

ANALISIS STABILITAS LERENG DAERAH SENGI MENGUNAKAN SLOPE/W SEBAGAI REFERENSI KELAYAKAN PEMINDAHAN CANDI LUMBUNG SENGI

N. K. Wiguna*, A. Rifa'i dan S. Siswosukarto

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada,

Email: nanu.karunia.w@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Peninggalan sejarah budaya yang terdapat di Indonesia merupakan salah satu anugerah keanekaragaman yang harus dilestarikan. Candi Lumbung Sengi merupakan peninggalan sejarah kerajaan Hindu yang terdapat di Jawa Tengah. Kaki lereng pada tempat awal berdirinya candi mengalami erosi yang disebabkan oleh banjir lahar dingin hasil erupsi Gunung Merapi pada tahun 2010. Dilakukan penelitian tentang lapisan bawah permukaan tanah, jenis tanah di lapangan, serta stabilitas lereng pada lokasi awal berdirinya candi. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini berguna sebagai referensi kelayakan pemindahan candi. Penyelidikan tanah di lapangan menggunakan metode *Cone Penetration Test* (CPT) dan pengujian Geolistrik 2D menggunakan alat NANIURA model NRD 300 HF untuk mengetahui pola perlapisan bawah tanah. Klasifikasi jenis tanah di lapangan menggunakan sistem klasifikasi tanah Unified dan untuk analisis stabilitas lereng menggunakan *Limit Equilibrium Method* metode Morgenstern-Price dengan bantuan software SLOPE/W 2012. Konfigurasi yang digunakan untuk pengujian Geolistrik 2D adalah Wenner-Schlumberger. Dari pengujian tanah di laboratorium, didapatkan 3 jenis tanah yaitu SM, SP, dan SW. Gempa menjadi salah satu parameter yang dimasukkan ke dalam analisis stabilitas lereng. Faktor keamanan lereng untuk kondisi di lapangan menunjukkan angka aman yang stabil yaitu sebesar 2,877. Ketika parameter gempa dimasukkan dalam analisis, faktor keamanan lereng turun menjadi 2,024 dan ketika simulasi kaki lereng terendam air faktor keamanan lereng menjadi 2,582. Terdapat beberapa pemodelan yang dianalisis dalam penelitian ini, sehingga dapat diketahui pemodelan yang bagaimana yang dapat memenuhi kriteria angka aman dalam SNI 03-1962-1990 tentang Tata Cara Penanggulangan Longsor sebagai dasar perencanaan.

Kata kunci: faktor keamanan, klasifikasi tanah, sengi

1. PENDAHULUAN

Candi Lumbung Sengi merupakan candi Hindu yang terletak secara administratif di Dusun Sengi, Desa Krogowan, Kecamatan Sawangan, Kabupaten Magelang. Candi ini terkena dampak dari banjir lahar dingin yang terjadi pada tanggal 4 November 2010 setelah kejadian erupsinya Gunung Merapi. Kaki lereng yang menjadi tempat candi ini berdiri tererosi oleh aliran air yang meluap dari Sungai Apu. Pada tahun 2011, Candi Lumbung ini dialokasikan ke tempat yang lebih aman yaitu di Dusun Tlatar, Desa Krogowan, Kecamatan Sawangan, Kabupaten Magelang karena takut akan bahaya longsor.

Pihak pengelola Candi Lumbung Sengi ingin memindahkan kembali candi ini ke tempat semula agar aspek budaya dari sebuah candi terpenuhi. Tetapi pihak pengelola masih kurang yakin akan kelayakan lokasi awal candi setelah diterjang banjir lahar dingin, terlebih kaki lereng menjadi sangat curam dan pengelola tidak mempunyai data yang akurat tentang lokasi awal setelah banjir terjadi, maka aspek teknis menjadi hal yang perlu diperhatikan dalam permasalahan ini.

Karena lokasi awal candi merupakan tebing pinggir sungai, maka geoteknik menjadi salah satu aspek teknis yang perlu ditinjau. Stabilitas suatu lereng dapat diketahui dari penyelidikan tanah lapangan disertai perhitungan angka aman sebagai dasar perencanaan peletakan Candi Lumbung Sengi. Analisis dari segi geoteknik ini diharapkan dapat menjadi referensi kelayakan pemindahan Candi Lumbung Sengi, mengingat betapa pentingnya peninggalan budaya leluhur yang harus kita jaga dan kita lestarikan agar generasi masa depan tidak lupa bagaimana sejarah terbentuk.

2. LITERATUR DAN DASAR TEORI

2.1 Tanah

Tanah merupakan suatu material yang berada di kerak bumi, berbentuk butiran halus maupun butiran kasar dan juga sebagai hasil dari pelapukan suatu batuan secara kimiawi maupun fisik. Menurut Terzaghi (1996) Tanah merupakan agregat alami dari butiran-butiran mineral yang dapat dipisahkan dengan cara mekanis seperti agitasi dalam air, sedang batu adalah agregat alami yang terdiri dari mineral-mineral yang terikat sangat kuat oleh gaya-gaya kohesif yang permanen. Tanah mempunyai *Index Properties* yang akan menjadi dasar untuk klasifikasi tanah dan juga *Mechanical Properties* yaitu sifat mekanis tanah yang dapat mempertahankan keseimbangannya.

Beberapa parameter yang perlu diketahui dari tanah untuk menyelesaikan berbagai permasalahan di lapangan adalah sebagai berikut:

1. Sifat Indeks Tanah (*Index Properties of Soil*)
2. Klasifikasi Tanah
3. Sifat Mekanis Tanah (*Mechanical Properties of Soil*)
4. Deformasi Tanah

2.2 Faktor Penyebab Gerakan Lereng

Hardiyatmo (2012) mengemukakan bahwa gerakan lereng biasanya diakibatkan oleh perubahan kondisi geometri lereng, misalnya mempertajam kemiringan lereng dan infiltrasi air hujan ke dalam tanah yang menyebabkan tanah pembentuk lereng menjadi lebih berat sehingga mengakibatkan bertambahnya tegangan geser dan mengurangi kuat geser tanah yang bekerja pada bidang gelincir lereng. Dengan kata lain, gerakan lereng terjadi jika tegangan geser akibat beban yang bekerja pada lereng menyebabkan kuat geser terlampaui.

