

PROYEK AKHIR - VH231837

**PERENCANAAN STRUKTUR PEMECAH GELOMBANG
DAN PERKUATAN TANAH DASAR MENGGUNAKAN
GEOTEXTILE-ENCASED STONE COLUMN PADA
PROYEK EASTPORT *BREAKWATER WORKS***

RISTIYA RACHMA PRAMESTI

NRP 2036211003

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Hendra Wahyudi, MS.

NIP 196304261988031003

Deris Faisa Ralindra, S.T., M.T.

NIP 198912172024061001

Program Studi Sarjana Terapan

Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Air

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil

Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



PROYEK AKHIR - VH231837

**PERENCANAAN STRUKTUR PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN
TANAH DASAR MENGGUNAKAN *GEOTEXTILE-ENCASED STONE
COLUMN* PADA PROYEK EASTPORT *BREAKWATER WORKS***

RISTIYA RACHMA PRAMESTI

NRP 2036211003

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Hendra Wahyudi, MS.

NIP 196304261988031003

Deris Faisa Ralindra, S.T., M.T.

NIP 198912172024061001

Program Studi Sarjana Terapan

Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Air

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil

Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



FINAL PROJECT - VH231837

**PLANNING OF BREAKWATER STRUCTURE AND SOIL IMPROVEMENT
USING GEOTEXTILE-ENCASED STONE COLUMN AT EASTPORT
BREAKWATER WORKS PROJECT**

RISTIYA RACHMA PRAMESTI

NRP 2036211003

Advisor

Dr. Ir. Hendra Wahyudi, MS.

NIP 196304261988031003

Deris Faiza Ralindra, S.T., M.T.

NIP 198912172024061001

Study Program Applied Bachelor Civil Engineering

Waterworks Construction Engineering Technology

Departement of Civil Infrastructure Engineering

Faculty of Vocation

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

LEMBAR PENGESAHAN

PERENCANAAN STRUKTUR PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN TANAH DASAR MENGUNAKAN *GEOTEXTILE-ENCASED STONE* COLUMN PADA PROYEK EASTPORT *BREAKWATER WORKS*

PROYEK AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Terapan pada
Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Air
Departemen Teknik Infrastruktur Sipil

Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **RISTIYA RACHMA PRAMESTI**

NRP. 2036211003

Disetujui oleh Tim Pembimbing dan Penguji Proyek Akhir:

- | | | |
|---|---------------|---------|
| 1. Dr. Ir. Hendra Wahyudi, MS. | Pembimbing I | (.....) |
| 2. Deris Faiza Ralindra, S.T., M.T. | Pembimbing II | (.....) |
| 3. Rizki Robbi Rahman Alam, S.T., M.T. | Penguji I | (.....) |
| 4. Moh. Fadhlhan Rosyidi, S.Tr.T., M.T. | Penguji II | (.....) |

01 AUG 2025

Mengetahui,

Kepala Departemen Teknik Infrastruktur Sipil FV ITS



Tata, Ph.D.
NIP. 198006212005011002

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN ORISINALITAS

STATEMENT OF ORIGINALITY

Yang bertanda tangan di bawah ini

The undersigned below

Nama Mahasiswa / NRP : Ristiya Rachma Pramesti / 2036211003

Student Full Name / Student ID

Program Studi : Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Air

Study Programme

Dengan ini menyatakan bahwa Proyek Akhir dengan judul “Perencanaan Struktur Pemecah Gelombang dan Perkuatan Tanah Dasar Menggunakan *Geotextile-Encased Stone Column* Pada Proyek Eastport *Breakwater Works*” adalah hasil karya saya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah. Proyek Akhir ini telah diperiksa menggunakan aplikasi Turnitin dan memperoleh tingkat kemiripan sebesar 14%. Sebagai bagian dari pernyataan ini, saya melampirkan hasil uji kemiripan Turnitin sebagai bukti pendukung.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Hereby declare that the Final Project with the title of “Planning of Breakwater Structure and Soil Improvement Using Geotextile-Encased Stone Column At Eastport Breakwater Works Project” is the result of my own work, is original, and was written following the rules of scientific writing. This Final Project has been checked using the Turnitin application and obtained a similarity index of 14%. As part of this statement, I attach the Turnitin similarity report as supporting evidence. If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 31 Juli 2025

Mahasiswa,



(Ristiya Rachma Pramesti)

NRP. 2036211003

turnitin 3.pdf

ORIGINALITY REPORT

14%

SIMILARITY INDEX

15%

INTERNET SOURCES

3%

PUBLICATIONS

6%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repository.its.ac.id Internet Source	7%
2	repository.ub.ac.id Internet Source	1%
3	www.scribd.com Internet Source	1%
4	repository.uib.ac.id Internet Source	1%
5	Submitted to Program Pascasarjana Universitas Negeri Yogyakarta Student Paper	1%
6	es.scribd.com Internet Source	<1%
7	e-journal.uajy.ac.id Internet Source	<1%
8	positori.usu.ac.id Internet Source	<1%
9	pdfcoffee.com Internet Source	<1%

10	dspace.uui.ac.id Internet Source	<1 %
11	repository.usu.ac.id Internet Source	<1 %
12	adoc.pub Internet Source	<1 %
13	ar.scribd.com Internet Source	<1 %
14	lib.ui.ac.id Internet Source	<1 %
15	eprints.undip.ac.id Internet Source	<1 %
16	peraturan.bpk.go.id Internet Source	<1 %
17	pareparekota.go.id Internet Source	<1 %
18	pt.scribd.com Internet Source	<1 %
19	idoc.pub Internet Source	<1 %
20	Submitted to Politeknik Negeri Bandung Student Paper	<1 %

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KODE ETIK PENGGUNAAN AI GENERATIF
CODE OF CONDUCT STATEMENT: GENERATIVE AI OR AI-ASSISTED USAGE

Saya yang bertanda tangan di bawah ini
I, the undersigned

Nama Mahasiswa / NRP : Risiya Rachma Pramesti / 2036211003

Full Name / Student ID

Program Studi : Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi
Study Programme Bangunan Air

Judul Proyek Akhir : Perencanaan Struktur Pemecah Gelombang dan Perkuatan
Final Project Title Tanah Dasar Menggunakan *Geotextile-Encased Stone Column* Pada Proyek *Eastport Breakwater Works*

dengan ini menyatakan bahwa pada Proyek Akhir dengan judul di atas tersebut:
hereby declare that in the Final Project with the above title:

No.	Pernyataan <i>Statement</i>	(✓)
1	Saya tidak menggunakan AI generatif sama sekali <i>I did not use generative AI at all</i>	
2	Saya hanya menggunakan AI generatif sebagai alat bantu untuk memperbaiki tata bahasa. AI generatif tidak digunakan untuk membuat isi Proyek Akhir. <i>I only used generative AI as a tool to improve the readability or language of the text in my Final Project. It was not used to generate a complete text of my work.</i>	✓
3	Saya telah memeriksa dan/atau memperbaiki seluruh bagian dari Proyek Akhir saya yang dibantu oleh AI generatif agar sesuai dengan baku mutu penulisan karya ilmiah. <i>I have reviewed and refined all aspects of my work that generative AI assists with, ensuring it adheres to the standards of academic writing.</i>	✓
4	Saya tidak menggunakan AI generatif untuk pembuatan data primer, grafik dan/atau tabel pada Proyek Akhir saya. <i>I did not use generative AI to generate primary data, figures, and/or tables in my work.</i>	✓
5	Saya telah memberikan atribusi/pengakuan terhadap alat AI yang digunakan, secara rinci pada suatu bagian pada lampiran. <i>I have acknowledged the use of generative AI in any part of the work in the specific appendix page.</i>	
6	Saya memastikan tidak ada plagiarisme, termasuk hal yang berasal dari penggunaan AI generatif. <i>I have ensured that there is no plagiarism issue in the work, including any parts generated by AI.</i>	✓

Surabaya, 31 Juli 2025
Mahasiswa,



(Ristiya Rachma Pramesti)
NRP. 2036211003



Berita Acara Sidang Proyek Akhir / Thesis

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil Fakultas Vokasi ITS

Semester Genap 2024-2025

Nomor Jadwal **43**

Bahwa pada hari ini : Kamis, 17 Juli 2025

Pukul : 15.00 s/d 17.00

Di tempat : R-4

Program Studi : D4 TRKBA

Nama Mahasiswa : RISTIYA RACHMA PRAMESTI

NRP : 2036211003

Tanda Tangan Mahasiswa

Judul sidang Proyek Akhir/Thesis :

PERENCANAAN STRUKTUR PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN TANAH DASAR
MENGUNAKAN GEOTEXTILE-ENCASED STONE COLUMN PADA PROYEK EASTPORT
BREAKWATER WORKS

Yang dihadiri oleh Dosen Pembimbing :

No	NIP Nama Dosen	Tanda Tangan
1	Dr. Ir. Hendra Wahyudi, MS. 196304261988031003	
2	Deris Faiza Ralindra, S.T., M.T. 198912172024061001	
3		

Yang dihadiri oleh Dosen Penguji :

No	NIP Nama Dosen	Tanda Tangan
1	Rizki Robbi Rahman Alam, S.T., M.T. 199605302024061002	
2	Moh. Fadhlhan Rosyidi, S.Tr.T., M.T. 199703182024061003	
3		

Bahwasanya, musyawarah pembimbing dan penguji pada sidang proyek akhir/thesis ini memutuskan :

- ☐ LULUS
☒ LULUS, DENGAN REVISI/CATATAN
☐ TIDAK LULUS SIDANG

Catatan / revisi / masukan : **TERLAMPIR**

Tindak lanjut :

Mahasiswa memperbaiki/memperbaiki Proyek Akhir/Thesis sesuai dengan masukan dari Bapak/Ibu Dosen Pembimbing/Penguji

Penutup :

Demikian Berita Acara Sidang Proyek Akhir/Thesis ini dibuat sebagai panduan revisi oleh Mahasiswa.

LEMBAR REVISI / PERBAIKAN

Peserta Sidang Proyek Akhir/Thesis :

Nama Mahasiswa : RISTIYA RACHMA PRAMESTI

NRP : 2036211003

Program Studi : D4 TRKBA

Judul sidang Proyek Akhir/Thesis :

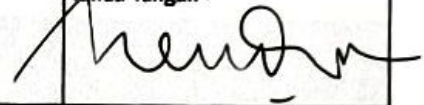
PERENCANAAN STRUKTUR PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN TANAH DASAR
MENGUNAKAN GEOTEXTILE-ENCASED STONE COLUMN PADA PROYEK EASTPORT
BREAKWATER WORKS

Catatan / revisi / masukan :

Nama Dosen :

Dr. Ir. Hendra Wahyudi, MS. || 196304261988031003

Tanda Tangan :



Area for handwritten notes and revisions, consisting of multiple horizontal dashed lines.

Note : Jika isian catatan revisi/perbaikan kurang, dapat mengisi di balik lembar ini.

LEMBAR REVISI / PERBAIKAN

Peserta Sidang Proyek Akhir/Thesis :

Nama Mahasiswa : RISTIYA RACHMA PRAMESTI

NRP : 2036211003

Program Studi : D4 TRKBA

Judul sidang Proyek Akhir/Thesis :

PERENCANAAN STRUKTUR PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN TANAH DASAR
MENGUNAKAN GEOTEXTILE-ENCASED STONE COLUMN PADA PROYEK EASTPORT
BREAKWATER WORKS

Catatan / revisi / masukan :

Nama Dosen :	Tanda Tangan :
Deris Faisa Ralindra, S.T., M.T. 198912172024061001	

- total settlement 6, m ? , $\sigma = 49,6 \text{ kN}$, dari settlement berapa ?
- perhitungan daya dukung pondasi ~~dasar~~ ^{dasar} dalam (cek kembali formula) ^{adisi} _{dasar}
- total settlement GESC kok masih dasar ? _{mayor dari mana}
- kekuatan geotextilnya apa sudah cukup ?

P. Fadlan

- cek lajur penunjang
- konsy komposit (diastak ke P. Fadlan)
- perbaiki gambar detail.

P. Robbi

- Tambahkan gzy gelombang
- Cek kondisi Surf maksimum
- perbaiki ^{metode} metode perhitungan.

LEMBAR REVISI / PERBAIKAN

Peserta Sidang Proyek Akhir/Thesis :

Nama Mahasiswa : RISTIYA RACHMA PRAMESTI

NRP : 2036211003

Program Studi : D4 TRKBA

Judul sidang Proyek Akhir/Thesis :

PERENCANAAN STRUKTUR PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN TANAH DASAR
MENGUNAKAN GEOTEXTILE-ENCASED STONE COLUMN PADA PROYEK EASTPORT
BREAKWATER WORKS

Catatan / revisi / masukan :

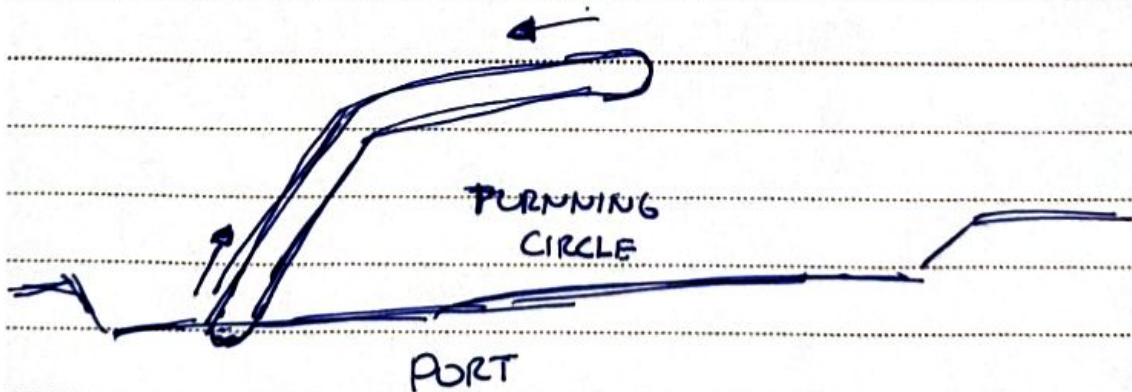
Nama Dosen :

Rizki Robbi Rahman Alam, S.T., M.T. | 199605302024061002

Tanda Tangan :



- 1) DETAIL & POLA SUSUNAN ~~STONE COLUMN~~ STONE COLUMN
DITAMBAH GAMBAR NYA
- 2) DIAMETER ARMOR PERLU DITAMBAH, DAN JUMLAH
BATU KESELURUHAN
- 3) ~~GAMBAR~~ ^{GAMBAR} ~~STRATIGRAFI~~ STRATIGRAFI DI PERBAIKI (TERLAMAR)
- 4) STABILITAS LENGKAP DENGAN LLWL DAN
GAYA GELOMBANG
- 5) METODE KONSTRUKSI MULAI DARI LAUT DAN
DARAT



Note : Jika isian catatan revisi/perbaikan kurang, dapat mengisi di balik lembar ini.

LEMBAR REVISI / PERBAIKAN

Peserta Sidang Proyek Akhir/Thesis :

Nama Mahasiswa : RISTIYA RACHMA PRAMESTI

NRP : 2036211003

Program Studi : D4 TRKBA

Judul sidang Proyek Akhir/Thesis :

PERENCANAAN STRUKTUR PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN TANAH DASAR
MENGUNAKAN GEOTEXTILE-ENCASED STONE COLUMN PADA PROYEK EASTPORT
BREAKWATER WORKS

Catatan / revisi / masukan :

Nama Dosen :	Tanda Tangan :
Moh. Fadhlan Rosyidi, S.Tr.T., M.T. 199703182024061003	

1. Cek waktu konsolidasi nilai cv
2. Cek terhadap komposit material → Stabilitas & Settlement
3. data tanah usap ke gambar cross
4. Perbaikan metode Pelaksanaan

Note : Jika isian catatan revisi/perbaikan kurang, dapat mengisi di balik lembar ini.



ASISTENSI TUGAS AKHIR TERAPAN/TESIS

Nama : Ristiya Rachma Pramesti

NRP : 2036211003

Judul Tugas Akhir : Perencanaan Struktur Pemecah Gelombang & Pertebaran Tanah Dasar menggunakan Geotextile-Encased Stone Column Pada Proyek Eastport Breakwater Works

Dosen Pembimbing : Dr.Ir. Hendra Wahyudi, M.T.

NO	TGL	TUGAS/MATERI YANG DIBAHAS	TANDA TANGAN	KETERANGAN
1.	22-04-25	- Dimensi struktur disesuaikan dengan perhitungan telakha- rus sama dengan proyek - Analisis metode perbaikan tanah segera dikerjakan - Stabilitas sementara dianalisis sesuai sempro dulu	Hendra	B C K ☐ ☐ ☐
2	28-04-25	- Dimensi struktur sudah selesai - Desain GESC segera di selesaikan	Hendra	B C K ☐ ☐ ☐
3	26-05-25	- Stabilitas sebaiknya dianalisis metode konven- sional juga	Hendra	B C K ☐ ☐ ☐
4.	24/6	Dijinkan y. ikut ujian	Hendra	B C K ☐ ☐ ☐
				B C K ☐ ☐ ☐

Keterangan :

B
☐ = Lebih cepat dari jadwal

C
☐ = Sesuai dengan jadwal

K
☐ = Terlambat dari jadwal



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, TINGGI, SAINS
DAN TEKNOLOGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS VOKASI
DEPARTEMEN TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL
Kampus ITS Manyar, Jl. Raya Menur 127 Surabaya, 60116
Telepon: 031 5947637 Fax: 031 5938025
<https://www.its.ac.id/tis/> email: tis@its.ac.id

ASISTENSI TUGAS AKHIR TERAPAN/TESIS

Nama : Ristiya Rachma Pramesti
NRP : 2036211003

Judul Tugas Akhir : Perencanaan Struktur Pemecah Gelombang & Penguatan Tanah Dasar Menggunakan Geotextile-Encased Stone Columns Pada Proyek Eastport Breakwater Works

Dosen Pembimbing: Peris Faisa Ralindra, S.T., M.T.

NO	TGL	TUGAS/MATERI YANG DIBAHAS	TANDA TANGAN	KETERANGAN
1.	28-04-25	- Penggunaan data tanah harus dipahami dan bisa dibuat analisisnya di bab 4 - Contoh perhitungan settlement konvensional hasilnya tidak boleh berbeda lebih dr 5% dr hasil software		B C K ☐ ☐ ☐
2.	14-05-25	- Analisis kondisi tanah, beban, penurunan, & stabilitas untuk penentuan penguatan tanah - SF daya dukung kolom 2,5-4, untuk meningkatkan daya dukung bisa diperbesar luas permukaan kolomnya		B C K ☐ ☐ ☐
3.	26-05-25	- Stage construction dianalisis setiap 2m - Analisis daya dukung grup stone colum - Dalam setiap asumsi, dasarnya diperkuat		B C K ☐ ☐ ☐
4.	16-06-25	- Hitung Q_u dan Q_{izin} - Timbunan bertahap dihitung stabilitasnya di Geostudio saja -		B C K ☐ ☐ ☐
5.	30-06-25	- Geotextile berada dibawah timbunan (dasar) - Ms. Project dibuat simple saja - Lampiran Gambar kerja dibuat jilidan sendiri		B C K ☐ ☐ ☐

Keterangan :

- B
☐ = Lebih cepat dari jadwal
C
☐ = Sesuai dengan jadwal
K
☐ = Terlambat dari jadwal

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRAK

PERENCANAAN STRUKTUR PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN TANAH DASAR MENGUNAKAN *GEOTEXTILE-ENCASED STONE COLUMN* PADA PROYEK EASTPORT *BREAKWATER WORKS*

Nama Mahasiswa / NRP : Ristiya Rachma Pramesti / 2036211003
Departemen : Teknik Infrastruktur Sipil FV - ITS
Dosen Pembimbing 1 : Dr. Ir. Hendra Wahyudi, MS.
Dosen Pembimbing 2 : Deris Faisa Ralindra, S.T., M.T.

Abstrak

Pelabuhan memegang peranan krusial dalam sistem transportasi barang. Data Badan Pusat Statistik tahun 2024 menunjukkan bahwa transaksi peti kemas di lima pelabuhan utama Indonesia mengalami peningkatan sebesar 30% dari tahun 2020 hingga 2023. Melihat potensi tersebut, PT. Lamongan *Integrated Shorebase* merencanakan pembangunan *East Java Multipurpose Terminal* (EJMT) yang berlokasi di Desa Kemantren, Kecamatan Paciran, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur. EJMT menghadapi tantangan terkait kondisi gelombang tinggi yang dapat mengganggu operasional pelabuhan. Untuk mengatasi masalah tersebut, pembangunan *breakwater* direncanakan untuk menyediakan pelabuhan yang aman dan tenang. Namun, proyek tersebut berpotensi mengalami keterlambatan akibat kondisi tanah lempung kelanauan dengan permeabilitas rendah. Oleh karena itu, diperlukan solusi yang tepat untuk mengatasi berbagai permasalahan tersebut. Hasil analisis menunjukkan desain dari struktur *shore connected breakwater* yang direncanakan tidak memungkinkan terjadinya *overtopping* dengan elevasi puncak bagian lengan +6,5 m dan bagian kepala +6,8. Perkuatan tanah dasar yang direncanakan adalah *Geotextile-Encased Stone Columns* (GESC) dengan pola pemasangan segitiga, diameter kolom sebesar 0,8 m, jarak spasi 1,5 m, dipasang hingga kedalaman tanah *uncompressible*, dan setiap kolom memiliki 1 lapis *Geotextile Woven Settlement* yang dihasilkan dari timbunan struktur *breakwater* sebesar 6,449 meter pada kondisi sebelum perkuatan dan 0,545 meter pada kondisi setelah perkuaan. Stabilitas yang dihasilkan dengan adanya GESC yang paling kritis sebesar 1,425 pada kondisi LLWL dengan gempa. Nilai tersebut lebih besar dari SF yang disyaratkan, sehingga struktur *breakwater* aman dari keruntuhan. Berdasarkan analisis produktivitas dan durasi pekerjaan, pekerjaan konstruksi Proyek EBW akan selesai pada September tahun 2025 atau Februari tahun 2026 disesuaikan dengan pemilihan metode konstruksinya. Maka, rencana desain struktur *breakwater* dan perkuatan tanah dasar menggunakan GESC efektif untuk menyelesaikan pekerjaan konstruksi dengan tepat waktu.

Kata kunci: *Breakwter, Settlement, GESC.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

PLANNING OF BREAKWATER STRUCTURE AND SOIL IMPROVEMENT USING GEOTEXTILE-ENCASED STONE COLUMN AT EASTPORT BREAKWATER WORKS PROJECT

Student Name / NRP : Ristiya Rachma Pramesti / 2036211003
Department : Teknik Infrastruktur Sipil FV - ITS
Advisor 1 : Dr. Ir. Hendra Wahyudi, MS.
Advisor 2 : Deris Faisa Ralindra, S.T., M.T.

Abstract

Ports play a crucial role in the freight transportation system. Data from the Central Statistics Agency in 2024 shows that container transactions at Indonesia's five main ports increased by 30% from 2020 to 2023. Given this potential, PT. Lamongan Integrated Shorebase plans to build the East Java Multipurpose Terminal (EJMT) located in Kemantren Village, Paciran District, Lamongan Regency, East Java. The EJMT faces challenges related to high wave conditions that could disrupt port operations. To address this issue, the construction of a breakwater is planned to provide a safe and calm port. However, the project may face delays due to the low permeability of the clayey soil. Therefore, an appropriate solution is needed to address these issues. Analysis results indicate that the design of the planned shore-connected breakwater structure does not allow for overtopping, with a peak elevation of +6.5 m for the arm section and +6.8 m for the head section. The planned soil reinforcement is Geotextile-Encased Stone Columns (GESC) with a triangular installation pattern, a column diameter of 0.8 m, a spacing of 1.5 m, installed to the depth of uncompressible soil, and each column has one layer of woven geotextile. The settlement resulting from the breakwater structure pile-up is 6.449 meters in the pre-reinforcement condition and 0.545 meters in the post-reinforcement condition. The stability resulting from the most critical GESC is 1.425 in the LLWL condition with an earthquake. This value is greater than the required SF, so the breakwater structure is safe from collapse. Based on productivity and duration analysis, the construction work for the EBW Project will be completed by September 2025 or February 2026, depending on the selected construction method. Therefore, the design plan for the breakwater structure and foundation reinforcement using GESC is effective for completing the construction work on schedule.

Keywords: Breakwter, Settlement, GESC.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga dapat menyelesaikan Laporan Proyek Akhir yang berjudul “Perencanaan Struktur Pemecah Gelombang dan Perkuatan Tanah Dasar Menggunakan *Geotextile-Encased Stone Columns* (GESC) Pada Proyek Eastport *Breakwater Works*”. Penyusunan Laporan Proyek Akhir ini tidak lepas dari bantuan, doa, dukungan, dan perhatian berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis sampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Diri penulis sendiri karena telah berjuang dan bekerja keras untuk menyelesaikan Proyek Akhir ini.
2. Kedua orang tua dan keluarga tercinta yang selalu mendoakan tiada henti untuk keberhasilan penulis serta memberi dukungan moral maupun materil dalam setiap langkah.
3. Bapak Tatas., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
4. Bapak Deris Faisa Ralindra, S.T., M.T. selaku Kepala Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Air, Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan dosen pembimbing 2 yang telah memberikan arahan serta saran dalam penyelesaian Proyek Akhir ini.
5. Bapak Dr. Ir. Hendra Wahyudi, MS. selaku dosen pembimbing 1 yang telah memberikan arahan dan saran dalam penyelesaian Proyek Akhir ini.
6. Bapak Rizki Robbi Rahman Alam, S.T., M.T. selaku dosen penguji 1; Bapak Moh. Fadhlhan Rosyidi, S.Tr.T., M.T. selaku dosen penguji 2 yang telah memberikan koreksi dan saran dalam penyelesaian Proyek Akhir ini.
7. Bapak Prof. Dr. Ir. Kuntjoro, M.T. selaku dosen wali yang telah memberikan arahan dan bantuan selama masa perkuliahan.
8. Mochammad Rifai Sodhikin yang selalu mendampingi dan memberikan motivasi dalam menyelesaikan Proyek Akhir ini.
9. Teman-teman penghuni Ruang Baca Kampus ITS Manyar yang senantiasa memberikan semangat dalam menyelesaikan Proyek Akhir ini
10. Teman-teman TRKBA dan DS42 yang telah membantu selama masa perkuliahan serta berbagi informasi demi terselesaikannya Proyek Akhir ini.

