayu jati
   P = 430 kg
   L = 18 cm
   B = 5 cm
   H = 1.7 cm
   Diperoleh kuat lentur tarik untuk papan kayu jati sebesar **803,4602 kg/cm^2**

2) Reng kayu jati
   P = 610 kg
   L = 18 cm
   B = 3.4 cm
   H = 2.4 cm
   Diperoleh kuat lentur tarik untuk reng kayu jati sebesar **840,9926 kg/cm^2**

3) Akrilik
   P = 50 kg
   L = 18 cm
   B = 12 cm
   H = 0.5 cm
   Diperoleh kuat lentur tarik untuk akrilik sebesar **450 kg/cm^2**

b. Kuat Tekan

Bahan yang akan dihitung kuat tekannya adalah mortar Sika, mortar EP – IS, dan Araldite. Pengujian analisis bahan dilakukan oleh tim kajian menggunakan fasilitas laboratorium fisik Balai Konservasi Peninggalan Borobudur di Magelang, Jawa Tengah. Sedangkan alat yang digunakan adalah seperangkat alat UTM (*Universal Testing Machine*). Analisis kuat tekan pada beberapa bahan di atas, bertujuan untuk mengetahui kuat tekannya apabila ada beban yang berada di atas bahan. Dari hasil pengujian yang dilakukan diperoleh sebagai berikut :

1) Mortar Sikadur 31 CF pecah saat beban yang diberikan = 700 kg. Dengan menggunakan rumus diatas maka diperoleh kuat tekannya sebesar **142,672** kg/cm^2.
2) Mortar EP-IS AW 2101 pecah saat beban yang diberikan = 1600 kg. Dengan menggunakan rumus diatas maka diperoleh kuat tekannya sebesar **326,144** kg/cm^2.

D. PENUTUP

1. Simpulan

Dari berbagai model pelapis struktur batu candi seperti tersebut di atas ternyata belum didapatkan model yang tepat dan sesuai dengan kondisi struktur tangga Candi Borobudur. Berbagai bahan mempunyai kekurangan dan kelebihannya sendiri – sendiri misalnya pada bahan kayu yang mudah diolah tetapi dari segi estetika dan ketahanan kurang baik. Sedangkan pada mortar dengan perekat Sikadur maupun EP-IS sebenarnya baik, apabila digunakan untuk menutup bidang tangga yang aus. Tetapi dari kaidah arkeologi tidak sesuai. Hal ini dikarenakan penggunaan mortar yang melapisi pijakan tangga candi termasuk ke dalam penambahan dan perubahan struktur yang dinilai kurang baik.

Menyelesaikan persoalan keausan batu penyusun struktur tangga candi memang tidak mudah. Hal ini karena penanganannya harus disesuaikan dengan kaidah arkeologi dengan memper-

hatikan hal – hal seperti keaslian bentuk, tata letak, pengerjaan, dan bahan.

Kondisi batu penyusun struktur tangga Candi Borobudur sudah mengalami keausan yang dinilai parah karena aktivitas kunjungan wisata pada candi tersebut. Namun demikian, langkah-langkah untuk melakukan pelestarian masih berjalan hingga saat ini khususnya dengan membuat model percobaan pelapis tangga candi.

2. Saran

Beberapa hal penting yang perlu diperhatikan mengenai penanganan keausan pada tangga Candi Borobudur diantaranya:

a. Beberapa bahan harus benar-benar bersifat aman bagi struktur batu tangga candi maupun bagi pengunjung candi. Selain itu juga perlu diperhatikan dari segi estetikanya sehingga diperlukan uji model dan bahan secara lebih mendalam.

b. Pada bahan-bahan yang bersifat menambah atau mengubah struktur batu tangga candi hendaknya dihindari karena dapat mengurangi nilai arkeologisnya.

c. Diperlukan adanya manajemen pengunjung di zona I Candi Borobudur untuk membatasi jumlah pengunjung yang naik ke candi. Berkurangnya jumlah pengunjung berarti memperpanjang waktu kerusakan dan daya tahan struktur batu Candi Borobudur.

DAFTAR PUSTAKA

Balai Konservasi Peninggalan Borobudur. 1991. *Data Ukuran Candi Borobudur.* Magelang: Balai Konservasi Peninggalan Borobudur.

Brahmantara, dkk. 2008. *Kajian Struktur Permukaan Halaman Candi Borobudur dan Korelasinya dengan Keausan Batu Tangga.* Borobudur: Balai Konservasi Peninggalan Borobudur.

Setyawan, Hari. dkk. 2010. *Pengamatan Keausan Batu Struktur Candi pada Bagian Tangga, Stupa Teras, dan Lantai Stupa teras.* Borobudur: Balai Konservasi Peninggalan Borobudur.

Stuterheim, W. F. 1950. *Chandi Borobudur Name Form and Meaning, Studies In Indonesia Archaeology.* Batavia: Kolff & Co.

Sutantio, Julianto S. 1985. *Pengunjung dan Masalah Konservasi Candi Borobudur: Sebuah Penelitian Pendahuluan. Skripsi Jurusan Arkeologi.* Jakarta: Fakultas Sastra Universitas Indonesia.

Taufik, Muhammad. 2005. *Minimalisasi Dampak Negatif Pemanfaatan Candi Borobudur sebagai Objek Wisata.* Tesis Pascasarjana Program Studi Arkeologi Bidang Ilmu Humaniora. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

PENGARUH SAMPAH TERHADAP PELAPUKAN BATU CANDI BOROBUDUR

Ari Swastikawati, Al. Santoso, Riyanto P. Lambang

Abstract

Some cultural heritage in Indonesia is currently widely used for tourism activities. The tourism activities cause negative impacts, one is garbage. So the question arises "junk dangerous are against cultural heritage?'. Therefore, in 2003-2004 Borobudur Center of Study and Conservation conduct the study, entitled "Effects of Waste to Decay of Borobudur Stone". This study aims to determine the number and identify the types of garbage in Borobudur, determine the types of organic materials generated during decomposition of garbage, and determine the effect of organic matter produced during decomposition of garbage on the solubility of minerals rocks. The research method in this study is conducted field surveys, laboratory analysis, and experiments in the laboratory.

The study results show the composition of waste in Borobudur is 94% organic waste, 6% and 67% inorganic waste is organic waste that is easily decomposed. Based on the results of chemical and physical analyzes of stone it can be concluded that the scum on the surface of the stone for a month not affect the porosity, color, and chemical composition of the rock. The based on the results of microbiological analysis shows the influence of the waste on the growth of microorganisms on the surface of stone. Results of analysis of samples of waste fluids using infrared showed the presence of the carboxylic acid in the sample. The analysis results prove that the decomposition of waste to produce organic acids such as carboxylic acids.Carboxylic acids represented by oxalic acid capable of dissolving the elements Si, Fe, and Mg stone. The higher

concentration of oxalic acid and dissolving the longer time, couse the number of elements of Si, Fe, and Mg greater soluble stone. The greater the porosity of the stone so the more rock elements dissolved by oxalic acid. When this condition occurs in nature with a long period of time would be very possible caused stones become fragile.

Key word:

Abstrak

Beberapa cagar budaya di Indonesia saat ini banyak dimanfaatkan untuk kegiatan pariwisata.Kegiatan pariwisata tersebut menimbulkan dampak negatif, salah satunya sampah.Sehingga muncul pertanyaan"Berbahayakah sampah terhadap Cagar Budaya?". Oleh karena itu pada tahun 2003–2004 Balai Studi dan Konservasi Borobudur melaksanakan kegiatan kajian yang berjudul "Pengaruh Sampah terhadap Pelapukan Batu Candi Borobudur". Kajian ini bertujuan untuk mengetahui jumlah dan mengidentifikasi jenis sampah yang ada di Candi Borobudur, mengetahui jenis-jenis bahan organik yang dihasilkan selama proses pembusukan sampah, dan mengetahui pengaruh bahan organik yang dihasilkan selama proses pembusukan sampah terhadap kelarutan mineral-mineral batuan. Adapun metode penelitian yang dilaksanakan dalam kajian ini adalah survei lapangan, analisis laboratorium, dan eksperimen di laboratorium.

Hasil kajian menunjukan komposisi sampah di Candi Borobudur adalah 94% sampah organik, 6% sampah anorganik dan 67% merupakan sampah organik yang mudah membusuk.Berdasarkan hasil analisis kimia dan fisik batu maka dapat disimpulkan bahwa adanya sampah pada permukaan batu selama satu bulan belum berpengaruh terhadap porositas, warna, dan komposisi kimia batu.Sementara itu berdasarkan hasil analisis mikrobiologi menunjukan adanya pengaruh sampah terhadap pertumbuhan mikroorganisme pada permukaan batu.Hasil analisissampel cairan sampah

menggunakan inframerah menunjukan adanya asam karboksilat dalam sampeltersebut.Hasil analisis tersebut membuktikan bahwa dekomposis sampah menghasilkan asam organik yang berupa asam karboksilat.Jenis asam karboksilat yang diwakili oleh asam oksalat mampu melarutkan unsur Si, Fe, dan Mg batu. Semakin tinggi konsentrasi asam oksalat dan semakin lama waktu pelarutan, jumlah unsur Si, Fe, dan Mg batu yang larut semakin besar. Semakin besar porositas batu, akansemakin banyak pula unsur batuan yang larut oleh asam oksalat. Bila kondisi ini terjadi di alam dengan kurun waktu yang lama tentu akan sangat mungkin mengakibatkan batu menjadi lapuk.

Kata kunci: *sampah, pelapukan, cagar budaya.*

A. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Beberapa Cagar Budaya di Indonesia saat ini banyak yang dimanfaatkan sebagai objek wisata seperti Candi Borobudur, Prambanan, Gedong Songo, Dieng, Keraton, dan sebagainya.Pemanfaatan tersebut bertujuan untuk pendidikan kepada masyarakat, menambah devisa negara, dan pendapatan daerah. Namun akibat dari pemanfaatan tersebut menimbulkan dampak negatif dengan timbulnya berbagai masalah.Terutama masalah yang ditimbulkan oleh pengunjung. Pihak pengelola telah membuat aturan atau larangan untuk mencegah hal tersebut seperti larangan corat-coret, larangan membuang sampah sembarangan, dan sebagainya. Namun pada kenyataannya, aturan-aturan tersebut masih dilanggar, seperti pengunjung membuang sampah sembarangan di sekitar Cagar Budaya.Pertanyaan yang muncul "berbahayakah sampah terhadap Cagar budaya?".

Sampah adalah segala benda atau bahan yang terbentuk karena kegiatan manusia yang tidak dipakai, tidak disenangi, dan kemudian dibuang. Sampah dapat berbentuk padat, cairan maupun gas.Sampah yang berasal dari tempat umum seperti tempat

hiburan, olah raga, tempat ibadah dan lain-lain dapat berupa kertas pembungkus, sisa makanan, plastik dan lain-lain.Berdasarkan bahan penyusunnya sampah dibedakan menjadi dua yaitu sampah organik dan sampah anorganik.Sampah organik antara lain sisa makanan, puntung rokok, kotoran manusia, serasah daun, bungkus makanan, biji-bijian, buah-buahan dan lain-lain. Sedangkan sampah anorganik berupa sampah yang berasal dari kaca dan logam seperti pecahan botol, kaleng minuman, abu dan sebagainya.

Berdasarkan lamanya sampah terurai, sampah dibedakan menjadi sampah lambat terurai dan sampah cepat terurai. Sampah yang lambat terurai seperti plastik, kaleng minuman dan lain sebagainya. Secara teknis sampah jenis ini akan menyebabkan kerusakan terhadap cagar budaya. Karena sampah-sampah tersebut dapat menyumbat saluran drainase.Sedangkan sampah yang cepat terurai adalah sisa makanan, kotoran manusia dan lain sebagainya. Sisa makanan ini mengakibatkan proses pembusukan dengan mengeluarkan zat yang bersifat asam dan menyebabkan pertumbuhan jamur serta bakteri yang akan berpengaruh terhadap batuan Candi Borobudur. Untuk mengetahui pengaruh sampah tehadap kelestarian benda cagar budaya, rumusan masalah penelitiannya adalah "Bagaimanakah pengaruh sampah terhadap pelapukan batu Candi Borobudur?".

2. Maksud dan Tujuan

Maksud dari kajian ini adalah ingin mendeskripsikan pengaruh sampah terhadap batu Candi Borobudur. Adapun tujuan kajian ini adalah sebagai berikut.

a. Mendeskripsikan jumlah dan mengidentifikasi jenis sampah yang adadi Candi Borobudur.
b. Mendeskripsikan jenis-jenis bahan organik yang dihasilkan selama proses pembusukan sampah.
c. Mendeskripsikan sifat-sifat kimia dari bahan organik yang dihasilkan selama proses pembusukan sampah.

d. Menemukan pengaruh bahan organik yang dihasilkan selama proses pembusukan sampah terhadap kelarutan mineral-mineral batuan.

B. TINJAUAN PUSTAKA

Pengertian dan Klasifikasi Sampah

Sampah adalah sebagian dari benda-benda atau hasil-hasil yang dipandang tidak digunakan, tidak dipakai,tidak disenangi dan harus dibuang, sedemikian rupa sehingga tidak menganggu lingkungan hidup. Pengertian lain, sampah adalah semua jenis buangan atau kotoran yang berasal dari berbagai sumber, seperti rumah tungga, perkantoran, penginapan, hotel, rumah makan, bangunan umum, pabrik industri, pasar temasuk puing-puing atau sisa-sisa bangunan dan besi tua (bekas) kendaraan bermotor.

Sampah mengandung berbagai bahan pencemar seperti pencemar biologis yang terdiri atas bakteri, jamur, virus protozoa dan sebagainya, baik yang protogen maupun tidak, pencemar anorganik seperti kaleng, kaca besi, plastik, kain dan sebagainya. Pencemar bahan toksik (beracun) seperti sisa obat-obatan, baterai, asbes dan sebagainya (Daryanto, 1995;98).

Adapun klasifikasi sampah berdasarkan zat kimia yang terkandung didalamnya dibagi menjadi sampah anorganik berupa logam, pecahan gelas, dan abu.Sedangkan sampah organik berupa sisa makanan, kertas, plastik, daun-daunan, sisa sayur-sayuran, buah-buahan dan sebagainya.Klasifikasi sampah berdasarkan dapat tidaknya dibakar adalah sampah yang mudah dibakar (seperti kertas, karet, plastik, kain, kayu), dan sampah yang tidak dapat dibakar (seperti kaleng, sisa potongan besi, gelas, abu). Sedangkan klasifikasi berdasarkan dapat tidaknya membusuk sampah dibedakan menjadi sampah yang sukar membusuk (seperti kaleng, pecahan gelas, plastik, karet), dan sampah yang mudah membusuk (seperti potongan daging, sisa makanan, sisa daun, buah) (Daryanto 1995:103).

Pengaruh Sampah secara Umum

Sampah akan berdampak buruk terhadap lingkungan ketika sampah tidak dikelola dengan baik. Dampak negatif dari sampah yang tidak dikelola dengan baik adalah sebagai berikut:

- Insiden penyakit meningkat, misalnya penyakit saluran pencernaan (diare, kolera, tipus) demam berdarah, penyakit kulit dan sebagainya. Potong-potongan besi dapat melukai anggota tubuh.
- Mengganggu estetika lingkungan.
- Menimbulkan bau, abu, dan polusi udara lainnya terutama bila sampah dibakar.
- Sampah yang masuk kedalam saluran air dapat menyebabkan turunnya kualitas air, mencemari air permukaan,dan menyebabkan banjir.
- Bila air menjadi asam karena pembusukan sampah, akan-mempercepatkerusakan fasilitas pelayanan masyarakat seperti jalan, jembatan, dan sebagainya.
- Pengolahan sampah yang kurang baik mencerminkan keadaan status sosial masyarakat di daerah tersebut.

Sampah juga dapat menimbulkan gangguan keseimbangan lingkungan, kesehatan dan keamanan, serta pencemaran. Gangguan tersebut antara lain:

- Sampah dapat menimbulkan pencemaran atau pengotoran, pencemaran dapat berupa udara kotor karena mengandung gas-gas yang terjadi dari perombakan sampah, bau tidak enak, daerah menjadi becek, dan kadang-kadang berlumpur pada saat musim hujan.
- Sampah bertumpuk-tumpuk dapat menimbulkan kondisi tidak sesuai dengan lingkungan yang normal. Tumpukan sampah menyebabkan kenaikan suhu dan perubahan pH menjadi asam atau terlalu basa, keadaan demikian akan-mengakibatkan terganggunya kehidupan di lingkungan sekitarnya.
- Kekurangan oksigen pada daerah pembuangan sam-

pah. Keadaan ini karena perombakan sampah menjadi senyawa-senyawa sederhana memerlukan oksigen yang diambil dari udara sekitarnya. Bila dibiarkan terus menerus akansemakin parah dan dapat mengakibatkan tanah menjadi gersang atau kurus.

- Gas-gas yang dihasilkan selama degradasisampah dapat membahayakan kesehatan dan kadang-kadang beracun dan dapat mematikan.
- Berbagai penyakit akan timbul dari sampah yang di tularkan lewat lalat, tikus, anjing,atau binatang lainnya.
- Sampah digolongkan sebagai pemandangan yang tidak nyaman dinikmati.

Proses Pembusukan Sampah

Pembusukan *(putrefaction)* merupakan proses peruraian yang hasil akhirnyaberbau busuk, seperti halnya yang terjadi pada peruraian daging atau ekstra daging yang pada prinsipnya merupakan peruraian protein. Sedangkan fermentasi merupakan proses-proses yang menghasilkan alkohol atau asam-asam organik, seperti yang terjadi pada peruraian ekstrak yang berasal dari bahan makanan yang mengandung karbohidrat (Jutono, 1997).

Proses mineralisasi adalah poses menghancurkan bahan organik yang berasal dari binatang dan tanaman menjadi senyawa anorganik yang sederhana. Kegiatan ini dilakukan oleh mikroorganisme (bakteri, cendawan, *aktinomicetes*). Perubahan secara fisik maupun kimiawi yang sederhana oleh mikroorganisme tanah disebut proses dekomposisi (pembusukan/pelapukan) atau kadang-kadang disebut mineralisasi. Proses dekomposisi sangat membantu tersedianya zat-zat organik tanah yang merupakan hara bagi tanaman (Sutedjo, M.M dkk, 1991).

Leachate atau air luruhan sampah didifinisikan sebagai cairan yang melewati sampah padat, dimana cairan tersebut mengekstraksi material organik yang ada di dalam sampah kemudian larut dan tersuspensi dalam cairan tersebut (Tchoba-

noglous, 1997). *Lachate* termasuk dari dekomposisi sampah akibat aktivitas mikrobia yang mengubah menjadi bentuk yang lebih sederhana. Pada mulanya sampah terdekomposisi secara aerobik, tetapi setelah oksigen didalamnya habis, mikroorganisme utama yang bekerja adalah mikroorganisme fakultatif anaerob yang menghasilkan gas methan. Karakteristik peruraian secara aerobik adalah timbulnya karbon diaoksida, air,asam organik, nitrogen, amoniak dan lain-lain. Reaksi kimia proses dekomposisi secara aerobik dijelaskan sebagai berikut:

$$n(C_6H_{12}O_6) + 6n(CO_2) \longrightarrow 6\ n\ (CO_2) + 6nH_2O + n(688\ \text{kalori})$$

Reaksi kimia secara anaerobik

$$COOH.COOH \longrightarrow 2CH_4 + 14CO + 4H_2O$$ (Surawiria, 1996)

Menurut Tchobanoglous (1993), lindi atau *leachate* mengandung zat organik dengan konsentrasi tinggi, termasuk juga logam berat. Karakteristik utama dalam *leachate* antara lain: zat organik, kalsium (Ca), besi (Fe) dan nitrat (Na_2).

Proses Pelarutan Oksida Logam

Pada subbab sebelumnya telah dijelaskan bahwa salah satu hasil peruraian sampah adalah asam-asam organik. Secara teoretis, asam organik dapat dilarutkan oksida logam. Menurut Stumm (1995), proses pelarutan oksida logam dalam larutan asam organik dapat berlangsung karena asam organik dapat berfungsi sebagai asam lemah, reduktor maupun ligan pengompleks. Asam organik yang dapat berperan sebagai asam lemah, reduksi, dan pembentuk kompleks adalah asam oksalat.Kecepatan pelarutan oksida logam dalam media asam organik dapat dipengaruhi oleh pH maupun konsentrasi larutan media tersebut. Proses pelarutan oksida logam dalam suatu media asam organik

secara umum melalui tahap :

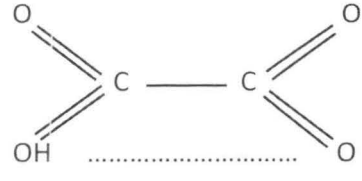
a. Pengikatan *reaktan* seperti H_2O, H^+, ligan, reduktan, dan oksidan dari media ke dalam situs permukaan oksida logam yang berlangsung cepat.
b. Pelepasan spesies logam dari sedimen ke dalam media pelarut berlangsung secara lambat.

Asam Oksalat

Asam oksalat dipilih dalam penelitian ini karena dapat bertindak sebagai asam lemah, pereduksi, dan ligan pembentuk kompleks sehingga dapat mewakili asam-asam organik yang lain. Penelitian tentang pelarutan dengan asam oksalat telah banyak dilaporkan. Furrer da Stumm (1986) telah melakukan penelitian tentang proses pelarutan oksida Al dari Al_2O_3dalam asam oksalat melalui proses protonasi, reduksi, dan pembentukan kompleks. Hasil penelitian menunjukan bahwa menurunnya pH dan meningkatnya konsentrasi asam oksalat dapat menaikan kecepatan pelarutan Al (Aluminium).Asam oksalat merupakan asam dikarboksilat. Reaksi disosiasinya dapat dituliskan sebagai berikut:

HOOC-COOH $\leftrightarrow$ OOC-COOH $\leftrightarrow$ OOC-COO

Konstanta disosiasi asam (Ka) dari asam oksalat adalah Kał1= 5,4 x 10^{-2} dan Ka2= 5,4 x 10^{-5}. Menurut Morrison dan Boyd (1973) dalam (Himawan, I. 2004), menyatakan gugus-



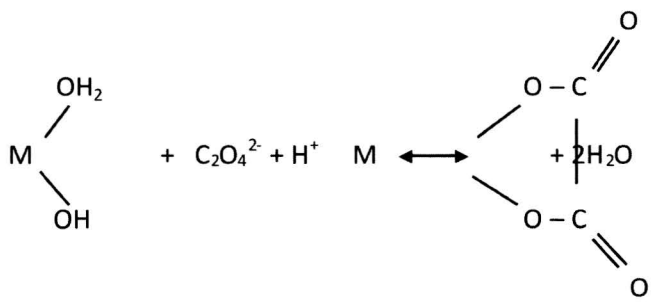
gugus karboksil dari asam oksalat adalah gugus yang dapat menarik elektron sehingga dapat menstabilkan muatan negatif dari ion monokarboksilat dan dapat membentuk ikatan hidrogen.

Gugus-gugus karboksil yang kaya elektron dari asam oksa-

lat dapat mentransferkan elektron ke dalam pusat logam.Hal ini menyebabkan kehilangan sebuah elektron dari asam oksalat dan membentuk ion radikal, asam oksalat dapat mereduksi MnO_2 dan Fe^{3+} (Forstner dan Wittmann, 1983). Menurut Stone dan Morgan (1984), akhir dari reaksi reduksi oksidasi akan kehilangan gas CO_2 dengan reaksi sebagai berikut :

$$H_2C_2O_22CO_{2(gas)} \longleftrightarrow + 2H^+ + 2^-$$

Selain itu menurut Furrer dan Stumm (1983), asam oksalat dapat bertindak sebagai ligan pembentuk kompleks yang terbentuk dari ligan-ligan bidentat seperti dikarbosilat dengan oksida logam akan membentuk senyawa kompleks khelat sehingga akan meningkatkan kelarutan reaksi pembentukan senyawa kompleks yang formulasinya dapat ditulis sebagai berikut:



Batuan

Bantuan merupakan kumpulan dari mineral-mineral, dapat berasal dari satu jenis mineral ataupun berbagai jenis mineral. Mineral batuan adalah suatu zat padat dari unsur kimia atau persenyawaan kimia yang dibentuk dari proses anorganik dan mempunyai susunan kimiawi tertentu dengan penempatan atom-atom secara berurutan didalamnya, maka setiap mineral mempunyai sifat fisik dan kimiawi tersendiri(Graha, 1987).

Batuan penyusun Candi Borobudur, untuk batu kulit adalah jenis andesit, baik batu polos maupun batu relief.Batuan tersebut diperkirakan diambil dari sungai Krasak berdasarkan kesamaan sifat-sifat batuannya dengan yang ada pada Candi Borobudur.

Batu isian candi sebagian terdiri atas batu konglomerat tuff (Aryanto, 1993).Untuk itu dalam penelitian ini menggunakan batu andesit.

Batu andesit adalah batuan yang terbentuk pada temperatur menengah dan banyak mengandung mineral andesine. Batu andesit mempunyai komposisi mineralogi piroksin, plagiaklas, kwarsa, dan feldspar. Piroksin merupakan mineral berwarna gelap-hitam, dan termasuk mineral mafik karena kaya akan magnesium dan besi. Piroksinterutama terdiri atas mineral augit Ca (MgFe $)_2(SiO_2)((AlFe)_2O_3)$. Kwarsa mempunyai komposisi kimia SiO_2. Feldspar terdiri atas orthoklas ($KAlSiO_2$) sebagi sumber utama unsur K (kalium) pada batu (Surhayadi, 1984). Plangioklas tediri dari mineral-mineral $Na(AlSi_3O_8)$ dan $Ca(Al_2Si_2O_8)$ yang tercampur dalam segala perbandingan (Lange,M.et al, 1991). Plangioklas, kwarsa, dan feldsplar berwarna terang (felsik). Karena miskin akan magnesium dan besi. Menurut Graha, D.S. (1987), batu andesit mempunyai komposisi kimia sebagai berikut: SiO_2 55, 45%, FeO_3 1,39%, FeO 7,07%, MgO 3,10%, CaO 7,47%, K_2O 1,60% dan P_2O_6 0,28%.

C. METODE PENELITIAN

1. Alat dan Bahan

a. Alat

Peralatan yang digunakan selama penelitian adalah spectrometer serapan atom tipe AA-782 Nippon Jarel As, timbangan analitik, oven, blender, hot plate, thermometer, erlenmeyer ukuran 250 ml, cawan petri, tabung reaksi, pH meter, shaker, botol film, baskom plastik, dan pengaduk plastik.

b. Bahan

Bahan yang digunakan selama penelitian adalah sampel batu, medium jamur dan bakteri, asam oksalat murni

($H_2C_2O_4.2H_2O$),adonan sampah, indikator PP, sampel batu, NaOH, $NH_4Fe(SO_4)2.12H_2O$, aqudest, kertas saring, dan kapas.

2. Cara kerja

a. Klasifikasi Sampah dan Persentase Komposisi Sampah

1) Klasifikasi sampah berdasarkan mudah tidaknya membusuk yaitu sampah yang mudah membusuk antara lain sisa makanan, buah-buahan, seresah daundan lain-lain. Sedangkan sampah yang sukar membusuk antaralainkaret.