2.3 Kuat Geser Tanah

Menurut Look (2007) beberapa hal yang mengakibatkan penurunan kekuatan geser adalah sebagai berikut:

1. Meningkatnya tekanan pori. Hal ini mengakibatkan menurunnya tegangan efektif tanah. Tanah dengan permeabilitas tinggi akan mengalami perubahan muka air tanah yang cepat contohnya adalah pada tanah *coarse grained*, serta lempung dengan kekar, sesar, dan lensa.
2. Kekar. Tidak terdapat kekuatan pada daerah retakan, khususnya tanah yang mengalami gaya tarik.
3. Pengembangan tanah (*swelling*). Biasa terjadi pada lempung dengan tingkat plastisitas tinggi dan *overconsolidated*. Proses terjadinya *swelling* sangat lama, dapat terjadi 10 hingga 20 tahun.
4. Cermin sesar (*slickensides*), menunjukkan bahwa lereng tersebut pernah bergeser dan biasanya terdapat di tanah lempung dengan plastisitas tinggi.
5. Dekomposisi. *Clay shale* dan batulempung merupakan batu yang terlihat keras, tetapi apabila terkena air akan mengalami *slaking* yang mengakibatkan menurunnya kekuatan tanah.
6. Rayapan (*creep*) dibawah beban yang terus bertambah.
7. Perubahan pada komposisi kimia.
8. *Strain softening* yang pada umumnya terjadi pada *soft clay* dan *sensitive clay*. Semakin bertambahnya deformasi maka tanah akan semakin lemah.
9. Pelapukan pada lereng batuan atau lereng tanah yang mengeras. Pelapukan menyebabkan timbulnya kekar-kekar yang menurunkan kekuatan lereng tersebut.

Lalu beberapa hal yang mengakibatkan meningkatnya tegangan geser pada lereng menurut Look (2007) adalah sebagai berikut:

1. Pembebanan pada bagian atas lereng. Penempatan tanah urugan dan konstruksi bangunan dengan pondasi dangkal pada mahkota lereng mengakibatkan bertambahnya beban bagian atas lereng.
2. Tekanan air pada retakan lereng atas. Apabila kemampuan tanah dalam meloloskan air termasuk lemah, maka tekanan pori akan mengalami kenaikan.
3. Peningkatan berat tanah yang disebabkan oleh perubahan kadar air. Perubahan ini biasa disebabkan oleh naiknya permukaan air tanah, infiltrasi, atau rembesan.
4. Melemahnya bagian bawah lereng. Hal ini dapat disebabkan oleh penggalian manusia atau erosi di dasar lereng.

5. Penurunan muka air tanah pada dasar lereng. Penurunan muka air tanah tiba-tiba (*rapid drawdown*) pada dasar lereng dapat mengakibatkan longsor.
6. Perubahan kemiringan lereng, dapat terjadi karena aktivitas manusia atau kejadian alam.

2.4 Beban Statis dan Beban Dinamis

Beban yang berpengaruh pada lereng terbagi atas beban internal, yaitu beban yang berasal dari tanah atau batuan sendiri seperti volume serta berat jenis tanah atau batuan tersebut. Sedangkan, beban eksternal merupakan beban tambahan yang dapat menambah potensi Bergeraknya lereng tersebut, terbagi atas beban statis dan beban dinamis.

a. Beban Statis

Beban statis merupakan beban yang berasal dari beban teknis seperti pondasi bangunan di atas lereng, bendungan, jembatan ataupun yang berasal dari alam yang cenderung tetap dan tidak berubah. Bowles (1997) mengemukakan, setiap beban teknis dan alami yang bekerja akan menghasilkan tegangan dan regangan di dalam massa tanah yang dapat berintegrasi pada zona tegangan yang ditinjau yang menyebabkan tanah berdeformasi.

b. Beban Dinamis

Beban dinamis merupakan beban yang intensitasnya berubah ubah menurut waktu, sehingga dapat dikatakan bahwa besarnya beban merupakan fungsi waktu. Beban dinamis lebih kompleks dari pada beban statis, baik jika ditinjau dari bentuk fungsi bebannya maupun akibat yang ditimbulkan. Pada lereng alam, beban dinamis lebih banyak dihasilkan oleh gempabumi. Gempabumi akan menghasilkan getaran, dimana getaran tersebut akan memutuskan hubungan antar butir partikel-partikel penyusun tanah dan mengakibatkan longsor (Pramumijoyo, 2007).

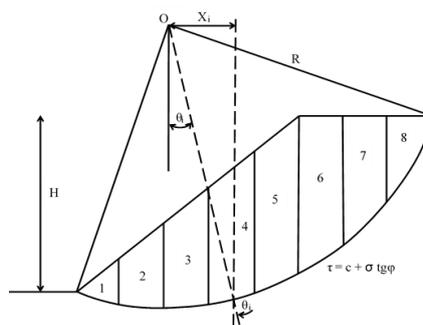
2.5 Konfigurasi Wenner-Schlumberger

Dari sekian banyak metode geofisika yang diterapkan dalam geolistrik, metode tahanan jenis adalah metode yang paling sering digunakan. Metode ini pada prinsipnya bekerja dengan menginjeksikan arus listrik ke dalam bumi melalui dua elektroda arus sehingga menimbulkan beda potensial. Beda potensial yang terjadi diukur melalui dua elektroda potensial (Reynold, 1997).

