

Analisa Stabilitas Struktur Bukit Candi Borobudur - Kajian Rayapan Menggunakan Data Inklinometer -

Oleh Brahmantara, ST
Staf Balai Konservasi Peninggalan Borobudur

Studi ini adalah untuk melakukan analisis terhadap data inklinometer pasca pemugaran kedua sampai dengan saat ini. Adapun tujuan yang hendak dicapai adalah untuk mengetahui ada tidaknya rayapan yang terjadi di area candi Borobudur berdasarkan data *Inklinometer* tersebut. Manfaat studi rayapan di area candi Borobudur berdasarkan data inklinometer adalah untuk mengetahui kondisi tanah bukit dasar candi Borobudur, jika ada gerakan-gerakan tanah bukit di bawah candi yang dapat mempengaruhi kondisi struktur candi akan terdeteksi secara dini. Dengan demikian dapat diambil langkah-langkah antisipasi untuk menghindari akibat yang lebih parah. Agar tujuan studi tidak menyimpang dari sasarannya dan terfokus pada pokok permasalahannya perlu ditetapkan pula batasan-batasan dan ruang lingkup studi. Studi akan dilaksanakan terbatas pada analisis data inklinometer yang ada di Kantor Balai Konservasi Peninggalan Borobudur pasca pemugaran kedua sampai dengan saat ini.

Dari hasil penelitian para ahli, menunjukkan bahwa kondisi tanah bukit di bawah candi merupakan salah satu faktor penyebab kerusakan pada Candi Borobudur. Hal ini disebabkan karena struktur tanah bukit dasar candi terdiri dari lapisan tanah lempung. Salah satu sifat tanah lempung adalah jika terkena air, daya dukung/kekuatan tekannya menjadi sangat rendah, mengakibatkan dinding-dinding candi mengalami penurunan.

Candi Borobudur terletak di atas bukit dengan ketinggian 265,740 meter dari permukaan air laut, beriklim

tropis dengan curah hujan bulanan cukup tinggi, yakni mencapai 621 milimeter. Candi Borobudur telah mengalami pemugaran sebanyak dua kali. Pemugaran pertama dilaksanakan oleh TH. Van Erp pada tahun 1907 - 1911 pada masa pemerintahan Belanda dan pemugaran kedua dilaksanakan oleh pemerintah Indonesia bekerja sama dengan UNESCO pada tahun 1973 - 1983.

Dengan mempertimbangkan kondisi tanah bukit yang terdiri dari lapisan tanah lempung serta untuk menghindari hal-hal yang tidak diinginkan selama berlangsungnya pemugaran kedua, maka pada tahun 1975 dipasang alat-alat monitoring di atas Candi Borobudur. Alat-alat tersebut berupa 48 SINCO pore pressure indicator, model 51411 dan SINCO digital inklinometer, model 50306 dengan 16 buah kasing kedalaman 15 meter, hingga sekarang kondisi kasing inklinometer yang masih dalam kondisi baik ada 11 kasing, sedangkan sisanya sudah tidak bisa digunakan.

Inklinometer sendiri adalah alat yang terdiri dari kasing yang berupa pipa besi yang ditanam didalam tanah

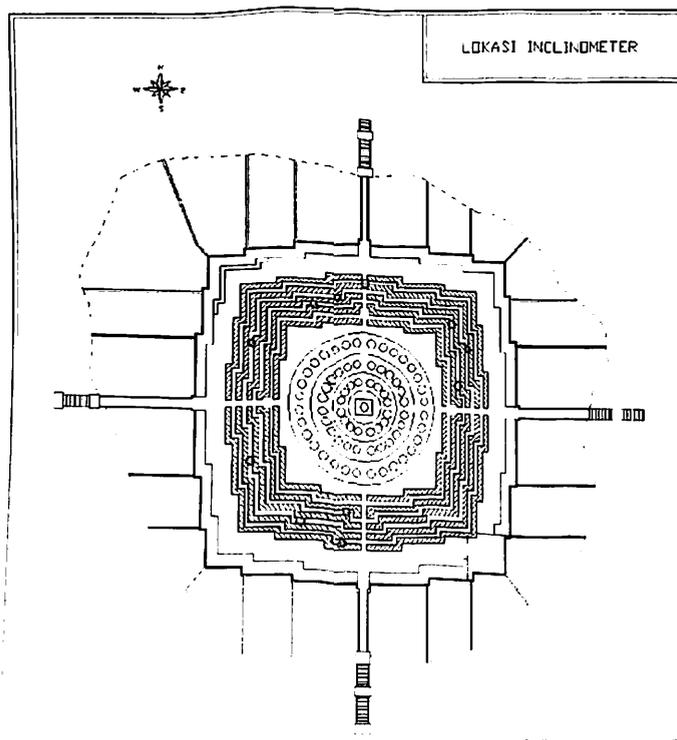
dengan kedalaman tertentu, dan transducer yang digunakan untuk pengambilan data yang kemudian diolah dan menjadi sebuah data yang bertujuan untuk mengetahui gerakan tanah bawah permukaan dalam arah X dan Y.

