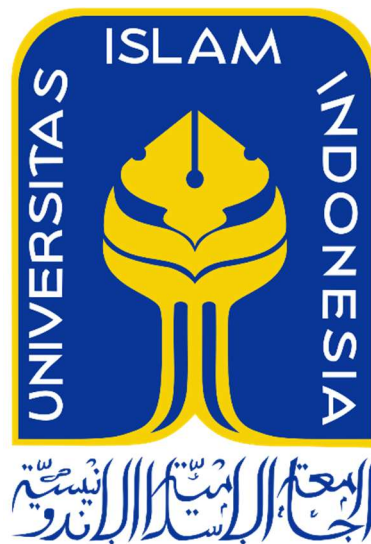


TUGAS AKHIR

**ANALISIS PERKUATAN LERENG AREA SITUS
CANDI DAWANGSARI
(ANALYSIS OF SLOPE REINFORCEMENT IN
DAWANGSARI TEMPLE SITE AREA)**

**Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



BAYU TRI JANANTO

20511073

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

2025

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PERKUATAN LERENG AREA SITUS
CANDI DAWANGSARI
(ANALYSIS OF SLOPE REINFORCEMENT IN
DAWANGSARI TEMPLE SITE AREA)**

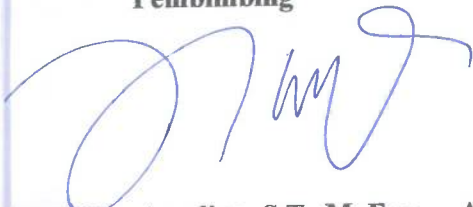
Disusun oleh

Bayu Tri Jananto
20511073

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 23 September 2025
Oleh Dewan Penguji:

Pembimbing



Anisa Nur Amalina, S.T., M. Eng.
NIK: 215111305

Penguji I



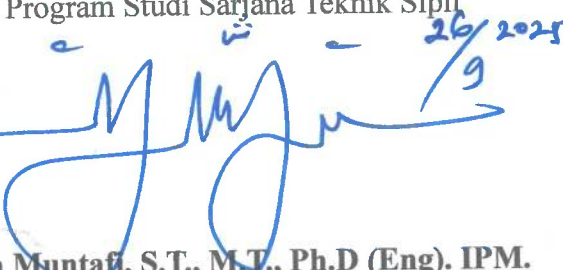
Astriana Hardawati, S.T., M. Eng.
NIK: 16111301

Penguji II



Dr. Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T.
NIK: 045110407

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Sarjana Teknik Sipil



26/9/2025

Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D (Eng). IPM.
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, September 2025

Yang membuat pernyataan,



Bayu Iri Jananto
(20511073)

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Segala puji dan syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan dan karunia-Nya sehingga Tugas Akhir dengan judul “Perkuatan Lereng Area Situs Candi Dawangsari” dapat terselesaikan. Tugas Akhir ini disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan kelulusan sarjana Teknik Sipil strata I Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Penulis menyadari adanya kekurangan pada penulisan tugas akhir ini, karena terbatasnya kemampuan penyusun, baik berupa kemampuan ilmu dan wawasan serta kemampuan menuangkan ide kedalam bentuk tulisan sehingga tulisan ini mungkin masih jauh dari kata sempurna.

Selama proses penyusunan tugas akhir dapat berjalan lancar berkat bantuan dari berbagai pihak. Atas bantuan tersebut diucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi – tingginya kepada:

1. Dosen Pembimbing I Ibu Anisa Nur Amalina, S.T., M.Eng. selaku, yang telah memberikan bimbingan dukungan dan pengarahan selama penyelesaian tugas akhir ini,
2. Ibu Astriana Hardawati, S.T., M.Eng. selaku Penguji 1 yang telah memberikan masukan, saran, dan motivasi kepada penulis
3. Ibu Dr. Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T. selaku Penguji 2 yang telah memberikan masukan, saran, dan motivasi kepada penulis
4. Ketua Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Ibu Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.
5. Orangtua yang telah memberi dukungan dan doa selama proses penyusunan Tugas Akhir ini,
6. Rekan - rekan dan semua pihak yang telah ikut membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini terutama Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah X yang telah membantu dengan memberikan data penelitian.

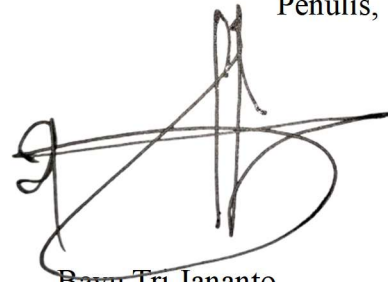
Penyusun menyadari bahwa penelitian yang sekaligus Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna dan masih banyak kekurangan dikarenakan keterbatasan penyusun baik secara keilmuan maupun secara pengalaman penelitian. Oleh karena itu, penyusun menerima segala kritik, saran, ataupun komentar yang membangun sehingga hasil penelitian ini menjadi lebih baik lagi.

Akhirnya, semoga tugas akhir ini dapat memberikan kontribusi dan informasi keilmuan bagi pengembangan ilmu pengetahuan khususnya dan bermanfaat bagi semua pihak. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan bagi semua pihak yang dengan Ikhlas membantu, membimbing dan mengarahkan hingga selesainya penelitian.

Wassalamualaikum Wr.Wb.

Yogyakarta, September 2025

Penulis,

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'B' followed by a vertical line and a horizontal stroke that loops back to the left.

Bayu Tri Jananto
20511073

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xiv
ABSTRAK	xvi
<i>ABSTRACT</i>	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian	4
1.6 Lokasi Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tinjauan Umum	5
2.2 Perkuatan Tanah Metode Dinding Penahan Tanah	5
2.3 Perkuatan Tanah Metode <i>Sheet Pile</i>	6
2.4 Pemodelan <i>Software Plaxis</i> Lereng	7
2.5 Penelitian Terdahulu	8
2.6 Persamaan dan Perbedaan Dengan Penelitian Terdahulu	12
BAB III LANDASAN TEORI	13
3.1 Lereng	13
3.2 Stabilitas Lereng Tanpa Perkuatan	15
3.2.1 Model Keruntuhan Tanah	15
3.3 Dinding Penahan Tanah	16

3.4	<i>Sheet Pile</i>	17
3.5	Tekanan Lateral Tanah	18
3.6	Tanah	23
3.6.1	Klasifikasi Tanah	24
3.6.2	Parameter Tanah	27
3.7	Metode <i>Fellenius</i>	36
3.8	Kriteria Faktor Keamanan	38
3.9	Plaxis Versi 20	39
BAB IV METODE PENELITIAN		44
4.1	Tinjauan Umum	44
4.2	Data Penelitian	44
4.3	Tahapan Penelitian	44
4.4	Bagan Alir	45
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN		47
5.1	Gambaran Umum	47
5.2	Parameter Penelitian	47
5.2.1	Pengujian Lapangan (<i>Hand Boring</i>)	48
5.2.2	Muka Air Tanah	49
5.2.3	Pengujian Laboratorium	50
5.2.4	Beban Stupa Dawangsari	51
5.2.5	Beban Gempa	55
5.3	Analisis Stabilitas Lereng Asli	56
5.3.1	Analisis Lereng Asli Dengan Program <i>Plaxis V20</i>	58
5.3.2	Pembuatan Jaring Elemen Lereng Asli Dengan Program <i>Plaxis V20</i>	59
5.3.3	Tahap Perhitungan Lereng Asli Dengan Program <i>Plaxis V20</i>	59
5.3.4	Hasil Output Program Lereng Asli Dengan Program <i>Plaxis V20</i>	60
5.3.5	Analisis Lereng Asli Menggunakan Perhitungan Manual Metode <i>Fellenius</i>	66
5.4	Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan Dinding Penahan Tanah	73
5.4.1	Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan Dinding Penahan Tanah Dengan Perhitungan Manual	73

5.4.2 Data Material Dinding Penahan Tanah Kantilever	81
5.4.3 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan Dinding Penahan Tanah Dengan Program Plaxis V20	81
5.4.4 Tahap Perhitungan Stabilitas Lereng Perkuatan Dinding Penahan Tanah Menggunakan Program Plaxis V20	82
5.4.5 Hasil Output Program Plaxis Lereng Perkuatan Dinding Penahan Tanah	82
5.5 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i>	89
5.5.1 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i> Menggunakan Perhitungan Manual	89
5.5.2 Spesifikasi Material <i>Sheet Pile</i>	96
5.5.3 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i> Menggunakan Perhitungan Program Plaxis V20	98
5.5.4 Pembuatan Jaring Elemen Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i>	99
5.5.5 Tahap Perhitungan Stabilitas Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i> Menggunakan Perhitungan Program Plaxis V20	99
5.5.6 Hasil Output Plaxis Perkuatan <i>Sheet Pile</i>	100
5.6 Pembahasan	106
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	111
6.1 Kesimpulan	111
6.2 Saran	111
DAFTAR PUSTAKA	112
LAMPIRAN	112

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Perbedaan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Sekarang	9
Tabel 2. 2	Lanjutan Tabel Perbedaan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Sekarang	10
Tabel 2. 3	Lanjutan Tabel Perbedaan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Sekarang	11
Tabel 3. 1	Klasifikasi Kemiringan Lereng	13
Tabel 3. 2	Sistem Klasifikasi USCS	26
Tabel 3. 3	Sistem Klasifikasi AASTHO	27
Tabel 3. 4	Berat Jenis Tanah	30
Tabel 3. 5	Nilai Perkiraan Permeabilitas Tanah	31
Tabel 3. 6	Nilai Modulus Elastisitas Tanah	31
Tabel 3. 7	Nilai Kisaran Poisson Ratio Tanah	33
Tabel 3. 8	Hubungan Sudut Geser Dalam dan Jenis Tanah	33
Tabel 3. 9	Kriteria Faktor Keamanan	39
Tabel 5. 1	Hasil Pengujian Hand Boring BH-1	49
Tabel 5. 2	Hasil Pengujian Laboratorium Tanah	50
Tabel 5. 3	Koefisien Situs FPGA	55
Tabel 5. 4	Tabel Rekapitulasi Perhitungan Lereng Asl Dengan Metode Fellenius	69
Tabel 5. 5	Lanjutan Tabel Rekapitulasi Perhitungan Lereng Asli Dengan Metode Fellenius	70
Tabel 5. 6	Lanjutan Tabel Rekapitulasi Perhitungan Lereng Asli Dengan Metode Fellenius	71
Tabel 5.7	Preliminary Design Dinding Penahan Tanah	74
Tabel 5.8	Rekapitulasi Perhitungan Berat Dan Momen DPT	78
Tabel 5.9	Perbandingan Angka Keamanan Dan Penurunan Lereng Asli dan Perkuatan	110

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1	Lokasi Penelitian Candi Dawangsari	2
Gambar 3. 1	Tipe-tipe Gerakan Massa Lereng	16
Gambar 3. 2	Dimensi Tipikal Dinding Penahan Tanah	17
Gambar 3. 3	Tanah Lateral Saat Diam	19
Gambar 3. 4	Tekanan Tanah Lateral Aktif	20
Gambar 3. 5	Tekanan Tanah Lateral Pasif	21
Gambar 3. 6	Tekanan Tanah Lateral Akibat Beban Merata q	23
Gambar 3. 7	Diagram Fase Tanah	28
Gambar 3. 8	Korelasi Kohesi dan N-SPT	34
Gambar 3. 9	Gaya-Gaya Yang Bekerja Pada Irisan	36
Gambar 3. 10	Titik Nodal dan Titik Tegangan	40
Gambar 3. 11	Pengaturan Global Lembar Tab Proyek	42
Gambar 3. 12	Pengaturan Global Lembar Tab Dimensi	42
Gambar 3. 13	Jendela Utama Program Masukan	43
Gambar 4.1	Bagan Alir Penelitian	45
Gambar 4. 2	Bagan Alir Penelitian	46
Gambar 5.1	Denah Area Uji Candi Dawangsari	48
Gambar 5.2	Rencana Rekonstruksi Stupa Dawangsari	51
Gambar 5.3	Desain Spektra Indonesia	56
Gambar 5.4	Garis Elevasi	56
Gambar 5.5	Pengukuran Lapangan Elevasi Lereng: (a) Titik Terbawah Elevasi Lereng (b) Titik Teratas Elevasi Lereng	57
Gambar 5.6	Detail Potongan Lereng Rencana Pasca Pugar	58
Gambar 5.7	Rencana Pemodelan Plaxis Lereng Asli	58
Gambar 5.8	Pemodelan Lereng Asli Dengan Program Plaxis	59
Gambar 5.9	Meshing Lereng Asli Dalam Program Plaxis	59
Gambar 5.10	Perhitungan Tegangan Awal Dalam Plaxis	60

Gambar 5.11	Deformed Mesh Lereng Asli Tanpa Beban Gempa	61
Gambar 5.12	Pergerakan Lereng Asli Tanpa Beban Gempa	61
Gambar 5. 13	Daerah Potensi Longsor Lereng Asli Tanpa Beban Gempa	61
Gambar 5.14	Arah Penurunan Lereng Asli Tanpa Beban Gempa	62
Gambar 5.15	Daerah Penurunan Lereng Asli Tanpa Beban Gempa	62
Gambar 5.16	Nilai Safety Factor Lereng Asli Tanpa Beban Gempa	63
Gambar 5.17	Deformed Mesh Lereng Asli Dengan Beban Gempa	63
Gambar 5.18	Arah Peregerakan Lereng Asli Dengan Beban Gempa	64
Gambar 5.19	Daerah Potensi Longsor Lereng Asli Dengan Beban Gempa	64
Gambar 5.20	Arah Penurunan Lereng Asli Dengan Beban Gempa	65
Gambar 5.21	Daerah Penurunan Lereng Asli Dengan Beban Gempa	65
Gambar 5.22	Nilai Safety Factor Lereng Asli Dengan Beban Gempa	66
Gambar 5.23	Irisan Daerah Keruntuhan Lereng	66
Gambar 5.24	Diagram Tekanan Tanah Lateral DPT	75
Gambar 5.25	Area Perhitungan Berat Dan Momen DPT	77
Gambar 5. 26	Pemodelan Lereng Perkuatan DPT	81
Gambar 5. 27	Perhitungan Tegangan Awal Lereng Dengan Perkuatan DPT	82
Gambar 5. 28	Deformed Mesh Lereng Dengan Perkuatan DPT Tanpa Beban Gempa	83
Gambar 5. 29	Arah Pergerakan Lereng Dengan Perkuatan DPT Tanpa Beban Gempa	84
Gambar 5. 30	Daerah Potensial Longsor Lereng Dengan Perkuatan DPT Tanpa Beban Gempa	84
Gambar 5. 31	Arah Penurunan Lereng Dengan Perkuatan DPT Tanpa Beban Gempa	85
Gambar 5. 32	Daerah Penurunan Lereng Dengan Perkuatan DPT Tanpa Beban Gempa	85
Gambar 5. 33	Angka Aman Lereng Dengan Perkuatan DPT Tanpa Beban Gempa	86
Gambar 5. 34	Deformed Mesh Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa	86
Gambar 5. 35	Arah Pergerakan Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa	87

Gambar 5. 36 Daerah Penurunan Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa	87
Gambar 5. 37 Arah Penurunan Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa	88
Gambar 5. 38 Daerah Penurunan Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa	88
Gambar 5. 39 Angka Aman Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa	89
Gambar 5. 40 Diagram Gaya Lateral Tanah Perkuatan <i>Sheet Pile</i>	90
Gambar 5. 41 Nilai Momen Maksimum Sheet Pile Pada Program Plaxis	96
Gambar 5. 42 Spesifikasi Material CCSP	97
Gambar 5. 43 Ilustrasi Dimensi CCSP	97
Gambar 5. 44 Detail Dimensi Produk CCSP	98
Gambar 5.45 Pemodelan Lereng Perkuatan <i>Sheetpile</i>	99
Gambar 5. 46 Meshing Lereng Dengan Perkuatan <i>Sheet Pile</i>	99
Gambar 5.47 Perhitungan Tegangan Awal Lereng Dengan Perkuatan <i>Sheet Pile</i>	100
Gambar 5. 48 Deformed Mesh Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i> Tanpa Beban Gempa	101
Gambar 5. 49 Pergerakan Lereng Perkuatan Sheet Pile Tanpa Beban Gempa	101
Gambar 5. 50 Daerah Potensi Longsor Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i> Tanpa Beban Gempa	101
Gambar 5. 51 Arah Penurunan Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i> Tanpa Beban Gempa	102
Gambar 5. 52 Daerah Penurunan Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i> Tanpa Beban Gempa	102
Gambar 5. 53 Nilai Safety Factor Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i> Tanpa Beban Gempa	103
Gambar 5. 54 Deformed Mesh Lereng Asli Dengan Beban Gempa	103
Gambar 5. 55 Arah Pergerakan Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i> Dengan Beban Gempa	104
Gambar 5. 56 Daerah Potensi Longsor Lereng Perkuatan <i>Sheet Pile</i> Dengan Beban Gempa	104

Gambar 5. 57	Arah Penurunan Lereng Perkuatan Sheet Pile Dengan Beban Gempa	105
Gambar 5. 58	Daerah Penurunan Lereng Perkuatan Sheet Pile Dengan Beban Gempa	105
Gambar 5.59	Nilai Safety Factor Lereng Perkuatan Sheet Pile Dengan Beban Gempa	106
Gambar 5.60	Grafik Perbandingan Safety Factor Perkuatan DPT	107
Gambar 5.61	Grafik Perbandingan Penurunan Tanah Perkuatan DPT	108
Gambar 5.62	Grafik Perbandingan Safety Factor Tanah Perkuatan <i>Sheet Pile</i>	109
Gambar 5.63	Grafik Perbandingan Penurunan Tanah Perkuatan <i>Sheet Pile</i>	109

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

USCS	= <i>Unified Soil Classification System</i>
USBR	= <i>United State Bureau of Reclamation</i>
AASHTO	= <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
SPSP DIY	= Suaka Peninggalan Sejarah dan Purbakala Daerah Istimewa Yogyakarta
w	= Kadar air
gs	= Berat jenis
c	= kohesi tanah (kN/m ²)
FS	= Faktor Keamanan (<i>Factor Safety</i>)
2D	= Dua dimensi
H	= Tinggi lereng, kedalaman tanah
α	= Sudut kemiringan lereng
γ	= Berat volume tanah (kN/m ³)
k	= Koevisien permeabilitas
E	= Modulus elastisitas (MPa)
SF	= Faktor keamanan (<i>safety factor</i>)
STA	= Stasiun
s/d	= Sampai dengan
DPT	= Dinding penahan tanah
MDD	= <i>Maximum Dry Density</i>
OMC	= <i>Optimum Moisture Content</i>
μ	= <i>Poisson's Ratio</i>
Ka	= Koefisien tekanan tanah aktif
Kp	= Koefisien tekanan tanah pasif
W	= Berat total (kN)
Ws	= Berat butiran padat (kN)

W_w	= Berat air (kN)
V	= Volume total (m^3)
V_s	= Volume butiran padat (m^3)
V_w	= Volume air (m^3)
V_a	= Volume udara (m^3)
V_v	= Volume rongga (m^3)
γ_d	= Berat volume tanah kering (kN/m^3)
PGA	= <i>Peak Ground Acceleration</i>
PUSKIM	= Pusat Penelitian dan Pengembangan Pemukiman
σ	= Tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m^2)

ABSTRAK

Indonesia sebagai negara yang heterogen dengan beragam budaya, menyimpan banyak situs warisan sejarah, termasuk candi-candi dari era klasik Hindu-Buddha. Salah satunya adalah Candi Dawangsari, yang terletak di Sambirejo, Prambanan, Sleman, dan direncanakan untuk direstorasi. Situs candi ini berada di lereng dengan kemiringan 16,10% dan terdiri dari lapisan tanah litosol dan regosol, sehingga penguatan lereng menjadi aspek penting dalam memastikan stabilitas struktural. Studi ini bertujuan untuk menganalisis faktor keamanan penguatan lereng menggunakan dinding penahan dan *sheet pile*.

Alternatif perkuatan yang dilakukan dalam penelitian kali ini adalah menggunakan dinding penahan tanah dan concrete sheet pile. Analisis dilakukan menggunakan perhitungan manual dan pemodelan numerik dengan Plaxis V20. Akan didapatkan angka aman dan beberapa parameter lain untuk membandingkan efektifitas guna mencari alternatif yang lebih baik.

Hasil menunjukkan bahwa dinding penahan tanpa beban gempa mencapai faktor keamanan 2,199 dan dengan beban gempa 1,111, Sementara itu, metode *sheet pile* menghasilkan kedalaman yang diperlukan (Do) sebesar 2,3 m dengan momen maksimum 33,10 kNm sesuai untuk model CCSP W-500 A 1000. Analisis Plaxis untuk *sheet pile* menghasilkan faktor keamanan 2,098 (tanpa beban gempa) dan 1,110 (dengan beban gempa), juga memenuhi persyaratan keamanan. Berdasarkan perbandingan, kedua metode memberikan stabilitas yang memadai.

Kata kunci: DPT Kantilever, Fellenius, Perkuatan lereng, Stabilitas lereng, *Sheet Pile*

ABSTRACT

Indonesia as a heterogeneous country with diverse cultures, has many historical heritage sites, including temples from the classical Hindu-Buddhist era. One of them is Dawangsari Temple, located in Sambirejo, Prambanan, Sleman, which is planned for restoration. This temple site is located on a slope with a gradient of 16.10% and consists of lithosol and regosol soil layers, making slope reinforcement an important aspect in ensuring structural stability. This study aims to analyze the safety factors of slope reinforcement using retaining walls and sheet piles.

The reinforcement alternatives considered in this study are retaining walls and concrete sheet piles. The analysis was conducted using manual calculations and numerical modeling with Plaxis V20. Safety factors and several other parameters will be obtained to compare effectiveness and identify the most suitable alternative.

The results show that the retaining wall without earthquake loads achieves a safety factor of 2.199 and with earthquake loads of 1.111. Meanwhile, the sheet pile method yields a required depth (D_o) of 2.3 m with a maximum moment of 33.10 kNm, suitable for the CCSP W-500 A 1000 model. Plaxis analysis for sheet piles produced a safety factor of 2.098 (without earthquake loads) and 1.110 (with earthquake loads), also meeting safety requirements. Based on comparisons, both methods provide adequate stability.

Keywords: *Cantilever Reinforcement, Fellenius, Slope stability, Slope reinforcement, , Sheet Pile*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara yang heterogen dan mempunyai beragam budaya tentu saja memiliki berbagai peninggalan kebudayaan salah satunya adalah bangunan candi. Candi adalah sebuah wujud peninggalan sejarah dari masa kerajaan atau sering dikenal dengan masa klasik Hindu - Buddha. Candi adalah istilah umum untuk menamakan semua bangunan peninggalan kebudayaan Hindu dan Buddha di Indonesia (Permana, 2016). Bangunan tersebut banyak ragamnya, misalnya pemandian kuna, gapura atau gerbang kuna, ataupun bangunan suci keagamaan. Candi digunakan untuk menyebut suatu kelompok arca yang menjadi *pundhen desa*. Menurut kitab *Manasara Silpasastra*, tata cara Pembangunan candi meliputi perencanaan bentuk candi, mencari lokasi untuk membangun candi, menguji tanah, menyiapkan tanah, pembuatan *vastupurusamandala* (denah suci), membuat denah dan menempatkannya sesuai rencana ruang serta pengerjaan fisik, seperti penumpukan batu dan membuat ornamen.

Penentuan lokasi merupakan bagian yang penting. Lahan candi harus suci, keramat, tenang dan jauh dari keramaian. Maka sering dijumpai lahan yang digunakan biasanya terletak pada hutan yang lebat, pegunungan, tepian sawah yang subur, dekat sumber mata air, dan lereng gunung. Berdasarkan lokasi lahan yang kerap ditemui disekitar pegunungan, identik dengan kontur tanah yang memiliki kemiringan. Perlu dilakukan rekayasa teknik untuk memperkuat struktur candi pra dan pasca pugar. Kali ini peneliti ingin melakukan perkuatan lereng pada candi Dawangsari yang direncanakan untuk dilakukan pemugaran.

Candi Dawangsari adalah sebuah stupa yang terletak di Dusun Dawangsari, Sambirejo, Prambanan, Sleman tepat 200 m di utara candi Barong dengan koordinat 49 M X.44586, Y.9140626, Z.199,27 Mdpl. Menurut perkiraan, candi ini dibangun pada masa klasik zaman kerajaan Mataram Kuno. Pada saat pertama kali ditemukan reruntuhan situs ini mempunyai batu – batu komponen stupa yang merupakan

pertanda Buddhisme. Pada tahun 1987 – 1989 dilakukan pengumpulan data oleh Suaka Peninggalan Sejarah dan Purbakala (SPSP DIY) mengungkap bahwa struktur tatanan batu yang membentuk dua lingkaran bagian dari stupa dan susunan batu yang membentuk sudut. Kemudian pada tahun 2019-2021 pengumpulan data dengan kegiatan pemetaan, eskavasi, dan penyusunan percobaan. Tahun 2022 dilakukan studi rekonstruksi, berhasil direkonstruksi sebagian struktur batu sisi genta dan yasti. Tahun 2023 dilakukan studi kelayakan dengan kesimpulan layak dipugar. Lokasi penelitian perkuatan lereng candi Dawangsari dapat dilihat pada Gambar 1.1 berikut ini.



Gambar 1. 1 Lokasi Penelitian Candi Dawangsari
(Sumber: Google Earth)

Pemugaran adalah upaya pengembalian kondisi fisik benda cagar budaya, bangunan cagar budaya, dan struktur cagar budaya yang rusak sesuai dengan keaslian bahan, bentuk, tata letak, dan teknik pengerjaan untuk memperpanjang usianya (UU Cagar Budaya Pasal 1 Nomor 11 Tahun 2010). Pemugaran cagar budaya sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus memperhatikan keaslian bahan, bentuk, tata letak, gaya, dan teknologi pengerjaan, kondisi semula dengan tingkat

perubahan sekecil mungkin, penggunaan teknik, metode, dan bahan yang tidak bersifat merusak, dan kompetensi pelaksana dibidang pemugaran.

Kondisi lingkungan stupa candi Dawangsari berada pada topografi yang memiliki kemiringan lereng sebesar 16,10% dan berada di atas formasi semilir. Tanah lapisan atas berjenis litosol dengan ketebalan 1 - 2,5 m. Pada bagian bawah terdapat lapisan tanah regosol dengan tebal 0,4 - 0,6 m. Penggunaan lahan area sekitar stupa didominasi kebun dan ladang. Penelitian ini adalah dengan membuat rencana perkuatan lereng pada candi Dawangsari dilakukan dengan membuat rencana bangunan dengan 2 alternatif yaitu dengan dinding penahan tanah dan *sheet pile*. Rencana tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan kemampuan yang disediakan struktur untuk mendukung beban yang dimiliki candi karena sejauh ini desain struktur hanya didasarkan pada kebiasaan pembangunan candi yang sudah pernah dilakukan sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan pada latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut.

1. Berapakah beban dari bangunan stupa candi Dawangsari dengan konstruksi jenis batuan alam andesit setelah tersusun sesuai rencana?
2. Berapa angka aman lereng eksisting area stupa candi Dawangsari?
3. Berapa angka aman dengan perkuatan lereng alternatif Dinding Penahan Tanah?
4. Berapakah angka aman dengan perkuatan lereng alternatif Sheet Pile?
5. Bagaimanakah perbandingan angka keamanan kedua alternatif perkuatan untuk mengatasi kondisi kemiringan lereng pada area sekitar candi Dawangsari?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui beban bangunan stupa candi Dawangsari dengan konstruksi jenis batuan alam andesit setelah tersusun sesuai rencana.
2. Mengetahui angka aman lereng eksisting area stupa candi Dawangsari.

3. Mengetahui angka aman dengan perkuatan lereng alternatif dinding penahan tanah
4. Mengetahui angka aman dengan perkuatan lereng alternatif *sheet pile*
5. Mengetahui perbandingan kedua alternatif untuk mengatasi kondisi kemiringan lereng pada area sekitar candi Dawangsari.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh melalui penelitian ini sebagai berikut.

1. Untuk memenuhi persyaratan memperoleh derajat sarjana strata satu Teknik Sipil.
2. Mengatasi kemiringan lereng area candi Dawangsari sehingga dapat mencegah longsor ketika candi telah dipugar.
3. Mengetahui metode yang lebih efektif untuk memperkuat lereng candi Dawangsari.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian dimaksudkan agar penelitian yang dilakukan tidak menyimpang dari tujuan penelitian. Adapun Batasan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Perhitungan total beban fondasi hanya untuk mengetahui beban keseluruhan candi,
2. Perhitungan beban batu alam candi adalah sama dengan batuan yang sudah ditemukan sampai pemugaran 2025 dilakukan,
3. Perhitungan konstruksi perkuatan lereng rekayasa konstruksi hanya meliputi dinding penahan tanah dan pile,
4. Pemodelan struktur dilakukan dengan software Plaxis V20.

1.6 Lokasi Penelitian

Penelitian penulis dilakukan di area candi Dawangsari, Desa Sambirejo, Kecamatan Prambanan, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Perkuatan lereng adalah serangkaian teknik dan metode yang digunakan untuk meningkatkan stabilitas dan keamanan lereng, baik yang alami maupun buatan. Lereng yang tidak stabil dapat menyebabkan longsor, yang berpotensi merusak infrastruktur dan membahayakan keselamatan manusia. Oleh karena itu, perkuatan lereng menjadi penting dalam rekayasa sipil dan manajemen risiko geoteknik. Perkuatan lereng merujuk pada berbagai cara untuk memperkuat atau menstabilkan lereng agar dapat menahan gaya – gaya yang bekerja padanya, terutama gaya gravitasi yang dapat menyebabkan pergerakan tanah. Metode perkuatan ini dapat melibatkan penggunaan material konstruksi atau teknik vegetasi. Memahami jenis dan sifat tanah sangat perlu untuk memilih metode perkuatan yang tepat. Meninjau kemiringan lereng dan sistem drainase juga menjadi salah satu aspek yang penting dalam perencanaan.

Kondisi tanah merupakan faktor yang sangat penting untuk dinilai sebelum dilakukan pemugaran pada area candi. Walaupun pada banyak jurnal sejarah ditemukan bahwa nenek moyang kita membangun candi diatas tanah keras. Namun, penilaian harus tetap dilakukan untuk memastikan bahwa kondisi pasca-pugar adalah layak dan sesuai. Selain itu, penemuan situs candi seringkali dijumpai pada kondisi area yang memiliki kontur tanah yang tidak rata seperti lereng sehingga dapat beresiko terdampak longsor.

2.2 Perkuatan Tanah Menggunakan Dinding Penahan Tanah

Ramadhanti R (2022) mencoba untuk merencanakan perkuatan lereng dengan beberapa jenis model dinding penahan tanah. Sebelum melakukan perencanaan, dilakukan pengujian laboratorium untuk mendapatkan data tanah seperti kadar air (w), berat jenis (g_s), sudut geser dalam tanah (ϕ), dan kohesi tanah (c). parameter – parameter tersebut diinputkan ke dalam *software* GeoStudio. Perencanaan tersebut

dilakukan dengan menganalisis stabilitas lereng sehingga di dapatkan faktor keamanan. Berdasarkan faktor keamanan lereng yang didapatkan melalui GeoStudio dapat direncanakan dimensi dinding penahan tanah dengan beberapa jenis variasi yang telah ditentukan seperti *gravity*, bronjong, kantilever, dan kantilever dengan *mini pile*. Hasil penelitian didapatkan bahwa rencana dinding penahan tanah jenis kantilever dengan *mini pile* memenuhi seluruh faktor aman geser, faktor aman guling, dan faktor aman runtuh.

Soumahu dkk (2023) melakukan sebuah perencanaan dinding penahan tanah sebagai salah satu alternatif perkuatan tebing pada ruas jalan Hutumuri STA 1+200 – 1+270 menggunakan metode irisan sederhana. Setelah itu, teori Terzhagi digunakan untuk menganalisa kestabilan dinding terhadap tekanan tanah di belakang dinding agar tidak terjadi pergeseran sehingga memungkinkan terjadinya guling pada saat Pembangunan dinding penahan tanah. Dengan metode irisan sederhana dan teori rankine untuk mengetahui kondisi lereng apakah aman atau tidak. Pada akhirnya, ditemukan bahwa lereng dalam kondisi tidak aman dengan nilai faktor keamanan lereng kurang dari 1,2 sehingga perlu digunakan dinding tipe *Counterfort* belum memenuhi syarat dikarenakan pada potongan I didapatkan nilai faktor keamanan daya dukung tanah $FS = 2,454$ dimana nilai untuk faktor keamanan $FS < 3$.

2.3 Perkuatan Tanah Menggunakan *Sheet Pile*

Sianipar (2016) menyelidiki bagaimana perkuatan lereng dapat mengatasi masalah keterbatasan lahan yang terjadi pada proses Pembangunan Jalan Tol Gempol-Pandaan sepanjang 13,15 kilometer. Dalam hal ini, pabrik kaca disekitar tol mengganggu kestabilan lereng tol yang akan dibangun. Sedangkan, jika harus membebaskan lahan tersebut membutuhkan biaya yang sangat besar. Maka peneliti mencoba menganalisis suatu alternatif perkuatan lereng dengan metode *soldier pile* dengan atau tanpa anchor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan alternatif perencanaan *soldier pile* yang paling efisien adalah perkuatan *soldier pile* dengan *ground anchor*.

Ardianto A dan Zayadi R (2022) meneliti tentang masalah kelangkaan lahan di daerah perkotaan menyebabkan perlu dilakukan pemanfaatan ruang bawah tanah seperti basement. Dalam pembuatannya dilakukan pekerjaan galian dalam, oleh karena itu dibutuhkan sebuah dinding penahan tanah agar tanah tidak mengalami keruntuhan. Selain itu, wilayah perkotaan memiliki muka air yang cukup dangkal sehingga perlu dilakukan penambahan ground anchor untuk menahan beban akibat air tanah. Tujuan dari penelitian ini yaitu membandingkan stabilitas dinding penahan tanah *sheet pile* dipasangkan ground anchor dan dinding penahan tanah *sheet pile* tanpa ground anchor terhadap bahaya guling, geser, dan deformasi yang timbul akibat pekerjaan galian. Pada tahap awal, dilakukan perhitungan kebutuhan panjang penetrasi dinding penahan tanah menggunakan metode konvensional. Tahap berikutnya dilakukan perhitungan stabilitas secara manual terhadap bahaya guling dan geser. Tahap terakhir dilakukan perhitungan deformasi menggunakan aplikasi Plaxis V20. Hasil analisis yang didapatkan bahwa penggunaan ground anchor dalam perencanaan mengakibatkan kebutuhan panjang penetrasi dinding berkurang. Pemasangan ground anchor dapat menaikkan faktor keamanan stabilitas terhadap bahaya guling. Deformasi yang terjadi pada muka air dangkal pada *sheet pile* sebelum dipasangkan ground anchor lebih besar pada galian dalam, sedangkan deformasi cenderung berkurang setelah ground anchor dipasang. Sehingga dapat disimpulkan pemasangan ground anchor efektif meningkatkan stabilitas terhadap guling dan mereduksi besar deformasi dinding penahan tanah.

