



LIMNOTEK

Perairan Darat Tropis di Indonesia

Volume 22, Nomor 2, Desember 2015

Nomor Akreditasi : 659/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

<i>Helmy Murwanto, dan Ananta Purwoarminta</i> Rekonstruksi Danau Purba Borobudur dengan Pendekatan Spasiotemporal	106-117
<i>Livia Rossila Tanjung</i> Moluska Danau Maninjau: Kandungan Nutrisi dan Potensi Ekonomisnya	118-128
<i>Sulastri, Syahroma Husni Nasution, dan Sugiarti</i> Konsentrasi Unsur Hara dan Klorofil-a di Danau Towuti, Sulawesi Selatan	129-143
<i>Sri Wahyuni, Sulistiono, dan Ridwan Affandi</i> Pertumbuhan, Laju Eksploitasi, dan Reproduksi Ikan Nila (<i>Oreochromis niloticus</i>) di Waduk Cirata, Jawa Barat	144-155
<i>Agus Arifin Sentosa, dan Hendra Satria</i> Karakteristik Limnologis Lahan Basah di Distrik Kimaam Pulau Dolak, Merauke, Papua pada Musim Peralihan, Mei 2014	156-169
<i>Fifia Zulti, dan Sugiarti</i> Fluktuasi pH, Oksigen Terlarut dan Nutrien di Danau Towuti	170-177
<i>Reliana Lumban Toruan</i> Komposisi Zooplankton pada Periode Air Surut di Danau Paparan Banjir: Studi Kasus Danau Tempe, Indonesia	178-188
<i>Nofdianto dan Hasan Fauzi</i> Sistem Resirkulasi Aquaponik untuk Pengendalian Kelebihan Nutrien di Perairan: Laju Serap dan Penyisihan Nutrien oleh beberapa Jenis Sayuran	189-197
<i>Irin Iriana Kusmini, Rudhy Gustiano, Gleni Hasan Huwoyon, dan Fera Permata Putri</i> Perbandingan Pertumbuhan Ikan Nila Best F6, Nila Best F5 dan Nila Nirwana pada Pendederan I-III di Jaring Apung Danau Lido	198-207
<i>Aida Sartimbul, Mujiadi, Hartanto, Seto Sugianto Prabowo Rahardjo, dan Antonius Suryono</i> Analisis Kapasitas Tampungan Danau Sentani untuk Mengetahui Fungsi Detensi dan Retensi Tampungan	208-226

PUSAT PENELITIAN LIMNOLOGI
LEMBAGA ILMU PENGETAHUAN INDONESIA

MAJALAH LIMNOTEK Perairan Darat Tropis di Indonesia merupakan penerbitan berkala ilmiah di bidang limnologi dan kajian sumber daya perairan darat lainnya, yang terakreditasi sesuai dengan SK Kepala LIPI No. **659/AU3/P2MI-LIPI/07/2015**, tentang Akreditasi Majalah Ilmiah LIMNOTEK, Perairan Darat Tropis di Indonesia. Diterbitkan dua kali setahun oleh Pusat Penelitian Limnologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Majalah ini diharapkan dapat berfungsi sebagai wahana diseminasi dan komunikasi hasil-hasil penelitian dan pengembangan sumber daya perairan darat, khususnya di Indonesia.

Susunan Dewan Redaksi LIMNOTEK Perairan Darat Tropis di Indonesia berdasarkan SK Kepala LIPI Nomor 3/E/2015 adalah :

Pemimpin Redaksi : Drs. Tjandra Chrimadha, M.Phill.

Anggota : Dr. R. Gunawan Pratama Yoga, M.Sc.
Dr. Jojok Sudarso, M.Si.
Dr. Sekar Larashati, M.Si.
Dr. Hidayat, M.Sc.
Dr. Apip, M.Sc.
Dr. Yustiawati, M.Sc.

Sekretariat : Kodarsyah, M.Kom.
Taofik Jasaalesmana, M.Si.
Mey Ristanti Widoretno, S.P.
Saepul Mulyana, A.Md.

Alamat Redaksi : Pusat Penelitian Limnologi LIPI
Kompleks LIPI Cibinong
Jl. Raya Jakarta-Bogor km. 46
Cibinong 16911, Bogor Jawa Barat, Indonesia
Tlp. 021 – 8757071-3
Fax. 021 – 8757076
Email : limnologi.tropis@limnologi.lipi.go.id
Url : <https://www.limnotek.or.id/>

Ucapan terima kasih kepada *reviewer*

LIMNOTEK

**Perairan Darat Tropis di Indonesia
Volume 22, Nomor 2, Desember 2015**

Dr. Luki Subehi, M.Sc.

(Pusat Penelitian Limnologi – LIPI / Pakar Hidroklimatologi)

Drs. M. Fakhruddin, M.Si.

(Pusat Penelitian Limnologi – LIPI / Pakar Hidrologi)

Dr. Fauzan Ali

(Pusat Penelitian Limnologi – LIPI / Pakar Budidaya Fisiologi)

Dr. Livia Rossila Tanjung

(Pusat Penelitian Limnologi – LIPI / Pakar Biologi Sel dan Biokimia)

Andi Kurniawan, S.Pi.,

(Universitas Brawijaya Malang / Pakar Sumber Daya Hayati Perairan)

REKONSTRUKSI DANAU PURBA BOROBUDUR DENGAN PENDEKATAN SPASIOTEMPORAL

Helmy Murwanto^a, dan Ananta Purwoarminta^{b✉}

^a *Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, Univ. Pembangunan Nasional*

^b *Pusat Penelitian Geoteknologi-LIPI*

Email: ananta.purwoarminta@lipi.go.id

Diterima: 21 Januari 2015, Disetujui: 25 Agustus 2015

ABSTRAK

Candi Borobudur merupakan warisan dunia yang banyak menarik perhatian baik wisatawan maupun peneliti. Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pada masa lampau Bukit Borobudur dikelilingi oleh danau. Saat ini danau tersebut telah mengering dan sudah tidak terlihat keberadaannya. Pendangkalan dan pengeringan danau di sekitar Candi Borobudur menjadi dataran lakustrin kemungkinan tidak berlangsung dalam satu waktu. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui perkembangan danau melalui pendekatan spasiotemporal. Kondisi keruangan dapat diketahui dari survei lapangan dan analisis pollen, sedangkan umur endapan danau dapat diketahui dari analisis radiokarbon ¹⁴C. Perkembangan danau dapat dibagi menjadi tiga waktu yaitu pada kala Akhir Pleistosen dengan luas 73.712 km², Awal Holosen dengan luas 21.273 km², dan Akhir Holosen (Resen) dengan luas 8.357 km².

Kata Kunci : Candi Borobudur, danau purba, spasiotemporal, pollen, radiokarbon ¹⁴C

ABSTRACT

BOROBUDUR ANCIENT LAKE RECONSTRUCTION WITH SPATIOTEMPORAL APPROACH. Borobudur temple is a world heritage that attract lot of tourists and researchers. Previous researches show that Borobudur temple was surrounded by a lake in the past. Currently the lake has dried up and the existence can not be observed. Siltation of the lake around Borobudur into lacustrine plains occurred many times. The purpose of this study is to reconstruct the lake with spatiotemporal approach. Spatial conditions can be determined from field surveys and analysis of pollen, while the time can be seen from the analysis of radiocarbon ¹⁴C. Borobudur lake can be reconstructed into three time i.e. the Late Pleistocene (73.712 km²), Early Holocene (21.273 km²), and Late Holocene (Recent) (8.357 km²).