2) Klasifikasi sampah berdasarkan bahan kimia yang terkandung didalamnya yaitu organik dan anorganik. Bahan kimia organik antara lain kotoran binatang, sisa makanan, kertas, plastik, sayuran, buah, daun-daunan dan lain-lain.

3) Akumulasi sampah di atas candi

Cara ini dilakukan untuk mengetahui pada tingkat berapa akumulasi sampah mencapai tingkat tertinggi. Dilakukan dengan cara menghitung jumlah sampah pada tiap tingkat kemudian dicari jumlah sampah tertinggi dengan menggunakan persentase.

4) Perhitungan persentase komposisi sampah

Untuk memprediksijumlah sampah yang mudah membusuk pertahun dihitung terlebih dahulu berat sampah yang mudah membusuk perhari secara acak yaitu pada hari dimana candi ramai pengunjung, sedang, dan sepi pengunjung. Dengan cara ini dapat dihitungrata-rata berat sampah keseluruhan perhari (Ws). Selain itu dihitung pula rata-rata berat sampah yang sudah masuk perhari (Wb). Setelah dihitung persentase jumlah sampah yang

mudah membusuk perhari baru kemudian dihitung berat sampah yang mudah membusuk pertahun.

$$P = \frac{Wh}{Ws} x100\%$$

Keterangan:
Wb : Rata-rata berat sampah yang mudah membusuk perhari (kg)
Ws : Rata-rata berat sampah keseluruhan perhari (kg)
P : Persentase sampah yang mudah membusuk (%)

b. Simulasi Pembusukan Sampah

Sampah yang mudah membusuk seperti sisa makanan yang berbahan dasar karbohidrat (nasi, biskuit, permendan lain-lain),berbahan dasar protein (susu, yakult, dan lain-lain), buah buahan (jeruk, pisang apel, salak dan lain-lain), campuran dari berbagai jenis sampah yang mudah membusuk tersebut kemudian dibiarkan membusuk di atas batu. Setelah itu diamati pengaruh pembusukan tersebut terhadap permukaan batu.

Parameter yang diamati berupa peningkatan suhu sampah selama pembusukan, perubahan pH selama pembusukan, dan ada tidaknya perubahan warna permukaan batu yang di atasnya terdapat pembusukan sampah.

c. Menentukan Jumlah Asam Total

1) Dibuat larutan sampah dengan persentase tertentu.
2) Diambil dengan pipet 25 ml cairan sampah (*leachet*), dimasukkan ke dalam Erlenmeyer.
3) Ditambahkan indikator PP sebanyak 2-3 tetes.
4) Ditrisasi dengan larutan standar NaOH 0,1 M sampai timbul warna merah muda.

d. Standarisasi Larutan Standar NaOH 0,1 N

1) Timbang 0,126gram asam oksalat murni ($H_2C_2O_4.2H_20$), kemudian dimasukkan kedalam Erlenmeyer.
2) Ditambahkan indikator 10 ml aquadest.
3) Ditambahkan indikator PP Sebanyak 2-3 tetes.
4) Kemudian dititrasi dengan larutan NaOH yang sudah distandarisasi.

e. Pembuatan Larutan NaOH 0,1 M

Rumus larutan NaOH 0,1 M

RM NaOH = 40

Molar = mol/40

0,1 = mol/1 lt

0,1 mol = X gram / 40

X = 4 gram

1. Ditimbang 4 gram NaOH kristal (timbang cepat)
2. Hasil timbangan tadi dilarutkan dalam aquadest 1000 ml.

f. Pembuatan Larutan Asam Oksat

Pembuatan larutan asam oksalat 0,5 M, 0,75 M da 1 M dibuat dengan penimbangan 63,0 gram, 94,5 gram dan 126,0 gram Kristal $H_2C_2O_4.2H_2O$, kemudian masing-masing dimasukkan ke dalam labu takar 100 ml dan diencerkan dengan aquabidest.

g. Pembuatan Larutan Standar Fe

Larutan standar Fe 1000 ppm dibuat dengan memasukkan 8,610 gram $NH_4Fe(SO_4)_2.12H_2O$ ke dalam aqu-

abidest di dalam beker lalu dimasukkan ke dalam labu takar 1000 ml serta ditambahkan 100 ml H_2SO_4 dan diencerkan dengan aquabidest.

h. Penemuan Jenis-jenis Bahan Organik yang Dihasilkan selama Proses Pembusukan Sampah

1) Dibuat adonan sampah dengan komposisi yang sudah disesuaikan.
2) Cairan sampah diambil pada hari ke 5, 15, dan 30 sebanyak 5 sampai 10 ml.
3) Cairan sampah yang sudah diambil, dikeringkan dalam oven selama kurang lebih 6 jam pada suhu 70°C.
4) Cairan sampah yang sudah kering dianaliasa kandungan bahan organiknya menggunakan sinar inframerah di laboratorium MIPA UGM.

i. Eksperimen di Laboratorium untuk Mengetahui Pelarutan Mineral-Mineral Batuan oleh Asam Oksalat

1) Disediakan bubukan batu A dan B dengan ukuran 80 mesh masing-masing sebanyak 50 gram,kemudian bubukan tersebut dimasukkan ke dalam erlenmeyer.
2) Dalam erlenmeyer tersebut ditambahkan larutan asam oksalat dengan variasi konsetrasi 0,25 M dan aquadest murni sebagai kontrol sebanyak 200 ml.
3) Erlenmeyer dikocok menggunakan shaker dengan variasi waktu 5 hari, 15 hari, dan 30 hari.
4) Pada hari yang sudah ditentukan diambil sebanyak 50 sampai 100 ml, kemudian disaring menggunakan kertas saring.
5) Larutan tersebut kemudian dianalisis kandungan Si, Fe, dan Mg yang larut menggunakan Spektofotometri Serapan Atom atau SSA.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Akumulasi dan Komposisi Sampah di Candi Borobudur

Berdasarkan Tabel III.1. Dapat dilihat bahwa akumulasi sampah tertinggi pada tingkat XI atau di sekitar stupa induk.Rata-rata jumlah sampah di sekitar stupa induk 4.140 gram per hari sedangkan jumlah sampah terkecil pada tingkat 4 atau lorong 3 sebesar 832 gram per hari. Rata-rata jumlah sampah keseluruhan di Candi Borobudur ± 17.351 gram perhari, sehingga jumlah sampah dalam 1 tahun adalah ± 6.333.193 gram.

*Tabel 3.1.*Akumulasi Sampah pada Tiap Tingkat (gram per hari)

Hari	Tk.1	Tk.2	Tk.3	Tk.4	Tk.5	Tk.6	Tk.7	Tk.8	Tk.9
1	260	40	40	15	260	0	81	620	490
2	63	590	190	87	100	52	183	103	930
3	5140	3305	300	1100	1030	770	2320	3610	4300
4	970	610	800	590	1030	970	780	1610	3160
5	1180	2540	1880	1360	640	740	2120	2240	3400
6	1890	2170	1640	510	2135	2080	2610	3005	5780
7	1270	4640	3480	2160	1560	4220	5230	13560	10920
Jumlah	10.773	13.895	8330	5.822	6.755	8.832	13.324	24.748	28980
Rata rata	1.539	1.985	1190	832	965	1.262	1.903	3.535	4140

Lokasi di sekitar stupa induk mempunyai rata-rata sampah perhari tertinggi karena lokasi tersebut banyak dikunjungi pengunjung dan merupakan tempat istirahat sementara para pengunjung sambil menikmati pemandangan yang indah di sekitar Candi Borobudur.Berbeda dengan lorong 4 yang jarang dikunjungi pengunjung sehingga rata-rata sampah per hari rendah.

*Tabel 3.2.*Komposisi Sampah di Candi Borobudur

Hari	Berat Sampah (gram)				Komposisi Sampah (%)		
	Total	Organik	Anorganik	Mdh membusuk	Organik	Anorganik	Mdh Membusuk
1	1.806	1706	100	1143	94	6	63
2	2.298	2092	206	1467	91	9	64
3	21.875	20400	1475	17160	93	7	78
4	10520	10055	465	8025	96	4	76
5	16100	15260	840	11740	95	5	73
6	21820	19920	1900	11595	91	9	53
7	47040	45765	1275	28450	97	3	60
Jumlah	121459	115.198	6261	79580	658	42	468
Rata rata	17351	16457	894	11369	94	6	67

Berdasarkan Tabel III.2. Diketahui bahwa komposisi sampah Candi Borobudur adalah 6% merupakan sampah anorganik, 94% sampah organik, dan 67% adalah sampah organik yang mudah membusuk. Berdasarkan komposisi sampah tersebut, jumlah sampah organik yang mudah membusuk di Candi Borobudur ± 4.243.238 gram per tahun.

Sampah anorganik berupa kaleng minuman,botol minuman dari kaca, aluminium foil dan sebagainya.Sampah organik berupa plastik, sapu tangan, kaos kaki, sisa nasi, buah beserta kulitnya, roti,biskuit, daun pisang, seresah daun, kertas tissue,permen, minuman dsb.Sebagian besar sampah organik merupakan sampah yang mudah membusuk seperti sisa nasi, buah, roti, biskuit, kertas tisu, permen dan lain-lain.

2. Dekomposisi Sampah

Berdasarkan hasil pengamatan, pH sampah selama satu bulan diketahui adanya perubahan.Pada awal penelitian menunjukan pH 5, turun menjadi 4 selama kurang lebih 13 hari dan naik kembali sampai akhir penelitan menjadi 7 atau bersifat netral.Sampah yang digunakan dalam penelitian ini dihancurkan terlebih dahulu.Penghancuran sampah bertujuan untuk memper-

cepat proses dekomposisi sehingga di awal penelitian pH sampah sudah mencapai 5 (bersifat asam).

Perubahan pH sampah berakhir dengan pH netral diakhir penelitian dan dapat dijelaskan sebagai berikut. *Leachate* atau cairan sampah yang terbentuk dari proses dekomposisi sampah akibat aktifitas mikroba yang mengubahnya menjadi bentuk organik lebih sederhana. Pada mulanya sampah terdekomposisi secara aerobik, tetapi setelah oksigen didalamnya habis, mikroorganisme utama yang bekerja adalah mikroorgnisme fakultatif anaerob yang menghasilkan gas methan. Karakteristik penguraian secara aerobik adalah timbulnya karbondioksida, air, asam organik, nitrogen, amoniak dan lain-lain. Reaksi kimia pada proses dekomposisi secara aerobik dijelaskan sebagai berikut:

$$n(C_6H_{12}O_6) + 6\,n\,O_2 \longrightarrow 6\,n\,(CO_2) + 6\,H_2O + n\,(688 \text{ kalori})$$

reaksi kimia anaerobik adalah sebagai berikut :

$$COOH.COOH \longrightarrow 2\,CH_4 + 14\,CO_2 + 4\,H_2O$$

Sumber: (Suriawiria, 1996)

Adapun dekomposisi *leachate* akibat aktifitas mikrobia adalah sebagai berikut:

Tahap I, degradasi *leachate* dilakukan oleh mikroorganisme aerobik menjadi bentuk organik yang lebih sederhana, yaitu karbondioksida (CO_2) dan air (H_2O).

Tahap II, bila oksigen di udara yang tertangkap habis terkonsumsi oleh organisme aerobik dan digantikan karbondioksida (CO_2), proses degradasi diambil alih oleh organisme yang mampu berkembang biak dengan atau tanpa adanya oksigen yang tersedia. Organisme ini akan memecah molekul menjadi sederhana seperti hidrogen, amonia, air, karbondioksida, dan asam organik.

Tahap III, pada tahap ini organisme aerobik berkembang biak dan mengurai asam organik menjadi bentuk gas methan sehingga dapat dipahami mengapa diawal penelitian pH sampah bersifat asam karena diawal penelitian terbentuk asam organik dan diakhir penelitian pH cenderung bersifat netral sampai ke basa organik diurai menjadi gas methan.

Suhu sampah selama penelitian mengalami perubahan yang fluktatif atau naik turun akan tetapi secara garis besar terjadi peningkatan suhu. Peningkatan suhu sampah terjadi karena selama proses dekomposisi sampah terbentuk gas metan. Didukung oleh pernyataan Daryanto (1995), sampah yang bertumpuk tumpuk dapat menimbulkan kondisi yang tidak sesuai dengan lingkungan yang normal karena dapat menyebabkan kenaikan suhu.

3. Hasil Analisis Mikrobiologi

Berdasarkan hasil penelitian, tidak semua mikroorganisme yang berperan dalam proses pembusukan sampah dapat diisolasi dan diidentifikasi.Mikroorganisme yang diidentifikasi hanya mikroorganisme yang benar-benar tumbuh di permukaan batu percobaan khususnya berupa jamur atau cendawan karena hanya mikroorganisme tumbuh di permukaan batu yang kemungkinan besar menyebabkan pelapukan pada batu.Jamur yang berhasil diisolasi dan diidentifikasi adalah *Aspergillus sp., Penicellium sp.* dan *Cephalosporium sp.*

Berdasarkan kenyataan tersebut dapat dijelaskan mengapa mikroorganisme khususnya jamur dapat tumbuh di permukaan batu walaupun batu tidak menyediakan nutrisi mereka.Jamur dan sebagian besar bakteri merupakan tumbuhan yang bersifat heterotof.Tumbuhan bersifat heterotrof adalah tumbuhan non fotosintesis artinya tumbuhan tersebut tidak mampu membuat makanannya sendiri.Mereka tidak dapat melakukan fotosintesis karena tidak memiliki kloropas sehingga mereka hanya hidup di tempat yang dapat menyediakan nutrisi untuknya.Nutrisi mereka

berupa bahan organik seperti glukosa dan sebagainya.

Batu hanya menyediakan bahan anorganik,akan tetapi dengan adanya sampah pada permukaan batu, akan tersedia bahan organik untuk mikroorganisme heterotrof khususnya jamur. Bahan organik berasal dari cairan sampah atau *leachate*. Cairan sampah atau *leachate* yang mengandung bahan organik masuk ke dalam batuan melalui pori-pori, yang pada akhirnya akan keluar kembali pada sisi permukaan yang lain. Bahan organik pada permukaan batu yang akan menjadi media tumbuhnya jamur.

Berdasarkan uraian di atas, jika ditinjau dari pelapukan biologis, kemungkinan sampah secara tidak langsung dapat menyebabkan pelapukan batuan.Sampah menyediakan bahan organik untuk pertumbuhan jamur dan sebagian besar bakteri atau lebih tepatnya sampah menyediakan nutrisi untuk pertumbuhan mikroorganisme pada batu.Sementara jamur dan bakteri dalam metabolismenya dapat menghasilkan bahan organik yang bersifat sangat asam atau basa. Dibuktikan dengan perubahan pH medium yaitu *Aspergillus sp.* mengubah pH medium dari 7 menjadi 4, *Cephalosporium sp.* dari pH 7 menjadi 9 sementara itu *Penicellium sp.* tidak menyebabkan perubahan pH medium.

Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan *Aspergillus sp.* menghasilkan zat organik yang bersifat asam dan *Cephalosporium sp.* menghasilkan zat organik yang bersifat basa.Didukung pernyataan Sadirin (1981), jamur dan bakteri dalam metabolismenya dapat menghasilkan asam organik.Asam dan basa ini dapat melarutkan sebagian besar mineral batuan.

Dalam *Water Movement in Porous Solid* dijelaskan hasil reaksi bakteri tertentu dapat berbentuk asam, baik kuat maupun lemah yang dapat mengkorosi material bangunan yang sensitif terhadap asam. Tipe-tipe bakteri dan jamur tertentu memperoleh energinya dari oksidasi bahan organik dan menghasilkan asam organik, sebagai hasil akhir reaksi.Salah satunya yaitu asam

oksalat, fakta ini didukung dengan sejumlah penemuan kalsium diantara material yang ada pada permukaan batu kuno.

4. Hasil Analisis Fisik Batu

Hasil analisis fisik batu percobaan dan batu kontrol ditunjukan dalam tabel III.3. (yang dimaksud batu percobaan adalah batu yang dikenai perlakuan sedangkan batu kontrol batu yang tidak dikenai perlakuan). Perbedaan antara porositas batu percobaan dengan batu kontrol dapat dikatakan tidak ada karena selisihnya belum mencapai 10%.Demikian juga dengan warna batu antara batu kontrol dengan batu percobaan belum ada perbedaan.Berdasarkan hasil tersebut, dapat dikatakan bahwa setelah perlakuan selama kurang lebih satu bulan belum ada pengaruh sampah terhadap porositas dan warna batu percobaan.

Tabel 3.3. Rata rata porositas batu percobaan dan batu kontrol

No	Batu Kontrol	Batu Percobaan
A	33,11	31,73
B	15,08	15,72
C	30,56	30,39

Berdasarkan pengamatan secara visual terlihat adanya pengaruh yang disebabkan oleh perbedaan porositas batu. Terbukti batu A yang mempunyai porositas paling tinggi (33,11%) pada permukaannya ditumbuhi jamur, sedangkan batu B dan C yang lebih kompak dari batu A tidak ditumbuhi jamur sampai akhir penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa semakin porus batu akan semakin cepat dan banyak ditumbuhi mikroorganisme. Hal ini disebabkan batu porus akan lebih cepat dan lebih banyak menyerap cairan sampah.

5. Hasil Analisis Kimia Anorganik

Hasil analisis kimia tabel 3.4 menunjukan tidak ada perbedaan nyata komposisi kimia antara batu kontrol dengan batu percobaan.Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa adanya sampah pada permukaan batu selama 1 bulan belum berpengaruh terhadap kandungan SiO_2.Begitu juga dengan kandungan Ca dan Fe batu percobaan.Sementara itu berdasarkan teori menurut Tchobanoglous (1993), lindi atau *leachate* mengandung zat organik dengan konsentrasi tinggi,termasuk juga logam berat. Karakteristik utama dalam *leachate* antara lain: zat organik, kalsium (Ca), besi (Fe), dan nitrat (Na_2).

Jika dikaitkan antara hasil analisis kimia dengan teori seperti bertentangan karena sampah seharusnya meningkatkan kandungan Fe dan Ca batu.Kemungkinan ini terjadi karena waktu ekperimen yang hanya satu bulan sehingga dapat dikatakan adanya sampah selama satu bulan pada permukaan batu belum dapat menyebabkan pelapukan batu karena belum ada perubahan komposisi kimia batu.

Tabel 3.4 Kandungan Kimia Batu Percobaan dan Batu Kontrol

Sampel	Parameter yang dianalisis			
	SiO	Ca	Mg	Fe
A rata rata	40,59	3,54	5,53	6,31
kontrol	41,40	3,86	5,06	6,53
B rata rata	42,70	4,37	5,40	4,66
kontrol	41,94	4,17	5,11	4,24
C rata rata	39,91	4,54	5,28	4,73
kontrol	40,12	4,21	5,13	4,0

6. Pengaruh Sampah Terhadap Pelapukan Batu Candi Borobudur

Berdasarkan hasil pengambilan sampel sampah di Candi Borobudur, dapat disimpulkan bahwa sampah di tempat ini sebagian besar merupakan sampah organik yang mudah membusuk sedangkan sebagian kecil merupakan sampah anorganik.Apabila hasil ekperimen dikaitkan dengan keadaan sebenarnya di lapangan, sampah di Candi Borobudur belum mengakibatkan pelapukan karena sampah di Candi Borobudur dibersihkan secara rutin setiap hari.Seandainya sampah di tempat ini dibiarkan menumpuk selama satu bulan, sampah hanya berpengaruh terhadap pertumbuhan mokroorganisme. Sementara itu belum berpengaruh terhadap porositas, warna dan kandungan kimia batu.

Bagaimana jika sampah tersebut dibiarkan bertumpuk-tumpuk sampai bertahun-tahun? Seperti telah dijelaskan di atas, proses dekomposisi sampah dapat menghasilkan zat yag besifat asam maupun basa serta terjadinya peningkatan suhu. Asam dan basa dapat bereaksi dengan mineral batuan yang bila dibiarkan dalam jangka waktu yang lama akan melarutkan sebagian besar mineral batuan.

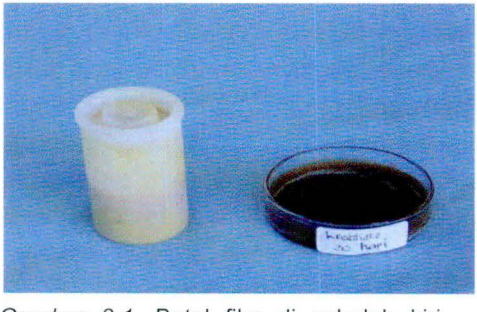
Meningkatnya suhu sampah akan diserap oleh batu karena batu merupakan benda yang bewarna gelap sehingga bersifat menyerap panas. Peningkatan suhu ini akan menyebabkan batu memuai. Bila kondisi ini dibiarkan dan terjadi secara berulang-ulang, lama-kelamaan mineral batuan akan rapuh. Ditinjau dari sudut pelapukan biologis, sampah akan sangat berbahaya karena dalam jangka satu bulan saja dapat memacu pertumbuhan mikroorganisme perusak batu apalagi bila dibiarkan sampai dalam hitungan tahun.

7. Jenis-Jenis Bahan Organik Hasil Proses Pembusukan Sampah oleh Mikrobia

Berdasarkan hasil analisis cairan sampah menggunakan metode spektrofotometri inframerah didapatkan data sebagai berikut:

Tabel 3.5. Bilangan Gelombang, Gugus Fungsi dan Intensitas

No	Bilangan Gelombang (nm)	Gugus Fungsi	Intensitas (%)		
			5 hari	15 hari	30 hari
1	3386-3425	-OH	1.27	25.00	16.00
2	2900	-OH	4.45	31.00	15.00
3	1740	-C-O	8.90	39.14	23.00
4	1600	-C-H	36.00	24.00	36.00
5	1377	-C-H	6.50	36.80	26.22
6	1236	-C-O	7.30	-	-
7	1150	-C-H	-	33.77	-
8	1020	-C-O	0.74	29.43	22.32
9	929	-C-H	11.00	42.77	30.19
10	856	-C-H	14.00	45.06	31.00
11	516-575	-C-H	5.70	38.16	26.96
12	466	-C-H	9.40	41.00	29.13



Gambar 3.1. Botol film di sebelah kiri berisi leacheat yang berasal dari sampah yang membusuk. Di dalam petridish merupakan cairan sampah yang telah dikeringkan, bahan ini siap untuk dianalisis menggunakan inframerah

Kehadiran gugus OH, CH, C=O, C-O dalam cairan sampah menunjukan semua sampel (sampel yang dianalisis seperti yang terlihat pada Gambar 3.1) mengandung asam karboksilat (CnH_2n+1 COOH). Namun demikian, jenis asamnya belum diketahui secara pasti.Untuk mengetahui jenis asam masih perlu diteliti lebih lanjut

dengan menggunakan metode kromatografi gas atau kromatografi cair tekanan tinggi (HPLC).

Adanya asam karboksilat membuktikan hasil dekomposisi sampah antara lain: berupa asam organik. Karakteristik peruraian sampah antara lain timbulnya asam organik (Suriawiria, 1996).Sel tanaman mengandung asam sitrat, quinat dan shikimat. Asam-asam ini dilepaskan setelah mereka mati. Dengan melapuknya jaringan tanaman yang diserang mikroflora akan menghasilkan antara lain asam format, asetat, propionat, butirat, laktat, malat, suksinat, oksalat dan lain-lain (*Huang* dan *Schnitzer*, 1997).

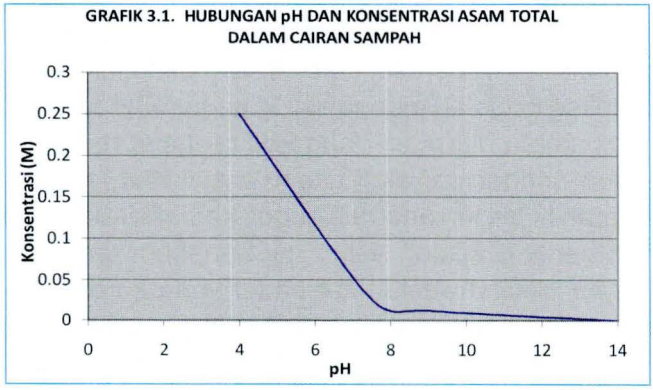
Asam karboksilat adalah suatu senyawa yang mengandung gugus karboksil yang berasal dari karbonil dan hidroksil.Sifat fisik asam karboksilat adalah mengandung gugus -OH sehingga dapat membentuk ikatan hidrogen.Yang kedua dapat membentuk ikatan hidrogen dengan molekul asam karboksilat lainnya dimana terjadi 2 ikatan hidrogen antara 2 gugus karboksil.Beberapa asam karboksilat penting adalah asam asetat, asam tartat dan asam oksalat.Asam oksalat adalah zat padat yang korosif dan racun, serta merupakan asam yang sangat kuat (Fessenden dan Fessenden, 1997).Oleh karena itu tepat kiranya dalam penelitian ini menggunakan asam oksalat untuk mewakili asam organik sebagai hasil dekomposisi sampah.

Perbandingan intensitas dari ketiga sampel menunjukan bahwa intensitas tertinggi untuk semua puncak dimiliki oleh sampel 15 hari, diikuti 30 hari, dan terendah adalah sampel 5 hari. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah asam dalam sampel 5 hari paling sedikit kandungan asam karboksilatnya.Jumlah tersebut meningkat dengan semakin lamanya waktu pembusukan (15 hari).Namun untuk waktu yang lebih lama lagi (30 hari) jumlah asam berkurang, meskipun lebih tinggi dari 5 hari.Menurunnya jumlah tersebut disebabkan oleh terurainya asam-asam yang terbentuk menjadi molekul yang lebih kecil, misalnya CO_2 dan H_2O.

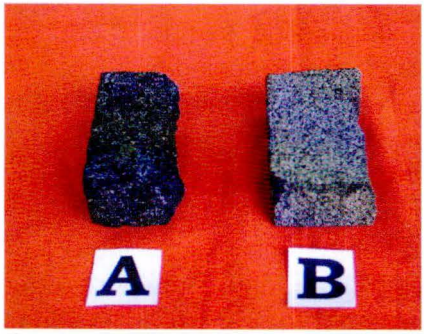
Selain itu dengan semakin lamanya waktu pembusukan juga dimungkinkan terbentuknya amonia (NH_3) hasil peruraian

protein.Terbentuknya amonia ditandai dengan meningkatnya pH larutan.Grafik 3.1.menunjukan hubungan antara pH dengan konsentrasi asam. pH dan konsentrasi asam berbanding terbalik. Artinya jika pH naik, konsentasi asam menurun dan sebaliknya. Jika pH menurun, konsentrasi asam akan naik. Pada awal proses dekomposisi sampah konsentrasi asam rendah, kemudian meningkat diikuti dengan penurunan pH, tetapi pada akhir penilitian konsentrasi asam menurun kembali diikuti dengan kenaikkan pH.

