

Pengaruh tektonik dan longsor lahan terhadap perubahan bentuklahan di bagian selatan Danau Purba Borobudur

Tectonics and landslides control of the landform changes in the southern part of Borobudur ancient lake

Helmy Murwanto¹, Ananta Purwoarminta², dan Darwin A. Siregar³

¹Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, UPN “Veteran” Yogyakarta
Jln. SWK 104 (Lingkar Utara), Condongcatur, Yogyakarta 55285

²Pusat Penelitian Geoteknologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Jln. Sangkuriang, Kompleks LIPI, Bandung 40135

³Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral
Jln. Diponegoro 57, Bandung 40122

ABSTRAK

Berbagai penelitian menyatakan bahwa Candi Borobudur dikelilingi oleh danau dan telah berubah menjadi dataran. Selama ini diketahui bahwa penyebab pendangkalan danau adalah aktivitas Gunung Merapi. Namun pada bagian selatan Danau Borobudur yang dibatasi oleh Pegunungan Menoreh, tidak ditemukan material Gunung Merapi tetapi ditemukan material batuan *Old Andesite Formations* (OAF) dari Pegunungan Menoreh. Data aktivitas tektonik terekam baik pada lembah-lembah sungai di bagian selatan dataran Borobudur. Tujuan dari penelitian ini adalah mengidentifikasi dan menganalisis penyebab perubahan bentuklahan di sisi selatan Danau Purba Borobudur. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan pengukuran dan pengamatan lapangan yang didukung dengan data citra satelit, topografi, stratigrafi, dan analisis ¹⁴C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada sisi selatan dataran bekas Danau Borobudur tepatnya di lembah Sungai Sileng banyak ditemukan singkapan batuan OAF dan endapan lempung hitam yang terpotong dan terangkat akibat aktivitas sesar. Berdasarkan pengamatan stratigrafi diketahui bahwa endapan lempung hitam tertutup oleh material hasil longsoran Pegunungan Menoreh. Hasil pengujian radiokarbon ¹⁴C menunjukkan bahwa endapan danau berumur 22,140 BP. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa pada sisi selatan Danau Purba Borobudur pendangkalannya disebabkan oleh aktivitas tektonik yang mengakibatkan pengangkatan dan pensesaran memicu terjadinya longsor lahan.

Kata kunci: tektonik, longsor, perubahan bentuk lahan, Danau Purba Borobudur, Pegunungan Menoreh

ABSTRACT

Many studies suggest the Borobudur Temple surrounded lakes and shallowed by materials from volcanic activities. In the southern part of Borobudur Lake didn't find volcano material but founded Old Andesite Formations (OAF) material, thats come from Menoreh Mountain. Tectonic activities and avalanche material found on the Sileng river at southern of Borobudur plains. Purpose of this study are identify and analyze causes of landform changes in the

southern part of Borobudur Ancient Lake. The methods used are field measurements and observations, support by satellite imagery data, topography, stratigraphy, and radiocarbon ^{14}C analysis. The results are in the southern part of Borobudur lake, found OAF materials and blackclay outcrops were cut and lifted by tectonics activities. Based on stratigraphy observations, known that blackclay deposits covered by the avalanche material results of Menoreh Mountains. Radiocarbon ^{14}C test showed that lacustrine ages is 22,140 BP. The conclusion are in the southern part of Borobudur Ancient Lake, shallowed by tectonics activities than triggered by landslides.

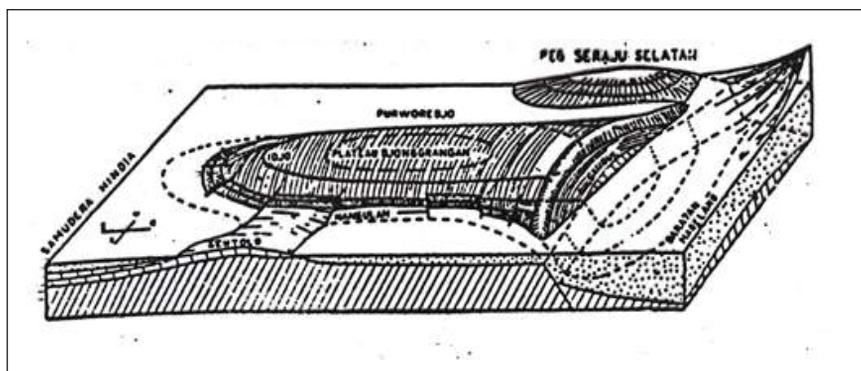
Keywords: tectonics, landslides, landform changes, Borobudur Ancient Lake, Menoreh Mountains