Keyword: Borobudur temple, ancient lake, spatiotemporal, pollen, radiocarbon ¹⁴C

PENDAHULUAN

Candi Borobudur merupakan warisan dunia yang banyak menarik perhatian para wisatawan dan peneliti baik nasional maupun internasional. Selama ini penelitian tentang Candi Borobudur lebih fokus pada bidang arkeologi, sejarah, dan budaya sedangkan keunikan dari lingkungan, fisiknya masih sedikit diteliti. Beberapa penelitian sebelumnya menyatakan bahwa Candi Borobudur dikelilingi oleh sebuah danau yang luas. Namun hal tersebut masih menjadi pertentangan, dikarenakan tidak ditemukannya prasasti yang menyatakan keberadaan danau di sekitar Candi Borobudur. Nieuwenkamp (1933) menyatakan bahwa Candi Borobudur dibangun di atas sebuah pulau yang dikelilingi oleh telaga, diibaratkan menyerupai ceplok bunga teratai dengan daun dan bunganya mengelilingi bakal buah yang terletak di tengah kolam. Nossin & Voute (1986), melakukan analisis geomorfologi berdasarkan interpretasi foto udara dan didukung dengan observasi lapangan. Hasil penelitian tersebut mengungkap bahwa di daerah Borobudur pada paruh kedua zaman Kuartar, terbentuk lingkungan danau. Candi Borobudur dibangun di atas bukit bagian dari Perbukitan Gandul-Sipodang, merupakan bagian puncak dari batuan vulkanik Tersier Kubah Kulonprogo yang terpatahkan (Nossin & Voute, 1986). Berdasarkan tinjauan geologi dan geomorfologi Bukit Borobudur yang dikelilingi bentuk lahan dataran, merupakan bagian dari Kubah Kulonprogo “Menoreh” yang terpatahkan, kemudian mengalami proses penenggelaman pada akhir zaman Tersier (Bemmelen, 1949).

Hipotesis tentang danau dianggap tidak mempunyai bukti-bukti pendukung yang kuat, karena tidak ada prasasti-prasasti yang menyebutkan lingkungan danau di sekitar Candi Borobudur (Soekmono, 1976). Hipotesis Nieuwenkamp (1933) masuk akal, karena daerah Kedu bagian selatan dahulu pernah terbentuk lingkungan danau yang luas. Lingkungan danau terbentuk berubah akibat letusan kuat Gunung Merapi di tahun

1006. Letusan kuat tersebut mengakibatkan bagian puncaknya longsor ke arah baratdaya, material longsorannya tertahan oleh Pegunungan Menoreh dan membendung Sungai Progo, serta membentuk bukit-bukit lipatan Perbukitan Gendol (Bemmelen, 1952). Penelitian tentang danau Purba Borobudur pernah dilakukan oleh Purbohadiwidjojo & Sukardi (1966) dengan melakukan pemboran dangkal di sekitar Candi Borobudur. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa Candi Borobudur pernah dikelilingi oleh danau yang ditunjukkan dengan adanya endapan rawa hasil pemboran.

Thanikaimoni (1983) melakukan penelitian dengan pendekatan palinologi menggunakan dua puluh sampel yang diambil di sekitar bangunan Candi Borobudur, Sungai Sileng pada kedalaman 20-120 cm. Hasil penelitian tersebut menunjukkan tidak ditemukan serbuk sari yang berasal dari komunitas tanaman rawa/air, sedangkan polen *cyperaceae* ditemukan sangat sedikit bahkan pada beberapa sampel tidak ditemukan. Hasil tersebut memberi gambaran bahwa endapan-endapan di kedalaman itu bukan berasal dari lingkungan danau. Sementara hasil penelitian Murwanto (2001) dengan melakukan analisis palinologi pada endapan lempung hitam yang diambil dari hasil pemboran di Sungai Sileng dan Elo, menunjukkan bahwa pada sampel tersebut mengandung pollen yang berasal dari lingkungan air (*Barringtonia*, *Acacia*, *Palmae*, *Euphorbiaceae*, *Browniowia*, *Calamus*, *Pandanus*, *Typha*, *Gramineae*, *Cyperaceae*), dan spora (*Acrostichum aureum*, *Verrucatosporites*, *Verrucosisporites*, *Monoletesporites*, *Triletesporites*, *Sphagnum*, *Pteris*).

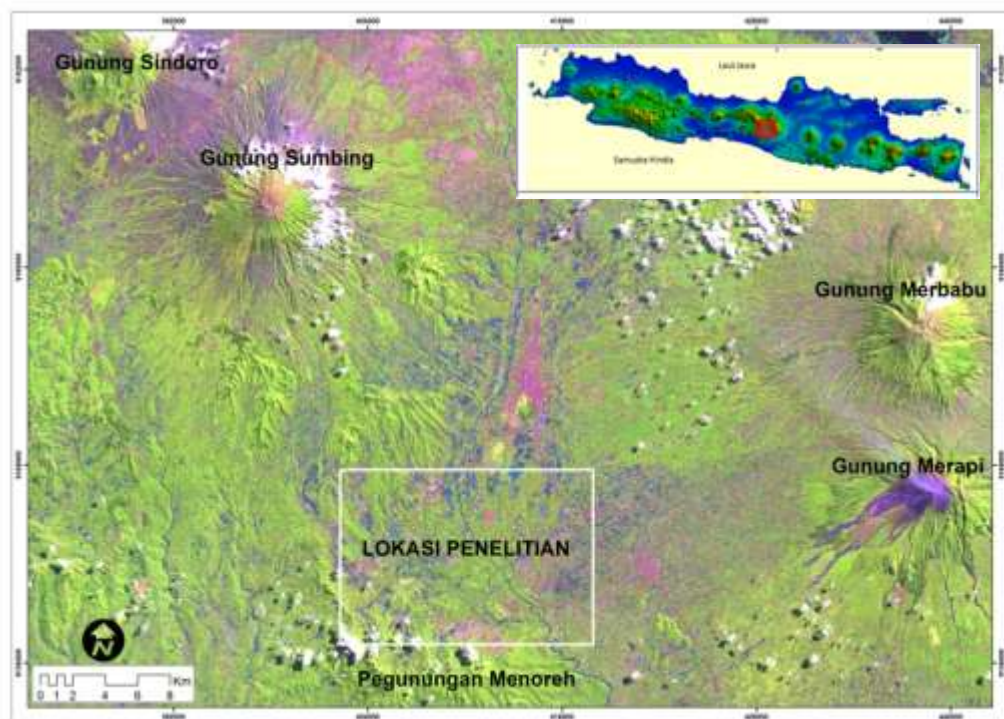
Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui luasan danau purba Borobudur yang selanjutnya dilakukan rekonstruksi perkembangan Danau Borobudur, menggunakan pendekatan spasiotemporal. Pendekatan ini diharapkan dapat membantu mengungkap keberadaan danau Borobudur berdasarkan ruang dan waktu. Kondisi ruang didasarkan pada uji pollen, sedang untuk waktu didasarkan pada uji radiokarbon ^{14}C .