Semoga Laporan Proyek Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca. Penulis menyadari akan adanya keterbatasan pengetahuan yang penulis miliki dalam penyusunan Laporan Proyek Akhir ini, sehingga masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang sifatnya membangun untuk evaluasi dan perbaikan kedepannya. Demikian yang dapat penulis sampaikan, semoga Laporan Proyek Akhir ini dapat dipahami dengan baik dan bermanfaat bagi siapapun yang membacanya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
1.6 Lokasi Penelitian	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	5
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 Pantai	6
2.2.2 Fetch	8
2.2.3 Transformasi Gelombang	8
2.2.4 Fluktuasi Muka Air Laut	14
2.2.5 <i>Breakwater</i>	18
2.2.6 Perencanaan Struktur <i>Breakwater</i>	20
2.2.7 Tanah	25
2.2.8 Penyelidikan Data Tanah.....	26
2.2.9 Karakteristik Tanah	28
2.2.10 Klasifikasi Tanah.....	30
2.2.11 Tanah Lunak	33
2.2.12 Penurunan Tanah (<i>Settlement</i>).....	35
2.2.13 Daya Dukung Tanah Dasar	44
2.2.14 Penentuan Metode Perbaikan Tanah	44
2.2.15 Metode Perbaikan Tanah dengan <i>Stone Column</i>	46
2.2.16 <i>Geotextile-Encased Stone Column</i> (GESC)	50
2.2.17 Jadwal Pelaksanaan	55
2.2.18 Settle3D	55
2.2.19 GeoStudio Slope/w	55

2.2.20	Microsoft Project	55
BAB 3	METODOLOGI	57
3.1	Bahan dan Peralatan yang Digunakan	57
3.1.1	Bahan	57
3.1.2	Alat	57
3.2	Urutan Pelaksanaan Proyek Akhir	57
3.2.1	Studi Literatur	57
3.2.2	Pengumpulan Data	58
3.2.3	Pengolahan Data	58
3.2.4	Perencanaan <i>Breakwater</i>	58
3.2.5	Perencanaan Perkuatan Tanah Dasar	59
3.2.6	Penyusunan Waktu Pelaksanaan Proyek	59
3.2.7	Kesimpulan dan Saran	59
3.3	Bagan Alir	60
BAB 4	PENGOLAHAN DATA	63
4.1	Data Batimetri	63
4.2	Data Tanah	65
BAB 5	PERENCANAAN <i>BREAKWATER</i>	71
5.1	Deformasi Gelombang	71
5.1.1	Refraksi Gelombang	71
5.1.2	Gelombang Pecah	74
5.2	Fluktuasi Muka Air Laut	76
5.2.1	Wave Set-Up	76
5.2.2	Wind Set-Up	76
5.2.3	Pemanasan Global	77
5.2.4	<i>Run Up</i>	78
5.2.5	Elevasi Muka Air Laut Rencana	79
5.3	Desain Struktur <i>Breakwater</i>	79
5.3.1	Berat Butir Batu	80
5.3.2	Lebar Puncak <i>Breakwater</i>	81
5.3.3	Tebal Lapis Pelindung	81
5.3.4	Jumlah Butir Batu	82
5.3.5	Dimensi Kaki Pelindung (<i>Toe</i>)	83
5.3.6	Desain Struktur <i>Breakwater</i>	84
BAB 6	PERENCANAAN PERKUATAN TANAH	85
6.1	Pembebanan	85
6.2	Analisis <i>Settlement</i> Tanpa Perkuatan	85

6.2.1	Perhitungan <i>Settlement</i> Metode Konvensional.....	85
6.2.2	Analisis <i>Settlement</i> Pada Software Settle3D	92
6.2.3	Perbandingan Hasil <i>Settlement</i>	98
6.2.4	Waktu Konsolidasi (<i>t</i>)	98
6.3	Analisis Daya Dukung Tanah Tanpa Perkuatan.....	100
6.4	Analisis Stabilitas Timbunan Tanpa Perkuatan.....	100
6.5	Perencanaan <i>Geotextile-Encased Stone Column</i> (GESC)	102
6.5.1	Tegangan yang Bekerja pada <i>Unit Cell</i>	103
6.5.2	Tegangan Horizontal Kolom dan Tanah	104
6.5.3	Penambahan Tegangan Menggunakan <i>Geotextile</i>	106
6.5.4	Daya Dukung Kolom Tunggal GESC	108
6.6	Analisis <i>Settlement</i> Dengan GESC	109
6.7	Analisis Stabilitas Timbunan Dengan GESC	110
BAB 7	PENYUSUNAN METODE DAN JADWAL PELAKSANAAN.....	117
7.1	Metode Pelaksanaan	117
7.1.1	Pekerjaan Perbaikan Tanah	117
7.1.2	Pekerjaan <i>Breakwater</i>	124
7.2	Volume Pekerjaan.....	130
7.2.1	Pemodelan Autodesk Revit 2025	130
7.2.2	<i>Quantity Take Off</i> Pada Autodesk Revit 2025	135
7.2.3	Volume Metode Konvensional.....	135
7.3	Produktivitas Alat Berat	137
7.3.1	Pekerjaan Perbaikan Tanah	137
7.3.2	Pekerjaan <i>Breakwater</i>	145
7.4	Waktu Pelaksanaan Proyek	150
BAB 8	PENUTUPAN.....	151
8.1	Kesimpulan.....	151
8.2	Saran	151
DAFTAR PUSTAKA		153
LAMPIRAN		155

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Grafik Transaksi Peti Kemas di 5 Pelabuhan Utama Indonesia Tahun 2020 - 2023	1
Gambar 1.2 Tinggi Timbunan Batu dan Kedalaman Tanah Lunak Proyek EBW	2
Gambar 1.3 Lokasi Penelitian	4
Gambar 2.1 Definisi dan Batasan Pantai	6
Gambar 2.2 Profil Pantai Berpasir	7
Gambar 2.3 Profil Pantai Berlumpur	8
Gambar 2.4 Gelombang Tanpa Difraksi	9
Gambar 2.5 Gelombang Terdifraksi	9
Gambar 2.6 Difraksi Gelombang di Belakang Rintangan	9
Gambar 2.7 Diagram Refraksi Gelombang	10
Gambar 2.8 Refraksi Gelombang Pada Kontur Lurus dan Sejajar	10
Gambar 2.9 Kondisi Untuk Gelombang Pecah Di Laut Dalam	12
Gambar 2.10 Penentuan Tinggi Gelombang Pecah	12
Gambar 2.11 Penentuan Kedalaman Gelombang Pecah	13
Gambar 2.12 Wave Set Up dan Set Down	15
Gambar 2.13 Muka Air Laut Karena Badai	15
Gambar 2.14 Perkiraan Kenaikan Muka Air Laut Karena Pemanasan Global	16
Gambar 2.15 Grafik <i>Run Up</i> Gelombang	17
Gambar 2.16 Elevasi Muka Air Laut Rencana	17
Gambar 2.17 Elevasi Muka Air Laut Rencana Tanpa Tsunami	18
Gambar 2.18 Pemecah Gelombang Sisi Miring	19
Gambar 2.19 Pemecah Gelombang Sisi Tegak	19
Gambar 2.20 Pemecah Gelombang Campuran	20
Gambar 2.21 Dimensi Pelindung Kaki Bangunan	22
Gambar 2.22 Peta Gempa	24
Gambar 2.23 Korelasi Parameter Tanah	27
Gambar 2.24 Grafik Plastisitas Untuk Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO	32
Gambar 2.25 Grafik Klasifikasi Tanah Metode USCS	32
Gambar 2.26 Grafik Plastisitas <i>Unified Soil Classification System</i>	33
Gambar 2.27 Kondisi Tegangan Tanah Saat $t = 0$	35
Gambar 2.28 Kondisi Tegangan Tanah Saat $0 < t < \infty$	36
Gambar 2.29 Kondisi Tegangan Tanah Pada $T = \infty$	36
Gambar 2.30 Grafik Tipikal e vs $\log \sigma$	36
Gambar 2.31 Grafik Untuk Menentukan Tekanan Pra-Konsolidasi	37
Gambar 2.32 Grafik e vs σ Kondisi NC dan OC	37
Gambar 2.33 Tahapan Settlement	38
Gambar 2.34 Kurva faktor pengaruh I	39
Gambar 2.35 Visualisasi dan Notasi $\Delta \sigma'$	41
Gambar 2.36 Grafik Variasi Nilai <i>Void Ratio</i> (e) Terhadap Waktu (t) Untuk Beban Tambahan yang Diberikan	42
Gambar 2.37 Metode Perbaikan Tanah yang Tersedia Untuk Berbagai Jenis Tanah	45
Gambar 2.38 Metode Konstruksi Untuk Timbunan Pada Tanah Lunak	45

Gambar 2.39 Tipe Keruntuhan <i>Stone Column</i>	46
Gambar 2.40 Tipe Keruntuhan <i>Stone Column</i> Grup	47
Gambar 2.41 <i>Stone Column</i> Dengan Pola Pemasangan Segitiga	48
Gambar 2.42 <i>Stone Column</i> dengan Pola Pemasangan Bujur Sangkar	48
Gambar 2.43 Model Perhitungan Dari <i>Geotextile-Encased Stone Column</i>	50
Gambar 2.44 Bidang Longsor Melingkar Timbunan	53
Gambar 2.45 Ilustrasi Parameter Stabilitas	53
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian (1)	60
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (2)	61
Gambar 4.1 Peta Sebaran Titik Batimetri Proyek EBW	63
Gambar 4.2 Peta Sebaran Titik Batimetri DEMNAS.....	64
Gambar 4.3 Peta Batimetri	64
Gambar 4.4 Peta Sebaran <i>Borehole</i>	65
Gambar 4.5 Grafik $C_c/(1+e_0)$ Vs Kedalaman.....	66
Gambar 5.1 Refraksi Gelombang	74
Gambar 5.2 Analisis <i>Fetch</i>	77
Gambar 5.3 Grafik Penentuan <i>Run Up</i> Gelombang	77
Gambar 5.4 Grafik Penentuan Bilangan Iribaren.....	78
Gambar 5.5 Pemecah Gelombang Sisi Miring Dengan Serangan Gelombang Pada Kedua Sisi	79
Gambar 6.1 Analisis Grafik Osterberg	87
Gambar 6.2 Project Settings Pada Settle3D	92
Gambar 6.3 Pengaturan Units Pada Settle3D	93
Gambar 6.4 Input Data Muka Air.....	93
Gambar 6.5 Input Geometri Timbunan (1).....	94
Gambar 6.6 Input Geometri Timbunan (2).....	94
Gambar 6.7 Input Data Parameter Tanah (1)	95
Gambar 6.8 Input Data Parameter Tanah (2)	95
Gambar 6.9 Identifikasi Lapisan Tanah (1).....	96
Gambar 6.10 Identifikasi Lapisan Tanah (2).....	96
Gambar 6.11 Compute Hasil <i>Total Settlement</i>	97
Gambar 6.12 Grafik Derajat Konsolidasi Pada Waktu ke-t	99
Gambar 6.13 Stabilitas Struktur <i>Existing</i> Tanpa Gempa Kondisi HHWL	100
Gambar 6.14 Stabilitas Struktur <i>Existing</i> Tanpa Gempa Kondisi LLWL	101
Gambar 6.15 Stabilitas Struktur <i>Existing</i> Dengan Gempa Kondisi HHWL.....	101
Gambar 6.16 Stabilitas Struktur <i>Existing</i> Dengan Gempa Kondisi LLWL	102
Gambar 6.17 Stabilitas Timbunan Dengan Perkuatan GESC Tanpa Gempa Kondisi HHWL	111
Gambar 6.18 Stabilitas Timbunan Dengan Perkuatan GESC Tanpa Gempa Kondisi LLWL.....	111
Gambar 6.19 Stabilitas Timbunan Dengan Perkuatan GESC Dengan Gempa Kondisi HHWL	112
Gambar 6.20 Stabilitas Timbunan Dengan Perkuatan GESC Dengan Gempa Kondisi LLWL	112
Gambar 6.21 Bidang Longsor Pada Timbunan	113
Gambar 7.1 Pekerjaan Pengadaan dan Instalasi GESC	117
Gambar 7.2 Penyesuaian Posisi dan Arah Tongkang (1)	118

Gambar 7.3 Penyesuaian Posisi dan Arah Tongkang (2)	119
Gambar 7.4 <i>Steel Tube</i> Menembus Tanah Dasar	119
Gambar 7.5 Penuangan Material Pengisi Pada GESC	120
Gambar 7.6 GESC yang Sudah Diinstal.....	120
Gambar 7.7 Pekerjaan Pengadaan dan Instalasi <i>Geotextile Woven</i>	121
Gambar 7.8 Pemuatan Material <i>Geotextile Woven</i>	122
Gambar 7.9 Lalu Lintas Jalur Darat dan Laut	122
Gambar 7.10 Pemasangan <i>Guide Line</i>	123
Gambar 7.11 Penenggelaman <i>Geotextile Woven</i> (1).....	123
Gambar 7.12 Penggelaran <i>Geotextile Woven</i> (2).....	123
Gambar 7.13 Posisi Instalasi <i>Geotextile Woven</i>	124
Gambar 7.14 Posisi <i>Bench Mark</i>	124
Gambar 7.15 Diagram Alir Pekerjaan <i>Excavation</i> STA 0+00	125
Gambar 7.16 Pemasangan <i>Guide Bouy</i>	125
Gambar 7.17 Pemasangan Patok STA 0+00	126
Gambar 7.18 Pengerukan <i>Seabed</i>	126
Gambar 7.19 Pengangkutan Galian Menuju <i>Disposol Area</i>	126
Gambar 7.20 Diagram Alir Instalasi Tubuh <i>Breakwater (Marine Construction)</i>	127
Gambar 7.21 Instalasi Batu (<i>Marine Construction</i>)	128
Gambar 7.22 <i>Join Inspection</i>	128
Gambar 7.23 Diagram Alir Instalasi Tubuh <i>Breakwater (Land Construction)</i>	129
Gambar 7.24 Instalasi Batu (<i>Land Construction</i>).....	130
Gambar 7.25 <i>Structural Template</i> pada Revit	130
Gambar 7.26 Membuat <i>Grid</i>	131
Gambar 7.27 Membuat <i>Level</i>	131
Gambar 7.28 <i>Family Template</i> pada Revit.....	132
Gambar 7.29 Fitur <i>Blend</i> pada Revit	132
Gambar 7.30 <i>Load Into Project</i>	133
Gambar 7.31 Penempatan <i>Section</i> pada Revit.....	133
Gambar 7.32 Proses <i>Quantity Take Off</i> pada Revit (1)	133
Gambar 7.33 Proses <i>Quantity Take Off</i> pada Revit (2)	134
Gambar 7.34 Proses <i>Quantity Take Off</i> pada Revit (3)	134
Gambar 7.35 Proses <i>Export Quantity Take Off</i> pada Revit.....	134
Gambar 7.36 Pemodelan Pada Revit STA 1+500 Sampai STA 1+600	135
Gambar 7.37 <i>Output Quantity Take Off</i> STA 1+500 - 1+600 Pada Revit	135
Gambar 7.38 <i>Plan of Geotextile Woven</i>	136

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

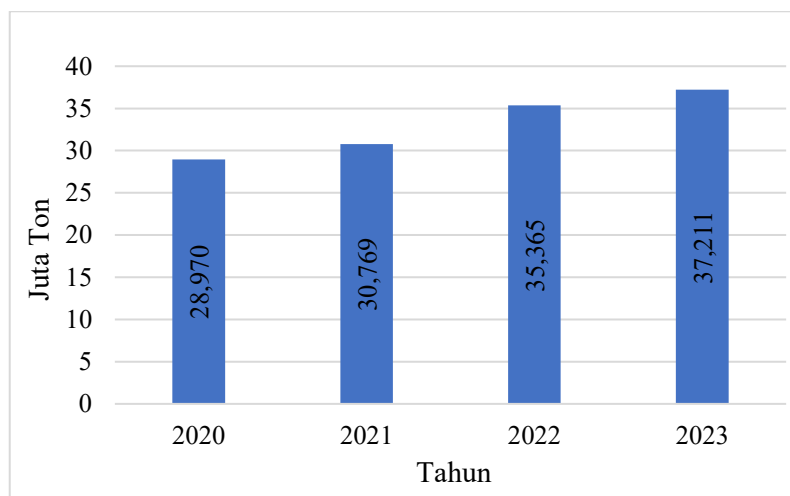
Tabel 2.1 Koefisien Refleksi	12
Tabel 2.2 Keuntungan dan Kerugian Ketiga Pemecah Gelombang	20
Tabel 2.3 Koefisien Stabilitas KD Untuk Berbagai Macam Butir	21
Tabel 2.4 Koefisien Lapis.....	23
Tabel 2.5 Faktor Amplifikasi Untuk PGA.....	25
Tabel 2.6 Klasifikasi Tanah dari Data Sondir	26
Tabel 2.7 Hubungan Antara Konsistensi Tanah dengan Tekanan Conus (Tanah Dominan Lanau dan Lempung).....	27
Tabel 2.8 Korelasi N-SPT dengan Karakteristik Tanah	27
Tabel 2.9 Indeks Plastisitas Tanah	28
Tabel 2.10 Klasifikasi Tanah AASHTO.....	31
Tabel 2.11 Tipe Tanah Lunak Berdasarkan Kadar Organik.....	33
Tabel 2.12 Kuat Geser Lempung Lunak	34
Tabel 2.13 Indikator Kuat Geser Tak Terdrainase Tanah Lempung Lunak.....	34
Tabel 2.14 Nilai Kisaran yang Realistis dari Tanah Lunak.....	34
Tabel 2.15 Harga-harga Modulus Young	39
Tabel 2.16 Harga-harga Angka Poisson	40
Tabel 2.17 Variasi Faktor Waktu Terhadap Derajat Konsolidasi	43
Tabel 2.18 Nilai Faktor Daya Dukung Terzaghi	44
Tabel 3.1 Data yang Dibutuhkan.....	57
Tabel 4.1 Lapisan Tanah Segmen 1.....	67
Tabel 4.2 Lapisan Tanah Segmen 2.....	67
Tabel 4.3 Lapisan Tanah Segmen 3.....	67
Tabel 4.4 Lapisan Tanah Segmen 4.....	67
Tabel 4.5 Lapisan Tanah Segmen 5.....	67
Tabel 4.6 Lapisan Tanah Segmen 6.....	68
Tabel 4.7 Lapisan Tanah Segmen 7.....	68
Tabel 4.8 Lapisan Tanah Segmen 8.....	68
Tabel 4.9 Lapisan Tanah Segmen 9.....	68
Tabel 4.10 Lapisan Tanah Segmen 10.....	69
Tabel 4.11 Lapisan Tanah Segmen 11.....	69
Tabel 5.1 Rekapitulasi Refraksi Gelombang	73
Tabel 5.2 Berat & Diameter Setiap Lapisan Batu	84
Tabel 6.1 Tegangan <i>Overburden</i> (σ_0') Segmen 10 STA 1+600	86
Tabel 6.2 <i>Immediate settlement</i> (S_i) Segmen 10 STA 1+600	88
Tabel 6.3 Nilai OCR Tanah.....	89
Tabel 6.4 Penentuan Rumus Konsolidasi Primer	90
Tabel 6.5 Nilai Konsolidasi Primer Setiap Lapisan Tanah	91
Tabel 6.6 <i>Total Settlement</i> Pada Settle3D	97
Tabel 6.7 Waktu Penurunan	99
Tabel 6.8 Tegangan Horizontal Tanah dan Kolom	105
Tabel 6.9 Perbedaan Antara Kolom dan Tanah.....	106
Tabel 6.10 Modulus Elastisitas Tanah Efektif.....	107

Tabel 6.11 Penambahan Radius Kolom	107
Tabel 6.12 Penambahan Tegangan Horizontal Akibat <i>Geotextile</i>	108
Tabel 6.13 Total Settlement Setelah Menggunakan Perkuatan GESC.....	110
Tabel 6.14 Tegangan Efektif Kolom Pada Bidang Longsor	113
Tabel 6.15 Kuat Geser Kolom Sepanjang Bidang Longsor	114
Tabel 6.16 Gaya Geser Maksimum	115
Tabel 7.3 Daftar Alat Instalasi GESC	118
Tabel 7.1 Indikator Pengujian <i>Geotextile Woven</i>	121
Tabel 7.2 Daftar Alat Instalasi <i>Geotextile Woven</i>	121
Tabel 7.4 Daftar Alat <i>Excavation</i>	125
Tabel 7.5 Daftar Alat Instalasi Tubuh <i>Breakwater (Marine Construction)</i>	127
Tabel 7.6 Daftar Alat Instalasi Tubuh <i>Breakwater (Land Construction)</i>	129
Tabel 7.7 Rekapistulasi Volume Material Pada Revit.....	135
Tabel 7.8 Volume <i>Geotxtile Woven</i> Pada Dasar Timbunan	136
Tabel 7.9 Produktivitas Alat Berat Instalasi <i>Geotextile Woven</i>	138
Tabel 7.10 Produktivitas Penggulungan <i>Geotextile Woven</i> Pada GESC.....	139
Tabel 7.11 Produktivitas Alat Berat Instalasi GESC.....	141
Tabel 7.12 Produktivitas Alat Berat Instalasi Batu Jalur Laut	145
Tabel 7.13 Produktivitas Alat Berat Instalasi Batu Jalur Darat.....	148
Tabel 7.14 Rekapitulasi Durasi Pekerjaan.....	150

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pelabuhan memiliki peran penting dalam kegiatan transportasi barang dari dan ke berbagai wilayah atau negara. Pelabuhan merupakan kunci dari kelancaran aliran *supply chain network* secara global khususnya dalam hal penjagaan kontinuitas aliran perpindahan barang berbentuk peti kemas. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik tahun 2023, jumlah transaksi peti kemas di 5 pelabuhan utama Indonesia yang meliputi Pelabuhan Tanjung Priok, Pelabuhan Tanjung Perak, Pelabuhan Balikpapan, Pelabuhan Belawan, dan Pelabuhan Makassar meningkat sebesar 30 % sejak tahun 2020 hingga tahun 2023. PT. Lamongan *Integrated Shorebase* memandang hal tersebut sebagai potensi bisnis dan investasi yang menjanjikan sehingga pada tahun 2023 pihak pengelola merencanakan pembangunan *East Java Multipurpose Terminal* (EJMT).



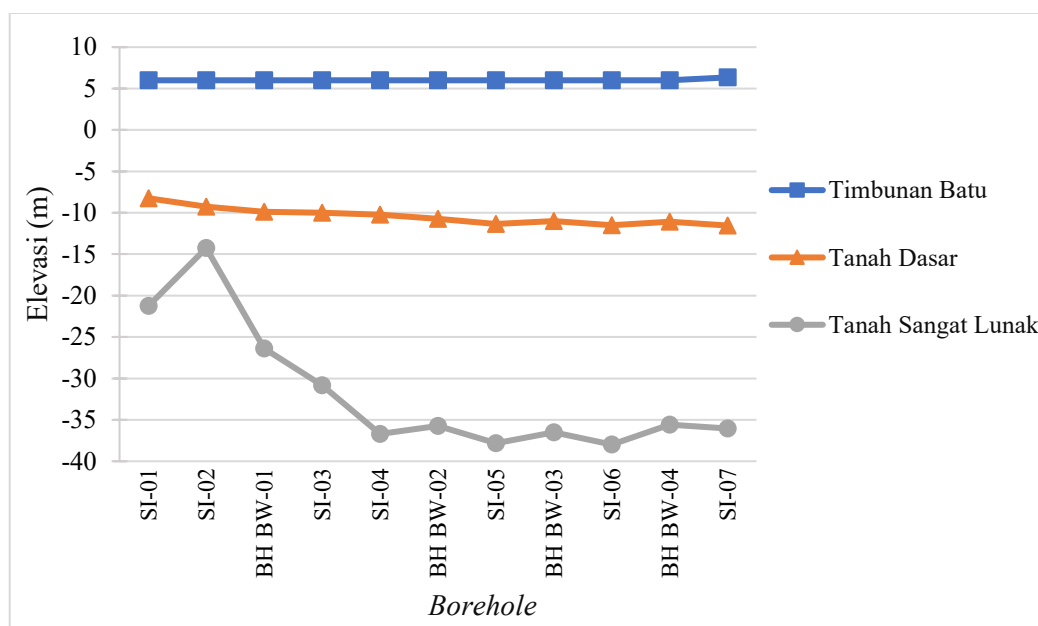
Gambar 1.1 Grafik Transaksi Peti Kemas di 5 Pelabuhan Utama Indonesia Tahun 2020 - 2023
Sumber: Badan Pusat Statistik Indonesia (2023)

EJMT yang berlokasi di Desa Kemantren, Kecamatan Paciran, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur diharapkan menjadi pelabuhan *multipurpose* yang dapat mendukung kemajuan perekonomian pada bidang manufaktur, bahan mentah, hingga barang olahan di Indonesia. Pelabuhan tersebut direncanakan dapat beroperasi pada tahun 2025. Namun, terdapat kendala yang menjadi pertimbangan dalam pengoperasian pelabuhan, yaitu gelombang tinggi dari arah barat laut. Hal tersebut cukup berisiko karena kapal yang melakukan muat dan bongkar dapat terombang-ambing serta sedimentasi yang dibawa dari laut dapat menyebabkan pendangkalan pada area pelabuhan. Pembangunan *breakwater* diharapkan menjadi solusi untuk menyediakan pelabuhan yang aman, tenang, dan terlindungi. Oleh karena itu, PT. Lamongan *Integrated Shorebase* menginisiasikan Proyek *Eastport Breakwater Works* (EBW) yang dimulai sejak 28 Agustus 2023 dan direncanakan selesai pada 25 Februari 2026 sebagai pendukung dari proyek EJMT.

Namun, Proyek *Eastport Breakwater Works* berpotensi mengalami kemunduran jadwal sehingga memberikan dampak negatif dalam aspek sosial serta ekonomi untuk EJMT. Hal tersebut disebabkan karena tanah pada area *breakwater* berjenis lempung kelanauan dengan permeabilitas yang rendah. Tanah dengan jenis tersebut apabila dalam kondisi jenuh memiliki daya dukung yang rendah dan waktu *settlement* yang lama, sehingga kondisi tanah kurang memenuhi syarat untuk mendirikan suatu bangunan atau konstruksi (Prastiwi dkk, 2016).

Dengan permasalahan tersebut, kontraktor memilih metode perbaikan tanah menggunakan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) untuk mendapatkan waktu dan total *settlement* yang kecil.