Grafik 3.1. Hubungan pH dan konsentarasi asam total dalam cairan sampah



8. Hasil Penentuan Sifat Fisik dan Kimiawi Batu



*Gambar 3.2.*Jenis batu andesit yang digunakan dalam percobaan. A contoh batu andesit yang porus sedangkan B contoh batu andesit yang kompak

Sampel batu yang digunakan adalah batu andesit dengan sifat fisik dan kimiawi berbeda. Sebelum digunakan sebagai bahan kajian sampel batu dianalisis secara fisik dan kimiawi. Hasil analisis secara fisik menunjukan batu A mempunyai porositas 33,11% sedangkan batu B 15,08% sehingga batu A lebih porus dibandingkan dengan batu B.

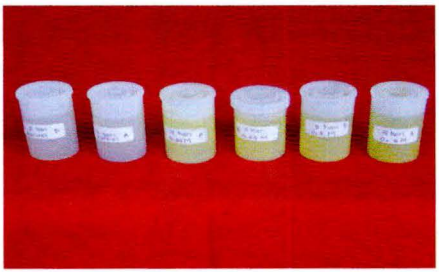
Hasil analisis secara kimiawi mengunakan metode gravimetri menunjukan kandungan silika (Si) batu A sebesar 41,40% dan batu B sebesar 41,94%. Kandungan besi (Fe) dan magnesium (Mg) dianalisis menggunakan metode titrasi menunjukan kandungan Fe batu A sebesar 6,53% sedangkan batu B sebesar 4,24 %. Kandungan Mg batu A sebesar 5,06% sedangkan batu B sebesar 5,11%.

9. Penentuan Persentase Silika (Si), Fe dan Mg Terlarut

Jumlah silika (Si), magnesium (Mg) dan besi (Fe), yang terlarut dalam asam oksalat dianalisis mengunakan metode SSA atau Spektofotometri Serapan Atom. Hasil analisis SSA dalam satuan ppm (part permillion atau milligram perliter) kemudian dikonversi dalam bentuk persen (%), sehingga persentase silika terlarut dapat dihitung. Persentase silika (Si), magnesium (Mg) dan besi (Fe) terlarut merupakan perbandingan silika (Si), magnesium (Mg) dan besi (Fe) yang larut per kandungan silika (Si), magnesium (Mg) dan besi (Fe) total dalam batu kali 100 %

Gambar 3.3. Bubukan batu (kiri batu A, kanan batu B), yang dilarutkan dalam aquadest (abu-abu) sebagai kontrol, asam oksalat 0,25 M (tengah) dan 0,5 M (pinggir kanan).

10. Pelarutan Silika (Si), Magnesium (Mg), dan besi (Fe) dalam Asam Oksalat



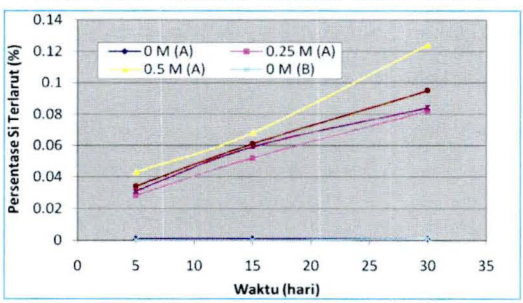
Gambar 3.4 Cairan yang telah disaring dan siap untuk dianalisis menggunakan metode analisis serapan atom

Proses pelarutan silika (Si), magnesium (Mg) dan besi (Fe) dapat berlangsung karena asam organik dapat berfungsi sebagai asam lemah, reduktor, maupun ligan pengompleks. Asam oksalat adalah asam organik yang dapat berperan sebagai asam lemah, reduksi dan pembentuk kompleks (Stumm, 1995). Kecepatan pelarutan oksida logam dalam media asam organik dipengaruhi oleh konsentarasi larutan media tersebut. Proses pelarutan oksida logam dalam suatu media asam organik secara umum melalui tahap:

- Pengikatan reaktan seperti H_2O, H^+, ligan, reduktan dan oksidan dari media ke dalam situs permukaan oksida logam berlangsung cepat.
- Pelepasan spesies logam dari sedimen ke dalam media pelarut berlangsung secara lambat.

Hasil pelarutan ketiga unsur tersebut disajikan dalam bentuk grafik sebagai berikut:

Grafik 3.2. Pelarutan didalam asam oksalat



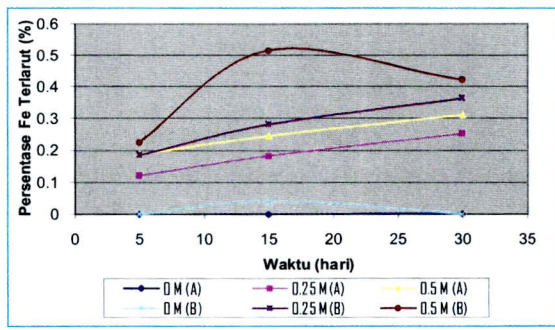
Berdasarkan Grafik 3.2 pelarutan Si dalam batu oleh asam oksalat menunjukan bahwa asam organik khususnya asam oksalat dapat melarutkan silika batu. Terlihat adanya perbedaan pelarutan antara kontrol/air (0 M) dengan perlakuan 0,25 M dan 0,5 M. Pelarutan Si dalam air mendekati 0%. Hal ini menunjukan pelarutan Si oleh asam oksalat lebih besar dibandingkan oleh air.Grafik tersebut juga menunjukan semakin tinggi konsentrasi asam oksalat dan semakin lama waktu pelarutan maka semakin besar persentase Si yang larut pada kedua jenis batu.

Kelarutan Si dalam asam oksalat pada batu A sebesar 0,124% sedangkan batu B sebesar 0,095%. Hal ini kemungkinan karena batu A lebih rapuh dari pada batu B, didukung pula oleh hasil analisis fisik yang menunjukan porositas batu A lebih besar dibandingkan dengan batu B.

Menurut *Huang* dan *Schnizel* (1997), air melepaskan Silika (Si) dari ikatannya terutama melalui proses hidrolisis sedangkan asam melalui pengompleksan. Mekanisme utama dalam penghancuran silika oleh asam organik adalah dengan pelarutan asam. Reaksi kimia antara air dan silika menurut *Stumm* (1994) sebagai berikut:

$$SiO_2 + H_2O \longrightarrow H_4SiO_4\,(aq)$$

Grafik 3.3. Pelarutan Fe didalam asam oksalat

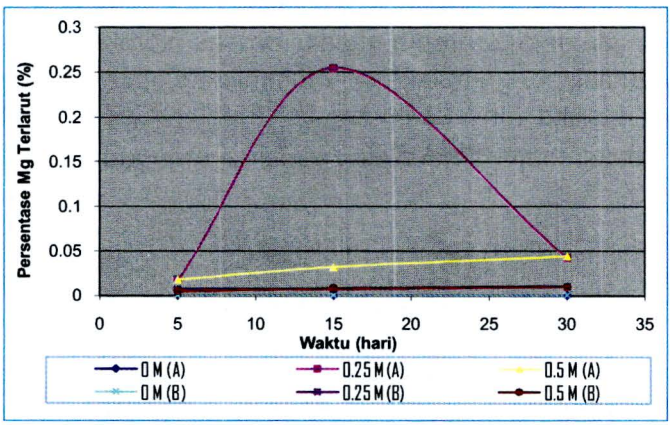


Grafik 3.3 di atas menunjukan bahwa Fe (besi) dalam batu dapat larut oleh asam oksalat. Terdapat perbedaan pelarutan

antara kontrol (0 M) dengan perlakuan 0,25 M dan 0,5 M. Hal ini menunjukan besi lebih mudah larut oleh larutan asam oksalat dibandingkan oleh air. Persentase kelarutan tertinggi unsur Fe pada batu B dalam larutan asam oksalat sebesar 0,516% sedangkan pada batu A sebesar 0,311%.

Menurut Stumm (1981), proses pelarutan ion H^+ dan anion oksalat pada permukaan membentuk spesies aktif. Terbentuknya spesies aktif dapat mempolarisasi dan memperlemah ikatan Fe dari senyawanya yang akhirnya dapat menyebabkan terlarutnya Fe ke dalam larutan. Jika pelarutan melalui protonasi, Fe akan terlarut sebagai ion-ionnya, jika melalui pembentukan kompleks, Fe akan terlarut sebagai Fe-oksalat sedangkan melalui reduksi, Fe yang terlarut dapat berupa ion Fe(II).

Grafik 3.4. Pelarutan Mg didalam asam oksalat



Grafik 3.4 menunjukan Mg dalam batu dapat larut oleh larutan asam oksalat.Kelarutan Mg lebih besar dalam asam oksalat dibandingkan dalam air.Terdapat perbedaan persentase Mg yang larut dalam air (0 M) dan dalam asam oksalat. Persentase kelarutan tertinggi unsur Mg dalam asam oksalat untuk batu A sebesar 0,254% sedangkan batu B sebesar 0,010%.

Grafik 3.2, 3.3 dan 3.4 menunjukan bahwa semakin lama waktu pelarutan, jumlah Si, Fe dan Mg yang larut semakin tinggi.

Selain itu semakin tinggi konsentrasi asam oksalat maka jumlah Si, Fe, dan Mg larut juga semakin tinggi.Dari ketiga unsur yang terdapat dalam batu maka Fe paling tinggi kelarutanya dalam asam oksalat.Hal ini terjadi karena Fe merupakan logam peralihan yang mempunyai kecenderungan lebih besar untuk membentuk ikatan kompleks dibandingkan dengan Si dan Mg.

E. KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Lokasi di sekitar stupa induk mempunyai jumlah sampah tertinggi, sedangkan di lorong ke-3 mempunyai jumlah sampah paling rendah. Komposisi sampah di Candi Borobudur adalah 94% sampah organik, 6% sampah anorganik dan 67% merupakan sampah organik yang mudah membusuk.

Berdasarkan hasil analisis kimia dan fisik batu, dapat disimpulkan bahwa adanya sampah pada permukaan batu selama satu bulan belum berpengaruh terhadap porositas, warna, dan komposisi kimia batu.Sementara itu berdasarkan hasil analisis mikrobiologi menunjukan adanya pengaruh sampah terhadap pertumbuhan mikroorganisme pada permukaan batu.

Hasil analisis cairan sampah menggunakan inframerah menunjukan adanya asam karboksilat dalam sampel tersebut. Hal ini membuktikan bahwa dekomposisi sampah menghasilkan asam organik yang berupa asam karboksilat.

Jenis asam karboksilat yang diwakili oleh asam oksalat mampu melarutkan unsur Si, Fe dan Mg batu. Konsentrasi asam oksalat 0,25 M dan 0,5 M mampu melarutkan ketiga unsur tersebut. Terbukti dengan hasil analisis menggunakan analisis serapan atom menunjukan kelarutan tertinggi unsur Si, Fe dan Mg batu berturut-turut adalah 0,124%, 0,516% dan 0,254%. Semakin tinggi konsentrasi asam oksalat dan semakin lama waktu pelarutan, maka jumlah unsur Si, Fe dan Mg batu yang larut semakin besar.

Si mempunyai kecenderungan untuk larut melalui mekanisme pelarutan asam sedangkan Fe mempunyai kecenderungan lebih besar untuk membentuk ikatan kompleks karena Fe merupakan logam transisi.Oleh karena itu dari ke-3 unsur yang dianalisis maka Fe mempunyai kelarutan paling tinggi dalam larutan asam oksalat.

Hasil analisis serapan atom menunjukan kelarutan Si dan Mg batu dengan porositas 33,11% (A) lebih besar dibandingkan batu dengan porositas 15,08% (B). Hal ini menunjukan semakin besar porositas batu maka semakin banyak unsur batuan yang larut oleh asam oksalat. Banyak sedikitnya unsur batuan yang larut akan mempengaruhi kestabilan batu. Asam oksalat dengan konsentrasi 0,25 M dan 0,5 M serta dengan waktu pelarutan 5, 15, dan 30 hari sudah mampu melarutkan unsur-unsur batuan. Bila kondisi ini terjadi di alam dengan waktu yang relatif lebih lama tentu akan menyebabkan batu menjadi rapuh.

2. Saran

Perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan metode kromatografi gas atau kromatografi cair tekanan tinggi (HPLC) untuk mengindentifikasi jenis-jenis asam karboksilat yang terdapat dalam cairan sampah.

DAFTAR PUSTAKA

Ariyanto, T.B. 1993. *Dampak Perawatan Candi Borobudur Terhadap Bangunan dan Lingkungan.* Magelang: Balai Studi dan Konservasi Borobudur.

Daryanto. 1995. *Masalah Pencemaran.* Bandung: Tarsito.

Jutono, dkk. 1972. *Dasar-Dasar Mikrobiologi.* Yogyakarta: Fakultas Pertanian, UGM.

Fessenden R.J. dan Fessenden, J.S. 1997. *Dasar-Dasar Kimia Organik.* Jakarta: Biarupa Aksara.

Furrer, G., and Stumm, W., 1986. *TheCoordination Chemistry of Weathering : I Dissolution Kinetics of &- Al_2O_3 and BeO, Geochim Cosmochim*, Cosmochim.

Gardner, M.J. and A.M. Gunn, 1988. *Approaches to Callibration in GFAAS : Direct or Standard Addition.* Analytical Chemistry.

Graha, D.S. 1987. *Batuan dan Mineral.* Bandung: Nova.

Hachiya, K., Sasaki, Y., Mikami, N., and Yasunaga, T., 1984. *Static and Kinetics Studies Adsorption-Desorption of Metal Ion on a-Al_2O_3 Surface.* J.Phys Chem.

Lange, M., Ivanova, M., and Lebedeva, N. (Silitonga, E.J.). 1991. *Geologi Umum.* Jakarta: Gaya Media Pratama.

Pescok, R.L., Shields, L.D., Caims, T., and Mc William, I.G. 1968. *Modern Methods of Chemical Analysis.* Secound edition. New York: John and Sons.

Stone, A.T., and Morgan, J.J. 1987. *Reduction and Dissolution of Manganese (III) and Manganese (VI) Oxides by Organics. 1. Reaction with Hydroguenose, 2. Survey of The Reactivity of Organics*, Environ. Sci. Tecnol.

Stumm, W. 1995. *Aquatic Chemical Kinetics : Reaction Rates of Prosses in Natural Waters.* New York: John Wiey and Sonc Inc.

Stumm, W., and Morgan, J.J. 1981. *Aquatic Chemestry : An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters.* New York: John Wiley and Sonc Inc.

Tcbanoglous. 1993. *Dispsal Reuse*. New Delhi: Mc Graw Hill Book Company.

Tcbanoglous.1997. *Integreted Solid Waste Management*. Toronto: McGraw Hill Book Company.

EFEKTIVITAS EDTA DALAM MEMBERSIHKAN LAPISAN KERAK PADA CAGAR BUDAYA BERBAHAN BATU

Ari Swastikawati, Fr. Dian Ekarini, Sri Wahyuni, A.Md

Abstract

The temples in Indonesia are generally located in an open area so it is affected by weather conditions and the surrounding climate. Especially affect the breakdown and weathering of the stone temple. On the surface of the stone temple appears the layers that cover the surface or crust of rock a white salt deposits, also due to the activities of microorganism that moss, algae) and lichens. The review was conducted in order to find appropriate methods to clean up the layers of crust that exist on the surface of the stones so that continuity can be maintained. Cleaning method is by using a chemical solution of EDTA (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid) with various concentrations to determine the most effective concentration to clean the crust layer and determines the length of contact time. Based on the results of the study data showed that the concentration of EDTA turns and duration of contact does not affect the dissolution rate of crust layer at the Borobudur, Mendut, and Kalasan Temple. Concentration of 3-5% with a contact time of 24 hours has been the most effective dissolving calcium (Ca), magnesium (Mg) in the stone of Mendut and Kalasan Temple and iron (Fe) and copper (Cu) in the crust layer in Kalasan. Whereas for Fe in the crust layer Mendut optimum dissolved in 15% EDTA contact time of 24 hours. Ca, Mg, Fe, and Cu in the crust layer dissolves at Borobudur Temple optimum EDTA concentration of 10% with a contact time of 24 hours. From EDS analysis (Energy Dispersive Spectroscopy) crust composition comprising a metal and non-metal elements. EDTA is only capable of dissolving metals only, while non- metallic elements are not

soluble. In general, these methods are not effective or optimally used in cleaning the crust layer that sticks to the stone temple.

Abstrak

Candi-candi di Indonesia umumnya terletak di kawasan yang terbuka sehingga sangat terpengaruh dengan kondisi cuaca dan iklim di sekitarnya. Terutama kerusakan dan pelapukan batu candi. Di permukaan batu candi muncul adanya lapisan-lapisan permukaan atau kerak yang menutupi batu, berupa endapan garam yang berwarna putih, juga akibat adanya aktivitas mikroorganisme yaitu *moss* (lumut), *algae* (ganggang) dan *lichen* (jamur kerak). Kajian ini dilakukan dalam rangka untuk mencari metode yang tepat untuk membersihkan lapisan-lapisan kerak yang ada pada permukaan batu candi sehingga kelestariannya dapat terjaga. Metode pembersihan yang dilakukan adalah dengan menggunakan larutan kimia EDTA *(Ethylene Diamine Tetraacetic Acid)* dengan berbagai konsentrasi untuk menentukan konsentrasi yang paling efektif untuk membersihkan lapisan kerak serta menentukan lamanya waktu kontak. Berdasarkan hasil kajian diperoleh data bahwa ternyata konsentrasi EDTA dan lamanya waktu kontak tidak berpengaruh terhadap tingkat kelarutan lapisan kerak yang ada di Candi Borobudur, Candi Mendut, dan Candi Kalasan. Konsentrasi 3-5% dengan waktu kontak 24 jam sudah paling efektif melarutkan kalsium (Ca), magnesium (Mg) pada Candi Kalasan dan Candi Mendut serta besi (Fe) dan tembaga (Cu) pada lapisan kerak di Candi Kalasan. Sedangkan untuk Fe di lapisan kerak Candi Mendut optimum larut pada EDTA 15% waktu kontak 24 jam. Ca, Mg, Fe dan Cu pada lapisan kerak Candi Borobudur optimum larut pada EDTA konsentrasi 10% dengan kontak waktu 24 jam. Dari analisis EDS *(Energy Dispersive Spectroscopy)* komposisi lapisan kerak terdiri atas unsur logam dan non logam. Larutan EDTA hanya mampu melarutkan unsur logam saja sedangkan unsur non logam tidak larut. Secara umum metode ini belum efektif atau bekerja secara optimal dalam membersihkan lapisan kerak yang menempel pada batu candi.

A. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Bangunan candi pada umumnya terletak di wilayah yang terbuka sehingga sangat terpengaruh oleh cuaca dan iklim di lingkungan sekitarnya. Hal ini memungkinkan bangunan cagar budaya yang berupa bangunan candi dapat mengalami kerusakan dan pelapukan. Faktor-faktor iklim yang berpengaruh terhadap proses kerusakan dan pelapukan ini diantaranya adalah suhu, kelembaban udara, sinar matahari, hujan, angin, dan sebagainya.

Kerusakan pada bangunan candi dari batu misalnya retak, pecah, renggang, sedangkan akibat dari proses pelapukan adalah munculnya lapisan putih pada permukaan batu yang sering disebut sebagai "endapan garam". Selain itu, pelapukan yang disebabkan oleh mikroorganisme adalah munculnya *moss* (lumut), *algae* (ganggang) dan *lichen* (jamur kerak). Lapisan-lapisan kerak yang ada di permukaan batu candi khususnya di Candi Borobudur sangat banyak ragamnya. Ada lapisan berwarna putih yang sering disebut sebagai endapan garam, lapisan oker (*occer*) yang berwarna kuning dan lapisan-lapisan akibat aktivitas mikroorganisme. Juga terdapat adanya *postule* (bisul-bisul batu) dan *alveoli* (bisul batu yang telah pecah). Lapisan-lapisan permukaan batu ini tidak hanya muncul di Candi Borobudur saja melainkan juga pada candi-candi batu lainnya termasuk Candi Mendut dan Candi Kalasan.

Lapisan kerak yang berwarna putih sebenarnya tidak hanya terdiri atas garam saja, tetapi di dalamnya juga terdapat berbagai macam kandungan yang saling bertumpuk dan berlapis-lapis. Pembentukkan lapisan kerak tersebut sangat panjang prosesnya. Diawali dengan adanya air hujan yang jatuh menerpa batu candi kemudian masuk ke dalam batu-batu candi, karena adanya sinar matahari terjadi penguapan air. Transpor air terjadi dari dalam batu menuju ke permukaan batu karena adanya penguapan air dengan membawa mineral-mineral batuan. Pada

saat proses penguapan air tersebut air menguap dan mineral-mineral batuan tadi tertinggal di permukaan batuan membentuk suatu lapisan permukaan yang sering disebut dengan endapan garam. Lapisan-lapisan kerak tersebut sangat bervariasi, ada yang sudah lama terbentuk sehingga tingkat kekerasannya tinggi dan ada yang belum lama terbentuk sehingga masih lunak dan mudah dibersihkan.

Lapisan-lapisan kerak yang terbentuknya sudah lama, sangat sulit dihilangkan karena sudah sangat keras dan biasanya sudah menyatu dengan permukaan batu candi. Penggaraman ini harus dihentikan atau paling tidak dikendalikan karena akan mengancam kelestarian Candi Borobudur dan candi-candi lainnya. Lapisan-lapisan kerak ini akan menyebabkan relief candi rusak dan mengelupas.

Balai Konservasi Borobudur selaku instansi yang bertanggung jawab untuk memelihara Candi Borobudur selalu berupaya dalam melakukan konservasi batu terutama penanganan tentang masalah-masalah tersebut. Namun demikian penggaraman atau lapisan-lapisan kerak ini masih menjadi permasalahan yang belum terpecahkan sampai saat ini.

UNESCO sebagai lembaga dunia yang menangani cagar budaya dunia mengirimkan *expert* dari Italia untuk membantu Balai Konservasi Borobudur dalam mengatasi permasalahan-permasalahan konservasi batu candi. Pada tahun 2006, 2008, dan 2011 seorang ahli konservasi Prof. Costantino Meuccii melakukan pendampingan kegiatan konservasi di Candi Borobudur. Materi yang diberikan selama pendampingan berisi jenis dan penyebab kerusakan dan pelapukan, bagaimana cara mengobservasinya, dan kemungkinan cara penanganannya. Beberapa rekomendasi dari hasil pendampingan tersebut antara lain observasi pelapukan secara digital menggunakan komputer agar memperoleh data yang akurat, penanganan endapan garam menggunakan beberapa bahan kimia antara lain EDTA (*Ethylene Diamine Tetra-acetic Acid*) dan NH_4HCO_3 (Amonium Bikarbonat).

Pemilihan EDTA sebagai media pelarutan didasarkan pada kenyataaan bahwa senyawa-senyawa organik yang dapat berperan sebagai asam lemah, reduktor, dan agen pengompleks suatu logam, serta dapat melarutkan logam tersebut dari oksidannya. Molekul EDTA merupakan ligan yang dapat membentuk senyawa kompleks yang larut dalam berbagai ion logam termasuk Ca, Fe, dan Mg. Sebagai tindak lanjut rekomendasi tersebut, pada tahun 2010 Balai Konservasi Borobudur malkukan Kajian dengan judul "*Metode Konservasi Relief Candi Borobudur*".

Dalam kajian "*Metode Konservasi Relief Candi Borobudur*" pada tahun 2010 digunakan dua bahan pelarut yaitu NH_4HCO_3 (*Amonium Bikarbonat*) dan EDTA (*Ethylen Diamine Tetra Acetic Acid*). Hasil penelitian tersebut menunjukan bahwa larutan NH_4HCO_3, EDTA dan campurannya memiliki kemampuan untuk melarutkan kalsium (Ca) dari endapan garam pada batu relief Candi Borobudur. Tetapi perlakuan kedua pelarut tersebut dengan konsentrasi 3%, 5% dan 10% belum terlihat secara nyata membersihkan endapan garam pada permukaan relief tersebut. Tingkat kelarutan garam kalsium tertinggi pada larutan EDTA 10% dengan waktu kontak 1,5 bulan sebesar 333,23 ppm. Berdasarkan hasil kajian tersebut maka perlu dilaksanakan kajian lanjutan pada tahun 2012, yang lebih difokuskan pada efektivitas EDTA dalam melarutkan endapan garam pada batu candi, dengan perlakuan berbagai konsentrasi dan metode yang baru.

2. Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari kajian "*Efektivitas EDTA dalam Membersihkan Lapisan Kerak pada Cagar Budaya Berbahan Batu*" adalah untuk menemukan metode yang paling tepat dalam mengatasi lapisan kerak yang terdapat pada batu candi. Adapun tujuan dari kajian ini adalah:

a) Mendeskripsikan efektifitas aplikasi larutan kimia EDTA (*Ethylene Diamine Tetraacetic Acid)* dalam membersihkan lapisan kerak pada permukaan batu candi.

b) Menentukan konsentrasi EDTA (*Ethylene Diamine Tetraacetic Acid*) yang paling tepat untuk membersihkan lapisan kerak pada permukaan batu candi.

c) Menentukan lama waktu aplikasi EDTA yang tepat untuk membersihkan lapisan kerak pada permukaan batu candi.

3. Manfaat Penelitian

Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi pedoman dalam penanganan lapisan kerak atau endapan garam pada permukaan batu candi.

4. Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam kajian ini dibatasi pada endapan garam atau lapisan kerak pada permukaan batu Candi Borobudur, Candi Kalasan, dan Candi Mendut. Larutan uji yang digunakan adalah EDTA (*Ethylene Diamine Tetraacetic Acid*) dengan konsentrasi 10%, 15%, dan 20% untuk Candi Borobudur, dan konsentrasi 3%, 5%, 10%, dan 15% untuk Candi Mendut dan Candi Kalasan.

B. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilaksanakan dalam kegiatan kajian ini antara lain studi literatur atau studi pustaka, observasi lapangan, eksperimen beserta analisis laboratorium dan monitoring dengan cara digitalisasi.

1. Studi Pustaka

Studi pustaka atau literatur dilaksanakan untuk mencari literatur-literatur yang relevan dengan tema kajian ini. Pencarian literatur dilaksanakan di perpustakaan Balai Konservasi Borobudur dan penelusuran melalui internet.

2. **Observasi Lapangan**

Observasi dilaksanakan sebelum eksperimen dan sesudah eksperimen di Candi Borobudur, Candi Mendut, dan Candi Kalasan. Kegiatan observasi lapangan sebelum ekperimen dilaksanakan untuk menentukan lokasi yang akan dijadikan tempat eksperimen. Dalam observasi awal ini juga dilakukan pemotretan serta digitalisasi luas endapan garam untuk memperoleh data mengenai luas endapan garam sebelum perlakuan.

Observasi setelah eksperimen dilaksanakan untuk mengetahui pengaruh perlakuan bahan kimia terhadap kelarutan endapan garam/lapisan kerak. Dalam observasi ini juga dilaksanakan pemotretan kemudian dilakukan digitalisasi data.