METODE

Lokasi Penelitian

Daerah penelitian terletak pada dataran di sekitar Candi Borobudur yang merupakan bagian dari dataran Kedu. Secara geografis daerah penelitian terletak pada koordinat $110^{\circ}05'$ – $110^{\circ}20'$ BT dan $7^{\circ}30'$ – $7^{\circ}38'$ LS. Daerah penelitian secara administrasi termasuk dalam Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah. Daerah ini dibatasi oleh rangkaian gunungapi dan Pegunungan Menoreh di bagian selatan. Bagian barat dan barat laut daerah penelitian dibatasi oleh rangkaian Gunung Sumbing (3.371 m dpl) dan pada sisi utara dibatasi oleh Gunung Tidar, sementara pada sisi timur laut dibatasi oleh lereng Gunung Merbabu (3.142 m dpl). Bagian timur daerah penelitian dibatasi oleh lereng Gunung Merapi (2.911 m dpl) (Gambar 1).

melakukan pengamatan lapangan, terlebih dahulu dilakukan interpretasi lembah menggunakan *Google Earth*. Kegiatan lapangan meliputi pengamatan morfologi dan identifikasi sebaran endapan danau serta melakukan pengambilan sampel endapan danau. Kegiatan pengambilan sampel dilakukan pada tahun 2012. Hasil pengambilan sampel tersebut selanjutnya dilakukan uji pollen dan radiokarbon ^{14}C . Metode yang digunakan untuk pengambilan sampel adalah dengan *purposive random sampling*. Pertimbangan yang digunakan adalah adanya kandungan karbon yang cukup untuk dilakukan uji laboratorium. Sedangkan untuk sampel pollen dipilih sampel yang tidak terdapat gangguan aliran air dari sungai yang juga mengandung pollen dari tanaman luar lingkungan Danau Borobudur.



Gambar 1. Daerah penelitian yang terletak di dataran yang dikelilingi oleh lereng gunungapi dan Pegunungan Menoreh (Sumber: Citra Landsat, 2000)

Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi dua jenis data yaitu morfologi detil dan sebaran endapan danau. Data morfologi detil dimaksudkan untuk mengetahui keberadaan lembah tampak seperti alur sungai yang berawa dan masih banyak ditemukan di lapangan. Sebelum

Uji Laboratorium

Uji laboratorium yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi uji radiokarbon ^{14}C , dan palinologi. Pengujian radiokarbon ^{14}C dimaksudkan untuk mengetahui umur batuan yang diketahui dari kandungan karbon dan tanaman yang terdapat pada endapan danau. Uji radiokarbon ^{14}C

digunakan untuk mengetahui umur absolut batuan sehingga diharapkan dapat mengetahui umur suatu ruang. Pengujian dilakukan pada endapan lempung dan kayu yang ditemukan baik pada singkapan di lapangan maupun pada material hasil pemboran. Endapan lempung hitam mempunyai kandungan karbon tinggi sehingga mengakibatkan berwarna gelap hingga hitam. Kandungan karbon tersebut dapat dimanfaatkan untuk uji radiokarbon ^{14}C . Pengambilan sampel uji radiokarbon ^{14}C dipilih berdasarkan sebaran endapan lempung hitam dan daerah yang mampu merepresentasikan kondisi danau pada masa lampau. Adapun lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 6. Lingkungan danau masa lalu menyisakan jejak berupa endapan danau yaitu lempung berwarna hitam dan mengandung karbon organik tinggi. Endapan danau tersebut kaya akan kandungan serbuk sari/pollen dari tanaman yang ada di ekosistem danau. Uji pollen ini dilakukan untuk mengetahui lingkungan pengendapan masa lampau dengan mendasarkan pada keberadaan serbuk sari dan spora (Robertsson, 1986). Kehadiran serbuk sari dan spora ini berasal dari tanaman yang pernah tumbuh di lingkungannya. Lingkungan danau/rawa mempunyai jenis tanaman yang berbeda dengan lingkungan daratan. Berdasarkan hal ini, maka analisis pollen digunakan sebagai dasar penentuan lingkungan masa lampau yang didekati dengan jenis serbuk sari tanaman masa lalu.

Uji palinologi adalah pengujian serbuk sari (*pollen*) pada tanaman yang pernah tumbuh pada lingkungan tertentu. Kegiatan uji polen ini dimaksudkan untuk mengetahui lingkungan danau di masa lampau. Sampel yang digunakan untuk uji polen adalah endapan danau yang diperkirakan didalamnya terdapat serbuk sari dari jenis-jenis tanaman air. Sampel pada uji ini dipilih yang mempunyai kandungan

karbon tinggi dan yang tidak terkena aliran dari luar lingkungan danau. Adanya aliran dari daerah luar melalui sungai mengakibatkan kandungan serbuk sari bercampur dengan serbuk sari dari tempat lain sehingga dapat mempersulit untuk mendapatkan serbuk sari dari tanaman komunitas air.

Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan analisis sapsiotemporal atau didasarkan pada ruang dan waktu. Analisis ruang menjelaskan tentang kondisi ruang di masa lalu yaitu keberadaan danau yang didasarkan pada jenis tanaman yang ada pada sedimen danau. Analisis temporal dilakukan berdasarkan umur yang diperoleh dari hasil uji radiokarbon ^{14}C . Hasil analisis tersebut selanjutnya diklasifikasikan berdasarkan umur geologi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