Pada analisis data tanah didapatkan hasil bahwa kedalaman tanah lunak pada lokasi *breakwater* dari Segmen 1 hingga Segmen 11 bervariasi antara 5 meter sampai 29 meter. Dengan ketebalan lapisan *compressible* yang bervariasi, setiap segmen juga memiliki total dan waktu *settlement* yang berbeda. Total *settlement* yang paling besar terjadi pada Segmen 10, yaitu 5,16 meter. Dengan total *settlement* yang cukup besar tersebut menyebabkan terjadinya *loose material*. Selain itu, waktu yang diperlukan untuk mencapai *settlement* juga cukup lama, yaitu 20 bulan. Apabila mengacu pada jadwal, waktu untuk mencapai *settlement* menggunakan metode perbaikan tanah PVD dapat menyebabkan keterlambatan proyek. Oleh karena itu, perlu dilakukan peninjauan ulang menggunakan metode perbaikan tanah lain yang sesuai dengan karakteristik tanah lunak sehingga dapat menghasilkan nilai total dan waktu *settlement* yang lebih kecil.



Gambar 1.2 Tinggi Timbunan Batu dan Kedalaman Tanah Lunak Proyek EBW
Sumber: *Geotechnical Interpretative Report* Proyek EBW (2024)

Metode perkuatan tanah dasar yang dapat diaplikasikan pada tanah sangat lunak adalah kolom batu (Han, 2015). Penggunaan kolom batu bertujuan untuk meningkatkan daya dukung tanah, mengurangi *total settlement*, dan mengurangi bahaya *liquefaction*. Namun, dalam tanah yang sangat lunak dengan kekuatan gaya geser *undrained* di bawah 15 kPa, kolom batu konvensional tidak dianjurkan karena batas tegangan efektif dari tanah tidak akan tercapai (FHWA, 1983). Apabila tanah tidak mampu menahan tegangan horizontal kolom, maka diperlukan tegangan horizontal tambahan yang diberikan oleh *Geotextile* atau disebut dengan *Geotextile-Encased Stone Columns* (GESC) (Rajagopal, 2010). Pada konstruksi *breakwater* di Patras, penggunaan metode tersebut dapat menghilangkan waktu tunggu konsolidasi yang sebelumnya dihasilkan oleh PVD selama 20 bulan dengan tetap mempertahankan stabilitasnya (Loukakis dan Yegian, 2015).

Dengan demikian, perlu dilakukan peninjauan ulang dalam memilih metode perkuatan tanah dasar yang dapat menahan beban dari struktur *breakwater*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah GESC. Maka dari itu, penulis melakukan penelitian pada Proyek Akhir

yang berjudul "Perencanaan Struktur Pemecah Gelombang dan Perkuatan Tanah Dasar Menggunakan *Geotextile-Encased Stone Columns* (GESC) Pada Proyek Eastport *Breakwater Works*". Diharapkan dengan adanya penelitian tersebut dapat memberikan desain struktur *breakwater* dan perkuatan tanah dasar yang lebih efektif terhadap mutu dan waktu.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam Proyek Akhir adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana desain dari struktur *breakwater* dan GESC untuk perkuatan tanah dasar?
2. Berapa total *settlement* yang dihasilkan sebelum dan sesudah perkuatan tanah dasar?
3. Bagaimana stabilitas terhadap keruntuhan dihasilkan dari struktur *breakwater* dan perkuatan tanah dasar?
4. Bagaimana efektivitas dari pemilihan desain *breakwater* dan perkuatan tanah dasar terhadap waktu pelaksanaan proyek?

1.3 Batasan Masalah

Agar tidak terjadi penyimpangan dalam pembahasan, perlu adanya beberapa batasan masalah sebagai berikut.

1. Efektivitas hanya dinilai berdasarkan nilai *safety factor* dan waktu penyelesaian proyek.
2. Nilai syarat *safety factor*, elevasi pasang surut, tinggi dan periode gelombang rencana, serta arah angin dominan berdasarkan ketentuan *owner* pada dokumen *Employer Requirements of EBW*.
3. Seluruh data tanah didapatkan dari dokumen *soil investigation* pada proyek dan data tanah yang tidak tersedia didapatkan dari pendekatan iterasi.
4. Hanya menggunakan data dari dokumen yang telah disetujui oleh *owner* atau direvisi oleh kontraktor maksimal pada tahun 2024.

1.4 Tujuan

Dari rumusan masalah yang telah penulis buat, tujuan dari Proyek Akhir adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui desain dari struktur *breakwater* dan GESC untuk perkuatan tanah dasar.
2. Mengetahui total *settlement* yang dihasilkan sebelum dan sesudah perkuatan tanah dasar.
3. Mengetahui stabilitas terhadap keruntuhan yang dihasilkan dari struktur *breakwater* dan perkuatan tanah dasar.
4. Mengetahui efektivitas dari pemilihan desain *breakwater* dan perkuatan tanah dasar terhadap waktu pelaksanaan proyek.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari Proyek Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan rekomendasi desain *breakwater* dan perkuatan tanah yang efektif.
2. Mendapatkan solusi metode perbaikan tanah sangat lunak untuk proyek yang serupa.

1.6 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian yang dipilih adalah Proyek Eastport *Breakwater Works* yang berada di Lamongan *Integrated Shorebase*, Desa Kemantren, Kecamatan Paciran, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur (6° 52' LS dan 112° 25' BT).



Gambar 1.3 Lokasi Penelitian
Sumber: Google Earth Pro (2024)

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian ini membutuhkan studi pustaka yang berhubungan dengan topik yang diambil seperti karakteristik tanah lunak, metode perbaikan tanah *stone column*, *breakwater*, dan metode pelaksanaan pekerjaan *stone column*. Studi pustaka tersebut digunakan oleh penulis sebagai acuan dan referensi dalam penyusunan proyek akhir ini. Studi pustaka yang digunakan pada penyusunan proyek akhir ini meliputi skripsi dan jurnal terdahulu, peraturan terkait, serta buku penunjang.

Literatur pertama pada penelitian yang berjudul "Perencanaan Bangunan Pemecah Gelombang Di Teluk Sumbreng, Kabupaten Trenggalek" (Karima, 2017). Penelitian ini berfokus pada perencanaan struktur *breakwater* yang berfungsi untuk meredam energi gelombang guna melindungi perairan di belakangnya. Tujuan utama dari pembangunan *breakwater* ini adalah untuk menunjang aktivitas sandar kapal nelayan serta memfasilitasi proses bongkar muat hasil tangkapan di area pelabuhan. Berdasarkan hasil analisis, struktur *breakwater* dirancang dengan tiga lapis pelindung. Tinggi gelombang di laut lepas yang digunakan sebagai dasar perencanaan diperoleh dari analisis *hindcasting* dan proyeksi gelombang dengan periode ulang 50 tahun, yaitu sebesar 3,82 meter. Sementara itu, tinggi gelombang yang diperkirakan bekerja langsung pada struktur berdasarkan hasil analisis refraksi adalah sebesar 0,343 meter.

Literatur kedua pada penelitian yang berjudul "*Quay Wall and Breakwater Design and Construction Of The New Port Of Patras*" (Loukakis dan Yegian, 2015). Penelitian ini menganalisis beberapa langkah perbaikan tanah yang digunakan dalam desain *Quay Wall and Breakwater Of Patras* untuk mengatasi kondisi geoteknik dan gempa bumi yang sangat merugikan. Dari hasil penelitian didapatkan alternatif desain perbaikan tanah yang dipilih adalah *stone column*. *Stone column* memberikan penguatan langsung tanah fondasi dengan mengganti sekitar 11% tanah liat. Rasio penggantian ini menjamin bahwa laju konstruksi tanggul timbunan batuan tidak bergantung pada peningkatan kekuatan lapisan tanah liat selama proses konsolidasi. Selain itu, masa tunggu yang semula berjumlah 20 bulan dihilangkan.

Literatur ketiga pada penelitian yang berjudul "*The Application Of Geotextile Encased Columns (GEC) Beneath Water In A Highly Seismic Area For The Construction Of An Up To 22 M High Embankment*" (Guler dkk, 2020). Penelitian ini menganalisis proyek perkuatan tanah dasar menggunakan *Geotextile Encased Columns (GEC)* pada timbunan jalan di atas wilayah Waduk Hirfanli. Timbunan jalan dibangun setinggi 22 m di atas tanah lunak sedalam 17 m. Penelitian tersebut juga membahas proses konstruksi dari instalasi GEC dengan kondisi muka air berada pada 12 m di atas tanah dasar. Hasil penelitian menyatakan bahwa perkuatan tanah menggunakan GEC pada studi kasus tersebut merupakan pilihan yang tepat karena uji stabilitas menggunakan beban seismik dan *shaking table test* menghasilkan angka yang aman.

Literatur keempat pada buku yang berjudul "*Design and Performance of Embankments on Very Soft Soils*" (Souza dan Marques, 2013). Penyusunan dari buku didasarkan pada pengalaman luas yang terakumulasi dalam 60 tahun terakhir tentang desain dan kinerja pekerjaan tanah pada tanah yang sangat lunak di Brazil. Buku tersebut menyajikan berbagai informasi dan teori mengenai aspek geoteknik tanah sangat lunak. Informasi yang termuat pada buku tersebut adalah sebagai berikut.

1. Perbandingan teknis konstruksi dan sifat-sifat tanah sangat lunak
2. Investigasi geoteknik

3. Metode perhitungan dan percepatan penurunan tanah
4. Metode analisis stabilitas tanggul
5. Metode perhitungan desain timbunan
6. Pemantauan kinerja timbunan di atas tanah sangat lunak

Literatur kelima pada buku yang berjudul "*Principles and Practice of Ground Improvement*" (Han, 2015). Buku tersebut merupakan sebuah referensi mendalam yang membahas berbagai teknik dan metode yang digunakan untuk memperbaiki sifat mekanik tanah. Tujuan utama dari perbaikan tanah ini adalah untuk meningkatkan daya dukung tanah, mengurangi permeabilitas, serta meningkatkan stabilitas lereng atau fondasi. Informasi yang termuat pada buku tersebut adalah sebagai berikut.

1. Jenis dan karakteristik tanah
2. Masalah umum tanah
3. Metode perbaikan tanah
4. Perancangan sistem perbaikan tanah
5. Studi kasus perbaikan tanah pada proyek konstruksi

2.2 Dasar Teori

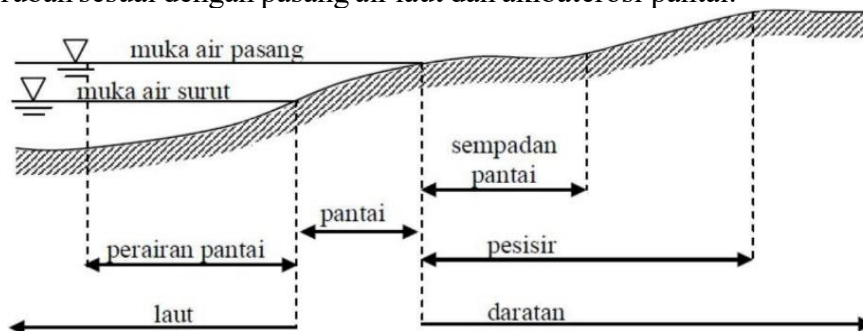
2.2.1 Pantai

2.2.1.1 Pengertian Pantai

Pantai merupakan bentuk bentang alam berupa hamparan pasir yang terletak di wilayah pesisir dan berperan sebagai batas alami antara daratan dan lautan. Panjang garis pantai suatu negara diukur berdasarkan total panjang wilayah tepi pantai yang berada dalam yurisdiksinya. Proses terbentuknya pantai disebabkan oleh hantaman gelombang laut yang berlangsung terus-menerus ke arah daratan, sehingga memicu terjadinya erosi atau pengikisan. Gelombang yang menimbulkan kerusakan ini dikenal sebagai gelombang destruktif.

Hingga saat ini, terdapat berbagai definisi mengenai pantai dan pesisir, namun sejumlah ahli sepakat terhadap beberapa pengertian umum sebagaimana dijelaskan oleh Triatmodjo (2008) dan digambarkan dalam Gambar 2.1, antara lain:

1. Pantai adalah daerah di tepi perairan yang dipengaruhi langsung oleh pasang air laut tertinggi dan air surut terendah.
2. Pesisir adalah daerah di tepi laut yang masih mendapat pengaruh laut seperti pasang surut, angin laut dan rembesan air laut. Jadi daerah pesisir jauh lebih luas dari pantai.
3. Daerah daratan adalah daerah yang dimulai dari garis pasang tertinggi ke arah darat.
4. Daerah lautan adalah daerah yang dimulai dari sisi laut pada garis surut terendah ke arah laut, termasuk dasar lautan dan bagian bumi di bawahnya.
5. Garis pantai adalah garis batas pertemuan antara daratan dan air laut dimana posisinya dapat berubah sesuai dengan pasang air laut dan akibat erosi pantai.



Gambar 2.1 Definisi dan Batasan Pantai

Sumber: Triatmodjo (2008)

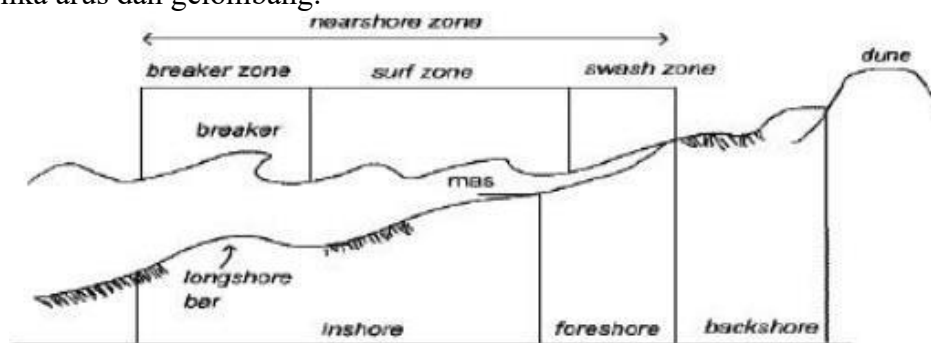
Apabila ditinjau dari garis pantai (*coastline*), maka wilayah pesisir memiliki dua macam batas (*boundaries*) dan arah. pertama, batas dan arah yang sejajar garis pantai (*longshore*). kedua, batas dan arah yang tegak lurus terhadap garis pantai (*cross-shore*). Menurut SPM (1984), pantai dan zona pantai merupakan wilayah di mana gaya-gaya laut berinteraksi langsung dengan daratan. Dalam wilayah ini, sistem fisik terdiri dari dinamika gerakan air laut yang berperan sebagai pemasok energi, sementara pantai berfungsi menyerap energi tersebut. Karena garis pantai merupakan titik pertemuan antara udara, daratan, dan lautan, maka proses fisika yang terjadi di kawasan ini bersifat sangat kompleks, unik, dan sering kali sulit dimodelkan secara presisi. Oleh karena itu, sebagian besar pemahaman mengenai pantai dan sistem fisik yang terkait masih bersifat deskriptif berdasarkan pengamatan empiris.

2.2.1.2 Bentuk Pantai

Bentuk profil pantai sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, berbagai faktor, antara lain intensitas serangan gelombang badai, sifat fisik sedimen seperti massa jenis dan ketahanan terhadap erosi, serta ukuran dan bentuk butir sedimen. Material penyusun pantai dapat berupa lumpur, pasir, atau kerikil, yang masing-masing memengaruhi tingkat kemiringan pantai. Pantai berlumpur umumnya memiliki kemiringan sangat landai, hingga 1 : 5000. Sebaliknya, pantai berpasir memiliki kemiringan sedang antara 1 : 20 hingga 1 : 50, sedangkan pantai berkerikil menunjukkan kemiringan yang lebih curam, hingga 1 : 4.

1. Pantai Berpasir

Pantai berpasir pada umumnya mempunyai bentuk seperti Gambar 2.2. Pantai pada gambar tersebut dibagi atas 2 bagian yaitu pantai belakang (*backshore*) dan pantai depan (*foreshore*). Kedua zona tersebut dipisahkan oleh *berm*, yaitu batas maksimum *runup* gelombang dalam kondisi normal. *Runup* sendiri adalah gerakan air laut yang naik ke permukaan pantai akibat gelombang. Saat terjadi badai, gelombang dapat menembus *berm*, terutama jika dikombinasikan dengan pasang naik. Zona pecah gelombang (*surf zone*) membentang dari titik pecahnya gelombang pertama kali hingga ke titik awal *runup*. Pada bagian awal zona ini sering ditemukan *longshore bar*, yaitu endapan pasir berbentuk gundukan memanjang di dasar laut sejajar dengan garis pantai, terbentuk akibat dinamika arus dan gelombang.



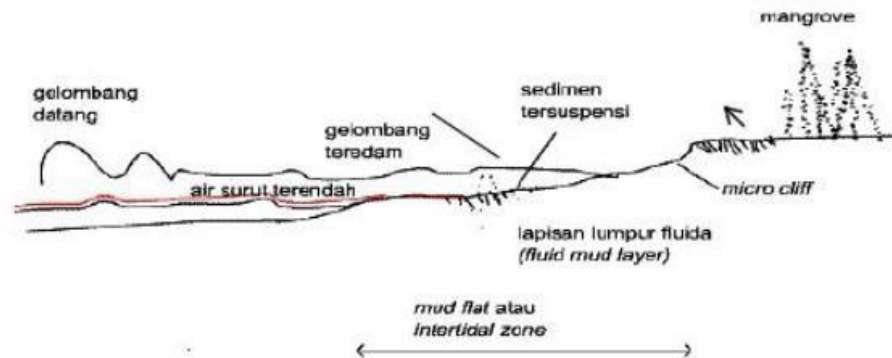
Gambar 2.2 Profil Pantai Berpasir

Sumber: Tarigan (2002)

2. Pantai Berlumpur

Pantai berlumpur umumnya ditemukan di wilayah dekat muara sungai, di mana aliran membawa sedimen tersuspensi dalam jumlah besar menuju laut. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, dalam kondisi gelombang yang relatif tenang, energi gelombang tidak cukup kuat untuk mengangkat sedimen ini ke perairan yang lebih dalam. Akibatnya, gelombang kehilangan energinya sebelum mencapai garis pantai. Hal ini disebabkan oleh

kemiringan dasar pantai yang sangat landai, yang memungkinkan sedimen terus mengendap dan terakumulasi di area tersebut.



Gambar 2.3 Profil Pantai Berlumpur
Sumber: Tarigan (2002)

Sedimen yang mendominasi wilayah pantai berlumpur umumnya bersifat kohesif dan memiliki ukuran butiran sangat halus. Berdasarkan klasifikasi, pasir memiliki ukuran butir antara 0,063 hingga 2,0 mm, sementara lumpur berukuran lebih kecil dari 0,063 mm dan termasuk dalam kelompok sedimen kohesif. Sedimen jenis ini biasanya berasal dari muara sungai yang mengangkut material tersuspensi ke laut. Dalam kondisi gelombang yang tenang, energi gelombang tidak cukup untuk mengangkut sedimen tersebut ke perairan lebih dalam, sehingga terjadi akumulasi di wilayah pesisir.

2.2.2 Fetch

Dalam peramalan gelombang angin, *fetch* umumnya dibatasi oleh daratan yang mengelilingi area pembangkitan gelombang. *Fetch* didefinisikan sebagai wilayah di mana kecepatan dan arah angin relatif tetap. Arah angin masih dianggap konstan apabila variasinya tidak melebihi 15°. Panjang *fetch* menentukan durasi pembentukan gelombang oleh angin, karena memengaruhi lamanya waktu transfer energi dari angin ke permukaan laut. Oleh karena itu, *fetch* memiliki pengaruh langsung terhadap periode dan tinggi gelombang yang dihasilkan.

Fetch rerata efektif diberikan dalam Persamaan 2.1 berikut:

$$F_{eff} = \frac{\sum(F \cdot \cos \alpha_i)}{\sum \cos \alpha_i} \quad (2.1)$$

Keterangan :

F_{eff} = *fetch* rerata efektif (m)

F = panjang segmen *fetch* yang diukur dari titik observasi gelombang ke titik ujung akhir *fetch* (m)

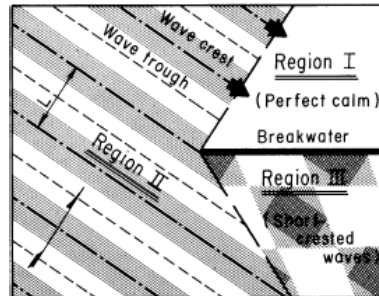
α_i = deviasi pada kedua sisi arah angin dengan menggunakan pertambahan sudut (misal 5° sampai mencapai sudut maksimal 45° pada kedua sisi dari arah angin, maka semakin kecil pertambahan sudut maka perhitungan semakin teliti)

2.2.3 Transformasi Gelombang

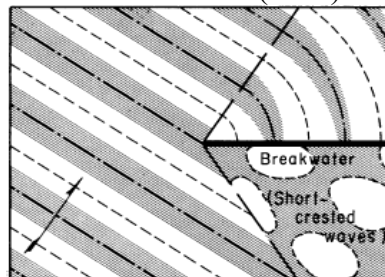
Ketika suatu deretan gelombang bergerak mendekati pantai, bentuk gelombang akan mengalami perubahan akibat proses difraksi, refraksi, pendangkalan gelombang, refleksi, dan gelombang pecah.

2.2.3.1 Difraksi Gelombang

Difraksi gelombang terjadi apabila gelombang datang terhalang oleh suatu rintangan seperti *breakwater* atau pulau, maka gelombang tersebut akan membelok di sekitar ujung rintangan dan masuk di daerah terlindung di belakangnya.



Gambar 2.4 Gelombang Tanpa Difraksi
Sumber: CERC (1984)



Gambar 2.5 Gelombang Terdifraksi
Sumber: CERC (1984)

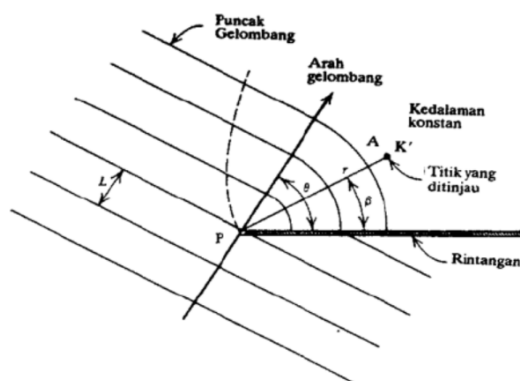
Apabila tidak terjadi difraksi gelombang, daerah di belakang rintangan akan tenang tetapi karena adanya proses difraksi maka daerah tersebut terpengaruh oleh gelombang datang. Persamaan tinggi gelombang akibat pengaruh difraksi gelombang dapat dilihat dalam Persamaan 2.2. Dengan K' adalah koefisien difraksi yang merupakan perbandingan antara tinggi gelombang di titik yang terletak di daerah terlindung dan tinggi gelombang datang. Nilai K' untuk θ , β , r/L tertentu dapat dilihat dalam tabel difraksi.

$$H_A = K' \cdot H_P \quad (2.2)$$

Dimana:

H_A = tinggi gelombang yang ditinjau (m)

H_P = tinggi gelombang di ujung rintangan (m)



Gambar 2.6 Difraksi Gelombang di Belakang Rintangan
Sumber: Triatmodjo (2016)

2.2.3.2 Refraksi Gelombang

Kecepatan rambat gelombang tergantung pada kedalaman air dimana gelombang menjalar. Apabila cepat rambat gelombang berkurang dengan kedalaman, panjang gelombang juga berkurang secara linier. Refraksi dan pendangkalan gelombang (*wave shoaling*) akan dapat menentukan tinggi gelombang di suatu tempat berdasarkan karakteristik gelombang datang. Refraksi mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap tinggi dan arah gelombang serta distribusi energi gelombang di sepanjang pantai.