PENDAHULUAN

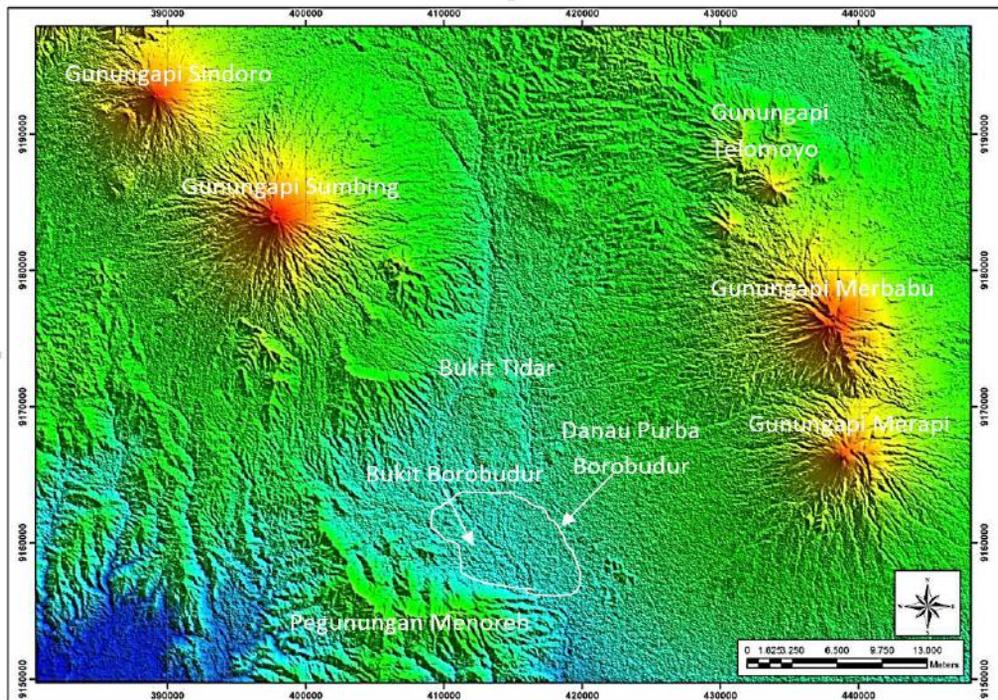
Latar Belakang

Candi Borobudur merupakan candi Budha sebagai warisan dunia yang dibangun di atas bukit (Bukit Borobudur) di Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah. Bukit Borobudur menyatu dengan Bukit Dagi terisolir, dan dikelilingi oleh dataran luas. Nossin dan Vote (1986) mendeskripsikan bentang alam di sekitar Candi Borobudur masa lalu merupakan danau dan Candi Borobudur dibangun di atas Perbukitan Gunung Gandul-Sipodang, merupakan bagian puncak dari batuan vulkanik Tersier Kubah Kulonprogo yang terpatahkan. Van Bemmelen 1949 menyatakan bahwa

Bukit Borobudur dikelilingi bentuk lahan dataran, bukit tersebut merupakan bagian dari Kubah Kulonprogo (Pegunungan Menoreh) yang terpatahkan, kemudian mengalami proses penenggelaman pada akhir zaman Tersier (Gambar 1). Pada zaman Kuartar di sekitar bagian yang terpatahkan, tumbuh beberapa gunung api muda, di antaranya Gunung Sumbing di sisi barat laut, Gunung Merbabu, dan Gunung Merapi di sisi timur-timur laut (Gambar 2). Bagian yang terpatahkan, kemudian membentuk sebuah cekungan antar-gunung “*intermountainous basin*” berumur Kuartar dikelilingi Pegunungan Menoreh dan gunung api yang selanjutnya disebut dengan Danau Purba Borobudur (Murwanto, 1996).



Gambar 1. Diagram blok dari Kubah Kulonprogo (van Bemmelen, 1949)



Gambar 2. Danau Purba Borobudur yang dikelilingi oleh Gunung api berumur Kuartar (Sumber : Citra Satelit ASTER, 2011).

Terbentuknya danau disebabkan oleh pengaruh aktivitas Gunung api Merapi dan proses tektonik, mengakibatkan terbandungnya Sungai Progo oleh endapan fluvio vulkanik Gunung api Merapi dan terjadinya pensesaran di Pegunungan Menoreh. Keberadaan danau dibuktikan dengan adanya endapan rawa berupa lempung hitam mengandung serbuk-sari dari tanaman komunitas rawa. Murwanto (1996), mengidentifikasi bahwa serbuk sari pada batulempung hitam di Kawasan Borobudur antara lain mengandung: *Nymphaea stellata*, *Cyperaceae*, *Eleocharis*, *Commelina*, *Hydrocharis* dan sebagainya. Sebaran endapan lempung hitam ini cukup luas dan saat ini menyisakan bekas rawa atau dataran lakustrin yang dimanfaatkan oleh masyarakat untuk aktivitas pertanian.

PERMASALAHAN

Lingkungan danau terbentuk sejak kala Pleistosen Akhir atau 22,130 + 400 B.P. (Murwanto, dkk, 2001). Berakhirnya lingkungan danau terjadi akibat tertimbun oleh material erupsi gunung api. Material hasil erupsi terangkut dan terendapkan, melalui sungai yang mengalir dan bermuara di lingkungan Danau Borobudur. Akibatnya, danau menjadi semakin dangkal dan sempit, akhirnya menjadi kering pada akhir abad ke-13 atau pada tahun 1288 Masehi (Murwanto, 1996).