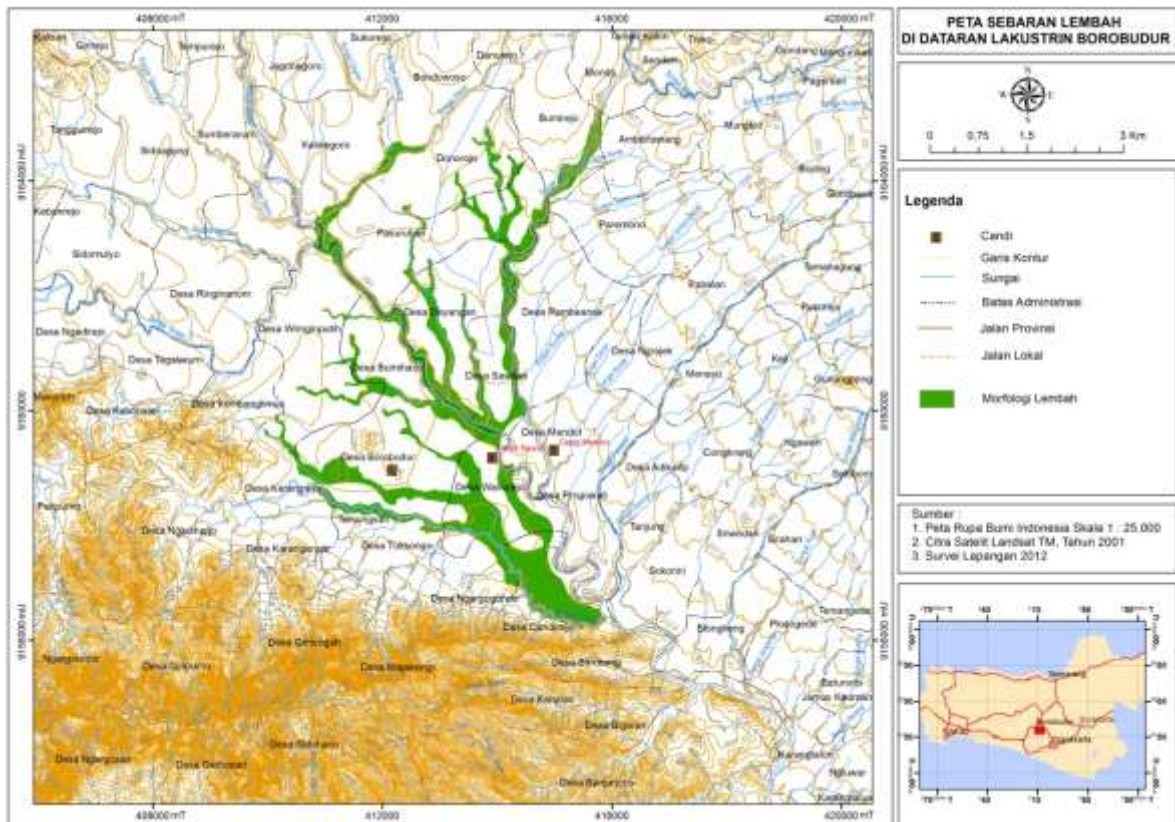
Analisis Morfologi

Analisis morfologi dilakukan secara detail dengan mengamati morfologi bekas danau dan alur sungai yang masih tampak di daerah penelitian. Morfologi tersebut berupa lembah-lembah yang memanjang dan terdapat air. Hal ini sebagai indikasi bahwa lembah tersebut merupakan bekas rawa. Lembah ini tampak seperti alur sungai yang memanjang dan dimanfaatkan oleh masyarakat untuk lahan pertanian (Gambar 2).

Lembah tersebut sebagai sisa genangan Danau Borobudur yang disebut sebagai dataran lakustrin. Pada lembah-lembah ini terdapat aliran air, dan beberapa lokasi tampak adanya endapan lempung hitam yang merupakan endapan danau. Lembah ini berada di Dataran Borobudur yang pada sisi utara terletak di Desa Pasuruhan dan Deyangan, Kecamatan Mungkid seperti tampak pada Gambar 3.



Gambar 2. Morfologi lembah bekas rawa di Desa Sabrangrowo (kiri), Kecamatan Borobudur dan Desa Pasuruhan (kanan), Kecamatan Mungkid



Gambar 3. Sebaran morfologi lembah yang terdapat pada Dataran Lakustrin Borobudur

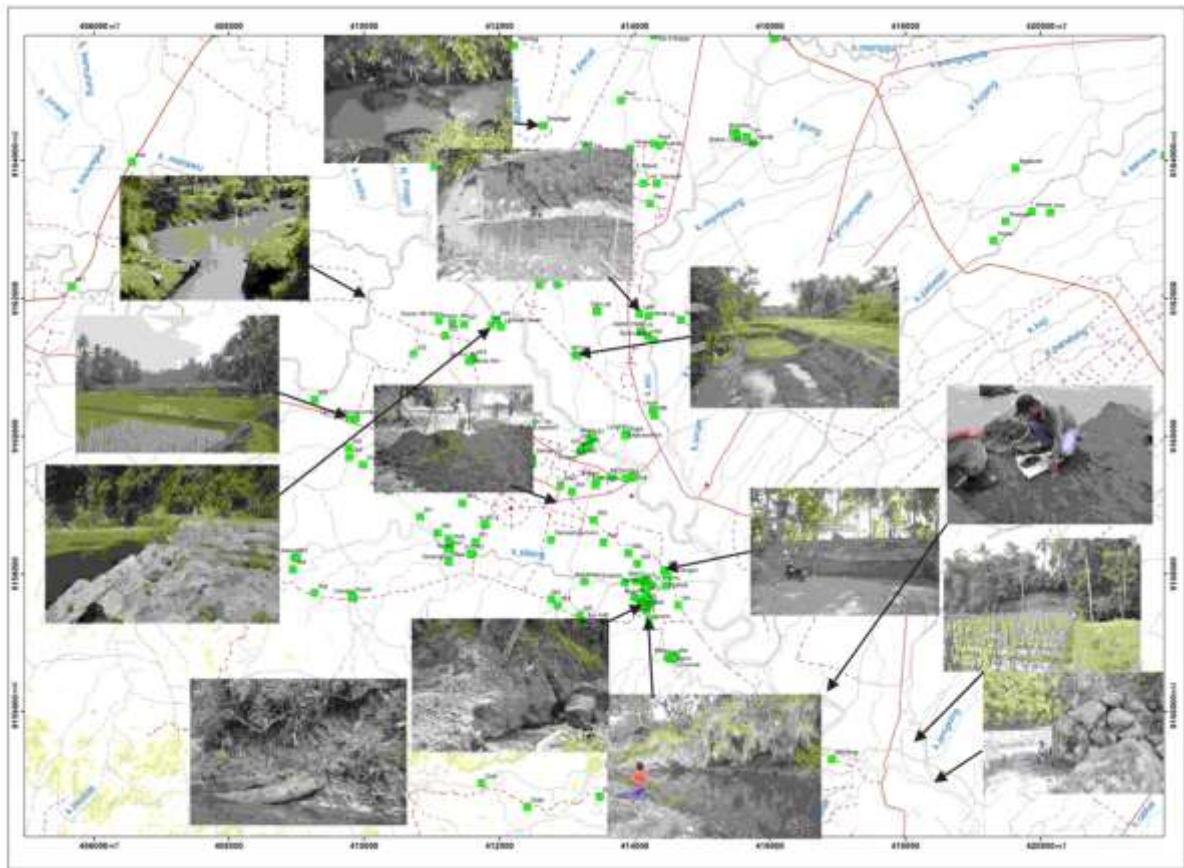
Sebaran Endapan Danau

Endapan danau Borobudur ditemukan pada tebing sungai, sumur penduduk, maupun dari penelitian sebelumnya. Pada daerah penelitian banyak ditemukan endapan lempung berwarna hitam dengan ketebalan yang paling besar bisa mencapai 5 meter. Endapan danau merupakan hasil sedimentasi danau yang salah satu komponennya adalah tanaman sehingga mempunyai kandungan karbon yang tinggi dan berwarna kehitaman. Endapan danau ini ditemukan dalam kondisi tertimbun oleh batuan maupun tanah.