Konfigurasi *Wenner-Schlumberger* adalah konfigurasi dengan sistem aturan spasi yang konstan dengan catatan faktor “n” untuk konfigurasi ini adalah perbandingan jarak antara elektroda C1-P1 (atau C2-P2) dengan spasi antara P1-P2. Jika jarak antar elektroda potensial (P1 dan P2) adalah *a* maka jarak antar elektroda arus (C1 dan C2) adalah $2na + a$. Proses penentuan resistivitas menggunakan 4 buah elektroda yang diletakkan dalam sebuah garis lurus (Sakka, 2001).

2.6 Limit Equilibrium Method

Metode *limit equilibrium* ini juga disebut dengan metode irisan (*method of slice*) karena metode ini membagi massa tanah atau lereng menjadi beberapa irisan vertikal, lalu keseimbangan dari tiap irisan tersebut diperhatikan. Dapat dilihat pada Gambar 1 dimana lereng dibagi menjadi beberapa irisan vertikal sesuai dengan bidang longsornya. Pada gambar tersebut bidang longsor lereng berbentuk *circular*, maka dapat dianalisis menggunakan Metode Fellenius atau Metode Bishop Disederhanakan (*Simplified Bishop Method*). Untuk bidang longsor *non-circular* dapat dianalisis menggunakan Metode Janbu, dan Morgenstern and Price



Gambar 1: Lereng dengan irisan untuk *Limit Equilibrium Method*

2.7 Metode Morgenstern-Price

Metode Morgenstern-Price (Morgenstern & Price, 1965) dapat digunakan untuk semua bentuk bidang runtuh dan telah memenuhi semua kondisi kesetimbangan. Metode Morgenstern-Price menggunakan asumsi yang sama dengan metode kesetimbangan batas umum yaitu terdapat hubungan antara gaya geser antar-irisan dan gaya normal antar-irisan, yang dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$X = \lambda f(x) E \quad (1)$$

Dengan x = arah vertikal dari gaya yang bekerja pada irisan, E = arah horizontal dari gaya yang bekerja pada irisan, $f(x)$ = merupakan bentuk beberapa fungsi.

Perbedaan perhitungan metode Morgenstern-Price dengan metode kesetimbangan batas umum (metode Fellenius) adalah dalam metode kesetimbangan batas umum, perhitungan faktor keamanan dilakukan dengan menggunakan kesetimbangan gaya dalam arah horisontal dan kesetimbangan momen pada pusat gelinciran untuk semua irisan. Sementara metode Morgenstern-Price, kesetimbangan gaya vertikal juga diperhitungkan serta kesetimbangan momen dari tiap irisan. Kesetimbangan gaya dalam arah vertikal dinyatakan dalam persamaan:

$$(X_L - X_R) + N \cos a + S_m \sin a - W = 0 \quad (2)$$

Gaya geser antar-irisan pada sisi kiri dan kanan untuk setiap irisan dapat dinyatakan sebagai berikut:

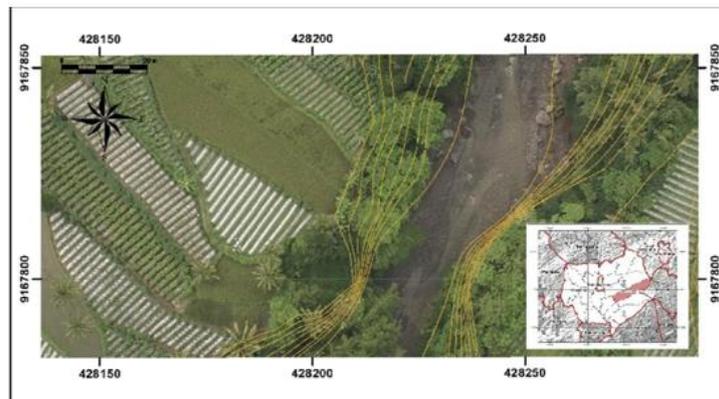
$$X_L = \lambda f(x_L) E_L \quad (3)$$

$$X_R = \lambda f(x_R) E_R \quad (4)$$

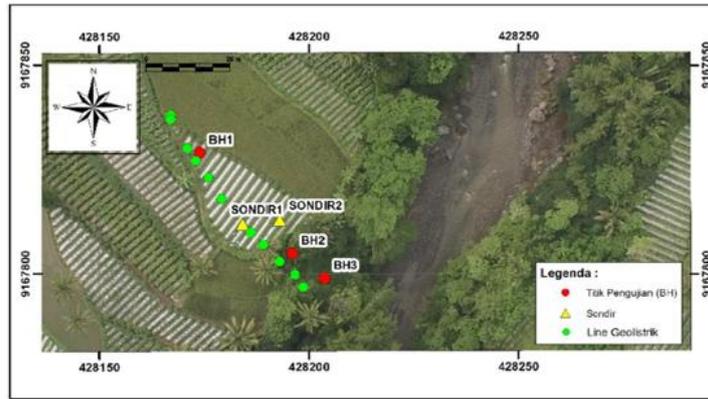
3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian dan Data

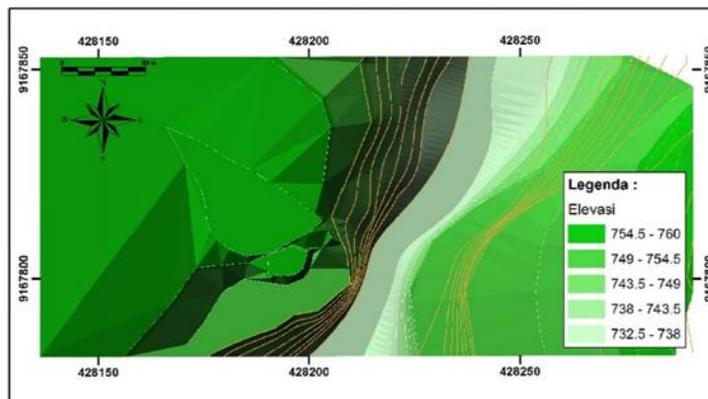
Lokasi awal berdirinya Candi Lumbung Sengi adalah di Dusun Sengi, Desa Krogowan, Kecamatan Sawangan, Kabupaten Magelang (Gambar 2) dan pengujian properties tanah dilakukan di Laboratorium Geoteknik dan Mekanika Tanah, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Data lapisan tanah penyusun diambil dari lima titik di lapangan yang dapat dilihat pada Gambar 3. Dua titik menggunakan metode *Cone Penetration Test* (CPT) berjarak kurang lebih 1 meter dan tiga titik untuk pengeboran menggunakan *Hand Auger Boring* serta metode Geolistrik tahanan jenis dengan menggunakan konfigurasi *Wenner-Schlumberger* untuk mengetahui pola perlapisan bawah tanah. Peta topografi yang didapatkan dari pengelola candi, kemudian diolah menggunakan software Arcgis agar menjadi DEM (*Digital Elevation Model*) (Gambar 4). Data yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1 berikut.