3. **Eksperimen di Lapangan**

Eksperimen atau percobaan di lapangan bertujuan untuk menentukan konsentrasi bahan kimia EDTA yang paling tepat dan menentukan lamanya waktu aplikasi yang paling efektif untuk membersihkan lapisan kerak/endapan garam pada permukaan candi batu. Tindakan yang dilakukan adalah sebagai berikut.

a) Pembuatan larutan EDTA konsentrasi 3%, 5%, 10%, 15% untuk Candi Mendut dan Candi Kalasan dan 10%, 15%, 20% untuk Candi Borobudur.
b) Membuat media berupa bubur kertas/tissue yang diberi larutan EDTA dengan berbagai konsentrasi.
c) Penempelan bubur kertas pada lokasi sampel.
d) Pengamatan selama 24 jam, 48 jam, dan 72 jam dengan mengganti media bubur kertas setiap pengamatan.
e) Setiap pemasangan/penggantian media bubur kertas, sebelumnya dilakukan pembersihan mekanis dengan sikat dan air.

4. Analisis Laboratorium

Analisis laboratorium dilaksanakan dengan analisis EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) untuk mengetahui komposisi unsur-unsur kimia dari sampel lapisan kerak/endapan garam yang diambil dan analisis AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*) untuk menentukan tingkat kelarutan lapisan kerak/endapan garam dalam EDTA. Analisis EDS dilakukan di Laboratorium SEM (*Scanning Electron Microscope*) Fakultas MIPA, Institut Teknologi Bandung, sedangkan untuk analisis AAS dilakukan di Laboratorium Analitik, Fakultas MIPA, UGM.

5. Digitalisasi Luasan Sampel Endapan Garam/Lapisan Kerak

Foto sebelum dan sesudah perlakuan dibandingkan untuk memperoleh luasan lapisan kerak/endapan garam yang berhasil dibersihkan. Digitalisasi dilakukan dengan menggunakan program excel.

C. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Analisis EDS

Hasil analisis EDS komposisi lapisan kerak pada Candi Borobudur, Candi Mendut, dan Candi Kalasan dari setiap jenis kerak yang dilaksanakan di Laboratorium SEM Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung telah dirangkum dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan dalam pembacaan. Adapun tabel dan grafik tersebut sebagai berikut:

Tabel 4.1. Komposisi Lapisan Kerak Candi Borobudur, Candi Mendut, dan Candi Kalasan serta Batu Segar Candi Kalasan

Asal Sampel (Kode)	Jenis Mineral (%)											
	C	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	S	CaO	FeO	K_2O	MnO	CuO
Batu segar K.	0	5.52	0	21.05	65.45	0	0	4.71	0	3.27	0	0
Bajralepa K.	27.83	0.47	0.73	1.74	35.86	0	0.07	32.66	0.64	0	0	0
Kerak K. hijau	8.72	0.43	0.28	4.83	13.38	1.27	41.74	29.02	0.33	0	0	0
Kerak K. merah	5.1	0.47	9.65	0.5	1.57	33.16	18.39	25.24	0	0	5.62	0.3
Kerak K. putih	10.58	0.36	0	31.42	7.94	34.85	8.78	4.82	0.73	0	0	0.52
Kerak B.	15.63	0	0.38	9.15	71.8	0	0	2.59	0.25	0	0	0.21
Kerak M.	6.18	0.97	0.28	3.45	66.91	0	12.42	9.02	0.77	0	0	0

Keterangan :

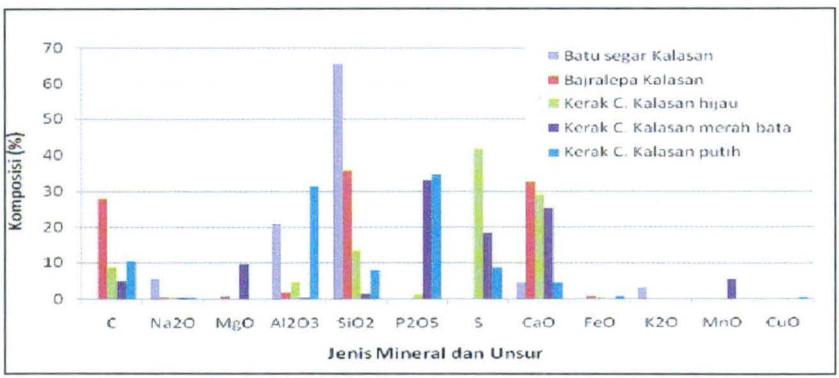
B : Candi Borobudur
K : Candi Kalasan
M : Candi Mendut
C : Karbon
S : Sulfur
Batu segar : Batu yang dianggap belum mengalami proses pelapukan

Berdasarkan hasil analisis tersebut secara keseluruhan menunjukan bahwa semua lapisan kerak pada Candi Borobudur, Candi Mendut, dan Candi Kalasan mengandung unsur karbon, begitu juga pada lapisan *bajralepa* Candi Kalasan. Mineral fosfat (P_2SO_4) juga ditemukan pada lapisan kerak Candi Kalasan. Begitu juga unsur belerang (S) ditemukan pada lapisan kerak pada Candi Kalasan dan Candi Mendut.

Adanya unsur karbon, fosfat, dan belerang mengindikasikan bahwa dalam lapisan kerak maupun dalam *bajralepa* terdapat material organik selain material an-organik. Sebagai pembanding hasil analisis batu segar Candi Kalasan tidak mengandung unsur karbon dan sulfur serta fosfat. Hasil ini menunjukan bahwa batu hanya mengandung material anorganik. Adanya material organik pada seluruh lapisan kerak memungkinkan material tersebut berasal dari aktifitas organisme, karena pada bagian dalam Candi

Kalasan dahulu sering dijadikan sebagai sarang kelelawar atau kemungkinan pada lapisan *bajralepa* terdapat campuran material organik karena kandungan karbon dalam *bajralepa* cukup tinggi yaitu 27,83%. Akan tetapi dugaan ini perlu dilakukan analisis lanjutan untuk memastikan komposisi jenis material organik dalam lapisan bajralepa.

Grafik 4.1 Perbandingan komposisi mineral batuan segar dan berbagai lapisan kerak Candi Kalasan



Hasil analisis EDS terlihat lebih jelas dalam bentuk Grafik 1. Grafik 1 menunjukan bahwa batu segar Candi Kalasan memiliki kandungan silika paling tinggi (65%). Sementara itu kandungan silika pada lapisan kerak Candi Kalasan lebih rendah. Kandungan silika dalam lapisan kerak Candi Kalasan berturut-turut dari yang tinggi ke rendah adalah lapisan kerak warna hijau (13,38%), lapisan kerak warna merah bata (1,57%), dan lapisan kerak warna putih (7,94%). Sedangkan kandungan silika pada lapisan *bajralepa* sebesar (35,86%). Jika dibandingkan dengan kandungan silika dalam lapisan kerak Candi Borobudur dan Candi Mendut yang cukup besar yaitu 71,8% dan 66,91%. Hasil analisis kandungan silika tersebut menjawab pertanyaan mengapa lapisan kerak pada Candi Borobudur dan Candi Mendut lebih keras dibandingkan dengan lapisan kerak pada Candi Kalasan. Hasil tersebut didukung oleh hasil pengukuran tingkat kekerasan lapisan kerak menggunakan skala Mohs dalam Tabel 4.2. berikut ini.

Tabel 4.2. Tingkat Kekerasan Lapisan Kerak (Skala Mohs)

Lokasi	Warna	Ulangan			Rata-rata
		1	2	3	
Candi Borobudur	Putih	4	5	6	5.0
Candi Mendut	Putih	5	3	4	4.0
Candi Kalasan	Hijau	2	2	3	2.3
Candi Kalasan	merah bata	2	2	2	2.0
Candi kalasan	Putih	2	2	2	2.0

Kandungan kalsium (CaO) dalam *bajralepa* Candi Kalasan sebesar 32,66 %, sedangkan dalam batu segar Candi Kalasan hanya 4,71%. Akan tetapi kandungan kalsium dalam kerak Candi Kalasan lebih tinggi dari batu segar yaitu lapisan kerak warna hijau sebesar 29,02 %, lapisan kerak warna merah bata 25,24%, dan dalam lapisan kerak warna putih sebesar 4,82 %. Sehingga memunculkan dugaan kuat jika kalsium dalam lapisan karat pada Candi Kalasan berasal dari bajralepa. Sementara itu kandungan kalsium oksida dalam lapisan kerak Candi Borobudur dan Candi Mendut cukup rendah yaitu 2,59 % dan 9,02 %.

Kandungan magnesium (MgO) dalam lapisan kerak Candi Borobudur 0,38%, Candi Mendut 0,28%. Kandungan magnesium dalam lapisan kerak Candi Kalasan berturut-turut dari yang tinggi ke rendah adalah lapisan kerak warna merah bata 9,65%, warna hijau 0,28%. Kandungan magnesium dalam lapisan kerak warna putih dan batu segar 0%. Kandungan besi (FeO) dalam batu segar Candi Kalasan 0%, tetapi lapisan *bajralepa* Candi Kalasan mengandung oksida besi sebesar 0,64%. Sedangkan kandungan besi dalam lapisan kerak Candi Kalasan berturut-turut dari yang tinggi ke rendah lapisan kerak warna putih (0,73%), lapisan kerak warna hijau (0,33%), dan lapisan kerak warna merah bata (0%). Komposisi kandungan magnesium oksida (MgO) dan besi oksida (FeO) dalam lapisan kerak Candi Kalasan semakin memperkuat dugaan bahwa lapisan kerak Candi Kalasan berasal dari lapisan *bajralepa*. Kandungan besi oksida (FeO) Candi Borobudur dan Candi Mendut relatif rendah yakni berturut 0,25% dan 0,77%.

Berdasarkan Tabel 4.1 dan Grafik 4.1 dapat diketahui pula

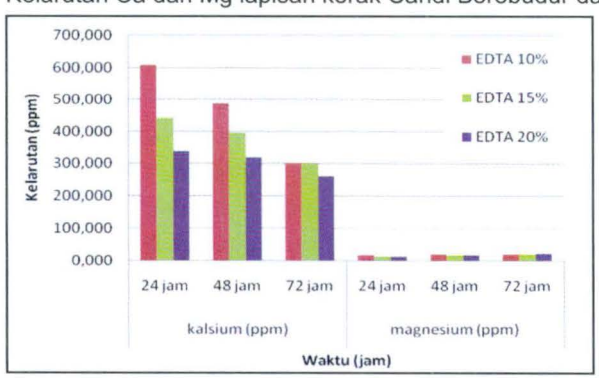
bahwa kandungan mineral atau unsur tertinggi pada masing-masing lapisan kerak. Lapiasan kerak warna hijau Candi Kalasan didominasi oleh unsur belerang sebesar (41,74%), sedangkan lapisan kerak warna merah bata dan warna putih didominasi oleh mineral P_2O_5 berturut-turut 33,16% dan 34,85%. Sedangkan kandungan mineral tertinggi dalam lapisan kerak Candi Borobudur dan Candi Mendut adalah mineral silika berturut-turut 71,8% dan 66,91%.

2. Hasil Analisis AAS

a. Kelarutan Kalsium dan Magnesium Lapisan Kerak Candi Borobudur dalam Larutan EDTA

Hasil analisis AAS, kelarutan kalsium dan magnesium ditampilkan dalam Grafik 4.2 untuk memudahkan dalam pembacaan. Grafik 2 menunjukan bahwa unsur kalsium dan magnesium pada lapisan kerak dapat larut dalam larutan EDTA. Grafik tersebut juga menunjukan bahwa konsentrasi EDTA dan waktu tidak berpengaruh terhadap kelarutan EDTA. Sehingga pada konsentasi EDTA 10% dan waktu kontak 24 jam sudah menunjukan hasil yang optimum. Hasil ini sama dengan hasil penelitian pada tahap I, konsentrasi EDTA 10% sudah menunjukan hasil yang optimum.

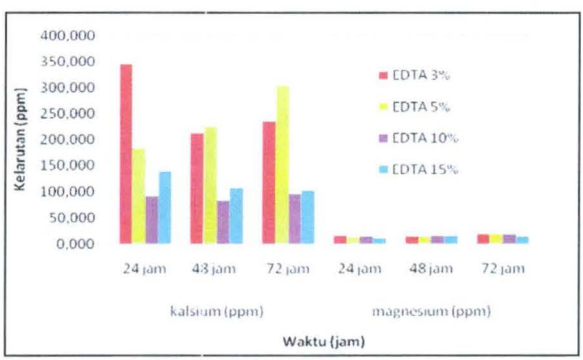
Grafik 4.2 Kelarutan Ca dan Mg lapisan kerak Candi Borobudur dalam EDTA



b. Kelarutan Kalsium dan Magnesium Lapisan Kerak Candi Medut dalam Larutan EDTA

Hasil analisis AAS kelarutan kalsium dan magnesium pada lapisan kerak Candi Mendut ditampilkan dalam Grafik 4.3. Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa perlakukan konsentrasi dan lamanya waktu aplikasi tidak berpengaruh terhadap hasil kelarutan kalsium dan magnesium pada lapisan kerak Candi Kalasan. Grafik tersebut menunjukan bahwa larutan EDTA dengan konsentrasi antara 3-5% sudah menunjukan hasil yang optimum dalam melarutkan kalsium dan magnesium dalam lapisan kerak pada Candi Mendut. Sekalipun magnesium yang larut sangat kecil karena persentase magnesium dalam lapisan kerak sangat rendah.

Grafik 4.3 Kelarutan Ca dan Mg lapisan kerak Candi Mendut dalam EDTA

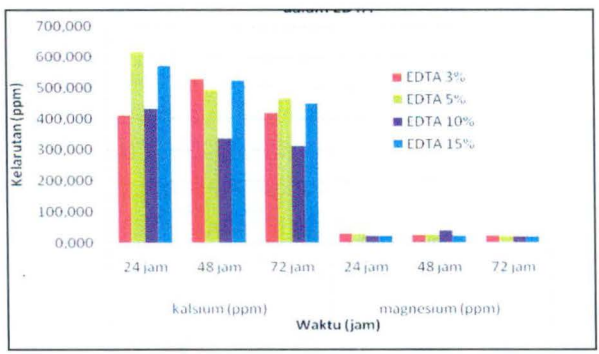


c. Kelarutan Kalsium dan Magnesium Lapisan Kerak Candi Kalasan dalam Larutan EDTA

Hasil analisis AAS kelarutan kalsium dan magnesium dalam lapisan kerak Candi Kalasan ditampilkan dalam Grafik 4.4. Berdasarkan grafik tersebut diketahui bahwa kalsium dan magnesium dapat larut dalam larutan EDTA. Akan tetapi perlakukan konsentrasi dan lamanya waktu aplikasi tidak berpengaruh terhadap tingkat kerarutan kalsium dan magnesium pada lapisan kerak Candi Kalasan. Grafik tersebut menunjukan bahwa pada

konsentarasi 5% dan lama waktu aplikasi 24 jam sudah menunjukan hasil optimum untuk melarutkan lapisan kerak pada Candi Kalasan.

Grafik 4.4 Kelarutan Ca dan Mg lapisan kerak Candi Kalasan dalam EDTA

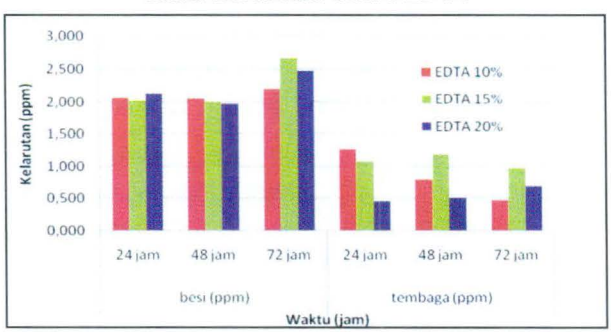


d. Kelarutan Besi (Fe) dan Tembaga (Cu) dalam Larutan EDTA

1) Kelarutan Besi (Fe) dan Tembaga (Cu) pada Lapisan Kerak Candi Borobudur dalam Larutan EDTA

Hasil analisis AAS kelarutan Fe dan Cu pada lapisan kerak Candi Borobudur dalam larutan EDTA disajikan dalam bentuk Grafik 4.5.

Grafik 4.5 Kelarutan Fe dan Cu lapisan kerak Candi Borobudur dalam EDTA

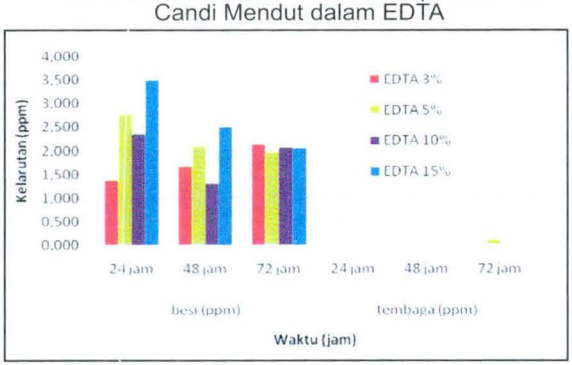


Grafik tersebut menunjukan bahwa besi dan tembaga dalam lapisan kerak dapat larut oleh larutan EDTA. Akan tetapi perlakuan konsentrasi dan lamanya waktu aplikasi relatif tidak berpengaruh terhadap kelarutan besi dan tembaga. Hasil analisis menunjukan bahwa pada konsentrasi 10% dan waktu 24 jam sudah menunjukan hasil yang optimum dalam melarutkan besi dan tembaga dalam lapisan kerak.

2) Kelarutan Besi (Fe) dan Tembaga (Cu) pada Lapisan Kerak Candi Mendut dalam Larutan EDTA

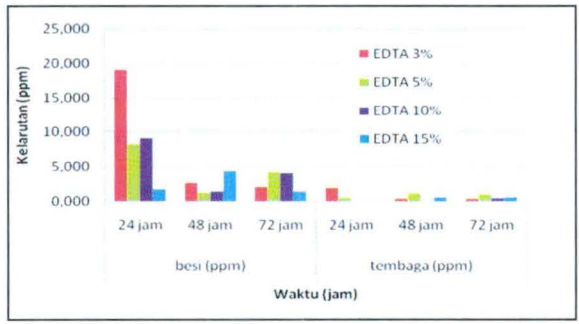
Hasil analisis AAS, kelarutan Fe dan Cu pada lapisan kerak Candi Mendut dalam larutan EDTA ditampilkan dalam bentuk Grafik 4.6. Berdasarkan grafik tersebut diketahui besi dapat larut dalam lapisan kerak dan juga dapat larut dalam EDTA tetapi relatif tidak ada tembaga yang larut dalam EDTA. Hal ini karena memang unsur tembaga dalam lapisan kerak tidak terdeteksi. Grafik tersebut juga menunjukan bahwa perlakuan konsentrasi dan lamanya waktu aplikasi relatif tidak berpengaruh terhadap kelarutan besi dalam EDTA. Pada konsentrasi 3% dan waktu aplikasi 24 jam sudah menunjukan hasil yang optimum.

Grafik 4.6 Kelarutan Fe dan Cu lapisan kerak Candi Mendut dalam EDTA



3) Kelarutan Besi (Fe) dan Tembaga (Cu) pada Lapisan Kerak Candi Kalasan dalam Larutan EDTA

Grafik 4.7 Kelarutan Fe dan Cu lapisan kerak Candi Kalasan dalam EDTA



Hasil analisis AAS kelarutan besi dan tembaga pada lapisan kerak Candi Kalasan dalam larutan EDTA disajikan dalam bentuk Grafik 4.7. Berdasarkan grafik tersebut diketahui bahwa besi dan tembaga dapat larut dalam larutan EDTA. Akan tetapi, perlakuan konsentrasi dan lamanya waktu aplikasi EDTA tidak berpengaruh terhadap kelarutan besi dan tembaga. Berdasarkan analisis data juga diketahui, bahwa kelarutan besi pada lapisan kerak optimum pada konsentrasi larutan EDTA 3% dengan waktu aplikasi 24 jam.

3. Tingkat Kebersihan Permukaan Batu Uji

a. Candi Kalasan

Tingkat kebersihan permukaan batu uji di Candi Kalasan dapat diketahui melalui hasil digitalisasi luas permukaan lapisan kerak sebelum dan sesudah perlakukan. Data hasil digitalisasi sebagai berikut:

Tabel 4.3. Persentase Tingkat Kebersihan Candi Kalasan

No	Lokasi	Sebelum treatment (cm^2)	Area yang bersih setelah treatment (cm^2)	Persentase Tingkat Kebersihan
1	3 %	590,7219	117,3110	20 %
2	5 %	567,0306	330,3068	58 %
3	10 %	558,6678	95,5535	17 %
4	15 %	569,1990	286,1230	50 %

Berdasarkan data dalam Tabel 4.3 menunjukan bahwa konsentrasi EDTA 5% berada pada tingkat kebersihan paling tinggi dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Tingkat kebersihan batu uji pada perlakuan EDTA 5% adalah 58%. Ini artinya perbedaan luasan permukaan kerak sebelum dan sesudah perlakukan sebesar 58%. Jika melihat data tersebut di atas, terdapat ketidakseragaman data. Hal ini kemungkinan karena komposisi kimia kerak pada permukaan batu tidak seragam atau tidak sama persis (lihat kembali data komposisi kerak pada Candi Kalasan dalam Tabel 4.1). Untuk mengetahui apakah metode pembersihan garam sudah efektif atau belum, dapat diketahui dengan menghitung jumlah tenaga dan bahan yang digunakan serta risiko dari penggunaan bahan tersebut.

Waktu dan bahan yang digunakan untuk membersihkan luas permukaan kerak 20 cm x 10 cm dengan konsentrasi EDTA 5%, berdasarkan analisis harga satuan setiap pembersihan 0,02 m^2 membutuhkan biaya Rp 257.200,00 sehingga untuk pembersihan EDTA seluas 1 m^2 membutuhkan biaya sebesar Rp 13.760.000,00 dengan tingkat kebersihan hanya 58% (lihat lampiran analisis harga satuan). Berdasarkan penghitungan tersebut, metode pembersihan endapan garam Candi Kalasan menggunakan EDTA tidak efektif untuk diterapkan.

b. Candi Borobudur

Perbandingan luas lapisan kerak sebelum dan sesudah perlakuan menunjukan tidak ada perbedaan tingkat kebersihan (lihat Tabel 4.4). Bila dikaitkan dengan komposisi lapisan kerak

pada Candi Borobudur yang menunjukan kandungan mineral silikanya sangat tinggi (71,8%), hasil tersebut menunjukan bahwa EDTA sukar untuk melarutkan endapan silika. EDTA hanya cepat melarutkan lapisan kerak dalam bentuk logam seperti Mg, Cu, dan Fe. Tetapi karena jumlah Mg, Ca, dan Fe rendah maka perlakuan dengan menggunakan EDTA tidak menunjukan adanya perbedaan luasan lapisan kerak sebelum dan sesudah perlakuan.

Tabel 4.4. Persentase Tingkat Kebersihan Candi Borobudur

No	Lokasi	Sebelum treatment (cm^2)	Area yang bersih setelah treatment (cm^2)	Persentase Tingkat Kebersihan
1	10 %	779,43	0	0 %
2	15 %	774,91	0	0 %
3	20 %	784.03	0	0 %

c. Candi Mendut

Tingkat kebersihan setelah perlakuan dengan larutan EDTA pada batu uji di Candi Mendut dapat dilihat pada Tabel 4.5. Hasil digitalisasi tersebut menunjukan bahwa pembersihan terhadap kerak pada permukaan batu uji tidak berpengaruh. Hal ini karena kandungan utama kerak pada Candi Mendut adalah mineral silika (lihat Tabel 4.1). Mineral silika merupakan mineral yang sukar larut dalam larutan asam, tetapi dalam reaksi jangka panjang mineral tersebut dapat larut. Sedangkan kandungan kalsium dan magnesium dalam kerak dapat larut oleh EDTA tetapi komposisi kedua unsur tersebut sangat rendah sehingga kelarutan kedua unsur tersebut dalam EDTA tidak berpengaruh terhadap tingkat kebersihan batu uji.

Tabel 4.5 Persentase Tingkat Kebersihan Candi Mendut

No	Lokasi	Sebelum treatment (cm^2)	Area yang bersih setelah treatment (cm^2)	Persentase Tingkat Kebersihan
1	3 %	154,767	0	0 %
2	5 %	351,204	0	0 %
3	10 %	166,369	0	0 %
4	15 %	168,823	0	0 %

4. Fluktuasi Suhu dan Kelembaban Selama Penelitian

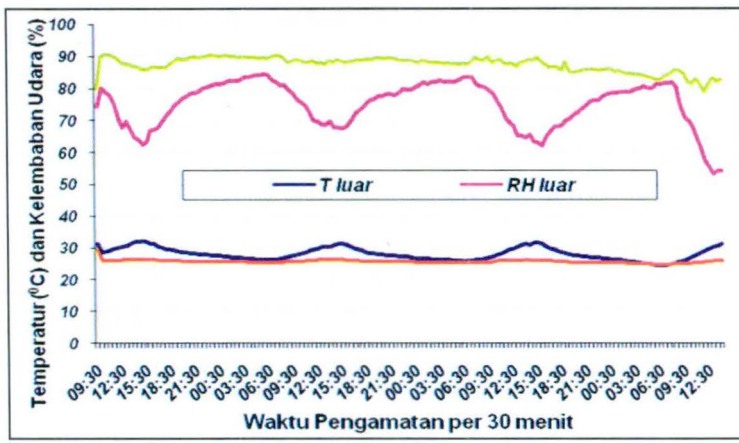
Dalam kajian ini dilakukan pemantauan suhu dan kelembaban pada Candi Kalasan, Candi Borobudur, dan Candi Mendut. Data suhu dan kelembaban tersebut selama penelitian penting untuk mengetahui tingkat fluktuasi suhu dan kelembaban yang berpengaruh terhadap proses pembentukan lapisan kerak.

a. Candi Kalasan

Berdasarkan hasil perekaman data *logger* pada suhu dan kelembaban udara Candi Kalasan selama penelitian menunjukan bahwa terjadi fluktuasi suhu dan kelembaban yang tinggi pada bagian luar bangunan candi dengan selisih sebesar 7,96°C dari suhu terendah (24,4°C) dan suhu tertinggi (32,36°C). Sedangkan pada bagian dalam Candi Kalasan fluktuasi suhu dan kelembaban udara terjadi relatif lebih rendah yakni sebesar 4,66°C dari suhu terendah (24,73°C) dan suhu tertinggi (29,39°C). Fluktuasi kelembaban udara pada bagian luar sebesar 31,06% dengan kelembaban terendah sebesar 53,38% sedangkan kelembaban tertinggi 84,44%. Sedangkan fluktuasi kelembaban yang terjadi pada bagian dalam bangunan candi sebesar 8,67% dengan kelembaban terendah 81,76% dan kelembaban tertinggi 90,36%.

Berdasarkan data dan Grafik 8. tersebut diketahui adanya fluktuasi suhu dan kelembaban yang tinggi dan temperatur yang tinggi pada bagian luar bangunan candi, sedangkan pada bagian dalam kelembaban udara sangat tinggi dan fluktuasi suhu serta kelembaban udara relatif lebih rendah. Kondisi ini yang menyebabkan dinding bagian dalam bangunan Candi Kalasan banyak terdapat lapisan kerak tetapi proses pengeringan endapan terjadi dalam waktu yang relatif lambat, sehingga proses kristalisasi kerak terjadi dalam proses yang lambat pula. Proses kristalisasi garam yang lambat tersebut menyebabkan lapisan kerak Candi Kalasan relatif lunak selain karena faktor komposisi dari lapisan kerak itu sendiri (lihat Tabel 4.1).