2.4 Pemodelan *Software Plaxis* Pada Stabilitas Lereng

Mutia dkk. (2024) mencoba untuk meneliti lereng dengan struktur tanah dan kemiringan tertentu menimbulkan potensi longsor yang membahayakan keselamatan pekerja tambang. Oleh karenanya dilakukan analisis potensi longsoran pada lereng galian penambangan Timah tersebut dengan melihat faktor keamanan (SF) lereng, serta menganalisis sejauh mana pergerakan tanah (deformasi) akibat penggalian.

Analisis dilakukan dengan memodelkan lereng galian menggunakan program Plaxis 2D Versi 8, berdasarkan data primer dan studi parametrik. Data yang

diperlukan yaitu tinggi lereng (H), stratigrafi, sudut kemiringan lereng (α), berat volume tanah (γ), koefisien permeabilitas (k), modulus elastisitas tanah (E), angka poisson (ν), kohesi tanah (c), sudut geser tanah (ϕ) dan asumsi muka air tanah. Selain itu dilakukan juga simulasi perbaikan lereng dengan mengubah geometri asli lereng berdasarkan dua alternatif solusi perbaikan yaitu dengan memperkecil sudut kemiringan lereng dan membuat berm/trap pada lereng.

Hasil analisis longsoran pada lereng galian penambangan Timah mendapatkan faktor keamanan (SF) sebesar 1,18 sehingga lereng teridentifikasi pada kondisi keruntuhan pernah terjadi artinya lereng berpotensi longsor. Dari dua alternatif analisis perbaikan yang direkomendasikan, solusi terbaik didapatkan dengan membuat berm/trap sebanyak 6 berm dengan sudut kemiringan pada setiap berm sebesar 50° dan lebar antar berm sebesar 3 meter. SF yang didapatkan sebesar 2,56 mengalami peningkatan sebesar 116,96 %, dengan deformasi sebesar -3 17,71*10 meter, mengalami pengecilan sebesar 42,89 %. Karena penggalian tetap mengalami pergerakan massa tanah (deformasi), tetapi berdasarkan analisis faktor keamanan, lereng pada kondisi aman (tidak berpotensi longsor).

2.5 Penelitian Terdahulu

Perbandingan penelitian saat ini dengan penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 2.1 di halaman selanjutnya.

Tabel 2. 1 Perbedaan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Sekarang

Peneliti	Penelitian Terdahulu						Penelitian yang dilakukan
	Sianipar (2016)	Ramadhanti (2022)	Prapanca (2022)	Ardianto (2022)	Soumahu dkk (2023)	Mutia dkk (2024)	Jananto (2024)
Judul Penelitian	Perencanaan <i>Soldier Pile</i> Untuk Perkuatan Lereng Jalan Tol Gempol-Pandaan STA. 6 + 518 s/d 6 + 575	Perencanaan Perkuatan Lereng Menggunakan Dinding Penahan Tanah (DPT) Pada Ruas Jalan Borobudur-Bigaran Kabupaten Magelang	Pengaruh Stabilisasi Tanah Pasir candi Prambanan Menggunakan Tanah Butiran Halus dan Kapur	Studi Stabilitas Dinding Penahan Tanah <i>Soldier Pile</i> Dengan Perkuatan Ground Anchor	Perencanaan Dinding Penahan Tanah Untuk Menanggulangi Kelongsoran Pada Ruas Jalan Hutumuri Kecamatan Leitimur Selatan	Perencanaan Perkuatan Lereng Tanah Dengan Struktur Dinding Penahan Tanah Kantilever (Studi Kasus Lereng Pulai Anak Aia Bukittinggi)	Analisis Perkuatan Lereng Area Situs Candi Dawangsari

Tabel 2. 2 Lanjutan Tabel Perbedaan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Sekarang

Peneliti	Penelitian Terdahulu						Penelitian yang dilakukan
	Sianipar (2016)	Ramadhanti (2022)	Prapanca (2022)	Ardianto (2022)	Soumahu dkk (2023)	Mutia dkk (2024)	Jananto (2024)
Metode Penelitian	Metode analisa yang digunakan adalah metode irisan Bishop. Perencanaan perkuatan dilakukan dengan metode <i>soldier pile</i> dengan/tanpa ankur	Perencanaan perkuatan dilakukan dengan metode Bishop dengan variasi dinding penahan tanah tipe gravitasi, tipe bronjong, tipe kantilever, dan tipe perkuatan mini <i>pile</i>	Metode uji laboratorium tanah <i>proctor standard</i> , geser langsung, dan triaxial UU	Metode analisis digunakan Plaxis untuk merencanakan kedalaman penetrasi <i>soldier pile</i> dan mendapat faktor keamanan dengan variasi muka air tanah dan ankur	Method of Slices digunakan pada penelitian ini untuk mendapat faktor aman guna merencanakan dimensi dinding penahan tanah yang efektif.	Menganalisa lereng tanah terhadap kelongsoran dan merencanakan penanganan kelongsoran yaitu menggunakan dinding penahan tanah kantilever menggunakan Metode Fellenius	Metode <i>Fellenius</i> dan Analisis dengan Plaxis dengan variasi perkuatan DPT dan <i>sheet pile</i> dengan dan tanpa pengaruh beban gempa

Tabel 2. 3 Lanjutan Tabel Perbedaan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Sekarang

Peneliti	Penelitian Terdahulu						Penelitian yang dilakukan
	Sianipar (2016)	Ramadhanti (2022)	Prapanca (2022)	Ardianto (2022)	Soumahudkk (2023)	Mutia dkk (2024)	Jananto (2024)
Hasil Penelitian	Berdasarkan analisis yang telah dilakukan ditemukan bahwa alternatif yang efektif adalah perkuatan <i>soldier pile</i> dengan ground anchor	Didapatkan nilai FS untuk setiap jenis dinding penahan tanah dengan nilai aman maupun tidak aman untuk berbagai varian standar safety factor	Berdasarkan pengujian didapatkan bahwa nilai MDD dan OMC terbaik pada campuran pasir 90% dan butiran halus 10%	Penggunaan angkur dapat mengurangi kebutuhan panjang dinding penahan tanah dan meningkatkan stabilitas	Diperoleh nilai untuk FS lereng kondisi tidak aman dengan nilai FS lereng kurang dari 1,2. untuk dinding penahan, Counterfort belum memenuhi syarat	Analisa stabilitas dinding penahan tanah kantilever yang direncanakan aman dan memenuhi syarat daya dukung, guling, dan geser	Analisa stabilitas dinding penahan tanah dan sheet pile yang direncanakan dan disimulasikan dengan Plaxis aman dan memenuhi syarat angka keamanan dan penurunan tanah.

2.6 Persamaan dan Perbedaan Dengan Penelitian Terdahulu

Adapun persamaan dan perbedaan penelitian ini dengan penelitian terdahulu sebagai berikut.

1. Persamaan penelitian pada penelitian ini adalah penulis memiliki persamaan dengan penelitian Muhammad Annan Prapanca (2022), yang mana penelitian meningkatkan stabilitas tanah area sekitar situs candi sebagai bangunan budaya yang banyak ditemui di Indonesia dengan konstruksinya yang unik. Metode perencanaan ini memiliki persamaan dengan yang dilakukan Riyan Ramadhanti (2022) dan Benny Renato Sianipar (2016), yaitu menggunakan metode perkuatan lereng dengan jenis dinding penahan tanah dan *sheet pile*.
2. Perbedaan penelitian yang dilakukan kali ini dengan dahulu yaitu lokasi yang direncanakan bertempat di candi Dawangsari, Sambirejo, Prambanan, Sleman. Selain itu, perencanaan perkuatan dilakukan dengan variasi dinding penahan tanah dan *concrete sheet pile* yang kemudian dimodelkan dengan software Plaxis V20. Kemiringan tanah yang ditinjau juga berbeda dari penelitian sebelumnya, sehingga dimensi model perkuatan tanah, angka aman, dan syarat lainnya juga sangat berbeda.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Lereng

Das (1985) dalam Pujianto (2017) menyebutkan lereng adalah suatu permukaan tanah yang miring dan membentuk sudut tertentu terhadap suatu bidang horizontal dan tidak terlindungi. Putra dkk. (2010) dalam Siregar (2023) menyebutkan terdapat dua permukaan memiliki dua elevasi ketinggian yang berbeda pada lereng, sehingga memungkinkan terjadinya gaya – gaya yang bekerja mendorong sehingga tanah yang lebih tinggi kedudukannya cenderung bergerak ke bawah yang biasa disebut gaya potensial gravitasi berdampak pada kelongsoran. Tingkat kemiringan lereng dapat bervariasi dan mempengaruhi stabilitasnya, semakin curam lereng akan lebih rentan terhadap longsor.

Klasifikasi kemiringan lereng berpedoman pada penyusunan lahan dan konservasi tanah dapat dilihat pada Tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3. 1 Klasifikasi Kemiringan Lereng

Kelas	Kemiringan	Golongan Lereng
I	0 – 8	Datar
II	>8-15	Landai
III	>15-25	Agak Curam
IV	>25-45	Curam
V	>45	Sangat Curam

Sumber: Departemen Kehutanan RI (1986)

Menurut Mina dkk (2019) dalam (Firmansyah dkk 2021) berdasarkan dari segi terbentuknya, lereng dibedakan menjadi 2 macam yaitu:

1. Lereng alam

Lereng alam terbentuk karena proses alam. Lereng - lereng alam yang telah ada selama bertahun - tahun dapat tiba - tiba runtuh dikarenakan adanya perubahan

topografi, gempa, aliran air, hilangnya kuat geser, perubahan tegangan dan cuaca. Biasanya keruntuhan - keruntuhan tersebut tidak dipahami secara baik karena sedikitnya studi yang dilakukan pada lereng - lereng alam tersebut. Mengetahui adanya bidang runtuh lama pada lereng alam dapat memudahkan untuk memahami dan memprediksi perilaku lereng tersebut. Selain sering kali disebabkan oleh aktivitas tektonik dan longsoran tanah sebelumnya, bidang runtuh juga dapat disebabkan oleh pengaruh sungai glasial dan fenomena glasial seperti pengembangan atau pemuaian tanah lempung yang tidak seragam. Solusi dalam stabilitas lereng yang berkaitan dengan lereng alam (*natural slope*) telah dikenal luas dari waktu ke waktu. Material yang paling berpengaruh pada analisis stabilitas lereng yaitu tanah lempung (*clay*) dan *shale* yang terikat secara kimia yang secara berangsur-angsur dapat terlepas karena pengaruh cuaca. Cuaca dapat menyebabkan banyak energi yang dilepaskan pada ikatan tersebut

2. Lereng buatan

Lereng buatan adalah didefinisikan sebagai lereng yang dibuat dalam rangka memenuhi ketentuan yang disyaratkan dalam pembangunan infrastruktur untuk kepentingan umum dan masyarakat. Pengelompokan terhadap lereng buatan yang berhubungan dengan tingkat stabilitasnya terhadap potensi longsoran dikelompokkan sebagai berikut (Mina dkk., 2019):

- 1) Keruntuhan lereng galian mencakup lereng di atas dan atau di bawah badan jalan, serta longsoran yang menimpa badan jalan itu sendiri.
- 2) Keruntuhan lereng timbunan mencakup longsoran lereng dangkal dan lereng dalam serta keruntuhan timbunan yang menimpa timbunan jalan, termasuk jembatan.
- 3) Keruntuhan bangunan penahan yaitu keruntuhan bangunan penahan yang dimaksudkan untuk menangani longsoran yang terjadi sesuai pada butir 1 dan 2.

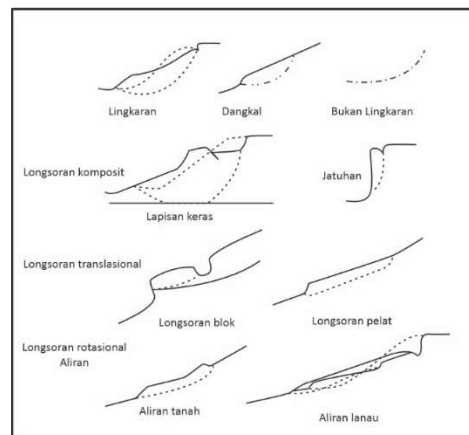
3.2 Stabilitas Lereng Tanpa Perkuatan

Lereng stabil apabila tidak memiliki potensi pergerakan, sehingga besarnya gaya penahan harus lebih besar daripada gaya penggerak lereng. Lereng telah diklasifikasikan berdasarkan tabel 3.1 diatas dan dapat disimpulkan bahwa lereng yang diteliti kali ini termasuk sebagai lereng agak curam dengan kemiringan sebesar 16,10 %.

3.2.1 Model Keruntuhan Tanah

Suryolelono (2003) menyatakan keruntuhan lereng dapat terjadi disebabkan oleh pengurangan kuat geser dan penambahan tegangan geser pada lapisan tanah pembentuk lereng Peningkatan tegangan geser terjadi disebabkan adanya fenomena variasi gaya intragranuler yang diakibatkan oleh kadar air dalam tanah yang menimbulkan tekanan air pori dalam tekanan hidrostatik dalam tanah meningkat. Bertambahnya berat beban pada lereng yang disebabkan air hujan yang berinfiltrasi ke dalam tanah di bagian lereng yang terbuka menyebabkan kandungan air dalam tanah meningkat, sehingga berat volume tanah bertambah dan berat pada lereng semakin besar. Pengaruh gempa juga menyebabkan kondisi lereng yang sebelumnya stabil menjadi labil.

Kondisi ini terjadi akibat guncangan pada lapisan tanah di bumi, sehingga menimbulkan perubahan pada struktur tanah. Akibat pengaruh gempa, tekanan air pori (μ) dalam lapisan tanah pasir ini meningkat, mengakibatkan tegangan efektif tanah menurun. Hal ini berarti tanah kehilangan kuat dukung tanah, berakibat tanah pembentuk lereng di atas lapisan ini runtuh maka timbul masalah tanah longsor. Longsor memiliki beberapa tipe diantaranya dapat dilihat pada Gambar 3.1 sebagai berikut.



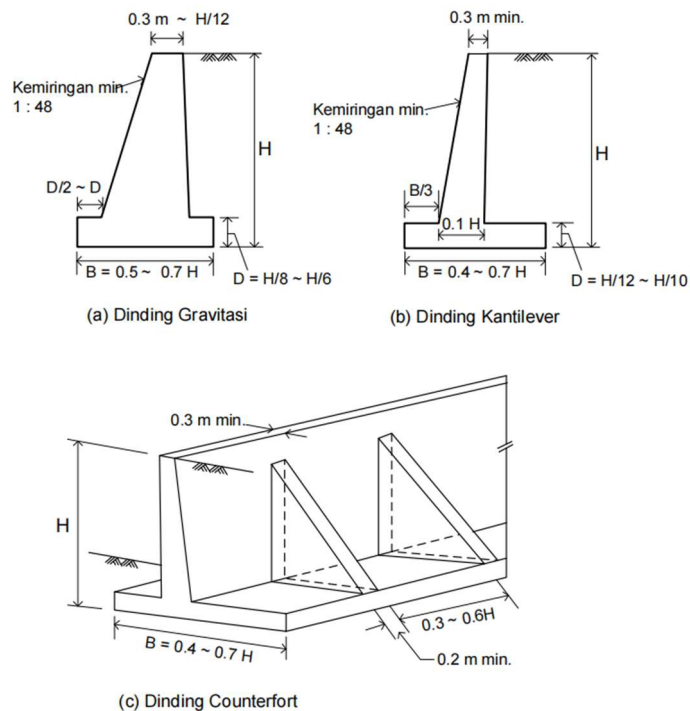
Gambar 3. 1 Tipe-tipe Gerakan Massa Lereng
(Sumber: Skempton dan Hutchinson, 1969)

3.3 Dinding Penahan Tanah

Dinding penahan tanah adalah konstruksi berupa dinding yang digunakan untuk menahan tanah yang lebih tinggi agar tidak bergeser atau longsor. Dinding penahan tanah digunakan biasa digunakan pada proyek konstruksi seperti jalan raya, perumahan, dan taman. Material yang biasa digunakan yaitu beton, batu bata, kayu, dan gabion atau bronjong. Ada beberapa jenis dinding penahan tanah, seperti *gravity retaining wall*, *cantilever retaining wall*, dan *anchored retaining wall*.

Proses pembuatan *retaining wall* dimulai dengan menentukan lokasi proyek dan ukuran dinding penahan tanah yang dibuat. Selanjutnya, dilakukan penggalian tanah untuk membuat fondasi yang menopang dinding penahan tanah. Selanjutnya dilakukan pemasangan batu bata atau beton sebagai material utama untuk membuat dinding penahan tanah.

Perencanaan dimensi dinding penahan tanah adalah langkah permulaan dalam desain struktur yang bertujuan untuk menahan tanah demi mencegah longsor dan pergeseran. Dalam perencanaan ini, beberapa faktor harus dipertimbangkan, termasuk stabilitas terhadap geser, guling, dan daya dukung tanah. Akan tetapi, perencanaan dimensi dinding penahan tanah sejauh ini dilakukan dengan cara *trial* untuk menemukan dimensi yang paling efektif demi memenuhi kestabilan yang berbeda di setiap lokasi perencanaan. Estimasi perencanaan dimensi awal pada dinding penahan tanah dapat dilihat pada Gambar 3.2 sebagai berikut.



Gambar 3. 2 Dimensi Tipikal Dinding Penahan Tanah
(Sumber: SNI 8460-2017 Geoteknik, 2017)

3.4 Sheet Pile

Sheet pile beton adalah struktur berbentuk lembaran atau pelat yang terbuat dari beton yang kuat dan tahan lama. Profilnya biasanya dirancang untuk menahan tekanan tanah dan air di sekitarnya. Mereka banyak digunakan dalam proyek konstruksi untuk berbagai tujuan, seperti dinding penahan tanah, pelindung sungai, fondasi bangunan di area rawan longsor, dan proyek pengerukan, seperti pembangunan pelabuhan dan dermaga. *Sheet pile* beton memiliki banyak keuntungan, termasuk kekuatan strukturalnya yang tinggi, daya tahan terhadap korosi, dan pemasangan yang mudah.

Tebing yang kekurangan pohon atau tidak memiliki penahan tanah ini akan membuat tanah lebih mudah terkikis sehingga mudah terjadi longsor. Salah satu material konstruksi yang berfungsi untuk menahan tanah adalah *sheet pile* atau salah satu jenis beton pracetak yang disusun sedemikian rupa sehingga membentuk dinding yang kokoh agar tidak terjadi longsor.

3.5 Tekanan Lateral Tanah

Tekanan tanah lateral adalah tekanan yang dihasilkan oleh tanah di sekitar struktur atau dinding yang dapat menyebabkan tekanan pada dinding tersebut. Tekanan tanah lateral sering terjadi pada dinding penahan tanah atau dinding penahan lereng. Tekanan tanah lateral dapat dihitung dengan menggunakan rumus Rankine atau rumus Coulomb. Tekanan tanah lateral dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti berat jenis tanah, kedalaman dinding penahan tanah, sudut gesekan dalam tanah, dan kemiringan lereng. Semakin tinggi berat jenis tanah, semakin dalam dinding penahan tanah, semakin tinggi sudut gesekan dalam tanah, dan semakin curam kemiringan lereng, akan semakin besar tekanan tanah lateral yang dihasilkan.

“Pada dinding penahan tanah tekanan lateral yang bekerja meliputi tekanan tanah pada kondisi diam, kondisi aktif, kondisi pasif, pada beban terbagi rata di atas permukaan timbunan, ketidakseimbangan muka air tanah di kedua sisi dinding, gaya gempa, gaya benturan gelombang, dan lain-lainnya. Pada analisis perhitungan dinding penahan tanah yang umumnya didasarkan bahwa dinding bergerak secara lateral yaitu dengan cara menggeser serta berotasi terhadap kaki dinding, sehingga kuat geser tanah di belakang dinding sepenuhnya termobilisasi. Wiswara (2012) dalam (Fahreza, 2024) menyebutkan dalam kondisi ini, tekanan lateral tanah memenuhi teori-teori Rankine atau Coulomb.

Ada beberapa kondisi tekanan tanah lateral yang dapat terjadi diantaranya sebagai berikut.

1. Tekanan Tanah Lateral Saat Diam

Tekanan tanah lateral saat diam adalah tekanan tanah ke arah lateral dengan tidak terjadinya regangan dalam tanah. Tekanan tanah lateral saat diam dapat terjadi akibat tekanan vertikal menimbulkan perubahan bentuk arah lateral karena pengaruh *poisson ratio*. Tanah pada sekitarnya menahan perubahan ke arah lateral. Pada saat kondisi ini terjadi keseimbangan tegangan arah vertikal dan horizontal karena tidak terjadi perubahan letak (*displacement*), maka tidak terjadi tegangan geser pada bidang vertikal dan horizontal di sembarang titik lapisan tanah. Kondisi keseimbangan di tempat yang dihasilkan dari kedudukan

tegangan dengan tanpa terjadinya tegangan geser disebut kondisi K_0 . Tekanan tanah lateral saat diam dapat dinyatakan dalam Persamaan 3.10 dan 3.11 berikut.

$$\sigma_h' = K_0 z \gamma' \quad (3.10)$$

atau

$$K_0 = \frac{\sigma_h'}{z \gamma'} = \frac{\sigma_h'}{\sigma_v'} \quad (3.11)$$

dengan:

K_0 = koefisien tekanan tanah saat diam

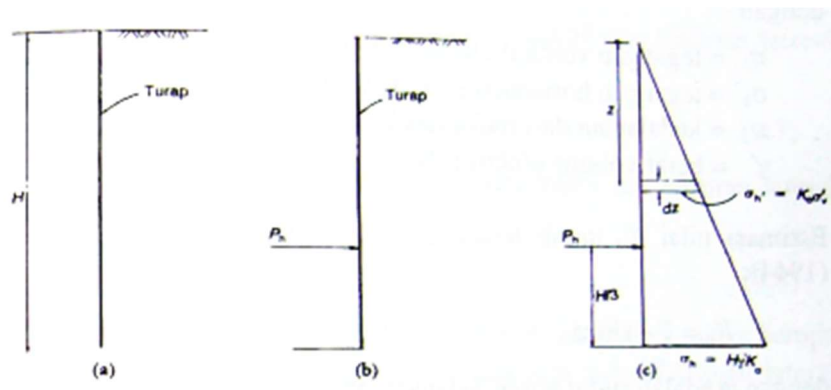
σ_v' = tegangan vertikal efektif (kN/m^3)

σ_h' = tegangan horizontal efektif (kN/m^3)

γ = berat volume efektif (kN/m^3)

z = kedalaman dari muka tanah (m)

Ilustrasi tekanan tanah lateral saat diam dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



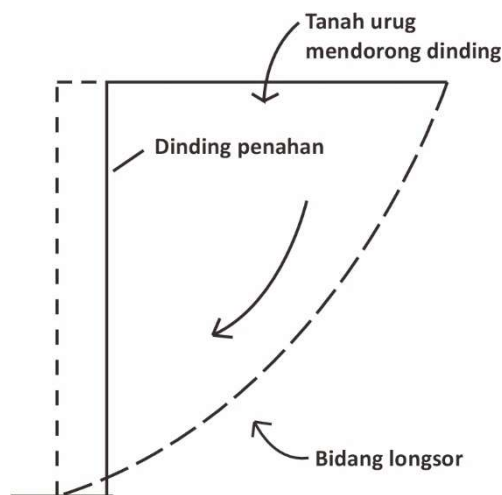
Gambar 3.3 Tanah Lateral Saat Diam

(Sumber: Hardiyatmo, 2003)

2. Tekanan Tanah Lateral Aktif

Jika dinding turap mengalami keluluhan atau bergerak ke arah luar dari tanah urug di belakangnya, maka tanah urug akan bergerak ke bawah dan ke samping menekan dinding turap. Tekanan seperti ini disebut tekanan tanah aktif (*active earth pressure*), sedangkan nilai banding tekanan horizontal dan tekanan vertikal tanah yang terjadi, didefinisikan sebagai koefisien tekanan tanah aktif (*coefficient of active earth pressure*) yang dinotasikan dengan K_a . Nilai tekanan

tanah aktif lebih kecil dari tekanan aktif saat diam. Gerakan dinding menjauhi tanah urug menghilangkan pertahanan baji tanah di belakang dinding. Jadi, tekanan tanah aktif adalah gaya yang cenderung mengurangi keseimbangan dinding penahan tanah. Ilustrasi untuk kondisi tekanan tanah aktif dapat dilihat pada Gambar 3.4 sebagai berikut.



Gambar 3. 4 Tekanan Tanah Lateral Aktif
(Sumber: Hardiyatmo,2003)

Persamaan untuk memperoleh nilai koefisien tanah aktif pada tanah datar dapat dilihat pada Persamaan 3.12 berikut ini.

$$K_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.12)$$

Untuk tekanan tanah aktif non kohesif menggunakan Persamaan 3.13 sebagai berikut.

$$P_a = 0,5K_a \gamma H^2 \quad (3.13)$$

Untuk tekanan tanah aktif kohesif menggunakan Persamaan 3.14 sebagai berikut.

$$P_a = 0,5K_a \gamma H^2 - 2c\sqrt{K_a} \quad (3.14)$$

dengan:

P_a = tekanan tanah aktif (kN/m)

K_a = koefisien tekanan tanah aktif

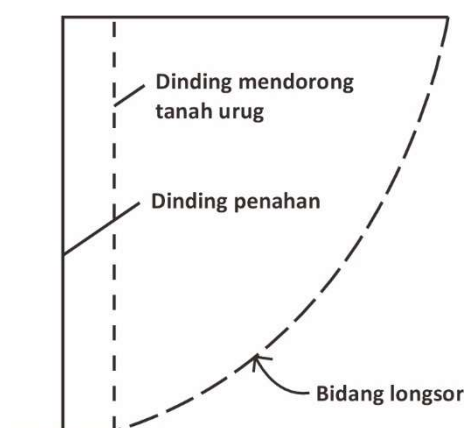
H = kedalaman tanah (m)

c = kohesi (kN/m²)

γ = berat volume efektif (kN/m³)

3. Tekanan Tanah Lateral Pasif

Suatu gaya yang mendorong dinding penahan ke arah tanah urug disebut tekanan tanah kondisi pasif (*passive earth pressure*), sedangkan nilai banding tekanan horizontal dan tekanan vertikal yang terjadi didefinisikan sebagai koefisien tekanan tanah pasif (*coefficient of passive earth pressure*) yang dinotasikan dengan K_p . Nilai tekanan tanah pasif lebih besar dari nilai koefisien tekanan tanah saat diam dan koefisien tekanan tanah pasir, atau bisa dinotasikan $K_p > K_o > K_a$. Tekanan tanah pasif menunjukkan nilai maksimum dari gaya yang dapat dikembangkan oleh tanah pada gerakan struktur penahan terhadap tanah urug, yaitu gaya perlawanan tanah sebelum dinding mengalami keruntuhan. Ilustrasi untuk kondisi tekanan tanah pasif dapat dilihat pada Gambar 3.5 sebagai berikut.



Gambar 3.5 Tekanan Tanah Lateral Pasif

(Sumber: Hardiyatmo, 2003)

Persamaan untuk memperoleh nilai koefisien tanah aktif pada tanah datar dapat dilihat pada Persamaan 3.15 berikut ini.

$$K_p = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (3.15)$$

Untuk tekanan tanah aktif non kohesif menggunakan Persamaan 3.16 sebagai berikut.

$$P_p = 0,5K_a\gamma H^2 \quad (3.16)$$

Untuk tekanan tanah aktif kohesif menggunakan Persamaan 3.17 sebagai berikut.

$$P_a = 0,5K_a\gamma H^2 + 2c\sqrt{K_a} \quad (3.17)$$

dengan:

P_p = tekanan tanah pasif (kN/m)

K_p = koefisien tekanan tanah pasif

H = kedalaman tanah (m)

c = kohesi (kN/m²)

γ = berat volume efektif (kN/m³)

4. Pembebanan Pada Lereng

Pada beberapa kasus kadang tanah urug di belakang dinding penahan tanah dipengaruhi oleh beban terbagi rata. Dengan menganggap beban terbagi rata q sebagai beban tanah setebal h_s dengan berat volume (γ) tertentu, maka tinggi lapisan tanah $h_s = q/\gamma$. Tekanan tanah lateral pada kedalaman h_s dari tinggi tanah permukaan dapat melalui Persamaan 3.18 sebagai berikut.

$$P_a = h_s\gamma K_a = qK_a \quad (3.18)$$

Jadi, akibat adanya beban terbagi rata ini, tambahan tekanan tanah aktif total pada dinding penahan tanah setinggi H dapat dinyatakan oleh Persamaan 3.19 sebagai berikut.

$$P_a' = qK_a H \quad (3.19)$$

dengan:

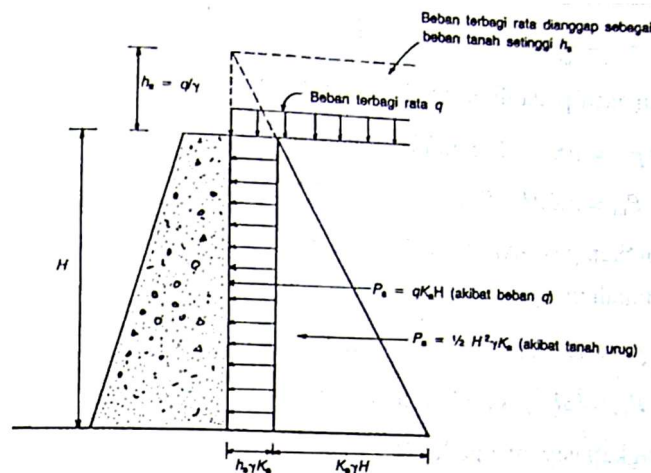
P_a' = tambahan tekanan tanah aktif total akibat beban terbagi rata

q = beban terbagi rata

H = tinggi dinding penahan tanah

K_a = koefisien tekanan tanah aktif

Diagram tekanan aktif akibat beban terbagi rata ini berupa segi empat dengan tinggi H dan lebar sisi qK_p . Ilustrasi tekanan tanah lateral akibat beban terbagi rata q dapat dilihat pada Gambar 3.8 di bawah ini.



Gambar 3. 6 Tekanan Tanah Lateral Akibat Beban Merata q
(Sumber: Hardiyatmo,2003)

3.6 Tanah

Tanah adalah lapisan permukaan yang terbentuk oleh bahan - bahan yang telah mengalami proses lanjutan akibat perubahan alam, termasuk pengaruh udara dan organisme hidup maupun mati. Kualitas tanah bervariasi tergantung pada lokasi dan kondisi pembentukannya. (Hardiyatmo, 2010) menyatakan tanah merupakan himpunan mineral, bahan organik, dan endapan - endapan yang relatif lepas (*loose*),

yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik atau oksida-oksida yang mengendap di antara partikel - partikel. Ruang di antara partikel - partikel dapat berisi air, udara ataupun keduanya. Proses pelapukan batuan atau proses geologi lainnya yang terjadi di permukaan bumi membentuk tanah. Pembentukan tanah dari batuan induknya, dapat terjadi secara fisis atau kimia.

Pasir, lempung, lanau atau lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada batas ukuran butiran yang telah ditentukan, istilah yang sama juga digunakan untuk menggambarkan sifat tanah yang khusus. Lempung adalah salah satu jenis tanah yang bersifat kohesif dan plastis, sedangkan pasir digambarkan sebagai tanah yang tidak kohesif dan tidak plastis (Hardiyatmo, 2010).

Tanah merupakan komponen penting dalam suatu ekosistem yang mendukung kehidupan di bumi. Memahami karakteristik dan fungsi tanah sangat penting dalam konstruksi utamanya sebagai media pendukung bangunan.

3.6.1 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah adalah cara mengumpulkan dan mengelompokkan tanah berdasarkan kemiripan sifat dan ciri morfologi, fisika dan kimia, serta mineralogi, kemudian diberi nama agar mudah dikenal, diingat, dipahami dan digunakan serta dapat dibedakan satu dengan lainnya. Tanah yang diklasifikasikan adalah benda alami yang terdiri dari padatan (bahan mineral dan bahan organik), cairan dan gas, yang terbentuk di permukaan bumi dari hasil pelapukan bahan induk oleh interaksi faktor iklim, relief, organisme dan waktu, berlapis - lapis dan mampu mendukung pertumbuhan tanaman, sedalam 2 m atau sampai batas aktivitas biologi tanah (*Soil Survey Staff*, 2010).

Terdapat dua sistem klasifikasi yang sering digunakan, yaitu USCS (*Unified Soil Classification System*) dan AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Sistem - sistem ini menggunakan sifat - sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran, batas cair dan indeks plastisitas.

1. Sistem Klasifikasi Tanah *USCS*

Sistem klasifikasi *USCS* (*Unified Soil Classification System*) awalnya diusulkan oleh Casagrande pada tahun 1942, kemudian direvisi oleh kelompok teknisi dari USBR (*United State Bureau of Reclamation*). Sistem ini banyak digunakan oleh berbagai organisasi konsultan geoteknik, pada sistem *USCS* ini tanah diklasifikasikan ke dalam tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) jika kurang dari 50% lolos saringan nomor 200, dan sebagai tanah berbutir halus (lanau/lempung) jika lebih dari 50% lolos saringan nomor 200, selanjutnya tanah diklasifikasi dalam sejumlah kelompok dan sub kelompok yang dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 Sistem Klasifikasi USCS

Divisi Umum		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria Laboratorium		
Tanah berbutir kasar 50% atau lebih tertahan saringan no.200 (0,075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan no.4 (4,75 mm)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$Cu = \frac{D60}{D10} > 4, Cc = \frac{(D30)^2}{D10 \times D60}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk GW		
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil, atau tidak mengandung butiran halus			
		GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI > 7$	Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol	
						GC
		Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan no.4 (4,75 mm)	Pasir bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$Cu = \frac{D60}{D10} > 6, Cc = \frac{(D30)^2}{D10 \times D60}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk SW
				SP	Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran	
	Pasir banyak kandungan butiran halus		SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$	Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung		
	Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no.200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung batas cair < 50% atau kurang	ML	Lanau tak organic dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung		
			CL	Lempung tak organic dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ("lean clays")		
OL			Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah			
Lanau dan lempung batas cair > 50%		MH	Lanau tak organic atau pasir halus diatomae, lanau elastis			
		CH	Lempung tak organic dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk (fat clays)			
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM248		
						PT

2. Sistem Klasifikasi Tanah AASTHO

Sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) adalah metode yang digunakan untuk mengklasifikasikan tanah berdasarkan karakteristik fisiknya, khususnya dalam konteks konstruksi jalan. Sistem ini pertama kali dikembangkan pada tahun 1929 dan telah mengalami beberapa revisi, dengan versi yang saat ini digunakan ditetapkan pada tahun 1945. Sistem klasifikasi AASHTO terbagi kedalam 8 kelompok A-1 sampai A-8 termasuk sub-sub kelompok. Sistem klasifikasi AASTHO dapat dilihat pada Tabel 3.3 dibawah ini.