Seismisitas dan Stabilitas Candi Borobudur.

Menurut Soetadi, Soetarjo dan Rogers (1982) maupun Ambraseys (1982) *ground acceleration* yang sesuai untuk analisis stabilitas struktur di lokasi candi Borobudur cukup diperkirakan sebesar 0,15 g, meskipun beberapa expert memberikan perkiraan 0,15 - 0,30 g. Wongsodinoto dan Djajaputra (1982) menyatakan bahwa dalam rangka monitoring stabilitas candi Borobudur, *warning* sistem yang didasari pada : (a) pengukuran fluktuasi derajat kejenuhan *shear characteristics (cohesion)* lapisan tanah tersebut melalui alat *pore pressure cells*, dan (b) pengukuran perubahan sudut inklinasi suatu inklinometer kasing dipasang vertikal pada lapisan tanah dari waktu ke waktu, terutama setelah terjadi gerakan masa tanah yang cukup besar akibat

longsoran ataupun gempa bumi ataupun gerakan yang relatif kecil akibat deformasi *elasto-plastis* yang terjadi pada lapisan tanah sebelum akhirnya mengalami keruntuhan, yang dapat dibaca dari alat *inklinometer*.

Peralatan *accelerometer* yang dipasang di candi Borobudur, yang dapat merekam *respons ground acceleration* setiap mengalami gempa bumi akan sangat membantu verifikasi asumsi nilai percepatan yang digunakan dalam analisis stabilitas struktur.



Hasil Studi

Wangsadinata dan Djajaputra (1982) telah melakukan perhitungan analisa stabilitas untuk berbagai variasi kondisi percepatan tanah (φ : 0,1 g dan 0,15 g) dan berbagai nilai kohesi tanah, C (yaitu 0,2; 0,3 dan 0,4 kg/cm²) dan menghasilkan nilai *Safety Factor* (*SF*) berkisar antara 1 sampai dengan 1,90.

Hasil evaluasi data *inklinometer* dan seismograf yang dikorelasikan dengan data ketinggian Arupadhatu dan data kemiringan dinding candi di depan kasing *inklinometer* yang dilakukan oleh Tukidjan, Budjono dan Siyanto (2003), menyimpulkan bahwa (a). Kedua ujung kasing *inklinometer* tidak mengalami perubahan letak (stabil). Hal ini disebabkan karena di bagian dasar kasing berada pada lapisan tanah keras yang tidak mudah bergerak, sedangkan di bagian puncak kasing masuk dalam lapisan beton dibawah lantai lorong (terjepit) sehingga tidak mudah bergerak. (b). pada titik interval kelipatan sama, yaitu 3 m, 6 m, 9 m dan 12 m terdapat gerakan horisontal yang bekerja pada kasing, sehingga terjadi perubahan pada kasing. Diperkirakan titik - titik interval tersebut merupakan tempat sambungan kasing - kasing sehingga dengan sedikit gerakan horisontal saja kasing akan mudah bergerak. (c). Ketinggian titik - titik sampel di puncak stupa pusat tidak menunjukkan adanya gejala penurunan. Maka gerakan horisontal yang bekerja pada kasing-kasing tersebut bukan disebabkan oleh adanya pembebanan (*creeping*). (d). Titik sampel kemiringan dinding lorong 1 dan dinding lorong 2 di depan kasing *inklinometer* tidak menunjukkan adanya perubahan (stabil).

Pengaruh Deformasi Horisontal *Inklinometer* terhadap dinding candi

1. Metode Analisa

Data Pengukuran kemiringan dinding candi Borobudur juga merupakan data korelasi adanya tekanan horisontal terhadap kasing *inklinometer* yang bekerja pada dinding candi. Oleh karena itu analisa data diarahkan untuk mengetahui perubahan - perubahan yang terjadi berdasarkan data yang ada.

Data pengukuran kemiringan dinding candi hasil pengukuran selama ini memiliki toleransi tertentu. Toleransi data kemiringan dinding lorong.1 sebesar 4 menit dan dinding Lr. 2,3 dan 4 sebanyak 6 menit. Maka data pengukuran pada *epoch* yang berurutan selalu berbeda, namun perbedaan ini belum bisa diartikan sebagai adanya deformasi kemiringan dinding candi, apabila perbedaan besaran ini masih dibawah kisaran toleransi.