Gambar 2: Peta Lokasi Penelitian



Gambar 3: Peta titik investigasi lapangan



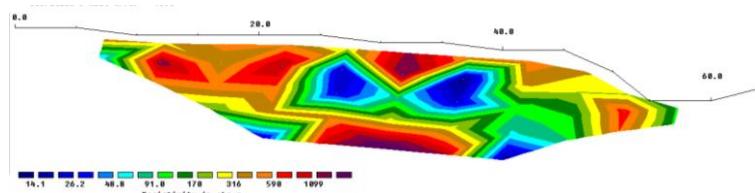
Gambar 4: Peta topografi yang telah menjadi DEM (*Digital Elevation Model*)

Tabel 1: Sumber data penelitian.

Data	Tipe	Sumber
1. Data Sondir (CPT)	Primer	Personal
2. Data bor tangan	Primer	Personal
3. Data geolistrik	Primer	Personal
4. Properti tanah	Primer	Personal
5. Peta topografi	Sekunder	Pengelola candi (BPCB)
6. Dokumentasi	Primer	Personal

3.2 Data Hasil Pengujian Geolistrik

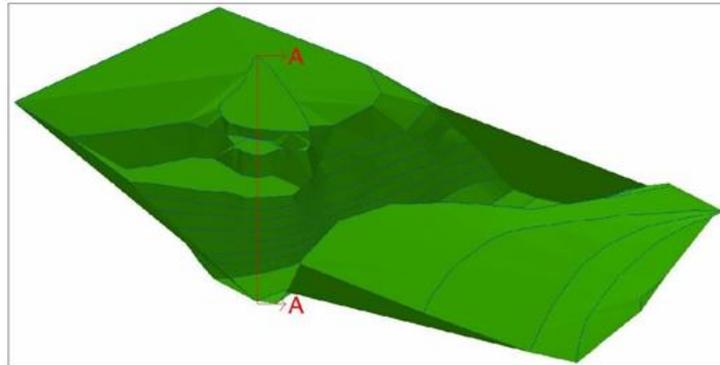
Pengujian geolistrik dilakukan dengan panjang *line* pengujian sebesar 70 m. Alat geolistrik diletakkan di tengah, kemudian patok besi dan patok tembaga disambungkan dengan kabel sepanjang kurang lebih 100 m. Konfigurasi yang digunakan pada penelitian ini adalah *Wenner-Schlumberger*. Hasil dari pengujian geolistrik dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5: Hasil pengujian geolistrik 2D

3.3 Data Hasil Pengolahan Digital Elevation Model (DEM)

Dengan menggunakan software Arcgis, peta topografi yang didapatkan dari pengelola dapat dirubah menjadi bentuk 3D. Dari bentuk 3D tersebut lalu ditentukan potongan melintang lereng yang akan ditinjau. Gambar 6 menunjukkan hasil pengolahan DEM dari software Arcgis berupa bentuk 3D.



Gambar 6: Hasil pengolahan DEM menjadi bentuk 3d

3.4 Data Hasil Pengujian Properties Tanah

Setelah tahap pengambilan sampel di lapangan, kemudian dilakukan pengujian sampel di Laboratorium Geoteknik dan Mekanika Tanah, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada untuk mengetahui sifat fisik dan mekanik dari tanah di lokasi penelitian. Pengujian yang dilakukan antara lain adalah pengujian sifat fisik, yang terdiri dari pengujian kadar air, pengujian untuk menentukan *Spesific Gravity* dan berat volume (γ), serta pengujian distribusi ukuran butir (*grain size test*). Pengujian untuk menentukan phi (ϕ) dan kohesi (c) dari tanah lapangan menggunakan uji geser langsung (*direct shear test*). Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2: Hasil pengolahan data laboratorium

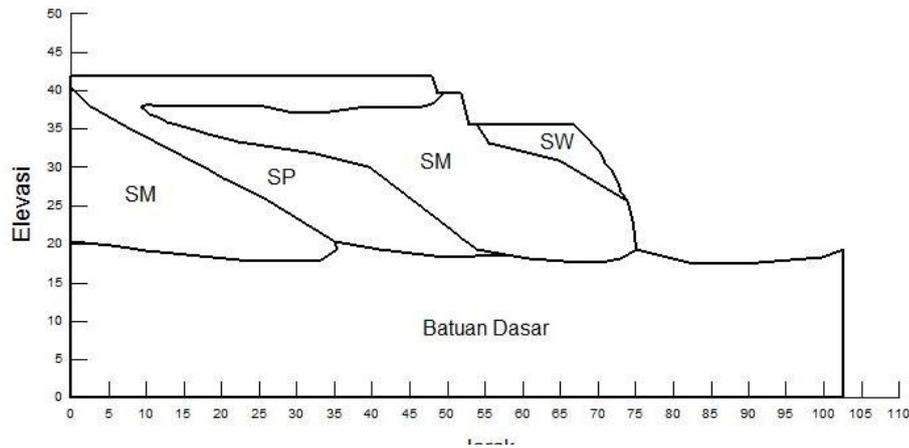
No.	Pengujian	BH 1	BH 2	BH 3
1	Berat Jenis, Gs	2.69	2.70	2.70
2	Kadar Air, w (%)	31.02	31.52	33.23
3	Berat Volume Basah, γ_b (gr/cm ³)	1.76	1.90	1.52
4	Berat Volume Kering, γ_d (gr/cm ³)	1.34	1.44	1.14
5	Analisa Ukuran Butiran			
	(%) Gravel	5.81	0.33	2.66
	(%) Pasir	73.83	71.63	74.13
	(%) Lanau/Lempung	20.36	28.04	22.21
6	Uji Geser Langsung			
	Sudut gesek dalam, ϕ (°.°)	44	49.71	44.13
	Kohesi, c (kg/cm ²)	0.1	0.163	0.03
7	Kedalaman pengambilan sampel (m)	1 - 1.5	2-2.5	5.5-6