Tabel 3. 3 Sistem Klasifikasi AASTHO

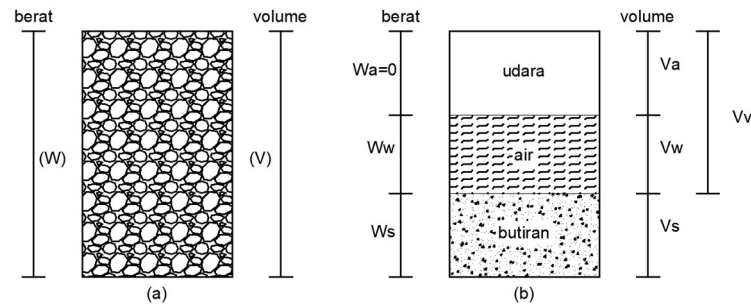
Klasifikasi Umum	Material Granuler (<35% lolos saringan No.200)							Tanah-tanah lanau-lempung (>35% lolos saringan no.200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Klasifikasi kelompok	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5/A-7-6
Analisis saringan (% loos)											
2,00 mm (no.10)	50 maks							-	-	-	-
0,425 mm (no.40)	30 maks	50 maks	51 min					-	-	-	-
0,075 mm (no.200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	36 min	36 min	36 min	36 min
Sifat fraksi lolos saringan no.40											
Batas Cair (LL)	-	-	-	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks plastis (PI)	6 maks		Np	10 maks	10 maks	11 min	11 min	10 maks	10 maks	11 min	11 min
Indeks kelompok (G)	0		0	0		4 maks		8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Tipe material yang pokok pada umumnya	Peahan batu, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil berlanau atau berlempung dan pasir				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik							Sedang sampai buruk			

Sumber: Hardiyatmo (2006)

3.6.2 Parameter Tanah

Properties tanah, atau sifat - sifat tanah, merupakan aspek penting dalam ilmu geoteknik dan mekanika tanah. Sifat - sifat ini membantu dalam memahami perilaku tanah pada berbagai kondisi, terutama dalam konteks konstruksi dan rekayasa sipil. Sifat - sifat ini sering dibagi menjadi dua kategori utama yaitu fisis dan mekanis. Susunan material tanah dapat dipahami secara sederhana terdiri dari butiran tanah, air, dan udara. Pada ruang antar butiran tanah dapat berisi air maupun udara. Ada kondisi saat tanah kering yaitu ketika tidak terdapat air pada rongga tanah. Bila rongga tanah terisi air dan udara maka disebut jenuh sebagian, sedangkan saat kondisi jenuh air semua pori terisi air sehingga tidak ada kandungan udaranya. Terdapat hubungan antara kadar air, kadar pori, porositas, dan lain

sebagainya pada diagram fase tanah. Diagram fase tanah dapat dilihat pada Gambar 3.7 sebagai berikut.



Gambar 3. 7 Diagram Fase Tanah
(Sumber: Hardiyatmo, 2010)

Berdasarkan Gambar 3.7 di atas dapat diketahui bahwa tanah memiliki volume V dan berat total W . Untuk mengetahui berat total, volume total dan volume rongga tanah dapat menggunakan Persamaan 3.20 hingga Persamaan 3.22 sebagai berikut.

$$W = W_s + W_w \quad (3.20)$$

$$V = V_s + V_w + V_a \quad (3.21)$$

$$V_v = V_w + V_a \quad (3.22)$$

dengan:

W = Berat total (kN)

W_s = Berat butiran padat (kN)

W_w = Berat air (kN)

V = Volume total (m^3)

V_s = Volume butiran padat (m^3)

V_w = Volume air (m^3)

V_a = Volume udara (m^3)

V_v = Volume rongga (m^3)

Selain unsur - unsur pada diagram fase tanah, dibutuhkan pula parameter tanah pada penelitian ini untuk dapat membuat pemodelan menggunakan Plaxis 2D. Parameter tanah yang dibutuhkan diantaranya adalah.

1. Berat Volume Kering (γ_d)

Berat volume kering tanah adalah sebuah parameter geoteknik untuk menunjukkan kepadatan tanah dalam keadaan kering. Didefinisikan juga sebagai perbandingan antara berat butiran padat tanah (W_s) dan volume total tanah (V). Perhitungan berat volume kering menggunakan Persamaan 3.23 sebagai berikut.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (3.23)$$

dengan:

W_s = Berat butiran padat (gram)

V = Volume total tanah (cm^3)

2. Berat Volume Basah (γ_b)

Berat volume basah tanah adalah sebuah parameter geoteknik untuk menunjukkan kepadatan tanah dalam keadaan jenuh air. Didefinisikan juga sebagai perbandingan antara total berat tanah mencakupi butiran padat dan air (W) dan volume total tanah (V). Perhitungan berat volume basah menggunakan Persamaan 3.24 sebagai berikut.

$$\gamma_b = \frac{W}{V} \quad (3.24)$$

dengan:

W = Berat total tanah (berat butiran+berat air) (gram)

V = Volume total tanah (cm^3)

3. Berat Volume butiran padat (γ_s)

Berat volume butiran padat adalah sebuah parameter geoteknik untuk menunjukkan kepadatan padat tanah tanpa mempertimbangkan air atau udara

yang ada dalam pori - pori tanah. Didefinisikan juga sebagai perbandingan antara berat butiran padat tanah (W_s) dan volume butiran padat (V_s). Perhitungan berat volume basah menggunakan Persamaan 3.25 sebagai berikut.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (3.25)$$

dengan:

W_s = Berat butiran padat (gram)

V_s = Volume butiran padat (cm^3)

4. Berat Jenis (G_s)

Berat jenis tanah adalah perbandingan antara berat volume butiran padat dengan berat volume air pada temperature $20^\circ C$. Perhitungan berat jenis menggunakan Persamaan 3.26 sebagai berikut.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (3.26)$$

dengan:

γ_s = Berat butiran padat (gram)

γ_w = Volume butiran padat (cm^3)

Nilai berat jenis umum tanah dapat dilihat pada Tabel 3.4 sebagai berikut.

Tabel 3. 4 Berat Jenis Tanah

No	Jenis Tanah	Berat Jenis (Gs)
1	Kerikil	2,65 - 2,68
2	Pasir	2,65 - 2,68
3	Lanau anorganik	2,62 - 2,68
4	Lempung organic	2,58 - 2,65
5	Lempung anorganik	2,68 - 2,75
6	Humus	1,37
7	Gambut	1,25 - 1,80

Sumber: Hary Christiady, Mekanika Tanah I (1922)

5. Permeabilitas

Permeabilitas tanah adalah kemampuan tanah untuk meneruskan atau meloloskan air atau udara melalui pori - pori yang ada di antara butiran tanah.

Permeabilitas biasa didefinisikan sebagai kecepatan aliran air melalui tanah. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor meliputi tekstur tanah, struktur tanah, dan porositas. Nilai kisaran berbagai permeabilitas jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 3.5 berikut ini.

Tabel 3. 5 Nilai Perkiraan Permeabilitas Tanah

No	Jenis Tanah	K (mm/detik)
1	Butiran kasar	$10 - 10^3$
2	Kerikil halus, butiran kasar bercampur pasir butiran sedang	$10^{-2} - 10$
3	Pasir halus, lanau longgar	$10^{-4} - 10^{-2}$
4	Lanau padat, lanau berlempung	$10^{-5} - 10^{-4}$
5	Lempung berlanau, lempung	$10^{-8} - 10^{-5}$

Sumber: Hardiyatmo (2012)

6. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas tanah, yang sering dilambangkan dengan E , adalah parameter penting dalam geoteknik yang menunjukkan kemampuan tanah untuk mendukung beban dan mengembalikan bentuknya setelah mengalami deformasi. Nilai kisaran berbagai permeabilitas jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 3.6 berikut ini.

Tabel 3. 6 Nilai Modulus Elastisitas Tanah

<i>Type</i>	<i>Strength of soil</i>	<i>Elastic modulus, E (MPa)</i>	
		<i>Short term</i>	<i>Long term</i>
<i>Silt</i>	<i>Soft</i>	<10	<8
	<i>Stiff</i>	10 - 20	8 - 15
	<i>Hard</i>	>20	>15
<i>Clay</i>	<i>Very Soft</i>	<3	<2
	<i>Soft</i>	2 - 7	1 - 5

Sumber: Look (2014)

Lanjutan Tabel 3. 6 Nilai Modulus Elastisitas Tanah

<i>Type</i>	<i>Strength of soil</i>	<i>Elastic modulus, E (MPa)</i>	
		<i>Short term</i>	<i>Long term</i>
<i>Clay</i>	<i>Firm</i>	5 - 12	4 - 8
	<i>Stiff</i>	10 - 25	7 - 20
	<i>Very Stiff</i>	20 - 50	15 - 35
	<i>Hard</i>	40 - 80	30 - 60

Sumber: Look (2014)

7. Derajat Kejenuhan

Derajat kejenuhan tanah adalah ukuran yang menunjukkan seberapa penuh ruang pori dalam tanah terisi oleh air. Derajat kejenuhan dapat dinyatakan dengan Persamaan 3.27 sebagai berikut.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (3.27)$$

dengan:

S = Derajat kejenuhan tanah (%)

V_w = Volume air yang terkandung dalam tanah (cm^3)

V_v = Volume rongga pori tanah (cm^3)

8. *Poisson Ratio*

Nilai *Poisson's ratio* tanah adalah rasio yang menggambarkan hubungan antara kompresi poros dan regangan lateral pada material tanah. Nilai ini bervariasi tergantung pada jenis tanah dan kondisi kelembabannya. Nilai *poisson ratio* juga dapat ditentukan berdasarkan macam tanah seperti pada Tabel 3.7 di bawah ini.

Tabel 3. 7 Nilai Kisaran Poisson Ratio Tanah

Macam Tanah	<i>Poisson Ratio</i> (ν)
Lempung jenuh	0,40 – 0,50
Lempung tak jenuh	0,10 – 0,30
Lempung berpasir	0,20 – 0,30
Lanau	0,30 – 0,35
Pasir padat	0,20 – 0,40
Pasir kasar (angka pori, $e = 0.40-0.70$)	0,15
Pasir halus (angka pori, $e = 0.40-0.70$)	0,25
Batu	0,10 – 1,40
Loess	0,10 – 0,30

Sumber: Bowles (1997)

9. Sudut Geser Dalam

Sudut geser dalam, atau *friction angle*, adalah sudut yang terbentuk antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan. Sudut ini merupakan parameter penting dalam mekanika tanah, karena menunjukkan kemampuan material untuk menahan beban dan stabilitasnya terhadap gesekan. Sudut geser dalam dapat dipahami sebagai sudut rekahan yang terjadi ketika suatu material dikenai tegangan melebihi batas gesernya. Semakin besar sudut geser dalam suatu material, semakin besar kemampuannya untuk menahan beban luar tanpa mengalami keruntuhan. Hubungan antara sudut geser dalam dengan jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 3.9 berikut ini.

Tabel 3. 8 Hubungan Sudut Geser Dalam dan Jenis Tanah

Tipe Tanah	θ (deg)
Pasir: butiran bulat	
Renggang/lepas	27-30
Menengah	30-35
Padat	35-38

Sumber: Das (1994)

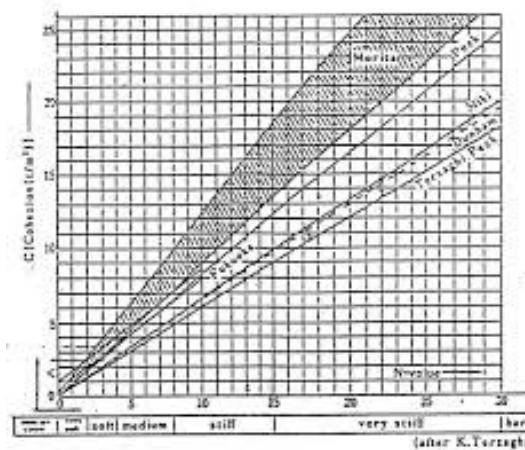
Lanjutan Tabel 3. 8 Hubungan Sudut Geser Dalam dan Jenis Tanah

Tipe Tanah	θ (deg)
Pasir: butiran bersudut	
Renggang/lepas	30-35
Menengah	35-40
Padat	40-45
Kerikil bercampur pasir	34-38
Lanau	26-35

Sumber: Das (1994)

10. Kohesi

Kohesi (cohesion) adalah gaya tarik menarik antara partikel yang dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas. Kohesi disebut juga sebagai lekatan antara butiran tanah. Nilai kohesi dapat diperoleh dari pengujian laboratorium yaitu pengujian kuat geser langsung (*direct shear strength test*) dan pengujian triaxial (*triaxial test*). Nilai kohesi juga dapat di korelasi terhadap nilai N-SPT yang ditentukan pada Gambar 3.8 berikut ini.

**Gambar 3. 8 Korelasi Kohesi dan N-SPT**

(Sumber: Terzhagi,1943)

11. Sudut Dilatasi

Sudut dilatasi (*dilatancy angle*) dinyatakan dalam derajat. Bolton 1986, dalam kaitannya dengan Plaxis, merekomendasikan korelasi sudut gesekan dengan sudut dilatasi untuk tanah kohesif $\psi = \phi - 30$. Untuk tanah kohesif yang

cenderung memiliki dilatansi yang kecil, maka nilai $\psi = 0$ realistis untuk digunakan dalam kasus umum.

12. Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dihasilkan oleh butir - butir tanah terhadap desakan atau tarikan yang bekerja pada tanah tersebut. Kekuatan ini sangat penting dalam analisis stabilitas tanah dan desain struktur, karena menentukan kemampuan tanah untuk menahan beban tanpa mengalami keruntuhan. Kuat geser tanah penting dalam berbagai aplikasi Teknik Sipil seperti analisis daya dukung fondasi, analisis stabilitas lereng, dan desain struktur penahan tanah. Kuat geser tanah dapat dijelaskan melalui teori oleh Mohr-Coulomb dengan Persamaan 3.28 sebagai berikut.

$$\tau = c + \sigma \tan (\varphi) \quad (3.28)$$

dengan:

τ = kuat geser tanah (kN/m^2)

c = kohesi tanah (kN/m^2)

σ = tegangan normal bidang geser (kN/m^2)

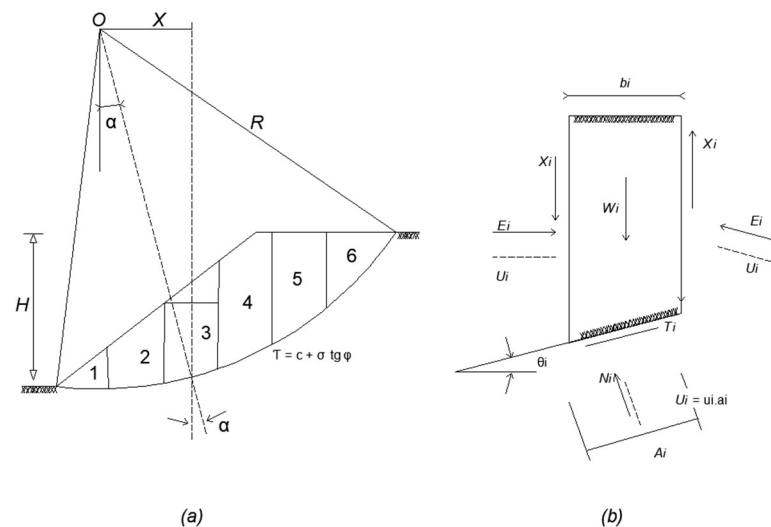
φ = sudut gesek dalam tanah ($^{\circ}$)

Parameter kuat geser tanah ditentukan dari beberapa pengujian laboratorium terhadap benda uji yang diambil dari lapangan yaitu dari hasil pengeboran tanah yang dianggap mewakili. Tanah yang berasal dari lapangan diusahakan kondisinya tidak berubah, terutama pada contoh asli (*undisturbed*), dimana letak permasalahannya adalah kadar air harus dijaga dan susunan tanah di lapangan diusahakan tidak berubah. Pengaruh kerusakan pada benda uji akan berakibat fatal terutama pada pengujian tanah lempung. Adapun terdapat beberapa cara untuk menentukan kuat geser tanah, sebagai berikut:

- a. Uji geser langsung (*direct shear test*).
- b. Uji triaksial (*triaxial test*).
- c. Uji tekan bebas (*unconfined compression test*).
- d. Uji geser kipas (*vane shear test*).

3.7 Metode Fellenius

Metode Fellenius yang banyak dikenal juga sebagai *Method of Slices*, digunakan untuk melakukan analisis stabilitas lereng dalam ilmu geoteknik. Metode ini dilakukan dengan membagi lereng menjadi beberapa irisan dan menganalisis gaya yang bekerja pada masing - masing irisan. Perhitungannya menjadi lebih sederhana dibandingkan metode lain seperti metode bishop atau janbu. Analisis stabilitas lereng Fellenius (1927) menganggap gaya - gaya yang bekerja pada sisi kanan - kiri dari sembarang irisan mempunyai resultan nol pada arah tegak lurus bidang longsor. Dengan anggapan ini, analisis keseimbangan vertikal dan gaya - gaya yang bekerja dengan memperhatikan tekanan air pori bisa dilakukan. Gaya - gaya yang bekerja pada irisan dapat dilihat pada Gambar 3.9 sebagai berikut.



Gambar 3. 9 Gaya-Gaya Yang Bekerja Pada Irisan
(Sumber: Hardiyatmo, 2003)

1. Gaya – gaya yang bekerja

Gaya – gaya yang bekerja pada irisan dengan mempertimbangkan tekanan air pori menggunakan Persamaan 3.29 berikut.

$$\begin{aligned} N_i &= W_i \cos \theta_i - U_i \\ &= W_i \cos \theta_i - u_i a_i \end{aligned} \quad (3.29)$$

2. Faktor keamanan

Faktor keamanan menggunakan Persamaan 3.30 sebagai berikut.

$$F = \frac{\sum M_r}{\sum M_d} \quad (3.30)$$

dengan:

$\sum M_r$ = jumlah momen dari tahanan geser sepanjang bidang longsor

$\sum M_d$ = jumlah momen dari berat massa tanah yang longsor

3. Lengan momen

Lengan momen dari berat massa tanah tiap irisan adalah $R \sin \theta$, maka menggunakan Persamaan 3.31 sebagai berikut.

$$\sum M_d = R \sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i \quad (3.31)$$

dengan:

R = jari-jari lingkaran bidang longsor

n = jumlah irisan

W_i = berat massa tanah irisan ke- i

4. Momen tahanan tanah

Menggunakan cara yang sama, momen yang menahan tanah akan longsor menggunakan Persamaan 3.32 sebagai berikut.

$$\sum M_r = R \sum_{i=1}^{i=n} (ca_i + N_i tg \varphi) \quad (3.32)$$

sehingga Persamaan untuk faktor aman menjadi Persamaan 3.33 sebagai berikut.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (ca_i + N_i tg \varphi)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (3.33)$$

Bila terdapat air pada lereng, tekanan air pori pada bidang longsor tidak menambah momen akibat tanah yang akan longsor (M_d) karena resultan gaya

akibat tekanan air pori lewat titik pusat lingkaran. Substitusi diperoleh Persamaan 3.34 sebagai berikut.

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} ca_i + (W_i \cos \theta_i - u_i a_i) \operatorname{tg} \theta}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (3.34)$$

dengan:

F = faktor aman

c = kohesi tanah (kN/m^2)

φ = sudut gesek dalam tanah ($^{\circ}$)

a_i = panjang lengkung lingkaran pada irisan ke-i (m)

W_i = berat irisan tanah ke-I (kN)

u_i = tekanan air pori pada irisan ke-i (kN/m^2)

θ_i = sudut yang didefinisikan dalam gambar ($^{\circ}$)

Jika terdapat gaya-gaya selain berat tanahnya sendiri, seperti beban bangunan diatas lereng, maka momen akibat beban ini diperhitungkan sebagai M_d .

Metode *Fellenius* menghasilkan faktor aman yang lebih rendah dari cara hitungan yang lebih teliti. Batas - batas nilai kesalahan dapat mencapai kira - kira 5 sampai 40% tergantung dari faktor aman, sudut pusat lingkaran yang dipilih, dan besarnya tekanan air pori. Walaupun analisis ditinjau dalam tinjauan tegangan total kesalahan masih merupakan fungsi dari faktor aman dan sudut pusat dari lingkaran (Whitman dan Baily, 1967). Cara ini telah banyak digunakan dalam praktek, karena cara hitungan sederhana dan kesalahan yang terjadi pada sisi yang aman.

3.8 Kriteria Faktor Keamanan

Faktor keamanan lereng untuk acuan dalam menganalisis kestabilan suatu lereng tanah adalah didasarkan pada pertimbangan antara biaya dan konsekuensi kegagalan lereng terhadap tingkat tidak pastinya kondisi analisis. Kriteria faktor keamanan lereng bisa dilihat pada Tabel 3.9 sebagai berikut.

Tabel 3. 9 Kriteria Faktor Keamanan

Biaya dan konsekuensi dari kegagalan lereng	Tingkat ketidakpastian kondisi analisis	
	Rendah	Tinggi
Biaya perbaikan sebanding dengan biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,25	1,5
Biaya perbaikan lebih besar dari biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,5	2,0 atau lebih

Sumber: SNI 8460 (2017)

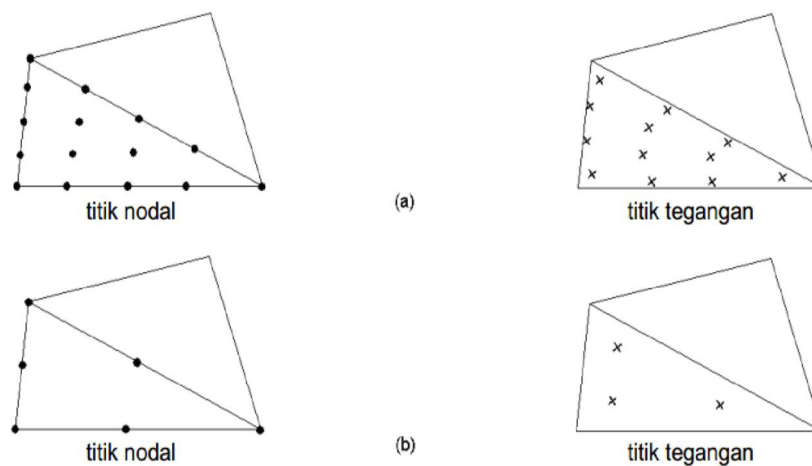
Selain daripada faktor keamanan lereng secara umum diatas, Indonesia sebagai suatu daerah yang mempunyai potensi bencana seperti gempa yang tinggi. Maka dari itu, perlu dilakukan analisis dengan mempertimbangkan faktor keamanan disertai dengan pengaruh beban gempa. Faktor keamanan minimum yang disyaratkan untuk analisis menggunakan model pseudostatik adalah lebih besar dari 1,1 ($FK > 1,1$) dengan menggunakan koefisien seismik yang didapatkan dari percepatan puncak dipermukaan (PGA) dengan penentuan kelas situs dan faktor amplifikasi (SNI 8460:2017).

3.9 Plaxis Versi 20

Plaxis V20 merupakan pembaruan yang signifikan pada rangkaian perangkat lunak Plaxis. Perangkat lunak ini digunakan secara luas dalam rekayasa geoteknik untuk menganalisis deformasi dan stabilitas dalam berbagai aplikasi seperti penggalian, fondasi, pembuatan terowongan, dan pertambangan. Prosedur pembuatan model secara grafis yang mudah memungkinkan pembuatan suatu model elemen hingga yang rumit dapat dilakukan dengan cepat (Brinkgreve, 2007), adapun model-model material dalam melakukan tahapan simulasi terhadap perilaku dari tanah, diantaranya sebagai berikut.

1. Model Linier Elastic.
2. Model Mohr Coulomb.
3. Model Jointed Rock.
4. Model Hardening soil.
5. Model Soft Soil.
6. Model Soft Soil Creep.

Di dalam program Plaxis, digunakan elemen segitiga dengan enam nodal dan elemen segitiga dengan lima belas nodal sebagai elemen hingga (Gambar 3.10). Elemen segitiga dengan lima belas nodal merupakan suatu elemen yang sangat akurat untuk menghasilkan kualitas tegangan tingkat tinggi dalam masalah - masalah yang sulit. Penggunaan elemen ini membutuhkan memori yang besar dan dalam perhitungan relatif lambat. Oleh karena itu, penggunaan elemen yang lebih sederhana dapat menjadi pilihan. Elemen segitiga dengan enam nodal merupakan suatu elemen yang cukup akurat yang memberikan hasil yang baik dalam deformasi standar. Ilustrasi titik nodal dan tegangan dapat dilihat pada Gambar 3.10 sebagai berikut.



Gambar 3. 10 Titik Nodal dan Titik Tegangan

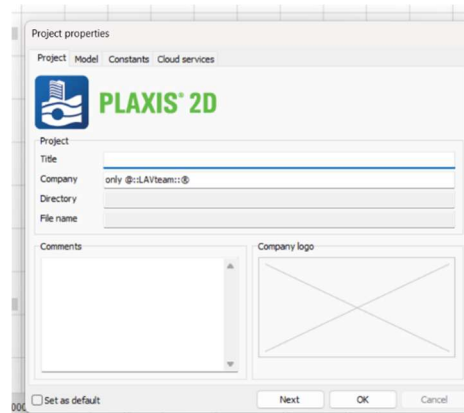
(Sumber: Brinkgreve, 2007)

Pemodelan *finite element* dengan aplikasi *software* Plaxis dipergunakan untuk melakukan perhitungan deformasi selama konstruksi pada timbunan di atas tanah lunak. Langkah-langkah perhitungan sebagai berikut.

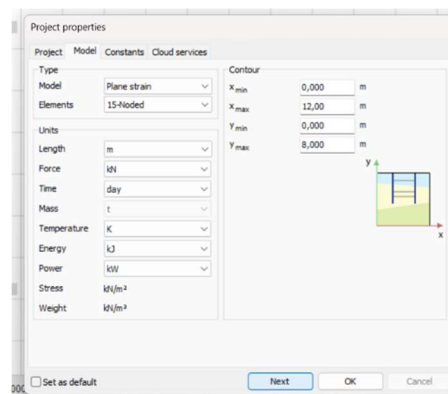
1. Memulai Program

Diasumsikan bahwa program telah terinstalasi dengan menggunakan prosedur yang dijelaskan dalam informasi Umum. Disarankan untuk membuat direktori yang terpisah untuk penyimpanan berkas data. Plaxis dalam kelompok program Plaxis. Pengguna diminta untuk mendefinisikan permasalahan baru atau membuka proyek yang telah ada. Jika pengguna memilih untuk membuka proyek yang telah ada, program memberikan daftar empat buah proyek paling akhir yang pernah dibuka yang dapat dibuka secara langsung. Memilih <<<berkas lainnya>>> yang berada posisi baris paling atas dari daftar ini memunculkan permintaan berkas dimana pengguna dapat memilih dan membuka proyek manapun yang telah ada.

2. Jika sebuah proyek baru dimulai, jendela pengaturan global seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.13 akan muncul. Jendela ini terdiri dari dua lembar-tab pertama berbagai pengaturan atau proyek harus diberikan. Nama berkas belum dispesifikasikan di sini, tetapi harus diberikan data menyimpan proyek. Penggunaan dapat memasukkan keterangan singkat mengenai permasalahan sebagai judul dari proyek atau deskripsi yang lebih mendetail dalam kotak komentar. Judul ini digunakan sebagai nama berkas dan muncul dalam setiap penggambaran keluaran. Kotak komentar merupakan tempat yang baik untuk menyimpan informasi tentang analisis. Selain itu, jenis analisis dan jenis elemen harus ditentukan di sini. Suatu nilai percepatan atau percepatan, di samping percepatan gravitasi, dapat dimasukkan untuk simulasi pseudo-statik dari beban-beban dinamis. Lembar-tab kedua ditunjukkan pada Gambar 3.11. Selain satuan dasar Panjang, Gaya dan Waktu, dimensi atau ukuran minimum dari bidang gambar harus ditetapkan di sini, sehingga model geometri dapat termuat dengan baik dalam bidang gambar. Sistem sumbu global positif adalah sumbu x mengarah ke kanan, sumbu y mengarah ke atas dan sumbu z mengarah ke pengguna.



Gambar 3. 11 Pengaturan Global Lembar Tab Proyek
(Sumber : Plaxis, 2024)

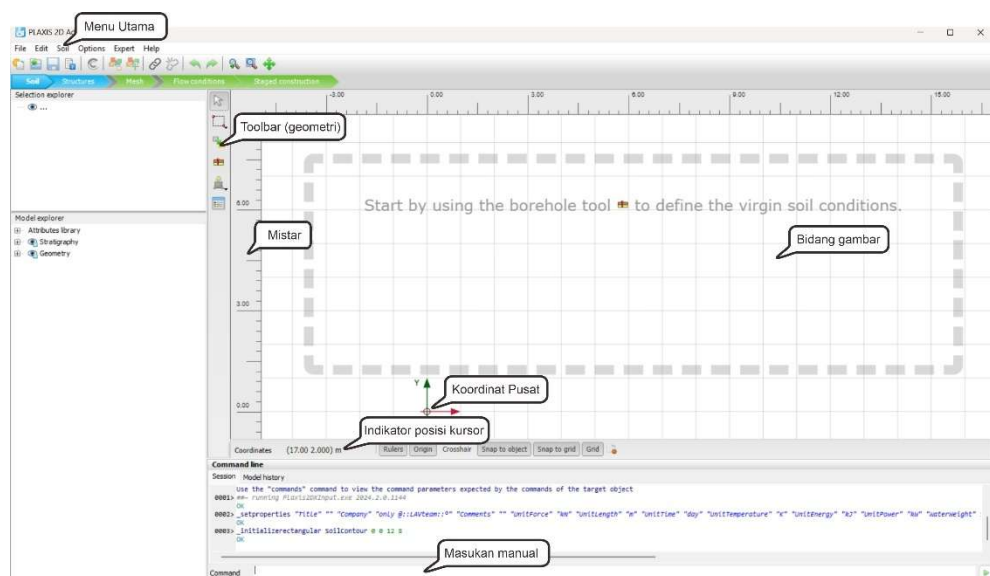


Gambar 3. 12 Pengaturan Global Lembar Tab Dimensi
(Sumber: Plaxis, 2024)

Model geometri 2 dimensi dalam Plaxis dibuat dalam bidang x-y sumbu z hanya digunakan untuk keluaran tegangan saja. Kiri adalah koordinat x terkecil dari model, Kanan adalah koordinat x terbesar dari model, Bawah adalah koordinat y terkecil dari model dan Atas adalah koordinat y terbesar dari model. Dalam praktek, bidang gambar yang terbentuk berdasarkan nilai-nilai yang diberikan mempunyai dimensi yang lebih besar dari pada nilai-nilai yang dimaksudkan dalam keempat spin edit tersebut. Hal ini terjadi akibat Plaxis secara otomatis menambahkan sedikit margin pada ukuran bidang gambar dan akibat perbedaan rasio lebar terhadap tinggi antara nilai-nilai yang dimasukkan dan ukuran layar.

3. Membuat Model Geometri

Saat pengaturan global telah diisi dan tombol <OK> di-klik, maka jendela Masukan utama muncul. Jendela utama ini ditunjukkan pada Gambar 3.13. Bagian-bagian terpenting dari jendela utama ditunjukkan dan dibahas secara singkat di bawah ini.



Gambar 3. 13 Jendela Utama Program Masukan
(Sumber : Plaxis, 2024)

Untuk kedua *toolbar*, nama dan fungsi dari tiap tombol di tampilkan setelah meletakkan posisi kursor pada tombol tertentu selama kurang-lebih satu detik; sebuah petunjuk muncul dalam sebuah kotak berwarna kuning dibawah tombol yang bersangkutan. Bantuan dapat ditampilkan oleh pengguna dengan menekan tombol <F1> pada papan ketik. Bantuan ini menyediakan latar belakang informasi tentang bagian tertentu yang dipilih dari program.

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Penelitian dilakukan pada area candi Dawangsari, Prambanan, Yogyakarta. Penelitian ini meliputi analisis stabilitas lereng dengan kondisi tanah asli menggunakan program Plaxis, kemudian didapatkan output berupa nilai *safety factor*. Parameter analisis menggunakan kontur kemiringan lereng pada tanah eksisting, sehingga didapatkan dimensi dan beberapa syarat yang diperlukan dalam perencanaan dinding penahan tanah dan *sheet pile* yang mencegah potensi terjadinya longsor setelah candi dipugar sesuai kondisi asli. Dari analisis tersebut, diharapkan dapat ditentukan kondisi mana yang menghasilkan faktor keamanan (*safety factor*) yang paling baik, sehingga pada perencanaan kekuatan stabilitas lereng dapat dijadikan sebagai acuan untuk kondisi tanah yang direkomendasikan.

4.2 Data Penelitian

Data penelitian ini merupakan data sekunder pengujian tanah area candi Dawangsari, data sekunder yang dimaksud meliputi:

1. Data tanah yang meliputi data tanah uji lapangan. Data tanah uji lapangan yaitu data dari hasil pengujian *hand boring* dan properties tanah dalam bentuk tabel dan grafik,
2. Data lapisan tanah,
3. Data lereng.

4.3 Tahapan Penelitian

Data penelitian ini proses penelitian dibagi menjadi beberapa tahapan, diantaranya sebagai berikut.