Grafik 4.8. Temperatur dan Kelembaban Udara di Candi Kalasan (21-24 Juni 2012)

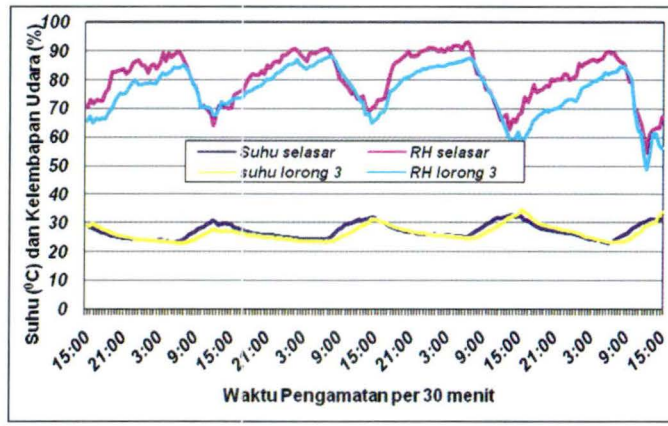


b. Candi Borobudur

Hasil perekaman data *logger* suhu dan kelembaban udara menunjukan adanya fluktuasi suhu dan kelembaban udara yang tinggi pada Candi Borobudur. Selisih suhu terendah (23,09°C) dan tertinggi (32,77°C) pada bagian selasar sisi selatan sebesar 9,68°C sedangkan pada bagian lorong sisi barat sebesar 11,77°C dari suhu terendah 23,09°C dan tertinggi 34,86°C. Sementara itu fluktuasi kelembaban udara pada bagian selasar sisi selatan sebesar 38,33% dari kelembaban udara terendah 54,63% dan kelembaban udara tertinggi 92,96%, sedangkan fluktuasi kelembaban udara pada lorong sisi barat sebesar 39,42% dengan kelembaban udara terendah 48,7% dan kelembaban udara tertinggi sebesar 88,12%.

Fluktuasi suhu dan kelembaban udara pada bagian lorong Candi Borobudur lebih besar dibandingkan pada bagian selasar. Kondisi ini yang kemungkinan menyebabkan kerusakan dan pelapukan pada batu-batu dinding lorong lebih besar dibandingkan pada bagian dinding selasar. Selain karena faktor lain yang ikut berperan dalam mempercepat kerusakan dan pelapukan batu-batu pada dinding lorong.

Grafik 4.9. Temperatur dan Kelembaban Udara di Candi Borobudur (17-21 Juli 2012)

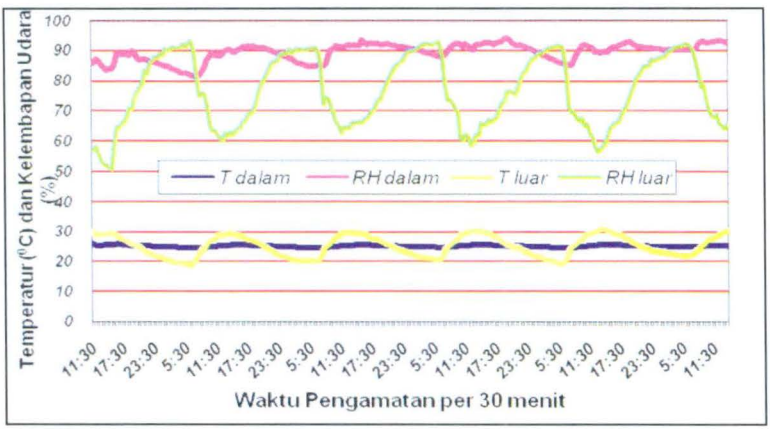


c. Candi Mendut

Berdasarkan hasil perekaman data *logger* menunjukan adanya fluktuasi suhu dan kelembaban udara yang tinggi pada bagian luar Candi Mendut, sedangkan pada bagian dalam candi relatif stabil. Fluktuasi suhu udara pada bagian luar sebesar 12,13°C dengan suhu udara tertinggi 31,13°C dan suhu terendah 18,87°C, sedangkan fluktuasi kelembaban udara pada bagian luar Candi Mendut sebesar 42,49% dengan kelembaban udara tertinggi 93,14%. Fluktuasi suhu udara pada bagian dalam Candi Mendut hanya sebesar 1, 07°°C dengan suhu terendah 24,58°C dan suhu tertinggi 25,6°C dan besarnya fluktuasi kelembaban pada bagian dalam Candi Mendut sebesar 12,08% dengan kelembaban udara terendah 81, 39% dan kelembaban udara tertinggi 93,47%.

Fluktuasi suhu dan kelembaban udara yang tinggi pada bagian luar Candi Mendut kemungkinan berpengaruh terhadap proses kristalisasi lapisan kerak pada dinding bagian luar sehingga lapisan kerak pada bagian luar bangunan Candi Mendut lebih keras dari pada lapisan kerak pada bagian dalam. Kekerasan lapisan kerak pada bagian luar antara 4-5 skala mohs sedangkan kerak pada bagian dalam antara 3-5 skala mohs.

Grafik 4.10. Temperatur dan Kelembaban Udara di Candi Mendut (5 - 10 Juli 2012)



D. PENUTUP

1. Kesimpulan

a. Komposisi lapisan kerak pada Candi Borobudur, Candi Mendut, dan Candi Kalasan terdiri dari material organik dan anorganik. Didapatkannya unsur karbon (C), sulfur (S), dan phospat (P) mengidikasikan adanya material organik sedangkan didapatkanya unsur silika (Si), almunium (Al), magnesium (Mg), besi (Fe), dan lain-lain mengindikasikan adanya material anorganik.

b. Peningkatan konsentrasi EDTA dan lamanya waktu aplikasi tidak berpengaruh terhadap kelarutan logam kalsium (Ca), magnesium (Mg), besi (Fe), dan tembaga (Cu).

- Konsentrasi EDTA 10% dan waktu kontak 24 jam sudah menunjukan hasil yang optimum dalam melarutkan Ca, Mg, Fe, dan Cu pada lapisan kerak Candi
- Konsentrasi EDTA 3% dengan waktu kontak 24 jam sudah optimum untuk melarutkan Ca dan

Mg dan konsentarsi 15 % untuk melarutkan Fe pada lapisan kerak Candi Mendut.

- Konsentrasi EDTA 5% dengan waktu kontak 24 jam menunjukan hasil optimum melarutkan Ca dan Mg dalam lapisan kerak Candi Kalasan, sedangkan untuk melarutkan Fe dan Cu optimum pada konsentrasi EDTA 3% dengan waktu kontak 24 jam.

c. Hasil digitalisasi menunjukan adanya perbedaan luas lapisan kerak Candi Kalasan sebesar 58% setelah perlakukan dengan EDTA 5%, sedangkan pada Candi Borobudur dan Candi Mendut tidak menunjukan adanya perbedaan luasan permukaan lapisan kerak baik sebelum maupun sesudah perlakuan, sehingga metode pembersihan lapisan kerak menggunakan EDTA tidak dapat membersihkan lapisan kerak secara menyeluruh.

d. Dilihat dari segi teknis pengerjaan dan hasil yang diperoleh, ternyata pembersihan lapisan kerak pada permukaan batu candi menggunakan larutan EDTA ini belum efektif didasarkan pada perhitungan waktu, biaya, dan resiko.

2. Saran

Perlu dilaksanakan penelitian lanjutan untuk mencari metode alternatif dalam pembersihan lapisan kerak pada permukaan batu candi yang lebih efektif dan efisien sehingga tidak merusak material cagar budaya serta ramah terhadap lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

Ariyanto, T.B. 1993. *Dampak Perawatan Candi Borobudur terhadap Bangunan dan Lingkungan.* Magelang: Balai Studi dan Konservasi Borobudur.

Croci, Giorgio. 1989. *The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage.* Computational Mechanics Publication Southmpton, UK and Boston, USA.

Graha, D.S. 1987. *Batuan dan Mineral.* Bandung: Nova.

Lange, M., Ivanova, M., and Lebedeva, N. (Silitonga, E.J). 1991. *Geologi Umum.* Jakarta: Gaya Media Pratama.

Pescok, R.L., Shields, L.D., Caims, T., and Mc William, I.G. 1968. *Modern Methods of Chemical Analysis. Secound edition.* New York: John and Sons.

Safaat, Sandi. 2004. *Kajian Pengaruh Temperatur dan Konsentrasi Larutan EDTA pada Proses Aktifasi Zeolit Alam dengan Metode Disolusi dalam Larutan Na_2EDTA. (Skripsi). Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.* Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

Salimin, Zainus; Gunandjar. 2006. *Penggunaan EDTA sebagai Pencegah Kerak pada Evaporasi Limbah Radioaktif Cair.* Batan: Pusat Teknologi Limbah Radioaktif.

Suharyadi. 1984. *Geologi Teknik untuk Teknik Sipil.* Fakultas Teknik. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

Torraca, Giorgio. 1982. *Porous Building Material-Material Science for Architectural Conservation.* Roma Italy: ICCROM.

Vercoef. 1992. *Geologi untuk Teknik Sipil.* Jakarta: ?

Winarno, S. 2001. *"Peranan Laboratorium dalam Konservasi Benda Cagar Budaya".* Makalah disampaikan dalam Penataran Tenaga Teknis Kepurbakalaan Tingkat Dasar di Bogor, 4-18 September 2001.

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

Jenis-Jenis Lapisan Kerak pada Candi Kalasan, Candi Borobudur, dan Candi Mendut Berdasarkan Kenampakan Warna

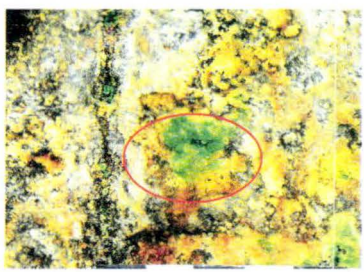


Foto 1. Lapisan Kerak Candi Kalasan yang Berwarna Hijau (a)

Foto 2. Lapisan Kerak Candi Kalasan yang Berwarna Hijau (b)

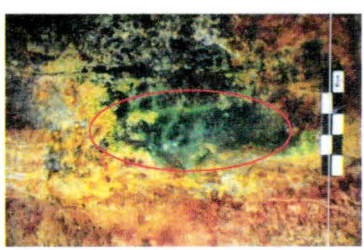


Foto 3. Lapisan Kerak Candi Kalasan yang Berwarna Hijau (c)

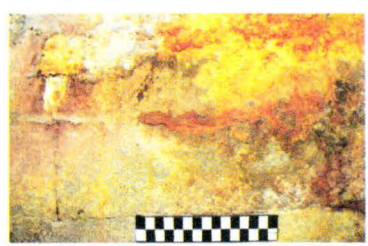


Foto 4. Lapisan Kerak Candi Kalasan yang Berwarna Merah(a)

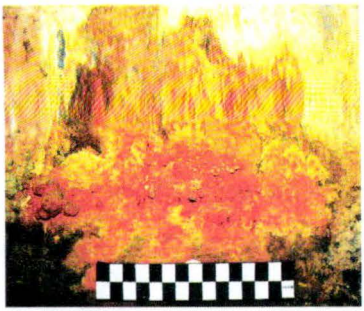


Foto 5. Lapisan Kerak Candi Kalasan yang Berwarna Merah(b)

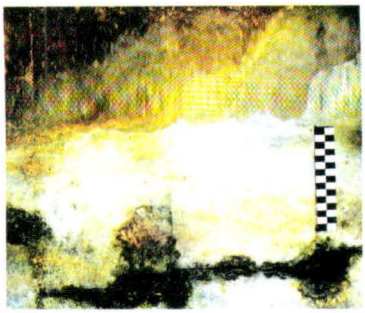


Foto 6. Lapisan Kerak Candi Kalasan yang Berwarna Putih

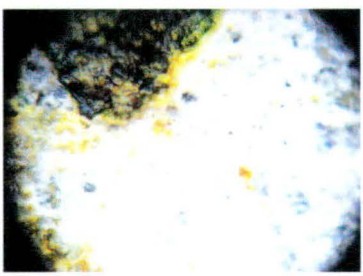


Foto 7. Lapisan Kerak Candi Borobudur Berwarna Putih (5x)

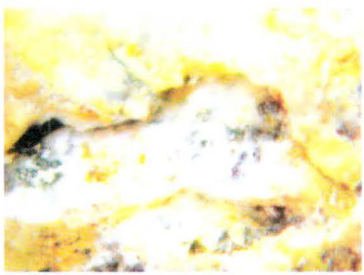


Foto 8. Lapisan Kerak Candi Borobudur Berwarna Putih (25x)

Foto 9. Lapisan Kerak Candi Mendut Berwarna Putih (a)

Foto 10. Lapisan Kerak Candi Mendut Berwarna Putih (b)

LAMPIRAN 2

Hasil Analisis SEM Struktur Mikroskopis Lapisan Kerak

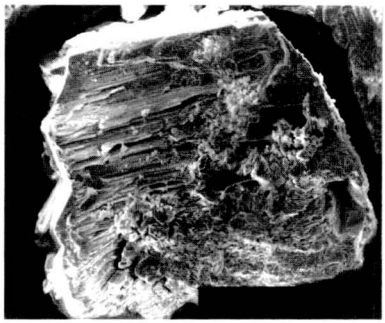


Foto 11. Struktur Mikroskopis Lapisan Kerak Candi Kalasan Warna Hijau (c) perbesaran 200x

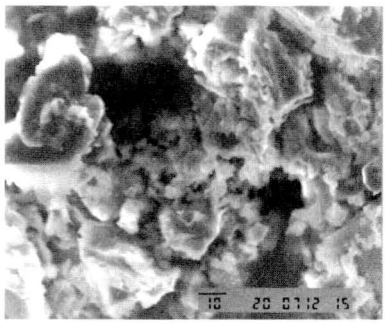


Foto 12. Struktur Mikroskopis Lapisan Kerak Candi Kalasan Warna Hijau (c) perbesaran 1000x

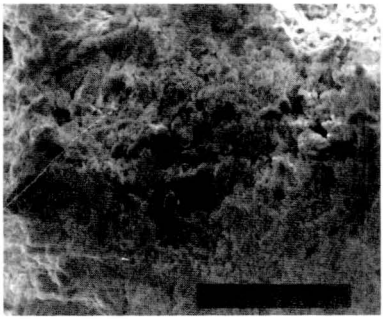


Foto 13. Struktur Mikroskopis Lapisan Kerak Candi Kalasan Warna Merah perbesaran 200x

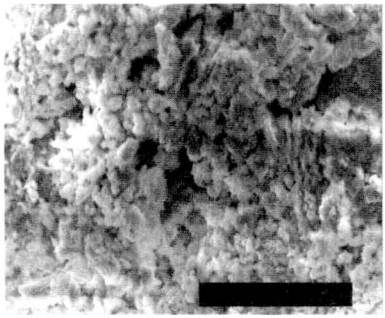


Foto 14. Struktur Mikroskopis Lapisan Kerak Candi Kalasan Warna Merah perbesaran 1000x

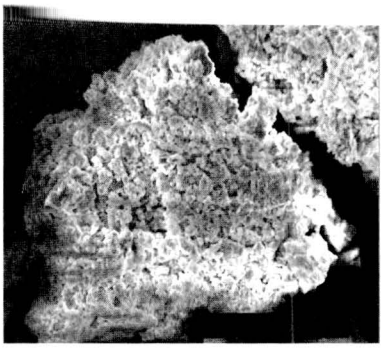


Foto 15. Struktur Mikroskopis Lapisan Kerak Candi Kalasan Warna Putih perbesaran 200x

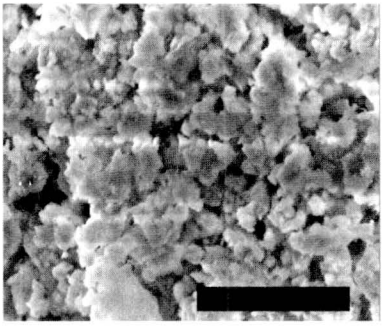


Foto 16. Struktur Mikroskopis Lapisan Kerak Candi Kalasan Warna Putih perbesaran 1000x

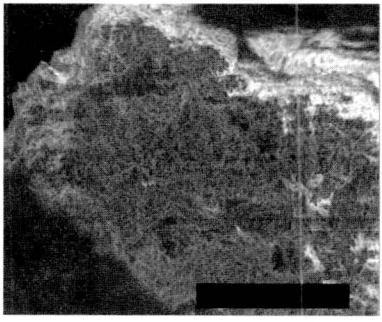


Foto 17. Struktur Mikroskopis Lapisan Kerak Candi Borobudur perbesaran 200x

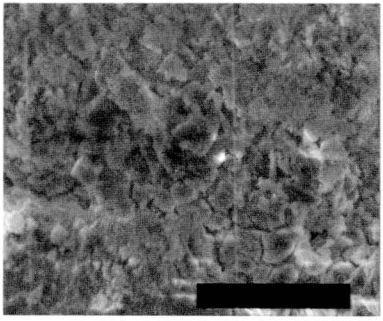
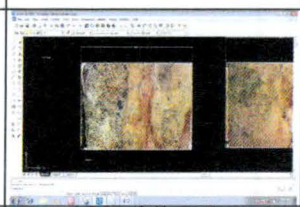
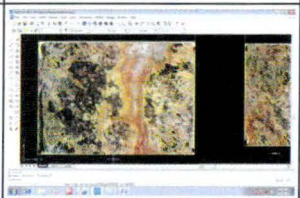
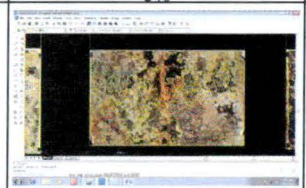
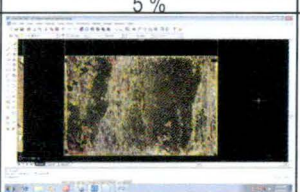
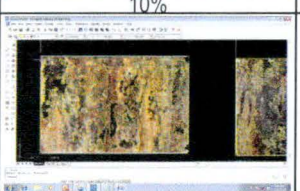
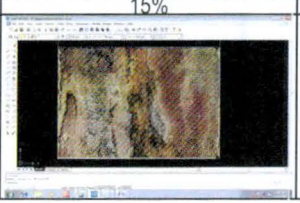
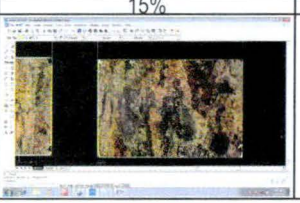


Foto 18. Struktur Mikroskopis Lapisan Kerak Candi Borobudur perbesaran 1000x

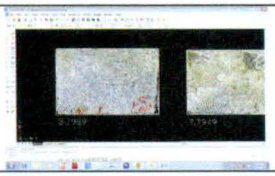
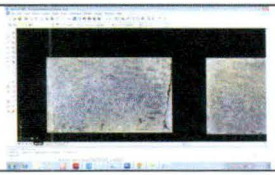
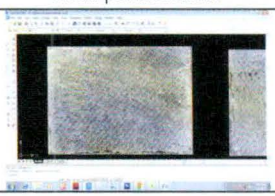
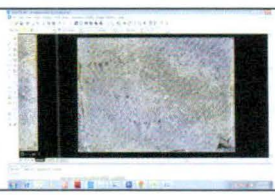
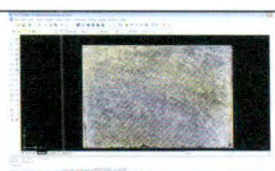
LAMPIRAN 3

Hasil Digitalisasi Lapisan Kerak Candi Kalasan

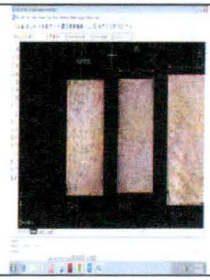
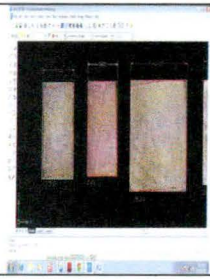
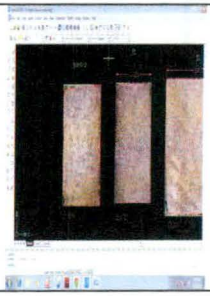
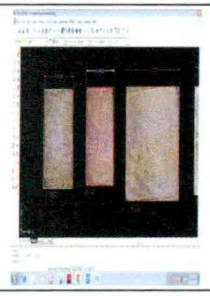
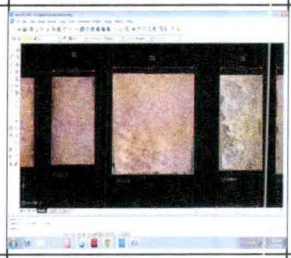
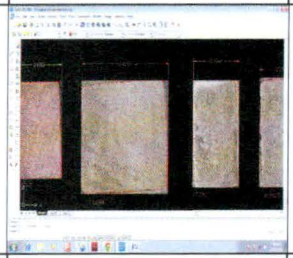
No	Sebelum Kontrol	Luas Area (cm^2)	Sesudah Kontrol	Luas Area (cm^2)
1		587.2249		164.4066
	3 %		3%	
2		590.7219		117.311
	5 %		5 %	
3		567.0306		330.3068
	10 %		10%	
4		558.6678		95.5535
	15%		15%	
5		569.199		286.1230

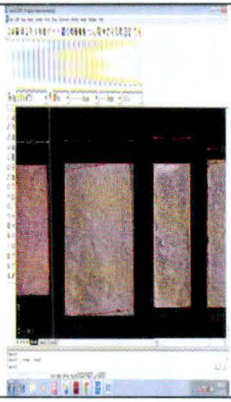
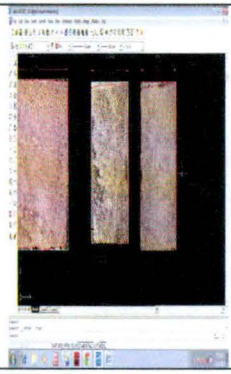
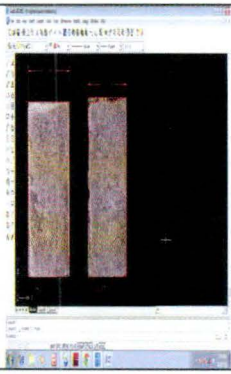
LAMPIRAN 4

Hasil Digitalisasi Sebelum dan Sesudah Perlakukan pada Candi Borobudur

No	Sebelum perlakuan	Luas area (cm^2)	Sesudah perlakuan	Luas area (cm^2)
K		8.7989		8.7989
	Pertumbuhan lumut	1.21 %	Hasil pembersihan	0%
10%		7,7949		7.,7949
	Endapan kuning	11 %		
15%		7.7491		7.7491
20%		7.8403		7.8403
	Pertumbuhan lumut	0.71 %		

LAMPIRAN 5

No	Sebelum perlakuan	Luas area (cm^2)	Sesudah perlakuan	Luas area (cm^2)
K		17.3804		17.3804
3%		15.4767		15.4767
5%		35.1204		35.1204

10%		16.6369		16.6369
15%		16.8763		16.8763

KARAKTERISTIK BATU PENYUSUN CANDI BOROBUDUR

Leliek Agung Haldoko, Rony Muhammad, Al. Widyo Purwoko

Abstract

Borobudur is one of Indonesia's cultural heritage has also been recognized as one of the world's cultural heritage. Borobudur is composed of andesite if examined more specifically have different characteristics so that the level of damage and weathering different. Determination of the characteristics of the stone temple of Borobudur is based on parameters of physical properties, chemical composition, and mineralogy of rocks.

Dark stone temple has had a greater density than light-colored stone temple because the content of ferromagnesium content is higher. In addition, dark stone temple is able to absorb the heat more than the light-colored stone temples.

Stone temple with moss has a smaller density and porosity greater than the temple is not stone overgrown with moss. The silica content in the stone temple is overgrown with moss is lower when compared to the no moss. This is because the process of weathering that occurs leads to reduced levels of silica in the rock. In addition, the potassium content of the stone temple is overgrown with moss is higher when compared to those without moss because potassium is an indispensable element for the growth of moss.

Stone temple experiencing salting has a smaller density and porosity greater than stone temple who did not experience salting. The silica content in the stone temples undergo salting lower than those who did not undergo salting. This is because the salting process, one of which dissolves the silica and then precipitation on the surface of the stone.

Keyword: Borobudur Temple, characteristics, stone, andesite, moss, salting, silica

Abstrak

Candi Borobudur merupakan salah satu warisan budaya Indonesia yang juga telah diakui sebagai salah satu warisan budaya dunia. Candi Borobudur tersusun oleh andesit yang jika diteliti secara lebih spesifik memiliki karakteristik yang berbeda-beda sehingga memiliki tingkat kerusakan dan pelapukan yang berbeda. Penentuan karakteristik batu Candi Borobudur didasarkan pada parameter sifat fisik, komposisi kimia, dan mineralogi batuan.

Batu candi yang berwarna gelap memiliki memiliki densitas yang lebih besar dibandingkan batu candi yang berwarna cerah karena kandungan kandungan ferro magnesium yang lebih tinggi. Selain itu batu candi yang berwarna gelap mampu menyerap panas yang lebih besar dibandingkan dengan batu candi yang berwarna cerah.

Batu candi yang ditumbuhi lumut memiliki densitas yang lebih kecil dan porositas yang lebih besar jika dibandingkan batu candi yang tidak ditumbuhi lumut. Kandungan silika pada batu candi yang ditumbuhi lumut lebih rendah jika dibandingkan dengan yang tidak ditumbuhi lumut. Hal ini dikarenakan proses pelapukan yang terjadi menyebabkan berkurangnya kadar silika pada batu. Selain itu, kandungan kalium pada batu candi yang ditumbuhi lumut lebih tinggi jika dibandingkan dengan yang tidak ditumbuhi lumut karena kalium merupakan unsur yang sangat diperlukan untuk pertumbuhan lumut.

Batu candi yang mengalami penggaraman memiliki densitas yang lebih kecil dan porositas yang lebih besar jika dibandingkan batu candi yang tidak mengalami penggaraman. Kandungan silika pada batu candi yang mengalami penggaraman lebih rendah jika dibandingkan dengan yang tidak mengalami penggaraman. Hal ini dikarenakan oleh proses penggaraman yang salah satunya melarutkan silika dan kemudian mengendapkannya di permukaan batu.

Kata Kunci : Candi Borobudur, karakteristik, batu, andesit, lumut, penggaraman, silika

A. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Candi Borobudur merupakan salah satu warisan budaya Indonesia yang juga telah diakui sebagai salah satu warisan budaya dunia. Candi Borobudur dibangun sekitar tahun 800-an Masehi oleh para penganut agama Buddha Mahayana pada masa pemerintahan Raja Samaratungga yang berasal dari wangsa atau dinasti Syailendra. Candi Borobudur merupakan tempat pemujaan bagi pemeluk agama Budha. Candi Borobudur terletak di Desa Borobudur, Kecamatan Borobudur, Kabupaten Magelang. Secara astronomis Candi Borobudur terletak pada 7,7° lintang selatan dan 110° bujur timur.