Pada bagian selatan danau, endapan lempung hitam ditemukan di lembah Sungai Sileng yang memanjang sepanjang lembah sungai ini. Sementara pada sisi timur, endapan danau banyak ditemukan di sepanjang lembah Sungai Progo dan Sungai Elo. Pada bagian utara, endapan danau banyak ditemukan di sepanjang Sungai Pacet hingga di wilayah Mertoyudan, Magelang. Sedangkan pada bagian barat, endapan lempung hitam ini terdapat di lembah Sungai Tangsi, Merawu, hingga Sungai Progo (Gambar 4 dan 5).



Gambar 4. Endapan lempung hitam yang terdapat di lembah Sungai Sileng (kiri) dan lembah Sungai Pacet (kanan)

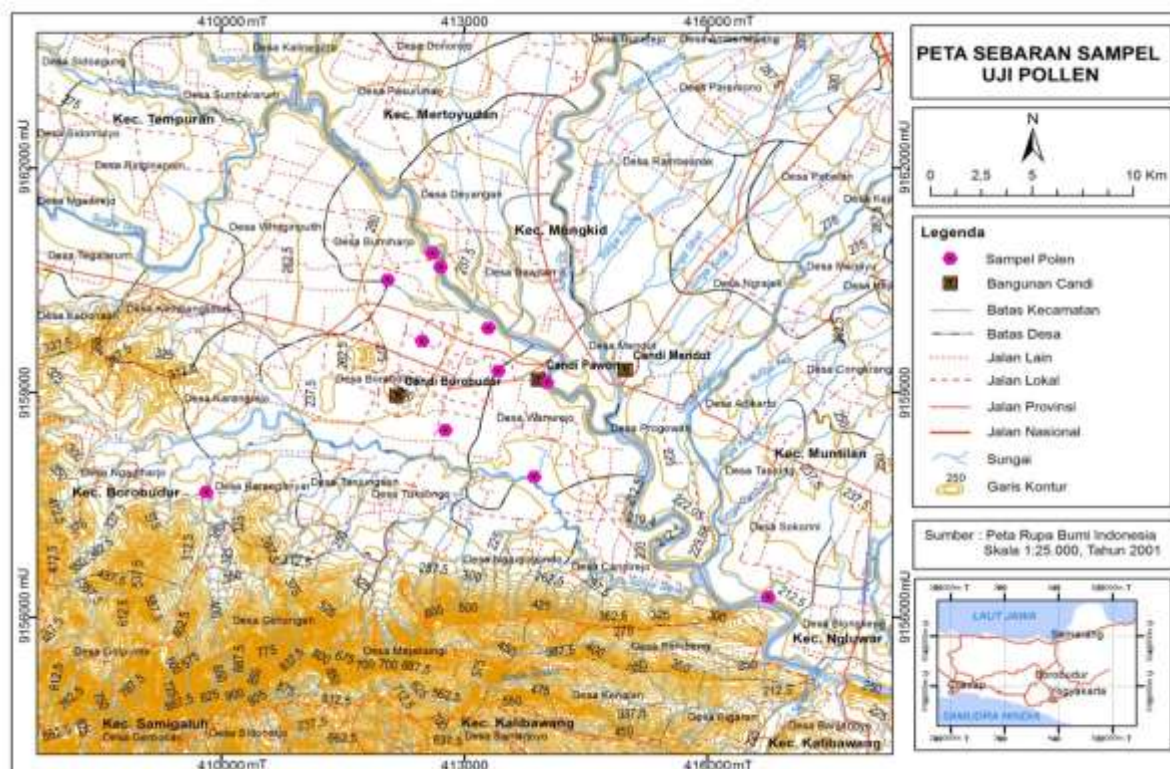


Gambar 5. Sebaran endapan danau di daerah penelitian

Uji Serbuksari/Pollen

Pengambilan sampel uji pollen dilakukan pada wilayah yang ditemukan adanya lempung hitam dengan kandungan organiknya (Gambar 6). Hasil analisis menunjukkan bahwa ketiga sampel yang dianalisis mengandung pollen berasal dari lingkungan rawa seperti *Euphorbiaceae* (tanaman jarak), *Gramineae* (padi, gandum, jagung, rumput gajah), *Cyperaceae* (rumput dekat rawa, gulma), *Nuphar* (sejenis teratai),

Nymphaea (teratai), *Commelina* (rumput-rumputan), dan spora (*Equisetum*, *Selaginella*, *Pteris*). Hasil uji ini bertolak belakang dengan Thanikaimoni (1983) yang tidak menemukan pollen tanaman air dan hanya menemukan *Cyperaceae* (rumput dekat rawa, gulma) dengan jumlah sedikit. Murwanto (1996) menemukan pollen komunitas rawa pada batulempung yang diambil di Sungai Sileng yaitu *Commelina*, *Eleocharis*, *Nymphaea stellata* dan *Cyperaceae*.



Gambar 6. Peta sebaran sampel pollen di daerah Borobudur dan sekitarnya

Hasil pengujian di lembah Sungai Progo sebelah timur Candi Pawon menunjukkan bahwa endapan lempung tersebut memiliki kandungan organik banyak, kaya akan kandungan pollen, spora fungi dan paku-pakuan (Gambar 7). Kenampakan butiran baik. Organik umumnya berwarna kuning, bening, coklat dan hitam. Kandungan fosil yang terdapat pada sampel ini adalah pollen: *Commelina* sp, (57 spesimen), *Cyperaceae* (223 spesimen), *Gramineae* (33 spesimen), *Labiatae* (78 spesimen), *Nuphar* sp. (1 spesimen), (*Pinus* (2 spesimen), *Scabratemonocolpites* sp (4 spesimen), dan *Triporites* sp, (1 spesimen). Selain itu juga terdapat spora: *Equisetum* sp. (32 spesimen), *Selaginella* sp (40 spesimen), *Davallia* sp. (34 spesimen), *Lycopodium* sp. (15 spesimen), *Hymenophylluyopteris* sp. (4 spesimen), *Dryopteris* sp. (7 spesimen), *Polypodiaceae* (13 spesimen), dan *Pteris* (2 spesimen). Dengan banyak dijumpainya taksa dari tumbuhan perairan air tawar, seperti: *Commelina* sp., *Equisetum* sp dan fungal spore, serta taksa dari tumbuhan semak, seperti *Cyperaceae*, *Gramineae* dan *Labiatae*, maka diperkirakan sampel ini

terendapkan di sekitar lingkungan rawa yang mulai mengering.

Sementara di selatan jembatan Sungai Progo, Sigug, Desa Bumiharjo juga dilakukan uji pollen. Hasil kandungan pollen berupa *Commelina* sp. (92 spesimen), *Cyperaceae* (94 spesimen), *Gramineae* (19 spesimen), *Amaranthaceae* (5 spesimen), *Nuphar* sp. (4 spesimen), *Nymphaea* sp. (1 spesimen), *Retitricolpites* sp. (1 spesimen), *Pinus* sp. (1 spesimen), dan *Scabratemonocolpites* sp. (10 spesimen). Sedangkan untuk Spora: *Equisetum* sp. (8 spesimen), *Selaginella* sp. (132 spesimen), *Davallia* sp. (14 spesimen), *Lycopodium* sp., (8 spesimen), dan *Polypodiaceae* (8 spesimen). Hasil analisis menunjukkan bahwa lokasi pengambilan sampel adalah lingkungan pengendapan berupa *open swamp* atau rawa yang terbuka. Hal ini dibuktikan dengan dijumpainya taksa dari tumbuhan perairan air tawar, seperti: *Nuphar* sp., *Nymphaea* sp., dan terutama *Commelina* sp., *Equisetum* sp. dan juga spora fungi, serta banyaknya taksa dari tumbuhan semak, seperti *Cyperaceae* dan *Gramineae*, menunjukkan sampel ini terendapkan di sekitar lingkungan rawa yang mulai mengering.