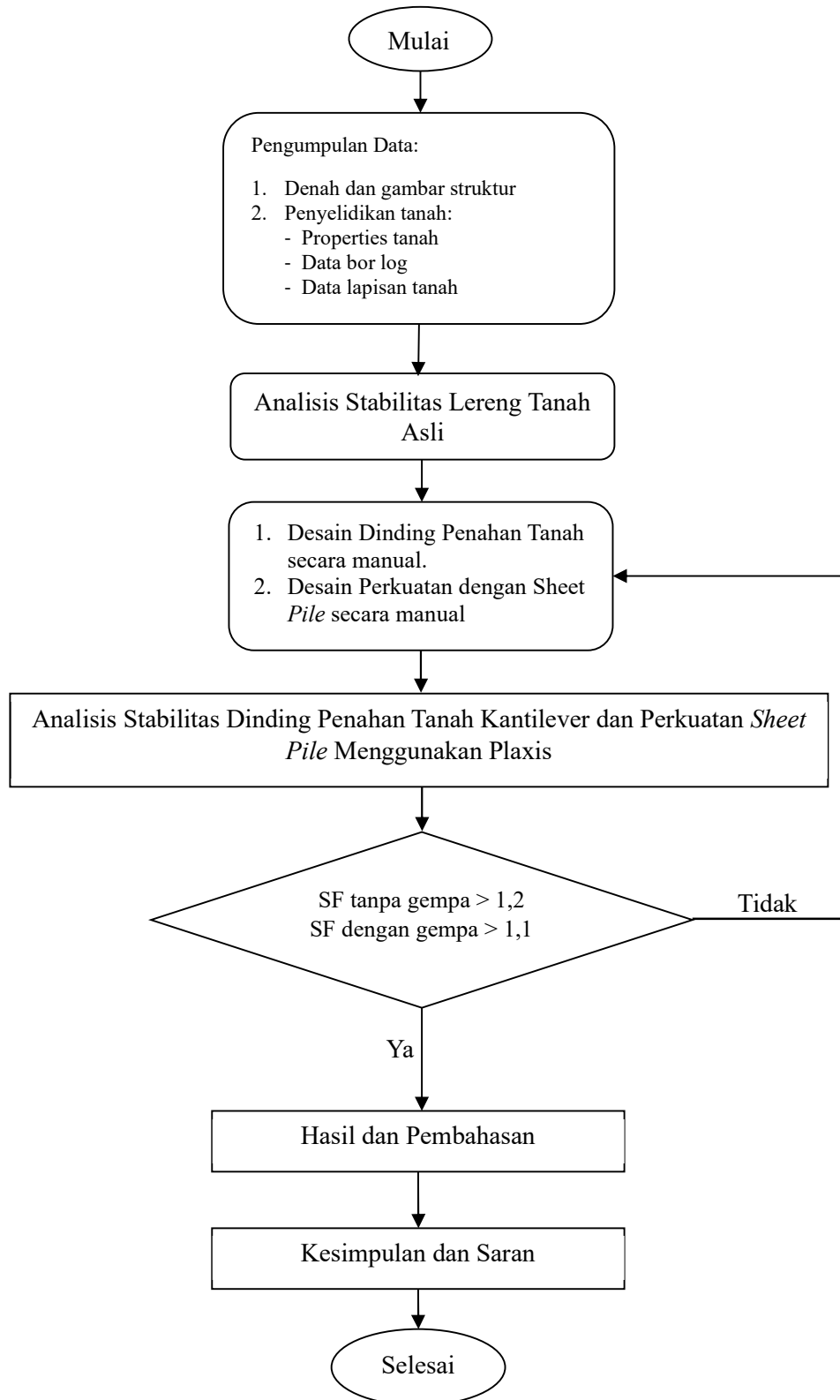
1. Tahap pengumpulan data, dimana tahap ini meliputi tahap pengambilan data tanah (data uji lapangan dan laboratorium) yang dibutuhkan untuk keperluan

analisis dari Laporan Penyelidikan Tanah Proyek Rekonstruksi Stupa Dawangsari 2022.

2. Tahap analisis dan pengolahan data, pada tahap ini data yang telah diambil (data uji lapangan dan data laboratorium), kemudian diolah dengan logika dan teori yang berlaku sebagai koreksi (analisis dengan program Plaxis), selanjutnya dapat ditentukan tindak lanjut dari hasil program Plaxis.
3. Tahap pembahasan dan penarikan kesimpulan, tahap ini dilakukan penulisan ke dalam laporan yang dimana berisi hasil – hasil yang telah didapatkan dari tahapan analisis, kemudian dihasilkan solusi dari masalah – masalah yang timbul dan diambil kesimpulan berdasarkan teori yang ada.

4.4 Bagan Alir

Bagan alir (*flow chart*) menunjukkan langkah – langkah yang ditempuh dalam proses penelitian. Dengan adanya bagan alir membantu kita melakukan evaluasi prosedur yang ada apakah sudah optimal atau sebaliknya untuk dapat melakukan improvement atau perbaikan. Jalannya penelitian dalam Tugas Akhir ini dapat dilihat pada bagan alir pada Gambar 4.1 di bawah ini.



Gambar 4. 2 Bagan Alir Penelitian

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Gambaran Umum

Penelitian ini akan meninjau kondisi lereng asli area sekitar Candi Dawangsari dengan rencana perkuatan tanah berupa dinding penahan tanah dan *sheet pile*. Perencanaan perkuatan lereng dilakukan untuk mempersiapkan pemugaran Stupa Candi Dawangsari yang saat ini belum tersusun sesuai kondisi pada masa lampau.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode fellenius dan analisis program Plaxis V20. Tujuan dari analisis pada penelitian ini adalah mengetahui angka aman serta merencanakan dimensi yang efektif untuk mendapatkan rencana perkuatan lereng yang efisien.

5.2 Parameter Penelitian

Penyelidikan tanah (*soil investigation*) merupakan langkah paling awal dalam suatu kegiatan proyek yang berkaitan dengan perencanaan suatu bangunan bawah (struktur tanah). Kegiatan ini diharapkan memberikan informasi tentang kondisi tanah, jenis tanah, muka air tanah, lapisan struktur tanah dan sifat-sifat tanah untuk perencanaan fondasi maupun dinding penahan tanah.

Fondasi merupakan struktur suatu bangunan yang berfungsi untuk meneruskan berat dan beban bangunan pada tanah dasar, jenis dan dimensi fondasi harus sedemikian, sehingga tanah dasar mampu mendukung beban yang berada di atasnya, serta penurunan yang terjadi akibat beban bangunan masih dalam toleransi yang aman bagi bangunan. Tanah dasar fondasi biasanya merupakan bahan/material yang susunannya amat rumit dan beraneka ragam. Data sidat-sifat propertis tanah, struktur perlapisan tanah serta data teknis tanah dasar merupakan faktor yang sangat penting dalam perancangan jenis, kedalaman dan daya dukung fondasi.

Tabel 5. 1 Hasil Pengujian *Hand Boring* BH-1

Titik Boring	Kedalaman (m)	Jenis Tanah
BH-1	0,00 – 1,80	Lanau berlempung warna coklat terdapat batu kapur
	1,80 – 2,50	Lanau berlempung mengandung pasir halus warna coklat terang
	2,50 – 2,70	Lanau berlempung mengandung pasir dan kerikil warna coklat
	2,70 – 3,35	Batu pasir dan kerikil warna putih
BH-2	0,00 – 0,50	Lanau berlempung warna hitam
	0,5 – 1,40	Lanau berlempung warna coklat kekuningan
	1,40 – 2,00	Lanau berlempung mengandung pasir halus warna coklat terang
	2,00 – 2,40	Lanau berlempung mengandung pasir dan kerikil warna coklat
	2,40 – 2,40	Batu pasir dan kerikil warna putih
BH-3	0,00 – 0,50	Lanau berlempung warna hitam
	0,5 – 1,20	Lanau berlempung warna coklat kekuningan
	1,20 – 2,20	Lanau berlempung mengandung pasir halus warna coklat terang
	2,20 – 2,60	Batu pasir dan kerikil warna putih
BH-4	0,00 – 0,50	Lanau berlempung warna hitam
	0,5 – 1,00	Batu pasir dan kerikil warna putih

Sumber: Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah X (2022)

5.2.2 Muka Air Tanah

Pada saat dilakukan penyelidikan di lapangan pada tanggal 15 Februari 2022. Pekerjaan penyelidikan tanah dilakukan dalam keadaan cuaca cerah hingga pada kedalaman 3,5-meter dari muka tanah setempat belum dijumpai muka air tanah.

Maka dari itu menggunakan asumsi muka air tanah berada pada kedalaman 4 meter dari muka tanah.

5.2.3 Pengujian Laboratorium

Secara umum jenis tanah pada lokasi penyelidikan merupakan tanah lanau lempungan dengan batuan dasar berupa batu pasir dengan kedalaman bervariasi antara 0,50 – 2,00-meter dari muka tanah setempat. Secara lengkap hasil pengujian laboratorium terhadap contoh tanah yang sudah diambil dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut ini.

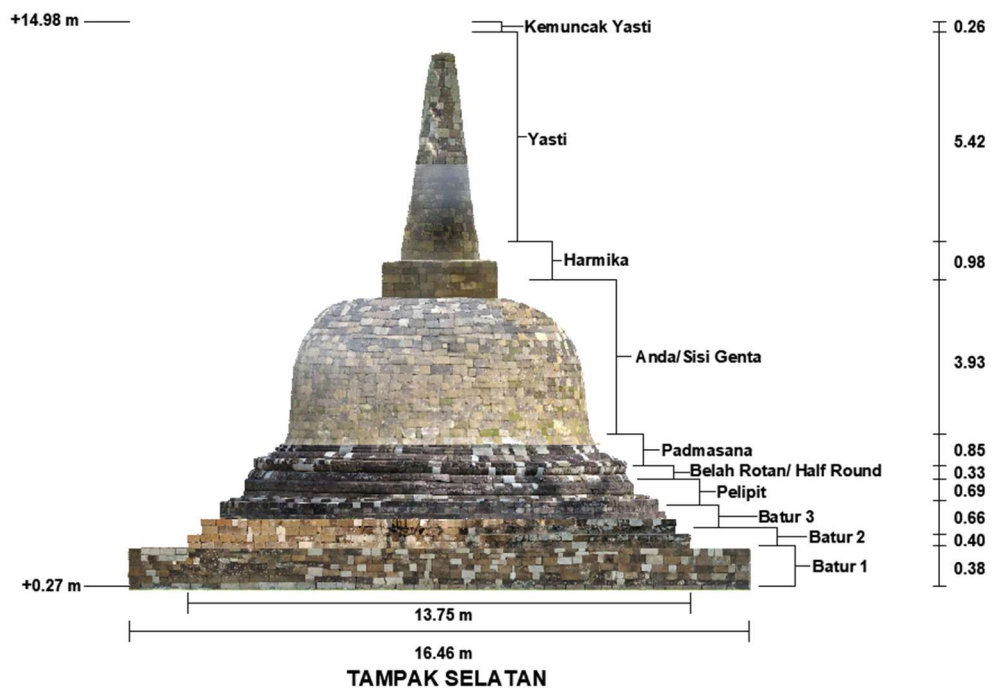
Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Laboratorium Tanah

No	Parameter Uji	Satuan	Hasil Uji			
			HB 1 (1,00-1,50 m)	HB 2 (1,00-1,50 m)	HB 3 (1,5- 2,0 m)	HB 4 (0,0- 0,5 m)
A. Soil Properties						
<i>Soil properties</i>	Kadar air	%	31,53	33,22	26,32	33,33
	Berat jenis tanah		2,638	2,550	2,623	2,578
	Berat vol tanah basah	gr/cm^3	1,798	1,586	1,634	1,798
	Berat volume tanah kering	gr/cm^3	1,367	1,190	1,293	1,348
	Angka pori, e		0,93	1,14	1,03	0,91
	Porositas, n	%	48,18	53,32	50,69	47,70
	Derajat kejenuhan	%	89,44	74,17	67,15	94,21
<i>Grain Size Analysis</i>	Kandungan krikil	%	0,00	0,00	0,00	0,00
	Kandungan pasir	%	12,39	26,27	27,57	24,92
	Kandungan lempung	%	25,51	25,29	16,34	9,21
	D10 (mm)	mm	-	-	-	0,0023
	D30 (mm)	mm	0,0032	0,0251	0,0251	0,0129
	D60 (mm)	mm	0,0417	0,0512	0,0606	0,0519
	<i>Uniformity coefficient, Cu</i>		-	-	-	22,6466
	Passing #200	%	86,71	73,73	72,43	75,08
<i>Engineering Properties</i>	<i>Total friction angle, ϕ</i>		29,20	27,40	27,70	21,90
	<i>Cohesion, c</i>	kg/cm^2	0,21	0,47	0,34	0,38

Sumber: Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah X (2022)

5.2.4 Beban Stupa Dawangsari

Pada kondisi masa lampau telah diperkirakan bentuk asli dari stupa Candi Dawangsari. Perhitungan beban candi dilakukan dengan cara menghitung volume batu tiap lapisan candi dikalikan dengan berat jenis batu alam. Berikut adalah rincian perhitungan tiap lapis dari Stupa Candi Dawangsari. Gambar rencana rekonstruksi stupa Dawangsari dapat dilihat pada Gambar 5.2 sebagai berikut.



Gambar 5.2 Rencana Rekonstruksi Stupa Dawangsari

1. Perhitungan Volume Batuan Stupa Candi

a. Lapis Fondasi atau Alas Batur

$$V1 = P \times l \times t$$

$$V1 = 18,16 \times 18,16 \times 0,69$$

$$V1 = 230,19 \text{ m}^3$$

b. Lapis Batur 1

$$V2 = P \times l \times t$$

$$V2 = 16,36 \times 16,36 \times 1,2$$

$$V2 = 317,28 \text{ m}^3$$

c. Lapis Batur 2

$$V3 = P \times l \times t$$

$$V3 = 13,75 \times 13,75 \times 0,4$$

$$V3 = 75,33 \text{ m}^3$$

d. Lapis Batur 3

$$V4 = P \times l \times t$$

$$V4 = 12,95 \times 12,95 \times 0,66$$

$$V4 = 110,55 \text{ m}^3$$

e. Lapis Pelipit

$$V5 = \pi \times r^2 \times t$$

$$V5 = \pi \times 5,91^2 \times 0,69$$

$$V5 = 75,55 \text{ m}^3$$

f. Lapis Belah Rotan

$$V6 = \pi \times r^2 \times t$$

$$V6 = \pi \times 5,05^2 \times 0,33$$

$$V6 = 26,43 \text{ m}^3$$

g. Lapis Padmasana

$$V7 = \pi \times r^2 \times t$$

$$V7 = \pi \times 4,86^2 \times 0,85$$

$$V7 = 63,20 \text{ m}^3$$

h. Lapis Genta

$$V8 = \frac{(\pi \times r^2) + (\pi \times r^2) + (\pi \times r^2)}{3} \times t$$

$$V8 = \frac{(\pi \times 4,1^2) + (\pi \times 3,7^2) + (\pi \times 1,5^2)}{3} \times 3,92$$

$$V8 = 137,23 \text{ m}^3$$

i. Lapis Harmika

$$V9 = \pi \times r^2 \times t$$

$$V9 = \pi \times 1,5^2 \times 0,98$$

$$V9 = 6,92 \text{ m}^3$$

j. Lapis Yasti

$$V_{10} = \frac{(\pi \times r^2) + (\pi \times r^2)}{2} \times t$$

$$V_{10} = \frac{(\pi \times 1,04^2) + (\pi \times 0,32^2)}{2} \times 5,57$$

$$V_{10} = 10,36 \text{ m}^3$$

k. Lapis Kemuncak Yasti

$$V_{11} = \frac{1}{3} \times \pi \times r^2 \times t$$

$$V_{11} = \frac{1}{3} \times \pi \times 1,5^2 \times 0,98$$

$$V_{11} = 0,04 \text{ m}^3$$

l. Total Volume Batuan Stupa

$$V_{total} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 + V_7 + V_8 + V_9 + V_{10} + V_{11}$$

$$V_{total} = 84,21 + 321,19 + 75,63 + 110,68 + 75,71 + 26,44 + 63,2 + 137,23 + 6,92 + 10,36 + 0,04$$

$$V_{total} = 911,62 \text{ m}^3$$

2. Perhitungan Volume Pasangan Batu Kali

a. Batur Tengah

$$V_1 = p \times l \times t \times \text{jumlah batur}$$

$$V_1 = 2,52 \times 1,33 \times 1,33 \times 1$$

$$V_1 = 4,46 \text{ m}^3$$

b. Batur Pinggir

$$V_2 = p \times l \times t \times \text{jumlah batur}$$

$$V_2 = 2,52 \times 4,99 \times 1,67 \times 4$$

$$V_2 = 84,00 \text{ m}^3$$

c. Batur Tengah

$$V_3 = p \times l \times t \times \text{jumlah batur}$$

$$V_3 = 5,30 \times 1,30 \times 1,30 \times 1$$

$$V_3 = 8,96 \text{ m}^3$$

d. Batur Pinggir

$$V4 = p \times l \times t \times \text{jumlah batur}$$

$$V4 = 4,76 \times 4,99 \times 1,67 \times 4$$

$$V4 = 158,67 \text{ m}^3$$

e. Volume Total Pasangan Batu Kali

$$V_{total} = V1 + V2 + V3 + V4$$

$$V_{total} = 4,46 + 84,00 + 8,96 + 158,67$$

$$V_{total} = 256,09 \text{ m}^3$$

3. Perhitungan Beban Total Batuan Stupa

a. Beban Batuan Candi

$$V = V_{total} \text{ batuan candi} - V_{total} \text{ pasangan batu kali}$$

$$V = 911,62 - 256,08$$

$$V = 655,54 \text{ m}^3$$

b. Berat Batuan Candi

$$Q = V \times \text{Berat Jenis Batu Andesit}$$

$$Q = 655,54 \times 2.771$$

$$Q = 1.816.510,95 \text{ Kg}$$

4. Perhitungan Beban Total Pasangan Batu Kali

a. Beban Batu

$$Qb = V \times \text{Berat Jenis Batu Kali}$$

$$Qb = 655,54 \text{ m}^3 \times 2.711 \text{ Kg/ m}^3$$

$$Qb = 1.816.510,95 \text{ Kg}$$

b. Beban Pasangan Batu Kali

$$Qk = V \times \text{Berat Jenis Batu Kali}$$

$$Qk = 256,08 \text{ m}^3 \times 2.200 \text{ Kg/ m}^3$$

$$Qk = 563.376,71 \text{ Kg}$$

c. Beban Dinamis

$$Qd = 100 \text{ kg/ m}^2 \times \text{Luas Penampang}$$

$$Qd = 100 \text{ kg/ m}^2 \times (18,25 \times 18,25)$$

$$Qd = 33.306,25 \text{ Kg}$$

d. Angka Aman

$$Q_{sf} = (Q_b + Q_k + Q_d) \times 10\%$$

$$Q_{sf} = (1.816.510,96 + 563.376,71 + 33.306,25) \times 10\%$$

$$Q_{sf} = 241.319,39 \text{ Kg}$$

e. Beban Total

$$Q_{tot} = Q_b + Q_k + Q_d + Q_{sf}$$

$$Q_{tot} = 1.816.510,95 + 563.376,71 + 33.306,25 + 241.319,39$$

$$Q_{tot} = 2.654.513,31 \text{ Kg}$$

f. Beban Total Per Satuan Luas

$$Q_f = \frac{Q_{tot}}{\text{Luas Penampang}} \times 10000$$

$$Q_f = \frac{2.654.513,31}{333,06} \times 10000 \times 98.0665$$

$$Q_f = 78,16 \text{ KN/m}^2$$

5.2.5 Beban Gempa

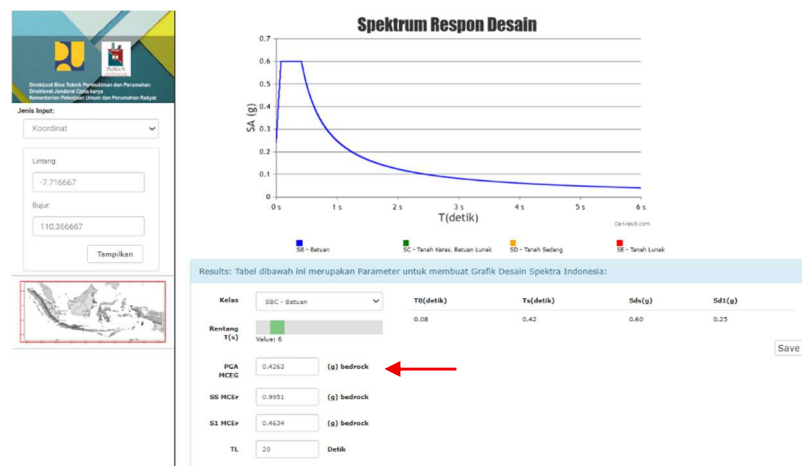
Beban gempa yang digunakan dalam analisa stabilitas lereng ini adalah beban gempa dinamik. Pada wilayah Candi Dawangsari memiliki percepatan puncak gempa (PGA) antara 0.4 - 0.5 g. Dapat dilihat koefisien situs pada Tabel 5.3 sebagai berikut.

Tabel 5. 3 Koefisien Situs F_{PGA}

Kelas Situs	PGA ≤ 0,1	PGA = 0,2	PGA = 0,3	PGA = 0,4	PGA = 0,5	PGA ≥ 0,6
<i>SA</i>	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
<i>SB</i>	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
<i>SC</i>	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
<i>SD</i>	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1
<i>SE</i>	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1
<i>SF</i>	<i>SS</i> ^(a)					

Sumber: SNI 1726 (2019)

Data mengenai respon spektrum desain daerah Candi Dawangsari yang berada di Sleman, Yogyakarta dan didapatkan PGA sebesar 0,4263 g yang didapat dari PUSKIM dapat dilihat pada Gambar 5.3 sebagai berikut.



Gambar 5.3 Desain Spektra Indonesia
(Sumber: Desain Spektra Indonesia, 2025)

5.3 Analisis Stabilitas Lereng Asli

Pada tahap analisis stabilitas lereng dilakukan dengan memodelkan lereng. Pemodelan dilakukan dengan membuat elevasi lereng sesuai dengan data yang didapat dari *Google Earth* ataupun pengukuran lapangan secara langsung. Garis elevasi tanah ditunjukkan pada Gambar 5.4 sebagai berikut.



Gambar 5.4 Garis Elevasi
(Sumber: Google Earth)

Sedangkan sebagai langkah validasi dilakukan pengukuran dilapangan menggunakan alat GPSMAP 65S dan didapatkan elevasi 204 mdpl pada dasar lereng dan 215 mdpl pada titik teratas lereng Dawangsari. Gambar hasil pengukuran dapat dilihat pada Gambar 5.5 sebagai berikut.



(a)

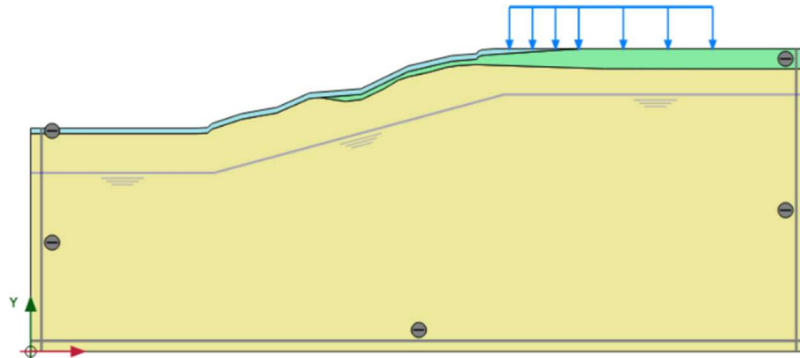


(b)

Gambar 5.5 Pengukuran Lapangan Elevasi Lereng: (a) Titik Terbawah Elevasi Lereng (b) Titik Teratas Elevasi Lereng

Pada saat pengukuran awal, dilakukan pemugaran pada Stupa Dawangsari dan dikhawatirkan dengan kondisi lereng tersebut terjadi longsor pada tanah mengingat bangunan candi akan dipugar dan disusun kembali sesuai kondisi awal zaman dahulu. Berikut detail irisan lereng secara melintang didapatkan dari Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah X dapat dilihat pada Gambar 5.6 sebagai berikut.

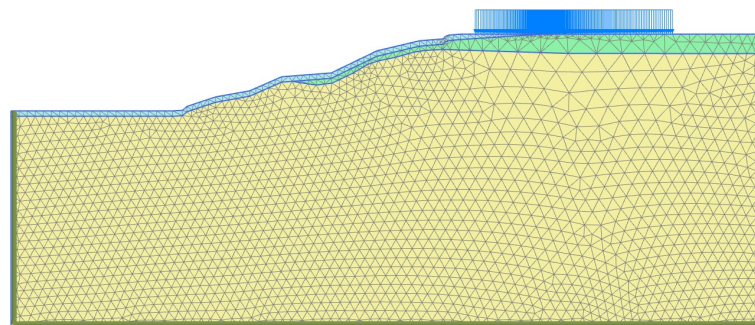
terhadap potongan melintang lereng asli dilakukan dengan visual dua dimensi. Gambar pemodelan dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut ini.



Gambar 5.8 Pemodelan Lereng Asli Dengan Program Plaxis

5.3.2 Pembuatan Jaring Elemen Lereng Asli Dengan Program Plaxis V20

Tahap selanjutnya adalah membagi model menjadi geometri elemen imajiner (*meshing*). Tahap *meshing* pada analisis kali ini menggunakan distribusi elemen jenis *fine*. Hasil output *meshing* atau jaring – jaring yang telah dimodelkan dapat dilihat pada Gambar 5.9 berikut.



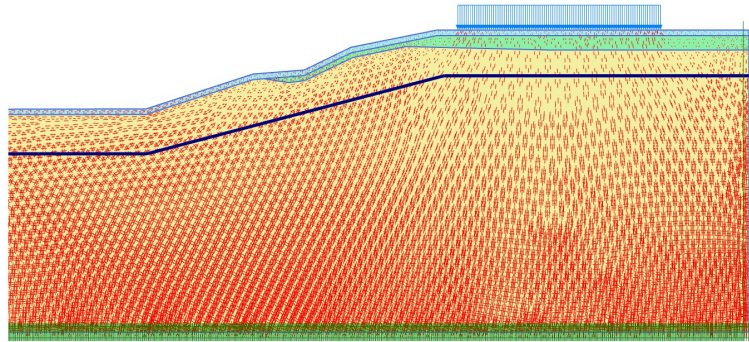
Gambar 5.9 Meshing Lereng Asli Dalam Program Plaxis

5.3.3 Tahap Perhitungan Lereng Asli Dengan Program Plaxis V20

1. Perhitungan tegangan awal

Proses ini disebut juga memasukkan beban gravitasi (*gravity load*). Dalam tahap perhitungan ini melibatkan struktur tanah dan batuan pembentuk lereng. Tujuan utama dalam proses ini adalah menghasilkan tegangan in-situ yang realistis dalam tanah, mencapai kesetimbangan gaya dan momen, dan menetapkan kondisi awal yang stabil sebagai referensi analisis selanjutnya. Hasil proses

perhitungan tegangan awal (*initial phase*) dapat dilihat pada Gambar 5.10 sebagai berikut.



Gambar 5.10 Perhitungan Tegangan Awal Dalam Plaxis

2. Proses Calculation

Pada tahap ini, perhitungan dilakukan dengan mengaktifasi parameter – parameter tanah yang telah dimasukkan sebelumnya beserta dengan plastic analysis untuk mengetahui penurunan yang terjadi. Kali ini memasuki staged construction sebagai loading input dimana ditemukan beberapa tahap analisis seperti gravity load, berat sendiri, beban candi, *safety factor* total tanpa pengaruh gempa, dan *safety factor* total dengan pengaruh variabel gempa.

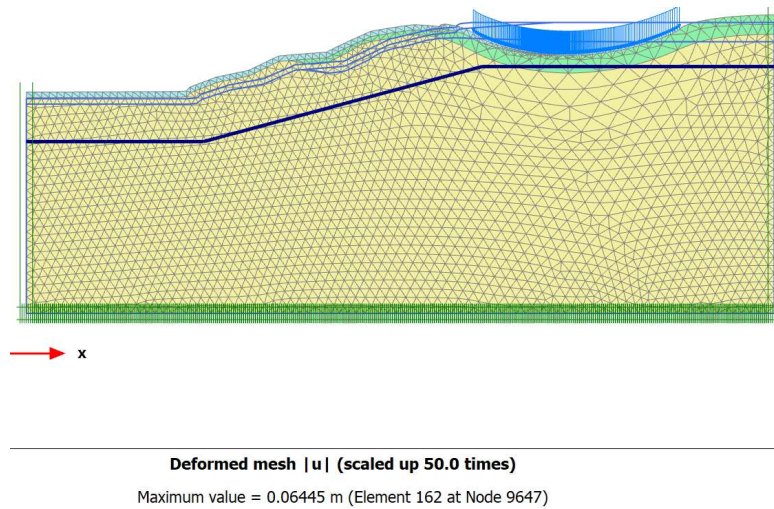
5.3.4 Hasil Output Program Lereng Asli Dengan Program Plaxis V20

Output hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 dapat dikehui angka aman dan besar penurunan yang terjadi pada lereng yang dimaksud. Hasil perhitungan dapat dilihat sebagai berikut.

1. Hasil perhitungan lereng asli tanpa beban gempa

a. *Deformed Mesh*

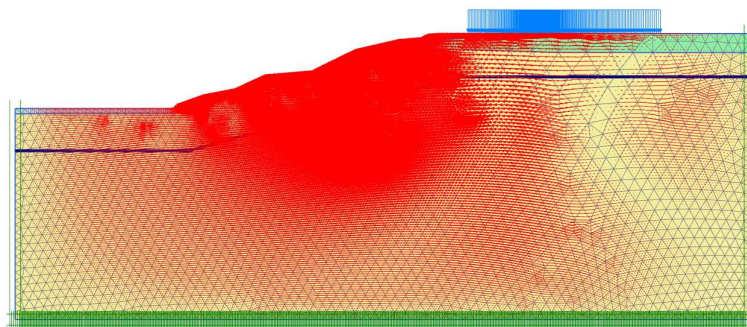
Hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 pada tahap *deformed mesh* tanpa beban gempa kali ini diperoleh 0,06445 m. Hasil berupa visual gambar dapat dilihat pada Gambar 5.11 sebagai berikut.



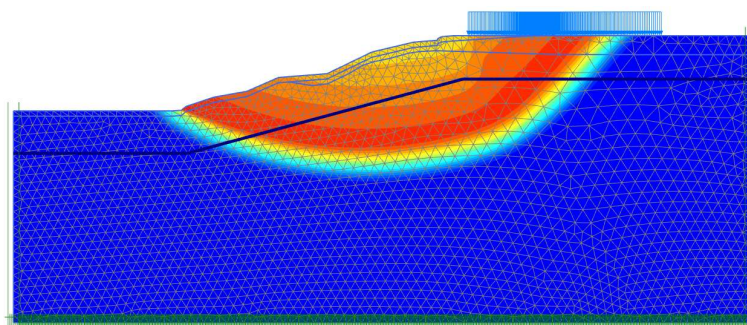
Gambar 5.11 Deformed Mesh Lereng Asli Tanpa Beban Gempa

b. Arah Pergerakan dan Daerah Potensial Longsor

Pergerakan arah dan daerah potensial longsor tanpa input beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.12 dan 5.13 sebagai berikut.



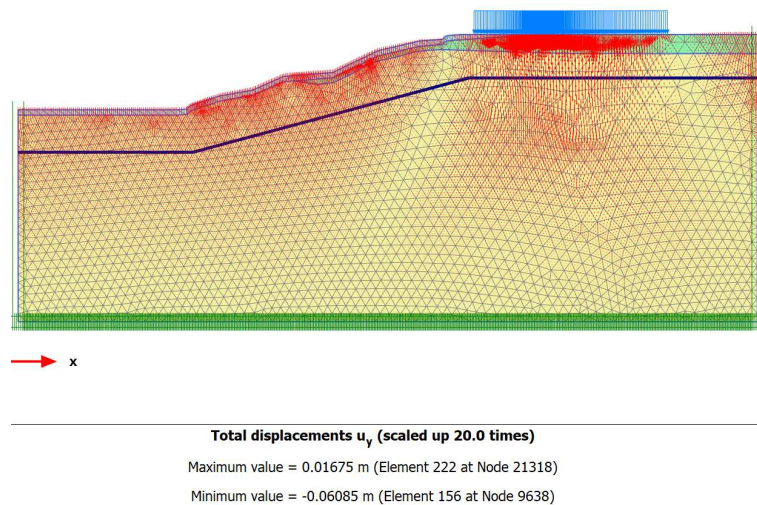
Gambar 5.12 Pergerakan Lereng Asli Tanpa Beban Gempa



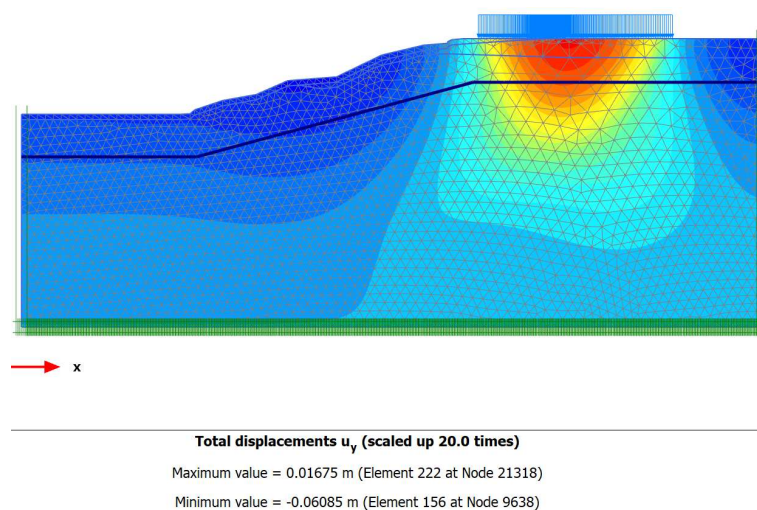
Gambar 5. 13 Daerah Potensi Longsor Lereng Asli Tanpa Beban Gempa

c. Penurunan

Peninjauan dan perhitungan penurunan lereng asli tanpa beban gempa dilakukan dengan tujuan mengetahui seberapa besar penurunan terjadi pada model lereng. Hasil penurunan yang diperoleh menurut perhitungan komputasi Plaxis V20 adalah sebesar 0,06085 m. Visual berupa gambar kondisi penurunan dapat dilihat pada Gambar 5.14 dan 5.15 sebagai berikut.



Gambar 5.14 Arah Penurunan Lereng Asli Tanpa Beban Gempa



Gambar 5.15 Daerah Penurunan Lereng Asli Tanpa Beban Gempa

d. Angka Keamanan

Hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 didapatkan angka keamanan pada lereng asli tanpa beban gempa sebesar 1,865 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.16 berikut.

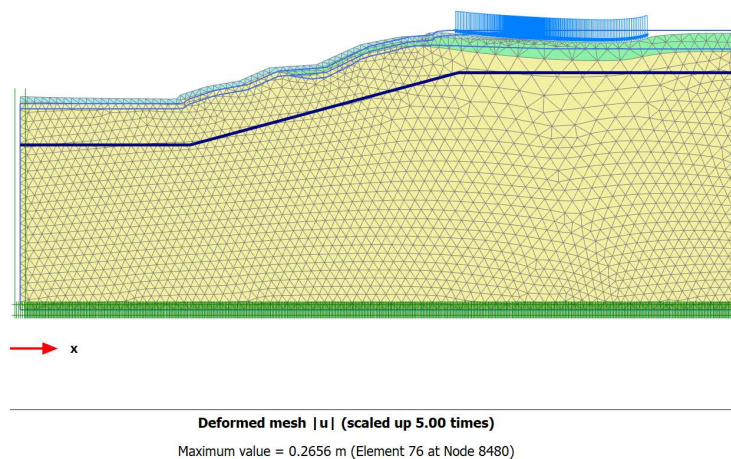
Reached values	
Reached total time	0.000 day
CSP - Relative stiffness	0.3257E-12
ForceX - Reached total force X	0.000 kN/m
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN/m
Pmax - Reached max pp	203.2 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase proportion	0.000
ΣM_{weight} - Reached weight proportion	1.000
ΣM_{sf} - Reached safety factor	1.865

Gambar 5.16 Nilai Safety Factor Lereng Asli Tanpa Beban Gempa

2. Hasil Perhitungan Lereng Asli Dengan Beban Gempa

a. *Deformed Mesh*

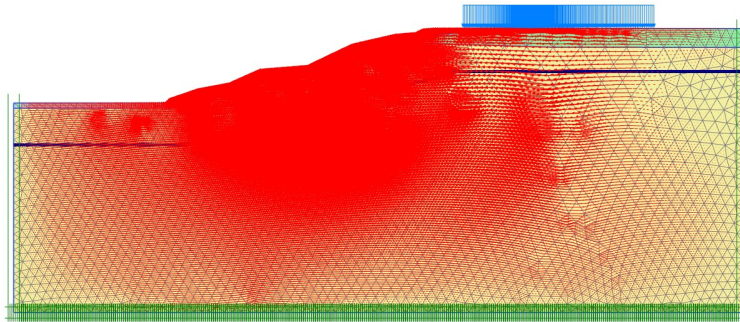
Hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 pada tahap *deformed mesh* disertai beban gempa kali ini diperoleh 0,2656 m. Hasil berupa visual gambar dapat dilihat pada Gambar 5.17 sebagai berikut.