Perubahan bentuklahan dari lingkungan danau menjadi dataran membutuhkan proses dan waktu yang sangat lama. Secara umum, faktor penyebab pendangkalan danau adalah proses sedimentasi yang sangat intens. Hasil peneli-

tian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya menyebutkan bahwa pendangkalan Danau Borobudur disebabkan oleh aktivitas gunung api terutama Gunung Merapi, (Bemmelen 1949; Purbohadiwidjojo dan Sukardi, 1966; Murwanto, 1996; Murwanto, dkk. 2001).

Berdasarkan pengamatan secara spasial, bagian selatan dari danau ini dibatasi oleh Pegunungan Menoreh yang diperkirakan juga mempunyai peran dalam pendangkalan danau. Kajian terkait dengan peran Pegunungan Menoreh terhadap pendangkalan danau belum pernah dilakukan, sehingga penelitian ini bermaksud mengkaji secara rinci dengan menunjukkan bukti-bukti lapangan, bahwa pendangkalan danau disebabkan oleh aktivitas tektonik dan longsoran material Pegunungan Menoreh cukup besar, terutama di kawasan Danau Purba Borobudur bagian selatan.

METODOLOGI

Data yang dikumpulkan dari penelitian ini meliputi data primer dan sekunder. Data primer merupakan data hasil pengamatan dan pengukuran di lapangan terdiri dari data struktur geologi, stratigrafi, dan radiokarbon ^{14}C . Sedangkan data sekunder merupakan data yang diperoleh dari penelitian sebelumnya, meliputi data *log* bor dan pola aliran sungai. Metode yang digunakan dalam penelitian ini dengan melakukan pengamatan dan pengukuran struktur geologi dan singkapan batuan di lapangan. Sebelum melakukan survei lapangan, terlebih dahulu dilakukan interpretasi citra satelit untuk mengetahui kondisi morfologi dan topografi untuk membantu dalam pengamatan aktivitas tektonik. Hasil aktivitas tektonik tersebut akan berpengaruh terhadap kondisi morfologi dan

pola aliran sungai. Kegiatan lapangan dilakukan untuk mengetahui bukti-bukti adanya jejak aktivitas sesar di Pegunungan Menoreh. Selain itu pengamatan lapangan juga dimaksudkan untuk mengetahui sebaran material yang berasal dari Pegunungan Menoreh. Sebaran material ini dapat diamati berdasarkan jarak dengan sumber material dan karakteristik material.

Analisis radiocarbon ^{14}C dimaksudkan untuk mengetahui umur dari danau dan waktu terjadinya pendangkalan. Untuk tahap pekerjaan laboratorium yang dilakukan pada prinsipnya adalah pemisahan karbon (C) dari sampel organik (lempung). Karbon dipisahkan sebagai CO_2 yang akan bereaksi dengan larutan amonium hidroksida. Selanjutnya diendapkan sebagai CaCO_3 dan kemudian ditambah Stronsium klorida akan terjadi endapan SrCO_3 . Reduksi dilakukan dengan serbuk logam Mg terhadap SrCO_3 pada temperatur 800°C untuk membentuk SrC_2 . Reaksi antara H_2O dengan SrC_2 akan menghasilkan gas Asetilena (C_2H_2) dan gas ini digunakan untuk mengukur aktivitas ^{14}C (karbon radioaktif) dengan memakai detektor “*Multi Anoda Anti Coincidence*”. Dengan memakai konstanta peluruhan radioaktif yang tertentu, maka rumus penentuan umur dari suatu sampel dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\text{Umur} = T = \frac{T^{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{A_0 - A_{DC}}{A - A_{DC}}$$

- A = Radioaktivitas isotop ^{14}C dalam sampel
 A_0 = Radioaktivitas isotop ^{14}C pada saat tanaman atau hewan tersebut hidup
 λ = Konstanta peluruhan radioaktif; $T^{1/2} = 1/\lambda$

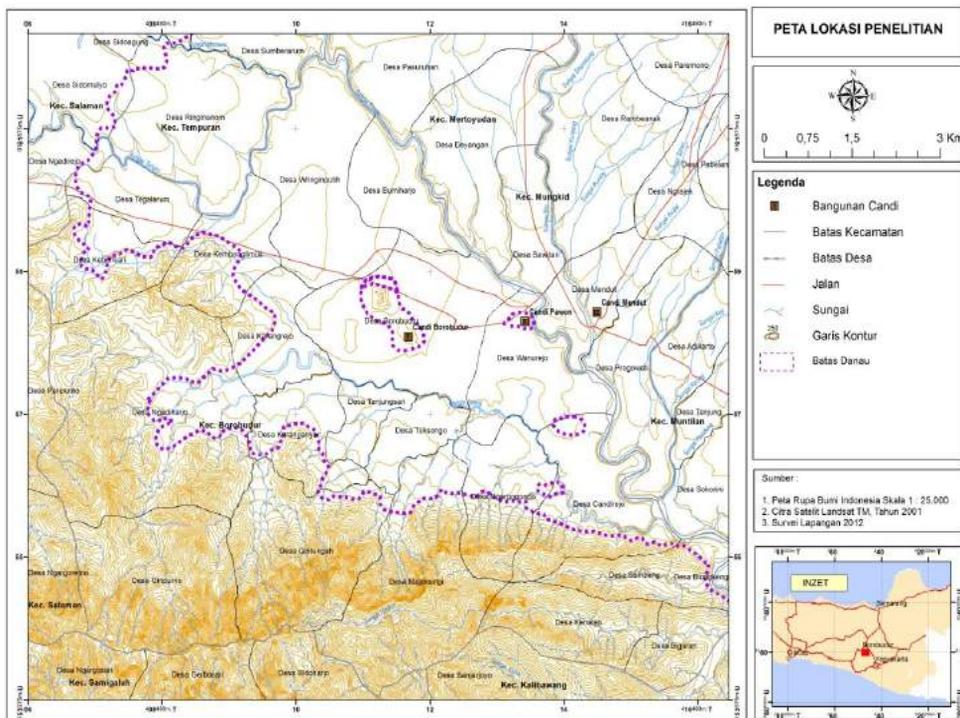
$T^{1/2}$ = waktu paruh = 5568+ 40 tahun
 A_{DC} = Radioaktivitas isotop C-14 Dead Carbon yang terukur
 In_2 = 0,693