Dengan menggunakan sistem klasifikasi *Unified* (Hardiyatmo, 2012), diketahui bahwa jenis tanah BH 1 merupakan SP yaitu pasir bergradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus. Jenis tanah untuk BH 2 merupakan SM yaitu pasir berlanau dan jenis tanah untuk BH 3 merupakan SW yaitu pasir bergradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.

3.5 Pemodelan Dengan SLOPE/W

a. Tahap pemodelan

Dari data-data yang diperoleh dari beberapa tahap penelitian, kemudian dilakukan pemodelan dengan menggunakan SLOPE/W. SLOPE/W sendiri merupakan *software* dengan dasar perhitungan menggunakan *Limit Equilibrium Method* dengan hasil akhir berupa faktor keamanan. Pada penelitian ini, tipe analisis yang digunakan adalah metode Morgenstern-Price, dimana metode ini merupakan metode yang lebih teliti dari metode lainnya karena mempertimbangkan pengaruh *force* dan moment dari lereng yang ditinjau serta memperhitungkan juga *interslice shear force*. Berdasarkan hasil dari pengujian geolistrik serta hasil dari pengolahan DEM, maka bentuk penampang dari potongan A-A yang akan dimodelkan pada SLOPE/W adalah seperti Gambar 7.



Gambar 7: Model penampang potongan A-A

b. Parameter input pemodelan

Untuk parameter input pemodelan pada SLOPE/W, dapat dilihat pada Tabel 3. Asumsi batuan dasar yang terletak di dasar permodelan merupakan hasil dari pengamatan di lapangan yang menunjukkan lapisan tanah keras yang menjadi dasar sungai.

Tabel 3: Parameter input pemodelan

Jenis Lapisan	Material Model	Parameter		
		Berat Jenis, γ (kN/m ²)	Kohesi, c (kPa)	Sudut Geser, ϕ (^o)
SP	Mohr Coulomb	17,3	10	44
SM	Mohr Coulomb	18,6	16,3	49,71
SW	Mohr Coulomb	15	3	44,1
Batuan Dasar	Bedrock		Impenetrable	

c. Beban dinamis dan air sungai tinggi

Terdapat beberapa pemodelan yang akan dianalisis pada SLOPE/W, dan pada setiap model akan dimasukkan beban dinamis berupa *seismic load* berkekuatan sebesar 0,15g dan kondisi air sungai tinggi. Hal ini perlu dilakukan untuk mengetahui berapa penurunan faktor keamanan dari lokasi penempatan candi ketika lereng mengalami kedua kondisi tersebut.

4. HASIL DAN DISKUSI

Empat pemodelan yang digunakan pada penelitian ini adalah pemodelan lereng di lapangan, pemodelan lereng dengan beban candi di tempat awal, pemodelan lereng dengan beban candi di tempat baru dan pemodelan lereng dengan pelandaian 45°. Bowles (1984) mengusulkan faktor keamanan lereng untuk material tanah. Untuk faktor keamanan (SF) dengan beberapa gerakan massa yang diusulkan oleh Bowles dapat dilihat pada Tabel 4. Untuk perencanaan, maka digunakan rancangan faktor keamaan yang telah di tetapkan oleh Indonesia dalam SNI 03-1962-1990 tentang Tata Cara Penanggulangan Longsor yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 4: Bowles Safety Factor

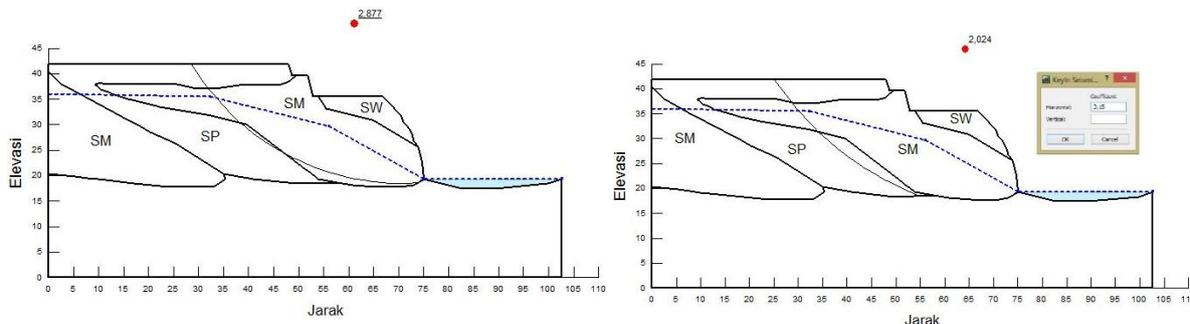
Safety Factor (SF)	Landslide Intensity
<1,07	Usually occur
1,07 ≤ SF ≤ 1,25	Once occur
>1,25	Rarely occur