2. Besaran Deformasi Kemiringan Dinding

Hasil analisa data kemiringan dinding candi Tahun 1994 - 2005 menunjukkan bahwa perbedaan data kemiringan dinding candi lorong 1 terhadap data awal berkisar antara 0 menit s/d 4 menit, selain masih dibawah kisaran toleransi angka-angka tersebut tidak menunjukkan adanya peningkatan. Demikian pula dengan data kemiringan dinding lorong 2 angka-angka perubahan terhadap data awal relatif kecil yaitu antara 0 menit s/d 4 menit, selain masih dalam kisaran toleransi juga tidak menunjukkan adanya peningkatan. Berdasarkan hasil analisa data kemiringan dinding tersebut data hasil pengamatan selama 12 tahun terakhir (1994 - 2005) dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Titik sampel kemiringan dinding lorong 1 dan dinding lorong 2 tidak menunjukkan adanya perubahan (masih stabil)
2. Deformasi Horisontal yang terjadi pada kasing-kasing *inklinometer* selama ini belum mempengaruhi stabilitas susunan batu dinding di depannya.

Deformasi Horisontal *Inklinometer* Posisi Relatif

Telah disebutkan di bagian depan, bahwa data sebanyak 29 *epoch* pengukuran *inklinometer* yang tersedia, dipilih 12 *epoch* untuk mewakili 12 tahun pengamatan. yaitu th.1994 s/d th 2005. Kasing *inklinometer* yang diamati sebanyak 11 buah, tersebar di l

orong, lorong 2 dan lorong 3 pada keempat sisi candi. Pengukuran kasing dilakukan sebanyak 4 kali setiap *epoch*nya, yakni dua kali arah sumbu X (barat - timur) dan dua kali arah sumbu Y (selatan-utara).

Berdasarkan data hasil pengukuran tersebut, selanjutnya dilakukan analisa posisi relatif setiap interval dari 11 kasing *inklinometer* tersebut pada setiap *epoch* pengamatan.

Pengaruh Deformasi Horisontal *Inklinometer* terhadap posisi Titik Sampel Topometri

1. Metode Analisa

Telah disebutkan di bagian depan bahwa data pengukuran topometri dinding candi Borobudur merupakan data korelasi adanya tekanan horisontal terhadap kasing *inklinometer* yang bekerja pada dinding candi. Oleh karena itu analisa data diarahkan untuk mengetahui perubahan - perubahan yang terjadi berdasarkan data yang tersedia Data pengukuran topometri terhadap titik sampel dinding candi Borobudur yang telah dilaksanakan mempunyai toleransi (kesalahan yang diijinkan) tertentu. Data pengukuran koordinat (X dan Y) memiliki toleransi sebanyak 20,00 mm, sedangkan untuk data pengukuran beda tinggi (ketinggian Z) sebanyak 10,00 mm. Data hasil pengukuran pada *epoch* yang berurutan selalu berbeda, namun perbedaan ini belum bisa diartikan sebagai deformasi horisontal dan vertikal dinding candi, apabila perbedaan besaran ini masih di bawah kisaran toleransi.

2. Besaran deformasi horisontal pada titik sampel

Hasil analisa menunjukkan bahwa data hasil pengukuran topometri dinding lorong 1 dibanding dengan data awal (1994) terdapat perbedaan yakni antara 0,10 mm s/d 19,00 mm baik pada arah sumbu X maupun sumbu Y. Selain masih di bawah kisaran toleransi angka-angka tersebut tidak menunjukkan adanya peningkatan. Data hasil pengukuran topometri dinding lorong 4 terhadap data awal (1994) juga relatif kecil, yakni

berkisar antara 0.00 mm s/d 17.00 mm selain masih di bawah kisaran toleransi, angka-angka tersebut juga tidak menunjukkan adanya peningkatan (lihat tabel no 4.57). Sedangkan hasil analisa mengenai ketinggian (Z) menunjukkan bahwa ketinggian titik sampel pada dinding Lr.1 dan dinding Lr. 4 berbeda dibanding dengan data awal (1994). Perbedaan tersebut berkisar antara 0.00 mm s/d 11 mm . Angka tersebut berada sedikit diatas toleransi yaitu satu milimeter, namun tidak menunjukkan adanya peningkatan.