Candi Borobudur tersusun oleh andesit yang memiliki porositas tinggi.Karena porositas tinggi inilah, andesit penyusun Candi Borobudur memiliki kuat tekan yang tergolong rendah jika dibandingkan dengan batuan sejenis (Sampurno, 1969). Andesit dipilih karena ketersediaannya yang banyak, mengingat gunung api di pulau Jawa kebanyakan mengandung magma intermediet dan membeku ketika mencapai puncak sehingga menghasilkan batuan beku jenis andesit. Andesit termasuk dalam batuan beku intermediet dengan kandungan silika 52-66 %, memiliki tekstur porfiroafanitik yaitu fenokris (butiran kristal) dikelilingi oleh massa dasar yang afanitik (halus), dengan komposisi mineral utama plagioklas, mineral aksesori hornblende, biotit, piroksen dan massa dasar dapat berupa mineral felsic (asam, warna cerah) atau mineral mafic (basa, warna gelap). Sedangkan batu candi dipilih yang memiliki porositas tinggi, karena dengan porositas yang tinggi maka batuan akan lebih mudah ketika dipahat.

Meskipun secara umum penyusun Candi Borobudur merupakan batu yang sejenis (andesit), namun jika dibedakan secara spesifik batu-batu penyusun tersebut memiliki karakteristik yang berbeda sehingga memiliki tingkat kerusakan dan pelapukan yang berbeda.Kerusakan dan pelapukan ini banyak sekali macamnya, yang tentunya disebabkan oleh faktor penyebab yang berbeda-

beda pula.Karena itu, perlu diketahui karakteristik yang spesifik untuk tiap-tiap batu berdasarkan parameter-parameter yang ada.

B. TINJAUAN PUSTAKA

Kerusakan dan pelapukan yang terjadi pada batu penyusun Candi Borobudur dapat dikelompokkan dalam 4 macam yaitu :

1. Kerusakan mekanis

Kerusakan material batuan yang disebabkan oleh gaya-gaya mekanis, seperti pembebanan dan getaran.

2. Pelapukan fisik

Pelapukan material batuan yang disebabkan oleh adanya faktor fisik seperti suhu, kelembaban, angin, air hujan, penguapan dan akan menghasilkan gejala-gejala seperti pengelupasan dan aus.

3. Pelapukan kimia

Pelapukan yang terjadi pada material batuan sebagai akibat dari proses atau reaksi kimiawi seperti penggaraman dan korosi.

4. Pelapukan biologis

Pelapukan pada material yang disebabkan oleh adanya kegiatan mikroorganisme seperti pertumbuhan lumut, *alga*, dan *lichen*.

Beberapa penelitian tentang batu penyusun Candi Borobudur pernah dilakukan sebelumnya.Penelitian yang dilakukan Leisen dkk (2012) menerangkan bahwa pola dan tingkat pelapukan pada setiap individu blok batu sangat tergantung pada varietas batunya. Ada perbedaan yang signifikan untuk pelapukan bagi varietas batu yang berbeda.Selain itu penelitian mengenai karakteristik material di situs dan di laboratorium menunjukkan karakteristik fisik seperti penyerapan air sangat berbeda untuk tiap varietas batu yang berbeda. Ariyanto (1993) menerangkan bahwa faktor utama yang menyebabkan terjadinya pengelupasan batu penyusun Candi Borobudur adalah akibat pemuaian

dan pengkerutan yang berbeda antara mineral-mineral pembentuk batuan dengan endapan garam.

C. METODE PENELITIAN

1. Pengumpulan Data di Lapangan

Pengumpulan data di lapangan meliputi pengambilan data sifat fisik batuan yaitu warna, kekerasan dan temperatur batu Candi Borobudur.Selain itu juga dilakukan pengamatan mengenai pelapukan yang terjadi seperti pertumbuhan lumut dan munculnya endapan garam. Selanjutnya dilakukan pengambilan sampel batu untuk dianalisis di laboratorium.

2. Analisis Sampel

Sampel batu dari hasil pengambilan di lapangan selanjutnya dilakukan analisis di laboratorium.Analisis yang dilakukan meliputi analisiskomposisi kimia batuan, sifat fisik batuan dan mineralogi batuan.

3. Analisis dan Interpretasi Data

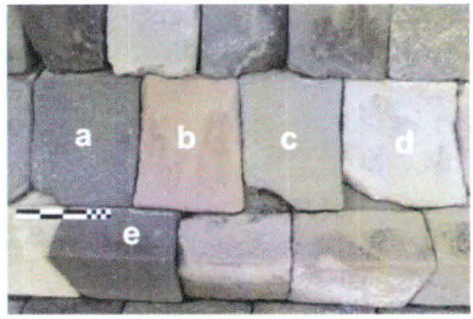
Data dari hasil pengumpulan di lapangan dan analisis sampel di laboratorium selanjutnya dianalisis untuk mengetahui karakteristik jenis-jenis batu penyusun Candi Borobudur. Selanjutnya dilakukan interpretasi data untuk menentukan hubungan antara kompisisi kimia batuan, sifat fisik batuan, dan mineralogi batuan terhadap pelapukan yang terjadi pada batu penyusun Candi Borobudur.

D. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Kondisi Batuan di Lapangan

Candi Borobudur tersusun atas andesit. Namun jika diamati andesit penyusun Candi Borobudur memiliki beberapa

macam karakteristik, misalnya dilihat dari segi warna, pertumbuhan lumut maupun munculnya endapan garam. Dari hasil pengamatan di lapangan,andesit penyusun Candi Borobudur dapat dikelompokkan menjadi 5 macam warna (Gambar 5.1) yaitu : abu-abu, abu-abu kecokelatan, abu-abu kehitaman, kemerahan dan hitam, meskipun jika diamati lebih jauh perbedaan warna batuan terlihat secara gradasional, sehingga macam warna batu bisa sangat banyak dan relatif (subjektif).



Gambar 5.1. Variasi warna batu Candi Borobudur : (a) abu-abu kehitaman, (b) kemerahan, (c) abu-abu, (d) abu-abu kecokelatan, (e) hitam

Pelapukan yang terjadi pada batu Candi Borobudur antara lain disebabkan oleh tumbuhan tingkat rendah seperti lumut yang tumbuh pada permukaan batu (Gambar 5.2 dan 5.3). Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan pertumbuhan lumut pada tiap blok batu tidak sama. Ada blok batu yang banyak ditumbuhi oleh lumut, di sisi lain ada juga blok batu yang bersih dari lumut. Hal ini tentunya disebabkan karena adanya faktor internal maupun eksternal. Faktor eksternal antara lain adalah keberadaan air yang membuat batuan menjadi lembab maupun intensitas sinar matahari yang mempengaruhi proses penguapan air dalam batuan. Sedangkan faktor internal sangat erat kaitannya dengan karakteristik batu itu sendiri, antara lain porositas, daya serap air maupun unsur yang terkandung dalam batu tersebut.

Gambar 5.2. Blok batu yang ditumbuhi lumut

Gambar 5.3. Relief pada batu yang ditumbuhi lumut

Pelapukan lain yang terjadi pada pada batu Candi Borobudur adalah pelapukan kimia yang berupa penggaraman. Munculnya penggaraman ini dikarenakan unsur yang ada pada batu terlarut oleh air dan keluar melalui pori-pori batu akibat penguapan lalu mengendap di permukaan batu. Karena itulah banyak faktor yang menyebabkan penggaraman terjadi baik faktor internal maupun eksternal. Faktor eksternal yang bekerja adalah air, karena keberadaan air inilah yang dapat melarutkan unsur yang terkandung pada batu. Selain itu faktor internal juga sangat mempengaruhi terjadinya penggaraman seperti keberadaan unsur yang dapat terlarut oleh air, maupun porositas batuan karena keberadaan pori-pori pada batuan inilah yang menjadi celah untuk keluarnya hasil pelarutan yang pada akhirnya akan mengendap di permukaan batuan.

Gambar 5.4. Penggaraman pada batu Candi Borobudur

Selanjutnya yang dilakukan adalah analisis sifat fisik, komposisi kimia maupun mineralogi batuan. Karena analisis yang dilakukan bersifat destruktif maka sampel andesit diambil dari batu candiyang ada di tempat penyimpanan batu (kondisinya relatif sama/di tempat terbuka) di sebelah barat Candi Borobudur, sehingga tidak merusak batu yang ada di candi. Sampel yang diambil adalah andesit yang terdiri dari 5 macam warna dan juga andesit yang ditumbuhi lumut maupun yang telah mengalami penggaraman. Setelah itu dilakukan pengkodean batu :

BDR 1 : andesit warna abu-abu
BDR 2 : andesit warna abu-abu kecokelatan
BDR 3 : andesit warna abu-abu kehitaman
BDR 4 : andesit warna kemerahan
BDR 5 : andesit warna hitam

2. Sifat Fisik Batuan

Analisis sifat fisik batu yang dilakukan di laboratorium meliputi densitas, berat jenis, porositas, daya serap air, kekerasan, dan temperatur. Hasil analisis sifat fisik batu yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 5.1. Selanjutnya dilakukan interpretasi hasil analisis untuk membandingkan karakteristik sifat fisik untuk tiap-tiap batu.

Tabel 5.1. Sifat fisik batu penyusun Candi Borobudur

Parameter	BDR 1	BDR 2	BDR 3	BDR 4	BDR 5
Densitas (g/cm3)	2,14	2,12	2,21	2,18	2,23
Berat Jenis	2,67	2,63	2,7	2,68	2,71
Porositas (%)	19,45	20,35	18,78	19,24	17,96
Daya serap air (%)	10,68	10,94	9,78	10,23	9,25
Kekerasan					
(skala mohs)	4 - 6	4 - 6	4 - 6	4 - 6	4 - 6
Temperatur batu (°C)	45,2	44,7	47,1	45,9	48,6

Keterangan :

- Sampel yang dianalisis dipilih andesit yang paling segar (tidak ditumbuhi lumut dan tidak menggalami penggaraman).
- Nilai tiap-tiap parameter sifat fisik didapatkan dari rata-rata beberapa sampel batu yang warnanya sama.
- Temperatur batu diukur pada bulan Agustus 2013 sekitar pukul 11.00 WIB

Dari tabel sifat fisik batu penyusun Candi Borobudur (Tabel 5.1), densitas sampel BDR 5 (hitam) memiliki nilai yang paling tinggi. Berturut-turut yang memiliki nilai densitas dari besar ke kecil yaitu BDR 3 (abu-abu kehitaman), BDR 4 (kemerahan), BDR 1 (abu-abu) idan BDR 2 (abu-abu kecoklatan). Nilai densitas yang lebih tinggi untuk batu yang berwarna gelap dikarenakan sesuai dengan teorinya memiliki kandungan ferro magnesium yang lebih tinggi, sehingga menyebabkan densitasnya menjadi lebih tinggi juga. Nilai berat jenis batu candi mengikuti pola yang sama dengan densitasnya, dimana batu yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi, densitasnya juga lebih tinggi. Nilai berat jenis dan densitas ini berbanding terbalik dengan nilai porositas maupun daya serap airnya. Hal ini dikarenakan batuan dengan rapat massa yang lebih besar akan memiliki volume pori yang lebih kecil.

Untuk nilai kekerasan batu, nilai yang didapatkan relatif sama yaitu 4 - 6 skala mohs. Nilai kekerasan 6 skala mohs didapat pada batuan yang tekstur permukaannya halus (pori-pori batu kecil), sedangkan nilai kekerasan 4 skala mohs didapat dari andesit yang tekstur permukaannya kasar.

Untuk pengukuran temperatur, andesit dengan warna yang gelap mampu menyerap panas yang lebih besar dibandingkan dengan andesit yang berwarna cerah. Hal ini dikarenakan andesit dengan warna gelap memiliki kandungan ferro magnesium yang lebih tinggi, sehingga kemampuan menyerap dan menyimpan panasnya juga lebih tinggi.

3. Komposisi Kimia Batuan

Batu penyusun Candi Borobudur yang berjenis andesit tersusun atas komposisi kimia oksida utama yaitu silikat, alumunium, besi, kalsium, magnesium, natrium, dan kalium. Hasil analisis kimia oksida utama pada batu penyusun Candi Borobudur disajikan pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2. Komposisi kimia batu penyusun Candi Borobudur

Unsur mayor	BDR 1 (%)	BDR 2 (%)	BDR 3 (%)	BDR 4 (%)	BDR 5 (%)
SiO_2	59,69	59,97	58,15	58,20	56,12
Al_2O_3	16,93	17,19	14,35	15,47	13,00
Fe_2O_3	5,31	5,14	6,71	5,97	7,53
FeO	4,78	4,62	6,03	5,37	6,78
MgO	1,57	0,62	1,55	0,62	1,29
CaO	2,68	2,60	3,89	3,50	1,96
Na_2O	3,81	3,50	4,13	4,02	3,29
K_2O	2,83	2,35	2,65	2,88	2,73

Keterangan :
- Sampel yang dianalisis dipilih andesit yang paling segar (tidak ditumbuhi lumut dan tidak menggalami penggaraman)

Dari komposisi kimia andesit Candi Borobudur terlihat bahwa andesit yang berwarna cerah relatif memiliki kandungan silika lebih tinggi daripada andesit yang berwarna gelap. Selanjutnya untuk kandungan besi (Fe), andesit yang berwarna gelap memiliki nilai yang lebih tinggi dari andesit yang berwarna terang. Hal ini dikarenakan kandungan mineral mafik *(ferro magnesium silikat)* yang lebih tinggi sehingga menyebabkan warna yang lebih gelap.

4. Mineralogi Batuan

Untuk mengidentifikasi karakteristik batuan dari aspek tekstur dan komposisi mineralogi dilakukan analisis petrografi dengan mikroskop polarisasi. Dari analisis petrografi yang dilakukan pada sayatan tipis andesit penyusun Candi Borobudur,terlihat kenampakan yang sama dari segi tekstur dan komposisi mineral. Datanya adalah sebagai berikut :

BDR 1

Warna abu-abu kecokelatan, tekstur *porfiritik*, bentuk subhedral-anhedral, komposisi mineral terdiri dari fenokris berupa plagioklas (25 %), piroksen (15 %), mineral opak (5 %) dan massa dasar berupa plagioklas (35 %) dan gelas vulkanik (20 %)

BDR 2

Warna abu-abu kecokelatan, tekstur *porfiritik*, bentuk subhedral-anhedral, komposisi mineral terdiri dari fenokris berupa plagioklas (30 %), piroksen (15 %), mineral opak (5 %) dan massa dasar berupa plagioklas (30 %) dan gelas vulkanik (20 %)

BDR 3

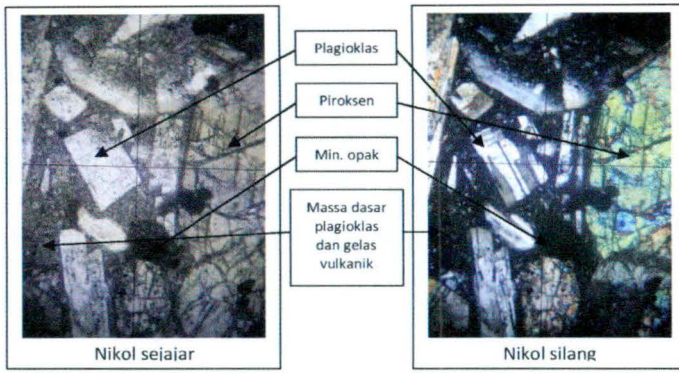
Warna abu-abu kecokelatan, tekstur *porfiritik*, bentuk subhedral-anhedral, komposisi mineral terdiri dari fenokris berupa plagioklas (20 %), piroksen (20 %), mineral opak (5 %) dan massa dasar berupa plagioklas (35 %) dan gelas vulkanik (20 %)

BDR 4

Warna abu-abu kecokelatan, tekstur *porfiritik*, bentuk subhedral-anhedral, komposisi mineral terdiri dari fenokris berupa plagioklas (25 %), piroksen (20 %), mineral opak (5 %) dan massa dasar berupa plagioklas (30 %) dan gelas vulkanik (20 %)

BDR 5

Warna abu-abu kecokelatan, tekstur *porfiritik*, bentuk subhedral-anhedral, komposisi mineral terdiri dari fenokris berupa plagioklas (20 %), piroksen (20 %), mineral opak (5 %) dan massa dasar berupa plagioklas (30 %) dan gelas vulkanik (25 %)



Gambar 5.5. Sayatan tipis andesit BDR 1

Dari analisis petrografi tersebut menunjukkan bahwa andesit penyusun Candi Borobudur tersusun atas mineral yang sama yaitu plagioklas, piroksen, mineral opak dan gelas vulkanik. Yang membedakan hal tersebut hanyalah pada persentase komposisinya saja.Plagioklas yang ada berjenis andesit. Andesit yang berwarna lebih cerah relatif memiliki kandungan plagioklas yang lebih tinggi dibandingkan yang berwarna lebih gelap.Sedangkan untuk kandungan piroksen, andesit yang berwarna lebih gelap memiliki komposisi yang lebih tinggi dibandingkan andesit yang berwarna lebih cerah.

5. Karakteristik Batu Candi Borobudur dan Hubungannya dengan Pertumbuhan Lumut

Batu penyusun Candi Borobudur yang tersusun atas andesit, sebagian telah mengalami pelapukan. Faktor yang berpengaruh terhadap pelapukan batu Candi Borobudur terdiri dari dua macam, yaitu faktor internal dan faktor eksternal. Faktor eksternal yang berpengaruh antara lain keberadaan air, fluktuasi suhu maupun aktifitas organisme, sedangkan faktor internal yang berpengaruh adalah dari karakteristik batu itu sendiri.

Lumut yang merupakan tumbuhan tingkat rendah menjadi salah satu faktor penyebab pelapukan batu Candi Borobudur.

Tumbuhnya lumut pada batu candi selain tentunya disebabkan karena faktor air (kelembaban) juga dipengaruhi oleh karakteristik batu itu sendiri. Alasan kenapa karakteristik batu menjadi salah satu faktor pertumbuhan lumut ini dikarenakan tidak semua batu Candi Borobudur ditumbuhi oleh lumut. Bahkan untuk blok batu yang langsung bersinggungan ada yang ditumbuhi lumut dan ada yang bersih dari pertumbuhan lumut (Gambar 5.6 dan 5.7)

Gambar 5.6. Blok batu yang ditumbuhi lumut dan yang tidak

Gambar 5.7. Relief pada blok batu yang ditumbuhi lumut dan yang tidak

Dari Gambar 5.6 dan 5.7 terlihat bahwa satu blok batu ditumbuhi lumut sedangkan blok batu lain yang bersebelahan tidak ditumbuhi lumut. Secara sepintas terlihat bahwa permukaan batu yang ditumbuhi lumut memiliki tekstur yang lebih kasar jika dibandingkan dengan batu yang bersih dari pertumbuhan lumut. Karena itulah diperlukan analisis sifat fisik dan kimia batuan untuk menjelaskan penyebabnya. Dari analisis sifat fisik yang dilakukan di laboratorium terhadap 3 sampel batu penyusun Candi Borobudur yang ditumbuhi lumut didapatkan hasil sebagai berikut (Tabel 5.3):

Tabel 5.3. Sifat fisik batu penyusun Candi Borobudur yang ditumbuhi lumut

Parameter	BDR 6	BDR 7	BDR 8
Densitas (g/cm^3)	2,02	2,07	2,05
Porositas (%)	23,81	22,85	23,31
Kekerasan (skala mohs)	+ 4	+ 4	+ 4

Dari analisis fisik pada Tabel 5.3 terlihat bahwa batu candi yang ditumbuhi lumut memiliki nilai densitas antara 2,02 - 2,07

g/cm^3. Nilai ini lebih kecil dari nilai densitas batu penyusun Candi Borobudur yang tidak ditumbuhi lumut (Tabel 1). Pada Tabel 1 mengenai sifat fisik batu penyusun Candi Borobudur, nilai densitas batu berkisar antara 2,12 - 2,23 gr/cm^3. Hal ini menunjukkan bahwa lumut tumbuh pada batu yang memiliki rapat massa yang relatif lebih kecil. Ini dikarenakan batu yang memiliki rapat massa lebih kecil akan memiliki pori-pori yang lebih besar yang akan dapat menyerap dan menyimpan air lebih besar pula sehingga kelembaban batu akan lebih tinggi (menunjang pertumbuhan lumut). Hal ini sesuai dengan nilai porositas batu candi yang ditumbuhi lumut (Tabel 3) yaitu berkisar antara 22,85 - 23,81 %, yang lebih tinggi dari porositas batu penyusun Candi Borobudur yang tidak ditumbuhi lumut (Tabel 5.1) yang berkisar antara 17,96 - 20,85 %.

Dari segi kekerasan, batu yang ditumbuhi lumut memiliki kekerasan + 4 skala mohs (Tabel 5.3), yang merupakan nilai kekerasan paling rendah dari batu penyusun Candi Borobudur yang tidak ditumbuhi lumut (Tabel 5.1) yang memiliki kekerasan 4 - 6 skala mohs. Hal ini tentunya dipengaruhi oleh densitas dan porositas batu yang memungkinkan untuk terjadinya pelapukan yang lebih cepat sehingga menyebabkan kekerasan batu menjadi rendah.Pelapukan menjadi semakin intensif karena adanya pertumbuhan lumut.Hal ini dikarenakan *rhizoid* lumut menembus ke dalam batuan mengikuti sistem pori-pori yang dapat menyebabkan dinding diantara pori-pori batuan menjadi pecah (Samidi, 1975).

Selain analisis fisik juga dilakukan analisis kimia untuk mengetahui komposisi kimia batu penyusun Candi Borobudur yang ditumbuhi lumut. Dari analisis kimia yang dilakukan di laboratorium terhadap 2 sampel batu penyusun Candi Borobudur yang ditumbuhi lumut didapatkan hasil sebagai berikut (Tabel 5.4) :

Tabel 5.4 Komposisi kimia batu penyusun Candi Borobudur yang ditumbuhi lumut

Unsur mayor	BDR 6 (%)	BDR 7 (%)
SiO_2	47,36	52,47
Al_2O_3	17,82	15,41
Fe_2O_3	9,11	8,02
FeO	8,19	7,21
MgO	1,71	1,76
CaO	4,56	4,04
Na_2O	4,20	3,80
K_2O	3,63	3,51

Dari Tabel 5.4 terlihat bahwa komposisi kimia batu candi yang ditumbuhi lumut memiliki kandungan SiO2 yang lebih kecil dari batu penyusun Candi Borobudur yang tidak ditumbuhi lumut (Tabel 5.2). Dari analisis kimia yang dilakukan pada dua sampel batu candi yang ditumbuhi lumut didapatkan nilai SiO2 47,36 % dan 52,47 %. Ini lebih kecildari nilai SiO2 pada batu candi yang tidak ditumbuhi lumut (Tabel 5.2) yang berkisar antara 56,12 - 59,97 %. Rendahnya kandungan SiO2 pada batu yang ditumbuhi lumut dikarenakan proses pelapukan yang menyebabkan berkurangnya kadar silika pada batu.

Hal ini sesuai dengan yang dikemukakan oleh Loughnan (1969) bahwa pelapukan memiliki 3 tahapan penting yaitu :

a. Hancurnya struktur mineral asal dengan disertai oleh pembebasan silika.
b. Terpindahnya beberapa komponen batuan yang lapuk
c. Terbentuknya mineral baru yang stabil pada kondisi lingkungan

Selain itu dari komposisi kimia batuan terlihat bahwa batu yang ditumbuhi lumut memiliki kandungan kalium yang lebih tinggi dari batu yang tidak ditumbuhi lumut. Kalium merupakan unsur yang sangat diperlukan untuk pertumbuhan lumut. Fungsi kalium bagi pertumbuhan lumut antara lain :

a. Membentuk dan mengangkut karbohidrat
b. Sebagai katalisator dalam pembentukan protein
c. Menetralkan reaksi dalam sel terutama dari asam organik

Kalium diserap dalam bentuk ion K^+. Dari analisis 2 batu yang ditumbuhi lumut, didapat K_2O 3,51 % dan 3,63 %. Ini lebih tinggi dari kandungan K_2O batu yang tidak ditumbuhi lumut yang berkisar antara 2,35 - 2,88 %. Hal ini menandakan bahwa batu yang memiliki kandungan kalium lebih tinggi relatif lebih mudah untuk ditumbuhi lumut, meskipun masih banyak faktor lain yang berpengaruh dalam pertumbuhan lumut seperti yang telah diuraikan sebelumnya.

6. Karakteristik Batu Candi Borobudur dan Hubungannya dengan Endapan Garam pada Permukaan Batu

Selain pertumbuhan lumut, pelapukan pada batu penyusun Candi Borobudur yang lain adalah munculnya endapan garam pada permukaan batu. Akibat pengaruh suhu lingkungan dan penyinaran matahari serta faktor-faktor lain, air yang terakumulasi pada batu akan menguap. Pada proses penguapan air melalui pori-pori batu, air membawa bahan-bahan mineral terlarut ke permukaan batu. Pada waktu air menguap bahan-bahan mineral terlarut akan tertinggal di permukaan batu sehingga dalam jangka waktu tertentu terakumulasi menjadi endapan garam yang tebal (Sudibyo, 2002).

Karakteristik batu yang diantaranya adalah sifat fisik dan komposisi kimia batu menjadi faktor yang penting dalam proses penggaraman. Hal ini dikarenakan tidak semua batu Candi Borobudur menggalami penggaraman. Bahkan untuk blok batu bersebelahan ada yang mengalami penggaraman dan ada yang tidak mengalami penggaraman (Gambar 5.8). Karena itulah sangat penting untuk mengidentifikasi karakteristik batu seperti tingkat porositas maupun unsur yang terkandung dalam batu dan endapan garam.