Tabel 5: Safety Factor dari SNI 03-1962-1990

Resiko	Kondisi Beban	Shear Strength Parameter			
		Maximum		Residual	
		Yakin	Tidak Yakin	Yakin	Tidak Yakin
Tinggi	Gempa	1,50	1,75	1,35	1,50
	Tanpa Gempa	1,80	2,00	1,60	1,80
Sedang	Gempa	1,30	1,60	1,20	1,40
	Tanpa Gempa	1,50	1,80	1,35	1,50
Rendah	Gempa	1,10	1,25	1,00	1,10
	Tanpa Gempa	1,25	1,40	1,10	1,20

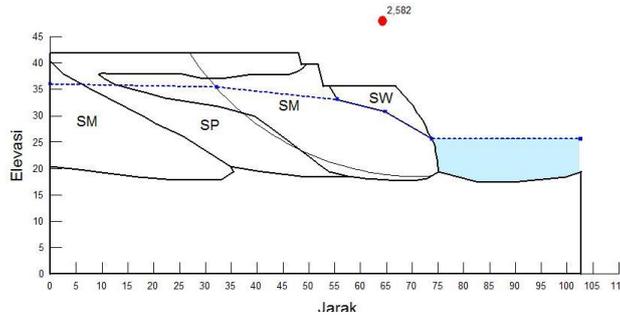
4.1 Pemodelan lereng di lapangan

Kondisi lereng di lapangan perlu ditinjau untuk mengetahui bagaimana keadaan lereng pasca banjir lahar dingin yang ditunjukkan oleh faktor keamaan. Untuk pemodelan kondisi lereng di lapangan dapat dilihat pada Gambar 8a, untuk faktor keamaan setelah diberi beban dinamis dan kondisi air tinggi dapat dilihat pada Gambar 8b dan Gambar 8c.



(a)

(b)



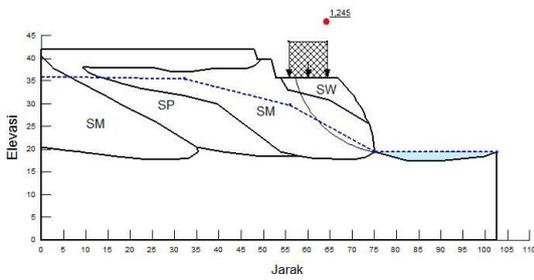
(c)

Gambar 8: (a) Pemodelan lereng di lapangan, (b) Pemodelan lereng di lapangan dengan beban gempa dan (c) Pemodelan lereng di lapangan dengan kondisi air tinggi

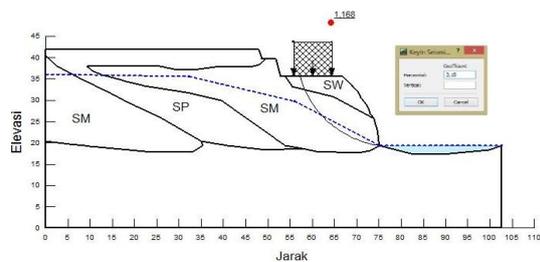
Faktor keamanan untuk pemodelan kondisi lereng lapangan tanpa beban gempa dan kondisi air tinggi adalah 2,877 dimana angka tersebut menunjukkan bahwa lereng sangat aman. Faktor keamanan ketika kondisi lereng mengalami kenaikan air, jauh lebih tinggi daripada ketika lereng diberi beban gempa, hal ini menunjukkan bahwa model lereng lapangan lebih kuat untuk menerima kondisi ketika air tinggi daripada menerima kondisi beban dinamis.

4.2 Pemodelan lereng dengan beban candi di tempat awal

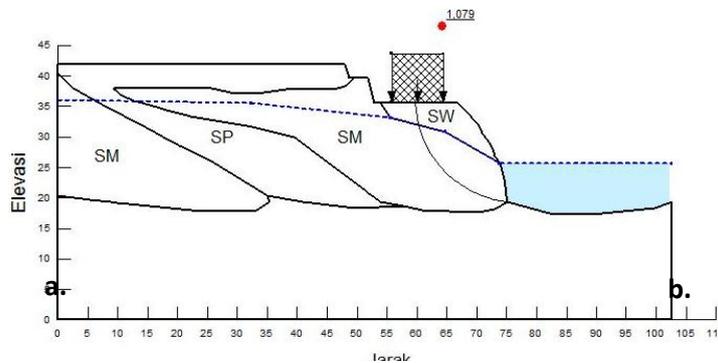
Pemodelan ini dilakukan untuk mengetahui apakah candi masih bisa diletakkan kembali di tempat asalnya tanpa diberikan stabilisasi. Gambar 9a menunjukkan pemodelan lereng tanpa beban dinamis dan kondisi air tinggi, sedangkan Gambar 9b dan Gambar 9c menunjukkan pemodelan lereng dengan beban dinamis dan kondisi air tinggi.



(a)



(b)