Kesimpulan

Hasil analisa data inklinometer dalam rangka studi rayapan di area candi Borobudur berdasarkan data inklinometer yang dikorelasikan terhadap data pengukuran titik sampel topometri dan data pengukuran kemiringan dinding candi, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Kedua ujung kasing inklinometer tidak mengalami perubahan letak (stabil). Hal ini disebabkan karena ujung dasar kasing berada pada lapisan tanah keras yang tidak mudah bergerak, demikian pula di bagian ujung puncak kasing, bagian ini masuk dalam lapisan beton di bawah lantai lorong, sehingga posisinya terjepit beton (?). dengan demikian perubahan akibat tekanan horisontal yang bekerja pada kasing tersebut sangat dimungkinkan terjadi di bagian tengah kasing (lihat lampiran gambaran no. 2 dan no. 3).
2. Sisi utara terdapat suatu rayapan ke arah barat laut, utara, dan timur laut yang terdeteksi pada kasing inklinometer no. 2 interval 6, kasing no. 3 interval , 6,9 dan 10 dengan laju perubahan maksimum 8,60 mm selama 12 tahun terakhir.
3. Sisi timur terdapat suatu rayapan ke arah timur dan selatan yang terdeteksi pada lapisan kasing no. 4 interval 3 dan 6 dengan laju perubahan maksimum 9,45 mm selama 12 tahun terakhir.
4. Sisi selatan terdapat suatu rayapan ke arah barat, barat daya dan tenggara yang terdeteksi pada kasing no. 7 interval 6 dan 9, kasing no.8 interval 6 dan 9 dan kasing no. 9 interval 12 dengan laju perubahan maksimum 7, 10 mm selama 12 tahun terakhir.
5. Sisi barat juga terdapat suatu rayapan ke arah barat dan barat laut yang terdeteksi pada kasing no. 10 interval 9 dan 12 serta kasing no. 11 interval 6 dan 9 dengan laju perubahan maksimum 4.06 mm selama 12 tahun terakhir.
6. Titik sampel pengukuran topometri pada dinding lorong 1 dan lorong 4 tidak menunjukkan adanya perubahan (toleransi pengukuran ± 20.00 milimeter).
7. Titik sampel kemiringan dinding lorong 1 dan dinding lorong 2 di depan kasing tidak menunjukkan adanya perubahan (toleransi pengukuran 4 menit dan 6 menit).
8. Rayapan yang terjadi di sisi Utara, Timur, Selatan dan Barat berada pada kedalaman antara 6 mm dan 9 mm dengan kecepatan maksimum 9,45 mm selama 12 tahun tersebut belum mempengaruhi stabilitas dinding candi.
9. Fakta lapangan menunjukkan bahwa hampir di setiap dasar kasing terdapat lumpur (?) yang berarti telah terjadi infiltrasi. Satu-satunya tempat yang sangat memungkinkan tempat terjadinya infiltrasi adalah melalui tempat sambungan kasing. Panjang pipa / kasing adalah 3 m sehingga tempat sambungan pipa adalah pada interval-interval kelipatan 3 m. dengan demikian di lokasi tersebut telah terjadi proses infiltrasi air dengan membawa partikel tanah dan mengendap di bagian dasar kasing.
10. Akibat proses infiltrasi yang terus menerus maka telah terjadi penggrogosan tanah di sekitar sambungan pipa, sehingga mempengaruhi posisi kasing.

Arah perubahan tidak beraturan, ada yang berubah ke arah luar bukit, ada yang ke arah samping dan bahkan ada yang ke arah dalam bukit.

Perubahan-perubahan tersebut terjadi pada lapisan tanah urug dengan demikian proses rayapan yang terdeteksi pada kasing-kasing inklinometer tersebut terjadi pada lapisan tanah urug dan belum berpengaruh terhadap stabilitas bukit dan struktur candi Borobudur.

Saran

Inklinometer merupakan salah satu instrumentasi monitoring stabilitas candi Borobudur yang sangat diperlukan setiap saat, maka disarankan :

1. Pengamatan kasing inklinometer tetap dilanjutkan dan ditingkatkan serta data pengukurannya disimpan secara teratur. Periode pengukuran disarankan empat bulan sekali yaitu bulan Januari, Mei, dan September.
2. Peralatan yang ada perlu ditambah dengan sistem pengambilan data dan pengolahan ke bentuk tabel dengan sistem komputerisasi yaitu dengan menambah *software* khusus pada komputer, sehingga kesalahan tulis dapat dihilangkan dan mempercepat proses analisa data.
3. Lereng halaman candi di kuadran timur laut dan barat daya dipasang kasing *inklinometer* untuk mendeteksi gerakan tanah di lokasi tersebut karena lereng yang ada cukup terjal.
4. Di lokasi candi Borobudur perlu dipasang alat seismograf lengkap dengan *accelerometer* untuk mendeteksi gempa yang ada di area Borobudur dalam rangka monitoring stabilitas Candi Borobudur.
5. *Inklinometer* dan seismograf perlu ditangani secara khusus, jika perlu tenaga oprasionalnya ada diberi kesempatan untuk mengikuti penataran/diklat tentang *inklinometer* dan seismograf ditempat lain. ■