Apabila gelombang ditinjau di suatu titik di laut dalam, maka:

$$\sin a = \left(\frac{C}{C_0} \right) \sin a_0 \quad (2.3)$$

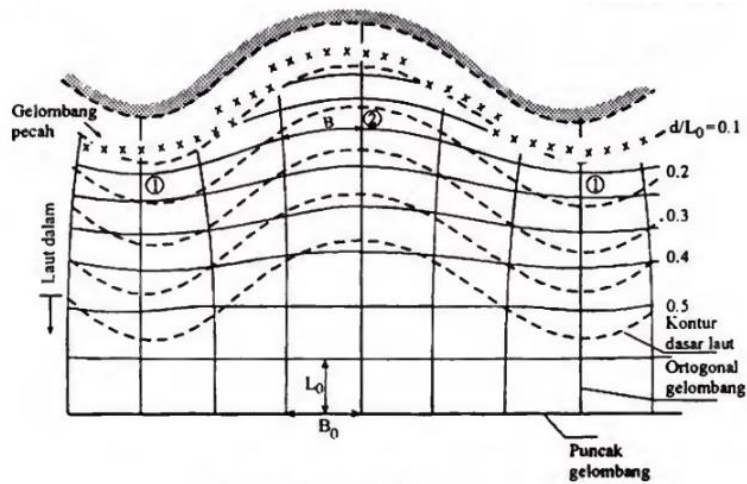
Dimana:

a = sudut antara puncak gelombang dengan kontur dasar ($^\circ$)

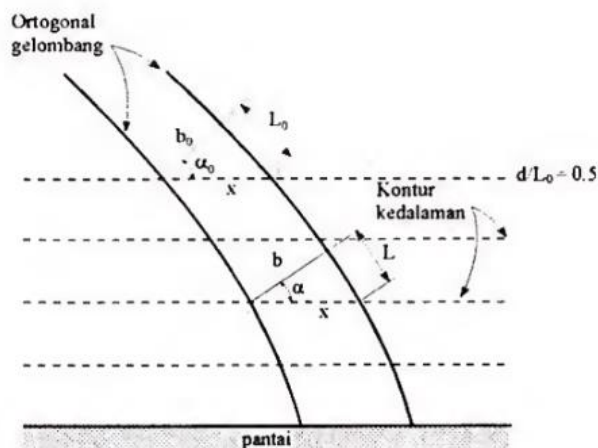
a_0 = sudut yang sama diukur saat garis puncak gelombang melintasi kontur dasar ($^\circ$)

C_0 = kecepatan gelombang pada kontur pertama (m/s)

C = kecepatan gelombang pada kontur kedua (m/s)



Gambar 2.7 Diagram Refraksi Gelombang
Sumber: Triatmodjo (1999)



Gambar 2.8 Refraksi Gelombang Pada Kontur Lurus dan Sejajar
Sumber: Triatmodjo (1999)

Seperti terlihat pada Gambar 2.8, jarak antara ortogonal di laut dalam dan di suatu titik adalah b_0 dan b . Apabila kontur dasar laut sejajar maka jarak x di titik 0 dan di titik berikutnya adalah sama, sehingga:

$$x = \frac{b_0}{\sin a_0} = \frac{b}{\sin a} \quad (2.4)$$

Dengan demikian, koefisien refraksi (K_r) adalah:

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} = \sqrt{\frac{\cos a_0}{\cos a}} \quad (2.5)$$

2.2.3.3 Pendangkalan Gelombang (*Wave Shoaling*)

Proses pendangkalan gelombang (*shoaling*) merupakan fenomena di mana tinggi gelombang berubah akibat variasi kedalaman perairan. Seiring berkurangnya kedalaman dasar laut, kecepatan rambat gelombang turut menurun. Akibatnya, puncak gelombang di perairan dangkal bergerak lebih lambat dibandingkan dengan puncak gelombang di perairan dalam. Koefisien *shoaling* dapat dituliskan dalam Persamaan 2.6:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{1 \times C_0}{2nC}} = K_s \quad (2.6)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sin h \left(\frac{4\pi h}{L} \right)} \right) \quad (2.7)$$

Koefisien *shoaling* juga dapat diperoleh dari tabel L-1 buku Teknik Pantai, Bambang Triatmodjo, 2016. Maka, tinggi gelombang pada laut dangkal akibat adanya refraksi dan *shoaling* adalah:

$$H = K_s \cdot K_r \cdot H_0 \quad (2.8)$$

Dimana:

K_s = koefisien *shoaling* (pendangkalan)

K_r = koefisien refraksi

H_0 = tinggi gelombang laut dalam (m)

Untuk keadaan dimana gelombang tidak mengalami difraksi, maka tinggi gelombang laut dalam ekuivalen (H'_0) adalah sebagai berikut.

$$H'_0 = K_r \cdot H_0 \quad (2.9)$$

2.2.3.4 Refleksi Gelombang

Refleksi gelombang adalah proses pemantulan sebagian atau seluruh energi gelombang datang akibat pertemuan dengan suatu struktur. Di lingkungan pelabuhan, refleksi gelombang dapat menyebabkan perairan kolam labuh menjadi tidak stabil atau bergelombang. Struktur dengan permukaan miring dan terbuat dari susunan batu umumnya mampu menyerap lebih banyak energi gelombang dibandingkan dengan struktur vertikal. Pada bangunan dengan dinding tegak, permukaan halus, dan material kaku, gelombang cenderung dipantulkan hampir seluruhnya. Tingkat kemampuan suatu struktur dalam memantulkan gelombang dinyatakan melalui koefisien refleksi, sebagaimana ditampilkan dalam Tabel 2.1.

Koefisien refleksi yaitu perbandingan antara tinggi gelombang refleksi H_r dengan tinggi gelombang datang H_i :

$$X = \frac{H_r}{H_i} \quad (2.10)$$

Tabel 2.1 Koefisien Refleksi

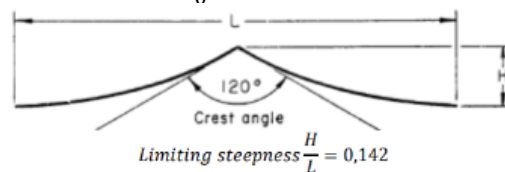
Tipe Bangunan	X
Dinding vertikal dengan puncak di atas air	0,7-1,0
Dinding vertikal dengan puncak terendam	0,5-0,7
Tumpukan batu sisi miring	0,3-0,6
Tumpukan blok beton	0,3-0,5
Bangunan vertikal dengan peredam energi (diberi lubang)	0,05-0,2

Sumber: Triatmodjo (1999)

2.2.3.5 Gelombang Pecah

Ketika gelombang menjalar dari tempat dalam menuju ke tempat dangkal, pada lokasi tertentu gelombang tersebut akan pecah. Kondisi gelombang pecah tersebut tergantung pada kemiringan dasar pantai dan gelombang. Kondisi yang menyebabkan gelombang pecah di laut dalam adalah kecuraman gelombang yang melampaui yang diberikan oleh Persamaan 2.11:

$$\frac{H_0}{L_0} = \frac{1}{7} \quad (2.11)$$



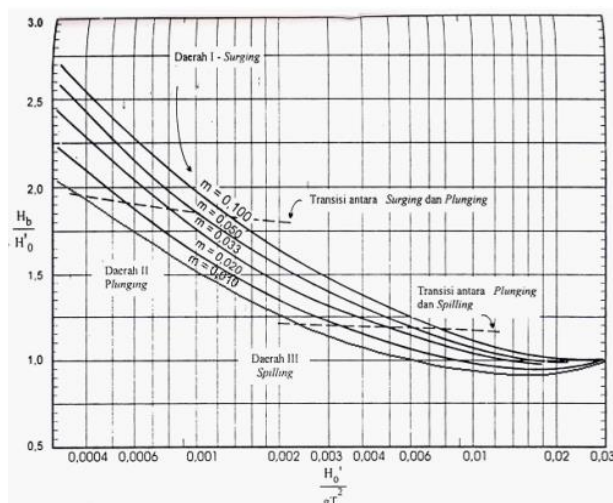
Gambar 2.9 Kondisi Untuk Gelombang Pecah Di Laut Dalam
Sumber: Rabung dkk (1999)

Kedalaman air dimana gelombang pecah (db) diberikan oleh rumus berikut.

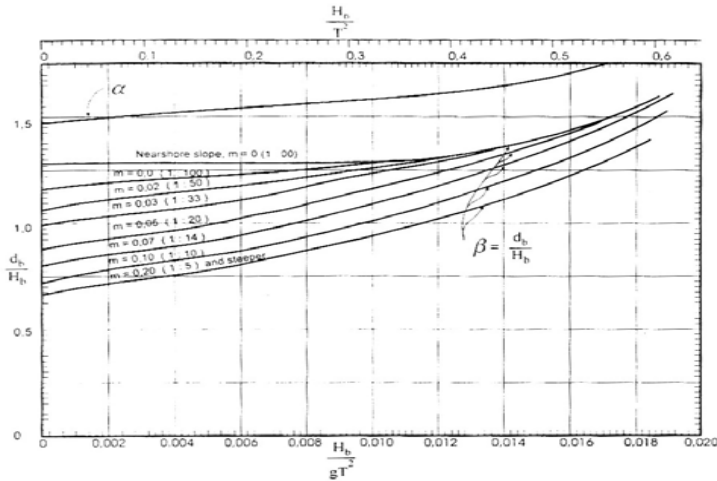
$$\frac{db}{Hb} = \frac{1}{b - \left(\frac{aHb}{gT^2}\right)} \quad (2.12)$$

$$\frac{db}{Hb} = 1,28 \quad (2.13)$$

Dimana a dan b merupakan fungsi dari kemiringan pantai yang diaplikasikan pada grafik berikut.



Gambar 2.10 Penentuan Tinggi Gelombang Pecah
Sumber: Triatmodjo (1999)



Gambar 2.11 Penentuan Kedalaman Gelombang Pecah

Sumber: Triatmodjo (1999)

Dimana a dan b merupakan fungsi kemiringan pantai (m), dengan Persamaan 2.14 dan 2.15 sebagai berikut:

$$a = 43,75(1 - e^{-19m}) \quad (2.14)$$

$$b = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5m})} \quad (2.15)$$

Dimana m adalah nilai *slope* atau kemiringan lereng. Sebelumnya juga perlu memperhitungkan nilai panjang gelombang laut dalam menggunakan Persamaan 2.16 sebagai berikut.

$$L_0 = 1,56T^2 \quad (2.16)$$

Dimana T adalah waktu terjadinya gelombang yang telah didapatkan dari analisa distribusi gelombang. Setelah didapatkan nilai L_0 kemudian dapat dihitung cepat rambat gelombang laut dalam (C_0) dan kedalaman laut dalam (d_0) menggunakan Persamaan 2.17 dan 2.18 sebagai berikut.

$$C_0 = \frac{L_0}{T} \quad (2.17)$$

$$\frac{d_0}{L_0} = \frac{1}{2} \quad (2.18)$$

Setelah didapatkan nilai d_0 maka dapat dicari nilai kemiringan lereng atau *slope* menggunakan peta batimetri. Lalu juga dapat dihitung nilai H'_0 menggunakan Persamaan 2.19 sebagai berikut.

$$H'_0 = H \times Kr \quad (2.19)$$

Dimana H adalah tinggi gelombang hasil analisis analisa frekuensi gelombang dan Kr adalah koefisien refraksi dengan nilai awal 1, sehingga dapat dihitung nilai H_b menggunakan Persamaan 2.20 sebagai berikut.

$$\frac{H_b}{H'_0} = \frac{1}{3,3 \left(\frac{H'_0}{L_0} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.20)$$

Setelah didapatkan nilai H_b maka dapat dihitung nilai d_b pada Persamaan 2.20. Untuk mencari nilai d_b juga dapat menggunakan grafik pada Gambar 2.11 grafik penentuan kedalaman gelombang pecah. Namun, perlu dihitung nilai pada sumbu x grafik tersebut menggunakan Persamaan 2.21 sebagai berikut.

$$x = \frac{H_b}{gT^2} \quad (2.21)$$

Gelombang pecah dapat dibedakan menjadi 3 tipe sebagai berikut.

1. *Spilling* terjadi apabila gelombang dengan kemiringan yang kecil menuju ke pantai yang datar, gelombang mulai pecah pada jarak yang cukup jauh dari pantai dan pecahnya berangsur-angsur.
2. *Plunging* terjadi apabila kemiringan gelombang dan dasar laut bertambah, gelombang akan pecah dan puncak gelombang akan memutar dengan masa air pada puncak gelombang akan terjun ke depan.
3. *Surging* terjadi pada pantai dengan kemiringan yang cukup besar seperti yang terjadi pada pantai berkarang, daerah gelombang pecah sangat sempit dan energi dipantulkan kembali ke laut dalam.

2.2.4 Fluktuasi Muka Air Laut

2.2.4.1 Pasang Surut

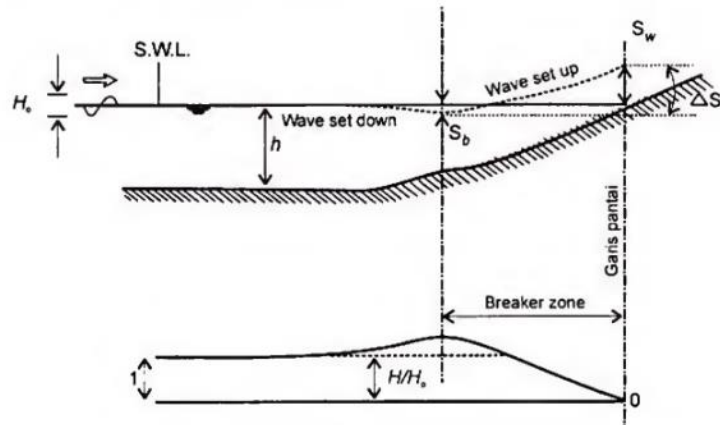
Pasang surut merupakan perubahan ketinggian muka air laut yang terjadi secara periodik sebagai akibat dari gaya tarik benda langit—terutama bulan dan matahari—terhadap massa air laut. Tinggi pasang surut didefinisikan sebagai selisih vertikal antara elevasi maksimum (puncak pasang) dan elevasi minimum (lembah surut) yang terjadi secara berurutan. Periode pasang surut adalah selang waktu yang dibutuhkan air laut untuk kembali ke posisi yang sama terhadap muka air rata-rata (Triatmodjo, 2016).

Secara umum pasang surut di berbagai daerah dapat dibedakan menjadi empat tipe, yaitu pasang surut harian tunggal (*diurnal tide*), harian ganda (*semi diurnal tide*) dan dua jenis campuran. Dengan elevasi laut yang selalu berubah, maka diperlukan suatu elevasi yang ditetapkan berdasarkan data pasang surut. Beberapa elevasi tersebut adalah sebagai berikut.

- a. Muka air tinggi (*high water level* atau *high water spring*, HWS), muka air tertinggi yang dicapai pada saat air pasang dalam satu siklus pasang surut.
- b. Muka air rendah (*low water level* atau *low water spring*, LWS), kedudukan air terendah yang dicapai pada saat air surut dalam satu siklus pasang surut.
- c. Muka air tinggi rerata (*mean high water level*, MHWL), adalah rerata dari muka air tinggi.
- d. Muka air rendah rerata (*mean low water level*, MLWL), adalah rerata dari muka air rendah.
- e. Muka air laut rerata (*mean sea level*, MSL), adalah muka air rerata antara muka air tinggi rerata dan muka air rendah rerata. Elevasi MSL sebagai referensi untuk elevasi di daratan.
- f. Muka air tinggi tertinggi (*highest high water level*, HHWL), adalah air tertinggi pada saat pasang surut purnama atau bulan mati.
- g. Muka air rendah terendah (*lowest low water level*, LLWL), adalah air terendah pada saat pasang surut purnama atau bulan mati.

2.2.4.2 Kenaikan Muka Air Karena Gelombang (*Wave Set-Up*)

Gelombang yang merambat dari laut menuju pantai menyebabkan muka air di zona pesisir mengalami fluktuasi terhadap muka air diam. Saat gelombang pecah, terjadi penurunan muka air rata-rata dibandingkan dengan muka air diam di sekitar area pecahnya gelombang. Setelah titik pecah tersebut, elevasi muka air rata-rata cenderung meningkat secara bertahap ke arah daratan, membentuk kemiringan permukaan air menuju pantai. Turunnya muka air laut dikenal dengan *wave set down*, sedangkan naiknya muka air laut disebut *wave set up* (Triatmodjo, 2011). *Wave set up* dan *wave set down* ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Wave Set Up dan Set Down
Sumber: Triatmodjo (1999)

Wave set up di pantai dapat dihitung dengan menggunakan teori Longuet-Higgins dan Stewart (1963).

$$S_b = \frac{0,536 H_b^{\frac{2}{3}}}{g^{\frac{1}{2}} T} \quad (2.22)$$

Dimana:

S_b = set-down di daerah gelombang pecah (m)

H_b = tinggi gelombang pecah (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

T = periode gelombang (m/s)

d_b = kedalaman gelombang pecah (m)

$$S_w = \Delta S - S_b \quad (2.23)$$

Dengan menggunakan $d_b = 1,28 H_b$, maka:

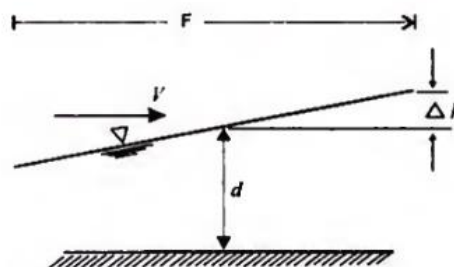
$$\Delta S = 0,15 d_b \quad (2.24)$$

Maka diperoleh:

$$S_w = 0,19 \left[1 - 2,82 \sqrt{\frac{H_b}{g T^2}} \right] H_b \quad (2.25)$$

2.2.4.3 Kenaikan Muka Air Karena Angin (Wind Set-Up)

Angin dengan kecepatan besar dapat terjadi di atas permukaan laut sehingga menyebabkan fluktuasi muka air laut yang besar sepanjang pantai. Oleh sebab itu, dalam menentukan elevasi muka air rencana perlu diperhitungkan pengaruh angin.



Gambar 2.13 Muka Air Laut Karena Badai
Sumber: Triatmodjo (1999)

Kenaikan elevasi muka air karena badai dapat dihitung dengan Persamaan 2.26 dan 2.27 sebagai berikut:

$$\Delta h = \frac{Fi}{gT^2} \quad (2.26)$$

$$\Delta h = Fc \frac{v^2}{2gd} \quad (2.27)$$

Dimana:

Δh = kenaikan elevasi muka air karena badai (m)

F = panjang *fetch* (m)

i = kemiringan muka air

c = konstanta = $3,5 \times 10^{-6}$

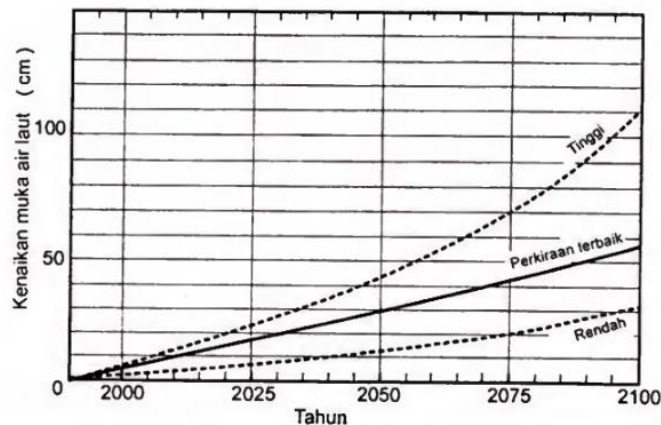
v = kecepatan angin (m/s)

d = kedalaman air (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

2.2.4.4 Pemanasan Global

Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer menyebabkan pemanasan global yang berkontribusi terhadap mencairnya es di wilayah kutub, sehingga memicu kenaikan muka air laut. Dalam perencanaan bangunan pantai, perubahan elevasi muka air laut akibat pemanasan global perlu diperhitungkan (Triatmodjo, 2008). Gambar 2.14 menampilkan proyeksi kenaikan muka air laut dari tahun 1990 hingga 2100, lengkap dengan estimasi batas atas dan bawah, yang diasumsikan berdasarkan tren peningkatan suhu global tanpa intervensi mitigasi.



Gambar 2.14 Perkiraan Kenaikan Muka Air Laut Karena Pemanasan Global
Sumber: Triatmodjo (1999)

2.2.4.5 Run Up

Elevasi puncak bangunan ditentukan berdasarkan tinggi *run up* gelombang, yang dipengaruhi oleh bentuk dan kekasaran permukaan bangunan, kedalaman perairan di kaki struktur, kemiringan dasar laut di depannya, serta karakteristik gelombang datang. Kompleksitas interaksi antar variabel tersebut menyebabkan perhitungan *run up* secara analitis menjadi sangat sulit dilakukan secara akurat. Gambar 2.15 merupakan grafik hasil percobaan di laboratorium yang dilakukan oleh Irrebaren untuk menentukan *run up* dan *run down* gelombang pada bangunan dengan permukaan miring dan dari berbagai tipe material.

$$I_r = \frac{tg \theta}{\left(\frac{H}{L}\right)^{0,5}} \quad (2.28)$$

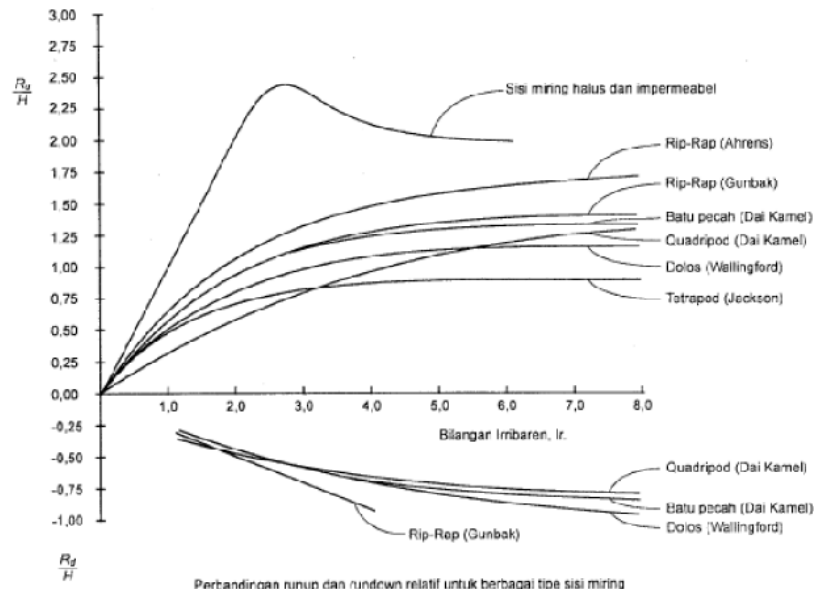
Dimana:

I_r = Bilangan Irrebarren

θ_r = Sudut kemiringan sisi pemecah gelombang

H = Tinggi gelombang di lokasi bangunan (m)

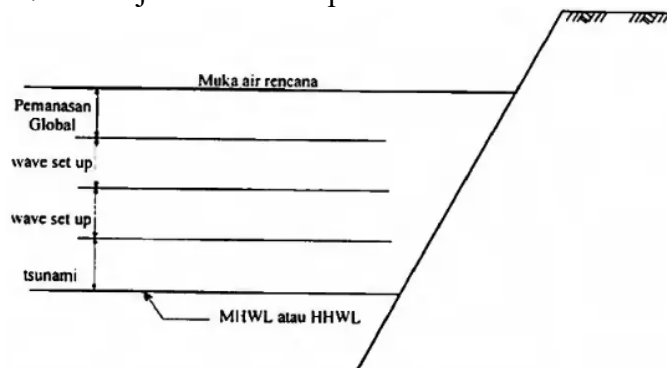
L_o = Panjang gelombang di laut (m)



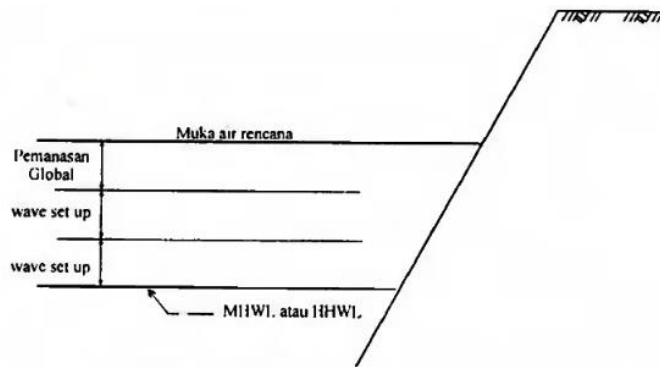
Gambar 2.15 Grafik *Run Up* Gelombang
Sumber: Triatmodjo (1999)

2.2.4.6 Elevasi Muka Air Laut Rencana

Elevasi puncak bangunan pantai ditetapkan berdasarkan elevasi muka air pasang tertinggi, sementara kedalaman alur pelayaran dan kolam pelabuhan mengacu pada muka air surut terendah. Dalam merancang elevasi puncak bangunan pelindung alur masuk pelabuhan, terlebih dahulu dihitung elevasi muka air rencana. Nilai ini diperoleh dari penjumlahan beberapa komponen, yaitu pasang surut, *wave set-up*, *wind set-up*, dan kenaikan muka air akibat pemanasan global. Tsunami tidak diperhitungkan mengingat kejadiannya sangat jarang. Apabila diperhitungkan, akan menyebabkan bangunan menjadi sangat besar. Untuk penambahan aspek lain ditentukan berdasarkan kebutuhan dari bangunan pantai tersebut. Gambar 2.16 dan 2.17 menunjukkan contoh penentuan elevasi muka air rencana.



Gambar 2.16 Elevasi Muka Air Laut Rencana
Sumber: Triatmodjo (1999)



Gambar 2.17 Elevasi Muka Air Laut Rencana Tanpa Tsunami
Sumber: Triatmodjo (1999)

2.2.5 Breakwater

2.2.5.1 Pengertian Breakwater

Pemecah gelombang atau dikenal sebagai juga sebagai *breakwater* adalah prasarana yang dibangun untuk memecahkan ombak/gelombang dengan menyerap sebagian energi gelombang. Pemecah gelombang berfungsi untuk mengendalikan abrasi yang dapat merusak garis pantai dan untuk menenangkan gelombang di pelabuhan, sehingga memudahkan dan mempercepat proses kapal merapat. Desain pemecah gelombang harus mempertimbangkan arus laut agar tidak menyebabkan pendangkalan di kolam pelabuhan. Jika pendangkalan terjadi, pelabuhan perlu dikeruk secara berkala untuk menjaga kedalaman yang diperlukan.

2.2.5.2 Fungsi Breakwater

Bangunan ini berfungsi untuk melindungi pantai di belakangnya dari energi gelombang yang berpotensi menyebabkan erosi. Pemecah gelombang tipe lepas pantai mengurangi energi gelombang yang menjangkau wilayah belakangnya, karena posisinya berada di dalam zona pecah gelombang (*breaking zone*). Dengan demikian, sisi luar struktur berperan dalam meredam energi gelombang, sehingga intensitas gelombang dan arus di area belakang bangunan dapat diminimalkan.

Gelombang yang menjalar menuju bangunan peredam akan mengalami pembagian energi menjadi tiga komponen: refleksi, transmisi, dan disipasi. Energi yang didisipasikan terjadi melalui mekanisme seperti pecahnya gelombang, viskositas fluida, dan gesekan dasar. Proporsi dari energi yang dipantulkan, diteruskan, dan didisipasikan ditentukan oleh karakteristik gelombang datang (periode, tinggi, kedalaman), jenis dan geometri bangunan (permukaan, kelulusan air, kemiringan, dan elevasi puncak). Interaksi ini menurunkan energi gelombang di area terlindung, mengurangi *transport* sedimen, dan mendorong akumulasi sedimen di belakang bangunan, sehingga meningkatkan stabilitas pantai di wilayah tersebut.

2.2.5.3 Jenis - Jenis Breakwater

Dalam pemilihan pemecah gelombang ditentukan dengan melihat hal-hal sebagai berikut:

- Bahan yang tersedia di sekitar lokasi
- Besar gelombang
- Pasang surut air laut
- Kondisi tanah dasar laut
- Peralatan yang digunakan untuk pembuatannya

Untuk perencanaan bentuk dan kestabilan *breakwater* perlu diketahui:

- Tinggi muka air laut akibat adanya pasang surut

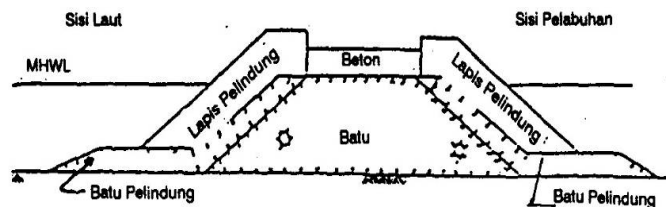
- b. Tinggi puncak gelombang dari permukaan air tenang
- c. Perkiraan tinggi dan panjang gelombang
- d. *Run up* gelombang

Bangunan *breakwater* dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan bentuk dan letak bangunannya sebagai berikut:

a. Berdasarkan Bentuk Model Penampang Melintangnya (Triatmodjo, 1999):

1. Pemecah gelombang dengan sisi miring

Pemecah gelombang bersisi miring dirancang dengan beberapa lapisan material, umumnya berupa tumpukan batu alam. Lapisan pelindung terluar terdiri dari elemen berukuran besar, seperti batu atau beton bertipe khusus (misalnya *quadripod*, *tetrapod*, dan *dolos*), yang berfungsi menyerap energi gelombang. Struktur ini bersifat fleksibel, sehingga kerusakan akibat gelombang terjadi secara bertahap, bukan mendadak. Tipe ini umumnya digunakan pada lokasi dengan kedalaman kolam labuh yang relatif dangkal.