LOKASI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada bagian selatan dari dataran bekas Danau Borobudur yang secara administratif terletak di Kecamatan Borobudur, Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah. Penelitian ini dilaksanakan di sebelah selatan dari Candi Borobudur yang berdekatan dengan Pegunungan Menoreh (Gambar 3). Singkapan batuan dan data struktur geologi lebih mudah ditemukan pada lembah-lembah sungai di daerah penelitian.

HASIL PENELITIAN

Interpretasi struktur geologi dengan menggunakan citra satelit digunakan sebagai acuan dalam melakukan pengamatan dan pengukuran sesar di lapangan. Gambar 4 merupakan data struktur geologi hasil interpretasi dari data topografi dan citra satelit daerah Borobudur dan sekitarnya. Dengan citra satelit struktur-struktur tersebut dapat terdeteksi, berupa kelurusan gawir sesar dengan deretan *triangular facets*, pergeseran *off set* blok sesar, kelurusan dan pembelokan secara tajam pola aliran sungai yang berkembang pada zona struktur. Kenampakan-kenampakan sesar tersebut terlihat jelas pada gawir Pegunungan Menoreh yang terletak di bagian selatan dari Candi Borobudur.



Gambar 3. Peta lokasi penelitian



Gambar 4. Hasil interpretasi struktur sesar di wilayah Dataran Kedu Selatan

Keberadaan struktur sesar tersebut perlu diamati lebih lanjut di lapangan. Pengamatan keberadaan sesar di lapangan akan lebih mudah ditemukan pada lembah-lembah sungai yang mengalir dan memotong dataran Borobudur, hal ini dikarenakan pada dasar lembah sungai akan tersingkap batuan dasarnya.

Sesar Progo

Sungai Progo merupakan sungai besar yang letaknya sekitar 3 km sebelah timur-timur laut bangunan Candi Borobudur. Pola aliran sungai ini di beberapa ruas tampak berkelok (*meandering*) cukup tajam, merupakan indikasi adanya pengaruh tektonik. Aktivitas tektonik mampu mengubah morfologi, baik pengangkatan maupun penurunan yang akan berakibat terhadap pembelokan alur sungai. Pengangkatan ini terli-

hat dari keberadaan struktur sesar pada lembah Sungai Progo. Struktur sesar dapat diamati pada bagian utara dari Jembatan Sigug, Desa Bumiharjo. Sesar memotong batuan breksi vulkanik di lembah Sungai Progo, dengan arah hampir N1500E atau timurlaut-baratdaya (Gambar 5). Apabila ditarik garis lurus dengan Pegunungan Menoreh akan tampak adanya hubungan (kelurusan) antara sesar yang memotong pada Pegunungan Menoreh dengan lokasi tersebut. Pada ruas Sungai Progo di sebelah timur Candi Pawon terdapat sesar-sesar yang memotong endapan rawa berupa lempung hitam (Gambar 6). Hal ini menunjukkan bahwa struktur sesar yang terdapat pada daerah ini merupakan sesar aktif yang memotong endapan rawa berumur Kuartar. Adanya sesar ini mengakibatkan endapan rawa yang berumur lebih tua letaknya



Gambar 5. Lembah Sungai Progo yang mengalami pengangkatan akibat aktivitas tektonik di sebelah utara Jembatan Sigug, Desa Bumiharjo



Gambar 6. Singkapan endapan rawa yang terpotong oleh struktur kekar, akibat sesar yang memotong batuan dasar Sungai Progo. Lokasi sebelah timur Candi Pawon

berada pada ketinggian yang hampir sama dengan endapan rawa yang lebih muda. Pengangkatan endapan rawa ini menjadi bukti adanya aktivitas tektonik di Dataran Borobudur.

Sesar Sileng

Singkapan sesar naik Sileng memiliki arah relatif barat-timur dan terletak pada tebing sungai.

Zona sesarnya menyebabkan perubahan arah pada Sungai Sileng karena memiliki arah kelurusan yang sama dengan arah sesarnya. Sesar ini merupakan sesar naik dengan bidang sesar N 102°E/77°. Sesar ini dicirikan dengan bidang sesar yang hampir vertikal kemudian melandai ke arah selatan (Gambar 7). Pada bidang sesar tidak ditemukan gores garis maka untuk penamaannya dilakukan pengambilan data struktur kekar karena pada daerah sekitar sesar ini ditemukan cukup banyak kekar-kekar, baik yang terbentuk karena gaya kompresional maupun tensional.