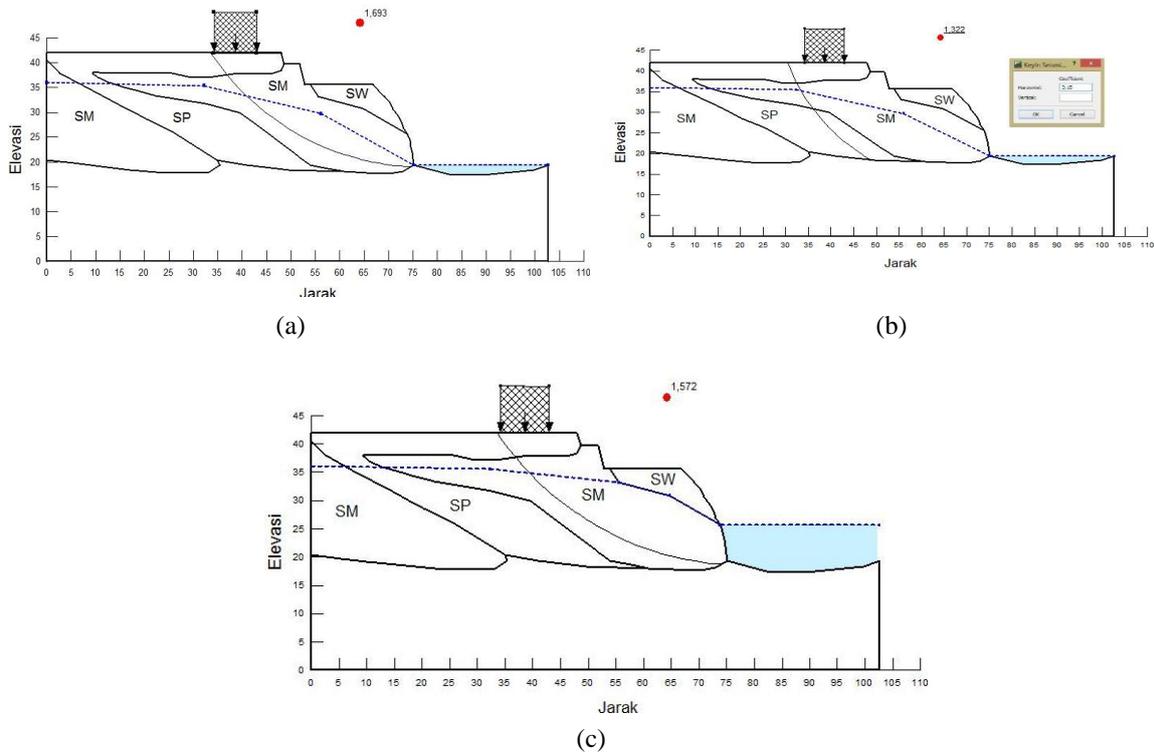
(c)

Gambar 9: (a) Pemodelan lereng dengan beban candi di tempat awal, (b) Pemodelan lereng dengan beban candi di tempat awal dengan beban gempa dan (c) Pemodelan lereng dengan beban candi di tempat awal dengan kondisi air tinggi

Faktor keamanan yang dihasilkan dari pemodelan ini berturut turut sebesar 1,245; 1,168 dan 1,079. Angka tersebut telah memenuhi kriteria faktor keamanan dari Bowles, tapi sangat rawan sebagai dasar perencanaan mengingat bahwa bangunan di atas lereng merupakan warisan budaya yang sangat penting. Untuk memberikan perkuatan pun akan sangat mahal, melihat faktor keamanan lereng hanya 1,079 ketika air sungai tinggi. Muncul solusi untuk menempatkan candi pada tempat baru yang telah dibebaskan oleh pengelola (BPCB).

4.3 Pemodelan lereng dengan beban candi di tempat baru

Candi yang diletakkan di tempat awal rawan mengalami longsor, oleh sebab itu candi harus dipindah ke tempat baru. Candi di tempatkan 5 m dari ujung lereng agar faktor keamanan meningkat dan pembebanan terjadi di mahkota lereng. Pemodelan dapat dilihat pada Gambar 10a, Gambar 10b dan Gambar 10c.



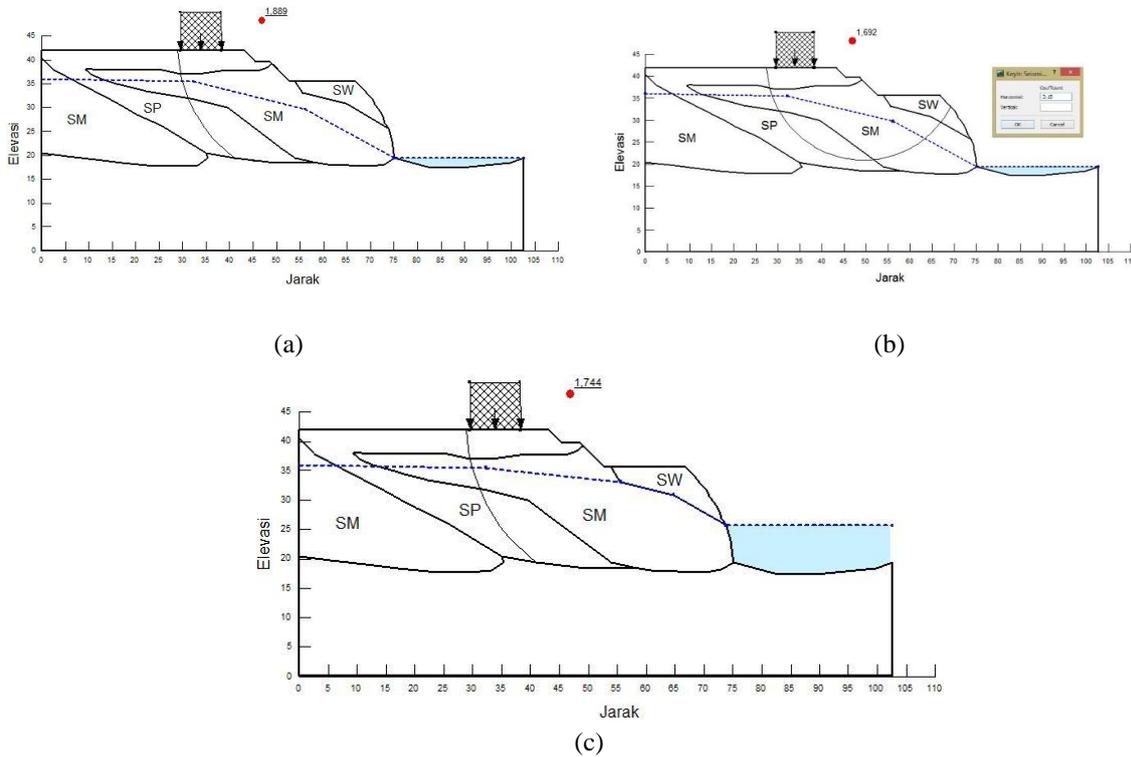
Gambar 10: (a) Pemodelan lereng dengan beban candi di tempat baru, (b) Pemodelan lereng dengan beban candi di tempat baru dengan beban gempa dan (c) Pemodelan lereng dengan beban candi di tempat baru dengan kondisi air tinggi