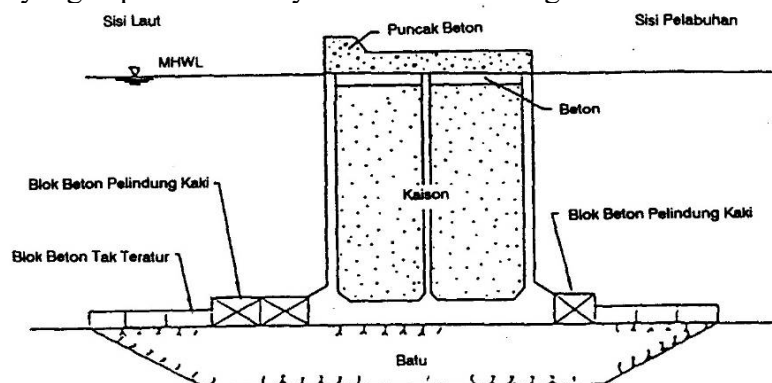
Gambar 2.18 Pemecah Gelombang Sisi Miring

Sumber: Triatmodjo (2003)

2. Pemecah gelombang sisi tegak

Pemecah gelombang tipe sisi tegak dirancang menggunakan berbagai material, termasuk pasangan batu, sel turap baja yang diisi tanah atau batu, tumpukan buis beton, dinding turap baja atau beton, serta kaisan beton. Pemecah gelombang tipe ini dibangun ketika tanah dasar memiliki daya dukung yang besar dan tahan terhadap erosi. Syarat yang harus diperhatikan pada tipe ini adalah sebagai berikut.

- Tinggi gelombang maksimum rencana harus ditentukan dengan baik.
- Tinggi dinding harus cukup untuk memungkinkannya.
- Fondasi dibuat sedemikian rupa sehingga tidak terjadi erosi pada kaki bangunan yang dapat membahayakan stabilitas bangunan.



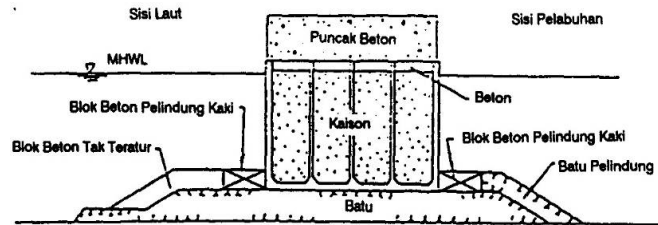
Gambar 2.19 Pemecah Gelombang Sisi Tegak

Sumber: Triatmodjo (2003)

3. Pemecah gelombang bertipe campuran

Breakwater tipe *cellular cofferdam* merupakan struktur yang dibentuk dari *sheet pile* saling mengunci (*interlocking*) membentuk sel-sel (*cells*), yang diisi dengan material tak kohesif seperti pasir sebagai pemberat bagian bawah, serta lapisan atas

berupa batu lindung untuk menjaga kestabilan terhadap serangan gelombang. Struktur ini umumnya dibangun dengan elevasi puncak mendekati *Mean Sea Level* (MSL), memungkinkan terjadinya *overtopping* atau limpasan gelombang. Desain *overtopping* ini dipilih atas dasar pertimbangan ekonomis dan karena kondisi gelombang rata-rata yang relatif kecil.



Gambar 2.20 Pemecah Gelombang Campuran
Sumber: Triatmodjo (2003)

Tabel 2.2 Keuntungan dan Kerugian Ketiga Pemecah Gelombang

Tipe	Keuntungan	Kerugian
Pemecah Gelombang Sisi Miring	Elevasi pada puncak bangunan rendah	Dibutuhkan jumlah material yang cukup banyak
	Gelombang refleksi kecil	Pelaksanaan pekerjaan lama
	Meredam energi gelombang	Potensi kerusakan pada waktu pelaksanaan cukup besar
	Kerusakan berangsur-angsur	Lebar dasar besar
	Perbaikan cukup mudah Murah	
Pemecah Gelombang Sisi Tegak	Pelaksanaan konstruksi cepat	Mahal
	Potensi kerusakan pada saat pelaksanaan kecil	Elevasi pada puncak bangunan cukup tinggi
	Perairan pada pelabuhan lebih luas	Tekanan gelombang cukup besar
	Sisi dalamnya dapat digunakan sebagai dermaga atau tempat tambahan	Diperlukan tempat pembuatan kaisan yang luas
	Biaya perawatan kecil	Apabila rusak akan sulit perbaikannya
Pemecah Gelombang Tipe Campuran	Pelaksanaan pekerjaan cepat	Diperlukan peralatan berat
	Kemungkinan kerusakan pada waktu pelaksanaan kecil	
Pemecah Gelombang Sisi Miring	Elevasi pada puncak bangunan rendah	Dibutuhkan jumlah material yang cukup banyak

Sumber: Triatmodjo (1999)

2.2.6 Perencanaan Struktur *Breakwater*

1. Stabilitas Batu Lapis Pelindung

Stabilitas *breakwater* sangat dipengaruhi oleh berat jenis dan bentuk batu pelindung, karena struktur ini termasuk dalam kategori struktur gravitasi yang mengandalkan berat sendiri untuk menahan gaya gelombang. Kedalaman perletakan struktur di bagian kaki ditentukan oleh kedalaman air relatif terhadap tinggi gelombang. Ketidakstabilan dapat

terjadi baik pada pertemuan antara lapisan batu dan sedimen dasar, maupun pada bagian puncak struktur. Pada *rubble mound breakwater*, yang tersusun dari tumpukan batu, batu pelindung berpotensi terlepas akibat gaya gelombang. Oleh karena itu, lebar dasar struktur harus dirancang cukup besar untuk menjaga kestabilan keseluruhan. Berat batu lapis pelindung dihitung dengan rumus Hudson berikut ini:

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (2.29)$$

Dimana:

W = berat rerata batu lapis luar

K_D = koefisien stabilitas yang tergantung pada bentuk batu pelindung (batu alam atau buatan), kekasaran permukaan batu, ketajaman sis-sisinya, ikatan antar butir, dan keadaan pecahnya gelombang yang diberikan pada Tabel 2.3.

γ_r = berat jenis batu (ton/m^3)

H = tinggi gelombang rencana (m)

S_r = perbandingan antara berat jenis batu dan berat jenis air laut (γ_r/γ_w)

γ_w = berat jenis air laut ($1,025-1,03 \text{ ton/m}^3$)

θ = sudut lereng sisi bangunan ($^\circ$)

Dalam perhitungan berat butir *armour* besarnya nilai K_D memegang peranan penting, karena secara langsung mempengaruhi besar kecilnya dimensi dan berat butiran pelindung. Nilai K_D berbeda tergantung dengan tipe *rubblemound*, jumlah lapisan, metode pemasangan di lapangan, lokasi penempatan (tubuh atau kepala bangunan), kondisi gelombang (pecah atau tidak), serta kemiringan lereng. Pada tabel 2.3 koefisien stabilitas K_D sesuai dengan tipe *rubble mound*.

Tabel 2.3 Koefisien Stabilitas K_D Untuk Berbagai Macam Butir

Lapis Lindung	N	Penempatan	Lengan Bangunan		Ujung (Kepala) Bangunan		Kemiringan
			K _D		K _D		Cot Θ
			Gel. Pecah	Gel. Tidak Pecah	Gel. Pecah	Gel. Tidak Pecah	
Batu Pecah							
•Bulat halus	2	Acak	1,2	2,4	1,1	1,9	1,5-3
•Bulat halus	>3	Acak	1,6	3,2	1,4	2,3	* ²
•Bersudut kasar	1	Acak	* ¹	2,9	* ¹	2,3	* ²
					1,9	3,2	1,5
Bersudut Kasar	2	Acak	2	4	1,6	2,8	2
					1,3	2,3	3
Bersudut Kasar	>3	Acak	2,2	4,5	2,1	4,2	* ²
Bersudut Kasar	2	Khusus ^{*3}	5,8	7	5,3	6,4	* ²
Parlelepipedium	2	Khusus	7-20	8,5-24	-	-	
					5	6	1,5
Tetrapod dan Quadripod	2	Acak	7	8	4,5	5,5	2
					3,5	4	3
					8,3	9	1,5
Tribar	2	Acak	9	10	7,8	8,5	2
					6	6,5	3
Dolos	2	Acak	15,8	31,8	8	16	2
					7	14	3

Lapis Lindung	N	Penempatan	Lengan Bangunan		Ujung (Kepala) Bangunan		Kemiringan
			K _D		K _D		Cot Θ
			Gel. Pecah	Gel. Tidak Pecah	Gel. Pecah	Gel. Tidak Pecah	
Kubus modifikasi	2	Acak	6,5	7,5	-	5	*2
Hexapod	2	Acak	8	9,5	5	7	*2
Tribar	1	Seragam	12	15	7,5	9,5	*2

Sumber: SPM (1984)

n : Jumlah susunan butir batu dalam lapis pelindung

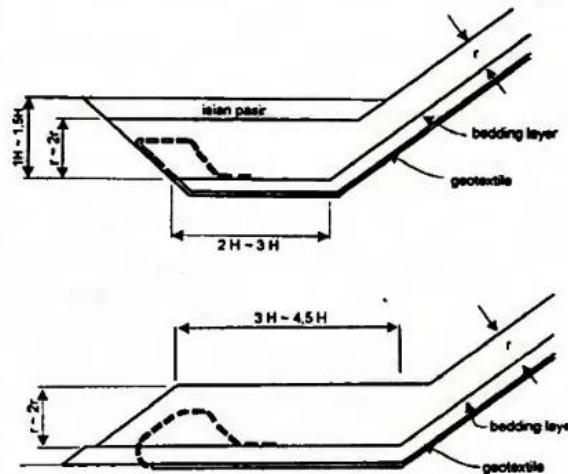
*1 : penggunaan n=1 tidak disarankan untuk kondisi gelombang pecah

*2 : sampai ada ketentuan lebih lanjut tentang nilai K_D , penggunaan K_D dibatasi pada kemiringan 1:1,5 sampai 1:3

*3 : batu ditempatkan dengan sumbu panjangnya tegak lurus permukaan bangunan

2. Pelindung Kaki Bangunan

Stabilitas pelindung kaki bangunan (*Toe Protection*) pada bangunan *breakwater* merujuk pada bagian dasar atau kaki dari struktur yang berfungsi untuk menstabilkan dan melindungi bangunan dari erosi dan gerusan akibat arus air dan gelombang. Bagian ini penting untuk mencegah terjadinya kerusakan pada struktur utama dan memastikan dapat berfungsi dengan baik dalam jangka panjang. Secara teknis, *toe* ini sering kali dilengkapi dengan material yang lebih berat atau diperkuat untuk memastikan stabilitas. Material yang digunakan untuk toe dapat berupa batu besar, beton, atau bahan lain yang memiliki berat dan kekuatan yang cukup untuk menahan tekanan dari arus dan gelombang laut.



Gambar 2.21 Dimensi Pelindung Kaki Bangunan

Sumber: Triatmodjo (1999)

Berdasarkan gambar di atas, maka dimensi lebar *toe* adalah 3H-4,5H dan untuk tinggi *toe* adalah 3r, yang mana r dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.30 sebagai berikut.

$$r = n \cdot k \Delta \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.30)$$

Dimana:

W = berat rerata butir batu (ton)

γ_r = berat jenis (ton/m^3)

3. Lebar Puncak

Perhitungan lebar puncak dan tebal lapisan pelindung serta jumlah butir batu dapat menggunakan Persamaan 2.31 dan 2.32 sebagai berikut.

$$B \text{ atau } t = n \cdot k\Delta \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.31)$$

$$N = An \cdot k\Delta \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{\gamma_r}{W} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.32)$$

Dimana:

B/t = lebar puncak/lebar lapis lindung (m)

N = jumlah butir batu ($M_{\text{minimum}}=3$)

$k\Delta$ = koefisien lapis

γ_r = berat jenis batu (ton/m^3)

A = luas permukaan (m^2)

P = porositas rerata dari lapis pelindung (%)

N = jumlah butir batu dalam satu luasan permukaan A

Tabel 2.4 Koefisien Lapis

Batu pelindung	n	Penempatan	Koef. Lapis	Porositas
Batu alam (halus)	2	acak	1,02	38
Batu alam (kasar)	2	acak	1,15	37
Batu alam (kasar)	2	acak	1,1	40
Kubus	2	acak	1,1	47
Tetrapod	2	acak	1,04	50
Quadripod	2	acak	0,95	49
Hexapod	2	acak	1,15	47
Tribard	2	acak	1,02	54
Dolos	1	acak	1	63
Tribard		seragam	1,13	47
Batu alam		acak		37

Sumber: Triatmodjo (1999)

4. Tekanan Gelombang Pada Struktur *Breakwater*

Gelombang pecah yang menghantam permukaan vertikal struktur pantai menghasilkan tekanan tinggi dalam durasi sangat singkat. Tekanan maksimum P_m pada muka air diam menjadi $H_b/2$ di atas dan di bawah muka air diam. Distribusi tekanan gelombang pecah pada struktur dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.33 sebagai berikut.

$$P_m = 101\gamma \frac{H_b d_s}{L_D D} (D + d_s) \quad (2.33)$$

Dimana:

P_m = tekanan dinamis maksimum (kN/m^2)

H_b = tinggi gelombang pecah (m)

L_D = panjang gelombang pada kedalaman D (m)

d_s = kedalaman pada kaki bangunan (m)

γ = berat jenis air laut (kN/m^3)

D = kedalaman pada jarak satu panjang gelombang di depan dinding (m)

5. Cek Stabilitas Struktur *Breakwater*

Analisis kelongsoran dapat dihitung dengan menggunakan metode irisan yang telah disederhanakan (Bishop, 1955). Metode ini mengasumsikan keseimbangan gaya vertikal pada setiap irisan, serta mengabaikan gaya geser antar irisan. Tujuannya adalah untuk menentukan faktor keamanan dan jari-jari kelongsoran pada lereng berbentuk melingkar. Metode Bishop sering digunakan karena mampu menghasilkan lintasan longsor kritis yang mendekati kondisi aktual di lapangan, sehingga dianggap lebih akurat dibanding metode lainnya. Berikut adalah prinsip Metode Bishop:

$$F = \frac{c' \sum L_n + \tan \phi' \sum (W \cos \alpha - ul)}{\sum W \sin \alpha} > 1,2 \quad (2.34)$$

Dimana:

L = panjang busur irisan (m)

ϕ = sudut geser ($^{\circ}$)

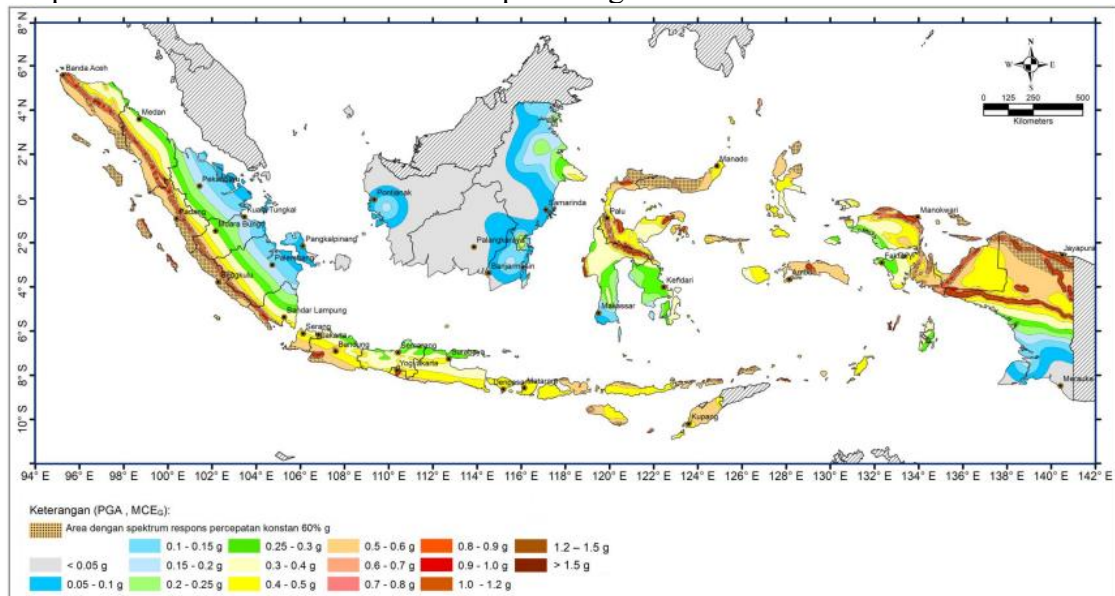
$\alpha = \delta$ = sudut irisan

c' = kohesi tanah

γ_w = berat jenis air laut (ton/m^3)

z_w = kedalaman dari busur irisan ke muka air (m)

Untuk stabilitas dalam kondisi gempa dapat menambahkan koefisien *seismic* yang didapatkan dari Gambar 2.22 ke dalam perhitungan.



Gambar 2.22 Peta Gempa

Sumber: Badan Standarisasi Nasional (2019)

Dari gambar tersebut terdapat rumus untuk mencari koefisien *seismic*, persamaan tersebut sebagai berikut:

$$kh = 0,5 \times \frac{PGA_M}{g} \quad (2.35)$$

$$PGA_M = F_{PGA} \times PGA \quad (2.36)$$

Dimana:

kh = koefisien horizontal *seismic*

PGA_M = nilai maksimum percepatan tanah terkoreksi (m/s^2)

g = gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

F_{PGA} = faktor amplifikasi (Tabel 2.5)

PGA = nilai maksimum percepatan tanah (m/s^2)

Tabel 2.5 Faktor Amplifikasi Untuk PGA

Kelas Situs	PGA				
	<0,1	0,2	0,3	0,4	>0,5
Batuan (SB)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan Keras (SA)	1	1	1	1	1
Tanah Keras (SC)	1,2	1,2	1,1	1	1
Tanah Sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1
Tanah Lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Sumber: SNI 8460:2017

Sehingga untuk mengetahui nilai f_s nya dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$F = \frac{c' \sum L_n + \tan \phi' \sum (W \cos \alpha - k W \sin \alpha - u l)}{\sum W \sin \alpha} > 1,2 \quad (2.37)$$

Berdasarkan analisis *Newmark* dalam Hoek and Bray (1981), dengan percepatan hasil K_h sama dengan 50% dari PGA (yaitu $K_h = 0,5 \cdot a_{max}/g$) menunjukkan bahwa perpindahan *seismic* akan kurang dari 1 m (Hynes dan Franklin, 1984). Mengenai kekuatan geser bahan-bahan batu, untuk sudut geser biasanya menggunakan angka-angka sebagai berikut (Sosrodarsono, 1977):

- Apabila bahan batu cukup keras dan stabil, maka biasanya untuk $D_{50} = 2-10\text{cm}$ (D_{50} adalah ukuran diameter dari susunan bahan batu yang terletak di garis 50% pada kurva gradasi), maka besar sudut geser dalamnya (ϕ) sekitar 40°
- Sedangkan untuk $D_{50} > 15\text{cm}$; maka sudut geser dalamnya (ϕ) 45° ,
- Material batu yang kekuatan tegangan tekannya tidak besar, maka untuk sudut geser dalamnya (ϕ) sekitar 35° sudah cukup aman.

2.2.7 Tanah

Tanah atau *soil* adalah lapisan teratas dari bumi, keberadaan tanah sangat penting bagi kehidupan manusia yang berada di atasnya. Dalam pengertian teknik secara umum, tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral padat yang tidak tersegmentasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang partikel padat tersebut (Braja M Das, 1995).

Tanah memiliki peran yang sangat penting dalam dunia teknik sipil, berfungsi sebagai tempat untuk meletakkan berbagai jenis bangunan, termasuk gedung, jalan raya, jalan kereta api, jembatan, dan bendungan. Dalam konteks ini, tanah tidak hanya sebagai media tetapi juga sebagai pendukung fondasi dari bangunan tersebut. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik dan kondisi tanah sangat diperlukan sebelum memulai konstruksi sipil.

Kondisi tanah merupakan faktor krusial yang harus diperhatikan saat merancang atau mendirikan bangunan, karena tanah di lokasi umumnya tidak homogen dan memiliki berbagai sifat serta karakteristik. Ketika tanah berfungsi sebagai pendukung fondasi, penting untuk memastikan bahwa tanah tersebut stabil. Jika terdapat sifat tanah yang tidak memadai untuk mendukung bangunan, perbaikan harus dilakukan terlebih dahulu untuk mencapai daya dukung yang diperlukan. Salah satu jenis tanah yang mempunyai daya dukung rendah adalah tanah lunak (Das, 1998).

2.2.8 Penyelidikan Data Tanah

Karakteristik tanah tertentu sering mudah terganggu akibat proses pengambilan contoh tanah (*disturbance*) selama kegiatan pengeboran dan penanganan. Untuk menghindari gangguan tersebut, dilakukan pengujian tanah secara langsung di lapangan (*in-situ test*). Pengujian ini memungkinkan evaluasi sifat mekanik tanah dalam kondisi alamiahnya, tanpa dipengaruhi oleh kerusakan akibat pengambilan sampel (Hardiyatmo, 2010). Oleh karena itu, penyelidikan tanah di lapangan menjadi metode yang penting dalam menentukan kapasitas dukung tanah. Adapun jenis pengujian lapangan yang akan dilakukan antara lain sebagai berikut.

2.2.8.1 Cone Penetration Test (Sondir)

Parameter tanah yang dapat diperoleh dari hasil penyelidikan uji sondir tanah di lapangan dengan mendeskripsikan sifat tanah dan jenis lapisan tanah yang akan divisualisasikan ke dalam bentuk stratigrafi. Data tekan *conus* (q_c) dan hambatan pelekat (f_s) digunakan untuk menentukan jenis tanah seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.6 Klasifikasi Tanah dari Data Sondir

Hasil Sondir		Klasifikasi
q_c	F_s	
6,0	0,15 - 0,40	Humus, lempung sangat lunak
	0,20	Pasir kelaanauan lepas, pasir sangat lepas
6,0 - 10,0	0,20 - 0,60	Lempung lembek, lempung kelanauan lembek
	0,10	Kerikil lepas
	0,10 - 0,40	Pasir lepas
10,0 - 30,0	0,40 - 0,80	Lempung atau lempung kelanauan
	0,80 - 2,00	Lempung agak kenyal
	1,50	Pasir kelanauan, pasir agak padat
60 - 60	1,0 - 3,0	Lempung atau lempung kelanauan kenyal
	1,0	Kerikil kepasiran lepas
60 - 150	1,0 - 3,0	Pasir padat, pasir kelanauan atau lempung padat dan lempung kelanauan
	3,0	Lempung kekerikilan kenyal
150 - 300	1,0 - 2,0	Pasir padat, pasir kekerikilan, pasir kasar, pasir kelanauan sangat padat

Sumber: Braja M. Das (1985)

2.2.8.2 Standart Penetration Test (SPT)

Standard Penetration Test (SPT) merupakan metode pengujian tanah yang dilakukan bersamaan dengan pengeboran, bertujuan untuk mengukur perlawanan dinamik tanah serta memperoleh contoh tanah terganggu. Uji ini dilakukan dengan menumbukkan tabung sampel (*split spoon sampler*) berdinding tebal ke dalam tanah secara vertikal sedalam 300 mm (1 ft), menggunakan palu seberat 63,5 kg yang dijatuhkan dari ketinggian 0,76 m secara berulang. Pengujian dibagi menjadi tiga tahap penetrasi masing-masing 150 mm. Pukulan pada tahap pertama dianggap sebagai dudukan (*seating blow*), sedangkan jumlah pukulan pada tahap kedua dan ketiga dijumlahkan untuk mendapatkan nilai N-SPT (jumlah pukulan per 0,3 m penetrasi).

Hubungan antara tekanan *conus* dan *undrained cohesion* adalah sebanding dimana semakin tinggi nilainya semakin keras tanah tersebut. Seperti yang terlihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.7 Hubungan Konsistensi Tanah dengan *Conus* (Tanah Lanau dan Lempung)

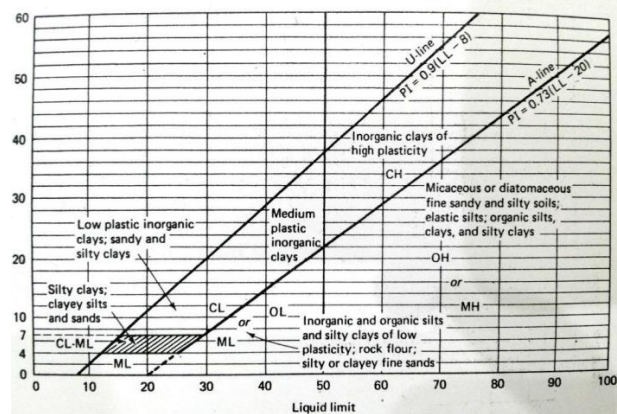
Konsistensi Tanah	Kekuatan Geser <i>Undrained, Cu</i>		Harga SPT,	Tahanan <i>Conus, qc</i> (Dari Sondir)	
	kPa	ton/m ²	harga N	kg/m ²	kPa
Sangat Lunak (<i>very soft</i>)	0 - 12,5	0 - 1,25	0 - 2,5	0 - 10	0 - 1.000
Lunak (<i>soft</i>)	12,5 - 25	1,25 - 2,5	2,5 - 5	10, - 20	1.000 - 2.000
Menengah (<i>medium</i>)	25 - 50	2,5 - 5	5, - 10,	20, - 40	2.000 - 4.000
Kaku (<i>stiff</i>)	50 - 100	5,0 - 10	10 - 20,	40, - 75	4.000 - 7.500
Sangat kaku (<i>very stiff</i>)	100 - 200	10, - 20,	20 - 30	75- 150	7.500 - 15.000
Keras (<i>hard</i>)	> 200	> 20	> 30	> 150	> 15.000

Sumber: Mochtar (2012)

Tabel 2.8 Korelasi N-SPT dengan Karakteristik Tanah

<i>Cohesive Soil</i>					
N (blows)	< 4	4 - 6	6 - 15	16 - 25	> 25
γ_{sat} (kN/m ³)	14 - 18	16 - 18	16 - 18	16 - 20	> 20
Qu (kPa)	< 25	20 - 50	30 - 60	40 - 200	> 100
Consistency	<i>very soft</i>	<i>soft</i>	<i>medium</i>	<i>stiff</i>	<i>hard</i>

Sumber: J.E Bowles, 1984 dalam Wahyudi, 1999



Gambar 2.6 *Casagrande Plasticity Chart*

Sumber: (Casagrande, 1948 dan Howard, 1977)

Untuk parameter dapat digunakan korelasi oleh Dr. Ir. Herman Wahyudi.