Gambar 7. Endapan rawa (lempung hitam) di Sungai Sileng tersesarkan akibat aktivitas tektonik (sesar naik)

Sesar Kaliduren

Pada Dusun Kaliduren ditemukan sesar yang memiliki arah relatif barat-timur. Zona sesarnya menyebabkan perubahan kelurusan sungai karena mengikuti kelurusan sesar tersebut. Sesar ini merupakan sesar mendatar kiri dengan bidang sesar N 101°E/75°. Sesar ini dicirikan dengan bidang sesarnya yang hampir vertikal dan menyebabkan ruas Sungai Sileng di dusun Kaliduren menjadi lurus (Gambar 8). Sesar ini terdapat pada litologi breksi vulkanik yang dicirikan dengan perubahan kemiringan lapisan

pada *footwall* dan *hangingwall*. Pada *hangingwall* didapatkan kemiringan lapisan yang lebih curam, hal ini dikarenakan terbentuknya drag fold yaitu lipatan yang terbentuk karena gerakan seretan sesar. Pada bidang sesarnya tidak ditemukan gores garis, maka untuk penamaannya dilakukan pengambilan data struktur kekar, karena pada daerah sekitar sesar ini ditemukan cukup banyak kekar-kekar baik yang terbentuk akibat gaya kompresional maupun tensional.

Sesar Sungai Tangsi

Berdasarkan hasil interpretasi Nossin dan Voute (1986), arah aliran Sungai Tangsi di sebelah barat laut Dataran Borobudur dipengaruhi oleh struktur sesar. Struktur tersebut mengakibatkan pembelokan aliran Sungai Tangsi sebesar 90°. Pola kelurusan aliran Sungai Tangsi setelah terjadi pembelokan, dapat diikuti sampai pertemuan dengan Sungai Progo, dengan arah timur laut-barat daya. Pola kelurusan Sungai Tangsi dapat diikuti sampai sejauh 10 km, mulai dari Sungai Klantangan di bagian baratdaya sampai Sungai Gending di bagian timurlaut. Data pendukung struktur sesar di Dataran Borobudur adalah terdapatnya mataair panas dengan rasa asin muncul melalui kekar-kekar yang memotong satuan breksi vulkanik produk Gunung api Sumbing. Mata air asin juga ditemukan di sebelah barat Desa Ngasinan, pada lembah Sungai Klantangan. Struktur kekar yang mengakibatkan munculnya mata air asin diduga sebagai akibat proses sekunder dari Sesar Tangsi.

Pada sebelah utara jembatan Ringinanom, Sesar Tangsi memiliki arah relatif timur laut-barat daya dan zona sesarnya mengakibatkan perubahan alur sungai karena mengikuti kelurusan sesar. Sesar ini merupakan sesar mendatar kanan.



Gambar 8. A. Material Lempung hitam yang merupakan endapan rawa terpotong oleh sesar. B. Breksi *Old Andesit Formation* yang terpotong oleh sesar. C. Air asin yang muncul dalam bentuk mata air melalui struktur sesar akibat proses tektonik.

Sesar ini dicirikan dengan bidang sesarnya yang hampir vertikal dan menyebabkan pada bagian Sungai Tangsi alurnya lurus. Kelurusan sungai pada utara jembatan Ringinanom adalah N 020° E (Gambar 9).

Material Longsoran

Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan adanya material longsoran dari Pegunungan Menoreh (breksi OAF) dengan ukuran bervariasi (Gambar 10). Material-material tersebut



Gambar 9. Kelurusan dan pemotongan aliran Sungai Tangsi akibat struktur sesar. Lokasi: sebelah utara jembatan Ringinanom.

banyak ditemukan di Desa Ngadiharjo dan Karanganyar Kecamatan Borobudur, baik di permukaan maupun pada lembah-lembah sungai.



Gambar 10. Bongkah material hasil longsoran berasal dari dinding Pegunungan Menoreh. Lokasi: sebelah selatan Dusun Nglipoh.

Analisis Radiokarbon ^{14}C

Analisis radiokarbon ini dilakukan di dua lokasi yang dianggap mampu mewakili umur danau di bagian selatan dari Danau Purba Borobudur. Gambar 11 merupakan endapan lempung hitam yang dilakukan pengujian radiokarbon ^{14}C . Hasil pengujian umur danau disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji radiokarbon ^{14}C

No.	Lokasi Sampel	Umur (BP)
1.	Dusun Pakisaji	22,140±390
2.	Dusun Soropadan	25,110±560



Gambar 11. Endapan Lempung hitam di Dusun Pakisaji (kiri) dan endapan lempung hitam di Dusun Soropadan (kanan).