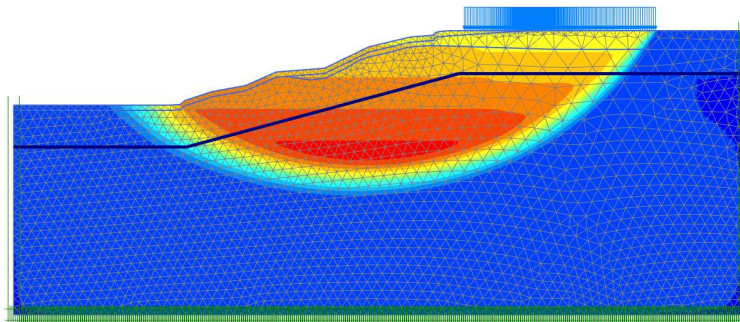
Gambar 5.17 *Deformed Mesh* Lereng Asli Dengan Beban Gempa

b. Arah Pergerakan dan Daerah Potensial Longsor

Pergerakan arah dan daerah potensial longsor dengan input beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.18 dan 5.19 sebagai berikut.



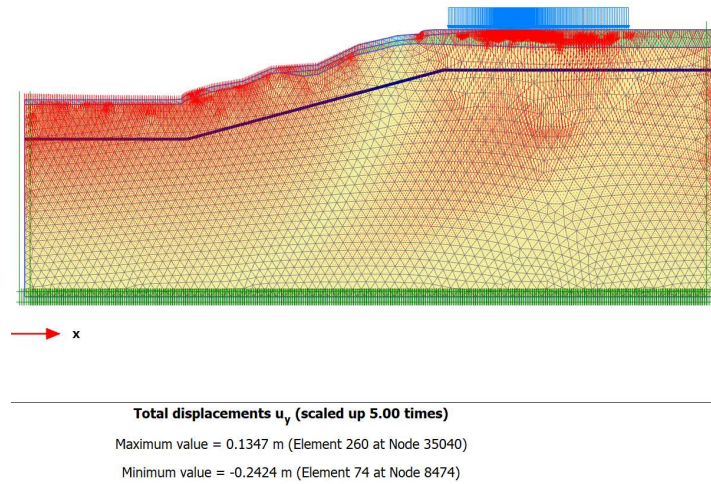
Gambar 5.18 Arah Peregerakan Lereng Asli Dengan Beban Gempa



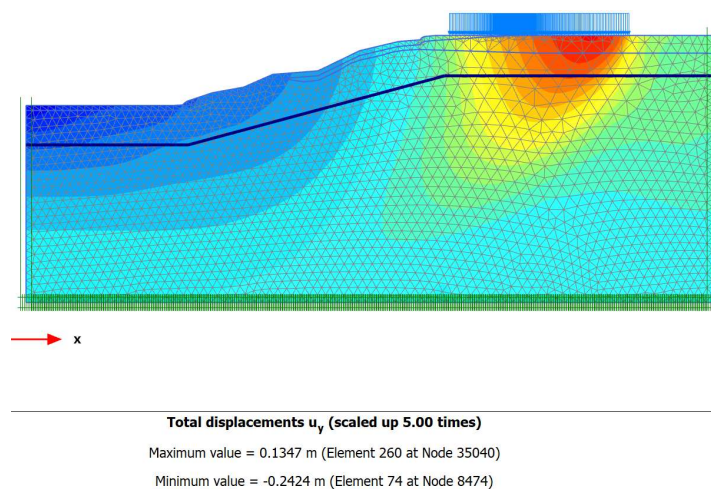
Gambar 5.19 Daerah Potensi Longsor Lereng Asli Dengan Beban Gempa

c. Penurunan

Peninjauan dan perhitungan penurunan lereng asli tanpa beban gempa dilakukan dengan tujuan mengetahui seberapa besar penurunan terjadi pada model lereng. Hasil penurunan yang diperoleh menurut perhitungan komputasi Plaxis V20 adalah sebesar 0,2424 m. visual berupa gambar kondisi penurunan dapat dilihat pada Gambar 5.20 dan 5.21 sebagai berikut.



Gambar 5.20 Arah Penurunan Lereng Asli Dengan Beban Gempa



Gambar 5.21 Daerah Penurunan Lereng Asli Dengan Beban Gempa

Hal tersebut bisa terjadi beberapa faktornya antara lain parameter tanah yang tidak realistis atau sesuai, konfigurasi model yang menyebabkan ketidakseimbangan gaya, beban diatas tanah yang terlalu besar, dan lain sebagainya.

d. Angka Keamanan

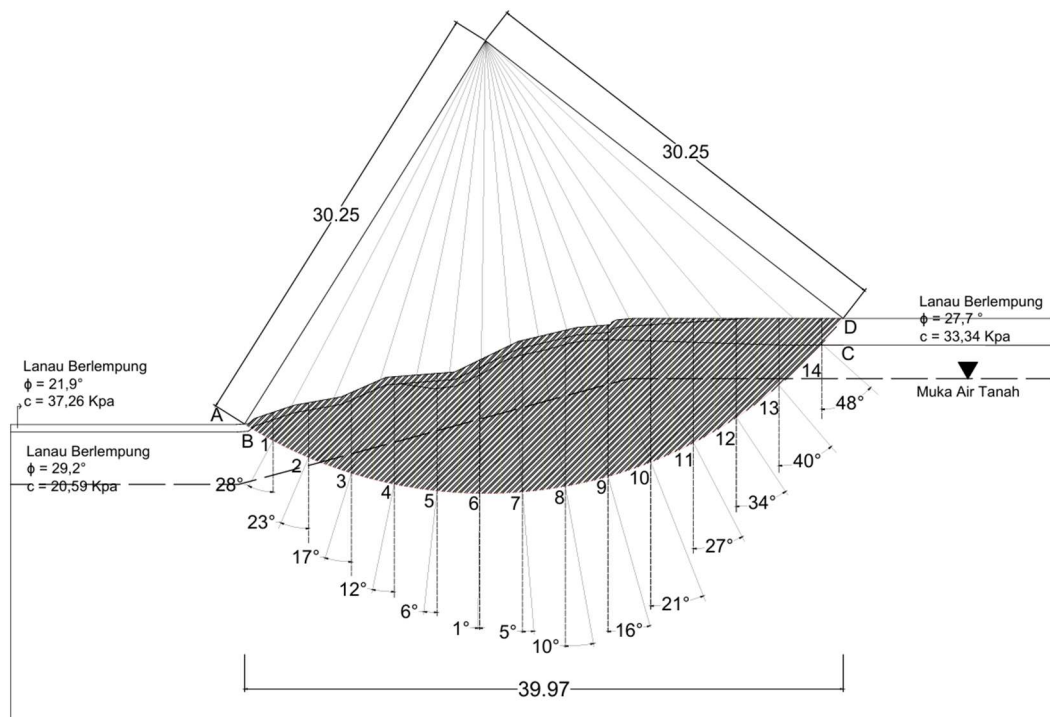
Hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 didapatkan angka keamanan pada lereng asli tanpa beban gempa sebesar 1,025 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.22 berikut.

Reached values	
Reached total time	0.000 day
CSP - Relative stiffness	-8.091E-12
ForceX - Reached total force X	0.000 kN/m
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN/m
Pmax - Reached max pp	206.0 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase proportion	0.000
ΣM_{weight} - Reached weight proportion	1.000
ΣM_{sf} - Reached safety factor	1.025

Gambar 5.22 Nilai Safety Factor Lereng Asli Dengan Beban Gempa

5.3.5 Analisis Lereng Asli Menggunakan Perhitungan Manual Metode *Fellenius*

Perhitungan manual juga dapat dilakukan pada objek tanah seperti lereng. Terdapat beberapa metode untuk menghitung manual sebuah lereng, salah satunya adalah metode *Fellenius*. Metode *Fellenius* dilakukan untuk mendapatkan nilai *safety factor* pada lereng. Perhitungan dilakukan pada daerah yang dinilai memiliki potensi keruntuhan. Gambar detail irisan daerah keruntuhan lereng asli dapat dilihat pada Gambar 5.23 sebagai berikut.



Gambar 5.23 Irisan Daerah Keruntuhan Lereng

Seperti yang dapat dilihat pada gambar diatas, bidang longsor pada penelitian ini terbagi menjadi 12 irisan. Panjang total bidang longsor ke arah horizontal

sepanjang 32,26 meter. Pada irisan 1 dan 2 mempunyai lebar 2,13 meter, sedangkan irisan lainnya mempunyai panjang 2,8 meter. Dalam perhitungan ini juga disertakan bagaimana muka air tanah mempengaruhi hasil angka aman karena banyak area yang terdapat muka air tanah dalam penggambaran kondisi melalui aplikasi Autocad. Berikut contoh perhitungan manual lereng asli menggunakan Metode *Fellenius* pada irisan 6.

1. Perhitungan Radians

$$\begin{aligned} \text{Rad}_6 &= \alpha \times \frac{\pi}{180} \\ &= 38^\circ \times \frac{\pi}{180} \\ &= 0,6632 \end{aligned}$$

2. Perhitungan Berat Irisan

$$\begin{aligned} W_6 &= \gamma \times A_6 \\ &= 17,5 \times 16,64 \\ &= 291,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

3. Perhitungan Sin α

$$\begin{aligned} \text{Sin}_\alpha &= \text{Sin}(\alpha_6) \\ &= \text{Sin}(38) \\ &= 0,6157 \end{aligned}$$

4. Perhitungan Cos α

$$\begin{aligned} \text{Sin}_\alpha &= \text{Cos}(\alpha_6) \\ &= \text{Cos}(38) \\ &= 0,788 \end{aligned}$$

5. Perhitungan $W_t \times \text{Sin } \alpha$

$$\begin{aligned} W_{t6} &= W_t \times \text{Sin } \alpha \\ &= 291,2 \text{ kN} \times 0,6157 \\ &= 179,2806 \text{ kN} \end{aligned}$$

6. Perhitungan $W_t \times \text{Cos } \alpha$

$$\begin{aligned} W_{t6} &= W_t \times \text{Cos } \alpha \\ &= 291,2 \text{ kN} \times 0,788 \\ &= 229,4687 \text{ kN} \end{aligned}$$

7. Perhitungan U_i (Pengaruh Muka Air Tanah)

$$\begin{aligned} U_{i6} &= \text{luas pias yang terdapat muka air tanah} \times \gamma_w \\ &= 14,114 \times 9.81 \\ &= 138,462 \text{ kN} \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil dari perhitungan lereng asli menggunakan Metode *Fellenius* dapat dilihat pada Tabel 5.4 sampai 5.6 berikut.

Tabel 5. 4 Tabel Rekapitulasi Perhitungan Lereng Asli Dengan Metode *Fellenius*

No	Lapisan Tanah	Luas Irisan	Berat	Sudut Irisan	Radian	Wt.Cos θ	Wt.Sin θ	Ui=ui.ai	Wt.Cos θ - Ui
		m ²	kN	derajat		kN	kN	kN	kN
1	1	1.286	22.680	-28	-0.489	20.03	-10.65	0,000	20.025
	3	2.762	48.691			42.99	-22.86		
2	1	1.428	25.170	-23	-0.401	23.17	-9.83	1,370	23.169
	3	8.958	157.944			145.39	-61.71		
3	1	1.428	25.170	-17	-0.297	24.07	-7.36	35,565	24.070
	3	13.984	246.573			235.80	-72.09		
4	1	1.428	25.170	-12	-0.209	24.62	-5.23	77.809	24.620
	2	0.118	1.886			1.84	-0.39		
	3	18.755	330.679			323.45	-68.75		
5	1	1.428	25.170	-6	-0.104	25.03	-2.63	111,989	25.032
	2	1.255	20.115			20.00	-2.10		
	3	19.676	346.925			345.02	-36.26		
6	1	1.428	25.170	-1	-0.017	25.17	-0.44	138,462	25.166
	2	1.331	21.331			21.33	-0.37		
	3	22.638	399.159			399.10	-6.97		
7	1	1.428	25.170	5	0.087	25.07	2.19	157,362	25.074
	2	1.274	20.415			20.34	1.78		
	3	25.986	458.178			456.43	39.93		

Tabel 5. 5 Lanjutan Tabel Rekapitulasi Perhitungan Lereng Asli Dengan Metode *Fellenius*

No	Lapisan Tanah	Luas Irisan	Berat	Sudut Irisan	Radian	Wt.Cos θ	Wt.Sin θ	Ui=ui.ai	Wt.Cos θ - Ui
		m ²	kN	derajat		kN	kN	kN	kN
8	1	1.428	25.170	10	-0.175	24.79	4.37	168,611	24.787
	2	1.317	21.105			20.78	3.66		
	3	26.935	474.923			467.71	82.47		
9	1	1.475	26.007	16	-0.279	25.00	7.17	171,915	25.000
	2	1.780	28.521			27.42	7.86		
	3	25.980	458.072			440.33	126.26		
10	1	1.212	21.365	21	-0.367	19.95	7.66	155,863	19.946
	Candi					44.21	16.97		
	2	3.086	49.448			46.16	17.72		
	Candi					112.59	43.22		
	3	23.078	406.918			379.89	145.83		
Candi			842.00	323.21					
11	1	0.678	11.960	27	-0.471	10.66	5.43	119,573	10.656
	Candi					47.24	24.07		
	2	3.880	62.170			55.39	28.22		
	Candi					270.19	137.67		
	3	19.122	337.163			300.41	153.07		
	Candi					1331.69	678.53		

Tabel 5. 6 Lanjutan Tabel Rekapitulasi Perhitungan Lereng Asli Dengan Metode *Fellenius*

No	Lapisan Tanah	Luas Irisan	Berat	Sudut Irisan	Radian	Wt.Cos θ	Wt.Sin θ	Ui=ui.ai	Wt.Cos θ - Ui
		m ²	kN	derajat		kN	kN	kN	kN
12	1	0.157	2.766	34	0.593	2.29	1.55	72,405	2.293
	Candi		12.263			10.17	6.86		
	2	4.658	74.641			61.88	41.74		
	Candi		364.077			301.83	203.59		
	3	14.057	247.857			205.48	138.60		
	Candi		1098.711			910.87	614.39		
13	2	5.051	25.517	40	0.698	19.55	16.40	15,659	19.547
	Candi		394.817			302.45	253.78		
	3	7.659	58.656			44.93	37.70		
	Candi		598.604			458.56	384.78		
14	2	3.793	14.388	48	0.838	9.63	10.69	0,0000	9.627
	Candi		296.469			198.38	220.32		
	3	0.637	0.614			0.41	0.46		
	Candi		49.788			33.31	37.00		
Jumlah						9171,69	3480,49	1226,52	

Hasil dari pengukuran tanah pada lapisan 1 didapatkan panjang garis lengkung (A-B) = 0,561 meter, (B-C) = 44,490 meter, dan (C-D) = 2,336 meter. Dengan demikian maka dilanjutkan dengan perhitungan nilai tahanan longsoran yang dikerjakan oleh komponen kohesi sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Sigma c_{iai} &= (AB \times c_1) + (BC \times c_3) + (CD \times c_2) \\ &= (0,561 \times 37,26) + (44,490 \times 20,59) + \\ &\quad (2,336 \times 33,34) \\ &= 1014,80 \text{ kN}\end{aligned}$$

Nilai tahanan longsor oleh gesekan pada dua lapisan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}(Wt \cos \theta - U_i) \times \tan \varphi &= (W \cos \theta \text{ lapis 1} \times \tan \varphi_1) + (W \cos \theta \text{ lapis 2} \times \tan \\ &\quad \tan \varphi_2) + (W \cos \theta \text{ lapis 3} \times \tan \varphi_3) + (W \cos \theta \text{ beban}) \\ &= 249,83 \times \tan 20,59^\circ + 304,32 \times \tan 33,34^\circ + \\ &\quad 3787,35 \times \tan 29,2^\circ + 4863,48 \\ &= 7240,37 \text{ kN}\end{aligned}$$

Pada tanah paling atas terdapat *surchARGE load* yang perlu diperhitungkan menurut SNI 8470:2017 sebesar 10 kN/m^2 (tidak menggunakan beban asli karena berada 24 dari titik perkuatan. Gaya yang dihasilkan dari beban tersebut diperhitungkan sebagai gayayang menggerakkan tanah. Perhitungan gaya dilakukan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}qA &= (q \times A) \\ &= (10 \times 342,25) \\ &= 3422,50 \text{ kN}\end{aligned}$$

Sehingga nilai safety factor pada lereng asli dengan perhitungan metode fellenius adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}SF &= \frac{(\Sigma c_{iai}) + ((W_i \cos \theta - U_i) \times \tan \varphi)}{(Wt \times \sin \alpha) + (Beban \times Luas)} \\ &= \frac{(1014,80 + 7240,37 - 1226,52)}{(3480,49 - 3422,50)} \\ &= 1,018\end{aligned}$$

Hasil safety factor lereng asli didapatkan dari perhitungan metode fellenius dan gempa tidak diperhitungkan adalah 1,018. Hasil tersebut agak berbeda dengan hasil safety factor dari program Plaxis sebesar 1,885 tanpa pengaruh gempa.

5.4 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan Dinding Penahan Tanah

Perkuatan tanah pada lereng Candi Dawangsari dilakukan dalam penelitian ini untuk mencapai nilai keamanan sesuai syarat dalam perencanaan geoteknik. Berdasarkan hasil analisis lereng asli tanpa perkuatan, faktor keamanan tanpa beban gempa sudah memenuhi karena didapatkan safety factor $1,865 > 1,25$ sedangkan saat disertai beban gempa didapatkan safety factor $1,025 < 1,1$. Maka dari itu perlu dilakukan perkuatan untuk mencapai safety factor yang disyaratkan agar saat pasca pugar keadaan lereng menopang beban candi Dawangsari. Salah satu alternatif perkuatan yang dilakukan adalah dinding penahan tanah.

5.4.1 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan Dinding Penahan Tanah Dengan Perhitungan Manual

Dinding penahan tanah perlu dianalisis untuk mengetahui kemampuan menahan beban yang bekerja terhadap dinding tersebut. Metode analisis dilakukan dengan perhitungan Plaxis V20 dan perhitungan manual. Pada langkah awal dilakukan *preliminary design* dengan asumsi tinggi dinding penahan tanah 6,5 meter sampai permukaan tanah lapis pertama. Tabel 5.7 dimensi dinding penahan tanah dapat dilihat sebagai berikut.

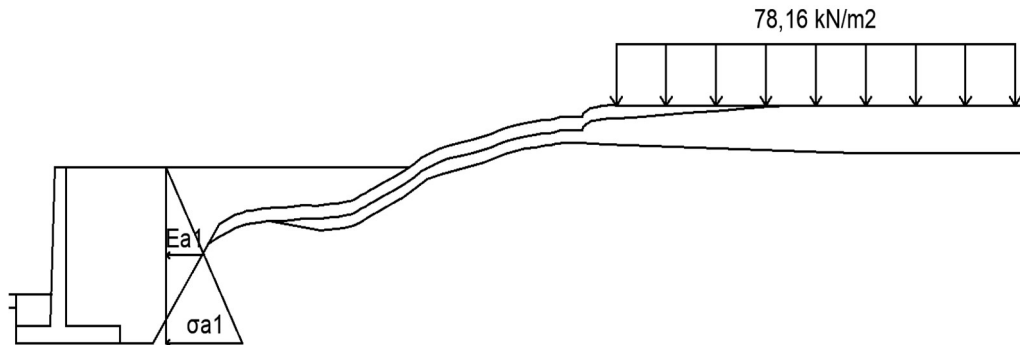
Tabel 5.7 Preliminary Design Dinding Penahan Tanah

Desain	Syarat	Dimensi yang Digunakan
<p>0.2 min</p> <p>H</p> <p>kemiringan dinding depan minimum 1:50</p> <p>$B/3$</p> <p>$D = H/12 - H/10$</p> <p>$B = 0,4 - 0,7 H$</p> <p>$D = H/12 - H/10$</p>	$H = 6 \text{ m}$	6,5 m
	$B = 0,4 - 0,7 H$	$0,7 H = 4.55 \text{ m}$
	$D = H/12 - H/10$	$D = H/10 = 0,65 \text{ m}$
	D	0,6 m
	$B/3$	1,5 m
	0,2 m (min)	0,5 m

Tahap selanjutnya setelah mendapatkan preliminary design dinding penahan tanah adalah melakukan analisis stabilitas internal. Analisis ini bertujuan demi mendapatkan angka aman terhadap faktor – faktor yang menjadi syarat keamanan seperti nilai pergeseran, penggulingan, dan keruntuhan pada tanah tinjau. Parameter beban yang digunakan pada perhitungan manual kali ini adalah beban sendiri tanah, beban candi Dawangsari, dan beban tanah diatas dinding penahan tanah. Perhitungan stabilitas dinding penahan tanah dengan tinjauan internal pada lereng candi Dawangsari adalah sebagai berikut.

1. Tekanan Tanah Lateral

Pada tahap ini memperhitungan tekanan tanah aktif dan tekanan tanah pasif. Namun, dalam perhitungan ini tidak disertakan tekanan tanah pasif karena dikhawatirkan ada faktor yang menghilangkan kontribusi tanah pasif seperti banjir dan lain sebagainya. Tetapi, hal tersebut membuat perhitungan ini menjadi risiko yang paling tinggi sehingga akan semakin aman jika diterapkan. Tekanan tanah aktif dihitung pada setiap lapisan. Diagram tekanan lateral dapat dilihat pada Gambar 5.24 sebagai berikut.



Gambar 5.24 Diagram Tekanan Tanah Lateral DPT

Berikut perhitungan untuk tekanan tanah lateral :

- a. Koefisien tekanan tanah aktif dan pasif

Untuk koefisien tekanan tanah aktif sebagai berikut.

$$\begin{aligned} K_a &= \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \\ &= \tan^2 \left(45 - \frac{29,2}{2} \right) \\ &= 0,34 \end{aligned}$$

- b. Perhitungan tekanan tanah sesuai kedalaman

Berikut ini adalah perhitungan tegangan horizontal tanah dengan kedalaman tanah eksisting.

$$\begin{aligned} \sigma_h &= K_a \times \gamma b \times z \\ &= 0,34 \times 17,632 \times 6,6 \\ &= 40,06 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

- c. Perhitungan gaya total aktif

Perhitungan gaya total tanah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{1}{2} \times \gamma \times K_a \times h \\ &= \frac{1}{2} \times 17,632 \times 0,34 \times 6,6 \\ &= 132,19 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan gaya total aktif tanah maka selanjutnya adalah menentukan titik berat sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Titik Berat (y)} &= \frac{1}{3} \times H \\
 &= \frac{1}{3} \times 6,6 \\
 &= 2,2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Kemudian gaya total dan titik berat dilakukan perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Eay &= Ea \times y \\
 &= 132,19 \times 2,2 \\
 &= 290,80 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

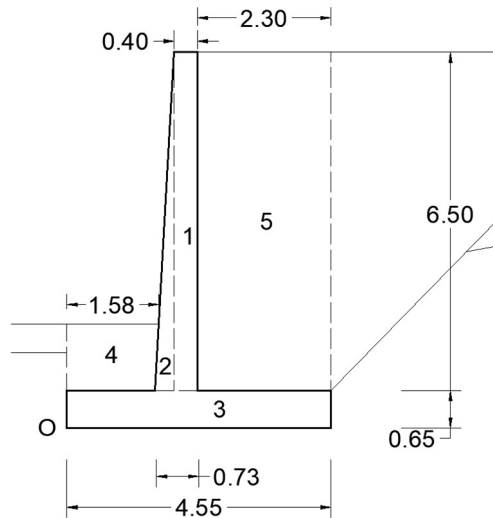
Setelah itu maka perlu mencari \bar{y} dengan perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \bar{y} &= \frac{Eai \times yi}{Eatot} \\
 &= \frac{290,80}{132,19} \\
 &= 2,2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Surcharge load yang dipakai pada penelitian ini adalah beban candi Dawangsari pasca pugar sebesar $78,16 \text{ kN/m}^2$.

2. Berat dan momen pada dinding penahan tanah

Perhitungan ini meliputi gaya pada berat struktur sendiri dan akibat berat tanah di belakang dinding penahan tanah. Semua gaya tersebut dibagi kedalam area pada dinding penahan tanah seperti bisa dilihat pada Gambar 5.25 sebagai berikut.



Gambar 5.25 Area Perhitungan Berat Dan Momen DPT

Berikut contoh perhitungan berat dan momen pada dinding penahan tanah area 1.

a. Perhitungan luas (A)

$$\begin{aligned} A &= P \times L \\ &= 5,85 \times 0,4 \\ &= 2,34 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

b. Perhitungan berat (W)

$$\begin{aligned} W &= A \times \gamma_{\text{concrete}} \\ &= 2,34 \times 23,58 \\ &= 55,18 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

c. Perhitungan lengan

$$\begin{aligned} \text{Lengan} &= H3 + H4 - \left(\frac{1}{2} \times H7\right) \\ &= 1,52 + 0,65 - \left(\frac{1}{2} \times 0,4\right) \\ &= 1,967 \text{ m} \end{aligned}$$

d. Perhitungan momen (M)

$$\begin{aligned} M &= W \times \text{Lengan} \\ &= 55,18 \times 1,967 \\ &= 108,52 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Hasil rekapitulasi perhitungan berat dan momen dinding penahan tanah dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut.

Tabel 5.8 Rekapitulasi Perhitungan Berat Dan Momen DPT

Area	Luas (m ²)	Berat (kN)	Jarak dari O (m)	Momen ke O (kNm)
1	2,34	55,18	1,967	108,52
2	0,81	19,16	1,683	32,25
3	2,96	69,74	2,275	158,65
4	1,94	34,13	0,610	20,82
5	15,49	273,15	3,358	917,33
Total		451,35		1237,56

3. Perhitungan daya dukung dinding penahan tanah

a. Stabilitas terhadap guling

Stabilitas terhadap guling dihitung dengan perbandingan momen yang menggulingkan dengan momen yang menahan. Momen guling dalam hal ini adalah tekanan tanah lateral aktif pada tanah depan dinding penahan tanah, sedangkan momen penahan yaitu diakibatkan dari momen berat sendiri dinding penahan tanah dan tanah yang berada di atasnya serta momen akibat tanah pasif yang ada di belakang dinding penahan tanah. Berikut ini adalah perhitungan stabilitas terhadap penggulingan.

$$\begin{aligned}
 FSo &= \frac{\sum MR}{\sum MO} \\
 &= \frac{1237,56}{290,80} \\
 &= 4,25
 \end{aligned}$$

F_s *overturning* > 1,5 maka stabilitas dinding penahan tanah terhadap penggulingan dinyatakan aman atau sudah terpenuhi.

b. Stabilitas terhadap geser

Tahanan geser pada dinding penahan tanah dengan lebar $B = 4,55$ m. Stabilitas ini diperhitungkan berdasarkan kemampuan dasar dinding penahan

tanah dimana terdapat kohesi dan berat jenis ditambahkan dengan berat dinding penahan tanah itu sendiri. Selanjutnya dibandingkan dengan gaya total yang melakukan pergeseran pada dinding penahan tanah Berikut ini adalah perhitungan stabilitas terhadap pergeseran.

$$\begin{aligned}
 F_{ss} &= \frac{\sum FR}{\sum FD} \\
 &= \frac{(\sum v \times \tan \varphi) + (B \times c)}{Ea} \\
 &= \frac{(451,35 \times \tan 29,2^\circ) + (4,55 \times 20,59)}{132,19} \\
 &= 2,61
 \end{aligned}$$

FS *sliding* > 1,5 maka stabilitas dinding penahan tanah terhadap pergeseran dinyatakan aman atau sudah terpenuhi.

c. Eksentrisitas

Eksentrisitas perlu menjadi pertimbangan dengan memperhitungkan jarak antara titik resultan gaya vertikal dengan pusat dinding penahan tanah. Perhitungan ini dilakukan agar tidak terjadi eksentrisitas berlebihan dan menjaga kestabilan seluruh struktur dinding penahan tanah. Proses perhitungan eksentrisitas adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{B}{2} - \left(\frac{\sum MR - \sum MO}{\sum V} \right) \\
 &= \frac{B}{2} - \left(\frac{1237,56 - 2,80}{451,35} \right) \\
 &= 0,177 < \frac{B}{6} \\
 &= 0,177 < \frac{4,55}{6} \\
 &= 0,177 < 0,758
 \end{aligned}$$

d. Tegangan kontak

Analisis tegangan minimum dan maksimum merupakan aspek penting dalam desain dinding penahan tanah untuk menentukan keamanan struktur terhadap daya dukung tanah. Berikut adalah perhitungan tegangan kontak dalam analisis dinding penahan tanah.

$$\begin{aligned}
 q \text{ maks} &= \frac{\Sigma V}{B} \times \left(1 + \frac{6e}{B}\right) \\
 &= \frac{451,35}{4,55} - \left(1 + \frac{6 \times 0,177}{4,55}\right) \\
 &= 122,40 \text{ KPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q \text{ min} &= \frac{\Sigma V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) \\
 &= \frac{451,35}{4,55} - \left(1 - \frac{6 \times 0,177}{4,55}\right) \\
 &= 75,99 \text{ KPa}
 \end{aligned}$$

Dalam perhitungan tegangan ini disyaratkan bahwa baik tegangan maksimum atau minimum harus lebih daripada nol. Maka dapat disimpulkan bahwa tegangan maksimum dan minimum telah memenuhi syarat.

e. Daya dukung tanah

Perhitungan daya dukung tanah merupakan metode perhitungan yang mempunyai andil besar dalam keberhasilan analisis stabilitas dinding penahan tanah. Dalam perhitungan ini digunakan model perhitungan dari Terzhagi dan angka N_c , N_q , N_γ diambil dengan interpolasi tabel Faktor Daya Dukung Terzhagi, kemudian perhitungan dapat dilihat sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Q \text{ Ultimate} &= c \times N_c + q \times N_q + 0,5 \times \gamma \times B \times N_\gamma \\
 &= (20,59 \times 35,26) + ((17,63 \times 6,6) \times 20,93) + \\
 &\quad (0,5 \times 17,632 \times 4,55 \times 18,10) \\
 &= 3888,009 \text{ KPa}
 \end{aligned}$$

f. *Safety Factor*

Perhitungan safety factor dilakukan dengan memperhitungkan momen penahan dibanding dengan momen pendorong. Momen pendorong dalam hal ini adalah tegangan maksimum dan penahannya adalah daya dukung tanah. Maka perhitungan *safety factor* adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 SF &= \frac{Q \text{ ultimate}}{Q \text{ toe}} \\
 &= \frac{3888,009}{122,40} \\
 &= 31,76 > 3
 \end{aligned}$$

Dalam perhitungan safety factor disyaratkan hasilnya adalah lebih dari 3. Maka dapat dinyatakan bahwa dimensi dinding penahan tanah dalam perhitungan ini sudah sesuai karena telah melebihi dari syarat – syarat diatas.

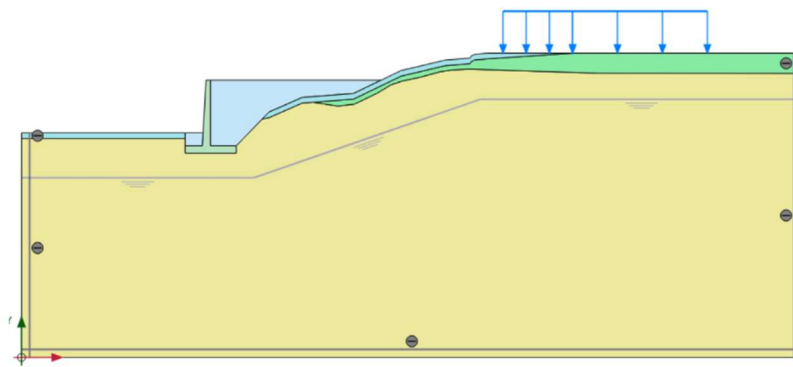
5.4.2 Data Input Material Dinding Penahan Tanah Kantilever Untuk Plaxis

Data yang digunakan dalam analisis dinding penahan tanah adalah asumsi penulis diantaranya sebagai berikut.

1. Gambar Permodelan Dinding penahan tanah merupakan tipe kantilever.
2. Dinding penahan tanah menggunakan beton bertulang.
3. Berat jenis volume beton adalah 24 kN/m^3
4. Mutu beton menggunakan 32 MPa.

5.4.3 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan Dinding Penahan Tanah Dengan Program Plaxis V20

Pada analisis kali ini dimodelkan dengan dua dimensi pada potongan melintang lereng. Pemodelan lereng dengan perkuatan dinding penahan tanah tipe kantilever dan menggunakan program Plaxis V20. Segala parameter data geoteknik dan juga beban yang bekerja dimasukkan untuk mendapatkan potensi keruntuhan. Gambar pemodelan dapat dilihat pada Gambar 5.26 berikut.

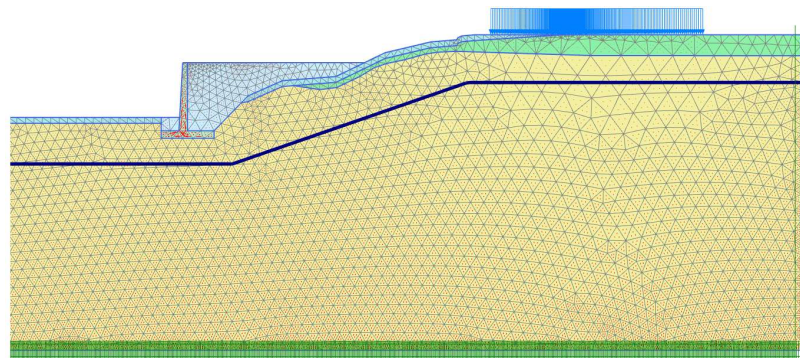


Gambar 5. 26 Pemodelan Lereng Perkuatan DPT

5.4.4 Tahap Perhitungan Stabilitas Lereng Perkuatan Dinding Penahan Tanah Menggunakan Program Plaxis V20

1. Tahap Perhitungan Tegangan Awal

Pada tahap ini biasa juga disebut perhitungan beban gravitasi (gravity load). Perhitungan ini pada dasarnya melibatkan struktur tanah dan batuan pembentuk lereng. Akan tetapi, kali ini dilakukan perhitungan dengan disertai perkuatan dinding penahan tanah tipe kantilever agar didapatkan peningkatan perkuatan lereng yang diharapkan. Hasil dari perhitungan tegangan awal dengan perkuatan dinding penahan tanah dapat dilihat pada Gambar 5.27 berikut ini.