VALEURS NUMÉRIQUES DE COMPACTÉ ET CONSOLIDATION

compacité (G = 2,7)							consolidation									
Nature des sols	γ_d		e^*	n	w_{sat}		γ_{sat}^*	K			C_v		$\bar{V}$		$m_v = \frac{1}{E}$	
	g/cm ³	lb cb.ft			%	g/cm ³		cm/s	ft/year	lugeon	cm ² /s	ft ² /year	bars	psi	cm ² /kg	ft ² /ton
molles giles moyennes	0.5	31.25	4.40	0.80	163.0	1.31		10 ⁻⁹	1.03 10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵		0.01	0.142	100	97.6
	0.6	37.50	3.50	0.78	129.6	1.38						0.05	0.71	20	19.5	
	0.7	43.75	2.86	0.74	105.8	1.44		10 ⁻⁸	1.03 10 ⁻²	10 ⁻³	1.10 ⁻⁴	3.4	0.1	1.42	10	9.76
	0.8	50.00	2.30	0.70	88.0	1.50					2	6.8	0.1	7.05	2	1.95
	0.9	56.25	1.88	0.67	74.1	1.57		10 ⁻⁷	1.03 10 ⁻¹	10 ⁻²	3	10.1	0.1	14.2	1	0.1178
	1.0	62.50	1.70	0.63	63.0	1.63	1.10 ⁻⁶				4	11.1	1	14.2	1	0.111
	1.1	68.75	1.45	0.59	53.9	1.69	2	2.08		0.1	5	16.9	2	28.4	0.5	0.488
	1.2	75.00	1.25	0.56	46.3	1.76	3	3.10			6	20.3	3	42.6	0.33	0.325
	1.3	81.25	1.08	0.52	39.9	1.82	4	4.13			7	23.6	4	56.9	0.25	0.244
	1.4	87.50	0.93	0.48	34.4	1.88	5	5.17			8	27.0	5	71.0	0.20	0.195
étroite: sables, graviers granulo étendue	1.5	93.75	0.80	0.44	29.6	1.94	6	6.20			10 ⁻³	33.8 10 ¹	6	85.3	0.17	0.163
	1.6	100.00	0.69	0.41	25.5	2.00	7	7.24					7	99.5	0.14	0.144
	1.7	106.25	0.59	0.37	21.8	2.07	8	8.26					8	113	0.12	0.122
	1.8	112.50	0.50	0.33	18.5	2.13	9	9.30			10 ⁻²	3.38 10 ²	9	127	0.11	0.111
	1.9	118.75	0.42	0.30	15.6	2.20	10 ⁻⁵	10.33	1				10	142	0.10	0.0976
	2.0	125.00	0.35	0.26	13.0	2.26	10 ⁻⁴	1.03 10 ²	10	10 ⁻¹	3.38 10 ³	11	156	0.093	0.0887	
	2.1	131.25	0.29	0.22	10.6	2.32	10 ⁻³	1.03 10 ³	100			12	170	0.083	0.0815	
	2.2	137.50	0.23	0.19	8.4	2.39	10 ⁻²	1.03 10 ⁴	1000			13	185	0.077	0.075	
	2.3	143.75	0.17	0.15	6.4	2.45	10 ⁻¹	1.03 10 ⁵	10000			14	199	0.071	0.07	
	2.4	150.00	0.13	0.11	4.63	2.51						15	213	0.064	0.065	
2.5	156.25	0.080	0.074	2.96	2.57						20	284	0.050	0.0488		
2.6	162.50	0.038	0.037	1.42	2.64						50	710	0.020	0.0195		
2.7	168.75	0.000	0.000	0.00	2.70						100	1420	0.010	9.76 10 ⁻³		
											500	7100	0.002	1.95 10 ⁻³		
											1000	14200	0.001	9.76 10 ⁻⁴		

Gambar 2.23 Korelasi Parameter Tanah

Sumber: Herman.W, 1999

2.2.9 Karakteristik Tanah

2.2.9.1 Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*)

Indeks Plastisitas (PI) adalah selisih antara batas cair dan batas plastis atau interval kadar air saat tanah masih mempunyai sifat plastis. Tanah dengan PI yang tinggi biasanya memiliki banyak butiran lempung. Jika PI rendah seperti lanau, sedikit pengurangan air akan menyebabkan tanah menjadi kering (Jumikis, 1962).

$$IP = LL - PL \quad (2.38)$$

Dimana:

IP = indeks plastisitas

LL = batas cair

PL = batas plastis

Tabel 2.9 Indeks Plastisitas Tanah

IP	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non Kohesif
<7	Plastisitas Rendah	Lnau	Kohesif Sebagian
7-17	Plastisitas Sedang	Lempung Berlanau	Kohesif
>17	Plastisitas Tinggi	Lempung	Kohesif

Sumber: Hardiyatmo (2002)

2.2.9.2 Kekuatan Geser Tanah (*Shear Strenght*)

Gaya perlawanan yang diberikan oleh butir-butir tanah terhadap tarikan atau desakan disebut kekuatan geser tanah. Jika tanah mengalami pembebanan, maka pembebanannya akan ditahan oleh:

1. Kohesi tanah yang bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya.
2. Gerakan antara butiran tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang geser.

Nilai kekuatan geser tanah digunakan untuk menghitung daya dukung tanah dan menyatakan kondisi runtuh. Kondisi keruntuhan terjadi akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan geser dan tegangan normal, sehingga dapat diambil hubungan fungsi antara tegangan normal dan tegangan geser pada bidang runtuhnya (Mohr, 1910).Adapaun persamaan yang menyatakan hubungan fungsi adalah sebagai berikut.

$$\tau = f(\sigma) \quad (2.39)$$

Dimana:

τ = tegangan geser (t/m^2)

σ = tegangan normal (t/m^2)

Coulumb (1776) mendefinisikan:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (2.40)$$

c = kohesi tanah (t/m^2)

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

Terzaghi (1925) mengubah persamaan Coulumb dalam bentuk efektif karena tanah sangat dipengaruhi oleh tekanan air pori.

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (2.41)$$

Dimana:

c = kohesi tanah efektif (t/m^2)

ϕ = sudut geser dalam tanah efektif ($^{\circ}$)
 σ = tegangan normal efektif (t/m^2)

Terdapat beberapa macam percobaan untuk menentukan kekuatan geser tanah, misalnya pengujian *triaxial*, pengujian geser langsung, dan pengujian kekuatan geser *unconfined*.

2.2.9.3 Tegangan Overburden

Tegangan yang memengaruhi kuat geser dan perubahan volume atau penurunan tanah disebut tegangan efektif (tegangan *overburden*) (Mohr, 1910). Penurunan muka air tanah akan menyebabkan kenaikan tegangan efektif pada tanah.

$$\sigma'_0 = \gamma' \cdot H_i \quad (2.42)$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (2.43)$$

Dimana:

σ'_0 = tegangan *overburden* atau tegangan efektif akibat berat sendiri (t/m^2)

γ' = berat jenis tanah dalam keadaan *submerged* atau terendam (t/m^3)

γ_{sat} = berat jenis tanah jenuh (t/m^3)

γ_w = berat jenis air (t/m^3)

H_i = kedalaman lapisan tanah yang ditinjau (m)

2.2.9.4 Penambahan Tegangan

Beban rencana dianggap diwakili oleh beban timbunan dari pembebanan. Besarnya nilai pengaruh I ditentukan oleh grafik OSTERBERG dengan menentukan besarnya panjang b timbunan dibandingkan kedalaman. Jika dalam perhitungan hasilnya cukup besar bila dimasukkan dalam grafik OSTERBERG, maka besarnya nilai pengaruh I = 0,5 (keadaan ∞).

Persamaan penambahan beban vertikal akibat variasi beban timbunan rencana adalah sebagai berikut.

$$\Delta\sigma = q \cdot H_r \quad (2.44)$$

$$\Delta\sigma = \gamma_{timb} \cdot 2 \cdot I \cdot H_r \quad (2.45)$$

Dimana:

$\Delta\sigma$ = penambahan tegangan vertikal (t/m^2)

γ_{timb} = berat isi tanah timbunan (t/m^3)

I = 0,5 (nilai pengaruh OSTERBERG)

H_r = tinggi timbunan rencana (m)

H_{eff} adalah tinggi timbunan efektif dimana untuk mendapatkannya harus menghubungkan grafik tinggi timbunan dengan grafik total penurunan yang terjadi. Dari kedua grafik tersebut, diambil titik pertemuannya yang berupa H_{eff} atau tinggi timbunan efektif.

2.2.9.5 Permeabilitas Tanah

Permeabilitas tanah merupakan kemampuan tanah untuk mengalirkan fluida, seperti air dan udara, melalui pori-porinya. Nilai permeabilitas biasanya dinyatakan dalam satuan kecepatan aliran, misalnya cm/jam (Hakim et al., 1986; Foth, 1984). Permeabilitas berbeda dari drainase yang hanya menggambarkan proses aliran air, karena permeabilitas juga mencakup pergerakan udara, bahan organik, mineral, dan partikel lain bersama air ke dalam

tanah (Rohmat, 2009). Karakteristik ini berpengaruh langsung terhadap kesuburan tanah dan kapasitas infiltrasi air.

2.2.9.6 Pemadatan Tanah

Pemadatan tanah (*compaction*) proses mekanis untuk mengurangi kandungan udara dalam pori-pori tanah, biasanya dilakukan dengan penggilasan atau penumbukan, sehingga butiran tanah menjadi lebih rapat. Proses ini tidak mengubah kadar air maupun volume padatan secara signifikan, namun mengurangi volume udara, menjadikan tanah lebih padat dan stabil. Pemadatan merupakan metode sederhana namun efektif untuk meningkatkan kestabilan dan daya dukung tanah. Menurut Hardiyatmo (1992), tujuan utama dari pemadatan tanah meliputi:

1. Meningkatkan kekuatan geser tanah
2. Mengurangi kompresibilitas (sifat mudah mampat)
3. Menurunkan permeabilitas
4. Mengurangi potensi perubahan volume akibat fluktuasi kadar air

Tanah berbutir kasar seperti pasir dan kerikil merupakan jenis tanah yang paling mudah dipadatkan di lapangan. Setelah dipadatkan, tanah granuler dapat mencapai kekuatan geser tinggi dengan sedikit perubahan volume karena permeabilitasnya yang tinggi. Sebaliknya, tanah lanau dan tanah lempung memiliki permeabilitas rendah dan cenderung sulit dipadatkan dalam kondisi basah. Namun, jika proses pemadatan tanah lempung dilakukan secara optimal, tanah ini dapat menunjukkan kekuatan geser yang baik.

2.2.10 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah mengacu pada pengelompokan jenis tanah yang berbeda ke dalam kelompok berdasarkan karakteristiknya. Tujuan klasifikasi tanah untuk menentukan kesesuaian aplikasi tertentu dan memberikan informasi tentang kondisi tanah dari satu daerah ke daerah lain dalam bentuk data dasar seperti karakteristik pemadatan, kekuatan tanah, berat, dan komposisi.

Sistem klasifikasi ini secara singkat menggambarkan sifat-sifat umum tanah, tetapi dalam praktiknya tidak ada deskripsi yang jelas tentang kemungkinan penggunaannya (Das.B.M, 1995). Terdapat beberapa sistem klasifikasi tanah, 2 di antaranya yaitu, AASHTO (*American Association of State Highway dan Transportation Official*) dan sistem klasifikasi tanah *unified* (USCS).

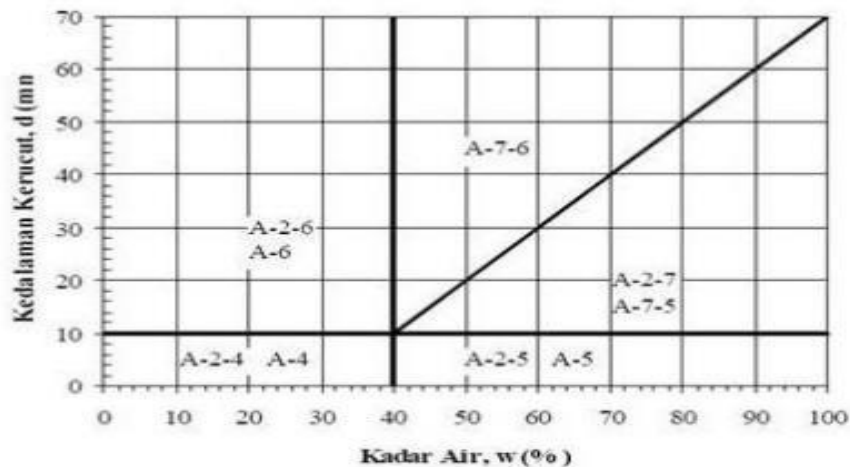
2.2.10.1 Sistem Klasifikasi AASHTO

AASHTO digunakan untuk menentukan kualitas tanah konstruksi jalan, yaitu tanah dasar. Sistem AASHTO membagi lahan menjadi tujuh kelompok, A1 hingga A7. A1, A2, dan A3 adalah tanah granular dimana kurang dari 35% jumlah butir lolos saringan No. 200. Tanah di mana lebih dari 35% butir lolos saringan ke-200 dibagi menjadi kelompok A4, A5, A6 dan A7. Partikel dari golongan A4 sampai A7 sebagian besar adalah lanau dan lempung. Klasifikasi tanah dengan sistem klasifikasi AASHTO adalah sebagai berikut.

Tabel 2.10 Klasifikasi Tanah AASHTO

Klasifikasi Umum	Tanah Berbutir (35 Atau Kurang Dari Seluruh Contoh Tanah Lolos Ayakan No. 200)							Tanah Lanau-Lempung (Lebih Dari 35 % Dari Seluruh Contoh Tanah Lolos Ayakan No. 200)			
Klasifikasi Kelompok	A-1		A3	A2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 * A-7-6 **
Analisis ayakan (% lolos)											
No. 10	≤ 50	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
No. 40	≤ 30	≤ 50	≤ 51	---	---	---	---	---	---	---	---
No. 200	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36
Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40											
Batas cair (LL)	---		---	≤ 41	≥ 41	≤ 40	≥ 40	≤ 40	≤ 41	≤ 40	≥ 41
Indeks elastisitas (PI)	≤ 6		---	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian sebagai bahan dasar tanah	Baik sekali sampai baik							Sedang sampai jelek			

Keterangan: * Untuk A-7-5, $PI \leq LL - 30$ ** Untuk A-7-6, $PI > LL - 30$



Gambar 2.24 Grafik Plastisitas Untuk Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO

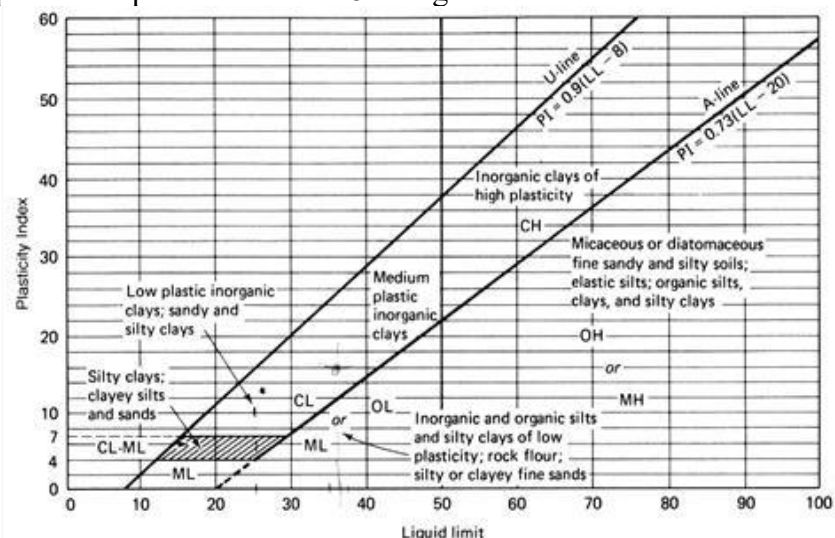
Sumber: Braja M. Das (1995)

2.2.10.2 Sistem Klasifikasi USCS

Pada sistem USCS, tanah diklasifikasikan ke dalam tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) jika kurang dari 50% lolos saringan nomor 200, dan sebagai tanah berbutir halus (lanau atau lempung) jika lebih dari 50% lolos saringan nomor 200. Tanah diklasifikasikan dalam 2 kelompok, antara lain sebagai berikut.

1. Tanah berbutir kasar (*coarse grained – soil*), yaitu tanah kerikil dan pasir yang kurang dari 50% berat total, contoh tanah lolos saringan no. 200. Simbol kelompok tersebut adalah G (tanah berkerikil), dan S (tanah berpasir). Selain itu, juga dinyatakan dengan simbol W (tanah gradasi baik) dan P (tanah gradasi buruk).
2. Tanah berbutir halus (*fine – grained – soil*), yaitu tanah yang lebih dari 50% berat contoh tanahnya lolos dari saringan no. 200. Simbol kelompok tersebut adalah C (tanah lempung anorganik), M (tanah berlanau anorganik), dan O (lanau atau lempung organik). Selain itu, juga dinyatakan dengan simbol H (plastisitas tinggi) dan L (plastisitas rendah).

Untuk dapat mengklasifikasikan tanah berbutir halus yang lebih spesifik, maka grafik plastisitas dapat dilihat pada Gambar 2.25 sebagai berikut.



Gambar 2.25 Grafik Klasifikasi Tanah Metode USCS

Sumber: Hardiyanto (2010)

2.2.11 Tanah Lunak

2.2.11.1 Deskripsi Tanah Lunak

Tanah lunak adalah jenis tanah kohesif yang didominasi oleh partikel halus seperti lempung dan lanau. Lapisan ini umumnya memiliki karakteristik berupa kekuatan geser rendah, tingkat kompresibilitas tinggi, permeabilitas rendah, serta daya dukung yang minim. Tanah ini terbentuk secara alami melalui proses sedimentasi di lingkungan seperti endapan aluvial, lahan rawa, danau, maupun daerah pesisir. Dari sisi sifat mekanis, tanah lunak tergolong sangat kompresibel dengan kuat geser tak terdrainase yang rendah, biasanya memiliki tekanan prategangan (*preconsolidation pressure*) di bawah 40 kPa.

Menurut Toha (1989), sifat-sifat umum tanah lunak adalah mempunyai kadar air 80-100%, batas cair 80-110%, dan plastisitas 30-5% apabila lolos saringan No. 200 sehingga lebih dari 90% dengan kuat geser 20-40 kN/m². Tanah lunak dibagi menjadi 2 bagian, tanah lempung lunak dan tanah gambut. Dalam pekerjaan geoteknik berdasarkan kandungan organik pada tanah gembur, dapat dilihat pada Tabel 2.11 berikut.

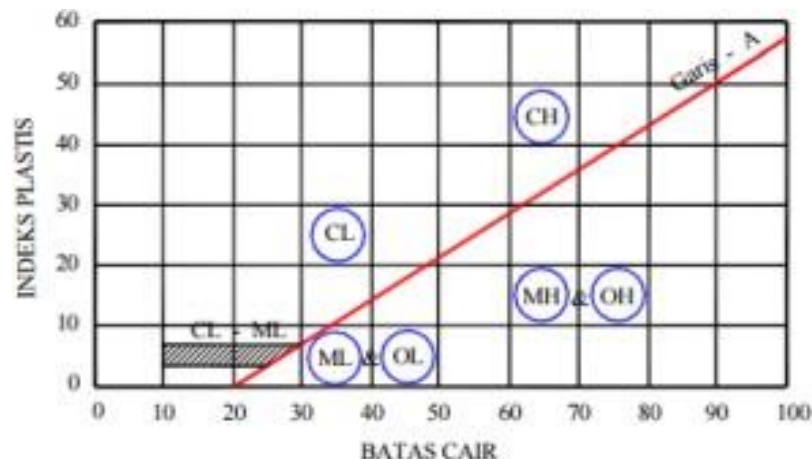
Tabel 2.11 Tipe Tanah Lunak Berdasarkan Kadar Organik

Jenis Tanah	Kadar Organik (%)
Lempung	< 25
Lempung Organik	25 - 75
Gambut	> 75

Sumber: (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2002) dalam (Yulianto dan Farhan, 2018))

2.2.11.2 Karakteristik Tanah Lunak

Tanah lunak memiliki sifat yang berbeda tergantung pada parameter dan kepadatan



Gambar 2.26 Grafik Plastisitas *Unified Soil Classification System*

tanah. Lempung lunak dapat diklasifikasikan ke dalam kelompok MH atau OH menurut *Uniform Soil Classification System* yang dikembangkan di Amerika Serikat oleh Casagrande (1948). Tanah liat lunak terdiri dari partikel yang sangat kecil ($< 0,002$ mm) dan menunjukkan sifat plastis dan kohesif. Sifat yang berubah tanpa mengubah isi atau kembali ke bentuk semula dan tanpa retak atau putus disebut sifat plastis, sedangkan sifat kohesif menunjukkan bahwa bagian-bagiannya saling menempel (Wesley, 1977).

Sumber: (Wagner. A.A., 1957) dalam (Yulianto dan Farhan, 2018)

Dalam rekayasa geoteknik, istilah "lunak dan sangat lunak" diartikan untuk lempung dengan kekuatan geser yang ditunjukkan pada Tabel 2.12 serta indeks kekuatan lempung dapat ditentukan ketika di lapangan dilihat pada Tabel 2.13.

Tabel 2.12 Kuat Geser Lempung Lunak

Konsistensi	Kuat Geser (kN/m ²)
Lunak	12,5 - 25
Sangat Lunak	< 12,5

Sumber: (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2002) dalam (Yulianto dan Farhan, 2018)

Tabel 2.13 Indikator Kuat Geser Tak Terdrainase Tanah Lempung Lunak

Konsistensi	Indikasi Lapangan
Lunak	Bisa dibentuk dengan mudah dengan jari tangan
Sangat Lunak	Keluar di antara jari tangan jika diremas dalam kepalan tangan

Sumber: Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah (2002) dalam Yulianto dan Farhan (2018)

Sedangkan pada tanah gambut terbentuk dan terdiri dari sisa-sisa tumbuhan. Sisa-sisa tumbuhan merupakan bahan organik, kandungan material organik pada tanah gambut adalah >75. Tanah gambut biasanya berada pada lahan yang basah atau jenuh air seperti cekungan, pantai, rawa. Sifat-sifat tanah gambut yang dapat diamati meliputi kadar air, densitas, daya dukung, subsidensi, dan *irreversible*. Tanah gambut memiliki kadar air 100-1300 ri berat kering. Hal ini menjelaskan bahwa tanah gambut dapat menyerap air hingga 13 kali beratnya sendiri. Maka kubah gambut dapat mengalirkan air ke daerah sekitarnya hingga batas tertentu.

Tabel 2.14 Nilai Kisaran yang Realistis dari Tanah Lunak

Parameter Tanah		Lempung	Lempung Organik	Gambut Berserat
Kadar Air, w	%	20 hingga 150	100 - 500	100 - 4000
Berat Isi Total, γ_b	(kN/m ³)	14 hingga 17	12 - 15	10 - 12
Kadar Organik	%	<25	25 - 75	>75
Kohesi Tak Terdrainase, c_u	KPa	5 - 50	5 - 50	10 - 50
Batas Cair, LL	%	60 - 120	-	-
Indeks Plastis, PI	%	40 - 80	-	-
c'	KPa	0	0	0
ϕ'		21 - 27	25 - 35	30 - 40
C_c		-	-	1 - 20
$C_c/(1+e_0)$		0.1 - 0.3	0.3 - 1.0	-
c_v	m ² /th	1 - 10	5 - 50	10 - 100
C_α	cm/det	(0.03 - 0.05) C_c	(0.04 - 0.06) C_c	1 - 4
k	cm/det	10^{-6} - 10^{-9}	100 - 10^{-12}	100 - 10^{-12}

Sumber: Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah (2002)

2.2.11.3 Masalah yang Timbul Pada Tanah Lunak dan Penanganannya

Masalah utama tanah lunak adalah masalah penurunan muka tanah dan masalah likuefaksi pada saat gempa bumi yang menyebabkan penurunan daya dukung tanah, dimana tanah lunak tidak dapat digunakan sebagai fondasi struktur.

Perbaikan tanah lunak dilakukan untuk meningkatkan daya dukungan kuat geser tanah, meningkatkan modulus tanah, menurunkan kuat tekan tanah, mengontrol stabilitas

volumetrik tanah (susut dan muai), mengurangi rentan terhadap likuefaksi, meningkatkan kualitas bahan konstruksi dan meminimalkan dampak terhadap lingkungan sekitar.

Penentuan metode perbaikan tanah bisa disesuaikan dengan kondisi tanah dan kriteria yang telah ditentukan. Kriteria ini meliputi jenis dan struktur tanah serta kondisi aliran tanah, jenis dan luas reklamasi yang diinginkan, biaya proyek, jangka waktu proyek, ketersediaan peralatan dan material, dan ketahanan material yang digunakan. Upaya untuk memperkuat dan meningkatkan seperti pengurangan kompresibilitas, peningkatan modulus, kontrol stabilitas volume, peningkatan kualitas material, pengurangan kerentanan likuefaksi, meminimalkan pengaruh lingkungan, peningkatan daya dukung dan kekuatan geser.