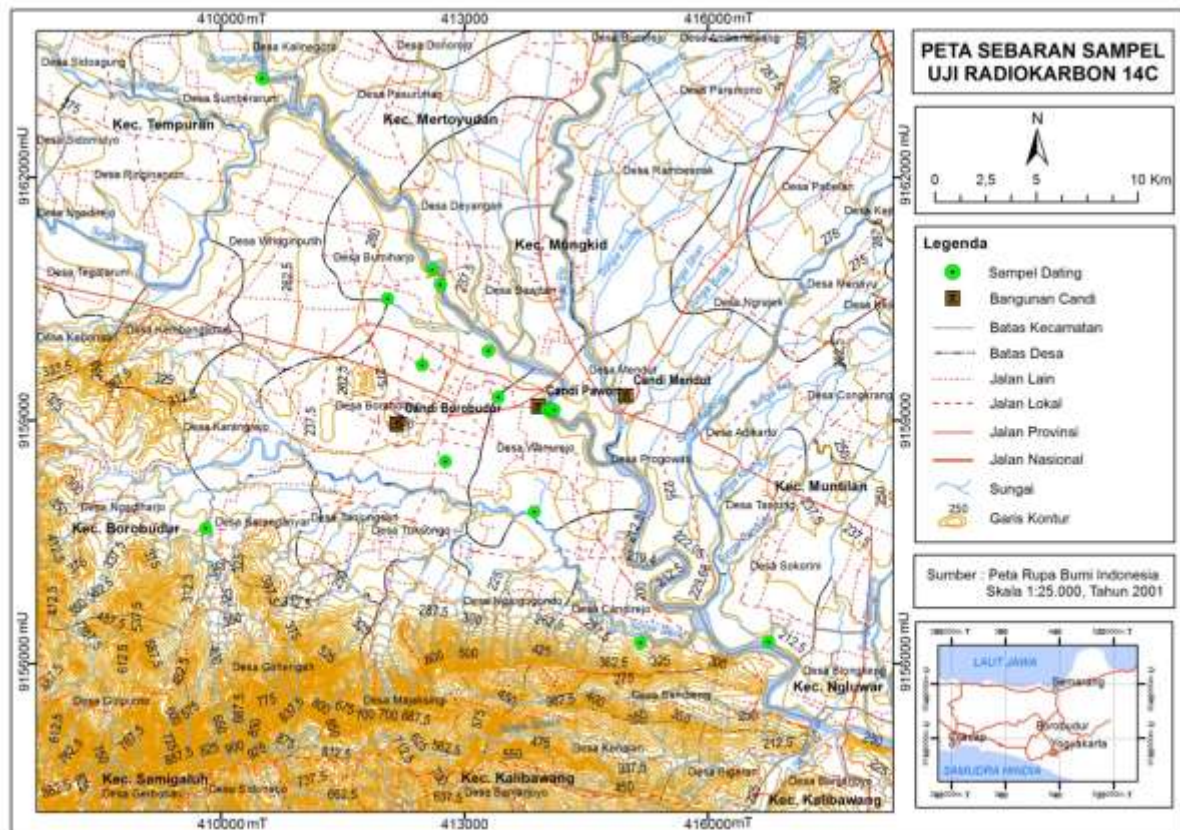


Gambar 7. Foto hasil uji pollen lembah Sungai Progo sebelah timur Candi Pawon

Uji Radiokarbon ^{14}C

Sampel yang diuji adalah endapan lempung hitam hasil sedimentasi danau dan fosil tanaman yang terdapat dalam endapan danau (Gambar 8). Berdasarkan hasil pengujian tersebut diketahui umur endapan danau dengan variasi yang sangat besar (Tabel 1). Umur paling tua mencapai 31.430

Before Pleistocene (BP) dan paling muda 1.700 *Before Pleistocene* (BP). Murwanto (1996, 2001) dan Newhall *et al.* (2000) juga melakukan pengujian radiokarbon ^{14}C di wilayah Borobudur yang hasilnya memiliki umur 420 ± 50 , 660 ± 110 (elevasi 214 meter; 70 36' 24,1" LS; 11 13' 10,6" BT), 680 ± 95 , dan 3.430 ± 50 tahun BP.



Gambar 8. Sebaran lokasi pengambilan sampel uji radiokarbon ^{14}C di daerah penelitian

Tabel 1. Umur absolut ^{14}C pengujian laboratorium dan penelitian sebelumnya

No	Lokasi	Umur ^{14}C BP	Keterangan	Sumber
1.	Tebing Sungai Progo sebelah utara Jembatan Bumiharjo	31.430 $\pm$ 2070	lempung hitam dari kedalaman 7 meter	Hasil Penelitian
2.	Tebing Sungai Progo sebelah timur Candi Pawon	27.070 $\pm$ 710	lempung hitam dari kedalaman 12 meter	Hasil Penelitian
3.	Sungai Dusun Soropadan	25.110 $\pm$ 560	lempung hitam	Murwanto dkk., 2014
4.	Tebing Sungai Progo selatan Jembatan Bumiharjo	24.640 $\pm$ 530	lempung hitam dari kedalaman 5 meter	Hasil Penelitian
5.	Teras Sungai Progo selatan Jembatan Blondo	23.640 $\pm$ 470	kayu	Hasil Penelitian
6.	Tebing sungai Dusun Pakisaji	22.140 $\pm$ 390	lempung hitam	Murwanto dkk., 2014
7.	Teras Sungai Progo Dusun Kaliabon Borobudur	14.790 $\pm$ 230	lempung hitam	Hasil Penelitian
8.	Utara Candi Borobudur	13.710 $\pm$ 540	tanaman pada batulempung di kedalaman 4 meter	Hasil Penelitian
9.	Dusun Soko	13.300 $\pm$ 210	lempung hitam	Hasil Penelitian
10.	Tebing sungai Dusun Gatak	6.330 $\pm$ 130	lempung hitam	Hasil Penelitian

Lanjutan Tabel 1.