Gambar 5. 27 Perhitungan Tegangan Awal Lereng Dengan Perkuatan DPT

2. Tahap Calculation

Pada tahap kalkulasi ini, seluruh parameter data tanah disertakan kemudian dilakukan perhitungan komputasi. Perhitungan dilakukan dengan tipe plastic analysis untuk mengetahui penurunan yang terjadi. Tahap ini memasuki staged construction sebagai loading input dimana ditemukan beberapa tahap analisis seperti gravity load, berat sendiri, beban candi, dan SF total tanpa pengaruh variabel gempa.

5.4.5 Hasil Output Program Plaxis Lereng Perkuatan Dinding Penahan Tanah

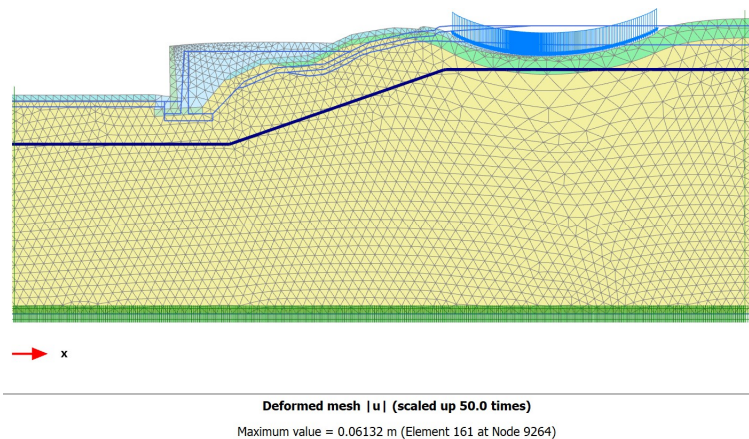
Pada proses ini bertujuan mengetahui angka keamanan dan besar penurunan yang terjadi pada lereng dengan perkuatan dinding penahan tanah kantilever

tersebut. Hasil dari perhitungan menggunakan program Plaxis V20 dapat dilihat sebagai berikut.

1. Hasil perhitungan lereng dengan perkuatan dinding penahan tanah kondisi asli tanpa beban gempa

a. Deformed Mesh

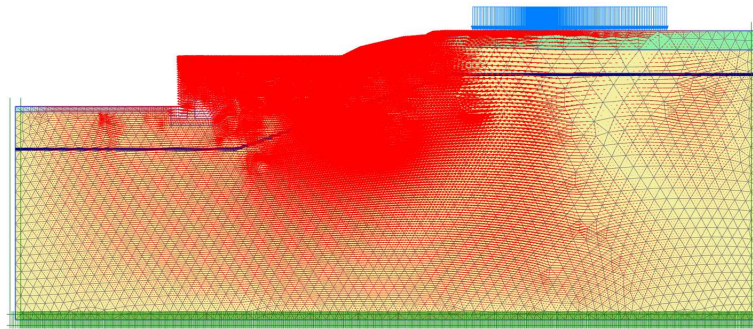
Hasil deformed mesh lereng dengan perkuatan dinding penahan tanah kondisi asli tanpa ada pengaruh beban gempa didapatkan nilai total displacement 0.06132 m. Hasil visual berupa gambar dapat dilihat pada Gambar 5.28 sebagai berikut.



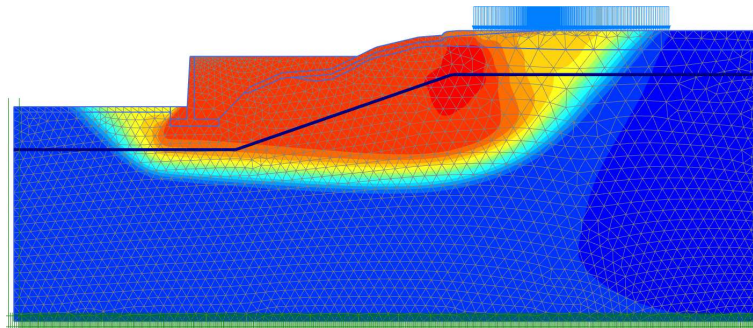
Gambar 5. 28 Deformed Mesh Lereng Dengan Perkuatan DPT Tanpa Beban Gempa

b. Arah Pergerakan dan Daerah Potensial Longsor

Pergerakan arah dan daerah potensial longsor dengan input beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.29 dan 5.30 sebagai berikut.



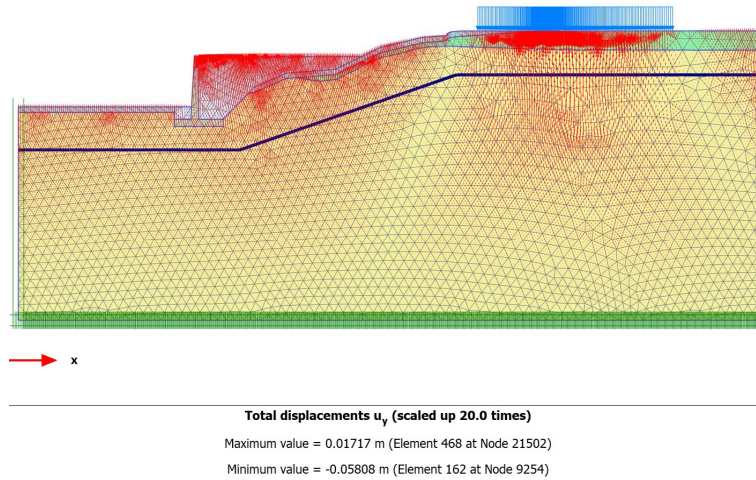
**Gambar 5. 29 Arah Pergerakan Lereng Dengan Perkuatan DPT
Tanpa Beban Gempa**



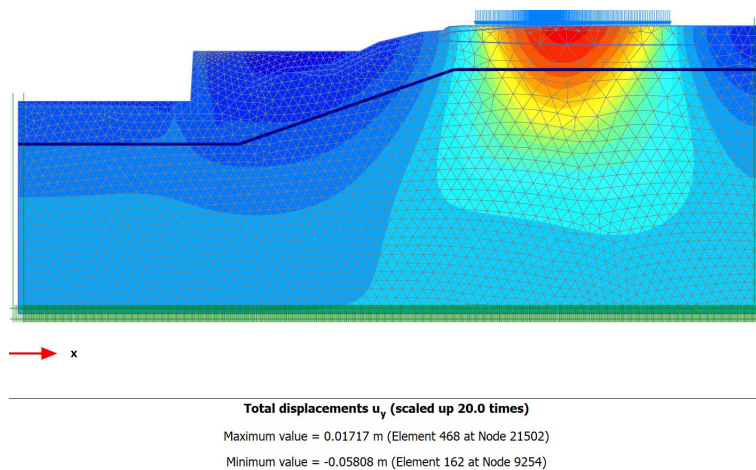
**Gambar 5. 30 Daerah Potensial Longsor Lereng Dengan Perkuatan
DPT Tanpa Beban Gempa**

c. Penurunan

Peninjauan dan perhitungan penurunan lereng asli dengan perkuatan DPT tanpa beban gempa dilakukan dengan tujuan mengetahui seberapa besar penurunan terjadi pada model lereng. Hasil penurunan yang diperoleh menurut perhitungan komputasi Plaxis V20 adalah sebesar 0,05808 m. visual berupa gambar kondisi penurunan dapat dilihat pada Gambar 5.31 dan 5.32 sebagai berikut.



Gambar 5. 31 Arah Penurunan Lereng Dengan Perkuatan DPT Tanpa Beban Gempa



Gambar 5. 32 Daerah Penurunan Lereng Dengan Perkuatan DPT Tanpa Beban Gempa

d. Angka Aman

Hasil Hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 didapatkan angka keamanan pada lereng asli tanpa beban gempa sebesar 1,865 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.33 berikut.

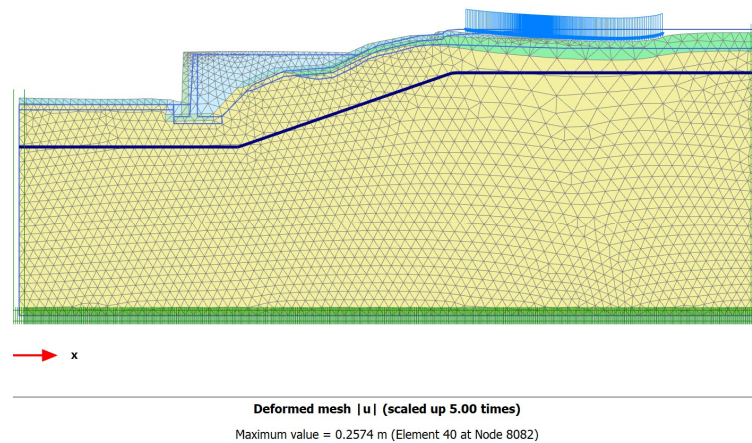
Reached values	
Reached total time	0.000 day
CSP - Relative stiffness	1.132E-9
ForceX - Reached total force X	0.000 kN/m
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN/m
Pmax - Reached max pp	39.92E3 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase proportion	0.000
ΣM_{weight} - Reached weight proportion	1.000
ΣM_{sf} - Reached safety factor	2.159

Gambar 5. 33 Angka Aman Lereng Dengan Perkuatan DPT Tanpa Beban Gempa

2. Hasil perhitungan lereng dengan perkuatan dinding penahan tanah kondisi asli dengan beban gempa

a. *Deformed Mesh*

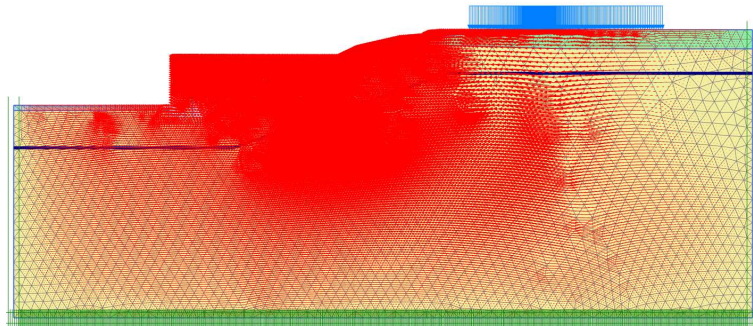
Hasil *deformed mesh* lereng dengan perkuatan dinding penahan tanah kondisi asli dengan pengaruh beban gempa didapatkan nilai total *displacement* 0,2574 m . Hasil visual berupa gambar dapat dilihat pada Gambar 5.34 sebagai berikut.



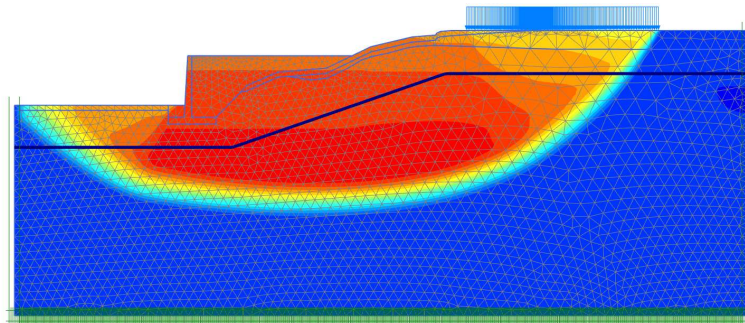
Gambar 5. 34 Deformed Mesh Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa

b. Arah Pergerakan dan Daerah Potensial Longsor

Pergerakan arah dan daerah potensial longsor dengan input beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.35 dan 5.36 sebagai berikut.



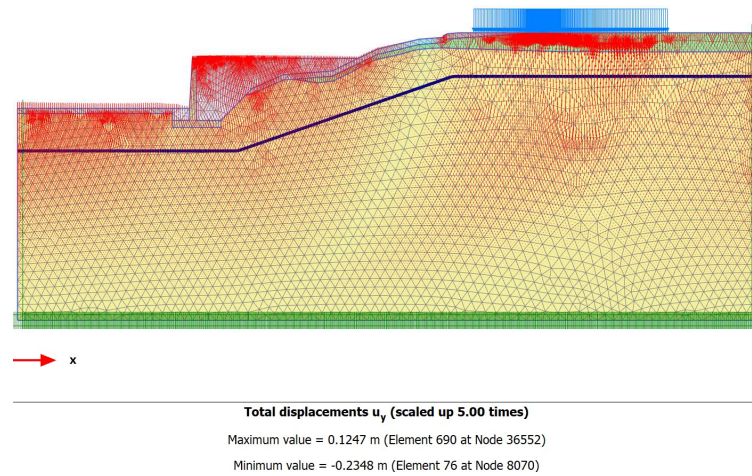
Gambar 5. 35 Arah Pergerakan Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa



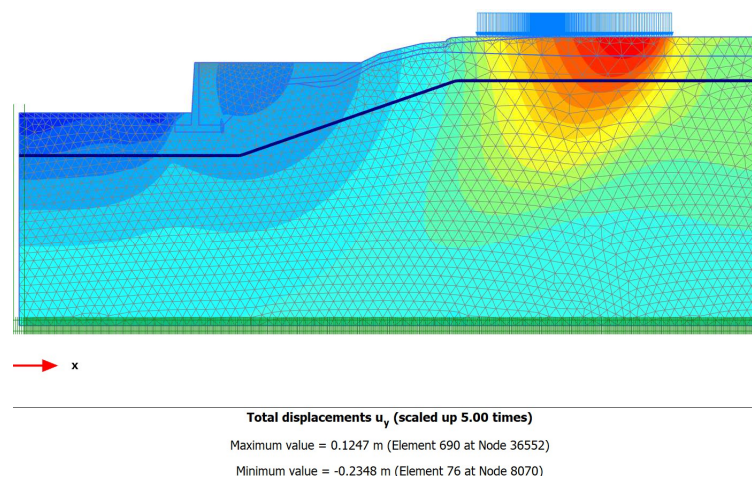
Gambar 5. 36 Daerah Penurunan Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa

c. Penurunan

Peninjauan dan perhitungan penurunan lereng asli dengan perkuatan DPT tanpa beban gempa dilakukan dengan tujuan mengetahui seberapa besar penurunan terjadi pada model lereng. Hasil penurunan yang diperoleh menurut perhitungan komputasi Plaxis V20 adalah sebesar 0,05808 m. visual berupa gambar kondisi penurunan dapat dilihat pada Gambar 5.37 dan 5.38 sebagai berikut.



Gambar 5. 37 Arah Penurunan Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa



Gambar 5. 38 Daerah Penurunan Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa

d. Angka Aman

Hasil Hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 didapatkan angka keamanan pada lereng asli tanpa beban gempa sebesar 1,865 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.39 berikut.

Reached values	
Reached total time	0.000 day
CSP - Relative stiffness	0.6337E-9
ForceX - Reached total force X	0.000 kN/m
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN/m
Pmax - Reached max pp	37.89E3 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase proportion	0.000
ΣM_{weight} - Reached weight proportion	1.000
ΣM_{sf} - Reached safety factor	1.111

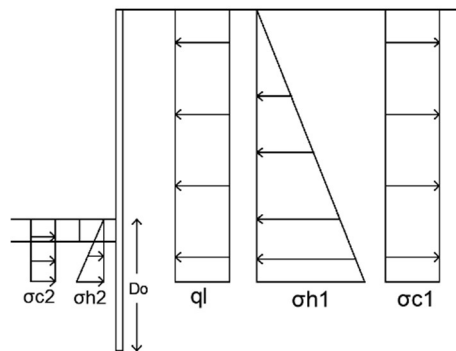
Gambar 5. 39 Angka Aman Lereng Perkuatan DPT Dengan Beban Gempa

5.5 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan *Sheet Pile*

Perkuatan tanah pada lereng Candi Dawangsari dilakukan dalam penelitian ini untuk mencapai nilai keamanan sesuai syarat dalam perencanaan geoteknik. Berdasarkan hasil analisis lereng asli tanpa perkuatan, faktor keamanan tanpa beban gempa sudah memenuhi karena didapatkan safety factor $1,865 > 1,25$ sedangkan saat disertai beban gempa didapatkan safety factor $1,025 < 1,1$. Maka dari itu perlu dilakukan perkuatan untuk mencapai safety factor yang disyaratkan agar saat pasca pugar keadaan lereng menopang beban candi Dawangsari. Salah satu alternatif perkuatan yang dilakukan adalah *sheet pile*.

5.5.1 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Menggunakan Perhitungan Manual

Sheet pile perlu dianalisis untuk mengetahui kemampuan menahan beban yang bekerja terhadap dinding tersebut. Metode analisis dilakukan dengan perhitungan Plaxis dan perhitungan manual. Berikut dapat dilihat diagram gaya pada perhitungan gaya lateral yang terjadi pada *sheet pile* dalam Gambar 5.40 dibawah ini.



Gambar 5. 40 Diagram Gaya Lateral Tanah Perkuatan *Sheet Pile*

Perhitungan manual *sheet pile* dilakukan dengan langkah – langkah sebagai berikut.

1. Perhitungan koefisien tekanan tanah

Koefisien tekanan tanah aktif dan pasif diperhitungkan menggunakan rumus Rankine sebagai berikut.

a. Koefisien tekanan aktif

$$\begin{aligned} K_a &= \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \\ &= \tan^2\left(45 - \frac{29,2}{2}\right) \\ &= 0,344 \end{aligned}$$

b. Koefisien tekanan pasif

$$\begin{aligned} K_p &= \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \\ &= \tan^2\left(45 + \frac{29,2}{2}\right) \\ &= 2,905 \end{aligned}$$

2. Perhitungan tekanan tanah

Koefisien tekanan tanah aktif dan pasif diperhitungkan menggunakan rumus Rankine sebagai berikut.

a. Aktif

1) Tekanan aktif akibat berat tanah

$$\begin{aligned} \sigma_h &= K_a \times \gamma \times h \\ &= 0,344 \times 17,632 \times 5 \\ &= 30,35 \text{ Kpa} \end{aligned}$$

2) Tekanan aktif akibat kohesi tanah

$$\begin{aligned}\sigma_c &= -2 \times c \times \sqrt{Ka} \\ &= -2 \times 20,59 \times \sqrt{0,344} \\ &= -24,16 \text{ Kpa}\end{aligned}$$

3) Tekanan aktif akibat beban diatas tanah

$$\begin{aligned}Q_1 &= Ka \times q \\ &= 0,344 \times 78,16 \\ &= 26,90 \text{ Kpa}\end{aligned}$$

b. Pasif

1) Tekanan pasif akibat berat tanah

$$\begin{aligned}\sigma_{h2} &= Ka \times \gamma \times D_o \\ &= 2,905 \times 17,632 \times D_o \\ &= 30,35 \text{ Kpa}\end{aligned}$$

2) Tekanan pasif akibat kohesi tanah

$$\begin{aligned}\sigma_{h2} &= 2c\sqrt{Kp} \\ &= 2 \times 20,59 \times \sqrt{2,905} \\ &= 70,19 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

3. Perhitungan Gaya Total

Untuk menentukan kedalaman turap, sebelumnya kita harus menghitung gaya – gaya yang terjadi. Dibawah ini adalah contoh perhitungan gaya – gaya yang terjadi.

a. Aktif

1) Gaya total akibat berat tanah

$$\begin{aligned}E_a &= \frac{1}{2} \times a \times (h + D_o) \\ &= \frac{1}{2} \times 30,35 \times (5 + D_o) \\ &= 75,86 + 15,17D_o \text{ kN/m}\end{aligned}$$

2) Gaya total akibat kohesi tanah

$$\begin{aligned} E a_c &= a \times t \\ &= -24,16 \times 5 \\ &= -120,80 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

3) Gaya total akibat beban diatas tanah

$$\begin{aligned} E q &= a \times t \\ &= 26,90 \times 5 \\ &= 134,52 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

b. Pasif

1) Gaya total akibat berat tanah

$$\begin{aligned} E p &= \frac{1}{2} \times a \times t \\ &= \frac{1}{2} \times 51,22 D_o \times D_o \\ &= 25,61 D_o^2 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

2) Gaya total akibat kohesi tanah

$$\begin{aligned} E c_p &= a \times t \\ &= 70,19 \times D_o \\ &= 70,19 D_o \text{ kN/m} \end{aligned}$$

4. Perhitungan Lengan (M)

a. Aktif

1) Lengan akibat berat tanah

$$\begin{aligned} y_{h1} &= D_o + \left(\frac{1}{3} \times h\right) \\ &= D_o + \left(\frac{1}{3} \times 5\right) \\ &= 1,67 + D_o \text{ kN/m} \end{aligned}$$

2) Lengan akibat kohesi tanah

$$\begin{aligned} y_c &= D_o + \left(\frac{1}{2} \times h\right) \\ &= D_o + \left(\frac{1}{2} \times 5\right) \\ &= 2,5 + D_o \text{ kN/m} \end{aligned}$$

3) Lengan akibat beban diatas tanah

$$\begin{aligned} yq &= Do + \left(\frac{1}{2} \times h\right) \\ &= Do + \left(\frac{1}{2} \times 5\right) \\ &= 2,5 + Do \text{ kN/m} \end{aligned}$$

b. Pasif

1) Gaya total akibat berat tanah

$$\begin{aligned} yh2 &= \frac{1}{3} \times Do \\ &= \frac{1}{3} \times Do \\ &= 0,33Do \text{ kN/m} \end{aligned}$$

2) Gaya total akibat kohesi tanah

$$\begin{aligned} yc2 &= \frac{1}{2} \times Do \\ &= \frac{1}{2} \times Do \\ &= 0,5Do \text{ kN/m} \end{aligned}$$

5. ΣM

a. Aktif

1) ΣM akibat berat tanah

$$\begin{aligned} \Sigma MEa &= Ea \times yh1 \\ &= (75,86 + 15,17Do) \times (1,67 + Do) \\ &= 126,44 + 75,86Do + 25,28Do + 15,17Do^2 \end{aligned}$$

2) ΣM akibat kohesi tanah

$$\begin{aligned} \Sigma MEca &= Eca \times yc1 \\ &= -120,80 \times (2,50 + Do) \\ &= -302,00 - 120,80Do \text{ kN/m} \end{aligned}$$

3) ΣM akibat beban diatas tanah

$$\begin{aligned} \Sigma MEq &= Eq l \times yql \\ &= 134,52 \times (2,50 + Do) \\ &= 336,29 + 134,52Do \text{ kN/m} \end{aligned}$$

b. Pasif

1) ΣM akibat berat tanah

$$\begin{aligned}\Sigma M_{Eq} &= E_p \times y h^2 \\ &= 25,61 D_o^2 \times 0,33 D_o \\ &= 8,54 D_o^3 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

2) ΣM akibat kohesi tanah

$$\begin{aligned}\Sigma M_{Eq} &= E_{cp} \times y c^2 \\ &= 70,19 D_o \times 0,5 D_o \\ &= 35,09 D_o^2 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Setelah diketahui Persamaan masing – masing tekanan tanah lateral aktif dan pasif maka selanjutnya adalah menjumlahkan keduanya.

$$M_a = 15,17 D_o^2 + 114,87 D_o + 160,73$$

$$M_p = 8,54 D_o^3 + 35,09 D_o^2$$

Langkah setelah menjumlahkan seluruh tekanan tanah aktif dan pasif adalah mencari momen total sebagai berikut.

$$\begin{aligned}M_o &= M_a - M_p \\ &= (5,17 D_o^2 + 114,87 D_o + 160,73) - (8,54 D_o^3 + 35,09 D_o^2) \\ &= -8,54 D_o^3 - 19,92 D_o^2 + 114,87 D_o + 195,83\end{aligned}$$

Dengan trial and error maka Persamaan kubik tersebut didapatkan nilai sebesar $D_o = 3,46$ m. Panjang tiang kemudian dicari dengan memperhitungkan *safety factor* sebagai berikut.

$$\begin{aligned}D &= SF \times D_o \\ &= 1,2 \times 3,46 \\ &= 4,1 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Panjang pile} &= D + h \\ &= 4,1 + 5 \\ &= 9,1 \text{ m}\end{aligned}$$

6. Mencari nilai momen maksimum

$$M_o = -8,54D_o^3 - 19,92D_o^2 + 114,87D_o + 195,83$$

$$M_{max} = -8,54x^3 - 19,92x^2 + 114,87x + 195,83$$

$$f'(x) = 0$$

$$= 114,87 - 39,84X - 25,61X^2$$

$$X_1 = 1,47$$

$$X_2 = -3,03$$

Maka diambil nilai x yang memiliki nilai positif adalah 1,47 kemudian disubstitusikan ke Persamaan M_o untuk mendapat momen maksimum sebagai berikut.

$$M_o = -8,54X^3 - 19,92X^2 + 114,87X + 195,83$$

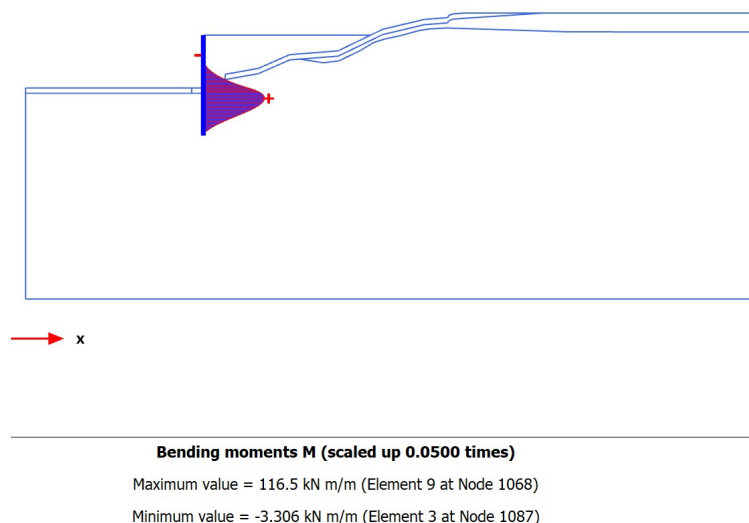
$$= -8,54(1,47)^3 - 19,92(1,47)^2 + 114,87(1,47) + 195,83$$

$$= 294,52 \text{ kNm atau } 33,10 \text{ Ton-m}$$

Setelah didapatkan momen maksimum senilai 33,10 ton-m maka dilakukan pemilihan material *sheet pile* melalui katalog produk *sheet pile* tipe CCSP.

7. Konfirmasi momen maksimum dengan Plaxis

Untuk memperkuat dasar pemilihan material *sheet pile* yang digunakan dalam penggunaan perkuatan jenis ini juga ditinjau *bending moment* yang terjadi melalui Plaxis sebagai konfirmasi dari hasil perhitungan manual tanpa gempa. Momen lentur (*Bending Moment*) adalah output dalam Plaxis yang dapat dilihat ketika memakai pemodelan plate baik dalam versi 2D. Nilai tersebut menunjukkan tingkat gaya dalam yang menyebabkan lentur pada elemen struktur yang relatif tipis. Tinjauan ini dibutuhkan untuk mengetahui momen maksimal yang dapat diterima material seperti *sheet pile* guna menentukan model material. Pada perkuatan *sheet pile* tanpa beban gempa dihasilkan momen maksimum sebesar 116,5 kNm atau 13,05 Ton-m. Visual berupa gambar kondisi penurunan dapat dilihat pada Gambar 5.41 sebagai berikut.



Gambar 5. 41 Nilai Momen Maksimum *Sheet Pile* Pada Program Plaxis

Jika ditinjau melalui Plaxis maka akan terlihat berbeda hasilnya dengan perhitungan manual karena dasar perhitungan pada program Plaxis lebih teliti dan kompleks. Nilai perhitungan didapatkan momen maksimum adalah 33,10 Ton-m sedangkan di Plaxis didapatkan momen sebesar 13,05 Ton-m. Hal tersebut bisa terjadi karena asumsi pada perhitungan manual beban terletak diatas sheet pile langsung sebesar $78,16 \text{ kN/m}^2$. Secara prinsip sebenarnya hal tersebut tidak terlalu ideal karena pada lokasi existing beban candi terletak 24,72 meter dari sheet pile sehingga boleh bila ingin diabaikan karena sudah di luar jangkauan perhitungan tekanan tanah lateral manual. Perhitungan dalam penelitian ini dilakukan dengan asumsi beban diatas *sheet pile* agar lebih aman karena skema kondisi terburuk sudah dilakukan. Maka dari itu, hasil momen maksimum dari program Plaxis agak berbeda dengan perhitungan manual.

5.5.2 Spesifikasi Material *Sheet Pile*

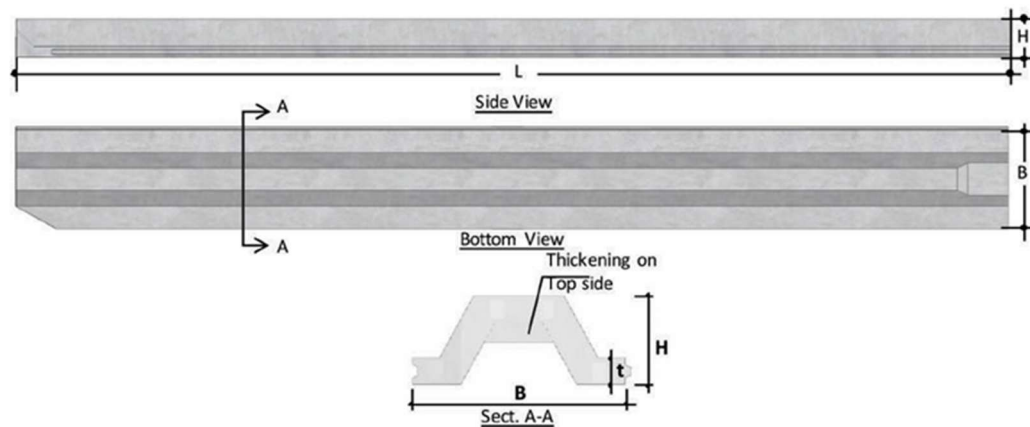
Alternatif perkuatan lereng selain dinding penahan tanah di candi Dawangsari, pada penelitian kali ini digunakan juga *sheet pile*. Jenis material *sheet pile* yang digunakan adalah CCSP (*Corrugated Concrete Sheet Pile*) *Prestressed* dan tipe join *Male – Female* dengan *method of driving Vibro or Diesel Hammer*. Selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 5.42 hingga 5.44 sebagai berikut.

SPECIFICATION OF SOURCE MATERIAL

Item	Specification	Reference
Aggregate		ASTM C33 - 2016 (Standard Specification Concrete Aggregates)
		SNI 8321-2016 (Concrete Aggregate Specification)
Cement		SNI 15-2049-2004 (Portland's Cement)
Admixture		ASTM C494 - 2016 (Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete)
Concrete	Compressive Strength at : 28 Days : 700 kg/cm ² (Cube), 55 MPa (Cylinder)	SNI 2847-2013 (Structural Concrete Requirement)
PC Strand	KBJP-P7 RB	SNI 1154-2011 (Uncoated Seven Wire Stress Relieved Strand for Prestress Concrete (Pc Strand/ KBJP-P7))
	Grade 270	ASTM A-416 (Standard Specification for Uncoated Seven_ Wire Stress Relieved Strand for Prestressed Concrete)
	SWPR7BL	JIS G 3536 : 2014 (Uncoated Stress-Relieved Steel Wires and Strands for Prestressed Concrete)
Reinforced Rebar	BjTS 40 For D ≥ 13mm	SNI 2052-2014 (Concrete Reinforcement Steel Bar)
	BjTP 24 For D < 13mm	

Gambar 5. 42 Spesifikasi Material CCSP
(Sumber: Product Catalog PT Waskita Beton Precast Tbk)

PRODUCT DIMENSION



Gambar 5. 43 Ilustrasi Dimensi CCSP
(Sumber: Product Catalog PT Waskita Beton Precast Tbk)

Type	Height H (mm)	Thickness t (mm)	Width W (mm)	Cross Section (cm ²)	Moment of Inertia (cm ⁴)	Unit Weight (kg/m)	Crack Moment (Ton.m)	Panjang L (m)
W-325 A 1000	325	110	996	1.315	134.261	329	11,4	8 - 13
W-325 B 1000							13,3	8 - 14
W-350 A 1000	350	120	996	1.468	139.432	368	15,6	9 - 15
W-350 B 1000							17,0	10 - 15
W-400 A 1000	400	120	996	1.598	248.685	400	20,1	10 - 16
W-400 B 1000							23,4	11 - 16
W-450 A 1000	450	120	996	1.835	353.354	459	26,9	11 - 17
W-450 B 1000							30,7	11 - 17
W-500 A 1000	500	120	996	1.818	462.362	455	35,2	12 - 17
W-500 B 1000							40,4	13 - 18
W-600 A 1000							50,6	12 - 17
W-600 B 1000	600	120	996	2.078	765.907	525	59,6	13 - 21 > 21 Up to 27 *)
W-900 A 1000	900	130	996	3.221	2.827.998	814	125,0	Up to 35 m

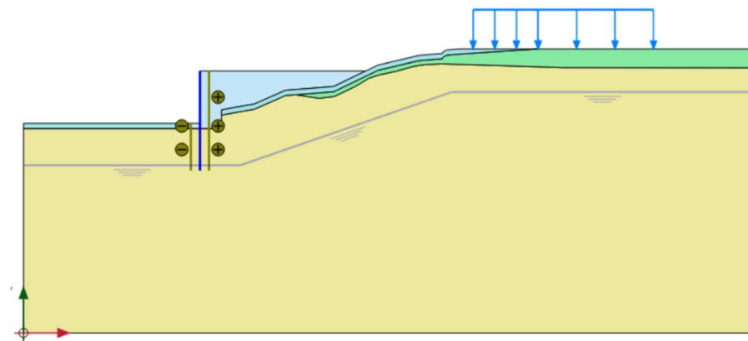
*) = Special Order

Gambar 5. 44 Detail Dimensi Produk CCSP
(Sumber: Product Catalog PT Waskita Beton Precast Tbk)

Pada perhitungan momen maksimum sebelumnya didapatkan M maks sebesar 294,52 kNm atau 33,10 Ton-m maka digunakan CCSP tipe W-500 A 1000 dalam perkuatan lereng candi Dawangsari.

5.5.3 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Menggunakan Perhitungan Program Plaxis V20

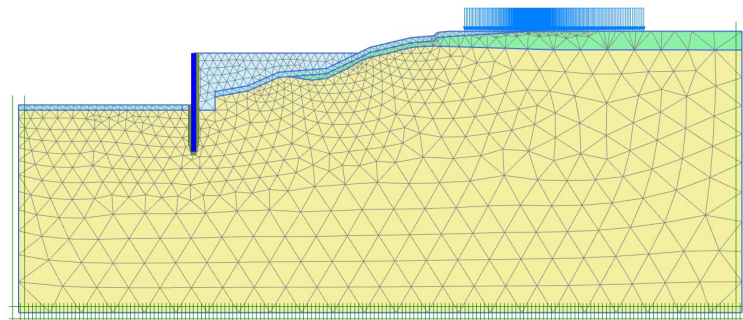
Pada analisis kali ini dimodelkan dengan dua dimensi pada potongan melintang lereng. Pemodelan lereng dengan perkuatan *sheet pile* dan menggunakan program Plaxis V20. Segala parameter data geoteknik dan juga beban yang bekerja dimasukkan untuk mendapatkan potensi keruntuhan. Gambar pemodelan dapat dilihat pada Gambar 5.45 berikut.