DATA PEMBORAN

Data pembooran di Sungai Sileng dilakukan oleh Murwanto, (2001) hingga kedalaman 50 m (Gambar 12). Data pembooran ini menghasilkan variasi batuan berupa lempung hitam, batupasir, batupasir kerakalan dan breksi. Hingga kedalaman 21 meter, batuanya didominasi oleh lempung hitam yang kaya akan material karbon dengan sisipan batupasir lepas pada kedalaman 7,5 – 8 m, 10, 5 – 11 m, dan 16 – 18 m, sedangkan lapisan breksi andesit terdapat pada kedalaman 15 – 16 m da, 18 – 19 m. Mulai kedalaman 21 m breksi.

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan dan pengolahan data di laboratorium, maka diketahui wilayah yang pendangkalannya diakibatkan oleh adanya aktivitas tektonik dan longsor (Gambar 13).

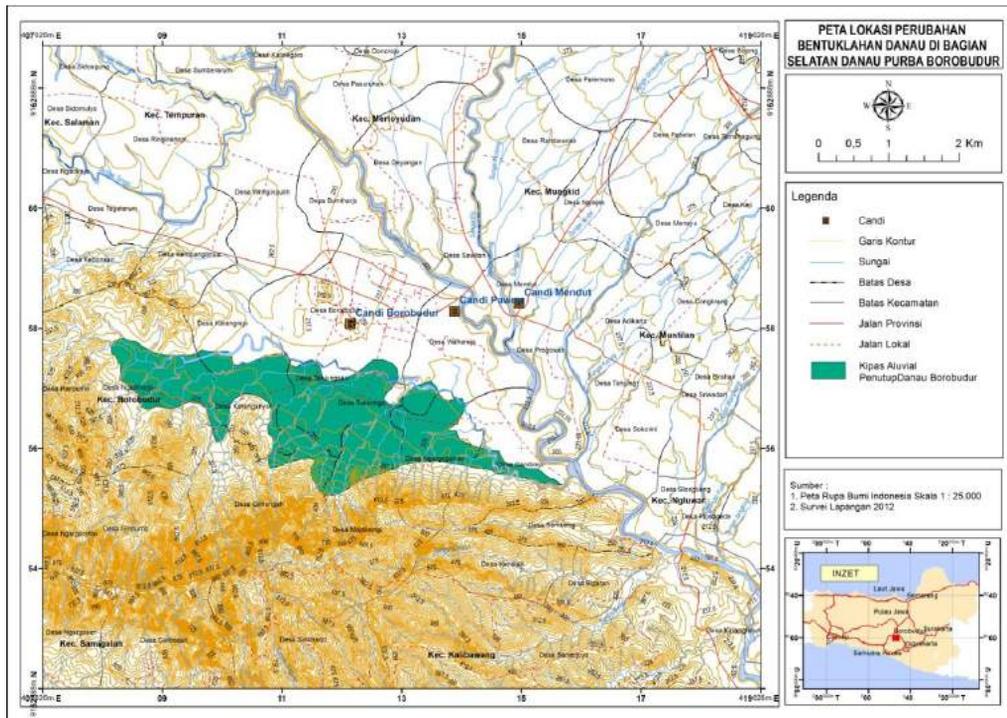
Dalam (meter)	Batuan	Keterangan
1	lempung hitam, tidak lengket	soil
2	lempung hitam, lengket, kaya marerial karbon	rawa-rawa (tertutup)
3		
4		
5		
6		
7		
8	pasir lepas, hitam, berbutir sedang - halus, berair	kanal sungai
9	lempung hitam, lengket, kaya marerial karbon	rawa-rawa (tertutup)
10		
11	pasir lepas, hitam, berbutir sedang - halus, berair	kanal sungai
12	lempung pasiran coklat kehitaman mengandung air payau dan gas (metan)	rawa-rawa berair payau (tidak tertutup)
13		
14	lempung, hijau, agak lengket mengandung klorit	
15		
16	pasir, konglomeratan (andesit) mengandung lempung berwarna hitam.	kanal sungai
17	pasir lepas, hitam, berbutir sedang - halus, berair	kanal sungai
18		
19	lempung, kecoklatan, pasiran, konglomeratan, mengandung pirit	
20	lempung coklat-kehitaman	rawa-rawa (tidak tertutup)
21		
22	pasir sangat kasar, breksian disusun oleh andesit, mengandung air payau	endapan sungai dengan arus kuat, air jernih
23		
24		

Gambar 12. Log litologi pemboran di Sungai Sileng di dominasi oleh lempung hitam dengan pasir breksian (Murwanto, 2001)

DISKUSI

Pegunungan Menoreh mempunyai ketinggian sekitar 900 m dpl., dengan banyak puncak yang menyerupai bentuk menara, salah satunya

adalah puncak Suroloyo. Pegunungan ini terletak di bagian selatan danau Borobudur dengan litologi berupa batuan breksi *Old Andesite Formation* (OAF). Kondisi morfologi pada



Gambar 13. Lokasi perubahan bentuklahan Danau Borobudur di bagian selatan akibat tektonik dan longsor lahan

Pegunungan Menoreh menunjukkan bahwa pada wilayah ini telah mengalami tingkat erosi yang sangat lanjut. Tingkat erosi ini selain disebabkan oleh adanya proses iklim juga dipengaruhi oleh proses tektonik yang berkembang pada wilayah tersebut. Iklim dan tektonik tersebut mengakibatkan kawasan Menoreh ini mudah terjadi tanah longsor. Bukti adanya longsor tersebut dapat diamati dari bekas atau sisa-sisa bidang longsor.