Gambar 5.8. Relief pada batu yang mengalami penggaraman dan yang tidak

Dari analisis sifat fisik yang dilakukan terhadap 2 sampel batu candi yang mengalami penggaraman didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 5.5. Sifat fisik batu penyusun Candi Borobudur yang mengalami penggaraman

Parameter	BDR 9	BDR 10
Densitas (g/cm^3)	2,03	2,05
Porositas (%)	23,15	23,36
Kekerasan (skala mohs)	+ 4	+ 4

Dari analisis fisik terhadap 2 batu yang mengalami penggaraman seperti pada Tabel 5.5 diatas terlihat bahwa nilai densitas adalah 2,03 dan 2,05 g/cm^3. Nilai ini lebih kecil dari nilai densitas batu penyusun Candi Borobudur yang tidak mengalami penggaraman (Tabel 2.1). Pada Tabel 2.1 mengenai sifat fisik batu penyusun Candi Borobudur, nilai densitas batu berkisar antara 2,12 - 2,23 g/cm^3. Hal ini menunjukkan bahwa endapan garam muncul pada batu yang memiliki rapat massa yang relatif lebih kecil. Ini dikarenakan batuan yang memiliki rapat massa lebih kecil akan memiliki pori-pori yang lebih besar yang akan dapat menyerap dan menyimpan air lebih besar sehingga pelarutan unsur-unsur yang terkandung didalamnya akan lebih intensif. Hal ini sesuai dengan nilai porositas yang dimiliki yaitu 23,15 % dan 23,36 % (Tabel 5.5), yang lebih tinggi dari nilai porositas batu penyusun

Candi Borobudur tidak mengalami penggaraman (Tabel 5.1) yang berkisar antara 17,96 - 20,85 %. Dari segi kekerasan, batu yang mengalami penggaraman memiliki kekerasan + 4 skala mohs. Hal ini tentunya dipengaruhi oleh densitas dan porositas batu yang memungkinkan untuk terjadinya pelapukan yang lebih cepat sehingga menyebabkan kekerasan batu menjadi rendah. Nilai kekerasan ini lebih rendah dari kekerasan endapan garam yang ada di permukaannya yang mencapai 5 - 6 skala mohs. Tingkat kekerasan endapan garam yang tinggi menjadi salah satu sebab kenapa pada permukaan batu yang mengalami penggaraman tidak ditumbuhi lumut. Lumut hanya tumbuh pada bagian tertentu saja, pada umumnya mengumpul di lubang-lubang alveol dan pori-pori yang tidak tertutup endapan garam. Pertumbuhan lumut pada blok batu yang mengalami penggaraman dapat dilihat pada Gambar 5.9 sebagai berikut :

Gambar 2.9. Pertumbuhan lumut pada blok batu yang mengalami penggaraman

Selain analisis fisik juga dilakukan analisis kimia untuk mengetahui komposisi kimia batu penyusun Candi Borobudur yang mengalami penggaraman. Dari analisis kimia yang dilakukan di laboratorium terhadap sampel batu penyusun Candi Borobudur yang mengalami penggaraman didapatkan hasil sebagai berikut (Tabel 5.6) :

Tabel 5.6. Komposisi kimia batu penyusun Candi Borobudur yang mengalami penggaraman

Unsur mayor	BDR 9 (%)
SiO_2	47,34
Al_2O_3	20,55
Fe_2O_3	8,60
FeO	7,73
MgO	1,55
CaO	4,15
Na_2O	4,16
K_2O	3,03

Dari Tabel 5.6 terlihat bahwa komposisi kimia batu candi yang mengalami penggaraman memiliki kandungan SiO2 yang lebih kecil dari batu penyusun Candi Borobudur yang tidak mengalami penggaraman (Tabel 5.2). Dari analisis kimia yang dilakukan pada sampel batu candi yang mengalami penggaraman didapatkan nilai SiO2 47,34 %. Ini lebih kecil dari nilai SiO2 pada batu candi yang tidak mengalami penggaraman (Tabel 5.2) yang berkisar antara 56,12 - 59,97 %. Rendahnya kandungan SiO2 pada batu yang mengalami penggaraman dikarenakan oleh proses penggaraman yang salah satunya melarutkan SiO2 dan kemudian mengendap di permukaan batu.

Ini terlihat hasil analisis endapan garam pada permukaan batu Candi Borobudur yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Septiningrum (2007) menganalisis 4 sampel endapan garam yang diambil pada permukaan batu di ke-4 sisi Candi Borobudur. Hasilnya adalah sebagai berikut (Tabel 5.7) :

Tabel 5.7. Hasil analisis endapan garam pada permukaan batu Candi Borobudur (Septiningrum, 2007)

No.	Parameter	Endapan Garam (%)				Rata-rata (%)
		Sampel A	Sampel B	Sampel C	Sampel D	
1	Kalsium (Ca+)	15,83	13,57	14,47	12,72	14,15
2	Magnesium (Mg2+)	10,57	8,47	9,60	9,65	9,57
3	Aluminium (Al3+)	1,42	1,66	1,83	4,27	2,30
4	Besi (Fe3+)	3,68	2,29	3,78	4,43	3,54
5	Sulfat (SO42-)	2,53	2,95	1,08	2,18	2,19
6	Klorida (Cl-)	0,41	0,43	0,27	0,40	0,38
7	Silika (SiO2)	38,62	37,05	38,50	36,07	37,56
8	Karbonat (CO32-)	26,94	33,57	30,47	30,29	30,32

Keterangan :
Sampel A : Endapan garam pada dinding sisi timur lantai 1
Sampel B : Endapan garam pada dinding sisi barat lantai 1
Sampel C : Endapan garam pada dinding sisi utara lantai 1
Sampel D : Endapan garam pada dinding sisi selatan lantai 1

Dari Tabel 5.7 terlihat bahwa komposisi kimia endapan garam pada permukaan batu Candi Borobudur mayoritas tersusun atas silika, karbonat, kalsium dan magnesium. Silika (SiO_2) larut dalam air yang terakumulasi pada pori-pori batu membentuk asam silikat (H_4SiO_4). Karena proses penguapan air melalui pori-pori batu, silika akan mengendap di permukaan batu. Reaksinya adalah sebagai berikut :

$$H_4SiO_4(aq) \longrightarrow SiO_{2(s)} + 2\,H_2O$$

Adapun senyawa karbonat muncul karena unsur yang ada dalam batu mengalami kontak dengan air hujan. Reaksinya adalah sebagai berikut :

$$CO_2 + H_2O \longrightarrow H2CO_{3(aq)}$$
$$CaO_{(s)} + H_2CO_{3(aq)} \longrightarrow CaCO_{3(s)} + H_2O$$
$$MgO_{(s)} + H_2CO_{3(aq)} \longrightarrow MgCO_{3(s)} + H_2O$$

Dari reaksi di atas terlihat bahwa kalsium dan magnesium bereaksi dengan H2CO3 dan mengalami pelarutan. Selanjutnya karena proses penguapan air melalui pori-pori batu, garam karbonat akan mengendap di permukaan batu dalam bentuk CaCO3 dan MgCO3. Hal ini yang menyebabkan endapan garam pada permukaan batu banyak mengandung karbonat, kalsium dan magnesium.

E. PENUTUP

1. Kesimpulan

Candi Borobudur tersusun oleh batu yang sejenis yaitu andesit.Meskipun demikian andesit penyusun Candi Borobudur memiliki karakteristik yang berbeda-beda sehingga memiliki tingkat kerusakan dan pelapukannya yang berbeda. Karakteristik batu penyusun Candi Borobudur antara lain :

a. Batu candi yang berwarna gelap memiliki memiliki densitas yang lebih besar dibandingkan batu candi yang berwarna cerah karena kandungan kandungan ferro magnesium yang lebih tinggi. Selain itu batu candi yang berwarna gelap mampu menyerap panas yang lebih besar dibandingkan dengan batu candi yang berwarna cerah.

b. Batu candi yang berwarna cerah memiliki kandungan silika lebih tinggi dan kandungan besi (Fe) yang lebih rendah daripada batu candi yang berwarna gelap.

c. Batu candi yang ditumbuhi lumut memiliki densitas yang lebih kecil dan porositas yang lebih besar jika dibandingkan batu candi yang tidak ditumbuhi lumut.

d. Kandungan silika pada batu candi yang ditumbuhi lumut lebih rendah jika dibandingkan dengan yang tidak ditumbuhi lumut. Hal ini dikarenakan proses pelapukan yang terjadi menyebabkan berkurangnya kadar silika pada batu.

e. Kandungan kalium pada batu candi yang ditumbuhi lumut lebih tinggi jika dibandingkan dengan yang tidak ditumbuhi lumut. Hal ini dikarenakan kalium merupakan unsur yang sangat diperlukan untuk pertumbuhan lumut.

f. Batu candi yang mengalami penggaraman memiliki densitas yang lebih kecil dan porositas yang lebih besar jika dibandingkan batu candi yang tidak mengalami penggaraman.

g. Kandungan silika pada batu candi yang mengalami penggaraman lebih rendah jika dibandingkan dengan yang tidak mengalami penggaraman. Hal ini dikarenakan oleh proses penggaraman yang salah satunya melarutkan silika dan kemudian mengendapkannya di permukaan batu.

2. Saran

Melakukan pengamatan secara kontinyu pada blok-blok batu yang mengalami penggaraman maupun yang ditumbuhi lumut pada permukaannya sehingga dapat diketahui perubahan yang terjadi dari waktu ke waktu.

DAFTAR PUSTAKA

Ariyanto, Y.B. 1993. *Laporan Studi Konservasi Tentang Penanganan Pengelupasan Batuan Candi Borobudur.* Magelang: Balai Studi dan Konservasi Borobudur.

Leisen, H., & Leisen E.v.P. 2012. *Technical Mission to Borobudur World Heritage Site in Indonesia.* Germany: Cologne University.

Loughnan, F.C. 1969. *Chemical Weathering of Silicate Minerals.* New York: Elsevier.

Martini, I.P., Chesworth, W. 1992. *Weathering Siol dan Paleosoil.* Amsterdam: Elsevier.

Samidi. 1975. *Penelitian Pendahuluan Pemberantasan Lumut pada Batuan Candi Borobudur,* Pelita Borobudur Seri B No. 7. Jakatra: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Sampurno. 1969. *Penelitian Tanah Dasar Candi Borobudur, Pelita Borobudur, Seri B No. 1.* Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia.

Septiningrum, D.P. 2007. *Analisis Endapan Garam pada Permukaan Batu Candi Borobudur.* Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.

Siregar, I.M. 2011.*Identifikasi Kerusakan dan Pelapukan Batuan, Makalah disajikan dalam Pelatihan Tenaga Teknis Konservasi Tingkat Menengah 25 Juli – 13 Agustus 2011.* Magelang: Balai Konservasi Borobudur.

Soekmono, R. 1972. *Riwayat Usaha Penyelamatan Candi Borobudur, Pelita Borobudur,* Seri A No. 1. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Sudibyo, Suhardi & Hersaktiningrum. 2002. *Studi Proses Penggaraman pada Batu Candi dan Metode Penanganannya.* Magelang: Balai Studi dan Konservasi Borobudur.

KAJIAN STRUKTUR PERMUKAAN HALAMAN CANDI BOROBUDUR DAN KORELASINYA DENGAN KEAUSAN BATU TANGGA

Brahmantara, Muhsidi, Wahyudi

Abstract

Courtyard of Borobudur temple surface structure on the present state of a given layer of a material such as sand, the drainage system is made such that the water flows out through the hills do not carry the sand material. The negative impact caused by the use of sand as a surface layer on the stone courtyard of the temple is the wear and tear on the stairs of the Borobudur Temple

The study of the correlation between the surface structure of the temple courtyard with eroded stone staircase Borobudur conducted to determine the influence of these relationships to wear the stone staircase and stone floors Borobudur.

The research method is done by calculating the friction value based on the load of visitors per person and also is done by testing the value of a stone by comparing the surface roughness based on the age of the existing stone on stone Borobudur.

From the calculation of the value of the wear based on the load of visitors showed that the ladder rises from 2003 to 2007 occurred wear rate of 0,7 cm, and to the stairs down (north, south, and west) from 2003 to 2007, the increase in annual wear rate of 0,8 cm.

From the test surface roughness values with Pendulum Skid Resistance can be seen that the value of the surface roughness of Borobudur temple stone there in a safe value, but for a stone staircase, assuming 24 years of age stone is a stone that is placed upon the restoration of both have secure critical value to the value of skid resistance by 37 BPN.

Keywords: stone wear, surface roughness, stone stairs, the pendulum skid resistance

Abstrak

Struktur permukaan halaman Candi Borobudur pada kondisi sekarang diberi lapisan berupa material pasir, dengan sistem drainase yang dibuat sedemikian rupa sehingga aliran air yang keluar lewat bukit tidak membawa material pasir tersebut. Dampak negatif yang diakibatkan oleh penggunaan pasir sebagai lapisan permukaan atas halaman candi adalah keausan batu pada tangga Candi Borobudur.

Kajian mengenai korelasi antara struktur permukaan halaman candi dengan keausan batu tangga Candi Borobudur dilaksanakan untuk mengetahui besarnya pengaruh dari hubungan tersebut terhadap keausan batu tangga dan batu lantai Candi Borobudur.

Metode penelitian dilakukan dengan menghitung nilai gesekan berdasarkan beban pengunjung per orangnya dan juga dilakukan dengan pengujian nilai kekesatan permukaan batu dengan membandingkan berdasarkan umur batu yang ada pada batu Candi Borobudur.

Dari perhitungan nilai keausan berdasarkan beban pengunjung didapatkan hasil bahwa pada tangga naik dari tahun 2003 sampai 2007 terjadi tingkat keausan 0,7 cm, dan untuk tangga turun (sisi utara, selatan, dan barat) dari tahun 2003 sampai tahun 2007 kenaikan tingkat keausan pertahunnya sebesar 0,8 cm.

Dari uji nilai kekesatan permukaan dengan *Skid Pendulum Resistance* dapat diketahui bahwa nilai kekesatan permukaan batu Candi Borobudur ada pada nilai aman, namun untuk batu tangga, dengan asumsi umur batu 24 tahun yaitu batu yang dipasang pada saat pemugaran kedua mempunyai nilai aman kritis dengan nilai s*kid resistance* sebesar 37 BPN.

Kata kunci : Keausan batu, kekesatan permukaan, batu tangga, skid pendulum resistance

A. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang Permasalahan

Candi Borobudur merupakan sebuah candi Budha yang dibangun di atas bukit dengan ketinggian kurang lebih 265 m. Borobudur dibangun pada masa kejayaan wangsa Syailendra. Setelah terlantar selama berabad-abad, Candi Borobudur ditemukan kembali oleh Thomas Stamford Raffles. Dalam perkembangannya konstruksi Candi Borobudur mengalami kondisi yang mengkhawatirkan kemudian dilakukan pemugaran yang pertama oleh Theodoor van Erp, seorang insinyur yang juga anggota tentara Belanda, dan Van de Kamer, insinyur ahli konstruksi bangunan. Pemugaran pertama yang dilakukan oleh Theodoor van Erp belum menyeluruh kesemua bagian candi. Kemudian pada tahun 1973 sampai dengan tahun 1983 dilakukan pemugaran yang kedua yang dilakukan oleh pemerintah Indonesia bekerja sama dengan UNESCO.

Perkembangan dalam aspek pemanfaatan memberikan dampak yang cukup signifikan. Kenaikan jumlah pengunjung tiap tahunnya berpengaruh terhadap tingkat keterawatan material batu sebagai penyusun candi. Beberapa perilaku yang juga cukup berpengaruh terhadap tingkat kelestarian Candi Borobudur adalah vandalisme dan sampah.

Selain permasalahan sampah dan vandalisme, pengunjung yang naik pada candi juga mempengaruhi tingkat keterawatan material batu pada lantai dan batu pada bagian tangga Candi Borobudur.

2. Rumusan Masalah

Sampai kondisi saat ini keausan pada batu bagian tangga dan lantai Candi Borobudur terus terjadi terutama pada bagian sudut batu tangga. Pijakan alas kaki pengunjung yang naik ke candi merupakan faktor yang cukup berpengaruh terhadap tingkat keausan yang terjadi. Tingkat keausan yang terjadi pada batu

bagian tangga maupun lantai dipengaruhi juga oleh jenis alas kaki yang digunakan. Alas kaki karet akan memberikan dapak keausan yang berbeda dengan jenis alas kaki kayu. Disamping jenis alas kaki yang dipakai faktor lain yang cukup besar adalah material pasir yang berada di halaman candi. pasir ini di rancang sebagai bagian dari komposisi lapisan pudel yang berfungsi sebagai stabilisasi permukaan tanah halaman, namun di sisi lain material pasir yang terbawa oleh alas kaki pengunjung ini akan mempercepat tingkat keausan batu tangga dan lantai. Gesekan dari material pasir ke batu akan berpengaruh terhadap tingkat keausan yang terjadi. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh material ini terhadap tingkat keausan yang terjadi maka perlu dilakukan kajian yang komprehensif. Dari hasil kajian ini diharapkan mampu memberikan rekomendasi terhadap penggunakan material pasir pada halaman candi.

3. Maksud dan Tujuan

Maksud dari kajian ini adalah untuk mengetahui pengaruh material pasir yang digunakan sebagai lapisan permukaan halaman candi terhadap keausan batu tangga Candi Borobudur. Sedangkan tujuan yang diharapkan adalah untuk mengetahui besarnya pengaruh hubungan tersebut terhadap tingkat keausan batu tangga dan batu lantai Candi Borobudur.

4. Manfaat Kajian

Manfaat dari Kajian Struktur Permukaan Halaman Candi Borobudur dan Korelasinya dengan Keausan Batu Tangga adalah untuk mengetahui besarnya pengaruh dari hubungan tersebut terhadap tingkat keausan batu tangga Candi Borobudur, sehingga diketahui tingkat keausan yang terjadi, hasil dari kajian ini diharapkan dapat digunakan sebagai data dalam melaksanakan tindakan penanggulangan keausan batu tangga dan batu lantai Candi Borobudur.

5. Ruang lingkup

Ruang lingkup dari kajian ini meliputi :

1. Ruang lingkup wilayah penelitian yaitu pada Candi Borobudur meliputi bagian halaman, batu tangga dan batu lantai candi.
2. Ruang lingkup substansi penelitian yaitu :
   a. tingkat keausan batu tangga dan batu lantai pada masing-masing sisi candi
   b. faktor pengunjung dan jenis alas kaki yang digunakan

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Batu penyusun Candi Borobudur

Candi Borobudur tersusun dari batu andesit dengan volume keseluruhan kurang lebih sebesar 55.000 m^3, dengan pahatan dan relief-relief yang ada, jika disusun berderet panjangnya kurang lebih 2900 meter.

Bentuk penampang vertikal menyerupai punden berundak dengan bagian-bagian yang terdiri dari *Kamadhatu, Rupadhatu, dan Arupadhatu* dengan komponen/bagian pokoknya yaitu lantai, dinding pagar langkan, gapura, dan stupa teras, sedangkan bentuk susun batu adalah dengan pola susun batu arah horisontal/mendatar, dengan ukuran batu kisaran : ± panjang 40-50 cm, ± tebal 30-40 cm dan ± tinggi 20-25 cm. Batu penyusun Candi Borobudur terdiri dari batuan andesit dengan komposisi sebagai berikut :

a. Batuan andesit
b. Porositas : (21,6 – 51,3) %
c. Berat jenis riil : 2,62 – 2,83
d. Kekerasan (skala mohs) : 5-7
e. Kuat tekan 66,5 kg/cm^2 – 207 kg/cm^2
f. Kadar air jenuh : 8,63 – 13,59 %

g. Permeabilitas : (0,6 – 12,7) darcys
h. Masa padat :
   i. Mineral : (31,01 – 63,55) %
   ii. Masa dasar : (36,45 – 68,99) %

Foto. 6.1 Pola Susun Batu Candi Borobudur

Foto. 6.2 Keausan Batu Tangga Candi Borobudur

Batu andesit penyusun Candi Borobudur sebagian mengalami keausan, terutama pada bagian lantai dan tangga. Menurut Sutanto (1985), pada Taufik, M (2005) disebutkan bahwa ditemukan 801 blok batu yang mengalami keausan. Hasil pengamatan di tahun 2000 jumlah keausan batu menjadi 1.383 blok batu (Sadirin, 2002), terjadi peningkatan keausan sebesar 582 blok batu. Jika dirata-rata setiap tahun terjadi keausan sebesar 36 blok batu.

2. Kekesatan permukaan material (*skid resistance)*

Kekesatan permukaan material adalah kemampuan dari permukaan perkerasan untuk memperkecil terjadinya roda kendaraan slip atau tergelincir terutama pada waktu permukaan jalan dalam keadaan basah. Permukaan jalan yang kasar mempunyai kekesatan yang lebih baik daripada permukaan jalan yang halus. Permukaan jalan yang terlalu kasar menyebabkan gangguan kenyamanan akibat bunyi yang timbul pada gesek antara ban dengan permukaan jalan, serta ban menjadi mudah aus. Permukaan perkerasan yang mengalami bleeding, kekesatannnya menjadi rendah.

C. LANDASAN TEORI

1. Gaya Gesekan

Gaya gesek adalah gaya yang akan bekerja pada benda dan arahnya selalu melawan arah gerak benda. Gaya gesek hanya akan bekerja pada benda jika ada gaya luar yang bekerja pada benda tersebut.

Keausan batu tangga dan lantai lorong pada Candi Borobudur faktor terbesar disebabkan oleh gesekan alas kaki pengunjung yang membawa material pasir halaman terhadap batu tangga dan lantai. Gaya gesekan ini dipengaruhi oleh beban pengunjung, sudut gesekan dan gaya gravitasi, dari hasil perhitungan didapatkan besaran koefisien yang terjadi, seperti yang disampaikan juga oleh Muhammad Taufik pada tesisnya 2005, perhitungan *koefisien gesek* ini dirumuskan sebagai berikut :

$$F = \mu . N$$

Keterangan :
μ. : koefisien gesekan
N : gaya normal pada benda yang ditinjau gaya geseknya
f : gaya gesek

dari rumusan dasar tersebut untuk analisa keausan batu tangga Candi Borobudur, dijabarkan dalam bentuk fungsi sebagai berikut :

$f_k = \mu k . N$

$N = W - F . \text{Sin } \alpha$

$F.h = f_k . S \qquad h = \frac{fk.s}{F}$

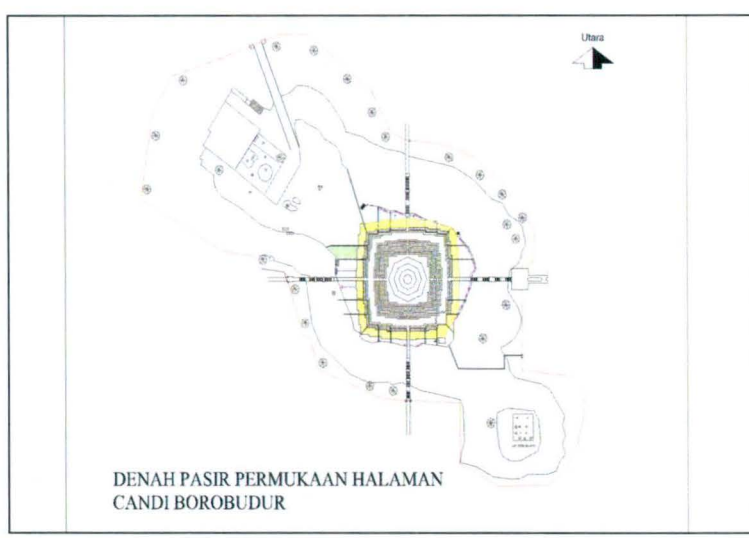
Nilai fk untuk gaya kinetik dan fs untuk gaya statik.

Nilai f_s/f_k antara nol sampai maksimum (nilai $f_s = 0$ jika tidak ada gaya luar F yang bekerja pada benda, dan nilai f_s mencapai maksimum pada saat benda akan bergerak). f_s maksimum ini tergantung pada sifat permukaan benda dan lantai yang bersinggungan serta tergantung pada gaya normal.

Untuk gaya gesekan yang terjadi pada batu tangga Candi Borobudur, juga dipengaruhi oleh sudut gesekan yaitu sudut kaki ketika orang berjalan naik dan sudut yang terbentuk ketika orang berjalan turun.

2. Lapisan Permukaan Tanah Halaman Candi Borobudur

Tanah halaman Candi Borobudur terbentang di keempat sisi dengan luas area masing masing berbeda-beda. Material pasir sebagai lapisan permukaan halaman tidak dipasang pada semua bagian sisi, karena halaman pada masing masing sudut dibagi menjadi beberapa fungsi, pada bagian tengah yang digunakan sebagai jalur pengunjung mengelilingi candi inilah lapisan permukaan tanah dengan material pasir diaplikasikan, sedangkan pada tepi luar dan dalam bagian kanan kiri jalur diberikan gebalan rumput, seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar 6.1. Denah Halaman Candi dengan Struktur Permukaan Pasir

D. METODOLOGI PENELITIAN

Untuk memperoleh data yang sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup penelitian metode yang digunakan meliputi dua tahapan pengumpulan data :

1. Studi literatur

   Studi literatur ini dilakukan dengan mencari referensi mengenai penelitian tentang keausan batu yang pernah dilaksanakan, karakteristik batuan candi borobudur, jumlah pengunjung dan tingkat kenaikan pertahunnya, dimensi dan luas keausan permukaan batu tangga dan batu lantai

2. Survei dan perekaman data langsung dilapangan

   Langkah pengumpulan data pada tahapan ini dilakukan dengan survei langsung melakukan pengukuran tingkat keausan pada batu tangga dan lantai, pengumpulan data jenis alas kaki pengunjung, dan pengukuran nilai kekesatan permukaan pada batu asli dan batu baru yang digunakan pada bagian selasar candi

Survei dan perekaman data dilapangan

1. Alat dan Bahan

a. Alat

Alat yang digunakan untuk pengambilan data di lapangan ini terdiri dari :

a. Sikat ijuk (bulu lembut dan kasar)
b. Penggaris
c. Papan tulis lapangan/*Hardboard*
d. Meteran
e. Distometer
f. Spidol anti air
g. Pensil *trackpen*
h. *Autolevel sprinter*

i. Alat untuk Pengujian kekesatan permukaan (SNI 03-4427-1997) terdiri dari :

- British Pendulum Tester

Foto 6.3 British Pendulum Tester

- Peluncur

  Peluncur terdiri atas lempengan pelat karet ukuran 6 mm x 5 mm x 76 mm yang direkatkan di bagian telapak bandul untuk pengujian pada permukaan datar, atau pelat karet ukuran 6 mm x 25 mm x 32 mm untuk pengujian pemolesan. Karet peluncur terbuat dari karet alam *(British)* sesuai dengan persyaratan dari *Road Research Laboratory (RRL) – British* atau karet sintetis yang sesuai dengan persyaratan dalam AASHTO M 261

Foto 6.4 Karet Peluncur

- Mistar pengukur panjang terdiri atas mistar tipis berskala untuk mengukur panjang bidang kontak yang akan diuji, dengan jarak antara 124 mm dan 127 mm untuk permukaan uji datar, atau 75 mm dan 78 mm untuk benda uji lengkung
- Termometer permukaan, dengan kapasitas 1°C sampai dengan 60°C.
- Peralatan lainnya antara lain tempat air, termometer permukaan, dan kuas.

b. Bahan

Bahan yang dipakai terdiri dari sampel batu andesit Candi Borobudur.

2. Metode Pelaksanaan

Adapun metode dan langkah kerja yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi :

a. Obervasi data di lapangan

1) Data pengunjung selama kurun waktu 8 tahun dari tahun 2000 – 2007
2) Pengambilan sampling jenis alas kaki yang dipakai pengunjung
3) Pengukuran tebal keausan pada batu tangga dan batu lantai masing-masing sampling di keempat sisi candi.
4) Perhitungan nilai gaya gesekan batu pada tangga dan lantai lorong berdasarkan beban dan sudut gaya yang dihasilkan.

b. Pengujian Laboratorium

Pengujian kekesatan permukaan perkerasan batu menggunakan *British Pendulum Tester (BPT)*

1) Ruang Lingkup

Standar ini menetapkan prosedur untuk mengukur nilai kekesatan permukaan perkerasan dalam hal ini batu tangga dan batu Candi Borobudur menggunakan alat *British Skid Resistance Tester (BPT).*

2) Acuan normatif

SNI 03-4427-1997, *Metode pengujian kekesatan permukaan perkerasan dengan alat pendulum.*

AASHTO M 261, *Standart tire for pavement property test.*

ASTM E 50, *Specification for standart rib tire for pavement skid resistance test*

3) Istilah dan Definisi

- **Kekesatan***:* tahanan gesek antara dua jenis benda yang salah satu atau keduanya bergerak.
- **Alat uji pendulum British (British Pendulum Tester, BPT):** alat yang digunakan untuk mengukur nilai kekesatan permukaan perkerasan dilengkapi dengan suatu ayunan atau pendulum atau bandul pada kedudukan tertentu.
- **British Pendulum Number (BPN):** nilai yang diperoleh dari hasil uji kekesatan pada permukaan perkerasan, yang diukur dengan alat *British Pendulum Tester (BPT).*
- **Peluncur karet***:* lembaran karet dengan ukuran tertentu yang direkatkan pada bagian bawah telapak bandul alat BPT, sebagai simulasi ban kendaraan; peluncur karet yang digunakan ada dua jenis yaitu karet peluncur British terbuat dari karet alam, dan karet peluncur sintetis yang sesuai dengan ketentuan dalam AASHTO M 261.
- **Nilai pemolesan *(polishing value)*:** kekesatan yang diperoleh dari pengujian kekesatan menggunakan alat BPT terhadap permukaan benda uji berupa batu

atau susunan batu yang diikat oleh semen atau aspal dengan bentuk dan ukuran tertentu.