2.2.12 Penurunan Tanah (*Settlement*)

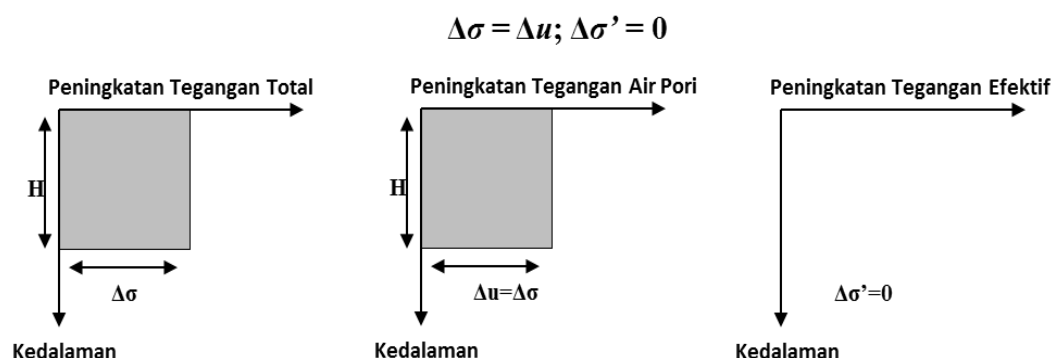
Penurunan muka tanah adalah suatu proses penurunan tanah berdasarkan metrik tertentu (*geodetic reference frame*) dimana dari berbagai variabel penyebabnya. Penurunan muka tanah disebabkan oleh banyak faktor seperti beban permukaan atau kehilangan air tanah karena penggunaan yang berlebihan hingga kerusakan struktur fondasi akibat gempa, dan lain-lain.

Penurunan tanah merupakan hasil dari adanya beban yang diterapkan di atas permukaan tanah yang menekan lapisan tanah di bawahnya. Beban ini menyebabkan pelepasan air interstisial, disertai dengan penurunan volume tanah, yang menyebabkan deformasi partikel tanah. Tanah granular (*sand*) sangat permeabel sehingga air pori bisa dengan mudah keluar dari lapisan tanah. Sedangkan tanah kohesif (*lempung*) mempunyai permeabilitas yang rendah, sehingga membutuhkan waktu yang lama untuk mengalirkan air pori.

2.2.12.1 Proses Penurunan Konsolidasi

Konsolidasi adalah proses pemampatan tanah kohesif dalam bentuk deformasi dan relokasi partikel tanah disertai keluarnya air pori atau udara dari rongga di antara partikel tanah tersebut selama hilangnya kelebihan tekanan air pori (*excess pore water pressure*) setelah adanya penambahan beban pada tanah atau lapisan tanah kohesif tersebut. Proses berlangsungnya konsolidasi ini dapat dijelaskan dengan kondisi regangan (*strain*) tanah saat berlangsungnya proses tersebut.

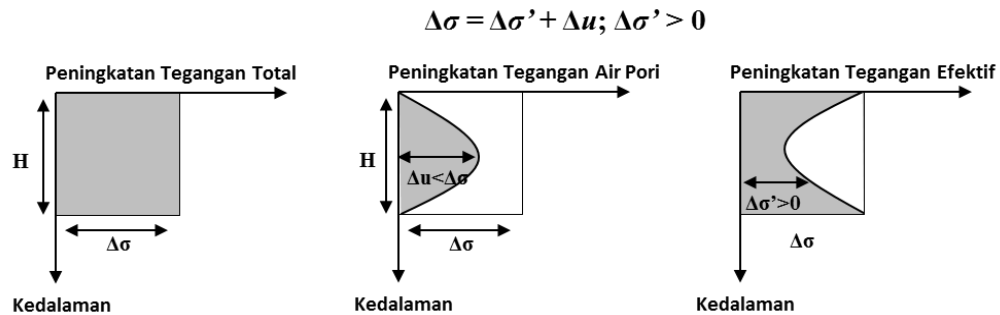
Karena tanah lempung memiliki koefisien permeabilitas yang rendah dan air bersifat tidak termampatkan (*incompressible*) jika dibandingkan dengan partikel tanah, penambahan tegangan ($\Delta\sigma$) diterima secara menyeluruh oleh air pori pada saat $t = 0$ seperti yang terlihat pada Gambar 2.27.



Gambar 2.27 Kondisi Tegangan Tanah Saat $t = 0$

Sumber: Braja M Das (2002)

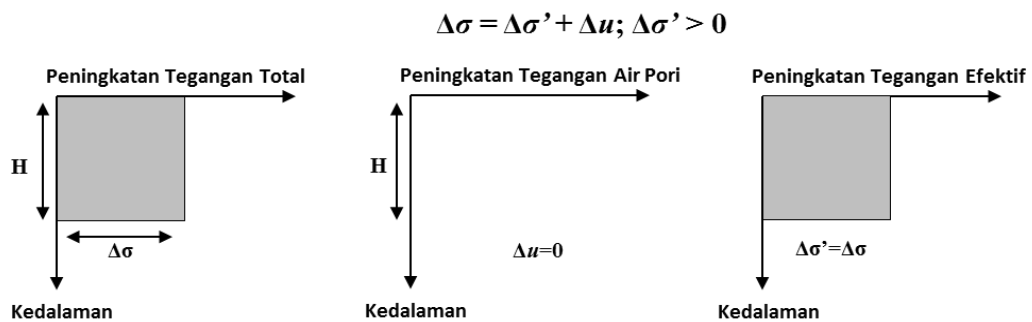
Semakin dekat dengan lapisan tanah pasir, penurunan tegangan air pori dan peningkatan tegangan efektif lebih cepat. Sebaliknya, di tengah lapisan lempung, penurunan tegangan air pori dan peningkatan tegangan efektif berlangsung lebih lambat seperti yang terlihat pada Gambar 2.28.



Gambar 2.28 Kondisi Tegangan Tanah Saat $0 < t < \infty$

Sumber: Braja M Das (2002)

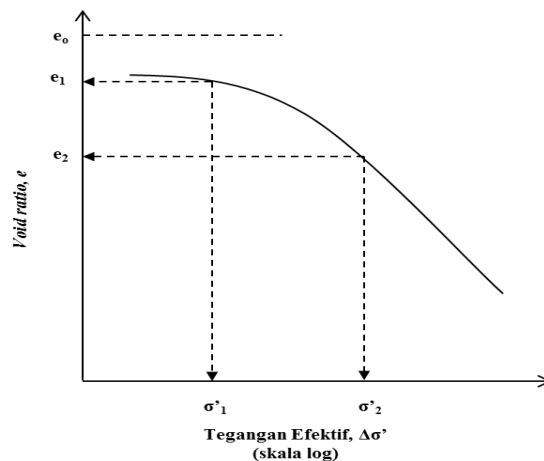
Proses keluarnya air dari pori-pori tanah secara perlahan-lahan sebagai akibat adanya penambahan beban serta transfer proporsi kelebihan tekanan air pori ke tegangan efektif, menyebabkan terjadinya penurunan yang merupakan fungsi dari waktu (*time-dependent settlement*) pada lapisan tanah lempung seperti yang terlihat pada Gambar 2.29.



Gambar 2.29 Kondisi Tegangan Tanah Pada $T = \infty$

Sumber: Braja M Das (2002)

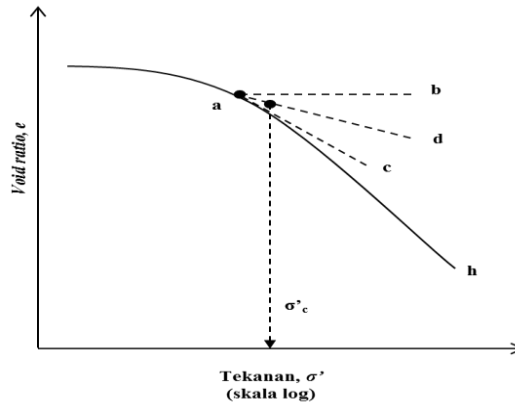
Void ratio (e) pada tanah yang mengalami konsolidasi akan mengalami perubahan. Parameter e ini menjadi salah satu parameter yang berpengaruh dalam mempelajari konsolidasi. Hubungan e dengan tegangan (σ) merupakan salah satu pokok kajian dalam konsolidasi yang ditunjukkan dengan grafik $e - \log \sigma'$ seperti pada Gambar 2.30.



Gambar 2.30 Grafik Tipikal e vs $\log \sigma$

Sumber: Braja M Das (2002)

Gambar 2.30 menunjukkan bahwa suatu lapisan tanah di lapangan pada suatu kedalaman tertentu, dalam sejarah geologisnya pernah mengalami tekanan efektif maksimum akibat berat tanah di atasnya (*maximum effective overburden pressure*) yang disebut juga dengan *preconsolidation pressure*.



Gambar 2.31 Grafik Untuk Menentukan Tekanan Pra-Konsolidasi

Sumber: Braja M Das (2002)

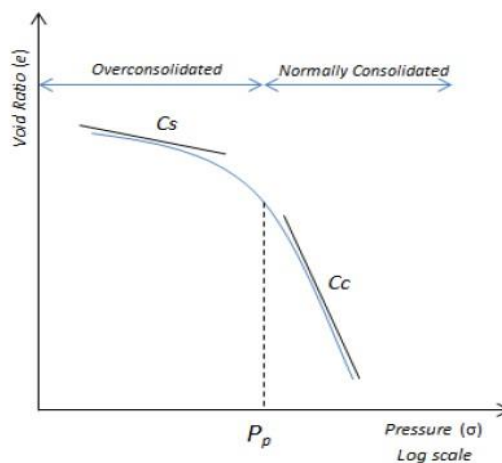
Berdasarkan kondisi pembebanan yang dilakukan pada suatu sampel tanah, tanah lempung dapat dikelompokkan kepada dua jenis, yaitu (Wesley, 1977):

- *Normally Consolidated* (NC) memiliki nilai $OCR=1$, lapisan tanah di bawah yang belum pernah mengalami tekanan di atasnya lebih tinggi daripada tekanan yang berlaku di masa sekarang.
- *Overconsolidated* (OC) memiliki nilai $OCR>1$, lapisan tanah di bawah pada suatu saat dalam sejarahnya geologinya pernah mengalami konsolidasi akibat tekanan yang lebih tinggi daripada tekanan yang berlaku di masa sekarang.

Nilai banding *overconsolidation* (*Overconsolidation Ratio*, OCR) didefinisikan sebagai nilai banding tekanan prakonsolidasi terhadap tegangan overburden efektif yang ada, atau bila dinyatakan dalam Persamaan 2.46 berikut ini.

$$OCR = \frac{P_c}{\sigma'_0} \quad (2.46)$$

Hubungan e dengan σ pada kondisi *normally consolidated* dan *overconsolidated* dapat dilihat pada Gambar 2.32.



Gambar 2.32 Grafik e vs σ Kondisi NC dan OC

Sumber: Wesley (1977)

Penurunan tanah total dapat digambarkan dengan persamaan:

$$S_T = S_i + S_c + S_s \quad (2.47)$$

Dimana:

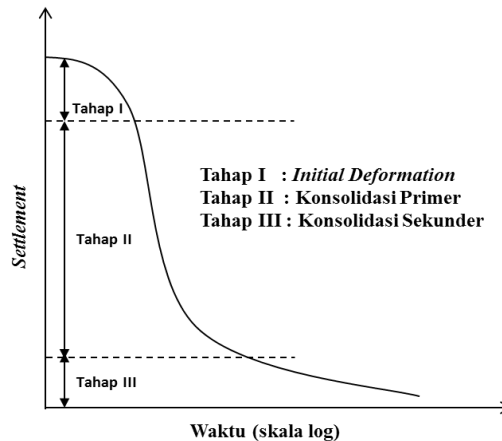
S_T = penurunan total (m)

S_i = penurunan seketika (m)

S_c = penurunan konsolidasi primer (m)

S_s = penurunan konsolidasi sekunder (m)

Gambar 2.33 menunjukkan kurva fase *settlement* yang merupakan hubungan antara penurunan terhadap waktu (skala log).



Gambar 2.33 Tahapan *Settlement*

Sumber: Braja M Das (2002)

2.2.12.2 Jenis Penurunan Tanah

1. Penurunan Seketika (*Immediate Settlement*)

Immediate settlement (S_e) merupakan penurunan seketika yang terjadi pada suatu lapisan tanah akibat adanya pengaruh beban luar, tanpa adanya perubahan kadar air dari tanah tersebut. Besarnya penurunan seketika bergantung pada besarnya modulus elastisitas tanah dan besarnya beban timbunan yang diberikan. Besar *immediate settlement* dapat didekati dengan Persamaan 2.48 (Das, 2002):

$$S_e = \Delta\sigma B \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_p \quad (2.48)$$

Dimana:

S_e = penurunan seketika (m)

$\Delta\sigma$ = tekanan yang bekerja pada tanah (kN/m²)

B = lebar fondasi atau diameter fondasi sirkular yang dapat dianalogikan sebagai lebar beban timbunan (m)

μ_s = *poisson's ratio* tanah

E_s = modulus elastisitas tanah (kN/m²)

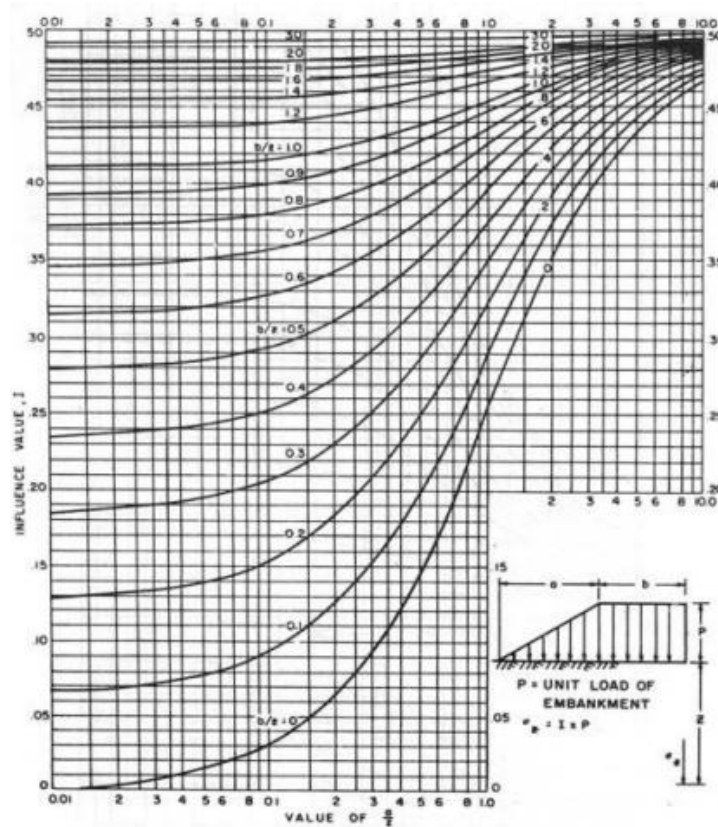
I_p = faktor tak berdimensi

Besarnya I_p dapat ditentukan dengan Persamaan 2.49:

$$I_p = \left[\frac{1}{\pi} m_1 \ln \left(\frac{1 + \sqrt{m_1^2 + 1}}{m_1} \right) + \ln \left(m_1 + \sqrt{m_1^2 + 1} \right) \right] \quad (2.49)$$

Dimana:

m_1 = perbandingan antara panjang dengan lebar fondasi atau timbunan



Gambar 2.34 Kurva faktor pengaruh I
Sumber: NAVFAC DM-7 (1970)

Atau menghitung dengan teori Jambu sebagai berikut.

$$S_i = q \times \sum \left(\frac{H_i}{E'_i} \right) \quad (2.50)$$

$$E'_i = E_i / \left(1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu} \right) \quad (2.51)$$

Dimana:

S_i = penurunan segera (m)

H_i = tebal lapisan tanah ke-i (m)

μ = angka Poisson

E_i = modulus elastisitas tanah (modulus Young) (t/m²)

E'_i = modulus elastisitas dari Oedometrik lapisan ke-i (t/m²)

q = beban timbunan (t/m³)

Tabel 2.15 Harga-harga Modulus Young

Jenis tanah	Modulus Young	
	psi	kN/m ²
Lempung lembek	250 – 500	1380 – 3450
Lempung keras	850 – 2000	5865 – 13800
Pasir lepas	1500 – 4000	10350 – 27600
Pasir padat	5000 – 10000	34500 – 69000

Sumber: Das (1994)

Tabel 2.16 Harga-harga Angka Poisson

Jenis tanah	Angka Poisson (μ)
Pasir lepas	0,2 – 0,4
Pasir agak padat	0,25 – 0,4
Pasir padat	0,3 – 0,45
Pasir berlanau	0,2 – 0,4
Lempung lembek	0,15 – 0,25
Lempung agak kaku	0,2 – 0,5

Sumber: Das (1994)

2. Konsolidasi Primer (*Primary Consolidation*)

Kondisi riwayat geologis dan sejarah tegangan atau beban yang pernah dipikul oleh tanah lempung menentukan perhitungan besarnya penurunan konsolidasi primer untuk satu-dimensi. Untuk tanah lempung yang *normally consolidated*, penurunan konsolidasi primer dapat ditentukan dengan persamaan (Das, 2002):

- a. Untuk tanah terkonsolidasi normal atau
- Normally Consolidated*
- (NC Soil).

$$S_c = \frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right) \quad (2.52)$$

S_c = pemampatan konsolidasi pada lapisan tanah ke i yang ditinjau (m)

H_i = tebal lapisan tanah ke-i (m)

e_0 = angka pori awal dari lapisan tanah ke-i

C_c = *compression index* dari lapisan tanah tersebut (lapisan ke-i)

$\Delta\sigma'$ = penambahan tegangan efektif

σ'_0 = tegangan *overburden* dari tanah bagian atas yang bekerja pada lapisan lempung yang ditinjau

- b. Untuk tanah tekonsolidasi berlebih atau
- Over Consolidated*
- (OC Soil), terdapat dua persamaan yang bergantung kepada besar kecilnya nilai
- σ'
- yang bekerja.

$$S_c = \frac{C_r H_i}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right) ; \sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq P_c \quad (2.53)$$

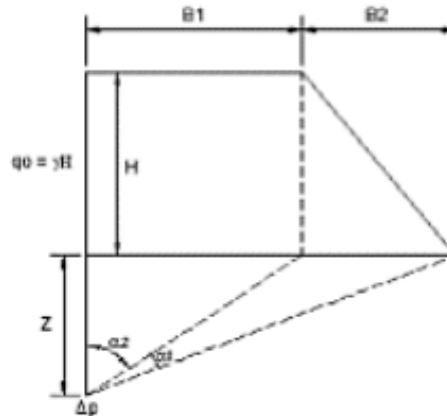
$$S_c = \frac{C_r H_i}{1 + e_0} \log\left(\frac{P_c}{\sigma'_0}\right) + \frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{P_c}\right) ; \sigma'_0 < P_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma' \quad (2.54)$$

Dimana:

C_r = indeks pemampatan kembali (lapisan ke-i)

P_c = tegangan prakonsolidasi

Dalam perhitungan penambahan tegangan vertikal di titik yang ditinjau tersebut dapat digambarkan berdasarkan Braja M. Das (1985), dalam bukunya "*Principles of Foundation Engineering, Second Edition*" diagram tegangan tanah akibat timbunan adalah sebagai berikut.



Gambar 2.35 Visualisasi dan Notasi $\Delta\sigma'$

Sumber: Modul Ajar Metode Perbaikan Tanah (2012)

Besarnya $\Delta\sigma'$ adalah sebagai berikut.

$$\Delta\sigma' = \frac{q_0}{n} \times \left(\left(\frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) \times (a_1 + a_2) - \left(\frac{B_1}{B_2} a_2 \right) \right) \quad (2.55)$$

Di mana:

q_0 = beban timbunan (t/m^2) ($q_0 = \gamma$ timbunan $\times$ h timbunan)

$\Delta\sigma'$ = besarnya tegangan akibat pengaruh beban timbunan yang ditinjau di tengah-tengah lapisan (t/m^2)

$$a_1 = \tan^{-1} \left(\frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \text{ (radian)}$$

$$a_2 = \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \text{ (radian)}$$

B_1 = $\frac{1}{2}$ lebar timbunan

B_2 = panjang proyeksi horizontal kemiringan timbunan

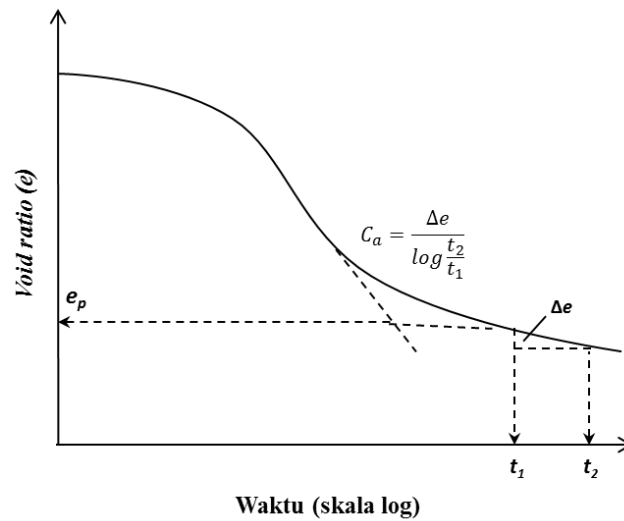
Nilai $\Delta\sigma'$ yang diperoleh adalah untuk $\frac{1}{2}$ bentuk timbunan sehingga untuk bentuk timbunan yang simetris, nilai I yang diperoleh harus dikali 2, dan berubah menjadi:

$$\Delta\sigma' = 2 \times q_0 \quad (2.56)$$

3. Konsolidasi Sekunder (*Secondary Consolidation*)

Konsolidasi sekunder terjadi setelah konsolidasi primer selesai. Penurunan konsolidasi sekunder terjadi sebagai akibat aksi deformasi partikel tanah yang bersifat plastis. Penurunan konsolidasi sekunder sangat kecil dan tidak signifikan pada jenis tanah lempung anorganik *overconsolidated*. Namun, penurunan konsolidasi sekunder lebih penting dari penurunan konsolidasi primer pada tanah organik dan tanah anorganik kompresibilitas tinggi (Das, 2002).

Kurva tipikal variasi nilai *void ratio* (e) terhadap waktu (t) untuk beban tambahan yang diberikan dapat dilihat dari Gambar 2.36.



Gambar 2.36 Grafik Variasi Nilai *Void Ratio* (e) Terhadap Waktu (t) Untuk Beban Tambahan yang Diberikan

Sumber: Braja M Das (2002)

Dari Gambar 2.33 *secondary compression index* dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$C_a = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log \frac{t_2}{t_1}} \quad (2.57)$$

Besar penurunan konsolidasi sekunder dapat dinyatakan dengan:

$$S_s = C'_a H \log \frac{t_2}{t_1} \quad (2.58)$$

Dimana:

C_a = *secondary compression index*

Δe = perubahan *void ratio*

t_2, t_1 = waktu

$$C'_a = \frac{C_a}{1 + e_p}$$

e_p = *void ratio* pada akhir konsolidasi primer

H = ketebalan lapisan lempung (m)

Secara umum, besar nilai C'_a berkisar antara:

- Lempung *overconsolidated* = 0,001 atau kurang
- Lempung *normally consolidated* = 0,005 – 0,03
- Tanah organik = 0,04 atau lebih

2.2.12.3 Waktu Penurunan Tanah

a. Lama Penurunan Tanah

Berdasarkan teori dan perumusan Terzaghi dan Das (1988), lama waktu penurunan tanah (konsolidasi) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$t = \frac{Tv \times H^2}{Cv} \quad (2.59)$$

Di mana:

t = lama waktu konsolidasi

T_v = faktor waktu terhadap derajat konsolidasi

H_i = panjang aliran air pori dalam tanah untuk mengalir keluar, dimana arah aliran air pori satu arah (ke atas atau kebawah)

$\frac{1}{2} H_i$ = panjang aliran air pori dalam tanah untuk mengalir keluar, dimana arah aliran air pori dua arah (ke atas dan ke bawah)

C_v = koefisien konsolidasi akibat aliran air pori arah vertikal (cm^2/s)

Untuk hubungan penurunan (S) dengan waktu penurunan (t) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan berikut:

$$S_t = U \times S_c \quad (2.60)$$

Di mana:

S_t = penurunan lapisan tanah pada waktu ke- t (m)

U = derajat konsolidasi (%)

S_c = konsolidasi primer (m)

b. Parameter tanah untuk lamanya penurunan tanah.

1. Faktor Waktu (T_v)

Merupakan fungsi dari derajat konsolidasi rata-rata ($U\%$) dimana tegangan air pori (U_0) adalah sama untuk seluruh keadaan lapisan yang mengalami konsolidasi. Dalam Das (1988), hal ini dapat dinyatakan untuk $U = 0\% - 60\%$,

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U\%) \quad (2.61)$$

Dari perumusan tersebut, Das (1988) menyajikan dalam Tabel 2.14 berupa variasi faktor waktu terhadap derajat konsolidasi untuk seluruh kedalaman lapisan.