Pegunungan Menoreh mempunyai kemiringan lereng lebih dari 40%, hal ini dipengaruhi oleh adanya aktivitas tektonik. Pegunungan ini mempunyai lapisan penutup tanah yang tipis, dan bagian permukaannya di dominasi oleh material batuan yang lapuk. Batuan yang lapuk ini

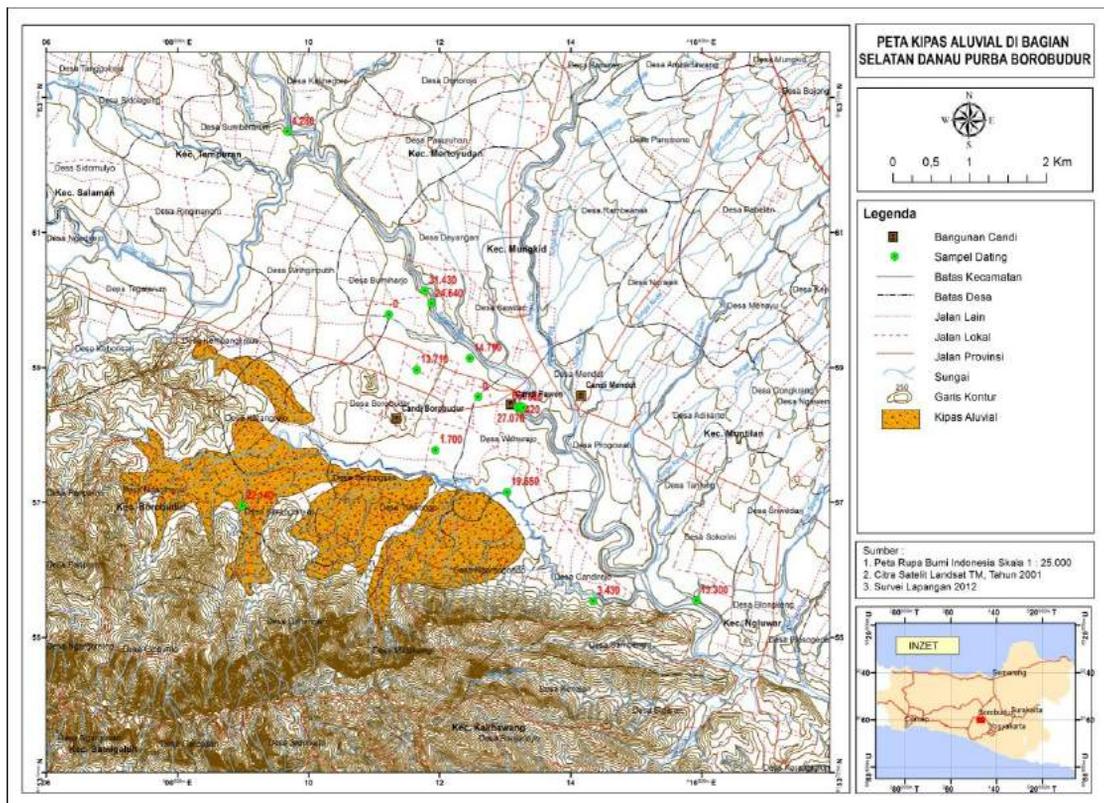
akan mudah mengalami longsor karena selain adanya rekahan juga batuan dasarnya yang kedap air, sehingga apabila terjadi pemicu seperti gempa bumi, hujan, dan perubahan tata guna lahan akan sangat mudah mengalami longsor.

Bukti aktivitas tektonik dapat ditemukan di Sungai Sileng yang terletak pada bagian utara Pegunungan Menoreh. Salah satu bukti aktivitas struktur geologi terdapat di Dusun Kaliduren, Desa Candirejo, Kecamatan Borobudur. Pada kawasan tersebut terdapat batuan breksi OAF yang terpotong oleh sesar dengan arah timur-barat. Pada wilayah tersebut juga terdapat air asin yang keluar melalui rekahan akibat adanya sesar. Aktivitas sesar ini mempunyai pengaruh yang kuat terhadap gerakan massa

atau longsor. Sesar-sesar tersebut akan memicu terbentuknya rekahan, yang selanjutnya terisi air hujan, akibatnya lereng Pegunungan Menoreh tidak stabil. Ketidakstabilan lereng tersebut berdampak pada terjadinya longsor dan aliran debris yang menutup Danau Borobudur pada waktu itu. Aliran *debris* merupakan aliran yang berisi campuran air, udara, lumpur, butiran padat dengan berbagai ukuran (Wong, dkk. 2007). Aliran debris ini akan membentuk kipas aluvial dari Pegunungan Menoreh. Kipas aluvial ditemukan di berbagai tempat di bagian selatan Dataran Borobudur (Gambar 14). Adanya kipas aluvial ini dibuktikan dari kondisi morfologi Pegunungan Menoreh dan material

yang ditemukan. Kipas aluvial ini mempunyai peran dalam proses pendangkalan Danau Borobudur, hal ini dibuktikan dengan endapan danau (lempung hitam) yang tertutup oleh material Pegunungan Menoreh.