E. HASIL DAN PEMBAHASAN

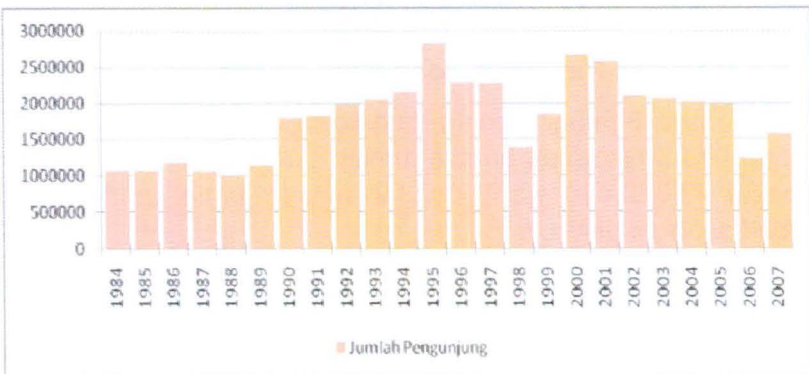
1. Keausan Batu Lantai dan Batu Tangga

Dari hasil pengumpulan data pengunjung dari tahun 1984 sampai 2007 diketahui bahwa jumlah pengunjung yang datang sebesar 43.328.414 orang dengan rincian jumlah pertahunnya adalah sebagai berikut :

Tabel 6.1 Jumlah Pengunjung Candi Borobudur dari Tahun 1984-2007

No	Tahun	Jumlah Pengunjung	No	Tahun	Jumlah Pengunjung
1	1984	1.082.363	13	1996	2.292.264
2	1985	1.080.568	14	1997	2.275.222
3	1986	1.178.668	15	1998	1.394.769
4	1987	1.060.303	16	1999	1.851.192
5	1988	1.017.052	17	2000	2.673.967
6	1989	1.149.298	18	2001	2.581.783
7	1990	1.805.923	19	2002	2.106.327
8	1991	1.834.420	20	2003	2.069.093
9	1992	1.990.016	21	2004	2.026.442
10	1993	2.053.128	22	2005	1.992.776
11	1994	2.161.902	23	2006	1.243.062
12	1995	2.834.856	24	2007	1.573.020

Sumber : Data Base Balai Konservasi Borobudur dan PT.TWCB



Grafik 6.1 Jumlah Pengunjung Candi Borobudur dari Tahun 1984-2007

Dari hasil pengumpulan dan pengamatan data dilapangan untuk jenis alas kaki yang digunakan oleh pengunjung menunjukkan ada beberapa macam tipe alas kaki yang digunakan, data tersebut adalah sebagai berikut :

Tabel 6.2 Jenis Sampel Alas Kaki yang Dipakai Pengunjung Candi Borobudur

No	Jenis alas kaki yang digunakan	Jumlah	Ket
1	Sepatu kulit	75	
2	Sepatu Boot	45	
3	Sepatu sport olahraga	124	
4	Sandal jepit	43	
5	Sandal kulit	26	

Sumber : Penulis melalui pengamatan dilapangan : November 2008

Hasil pengamatan di lapangan yang dilakukan oleh Taufik dkk menunjukan bahwa keausan pada lantai lorong dan teras *arupadhatu* berkisar antara 0,2 – 1,5 cm, sedangkan pada tangga sisi timur antara 0,2 – 1,8 cm, dan ketiga sisi lainnya berkisar antara 0,2 – 1,3 cm (T*aufik , 2005*).

Untuk mengetahui proses keausan batu yang terjadi digunakan rumus sebagai berikut (*Taufik, 2005*) :

$$Fk = \mu k.\ X\ N$$

$$N = W - F.\text{Sin}\ \alpha$$

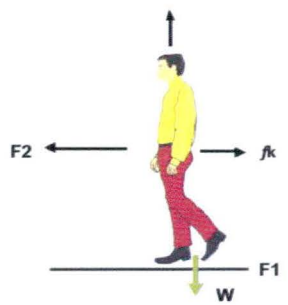
$$F.h = fk.\ S$$

$$H = \frac{fk.\ S}{F}$$

Keterangan :
fk : Gaya gesek
Uk: Koefisien gesek
N : Gaya normal : m x g (masa x gravitasi)
W : Gaya berat
F : Gaya tahan
S : Panjang gesekan

1. Analisis keausan batu pada lantai

N : gaya normal
fk : gaya gesekan
W : berat sendiri
F1 : gaya tahan batu
F2 : gaya gerak sendiri



Gambar 6.2 Gaya-gaya yang ditimbulkan ketika orang sedang berjalan

Sudut yang dibentuk ketika orang sedang berjalan

pada lantai adalah horisontal diasumsikan sebesar 17°. Maka perhitungan gaya gesek yang terjadi adalah sebagai berikut :

Uk = tg α
= tg. 17°
= 0,303
m = 60 kg (berat rata-rata orang)
s = 5 cm = 5 x 10^{-2}

Nilai gaya geseknya (fk)

Fk = uk x N
= uk x W
= uk x m.g
= 0,305 x 60 x 9,8
= 179,34 N

Dari nilai gaya gesek dihitung angka keausannya dengan F1 gaya tahan batu sebesar : 214,01 x 10^{8})

$$F1 \times h = fk \times s$$

$$h = \frac{179,34 \times 5.10^{-2}}{214,01 \cdot 10^{8}}$$

$$= \frac{896,7 \times 10^{-2}}{214,01 \cdot 10^{8}}$$

$$= \mathbf{4,19 \times 10^{-10}\ m}$$

Angka tersebut adalah tingkat keausan ketika orang berjalan dalam sekali pijakan gesek. Jika dihitung terhadap pengunjung sejak tahun 1984 sampai 2007 sebesar 43.328.414 maka nilai keausan yang terjadi pada batu lantai sebesar :

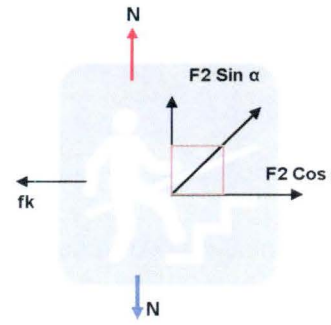
= 4,19 x 10^{-10} x 43.328,414
= 0,018 m = **1,8 cm**

Dari perhitungan Taufik dengan data pengunjung sampai

dengan 2003 terjadi keausan batu sebesar 1,5 cm jadi jika dibandingkan data sampai dengan tahun 2007, dari tahun 2003 terjadi kenaikan tingkat keausan pada batu sebesar **0,3 cm**.

2. Analisis keausan batu pada tangga ketika posisi pengunjung naik

N : gaya normal
fk : gaya gesekan
W : berat sendiri
F2 : gaya gerak sendiri yang terjadi ketika mengangkat kaki



Gambar 6.3 Gaya-Gaya yang Ditimbulkan Ketika Orang Naik Tangga

Sudut yang dibentuk ketika orang berjalan naik pada tangga adalah sudut resultan dengan asumsi besar sudut 38°. Gaya gerak (F2) dicari dengan menggunakan rumus neraca pegas. Langkah pertama cari nilai gaya berat (N) yang terjadi ;

$$N + F2 \sin \alpha = W$$
$$N = W - F2 \sin \alpha$$
$$= m.g - F2 \sin \alpha$$
$$= 60.9{,}8 - 512{,}16 \,.0{,}616$$
$$= \underline{\mathbf{276\ N}}$$

Gaya gesek (fk) yang dihasilkan sebesar :

$$Fk = uk \,.\, N$$
$$= tg.\ 38° \times 276$$
$$= \underline{\mathbf{215{,}28\ N}}$$

Dari data perhitungan diatas maka untuk nilai keausan batu pada tangga dicari :

$$h = \frac{fk \times s}{F1}$$

$$h = \frac{215{,}28 \times 0{,}05}{2{,}14 \times 10^{10}}$$

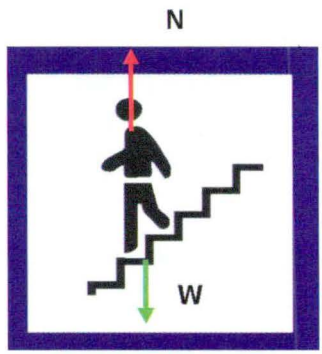
$$= \frac{10{,}7654}{2{,}14 \times 10^{10}} = \mathbf{5{,}03 \cdot 10^{-10}\ m}$$

Jika nilai keausan dihitung sejak tahun 1984 sampai tahun 2007 maka didapatkan nilai sebesar :

$$= 5{,}03 \cdot 10\ 10 \times 43.328.414$$

$$= \mathbf{2{,}2\ cm}$$

3. Analisis keausan batu pada tangga ketika posisi pengunjung turun tangga



Gambar 6.4 Gaya-Gaya yang Ditimbulkan Ketika Orang Naik Tangga

Sudut yang dibentuk ketika orang berjalan pada lantai adalah horisontal diasumsikan sebesar 38°. Gaya gerak (F2) ketika kaki mengayun kebawah = 0, gaya tahan batu F1 sebesar 2,14 x 10^{10} newton. Koefisien gesek (μk) = 0,78

Pertama kita cari gaya berat (N) yang terjadi :

N = W
= m .g
= 60 x 9,8
= 588 N

Gaya gesek (fk) yang dihasilkan sebesar :

fk = uk x N
= 0,78 x 276
= 458, 64 N

Dari perhitungan di atas maka nilai keausan tangga dicari :

$$h = \frac{fk \times s}{F1}$$

$$= \frac{458,64 \times 0,05}{2,14 \times 10^{10}}$$

$$= \frac{22,932}{2,14 \times 10^{10}}$$

$$= \mathbf{10,72 \,.\, 10^{-10}\ m}$$

Jika nilai keausan dihitung sejak tahun 1984 sampai tahun 2007 sebesar :

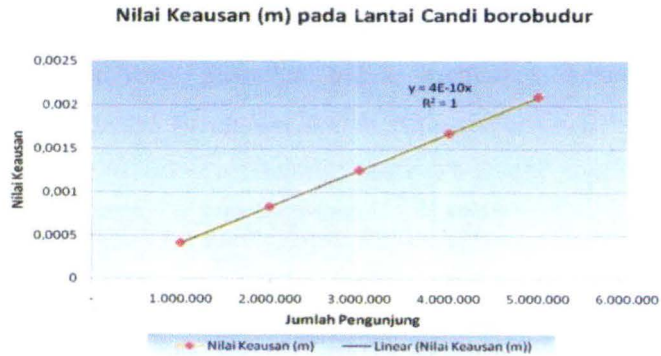
$$= 10,72 \,.\, 10^{-10} \times 43.328.414 = \mathbf{4,6\ cm}$$

Dari perhitungan Taufik tahun 2005 dengan data pengunjung sampai 2003 sebesar 3,8 cm dari tahun 2003 sampai 2007 ada kenaikan tingkat keausan sebesar **0,8 cm.**

Untuk perhitungan nilai keausan ketika turun tangga diasumsikan pengunjung turun melalui tiga tangga sehingga nilai keausan dibagi tiga : **0,26 cm**

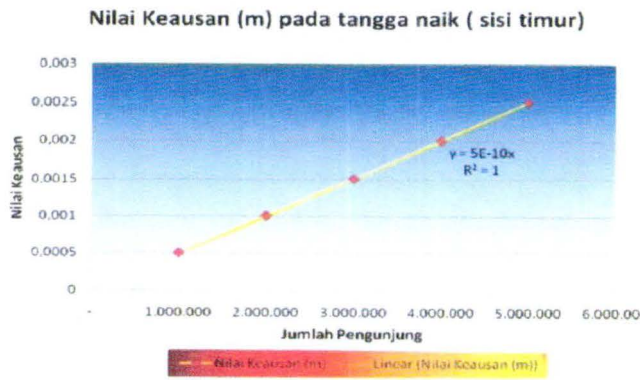
Dari data perhitungan di atas kita buat korelasi dengan analisa regresi sebagai berikut :

a. Nilai /tingkat keausan pada batu lantai Candi Borobudur



Grafik 6.2 Nilai Keausan pada Batu Lantai Candi Borobudur

b. Nilai /tingkat keausan pada tangga naik Candi Borobudur



Grafik 6.3 Nilai Keausan pada Tangga Naik Candi Borobudur

c. Nilai/tingkat keausan pada tangga turun Candi Borobudur (sisi utara, selatan, dan barat)

Grafik 6.4 Nilai Keausan pada Tangga Turun Candi Borobudur

d. Nilai kekesatan permukaan batu lantai dan batu tangga Candi Borobudur

Nilai kekesatan sebuah permukaan batu merupakan salah satu indikator yang bisa digunakan untuk mengetahui seberapa besar beban dan gesekan yang sudah terjadi pada suatu permukaan batu. Nilai kekesatan juga bisa menunjukan gaya gesek yang terjadi pada sebuah permukaan batu. Dari besaran nilai kekesatan ini pula bisa diketahui seberapa licin sebuah permukaan batu ketika mengalami gesekan.

Untuk mengetahui tingkat kekesatan batu lantai dan batu pada tangga Candi Borobudur dilakukan pengujian kekesatan permukaan perkerasan menggunakan alat *British Pendulum Tester* (BPT).

1. **Benda Uji**

a. **Di lapangan**

Benda uji berupa permukaan perkerasan yang akan diuji di lapangan harus bebas dari butiran-butiran lepas dan disiram dengan air bersih. Peralatan untuk benda uji yang posisinya tidak mendatar atau tanjakan atau menurun, dapat disiapkan sehingga mendatar dengan mengatur sekrup sehingga kepala bandul menyesuaikan kedudukannya dengan bebas di atas permukaan.

Foto. 6.5 Pengukuran suhu batu sebelum dilakukan uji kekesatan pada batu tangga

Foto. 6.6 Pengukuran bidang kontak gesekan

Foto. 6.7 Pengukuran nilai kekesatan permukaan pada batu tangga

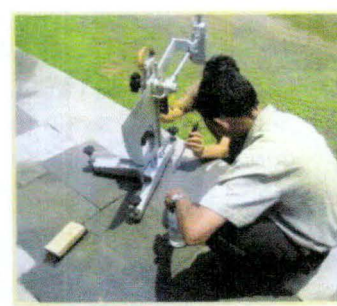


Foto. 6.8 Pengukuran nilai kekesatan permukaan pada sampel batu baru

b. Di Laboratorium

Panel uji harus bersih dan bebas dari butiran-butiran serta kokoh sehingga tidak bergerak akibat beban bandul yang diayunkan

I. Contoh benda uji laboratorium harus mempunyai bidang permukaan uji paling sedikit berukuran 89 mm x 152 mm.

II. Benda uji untuk pemolesan harus mempunyai bidang permukaan uji paling sedikit berukuran 45 mm x 90 mm berbentuk lengkung dengan diamater 406 mm.

Foto. 6.9 Pengukuran nilai kekesatan di laboratorium

c. Ringkasan pengujian

Cara uji terdiri atas alat penguji jenis pendulum yang dipasang karet peluncur standar untuk menentukan sifat-sifat hambatan atau gesekan *(frictional)* atau kekesatan permukaan perkerasan yang diuji.

Sebelum pengujian, permukaan yang diuji dibersihkan dan dibasahi dengan air secukupnya. Pendulum dipasang karet peluncur pada posisi menyentuh bidang kontak permukaan perkerasan yang akan diuji.

Batang pendulum diangkat dan diletakan pada posisi

terkunci. Batang pendulum dilepaskan dan biarkan karet peluncur menggesek dan menyinggung permukaan yang diuji, dan segera tangkap kembali pada saat bandul kembali berayun ke arah sebaliknya.

Jarum indikator menunjuk angka berskala yang tertera pada piringan skala ukur dengan satuan BPN. Makin kesat permukaan yang diuji makin besar pembacaan BPN. Setiap pengujian dilakukan empat kali bila menggunakan karet alam (karet *British)* atau lima kali bila menggunakan karet sintetis (AASHTO M 261).

Cara uji digunakan sebagai alat untuk mengukur sifat-sifat kekesatan benda uji, baik mikrotekstur maupun makrotekstur permukaan yang diuji di lapangan atau di laboratorium.

d. Hasil pengujian

Dari hasil pengujian Nilai Kekesatan permukaan di lapangan dan di laboratorium didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel IV.3 Hasil Uji Skid Resistance di Laboratorium dan di Lapangan

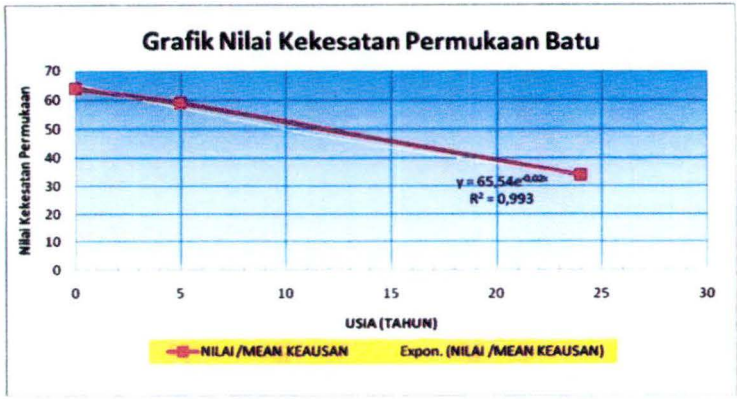
No	Sample Section	Surface Texture	Temperature (°C)	Skid Resistance Value	Mean	Remarks
	UJI LABORATORIUM					
1.	Batu lantai I	Kasar	28 °C	50;50;48;50;50	50	
2.	Selasar Sisi Barat	Kasar	28,6 °C	69;64;59;59;59	59	

1.	**UJI LAPANGAN** Tangga Sisi Timur Tingkat I	Kasar	39,5 °C	45;45;45;45;45	45	
2.	Tangga Sisi Selatan Tingkat 1	Kasar	37 °C	34;34;34;34;34;	34	
	PERBANDINGAN Sampel batu baru Selasar Sisi timur bid. d	Kasar	38,5 °C	70;70;67;67;67	67	

Dari hasil uji tersebut kita buat grafik dan analisis dengan regresi exponensial untuk menentukan hubungan masing-masing nilai. Dari data uji *skid resistance* di atas kita tentukan korelasi antara nilai kekesatan permukaan batu dengan lokasi sampel batuan. Lokasi sampel batuan yang kita ambil kita asumsikan berdasarkan umur batuan. Sampel batu yang berada pada selasar sisi timur merupakan batu baru yang dipasang pada tahun 2008 dalam rangka penyempurnaan lantai selasar. Batu ini kita asumsikan batu terpasang pada candi dengan umur 0 tahun. Sampel batu pada lokasi selasar sisi barat yang dipasang pada tahun 2005 kita asumsikan sebagai umur 5 tahun. Sedangkan batu tangga pada sisi selatan merupakan batu yang dipasang pada saat pemugaran 1973-1983 kita asumsikan batu dengan umur 24 tahun.

Asumsi umur batu ini kita hitung sejak batu itu terpasang di candi, bukan umur dari proses pembentukan di alam. Beban untuk uji kekesatan permukaan ini kita asumsikan sebagai beban manusia yaitu sebesar 70 kg.

Dari korelasi dan analisis tersebut di atas kita buat persamaan dengan hasil sebagai berikut :



Grafik 6.5 Korelai Nilai Kekesatan Permukaan Batu dengan Umur Batu

Dari grafik di atas dapat diketahui bahwa umur batu sangat mempengaruhi tingkat kekesatan permukaannya, semakin lama umur batu terpasang di candi maka akan semakin lemah nilai kekesatan permukaannya.

Nilai kekesatan permukaan juga tergantung pada tekstur permukaanya, hal ini juga berpengaruh pada angka keausan akibat gaya gesekan yang ditimbulkan oleh kaki pengunjung, jika angka keausannya tinggi maka akan berpengaruh pada nilai kekesatan permukaan. Dengan bertambahnya angka keausan maka nilai kekesatan permukaanya akan semakin lemah.

Acuan normatif suatu nilai kekesatan permukaan didasarkan pada *koefisien* kekesatan permukaannya. *Koefisien* kekesatan permukaan berdasarkan *Salt* (1973, Puslitbang Jalan) dinyatakan dalam skala 0,00 – 1,00, dimana batasan nilai koefisien permukaan adalah 0,33, untuk nilai kekesatan ≤ 0,33 menunjukan bahwa lapisan permukaan material tersebut licin (tidak aman terhadap slip), nilai tersebut untuk satuan BPN (*British Pendulum Number)* sama dengan 33.

Satuan BPN mempunyai syarat sebagai berikut :

1. Lalu lintas berat/tinggi > 65 BPN
2. Lalu lintas berat/sedang > 55 BPN
3. Lalu lintas sedang/ringan > 45 BPN

Sebagai ketentuan syarat uji untuk lalu lintas dan beban yang terjadi di Candi Borobudur masuk ke kategori lalu lintas sedang/ringan. Dari data berbagai ketentuan di atas dapat diketahui bahwa nilai kekesatan permukaan batu Candi Borobudur ada pada nilai aman, namun untuk batu tangga dengan asumsi umur 24 tahun yaitu yang dipasang pada saat pemugaran mempunyai hasil sebagai berikut :

1. Tangga sisi timur mempunyai nilai yang kritis dengan nilai uji *skid resistance* sebesar 45
2. Tangga sisi selatan mempunyai nilai aman yang mendekati kritis nilai uji *skid resistance* sebesar 37.
3. Sedangkan untuk sampel batu baru yang diambil pada bagian selasar sisi timur mempunyai nilai kekesatan yang paling baik yaitu dengan nilai uji sebesar 67.

F. PENUTUP

Dari hasil pengamatan data dilapangan, analisa data pengukuran nilai keausan dan kekesatan permukaan batuan Candi Borobudur dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu :

1. Kesimpulan

a. Material pasir yang terbawa pada alas kaki pengunjung candi dapat memberikan gaya gesekan yang cukup signifikan terhadap permukaan batu lantai dan batu tangga candi, sehingga menimbulkan keausan pada permukaan batu.

b. Pada tangga naik candi dari tahun 2003 sampai dengan tahun 2007 terjadi tingkat keausan sebesar 0,7 cm, dan untuk batu pada tangga turun (sisi utara, sisi selatan, dan sisi barat) dari tahun 2003 sampai tahun 2007 kenaikan tingkat keausannya sebesar 0,8 cm.

c. Dari hasil uji kekesatan permukaan dengan *Skid pendulum Resistance* dapat diketahui bahwa nilai kekesatan batu tangga Candi Borobudur dengan asumsi umur 24 tahun yaitu batu yang dipasang pada saat pemugaran ada pada tingkat yang kritis dengan nilai uji sebesar 45 untuk batu tangga pada sisi timur dan pada tingkat mendekati kritis pada batu tangga sisi selatan dengan nilai uji kekesatan sebesar 37.

d. Semakin tinggi tingkat keausan batu, maka memberikan nilai kekesatan permukaan yang semakin lemah, hal ini bisa dilihat dari perbandingan uji kekesatan pada bagian batu tangga dan pada batu selasar Candi Borobudur.

2 Saran

a. Penataan dan pengendalian pasir halaman sangat diperlukan untuk meminimalisir jumlah material pasir yang terbawa oleh alas kaki pengunjung.

b. Perlunya pengaturan jumlah pengunjung dan pembatasan waktu kunjung di atas candi sehingga pengunjung tidak terakumulasi dan terkonsentrasi dalam jumlah yang besar karena kondisi ini akan berakibat pada proses pembebanan dan gesekan pada permukaan batu candi.

c. Penggunaan alas kaki yang didesain dengan bahan yang lembut dan tidak merusak material batuan sehingga dampak keausan dapat diminimalkan.

d. Memberikan lapisan pelindung pada bagian tangga candi dari bahan-bahan yang bisa menyebarkan beban dan melindungi batu dari keausan (misalnya kayu, karet) atau bahan lainya dengan tetap menjaga dan mempertahankan nilai-nilai dan kaidah pelestarian sebuah warisan budaya dunia.

DAFTAR PUSTAKA

Taufik Muhammad, *Minimalisasi Dampak Negatif Pemanfaatan Candi Borobudur sebagai Obyek Wisata,* Tesis Arkeologi Pasca Sarjana, UGM, Yogyakarta 2005.

Ir. Sanggono, KH, 1997, *Buku Teknik Sipil.*

V.N Vazirani , S.P Chandola, *Civil Engineering Handbook* Vol. II. LAPT-II.

Suryolelono, K.B, Evaluasi Stabilitas Candi Borobudur,

Makalah Seminar, Jurusan Teknik Sipil UGM, Yogyakarta.

International Expert"s Meeting, 5-8 March 2007, *Action Plan Prambanan.*

International Expert"s Meeting, 5-8 March 2007, *Damage on the Prambanan Temple Compound After The Earth Quake,* The Archaeological Office of The Special Region of Yogyakarta.

Begeemen, H.K.S, dan Hoogkamer, E, 1974, *Stability Calculation The Restoration of Borobudur,* Report CC/III/2/1974, Depdikbud RI – Jakarta.

Marzuki, Y, dan Heraty, T, 1982, *Borobudur, Djambatan,* Jakarta.

Soekmono, R. 1972, Riwayat Usaha Penjelamatan Tjandi Borobudur (Sampai Akhir 1971), *Pelita Borobudur Seri A,* No. 1 Projek PELITA Restorasi Tjandi Borobudur Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Soekmono, 1978, *Candi Borobudur,* Pustaka Jaya, Jakarta.

Wiratman, W, dan Aziz, D, 1982 , *Preview of The Long-term Stability and Performance of Candi Borobudur,* Pelita Borobudur, seri CC No. 11, page 83, doc CC/XI/14/1982, Laporan Kegiatan Proyek Pemugaran Candi Borobudur, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia.

BALAI KONSERVASI BOROBUDUR
Jl. Badrawati Borobudur Magelang Jawa Tengah Indonesia 56553
Telp. (0274) 788175, 788225
Fax. (0274) 788367

HASIL KAJIAN BALAI KONSERVASI BOROBUDUR

Balai Konservasi Borobudur
Direktorat Jenderal Kebudayaan
Kementerian Pendidikan
dan Kebudayaan