Gambar 5.45 Pemodelan Lereng Perkuatan *Sheetpile*

5.5.4 Pembuatan Jaring Elemen Lereng Perkuatan *Sheet Pile*

Tahap selanjutnya adalah membagi model menjadi geometri elemen imajiner (*meshing*). Tahap *meshing* pada analisis kali ini menggunakan distribusi elemen jenis *fine*. Hasil output *meshing* atau jaring – jaring yang telah dimodelkan dapat dilihat pada Gambar 5.46 berikut.

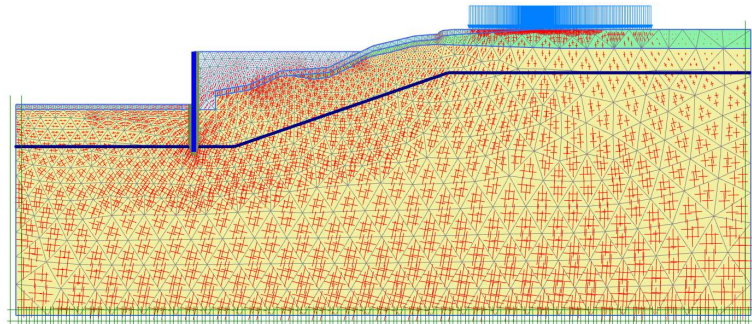


Gambar 5. 46 Meshing Lereng Dengan Perkuatan *Sheet Pile*

5.5.5 Tahap Perhitungan Stabilitas Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Menggunakan Perhitungan Program Plaxis V20

1. Tahap Perhitungan Tegangan Awal

Pada tahap ini biasa juga disebut perhitungan beban gravitasi (*gravity load*). Perhitungan ini pada dasarnya melibatkan struktur tanah dan batuan pembentuk lereng. Akan tetapi, kali ini dilakukan perhitungan dengan disertai perkuatan *sheet pile* agar didapatkan peningkatan perkuatan lereng yang diharapkan. Hasil dari perhitungan tegangan awal dengan perkuatan dinding penahan tanah dapat dilihat pada Gambar 5.47 berikut ini.



**Gambar 5.47 Perhitungan Tegangan Awal Lereng Dengan Perkuatan
*Sheet Pile***

2. Tahap Calculation

Pada tahap kalkulasi ini, seluruh parameter data tanah disertakan kemudian dilakukan perhitungan komputasi. Perhitungan dilakukan dengan tipe plastic analysis untuk mengetahui penurunan yang terjadi. Tahap ini memasuki staged construction sebagai loading input dimana ditemukan beberapa tahap analisis seperti gravity load, berat sendiri, beban candi, dan SF total dengan pengaruh variabel gempa.

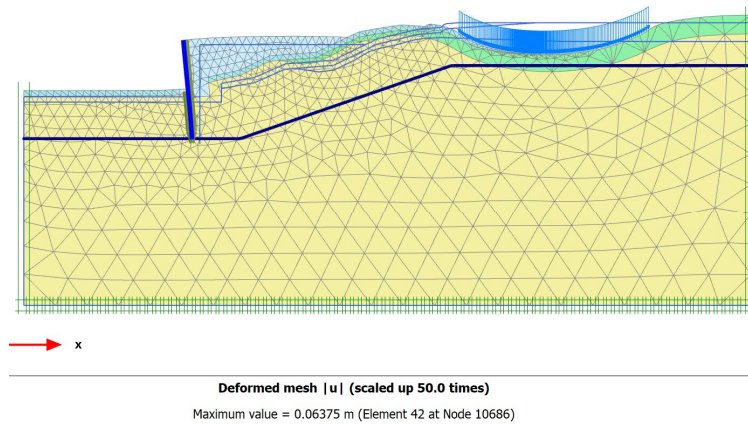
5.5.6 Hasil Output Plaxis Perkuatan *Sheet Pile*

Output hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 dapat diketahui angka aman dan besar penurunan yang terjadi pada lereng yang dimaksud. Hasil perhitungan dapat dilihat sebagai berikut.

1. Hasil perhitungan lereng perkuatan *soldier pile* tanpa beban gempa

a. *Deformed Mesh*

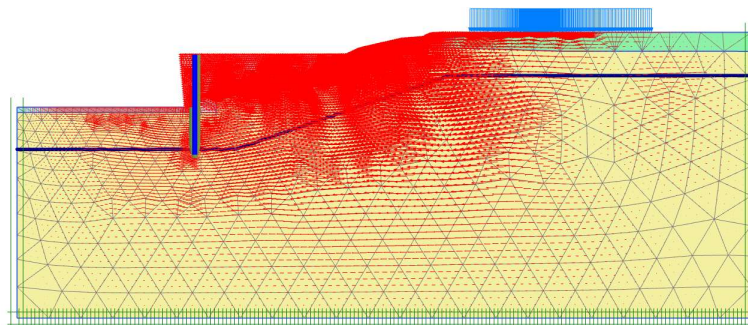
Hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 pada tahap deformed mesh tanpa beban gempa kali ini diperoleh 0,06375 m. Hasil berupa visual gambar dapat dilihat pada Gambar 5.48 sebagai berikut.



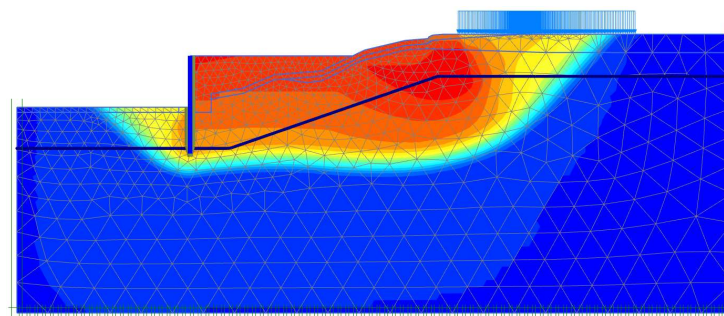
Gambar 5. 48 Deformed Mesh Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Tanpa Beban Gempa

b. Arah Pergerakan dan Daerah Potensial Longsor

Pergerakan arah dan daerah potensial longsor tanpa input beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.49 dan 5.50 sebagai berikut.



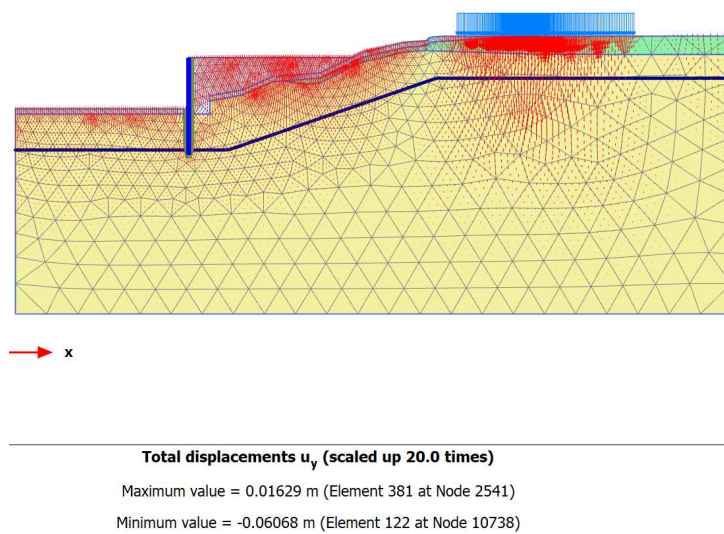
Gambar 5. 49 Pergerakan Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Tanpa Beban Gempa



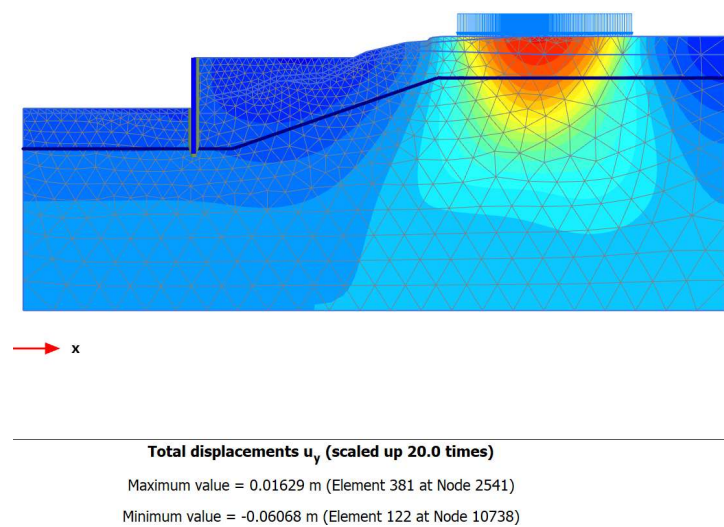
Gambar 5. 50 Daerah Potensi Longsor Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Tanpa Beban Gempa

c. Penurunan

Peninjauan dan perhitungan penurunan lereng perkuatan *soldier pile* tanpa beban gempa dilakukan dengan tujuan mengetahui seberapa besar penurunan terjadi pada model lereng. Hasil penurunan yang diperoleh menurut perhitungan komputasi Plaxis V20 adalah sebesar 0,06068 m. visual berupa gambar kondisi penurunan dapat dilihat pada Gambar 5.51 dan 5.52 sebagai berikut.



Gambar 5. 51 Arah Penurunan Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Tanpa Beban Gempa



Gambar 5. 52 Daerah Penurunan Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Tanpa Beban Gempa

d. Angka Keamanan

Hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 didapatkan angka keamanan pada lereng perkuatan *sheet pile* tanpa beban gempa sebesar 2,106 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.53 berikut.

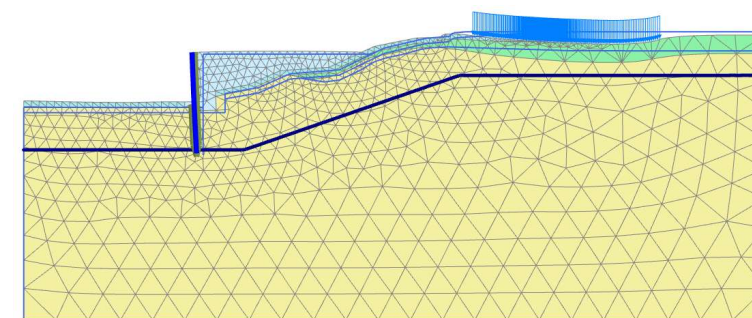
Reached values	
Reached total time	0.000 day
CSP - Relative stiffness	-2.348E-15
ForceX - Reached total force X	0.000 kN/m
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN/m
Pmax - Reached max pp	482.8 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase proportion	0.000
ΣM_{weight} - Reached weight proportion	1.000
ΣM_{sf} - Reached safety factor	2.098

Gambar 5. 53 Nilai Safety Factor Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Tanpa Beban Gempa

2. Hasil Perhitungan Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Dengan Beban Gempa

a. *Deformed Mesh*

Hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 pada tahap deformed mesh disertai beban gempa kali ini diperoleh 0,2572 m. Hasil berupa visual gambar dapat dilihat pada Gambar 5.54 sebagai berikut.



→ x

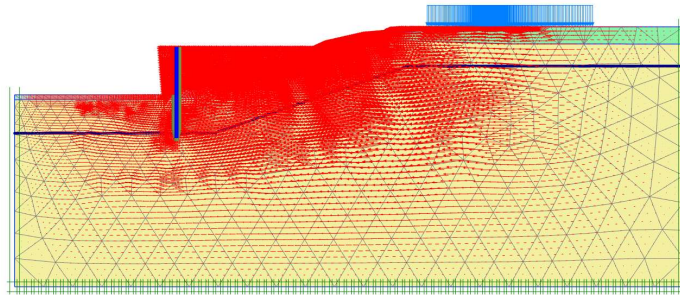
Deformed mesh |u| (scaled up 5.00 times)

Maximum value = 0.2572 m (Element 28 at Node 11389)

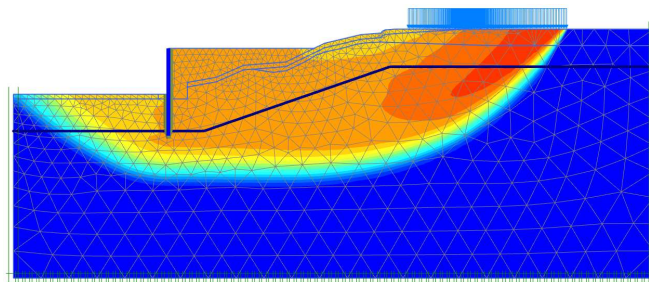
Gambar 5. 54 *Deformed Mesh* Lereng Asli Dengan Beban Gempa

b. Arah Pergerakan dan Daerah Potensial Longsor

Pergerakan arah dan daerah potensial longsor dengan input beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.55 dan 5.56 sebagai berikut.



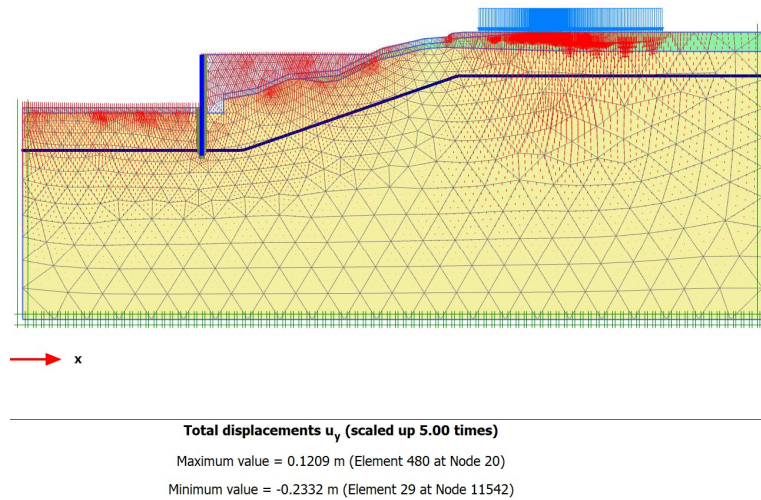
Gambar 5. 55 Arah Pergerakan Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Dengan Beban Gempa



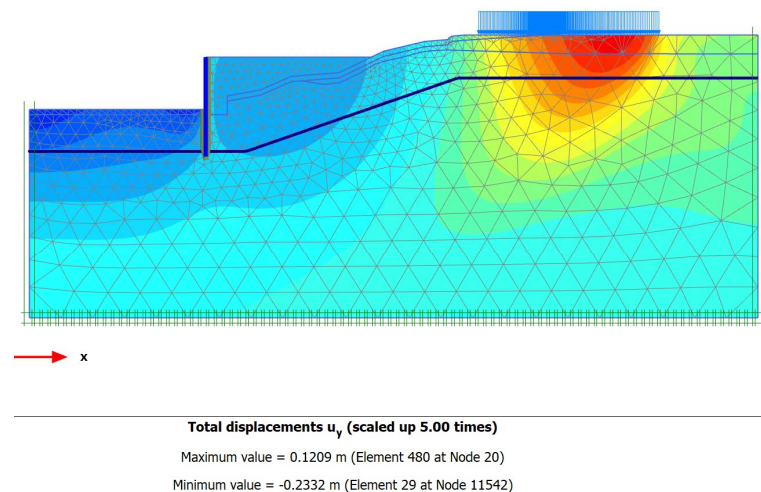
Gambar 5. 56 Daerah Potensi Longsor Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Dengan Beban Gempa

c. Penurunan

Peninjauan dan perhitungan penurunan lereng perkuatan *sheet pile* dengan beban gempa dilakukan dengan tujuan mengetahui seberapa besar penurunan terjadi pada model lereng. Hasil penurunan yang diperoleh menurut perhitungan komputasi Plaxis V20 adalah sebesar 0,2332 m. visual berupa gambar kondisi penurunan dapat dilihat pada Gambar 5.57 dan 5.58 sebagai berikut.



Gambar 5. 57 Arah Penurunan Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Dengan Beban Gempa



Gambar 5. 58 Daerah Penurunan Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Dengan Beban Gempa

Hal tersebut bisa terjadi beberapa faktornya antara lain parameter tanah yang tidak realistsis atau sesuai, konfigurasi model yang menyebabkan ketidakseimbangan gaya, beban diatas tanah yang terlalu besar, dan lain sebagainya.

d. Angka Keamanan

Hasil dari perhitungan komputasi program Plaxis V20 didapatkan angka keamanan pada lereng asli dengan beban gempa sebesar 1,110 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.59 berikut.

Reached values	
Reached total time	0.000 day
CSP - Relative stiffness	-1.084E-12
ForceX - Reached total force X	0.000 kN/m
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN/m
Pmax - Reached max pp	639.2 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase proportion	0.000
ΣM_{weight} - Reached weight proportion	1.000
ΣM_{sf} - Reached safety factor	1.110

Gambar 5.59 Nilai Safety Factor Lereng Perkuatan *Sheet Pile* Dengan Beban Gempa

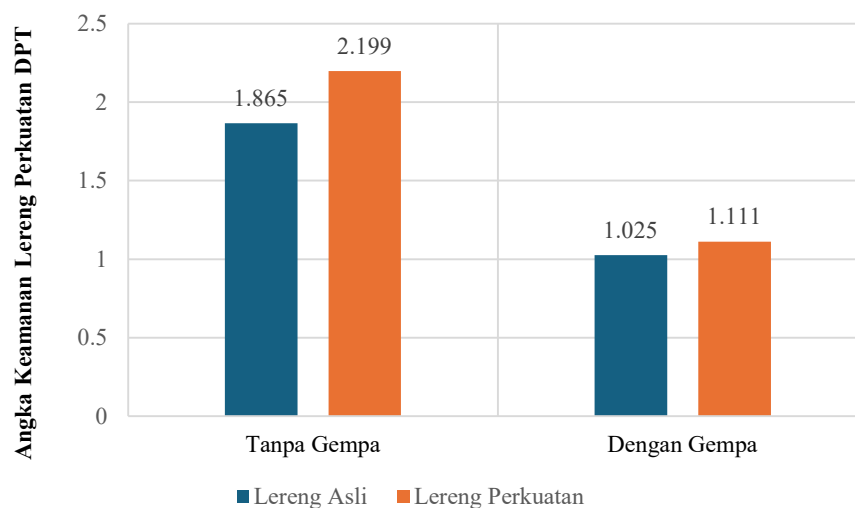
5.6 Pembahasan

Penelitian mengenai analisis perkuatan lereng candi Dawangsari di Sleman, Yogyakarta dilakukan untuk mengetahui angka keamanan stabilitas lereng. Telah dilaksanakan analisis terhadap lereng asli tanpa pengaruh beban gempa, lereng asli dengan pengaruh beban gempa, lereng menggunakan perkuatan dinding penahan kantilever tanpa beban gempa, lereng menggunakan perkuatan dinding penahan tanah kantilever dengan beban gempa, lereng menggunakan perkuatan *sheet pile* tanpa beban gempa, dan lereng menggunakan perkuatan *sheet pile* dengan beban gempa. Analisis dilakukan dengan perhitungan manual dan melalui program Plaxis V20. Analisis dengan metode fellenius dilakukan untuk lereng asli, kemudian untuk lereng dengan perkuatan dinding penahan tanah kantilever dan *sheet pile* dilakukan dengan perhitungan manual.

Melalui analisis program Plaxis pada lereng asli tanpa beban gempa didapatkan angka keamanan sebesar 1,865 dan lereng asli dengan beban gempa menghasilkan angka keamanan sebesar 1,025. Untuk pembandingan maka dilakukan perhitungan manual menggunakan metode fellenius dan diperoleh angka aman sebesar 33,00. Berdasarkan angka keamanan dengan beban gempa maka lereng

dalam kondisi kritis dan tidak aman karena nilai angka keamanan $< 1,1$ sehingga diperlukan perkuatan pada lereng.

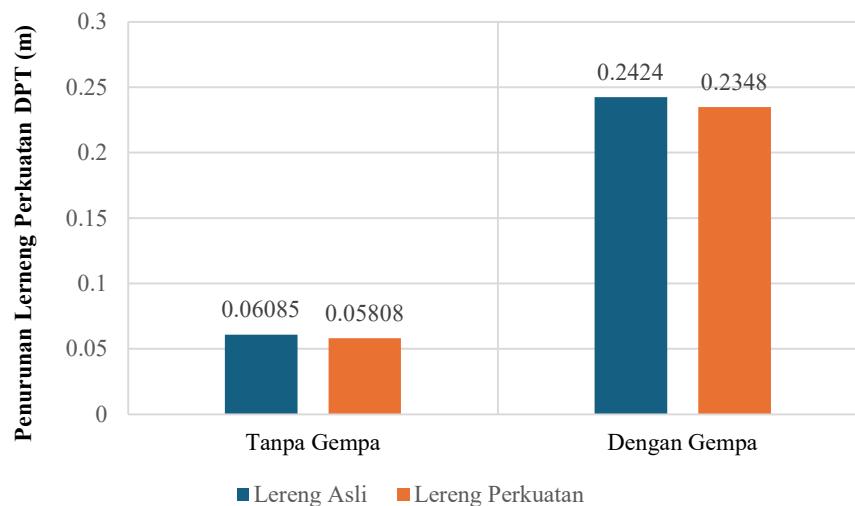
Hasil analisis program Plaxis dengan perkuatan dinding penahan tanah kantilever tanpa beban gempa didapatkan angka keamanan sebesar 2,199 sedangkan dinding penahan tanah kantilever dengan beban gempa menghasilkan angka keamanan sebesar 1,111. Maka dengan hasil tersebut dinilai memenuhi kriteria keamanan karena angka keamanan $> 1,1$. Kemudian dilakukan perhitungan manual dengan meninjau stabilitas dinding penahan tanah tanpa beban gempa yang menghasilkan angka keamanan terhadap geser sebesar $> 1,5$ yang diartikan memenuhi. Stabilitas terhadap guling didapatkan sebesar > 2 yang dapat diartikan memenuhi. Selanjutnya didapatkan angka keamanan terhadap kapasitas dukung tanah $q_{maks} = 122,40 \text{ kN/m}^2 < q_{all} = 290,80 \text{ kN/m}^2$, $q_{min} 122,40 > 0$ dengan diartikan sudah memenuhi dan aman. Perbandingan angka keamanan lereng candi Dawangsari kondisi asli dan setelah diberi perkuatan dinding penahan tanah kantilever dapat dilihat pada Gambar 5.60 sebagai berikut.



Gambar 5.60 Grafik Perbandingan Safety Factor Perkuatan DPT

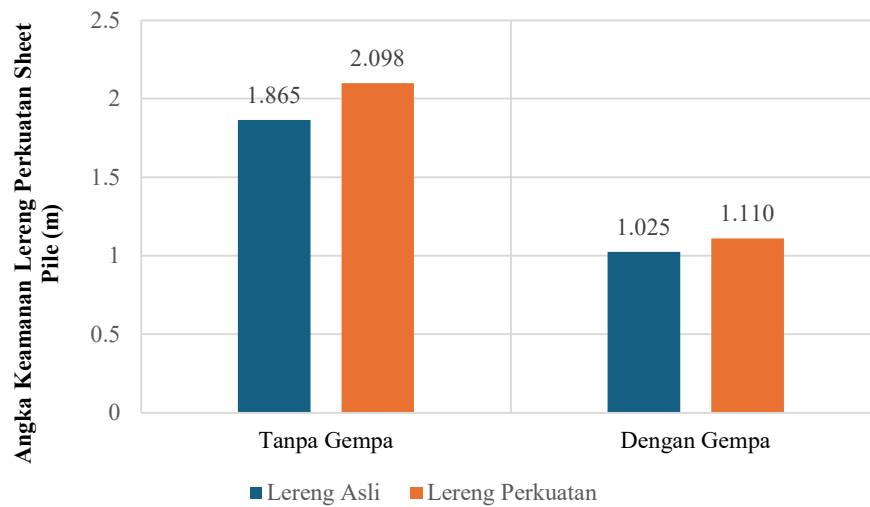
Selain membandingkan pada angka keamanan, penelitian kali ini juga meninjau penurunan tanah yang terjadi melalui analisis program Plaxis.

Perbandingan penurunan tanah antar kondisi asli dan menggunakan perkuatan dinding penahan tanah kantilever dapat dilihat pada Gambar 5.61 sebagai berikut.



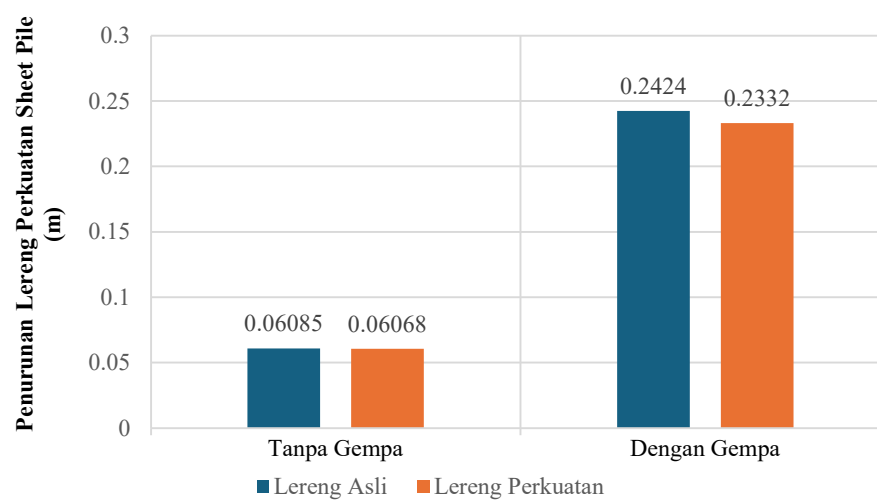
Gambar 5.61 Grafik Perbandingan Penurunan Tanah Perkuatan DPT

Sedangkan hasil analisis perkuatan *sheet pile* dianalisis melalui perhitungan manual guna mendapatkan kedalaman pile yang dilambangkan dengan D_0 . Pada perhitungan ini dihasilkan D_0 sebesar 2,3 m dan momen maksimum tanpa beban gempa yang menghasilkan momen sebesar 33,10 sehingga dapat memakai material CCSP model W-500 A 1000. Selain perhitungan manual juga dilakukan analisis melalui program Plaxis yang menghasilkan output *safety factor* dan penurunan. Grafik perbandingan angka keamanan menggunakan perkuatan *sheet pile* adalah sebagai berikut. Hasil analisis program Plaxis dengan perkuatan dinding penahan tanah *sheet pile* tanpa beban gempa didapatkan angka keamanan sebesar 2,098 sedangkan dinding penahan tanah *sheet pile* dengan beban gempa menghasilkan angka keamanan sebesar 1,110. Maka dengan hasil tersebut dinilai memenuhi kriteria keamanan karena angka keamanan $> 1,1$. Perbandingan angka keamanan lereng candi Dawangsari kondisi asli dan setelah diberi perkuatan *sheet pile* dapat dilihat pada Gambar 5.62 sebagai berikut.



Gambar 5.62 Grafik Perbandingan Safety Factor Tanah Perkuatan *Sheet Pile*

Selain membandingkan pada angka keamanan, penelitian kali ini juga meninjau penurunan tanah yang terjadi melalui analisis program Plaxis. Perbandingan penurunan tanah antar kondisi asli dan menggunakan perkuatan *sheet pile* dapat dilihat pada Gambar 5.63 sebagai berikut.



Gambar 5.63 Grafik Perbandingan Penurunan Tanah Perkuatan *Sheet Pile*

Secara ringkas dapat dirangkum dalam tabel hasil dari 2 (dua) alternatif perkuatan tanah dalam analisis Plaxis penelitian perkuatan lereng candi Dawngsari dapat dilihat pada Tabel 5.9 sebagai berikut.

Tabel 5.9 Perbandingan Angka Keamanan Dan Penurunan Lereng Asli dan Perkuatan

Parameter	Angka Keamanan		Penurunan	
	Tanpa Gempa (Syarat > 1,25)	Dengan Gempa (Syarat 1,1)	Tanpa Gempa	Dengan Gempa
Lereng Asli Tanpa Perkuatan	1,865	1,025	0,02082 m	0,1347 m
Lereng Dengan Perkuatan DPT Kantilever	2,199	1,111	0,0580 m	0,2348 m
Lereng Dengan Perkuatan <i>Sheet Pile</i>	2,098	1,110	0,0606 m	0,2332 m

Perbandingan menurut penelitian yang sudah dilakukan dan dibahas dalam tinjauan pustaka dibandingkan beberapa penyelesaian dalam menangani kasus kemiringan lereng. Mutia dkk. (2024) membuktikan bahwa dengan memberikan perkuatan dinding penahan tanah pada suatu lereng dapat meningkatkan angka keamanan yang semula 0,699 dengan validasi program Plaxis kemudian setelah direncanakan dengan metode manual didapatkan stabilitas terhadap geser sebesar $1,390 > 1,1$ (aman), stabilitas terhadap guling sebesar $1,206 > 1,1$ (aman), stabilitas daya dukung tanah sebesar $5,026 > 3$ (aman). Pada penelitian ini, langkah validasi berupa perhitungan manual dan menggunakan program Plaxis dilakukan agar lebih akurat dan meminimalisasi tingkat kesalahan. Didapatkan angka keamanan terbaik pada perkuatan dinding penahan tanah kantilever sebesar 1,111 dan penurunan sebesar 0,2348 m.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Beban dari bangunan stupa candi Dawangsari dengan konstruksi jenis batuan alam andesit setelah tersusun sesuai rencana sebesar $78,16 \text{ kN/m}^2$.
2. Nilai keamanan lereng asli dengan metode Fellenius diperoleh hasil sebesar 1,196. Hasil nilai keamanan lereng asli dengan pengaruh gempa menggunakan program analisis Plaxis V20 diperoleh angka keamanan sebesar 1,025.
3. Nilai angka keamanan yang didapatkan dengan perkuatan dinding penahan tanah sebesar 1,111
4. Nilai angka keamanan yang didapatkan dengan perkuatan *concrete sheet pile* sebesar 1,110.
5. Hasil alternatif perkuatan terbaik didapatkan pada model perkuatan Dinding Penahan Tanah Kantilever dengan angka keamanan yaitu 1,111 saat dipengaruhi beban gempa dan *Sheet Pile* yang menunjukkan hasil angka keamanan 1,110.

6.2 Saran

Berdasarkan analisis dan pembahasan studi kasus yang telah dijelaskan pada bagian bab sebelumnya maka terdapat saran sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya dapat melakukan penilaian perkuatan lereng bukan hanya dari segi angka keamanan dan penurunan, tetapi bisa juga menilai efektifitas dari pilihan bahan dan metode pemasangan sesuai lokasi penelitian.
2. Penelitian selanjutnya bisa melakukan analisis dengan program dikembangkan seperti Plaxis 3D untuk mendapatkan hasil yang lebih lengkap.
3. Penelitian selanjutnya dapat melakukan variasi dimensi dari jenis perkuatan seperti *sheet pile* dan kantilever.
4. Penelitian selanjutnya dapat melakukan variasi jenis perkuatan yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardianto A, & Zayadi R. (2022). Studi Stabilitas Dinding Penahan Tanah Soldier Pile Dengan Perkuatan Ground Anchor.
- Fahreza, I. (2024). Analisis Perencanaan Retaining Wall Menggunakan Sheetpile Pada Proyek Pengaman Sempadan Danau Toba.
- Firmansyah, R. (2021). Laporan Tugas Akhir Analisis Stabilitas Lereng Badan Jalan Desa Rahtawu Kecamatan Gebog Kabupaten Kudus Yayasan Alumni Universitas Diponegoro.
- Mutia, I., Warman, H., & Permata, R. (2024). Perencanaan Perkuatan Lereng Tanah Dengan Struktur Dinding Penahan Tanah Kantilever (Studi Kasus Lereng Pulau Anak Aia Bukittinggi).
- Pujianto, H., Muslih, Y., & Surjandari, N. S. (2017). Analisis Pengaruh Beban Gempa Terhadap Stabilitas Lereng Di Desa Sendangmulyo, Tirtomoyo, Wonogiri.
- Ramadhanti R. (2022). Perencanaan Perkuatan Lereng Menggunakan Dinding Penahan Tanah (Dpt) Pada Ruas Jalan Borobudur - Bigaran Kabupaten Magelang.
- Sianipar, B. R. (2016). *Soldier Pile Planning For Slope Reinforcement Of Gempol-Pandaan Toll Road At Sta. 6+518 To 6+575 Sta. 6+518 S/D 6+575* (Sianipar, Trans.).
- Siregar, C. A. (2023). Analisis Stabilitas Lereng Dengan Menggunakan Program Slope/W Dan Plaxis.
- Soumahu, V., Lewakabessy, G., Latar, S., Sipil, J. T., & Ambon, P. N. (2023). Perencanaan Dinding Penahan Tanah Untuk Menanggulangi Kelongsoran Pada Ruas Jalan Hutumuri Kecamatan Leitimur Selatan. In *JOURNAL AGREGATE* (Vol. 2, Issue 2).
- Wiswara N. (2012) Analisa Kedalaman Maksimum Dinding Penahan Tanah Tanpa Adanya Perkuatan (*Support*)

LAMPIRAN

Lampiran Permohonan Data dan Sampel

	FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN	Gedung KH. Moh. Natsir Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia Jl. Kalirejo km 14,5 Yogyakarta 55584 T. (0274) 898444 ext 3200, 3201 F. (0274) 895330 E. dekanat.ftsp@uii.ac.id W. ftsp@uii.ac.id
Nomor	: 288/Sek. Prodi PSTS/20/TA/X/2024	
Hal	: Permohonan Data dan Sampel Materi Tugas Akhir	
Kepada Yth: Kepala Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah X Jl. Yogya-Solo Km.15 Bogem, Kalasan, Sleman, DI Yogyakarta		
<i>Assalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh,</i>		
Untuk memenuhi salah satu syarat guna menyelesaikan studi pada Prodi Teknik Sipil Program Sarjana, setiap mahasiswa wajib melaksanakan penelitian Tugas Akhir yang berkaitan dengan ketekniksipilan. Dalam proses tersebut diperlukan data-data pendukung baik dari instansi Pemerintah BUMN maupun perusahaan swasta/Proyek.		
Berdasarkan hal tersebut, kami mohon bantuan Bapak/Ibu untuk dapat memberikan izin penelitian dan pengambilan data yang akan digunakan untuk keperluan penyusunan Tugas Akhir bagi mahasiswa Prodi Teknik Sipil Program Sarjana Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia Yogyakarta. Adapun nama mahasiswa tersebut adalah:		
Nama	: Bayu Tri Jananto	
NIM	: 20511073	
CP Mahasiswa/email	: 087839444632	
Judul Tugas Akhir	: Perkuatan Lereng Area Situs Candi Dawangsari	
Demikian permohonan dan pernyataan ini kami sampaikan, atas bantuan dan kerjasamanya kami ucapkan banyak terima kasih.		
<i>Wassalamu'alaikum Warrahmatullah Wabarakatuh.</i>		
 Sek. Prodi Teknik Sipil – Program Sarjana, Dina Anggraheni, S.T., M. Eng		Yogyakarta, 25 Oktober 2024 Dosen Pembimbing Tugas Akhir  Anisa Nur Amalina, S.T., M. Eng

Lampiran Balasan Perijinan Penelitian



KEMENTERIAN KEBUDAYAAN
BALAI PELESTARIAN KEBUDAYAAN WILAYAH X
 Jalan Yogya-Solo Km.15, Bogem, Kalasan, Sleman, Yogyakarta 55571
 Telepon (0274) 496019, 496419, 496413, 373241, 379308
 Pos-el bpk.wil10@kemdikbud.go.id

Nomor : 6158/F7.12/HM.00.03/2024

29 November 2024

Hal : Fasilitasi Pemanfaatan Cagar Budaya untuk Penelitian

Yth. Dosen Pembimbing Tugas Akhir
 Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia
 Yogyakarta

Dengan hormat, sehubungan dengan surat saudara nomor: 288/Sek.Prodi PSTS/20/TA/X/2024 tanggal 28 Oktober 2024, hal permohonan Izin Data dan Sampel Materi Tugas Akhir, kami sampaikan bahwa Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah X dapat memfasilitasi kegiatan tersebut kepada:

Nama : Bayu Tri Jananto
 NIM : 20511073
 Judul Tugas Akhir : Perkuatan Lereng Area Situs Candi Dawangsari

Adapun narahubung Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah X terkait kegiatan ini adalah Antar Nugroho (0856-4396-1223). Dimohon setelah menyelesaikan penelitian, mahasiswa tersebut menyampaikan hasil kegiatan berupa hasil penelitian dan dokumentasi foto/video melalui tautan <https://bit.ly/laporanpemanfaatanbpkwil10>.