Model ini memberikan gambaran peningkatan faktor keamanan dari lereng ketika candi tidak berada di bawah. Faktor keamanan tanpa ada beban dinamis dan kondisi air biasa naik sebesar 0,448 dari 1,245 menjadi 1,693. Faktor keamanan ketika kondisi diberi beban gempa dan kondisi ketika air tinggi pun meningkat tetapi masih belum memenuhi faktor keamanan dari SNI yang tinggi yaitu sekitar 1,8 karena resiko yang dimiliki lereng ini pun termasuk kategori tinggi. Tingginya kriteria faktor keamanan yang harus dipenuhi, memunculkan solusi untuk melandaikan lereng atas, dari 72° menjadi 45° agar faktor keamanan dapat meningkat.

4.4 Pemodelan lereng dengan pelandaian sebesar 45°

Salah satu teknik untuk meningkatkan faktor keamanan adalah dengan melandaikan lereng, dan diharapkan dengan cara ini gaya pendorong dari lereng akan berkurang lalu menaikkan faktor keamanan. Pemodelan dapat dilihat pada Gambar 11a, Gambar 11b dan Gambar 11c. Pelandaian lereng menjadi 45° ternyata memberikan peningkatan yang signifikan terhadap faktor keamanan dari model ini. Peningkatan dari 1,693 ke 1,889 memberikan gambaran bahwa pengurangan gaya pendorong dari lereng telah berhasil dilakukan tanpa ada perkuatan apapun. Model ini dapat memenuhi kriteria faktor

keamanan dari SNI 03-1962-1990, dalam keadaan terkena gempa maupun tidak terkena gempa. Untuk kondisi air tinggi, faktor keamanan yang didapat adalah sebesar 1,744, hanya terpaut 0,036 dari kriteria SNI 03-1962-1990. Angka 0,036 tidak terlalu besar mengingat jenis tanah lereng merupakan tanah pasir dimana tanah pasir bersifat *drained material* yang memiliki permeabilitas tinggi dan kemungkinan untuk *rapid drawdown* sangat kecil. Rangkuman hasil analisa berupa faktor keamanan untuk semua pemodelan dapat dilihat pada Tabel 6.



Gambar 10: (a) Pemodelan lereng dengan pelandaian 45°, (b) Pemodelan lereng dengan pelandaian 45° dengan beban gempa dan (c).Pemodelan lereng dengan pelandaian 45° dengan kondisi air tinggi

Tabel 6: Rangkuman hasil analisa pemodelan lereng

Model	Kondisi	Faktor Keamanan	Kriteria		
			Bowles (1977)	SNI 03-1962-1990	
Lereng kondisi di lapangan	Awal	2,877	Memenuhi	Memenuhi	-
	Beban dinamis (0,15g)	2,024	-	-	Memenuhi
	Kondisi air tinggi	2,582	Memenuhi	Memenuhi	-
Lereng dengan beban candi di tempat awal	Awal	1,245	Memenuhi	Tidak Memenuhi	-
	Beban dinamis (0,15g)	1,168	-	-	Tidak Memenuhi
	Kondisi air tinggi	1,079	Tidak Memenuhi	Tidak Memenuhi	-
Lereng dengan beban candi di tempat baru	Awal	1,693	Memenuhi	Tidak Memenuhi	-
	Beban dinamis (0,15g)	1,322	-	-	Tidak Memenuhi
	Kondisi air tinggi	1,572	Memenuhi	Tidak Memenuhi	-

Lereng dengan pelandaian 45°	Awal	1,889	Memenuhi	Memenuhi	-
	Beban dinamis (0,15g)	1,692	-	-	Memenuhi
	Kondisi air tinggi	1,744	Memenuhi	Tidak Memenuhi	-

5. KESIMPULAN

Setelah melakukan simulasi beberapa pemodelan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai yaitu Candi Lumbung Sengi layak untuk dipindahkan ke lokasi awal dengan tempat yang baru, yaitu tempat yang telah dibebaskan oleh pengelola (BPCB) dengan melandaikan lereng atas sebesar 45°. Faktor keamanan hasil dari simulasi beberapa pemodelan, yang dapat memenuhi kriteria SNI 03-1962-1990 hanyalah pemodelan lereng dengan pelandaian 45°. Ini menunjukkan bahwa tempat awal Candi Lumbung Sengi berdiri sudah tidak aman atau dapat dikatakan rawan longsor. Pelandaian lereng sebesar 45° menjadi solusi untuk menaikkan faktor keamanan lereng yang telah diberi beban candi. Metode ini selain murah, juga tidak membutuhkan banyak ruang untuk melakukannya. Dampak sekunder dari gempa untuk tanah pasir yaitu likuifaksi. Perlu penelitian lebih lanjut untuk menganalisa potensi likuifaksi yang dapat terjadi di daerah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J.E. (1984). *Physical and Geotechnical Properties of Soils, 2nd edition*. New York: McGraw-Hill Inc.
- Bowles, J.E. (1997). *Analisis dan Desain Fondasi I, Edisi Keempat*. Jakarta: Erlangga.
- Hardiyatmo, H.C. (2012). *Tanah Longsor dan Erosi-Kejadian dan Penanganan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Look, B. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Table*. UK: Taylor and Francis Group, London.
- Morgenstern, N.R., and Price, V.E. (1965). *The Analysis of The Stability of General Slip Surfaces*. Geotechnique, Vol.15.
- Pramumijoyo, S. (2007). *Surface Cracking due to Yogyakarta Earthquake 2006*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Reynolds, J.M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons, England.
- Sakka. (2001). *Metode Geolistrik Tahanan Jenis*. Makassar: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice, 3 rd. Ed*. John Wiley and Sons, New York.