No	Lokasi	Umur ^{14}C BP	Keterangan	Sumber
11.	Dusun Ngaran	1.700 $\pm$ 160	tanaman pada batuan lempung dari kedalaman 3 meter	Hasil Penelitian
12.	Sungai Sileng	420 $\pm$ 50	kayu pada lempung hitam	Newhall et al., 2000
13.	Sungai Progo	660 $\pm$ 110	kayu pada lempung hitam	Murwanto, 1996
14.	Sungai Progo	680 $\pm$ 95	kayu pada lempung hitam	Murwanto, 1996
15.	Sumur gali 13,5 meter di Borobudur	3.430 $\pm$ 50	kayu pada lempung hitam	Newhall et al., 2000
16.	Sungai Progo, utara Dusun Teluk	4.280 $\pm$ 100 4.310 $\pm$ 100	kayu pada lempung hitam	Murwanto, 2001
17.	Hasil pemboran di Sungai Sileng Dusun Soropadan	19.520 $\pm$ 340 19.650 $\pm$ 350	lempung hitam dari kedalaman 7 meter	Murwanto, 2001
18.	Hasil pemboran di Sungai Sileng Dusun Soropadan	22.040 $\pm$ 390 22.130 $\pm$ 400	lempung hitam dari kedalaman 9 meter	Murwanto, 2001

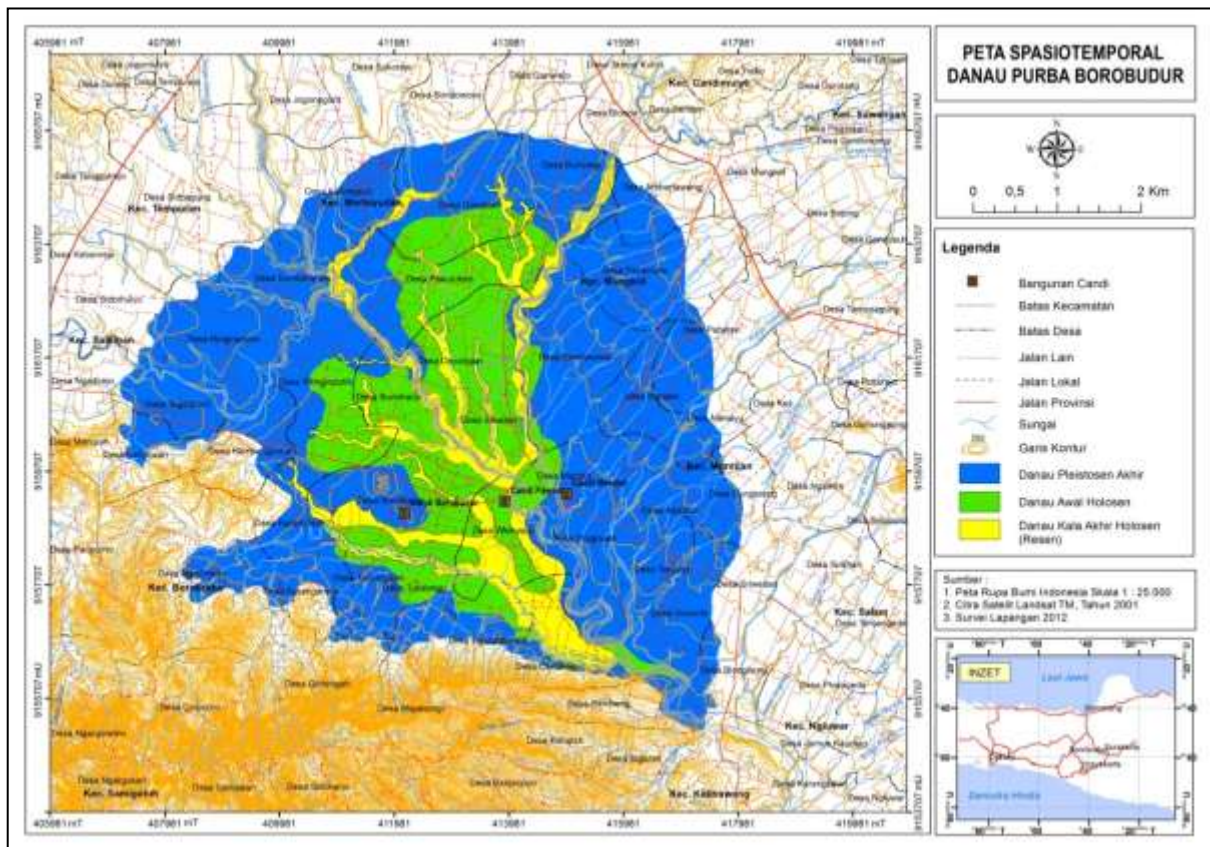
Spasiotemporal

Danau Borobudur dibagi menjadi 3 fase yaitu masa Akhir Pleistosen >10.000, masa Akhir Holosen, dan Awal Holosen (Resen) (Gambar 9). Semakin lama danau semakin menyempit hingga akhirnya menjadi dataran. Bagian selatan danau dibatasi oleh Pegunungan Menoreh, sehingga batas danau di selatan didasarkan pada adanya pegunungan tersebut. Sisi timur danau, batasnya disusun berdasarkan pada kemiringan endapan lempung yang disesuaikan dengan topografi di permukaan. Penentuan batas di sisi timur sulit dilakukan dengan pasti dikarenakan endapan rawa tertimbun oleh material vulkanik yang sangat tebal. Batas sisi utara danau didasarkan pada endapan lempung yang terdapat di sungai Pacet. Selain itu pertimbangan lainnya adalah adanya lereng dari Gunung Tidar. Sementara pada sisi barat, batasnya adalah alur sungai Tangsi yang terdapat endapan lempung hitam dan tertimbun oleh produk Gunung Sumbing.

Danau Kala Akhir Pleistosen mempunyai luas 73.712 km². Danau ini semakin menyempit seiring dengan perkembangan baik oleh aktivitas vulkanik, tektonik maupun deposisional. Aktivitas yang terjadi terus menerus berpengaruh kuat

terhadap pendangkalan danau. Penentuan batas wilayah pada kala ini, selain didasarkan pada hasil uji laboratorium tentang umur batuan juga didasarkan pada kondisi morfologinya. Pendangkalan ini cukup signifikan dipengaruhi oleh faktor tektonik dan vulkanik. Danau pada Kala Akhir Holosen ini mempunyai luas 21.273 km² dan terus mengalami penyempitan dan pendangkalan. Hal ini dipicu oleh aktivitas vulkanik dan tektonik. Aktivitas vulkanik dan tektonik yang terus berlangsung menimbun dan mengangkat danau, sehingga terjadi pendangkalan danau lebih lanjut, hingga kala Awal Holosen (Resen).

Danau kala Awal Holosen terbagi menjadi dua danau, danau yang pertama dibatasi pada muara Sungai Progo yang terletak di sebelah timur Candi Pawon. Danau pada kala ini berbentuk alur-alur yang sempit dengan estimasi luas sebesar 8.357 km². Faktor denudasi lebih berperan terhadap keberadaan danau. Pada kala ini daerah ini telah dihuni oleh masyarakat yang mulai melakukan pengolahan lahan untuk pertanian. Hal ini mengakibatkan meningkatnya proses denudasi, erosi, sedimentasi, dan banyak mata air mengering.