Atas perhatian dan kerja sama Saudara, kami sampaikan terima kasih.

Kepala,



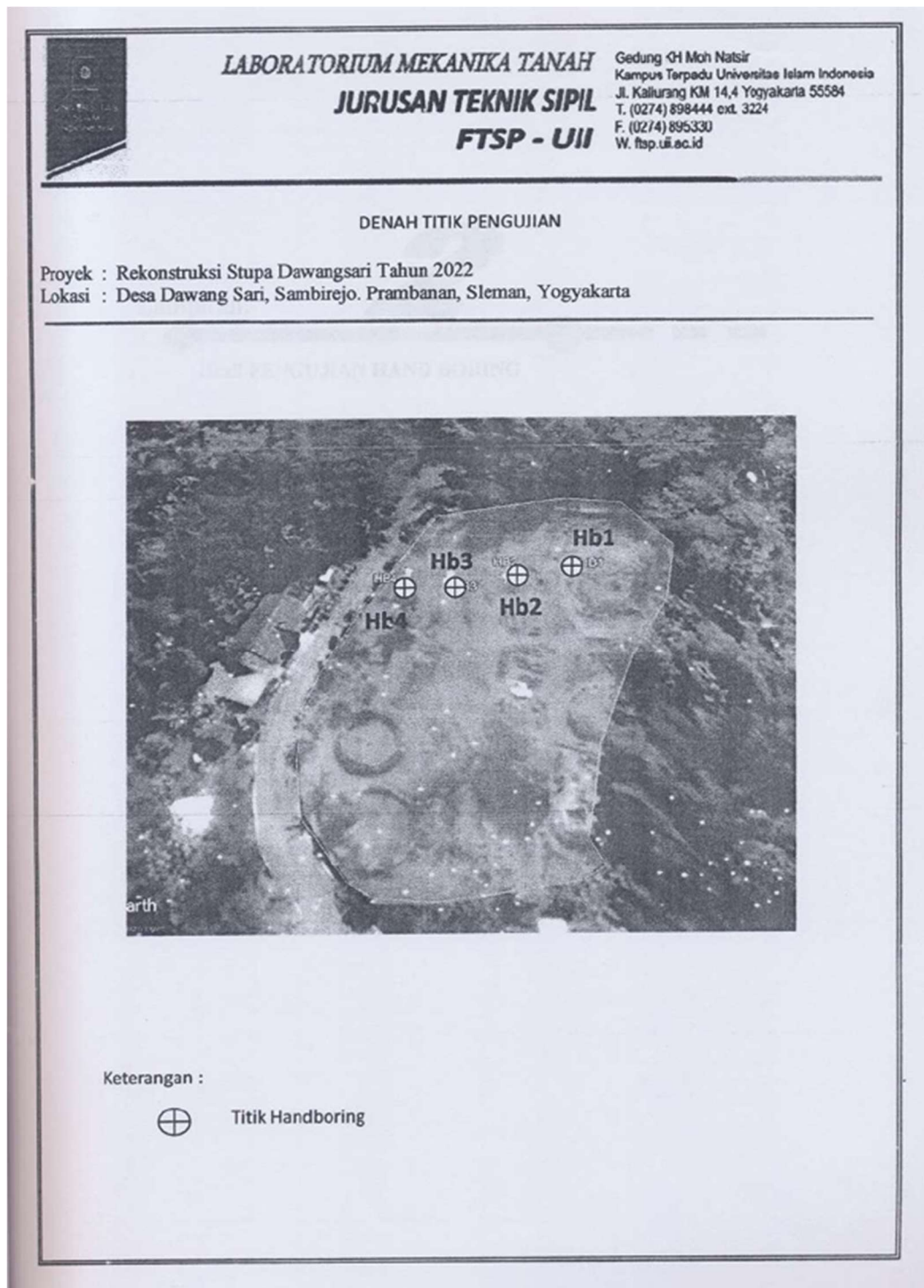
Manggar Sari Ayuati, SS,MA.
 NIP 197611072005022001



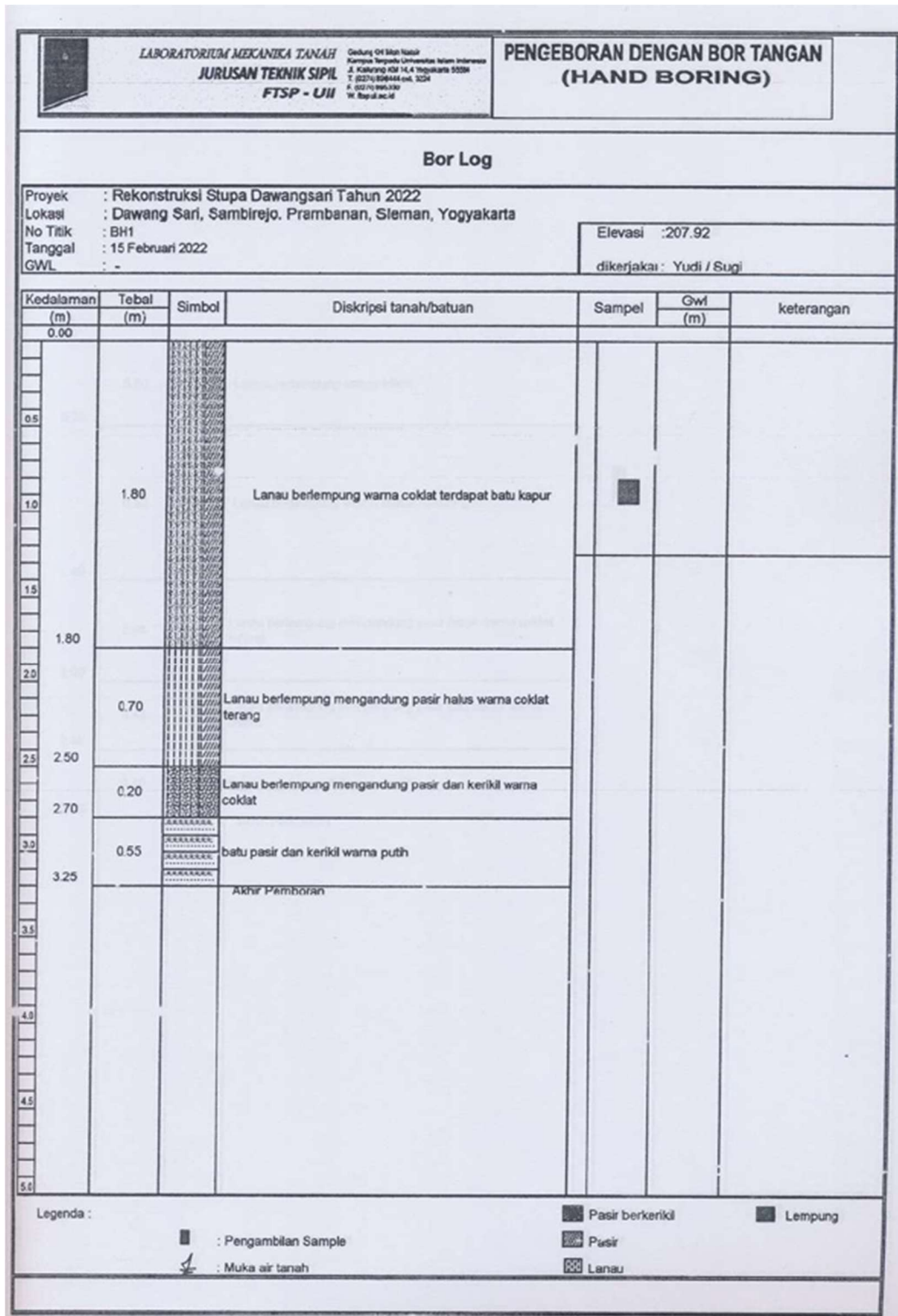
Catatan :

1. UU ITE No. 11 Tahun 2008 Pasal 5 Ayat 1 "Informasi Elektronik dan/atau Dokumen Elektronik dan/atau hasil cetaknya merupakan alat bukti yang sah."
2. Dokumen ini telah ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh BSE

Lampiran Denah Titik Pengujian



Lampiran Bor Log Hand Boring 1



Lampiran Bor Log Hand Boring 2

Kedalaman (m)		Tebal (m)	Simbol	Diskripsi tanah/batuan	Sampel	Gwl (m)	keterangan
0.00							
0.50	0.50			Lanau berlempung warna hitam			
1.00	0.90			Lanau berlempung warna coklat kekuningan			
1.50	1.40			Lanau berlempung mengandung pasir halus warna coklat terang			
2.00	2.00			Lanau berlempung mengandung pasir dan kerikil warna coklat			
2.50	2.40			batu pasir dan kerikil warna putih			
3.00	2.80			Akhir Pemboran			
3.50							
4.00							
4.50							
5.00							

Proyek : Rekonstruksi Stupa Dawangsari Tahun 2022
 Lokasi : Dawang Sari, Sambirejo. Prambanan, Sleman, Yogyakarta
 No Titik : BH2
 Tanggal : 15 Februari 2022
 Elevasi : 206.258
 dikerjakan : Yudi / Sugi
 GWL : -

LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FTSP - UII

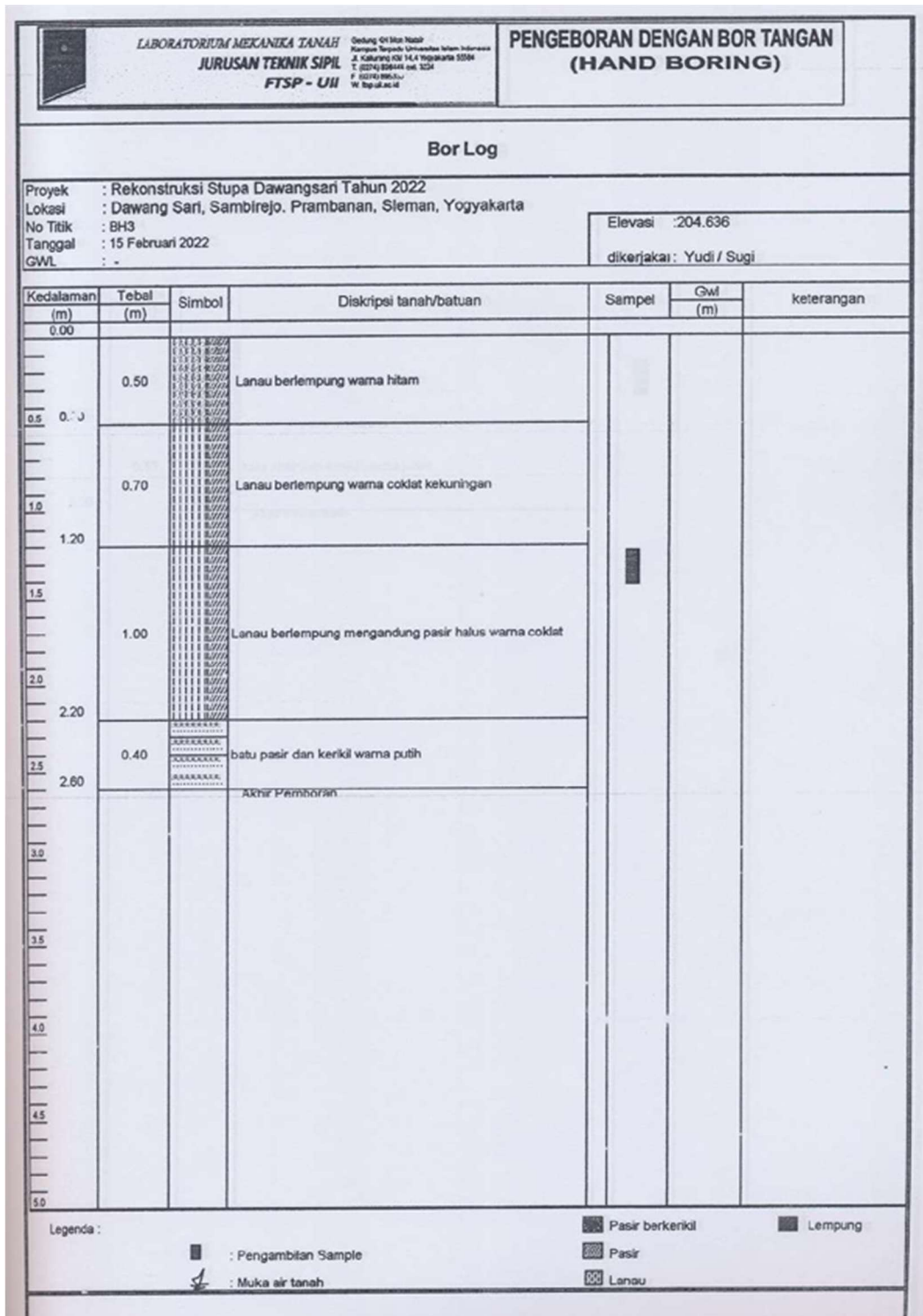
Gedung 01 Blok Pasir
 Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
 Jl. Kaliurang KM 14,4 Yogyakarta 55584
 T. (0274) 890444 ext. 3234
 F. (0274) 890239
 W. ipgii.ac.id

PENGEBORAN DENGAN BOR TANGAN
(HAND BORING)

Bor Log

Legenda :
 : Pengambilan Sample
 : Muka air tanah
 : Pasir berkerikil
 : Pasir
 : Lempung
 : Lanau

Lampiran Bor Log Hand Boring 3



Lampiran Bor Log Hand Boring 4

<small>LABORATORIUM MEKANIKA TANAH</small> <small>JURUSAN TEKNIK SIPIL</small> <small>FTSP - UH</small>		<small>Gedung 01 Blok Negeri</small> <small>Kampus Baru Universitas Islam Indonesia</small> <small>J. Kaliurang D.E. 54. Yogyakarta 55584</small> <small>T. 0274-89444 ext. 3024</small> <small>F. 0274-895300</small> <small>W. http://uui.ac.id</small>		PENGEBORAN DENGAN BOR TANGAN (HAND BORING)										
Bor Log														
Proyek : Rekonstruksi Stupa Dawangsari Tahun 2022 Lokasi : Dawang Sari, Sambirejo. Prambanan, Sleman, Yogyakarta No Titik : BH4 Tanggal : 15 Februari 2022 GWL : -				Elevasi : 202.636 dikerjakan : Yudi / Sugl										
Kedalaman (m)	Tebal (m)	Simbol	Diskripsi tanah/batuan	Sampel	Gwl (m)	keterangan								
0.00														
0.5	0.50		Lanau berlempung warna hitam	█										
1.0	0.50	XXXXXXX	batu pasir dan kerikil warna putih											
1.00			Akhir Pamboran											
1.5														
2.0														
2.5														
3.0														
3.5														
4.0														
4.5														
5.0														
Legenda : <table style="width: 100%; margin-top: 5px;"> <tr> <td style="width: 33%; text-align: center;">█ : Pengambilan Sample</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">▒ Pasir berkerikil</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">■ Lempung</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">/ : Muka air tanah</td> <td style="text-align: center;">░ Pasir</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">▤ Lanau</td> <td></td> </tr> </table>						█ : Pengambilan Sample	▒ Pasir berkerikil	■ Lempung	/ : Muka air tanah	░ Pasir			▤ Lanau	
█ : Pengambilan Sample	▒ Pasir berkerikil	■ Lempung												
/ : Muka air tanah	░ Pasir													
	▤ Lanau													

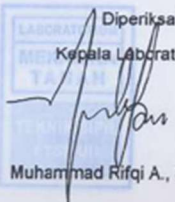
Lampiran Resume Properties Tanah HB 1

LABORATORIUM MEKANIKA TANAH JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - UII		RESUME PROPERTIES TANAH	
Gedung 01 Blok 1002 Kampus Satepa (Dinas) Jalan Indonesia A. Kulang KM 14.4 Yogyakarta 5508 T. (0271) 88644 ext. 324 F. (0271) 89336 W. http://uicf			
Proyek	: Rekonstruksi Stupa Dawangsari Tahun 2022		
Lokasi	: Dawang Sari, Sambirejo, Prambanan, Sleman, Yogyakarta		
No Titik	: HB 1 (1,00 - 1,50 m)		
Dikerjakan	: Yudi, Sugiyana		
Tanggal	: Februari 2022		
B. Uji Berat Volume			
No Ring	Satuan	a	b
Berat Ring	gram	62.98	62.98
Diameter Ring	cm	6.35	6.35
Tinggi Ring	cm	2.00	2.00
Volume Ring	cm ³	63.34	63.34
Berat ring + Tanah Basah	gram	176.53	177.16
Berat Tanah Basah	gram	113.550	114.180
Berat Volume tanah basah	gr/cm ³	1.793	1.803
Berat Volume tanah basah rata-rata	gr/cm ³	1.798	
A. Uji Kadar air			
No Cawan	Satuan	a	b
Berat Cawan	gram	8.60	9.03
Berat Cawan + Tanah Basah	gram	48.63	59.03
Berat Cawan + Tanah Kering	gram	39.15	46.99
Berat air	gram	9.48	12.07
Berat tanah kering	gram	30.35	37.93
Kadar air	%	31.24	31.82
Kadar air rata-rata	%	31.53	
C. Uji Berat Jenis			
No Pengujian	Satuan	1	2
Berat piknometer (W1)	gr	39.62	27.15
Berat piknometer + Tanah kering, (W2)	gr	58.90	38.16
Berat piknometer + Tanah + air, (W3)	gr	152.24	83.16
Berat piknometer + air, (W4)	gr	140.26	76.32
Suhu air (t°)	gr	25.00	25.00
γ air pada suhu (t°)		0.99708	0.99708
γ air pada suhu (20° C)		0.99820	0.99820
Berat Tanah kering (Ws)	gr	19.28	11.01
A = Ws + W4	gr	159.54	87.33
I = A - W3	gr	7.300	4.170
Berat Jenis tanah pada suhu (t°), Gs = Ws / I		2.641	2.640
Berat Jenis tanah pada suhu (20°) = Gs. ($\gamma_w t^\circ / \gamma_w t 20^\circ C$)		2.638	2.637
Berat jenis rata-rata pada suhu (20°)		2.638	

Volume total = 1.000 cm ³			
Va =		0.051	cm ³
Wa =		0.000	gr
Vw =		0.431	cm ³
Ww =		0.431	gr
Vs =		0.518	cm ³
We =		1.367	gr

No Sampel	Satuan	1	2	rerata
Kadar air (w)	%	31.24	31.82	31.529
Berat volume tanah basah (γ)	gr/cm ³	1.793	1.803	1.798
Berat volume tanah kering (γ_d)	gr/cm ³	1.368	1.368	1.367
Berat Jenis Tanah (Gs)		2.638	2.637	2.638
Angka pori, e		0.931	0.929	0.930
Porositas, n	%	48.22	48.15	48.183
Derajat kejenuhan		0.88	0.90	0.89

Diperiksa
Kepala Laboratorium




Muhammad Rifqi A., ST., M.Eng

Lampiran Resume Properties Tanah HB 2

LABORATORIUM MEKANIKA TANAH JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - UII		Gedung 01 Blok 1000F Kampus Segala Universitas Islam Indonesia J. Sekeloa Km 14.4 Yogyakarta 55084 T. (271) 88444 ext. 3224 F. (271) 882333 W. http://uui.ac.id		RESUME PROPERTIES TANAH	
Proyek : Rekonstruksi Stupa Dawangsari Tahun 2022 Lokasi : Dawang Sari, Sambirejo. Prambanan, Sleman, Yogyakarta No Titik : HB 2 (1,00 - 1,50 m) Dikerjakan : Yudi, Sugiyana Tanggal : Februari 2022					
B. Uji Berat Volume					
No Ring	Satuan	a	b		
Berat Ring	gram	42.95	42.95		
Diameter Ring	cm	6.00	6.00		
Tinggi Ring	cm	2.00	2.00		
Volume Ring	cm ³	56.55	56.55		
Berat ring + Tanah Basah	gram	132.75	132.51		
Berat Tanah Basah	gram	89.800	89.560		
Berat Volume tanah basah	gr/cm ³	1.588	1.584		
Berat Volume tanah basah rata-rata	gr/cm ³	1.586			
A. Uji Kadar air					
No Cawan	Satuan	a	b		
Berat Cawan	gram	9.21	8.88		
Berat Cawan + Tanah Basah	gram	65.33	68.87		
Berat Cawan + Tanah Kering	gram	51.40	53.84		
Berat air	gram	13.93	15.03		
Berat tanah kering	gram	42.19	44.96		
Kadar air	%	33.02	33.43		
Kadar air rata-rata	%	33.22			
C. Uji Berat Jenis					
No Pengujian	Satuan	1	2		
Berat piknometer (W1)	gr	28.40	18.60		
Berat piknometer + Tanah kering, (W2)	gr	42.54	33.94		
Berat piknometer + Tanah + air, (W3)	gr	85.51	78.02		
Berat piknometer + air, (W4)	gr	75.67	68.71		
Suhu air (t°)	gr	25.00	25.00		
γ air pada suhu (t°)		0.99708	0.99708		
γ air pada suhu (20° C)		0.99820	0.99820		
Berat Tanah kering (Ws)	gr	16.14	15.34		
A = Ws + W4	gr	91.81	84.05		
I = A - W3	gr	6.300	6.030		
Berat Jenis tanah pada suhu (t°), $G_s = W_s / I$		2.562	2.544		
Berat Jenis tanah pada suhu (20°) = $G_s (\gamma_w t^\circ / \gamma_w t 20^\circ C)$		2.559	2.541		
Berat jenis rata-rata pada suhu (20°)		2.550			

Volume total = 1.000 cm ³	
Va =	0.138 cm ³
Ww =	0.000 gr
Vw =	0.395 cm ³
Ww =	0.395 gr
Vs =	0.467 cm ³
Ws =	1.190 gr

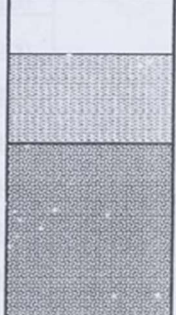
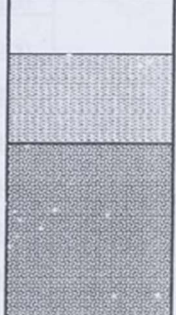
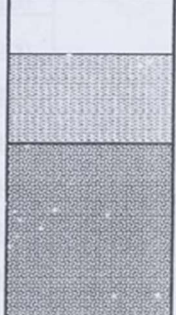
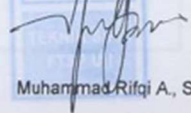
No Sampel	Satuan	1	2	rerata
Kadar air (w)	%	33.02	33.43	33.224
Berat volume tanah basah (γ)	gr/cm ³	1.586	1.584	1.586
Berat volume tanah kering (γ_d)	gr/cm ³	1.194	1.187	1.190
Berat Jenis Tanah (G_s)		2.559	2.541	2.550
Angka pori, e		1.144	1.141	1.142
Porositas, n	%	53.35	53.29	53.319
Derajat kejenuhan		0.74	0.74	0.74

Diperiksa
Kepala laboratorium

Muhammad Rifqi A., ST., M.Eng

Lampiran Resume Properties Tanah HB 3

LABORATORIUM MEKANIKA TANAH JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - UJI		Gedung Di Mah Negeri Kampus Sekeloa Utara Universitas Islam Indonesia Jl. Sekeloa Timur No. 144 Yogyakarta 55081 T. (0271) 80444 ext. 3234 F. (0271) 804330 W. http://uui.ac.id		RESUME PROPERTIES TANAH																																									
Proyek : Rekonstruksi Stupa Dawangsari Tahun 2022 Lokasi : Dawang Sari, Sambirejo. Prambanan, Sleman, Yogyakarta No Titik : HB 3 (1,50 - 2,00 m) Dikerjakan : Yudi, Sugiyana Tanggal : Februari 2022																																													
B. Uji Berat Volume																																													
No Ring	Satuan	a	b																																										
Berat Ring	gram	42.45	42.45																																										
Diameter Ring	cm	6.00	6.00																																										
Tinggi Ring	cm	2.00	2.00																																										
Volume Ring	cm ³	56.55	56.55																																										
Berat ring + Tanah Basah	gram	134.81	134.80																																										
Berat Tanah Basah	gram	92.360	92.410																																										
Berat Volume tanah basah	gr/cm ³	1.633	1.634																																										
Berat Volume tanah basah rata-rata	gr/cm ³	1.634																																											
A. Uji Kadar air																																													
No Cawan	Satuan	a	b																																										
Berat Cawan	gram	6.61	7.79																																										
Berat Cawan + Tanah Basah	gram	67.19	70.19																																										
Berat Cawan + Tanah Kering	gram	54.48	57.28																																										
Berat air	gram	12.71	12.91																																										
Berat tanah kering	gram	47.87	49.49																																										
Kadar air	%	26.55	26.00																																										
Kadar air rata-rata	%	26.32																																											
C. Uji Berat Jenis																																													
No Pengujian	Satuan	1	2																																										
Berat piknometer (W1)	gr	39.77	23.77																																										
Berat piknometer + Tanah kering, (W2)	gr	60.98	40.38																																										
Berat piknometer + Tanah + air, (W3)	gr	152.68	90.29																																										
Berat piknometer + air, (W4)	gr	139.53	80.02																																										
Suhu air (t ^o)	gr	25.00	25.00																																										
γ air pada suhu (t ^o)		0.99708	0.99708																																										
γ air pada suhu (20 °C)		0.99820	0.99820																																										
Berat Tanah kering (Ws)	gr	21.21	16.61																																										
A = Ws + W4	gr	160.74	96.63																																										
I = A - W3	gr	8.060	6.340																																										
Berat Jenis tanah pada suhu (t ^o), Gs = Ws / I		2.632	2.620																																										
Berat Jenis tanah pada suhu (20 ^o) = Gs (γw t ^o / γw t 20 °C)		2.629	2.617																																										
Berat jenis rata-rata pada suhu (20 ^o)		2.623																																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>No Sampel</th> <th>Satuan</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>rerata</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Kadar air (w)</td> <td>%</td> <td>26.55</td> <td>26.09</td> <td>26.319</td> </tr> <tr> <td>Berat volume tanah basah (γ)</td> <td>gr/cm³</td> <td>1.633</td> <td>1.634</td> <td>1.634</td> </tr> <tr> <td>Berat volume tanah kering (γd)</td> <td>gr/cm³</td> <td>1.291</td> <td>1.296</td> <td>1.293</td> </tr> <tr> <td>Berat Jenis Tanah (Gs)</td> <td></td> <td>2.629</td> <td>2.617</td> <td>2.623</td> </tr> <tr> <td>Angka pori, e</td> <td></td> <td>1.037</td> <td>1.019</td> <td>1.028</td> </tr> <tr> <td>Porositas, n</td> <td>%</td> <td>50.90</td> <td>50.47</td> <td>50.687</td> </tr> <tr> <td>Derajat kejenuhan</td> <td></td> <td>0.67</td> <td>0.67</td> <td>0.67</td> </tr> </tbody> </table>						No Sampel	Satuan	1	2	rerata	Kadar air (w)	%	26.55	26.09	26.319	Berat volume tanah basah (γ)	gr/cm ³	1.633	1.634	1.634	Berat volume tanah kering (γd)	gr/cm ³	1.291	1.296	1.293	Berat Jenis Tanah (Gs)		2.629	2.617	2.623	Angka pori, e		1.037	1.019	1.028	Porositas, n	%	50.90	50.47	50.687	Derajat kejenuhan		0.67	0.67	0.67
No Sampel	Satuan	1	2	rerata																																									
Kadar air (w)	%	26.55	26.09	26.319																																									
Berat volume tanah basah (γ)	gr/cm ³	1.633	1.634	1.634																																									
Berat volume tanah kering (γd)	gr/cm ³	1.291	1.296	1.293																																									
Berat Jenis Tanah (Gs)		2.629	2.617	2.623																																									
Angka pori, e		1.037	1.019	1.028																																									
Porositas, n	%	50.90	50.47	50.687																																									
Derajat kejenuhan		0.67	0.67	0.67																																									
Diperiksa Kepala Laboratorium Muhammad Rifqi A., ST., M.Eng																																													

Lampiran Resume Properties Tanah HB 4

LABORATORIUM MEKANIKA TANAH JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - UII		Gedung 0' (Mekah) lantai Kampus Sekeloa Utara Universitas Islam Indonesia J. Kaliurang, DM 14 E Yogyakarta 55584 T. (2014) 85444 ext. 324 F. (2014) 85330 W. ipak.uii.ac.id		RESUME PROPERTIES TANAH																																											
Proyek : Rekonstruksi Stupa Dawangsari Tahun 2022 Lokasi : Dawang Sari, Sambirejo, Prambanan, Sleman, Yogyakarta No Titik : HB 4 (0,00 - 0,50 m) Dikerjakan : Yudi, Sugiyana Tanggal : Februari 2022																																															
B. Uji Berat Volume																																															
No Ring	Satuan	a	b																																												
Berat Ring	gram	62.98	62.98																																												
Diameter Ring	cm	6.35	6.35																																												
Tinggi Ring	cm	2.00	2.00																																												
Volume Ring	cm ³	63.34	63.34																																												
Berat ring + Tanah Basah	gram	176.53	177.16																																												
Berat Tanah Basah	gram	113.550	114.180																																												
Berat Volume tanah basah	gr/cm ³	1.793	1.803																																												
Berat Volume tanah basah rata-rata	gr/cm ³	1.798																																													
A. Uji Kadar air																																															
No Cawan	Satuan	a	b																																												
Berat Cawan	gram	6.87	6.87																																												
Berat Cawan + Tanah Basah	gram	69.17	57.03																																												
Berat Cawan + Tanah Kering	gram	53.55	41.53																																												
Berat air	gram	15.62	12.50																																												
Berat tanah kering	gram	46.68	37.66																																												
Kadar air	%	33.46	33.19																																												
Kadar air rata-rata	%	33.33																																													
C. Uji Berat Jenis																																															
No Pengujian	Satuan	1	2																																												
Berat piknometer (W1)	gr	36.54	29.28																																												
Berat piknometer + Tanah kering, (W2)	gr	50.16	36.82																																												
Berat piknometer + Tanah + air, (W3)	gr	144.45	81.41																																												
Berat piknometer + air, (W4)	gr	136.11	76.79																																												
Suhu air (t°)	gr	25.00	25.00																																												
γ air pada suhu (t°)		0.99708	0.99708																																												
γ air pada suhu (20° C)		0.99820	0.99820																																												
Berat Tanah kering (Ws)	gr	13.62	7.54																																												
A = Ws + W4	gr	149.73	84.33																																												
I = A - W3	gr	5.280	2.920																																												
Berat Jenis tanah pada suhu (t°), Gs = Ws / I		2.580	2.582																																												
Berat Jenis tanah pada suhu (20°)= Gs. (γw t° / γw t 20° C)		2.577	2.579																																												
Berat jenis rata-rata pada suhu (20°)		2.578																																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">Volume total = 1.000 cm³</td> </tr> <tr> <td>Va =</td> <td></td> <td>0.028</td> <td>cm³</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Wa =</td> <td></td> <td>0.000</td> <td>gr</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Vw =</td> <td></td> <td>0.449</td> <td>cm³</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Ww =</td> <td></td> <td>0.449</td> <td>gr</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Vs =</td> <td></td> <td>0.523</td> <td>cm³</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Ws =</td> <td></td> <td>1.348</td> <td>gr</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>						Volume total = 1.000 cm ³						Va =		0.028	cm ³			Wa =		0.000	gr			Vw =		0.449	cm ³			Ww =		0.449	gr			Vs =		0.523	cm ³			Ws =		1.348	gr		
Volume total = 1.000 cm ³																																															
Va =		0.028	cm ³																																												
Wa =		0.000	gr																																												
Vw =		0.449	cm ³																																												
Ww =		0.449	gr																																												
Vs =		0.523	cm ³																																												
Ws =		1.348	gr																																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>No Sampel</td> <td>Satuan</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>rerata</td> </tr> <tr> <td>Kadar air (w)</td> <td>%</td> <td>33.46</td> <td>33.19</td> <td>33.327</td> </tr> <tr> <td>Berat volume tanah basah (γ)</td> <td>gr/cm³</td> <td>1.793</td> <td>1.803</td> <td>1.798</td> </tr> <tr> <td>Berat volume tanah kering (γ_s)</td> <td>gr/cm³</td> <td>1.343</td> <td>1.353</td> <td>1.348</td> </tr> <tr> <td>Berat Jenis Tanah (Gs)</td> <td></td> <td>2.577</td> <td>2.579</td> <td>2.578</td> </tr> <tr> <td>Angka pori, e</td> <td></td> <td>0.918</td> <td>0.906</td> <td>0.912</td> </tr> <tr> <td>Porositas, n</td> <td>%</td> <td>47.87</td> <td>47.53</td> <td>47.697</td> </tr> <tr> <td>Derajat kejenuhan</td> <td></td> <td>0.94</td> <td>0.95</td> <td>0.94</td> </tr> </table>						No Sampel	Satuan	1	2	rerata	Kadar air (w)	%	33.46	33.19	33.327	Berat volume tanah basah (γ)	gr/cm ³	1.793	1.803	1.798	Berat volume tanah kering (γ _s)	gr/cm ³	1.343	1.353	1.348	Berat Jenis Tanah (Gs)		2.577	2.579	2.578	Angka pori, e		0.918	0.906	0.912	Porositas, n	%	47.87	47.53	47.697	Derajat kejenuhan		0.94	0.95	0.94		
No Sampel	Satuan	1	2	rerata																																											
Kadar air (w)	%	33.46	33.19	33.327																																											
Berat volume tanah basah (γ)	gr/cm ³	1.793	1.803	1.798																																											
Berat volume tanah kering (γ _s)	gr/cm ³	1.343	1.353	1.348																																											
Berat Jenis Tanah (Gs)		2.577	2.579	2.578																																											
Angka pori, e		0.918	0.906	0.912																																											
Porositas, n	%	47.87	47.53	47.697																																											
Derajat kejenuhan		0.94	0.95	0.94																																											
Diperiksa Kepala Laboratorium  Muhammad Rifqi A., ST., M.Eng																																															