Material-material hasil aliran dari Pegunungan Menoreh dapat ditemui pada lembah Sungai Sileng dengan ukuran fraksi bervariasi dari halus hingga kasar. Material fraksi halus ini berupa butiran pasir dan tanah hasil pelapukan yang berwarna kemerahan yang menutup lempung hitam. Warna kemerahan pada tanah tersebut sama dengan lapisan tanah di Pegunungan Menoreh, hal ini menunjukkan bahwa tanah yang menutup endapan lempung hitam terse-



Gambar 14. Lokasi kipas aluvial di daerah penelitian.

but berasal dari transport sedimen Pegunungan Menoreh. Hal tersebut dapat ditemukan di lembah Sungai Suroloyo, Desa Pakisaji, Kecamatan Borobudur (Gambar 15). Proses gerakan massa tersebut akan meninggalkan jejak di Pegunungan Menoreh berupa tebing yang terjal dan berbentuk mahkota longsor (Gambar 16). Proses tektonik yang berkembang di Pegunungan Menoreh, juga akan memicu terjadinya gempa

bumi. Bukti-bukti terjadinya gempa bumi pernah terjadi di wilayah ini adalah banyaknya terdapat struktur geologi dengan kondisi batuan yang terpotong dan terangkat. Pengangkatan batuan ini akan mengubah morfologi yang ada di daerah penelitian. Perubahan morfologi ini akan memicu terjadinya pembelokan sungai yang mensuplai air ke Danau Purba Borobudur, kondisi ini ditemukan di wilayah Dusun



Gambar 15. Batuan lempung hitam pada tebing Sungai Sileng yang tertimbun material dari Pegunungan Menoreh (kiri) dan lapisan tanah di Pegunungan Menoreh (kanan).



Gambar 16. Bekas terjadinya longsor (mahkota longsor) di Pegunungan Menoreh.

Kebanglimus yang ditandai dengan pembelokan alur Sungai Tangsi ke arah utara. Bukti lain adalah adanya endapan danau yang terangkat sehingga berpengaruh pada kemiringan lereng dan berpotensi mengurangi daya tampung air danau. Selain itu, adanya aktivitas tektonik juga berdampak pada pembukaan atau pelebaran bendungan danau di Dusun Klamong. Pembukaan bendungan alamiah ini dibuktikan adanya bekas struktur yang memotong breksi OAF dan saat ini menjadi lembah Sungai Progo. Berbagai dampak tektonik tersebut berakibat pada menurunnya suplai air danau, berkurangnya daya tampung danau dan bertambahnya debit keluarnya air danau di penelitian. Kondisi tersebut akan berakibat pendangkalan Danau Borobudur meskipun terjadi dalam rentang waktu yang lama.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa pada sisi selatan Danau Purba Borobudur telah mengalami pendangkalan yang disebabkan oleh adanya aktivitas tektonik dan longsor lahan dari Pegunungan Menoreh. Rekaman aktivitas tektonik yang terdapat di lapangan menunjukkan bahwa wilayah penelitian dikontrol oleh struktur geologi. Struktur geologi tersebut mengubah morfologi dan membuka jalan keluar bagi genangan air danau. Aktivitas tektonik juga mengakibatkan terjadinya longsor lahan di Pegunungan Menoreh yang juga dipicu oleh curah hujan dan gravitasi bumi. Keberadaan struktur geologi akan membantu mempercepat terjadinya pelapukan batuan dan berpotensi terjadi longsor. Material hasil longsor di daerah penelitian, mempunyai dimensi bervariasi mulai dari fraksi halus hingga kasar.

Kawasan di sekitar Candi Borobudur mempunyai daya vitalitas yang tinggi sampai sekarang, meskipun telah mengalami perubahan lingkungan danau menjadi rawa-rawa dan sekarang berupa bentuklahan dataran. Jejak-jejak lingkungan alam masa lalu masih nampak jelas bisa dinikmati sampai sekarang. Untuk menjaga dan melestarikan keindahan kawasan tersebut, diperlukan penataan dan pengelolaan secara terpadu.

ACUAN

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.

Murwanto, H., 1996. *Pengaruh Aktivitas Gunung api Kuartar Terhadap Perubahan Lingkungan Danau di Daerah Borobudur dan Sekitarnya*, Jawa Tengah.

Murwanto, H., Sutanto, dan Suharsono, 2001. *Kajian Pengaruh Aktivitas Gunung api Kuartar Terhadap Perkembangan "Danau Borobudur" Dengan Bantuan Sistem Informasi Geografis*, *Laporan Akhir DCRG*, Departemen Pendidikan Nasional, Indonesia

Nossin, I.J. and Voute, C., 1986. *Notes on the Geomorphology of The Borobudur Plain (Central Java Indonesia) in an archeological historical context*. Symposium a Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management/Enschede, Netherland

Purbo Hadiwidjojo, M.M., dan 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.

Wong, D.W., Chiu, L.S., dan Lu, G.Y., 2007, Vulnerability Assesment of Rainfall-Induced Debris Flows in Taiwan, *Natural Hazards Journal*, 43:223-244.