Gambar 9. Peta Spasiotemporal Danau Purba Borobudur

KESIMPULAN

Keberadaan danau purba di sekitar Candi Borobudur dibuktikan dengan ditemukannya endapan lempung hitam yang mengandung serbukseri/pollen dari tanaman komunitas rawa. Kondisi morfologi berupa lembah yang lebar dan mengandung air masih dapat ditemui di daerah penelitian, hal tersebut merupakan sisa dari pendangkalan danau yang masih dapat ditemui. Perkembangan/pendangkalan danau di sekitar Candi Borobudur menjadi dataran lakustrin tidak berlangsung dalam satu waktu, tetapi berlangsung berkali-kali. Untuk merekonstruksi perkembangan danau dapat diketahui dengan pendekatan spasiotemporal. Kondisi keruangan dapat diketahui dari pengamatan lapangan dan analisis pollen, sedangkan waktunya dapat ditentukan berdasarkan analisis radiokarbon ^{14}C . Perkembangan danau dapat direkonstruksi menjadi tiga waktu yaitu pada kala Akhir Pleistosen dengan luas 73.712 km², Awal Holosen dengan luas danau 21.273 km², dan Akhir Holosen (Resen) dengan luas 8.357 km².

REKOMENDASI

Keberadaan dataran lakustrin merupakan sumberdaya alam yang tidak terdapat di setiap wilayah di Indonesia. Pada kawasan Candi Borobudur yang mempunyai sejarah budaya yang tinggi, keberadaan jejak danau ini akan membantu dalam pengembangan pariwisata bidang kebumih (geowisata).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Prof. Dr. Sutikno dan Prof. Dr. Sunarto, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, atas bimbingannya selama penelitian. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Prof. Dr. Sutanto, DEA, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta. Tidak lupa penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Bapak Darwin A. Siregar dan Ibu Sri Woro, Pusat Survei Geologi, atas bantuannya dalam uji laboratorium radiokarbon ^{14}C dan pollen.

DAFTAR PUSTAKA

- Bemmelen, R.W. van, 1949, *The Geology of Indonesia : General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes*, vol. IA, Government Printing Office, Martinus Nijhoff, The Hague, 732.
- Bemmelen, R.W. van, 1952, *De Geologische Geschiedenis Van Indonesic* NV Uitgeverij, W.P. Van Stockum Enzoon Den Haag, 67-68
- Murwanto, H., 1996. *Pengaruh Aktivitas Gunungapi Kuarter Terhadap Perubahan Lingkungan Danau di Daerah Borobudur dan Sekitarnya*, Jawa Tengah.
- Murwanto, H., Sutanto, Suharsono, 2001. *Kajian Pengaruh Aktivitas Gunungapi Kuarter Terhadap Perkembangan “Danau Borobudur” Dengan Bantuan Sistem Informasi Geografis*, *Laporan Akhir DCRG*, Departemen Pendidikan Nasional, Indonesia
- Murwanto, H., Purwoarminta, A., Siregar, D.A., 2014. *Pengaruh Tektonik dan Longsor Lahan terhadap Perubahan Bentuklahan di Bagian Selatan Danau Purba Borobudur*, *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung
- Nieuwenkamp, W.O.J. 1933: *Het Boroboedoermeer*, *Algemeen Handelsblad*, Den Haag, 9 September 1933.
- Newhall, C.G., Bronto, S., Alloway, B., Banks N.G., Bahar, I., Del Marmol, M.A., Hadisantono, R.D., Halcomb, R.T., Geehin, Miksic, J.N., Sayudi, A.D., Sukliyar, R., Sndreastuti, S., Tilling, R.I., Torley, R., Trimble, D., Wirakusumah, A.D., 2000, 10.000 Years of Explosive Eruptions of Merapi Vulcano, Central Java : Archeological and Modern Implications. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 100
- Nossin, I.J. and Voute, C., 1986. Notes on the Geomorphology of The Borobudur Plain (Central Java Indonesia) in an archeological historical context). *Symposium an Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management/Enschede*, Netherland
- Purbohadiwidjojo, M.M., Sukardi, 1966. *Tentang ada atau tidak adanya suatu danau lama di dekat Borobudur (About Wether there was an ancient lake near Borobudur)*, Unpublish Progress Report, Geotechnic Hydrology Direktorat Geology, No. 1514, 12 January.
- Robertsson, A.M., 1986. *Pollen Analysis: Background, Laboratory Techniques and Identification*, Intensive Course of Palinulo and Ravello, Italy
- Soekmono, 1976, *Chandi Borobudur: A Monument of Mankind*, UNESCO Press, Paris
- Thanikaimoni, G., 1983, Palynological Investigation on The Borobudur Monument, *Bulletin de l’ Ecole Francaise D’Extreme-orient Paris*.

PETUNJUK BAGI PENULIS

1. I hereby declare that this submission is my own work.
(Saya/kami dengan ini menyatakan bahwa naskah yang dikirim merupakan hasil karya sendiri.)
2. I hereby stated that this manusrcipt have no plagiarism matter.
(Saya/kami dengan ini menyatakan bahwa di dalam naskah kami tidak terdapat hal-hal yang bersifat plagiarisme.)
3. I declare the submission has no potential conflict of interest.
(Saya/kami menyatakan bahwa naskah yang kami kirimkan tidak akan menyebabkan pertentangan atau perselisihan kepentingan.)
4. I hereby stated that this manuscript have never been previously published in any other scientific publication and not being under reviewing process of any other scientific publication.
(Saya/kami dengan ini menyatakan bahwa naskah yang dikirim belum pernah dipublikasikan sebelumnya dan tidak sedang dalam proses penelaahan oleh jurnal atau penerbit lainnya.)
5. The submitted manuscript contains no least than 2.000 words and not exceed 10 pages A4 including figures and tables, without any appendixes.
(Naskah yang dikirim terdiri dari lebih dari 2000 kata dan tidak melebihi 10 halaman ukuran A4 termasuk gambar dan tabel, dan tanpa lampiran apapun.)
6. The submitted manuscript has been written using Open Office Text Document (.odt), Microsoft Word (.doc/.docx), or Portable Document Format (pdf).
(Naskah yang ditulis sudah menggunakan format Open Office Text Document (.odt), Microsoft Word (.doc/.docx), atau Portable Document Format (pdf)).
7. Title already brief and concise, written in English, and not exceed 15 words.
(Judul naskah sudah cukup ringkas, dan tidak melebihi 15 kata.)
8. Abstract already brief and concise and not exceed 250 words in Bahasa Indonesia and English.
(Abstrak sudah ditulis secara ringkas dan tidak melebihi 250 kata, dalam Bahasa Indonesia dan Bahasa Inggris.)
9. Keywords are written in Bahasa Indonesia and English, between three to five phrase.
(Kata kunci sudah ditulis antara 3-5 frase, dalam Bahasa Indonesia dan Bahasa Inggris.)
10. The manuscript structure already consist: Introduction, Method/Material, Result and Discussion, Conclusion, Acknowledgement, and References.
(Struktur naskah sudah terdiri dari: Pendahuluan, Metode, Hasil dan Pembahasan, Kesimpulan, Ucapan Terimakasih, dan Daftar Pustaka.)
11. References are written according the writing style of LIMNOTEK. The primary references are no less than 80% from at least ten sources and had been taken from the late ten year publications.
(Daftar pustaka sudah ditulis sesuai dengan format yang diacu LIMNOTEK Perairan Darat Tropis di Indonesia. Pustaka utama yang diacu sudah lebih dari 80% dari sekurang-kurangnya 10 sumber acuan terkini.)