Tabel 2.17 Variasi Faktor Waktu Terhadap Derajat Konsolidasi

Derajat Konsolidasi ($U\%$)	Faktor Waktu (T_v)
0	0
10	0,008
20	0,031
30	0,071
40	0,126
50	0,197
60	0,287
70	0,403
80	0,567
90	0,848
100	

Sumber: (Braja M. Das, 1988)

2. Koefisien Konsolidasi Vertikal (C_v)

Untuk jenis tanah heterogen, yang memiliki berlapis-lapis dengan ketebalan yang berbeda-beda, harga C_v gabungan dapat dicari dengan formula sebagai berikut:

$$C_{vgab} = \frac{(H_1 + H_2 + \dots + H_n)^2}{\left[\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}} \right]^2} \quad (2.62)$$

2.2.13 Daya Dukung Tanah Dasar

Analisis daya dukung tanah mempelajari kemampuan tanah dalam mendukung beban yang bekerja di atasnya. Daya dukung menyatakan kuat geser tanah untuk melawan penurunan akibat pembebanan, yaitu kuat geser yang dapat dibangkitkan oleh tanah sepanjang bidang gesernya. Daya dukung izin (q_{izin}) adalah tekanan maksimum yang dapat dibebankan pada tanah. Sedangkan daya dukung ultimit (q_u) didefinisikan sebagai beban maksimum per satuan luas dimana tanah masih dapat mendukung beban dengan tanpa mengalami keruntuhan. Bila dinyatakan dalam persamaan Terzaghi, maka:

$$q_u = cN_c + D_f\gamma N_q + 0,5\gamma BN_\gamma \quad (2.63)$$

Tabel 2.18 Nilai Faktor Daya Dukung Terzaghi

ϕ (°)	<i>General Shear Failure</i>			<i>Local Shear Failure</i>		
	N_c	N_q	N_γ	N_c	N_q	N_γ
0	5,7	1	0	5,7	1	0
5	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2
10	9,6	2,7	1,2	8	1,9	0,5
15	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9
20	17,7	7,4	5	11,8	3,9	1,7
25	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2
30	37,2	22,5	19,7	19	8,3	5,7
34	52,6	36,5	35	23,7	11,7	9
35	57,8	41,4	42,3	25,2	12,6	10,1
40	95,7	81,3	100,4	34,9	20,5	18,8
45	172,3	173,3	297,5	51,2	35,1	37,7
48	258,3	287,9	780,1	66,8	50,5	60,4
50	347,6	415,1	1153,2	81,3	65,6	87,1

Sumber: Terzaghi (1943)

2.2.14 Penentuan Metode Perbaikan Tanah

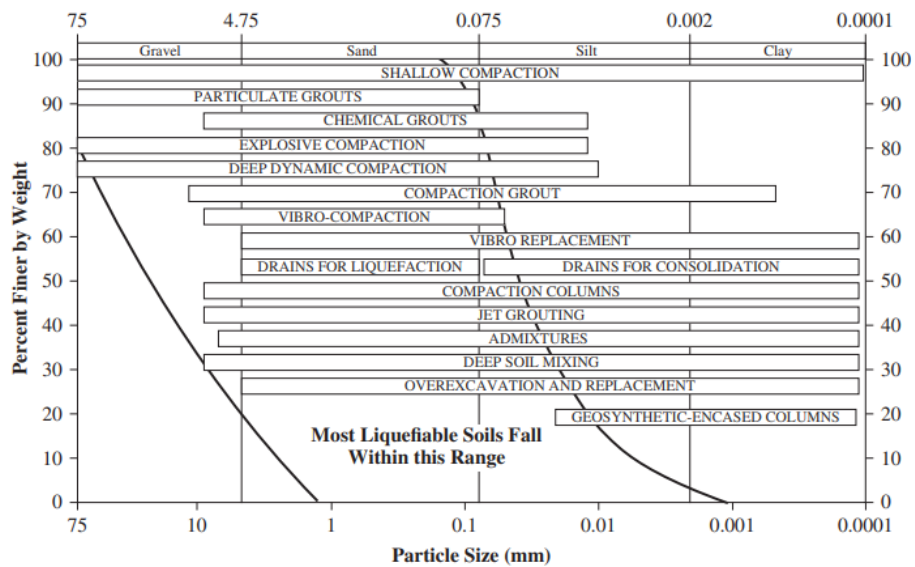
Pemilihan metode perbaikan tanah harus mempertimbangkan kondisi berikut.

1. Kondisi struktural

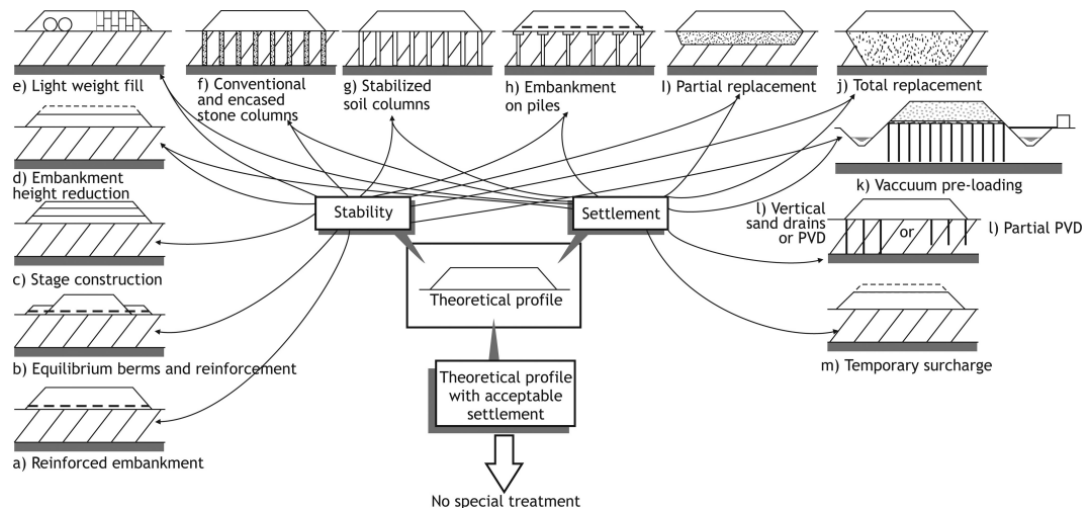
Kondisi struktural dapat mencakup jenis, bentuk, dan dimensi struktur serta kaki, fleksibilitas dan elemen struktural, jenis, besaran, dan distribusi beban, serta persyaratan kinerja (misalnya, penyelesaian total dan diferensial, gerakan lateral, dan faktor keamanan minimum).

2. Kondisi geoteknik

Kondisi geoteknik dapat mencakup lanskap geografis, formasi geologis, jenis, lokasi, dan ketebalan geomaterial yang bermasalah, usia, komposisi, distribusi isian, dan permukaan air tanah. Jenis tanah dan distribusi ukuran partikel sangat penting untuk pemilihan awal metode perbaikan tanah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.37 dan Gambar 2.38.



Gambar 2.37 Metode Perbaikan Tanah yang Tersedia Untuk Berbagai Jenis Tanah
Sumber: Han (2015)



Gambar 2.38 Metode Konstruksi Untuk Timbunan Pada Tanah Lunak
Sumber: Souza dan Marques (2013)

3. Pengaruh lingkungan

Kendala lingkungan mungkin termasuk getaran terbatas, kebisingan, lalu lintas, polusi air, deformasi struktur yang ada, serta kerusakan. Misalnya, pemadatan dinamis menginduksi getaran dan kebisingan, yang mungkin tidak cocok di area perumahan. Metode basah untuk membangun kolom batu dengan pengaliran air menghasilkan masalah di lokasi, yang mungkin merepotkan untuk situs dengan ruang terbatas. Dalam kondisi seperti itu, metode kering dapat digunakan sebagai gantinya.

4. Kondisi konstruksi

Pemilihan metode perbaikan tanah harus mempertimbangkan kondisi lokasi, waktu konstruksi yang diizinkan, ketersediaan bahan konstruksi, ketersediaan peralatan konstruksi dan kontraktor yang memenuhi syarat, dan biaya konstruksi. Pemilihan metode perbaikan tanah harus mempertimbangkan apakah lokasi tersebut dapat diakses oleh peralatan konstruksi terkait, seperti jalan akses. Sebagian besar metode perbaikan tanah menggunakan bahan tertentu selama konstruksi. Misalnya, kolom batu pada daerah tebing atau pegunungan akan lebih hemat biaya karena material dapat didatangkan langsung dari pengadaan sekitar.

5. Kemampuan dan daya tahan

Kemampuan metode perbaikan tanah tergantung pada beberapa faktor, seperti tingkat pendirian, variabilitas kondisi geoteknik dan struktural, variabilitas bahan konstruksi, kualitas kontraktor, kualitas pemasangan, serta kontrol dan jaminan kualitas. Beberapa peneliti telah melaporkan bahwa sampel dari kolom campuran dalam memiliki variabilitas yang tinggi dalam hal kekuatan tekan yang tidak terbatas. Proses instalasi otomatis atau yang dikendalikan komputer dapat mengurangi variabilitas geomaterial yang ditingkatkan. Jumlah riwayat kasus keberhasilan atau kegagalan yang terdokumentasi dengan baik juga merupakan bukti keandalan metode perbaikan tanah tertentu.

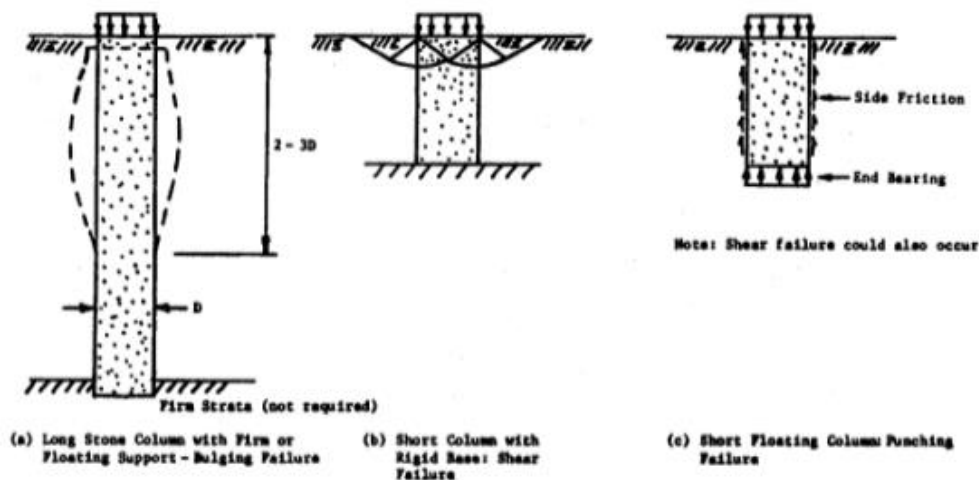
2.2.15 Metode Perbaikan Tanah dengan *Stone Column*

2.2.15.1 Deskripsi *Stone Column*

Metode perkuatan timbunan dengan *stone column* merupakan salah satu metode yang cocok untuk tamah sangat lunak. Metode tersebut membentuk kolom-kolom pada tanah dasar secara vertikal yang nantinya akan diisi oleh batu kecil atau kerikil. Batuan yang digunakan umumnya adalah batuan lepas dan tidak diikat oleh bahan pengikat contohnya seperti semen atau bahan lainnya. Pembuatan lubang untuk membentuk kolom-kolom tersebut dilakukan dengan menggunakan alat seperti tiang atau disebut sebagai *vibroplot* hingga kedalaman dengan sesuai perencanaan yang diinginkan dan menyibak tanah yang ada di sekeliling untuk membentuk lubang. Pemadatan yang disebabkan oleh pengisian material pada kolom dapat mempercepat penurunan hingga 70% pada kondisi tanah tertentu (Barksdale dan Bachus, 1983).

Pada metode *stone column* direncanakan sebagai *end bearing* dimana ujung bawah pada *stone column* mencapai tanah keras yang berada dibawah lapisan tanah lunak atau sebagai *floating column* dengan ujung bawah *stone column* tertanam dilapisan tanah lunak. Akibat dari adanya beban tersebut *stone column* mengalami keruntuhan dengan tipe yang berbeda-beda. Tipe keruntuhan sebagai berikut.

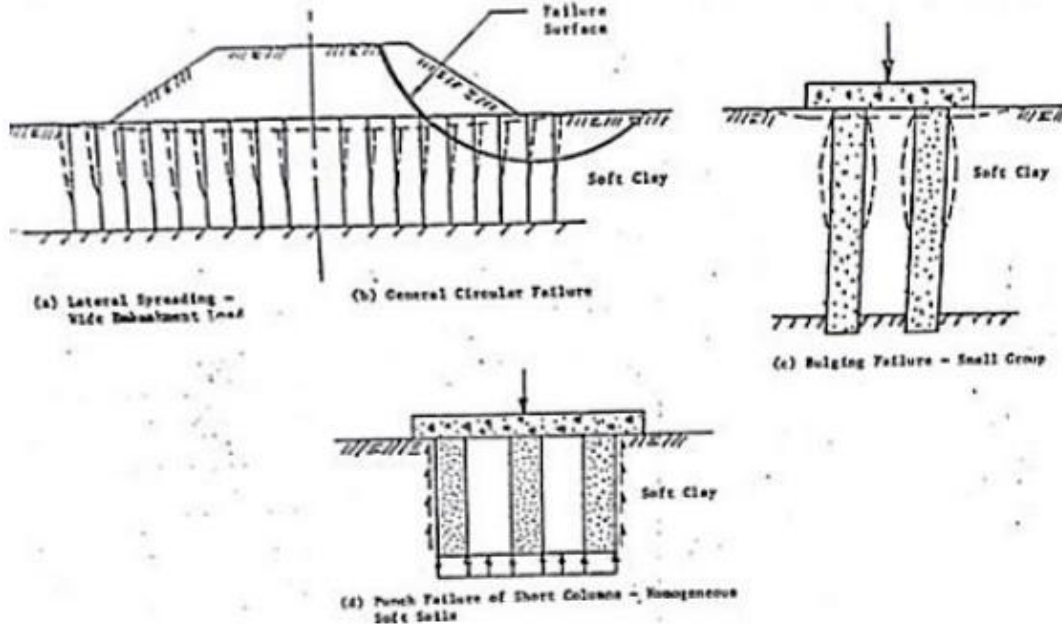
1. Keruntuhan bulging adalah keruntuhan *stone column* yang disebabkan oleh bergesernya material *stone column* secara horizontal akibat adanya beban vertikal. Bulging akan terjadi sepanjang 2 hingga 3 kali diameter pada tiang dekat permukaan.
2. Keruntuhan geser dangkal terjadi pada *stone column* pendek dimana $L/D < 3$ untuk kondisi *end bearing*. Keruntuhan ini sama seperti keruntuhan pada fondasi dangkal.
3. Keruntuhan geser dasar dan selimut, keruntuhan ini terjadi pada *floating stone column* dimana $L < 2 - 3D$.



Gambar 2.39 Tipe Keruntuhan *Stone Column*

Sumber: Barksdale dan Bachun (1983)

Dari ketiga tipe keruntuhan yang telah disebutkan diatas adalah tipe keruntuhan untuk *stone column* tunggal sedangkan untuk *stone column* tipe grup yang berada dibawah timbunan adalah *spreading*. *Spreading* akan berakibat pada bertambahnya pemampatan, serta berkurangnya ikatan antara *stone column* dengan tanah sekelilingnya.



Gambar 2.40 Tipe Keruntuhan *Stone Column* Grup
Sumber: Barksdale dan Bachun (1983)

2.2.15.2 Tipe dan Pola Pemasangan *Stone Column*

Pemasangan *stone column* dilakukan dengan metode *fixed type*, yaitu pemasangan kolom batuan hingga mencapai lapisan tanah keras (*bearing layer*). Pola pemasangan yang digunakan adalah pola segitiga sama sisi, di mana diameter ekuivalen area pengaruh *stone column* (D_c) dihitung sebesar 1,05 kali jarak spasi antar kolom. Volume tanah yang tergantikan oleh kolom batu sangat berpengaruh terhadap efektivitas perkuatan, karena berperan dalam meningkatkan kapasitas dukung dan mengurangi deformasi. Besarnya volume penggantian tanah dinyatakan dalam bentuk rasio area penggantian (a_s), dengan perumusan sebagai berikut.

$$a_s = \frac{A_s}{A} \quad (2.64)$$

$$a_c = \frac{A - A_s}{A} \quad (2.65)$$

Dimana:

A_s = luas *stone column*

A = luas *total unit cell*

Untuk pola pemasangan segitiga sama sisi, nilai

$$A_s = 0,907 \left(\frac{D}{s} \right)^2 \quad (2.66)$$

$$A_c = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad \text{atau} \quad A = \frac{1}{4} \pi D e^2 \quad (2.67)$$

Dimana:

D_e = diameter ekuivalen

D = diameter *stone column*

$$q_u = 40. N. Ap + (Nav. As)/5 \quad (2.69)$$

$$q_{izin} = q_u/SF \quad (2.70)$$

Dimana:

q_u = daya dukung ultimit (t/m^2)

q_p = daya dukung ujung kolom (t/m^2)

q_s = daya dukung selimut (t/m^2)

q_{izin} = daya dukung izin (t/m^2)

N = nilai SPT pada ujung kolom

Ap = luas ujung kolom (m^2)

As = luas selimut kolom (m^2)

Nav = nilai SPT rata-rata sepanjang kolom

B. Daya Dukung *Stone Column* Tunggal Berdasarkan Tegangan Horizontal

Stone column dengan panjang sekitar 4 hingga 6 kali diameternya rentan mengalami keruntuhan *bulging*, yaitu deformasi lateral yang terjadi akibat tekanan vertikal, umumnya sepanjang 2 hingga 3 kali diameter dari permukaan tanah. Pada kondisi ini, material granular dari *stone column* terdorong masuk ke dalam tanah lunak di sekitarnya. Daya dukung *stone column* tunggal umumnya dihitung berdasarkan teori *Cavity Expansion*, yang disederhanakan dengan asumsi bahwa *bulging* tidak terbatas hanya pada bagian atas, tetapi terjadi sepanjang kolom. Oleh karena itu, analisis menggunakan pendekatan pengembangan lubang silinder secara aksial (*cylindrical cavity expansion*), dengan mengasumsikan bahwa tekanan pasif tanah lunak sekitar akan mengimbangi tekanan lateral dari kolom.

Adanya *bulging* pada sepanjang *stone column* menyebabkan terjadinya tegangan perlawanan pasif yang dirumuskan sebagai berikut (Huges dan Withers, 1974):

$$\sigma_3 = \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln e \frac{E_s}{2c(1 + \mu)} \right] + \sigma_{h.geo} \quad (2.71)$$

Dimana:

σ_3 = tegangan perlawanan dari tanah lunak

σ_{ro} = tegangan horizontal total

E_s = modulus elastisitas tanah

c = kekuatan geser *undrained*

μ = angka *poisson* (*poisson's ratio*)

Tegangan vertikal ultimit (σ_1) yang dapat didukung oleh *stone column* adalah tegangan horizontal (σ_3) dikalikan dengan koefisien tekanan tanah pasif (Kp). Nilai Kp adalah sebagai berikut.

$$Kp = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \quad (2.72)$$

Dimana:

ϕ_c = sudut geser tanah pada *stone column*

Substitusi persamaan 2.55, maka tegangan vertikal maksimum yang dapat didukung oleh *stone column* tunggal adalah sebagai berikut.

$$q_{ult} = \left\{ \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln e \frac{E}{2c(1 + \mu)} \right] \right\} \left(\frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \right) \quad (2.73)$$

$$q_{izin} = q_u/SF \quad (2.74)$$

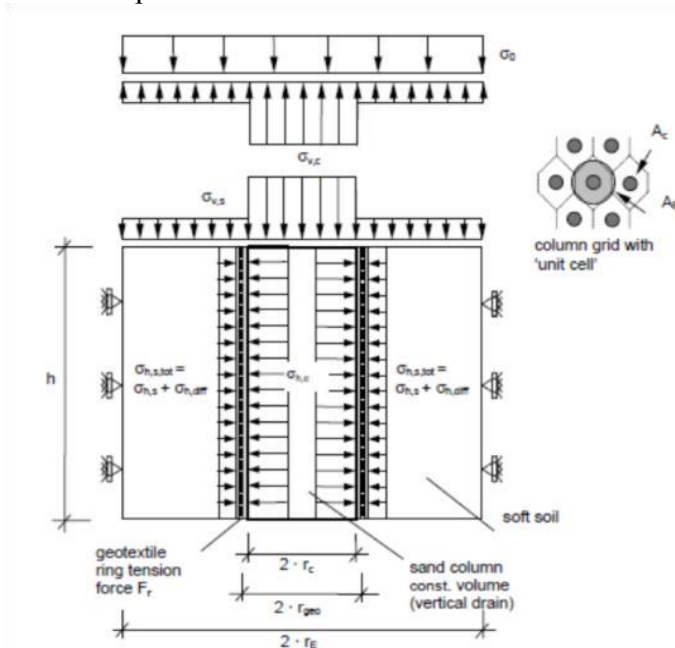
2.2.16 Geotextile-Encased Stone Column (GESC)

Kolom batu telah digunakan selama tiga dekade terakhir sebagai metode perbaikan tanah yang ekonomis, terutama untuk mendukung beban struktur seperti timbunan dan area penyimpanan berukuran besar. Kinerja kekuatan dan kekakuannya sangat dipengaruhi oleh tekanan lateral yang diberikan oleh tanah di sekitarnya (Zhang et al., 2013). Pada tanah sangat lunak dengan nilai kuat geser undrained yang rendah, penerapan kolom batu konvensional menjadi kurang efektif karena tidak tercapainya batas tegangan efektif tanah.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, digunakan pembungkus geotekstil pada kolom batu yang dikenal sebagai *Geotextile-Encased Stone Column* (GESC). Teknologi ini telah terbukti berhasil diterapkan dalam bidang geoteknik (Rajagopal, 2010). Geotekstil berperan penting dalam meningkatkan kekakuan kolom, mencegah terjadinya kehilangan material ke tanah lunak, serta menjaga fungsi drainase dan sifat gesekan agregat (Raithel et al., 2002; Murugesan & Rajagopal, 2006, 2010; Wu & Hong, 2009; Deb et al., 2011).

Walau telah banyak studi numerik dan eksperimental dilakukan, pendekatan analitis untuk desain GESC masih terbatas. Raithel dan Kempfert (2000) mengembangkan model numerik dan analitis dengan asumsi deformasi lateral seragam dan tekanan tanah saat istirahat. Namun, penelitian selanjutnya (Lee et al., 2007; Khabbazian et al., 2009; Murugesan & Rajagopal, 2010) menunjukkan bahwa di bawah beban vertikal, kolom mengalami deformasi aksial yang disertai penggelembungan lateral, terutama di bagian atas, sehingga asumsi deformasi seragam menjadi tidak relevan.

Untuk mengatasi hal ini, beberapa studi seperti Castro dan Sagaseta (2011) dan Pulko et al. (2011) mengembangkan solusi analitis berdasarkan pendekatan sel-unit, dengan mengasumsikan tanah sebagai elastis dan kolom sebagai elastis-plastik menurut kriteria Mohr-Coulomb. Meski demikian, tegangan geser antara kolom dan tanah belum diperhitungkan secara menyeluruh. Khabbazian et al. (2009, 2010) kemudian menggunakan model elemen hingga tiga dimensi untuk mempelajari perilaku interaksi geser antara geotekstil dengan kolom maupun tanah lunak.



Gambar 2.43 Model Perhitungan Dari *Geotextile-Encased Stone Column*

Sumber: Whiley (2015)

2.2.16.1 Analisis Tegangan

Kolom batu selalu disusun dalam formasi kerangka spasi bar biasa didalam prakteknya. Untuk menyederhanakan analisis, satu kolom dalam tanah sekitarnya dapat dianggap setara dengan *cell unit* silinder ditunjukkan pada Gambar 2.39. Diameter ekuivalen (D_e) dari zona yang dipengaruhi silinder adalah sebagai berikut.

$$D_e = 1,05S \text{ (Untuk Pola Segitiga)} \quad (2.75)$$

$$D_e = 1,13S \text{ (Untuk Pola Segiempat)} \quad (2.76)$$

Dimana:

S = pusat ke pusat jarak antar kolom

Selain konsep *cell unit*, beberapa asumsi berikut dibuat untuk menyederhanakan masalah dan untuk mendapatkan solusi analitis sebagai berikut.

1. Bahan *Geotextile* yang berperilaku sebagai bahan elastis dengan modulus kekakuan yang tetap.
2. Tegangan awal dalam perkuatan *Geotextile* yang disebabkan oleh instalasi kolom diasumsikan konstan sepanjang keseluruhan panjang kolom.
3. Tegangan geser antara kolom dan *Geotextile* dan antara *Geotextile* dan tanah di keliling arah diabaikan.
4. Dukungan lateral dari tanah ke kolom diinduksi terutama oleh tekanan tanah lateral dalam tanah (Raithel dan Kempfert 2000).
5. Kolom batu diasumsikan untuk beristirahat pada strata keras dan kemudian penyelesaian lapisan bantalan diabaikan.

Pada setiap waktu, tegangan yang terjadi di atas tanah terbagi antara kolom dan tanah sebagai berikut.

$$\mu A_e = \mu_c A_c + \mu_s (A_e - A_c) \quad (2.77)$$

Dimana:

μ = total tegangan yang terjadi

μ_c dan μ_s = tegangan yang diakibatkan oleh kolom dan tanah

A_c = luasan dari *unit cell* silinder (πr_e^2)

A_e = luasan melintang dari kolom (πr_e^2)

Rasio luas kolom A_c atas seluruh luasan yang setara dengan satuan silinder *unit cell* A_e mewakili luasan rasio pengganti untuk *stone column* dan luasan *ratio* pengganti pada tanah sekitarnya.

$$a_c = \frac{A_c}{A_e} \quad (2.78)$$

$$a_s = 1 - a_c \quad (2.79)$$

Pada saat beban *embankment* bekerja pada tanah yang diperbaiki dengan *stone column*, konsentrasi tegangan yang lebih besar terjadi pada *stone column* dan pengurangan tegangan terjadi pada tanah di sekitarnya. Faktor konsentrasi tegangan (n) adalah perbandingan tegangan antara *stone column* dan tanah di sekitarnya.

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \quad (2.80)$$

Jika rasio konsentrasi tegangan (SCR) n didefinisikan sebagai rasio tegangan vertikal di bagian atas kolom dengan bagian atas tanah, maka:

$$\mu_c = \frac{n}{1 + (n - 1)a_c} \quad (2.81)$$

$$\mu_s = \frac{1}{1 + (n - 1)a_s} \quad (2.82)$$

2.2.16.2 Tekanan Lateral Kolom dan Tanah

Mengingat keseimbangan antara beban $\Delta\sigma_0$ dan tekanan vertikal yang sesuai pada kolom $\sigma_{v,c}$ dan tanah lunak $\sigma_{v,s}$ dapat ditulis sebagai berikut.

$$\Delta\sigma_0 \cdot A_E = \Delta\sigma_{v,c} \cdot A_c + \Delta\sigma_{v,s} \cdot (A_E - A_c) \quad (2.83)$$

Tegangan vertikal karena beban *surchage* dan berat volume tanah yang berbeda menghasilkan tekanan horizontal. $\sigma_{v,o,c}$ dan $\sigma_{v,o,s}$ adalah tegangan vertikal awal pada kolom dan tanah (jika metode *displacement* digunakan $K_{0,s}$ * harus digantikan oleh $K_{0,s}$):

$$\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,o,c} \cdot K_{a,c} \quad (2.84)$$

$$\sigma_{h,s} = \Delta\sigma_{v,s} \cdot K_{0,s} + \sigma_{v,o,s} \cdot K_{0,s}^* \quad (2.85)$$

Untuk koefisien tekanan tanah aktif kolom menggunakan rumus empiris, yaitu:

$$K_{a,c} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.86)$$

Untuk tanah lempung, ($K_{0,s}$) koefisien tekanan *at rest* menggunakan rumus dari Broker dan Ireland sebagai berikut.

$$K_{0,s} = 1 - \sin\phi_s \quad (\text{Replacement Method}) \quad (2.87)$$

$$K_{0,s} = (1 - \sin\phi_s)OCR^{0.5} \quad (\text{Displacement Method}) \quad (2.88)$$

2.2.16.3 Lapisan Pembungkus dari Geotextile

Seperti disebutkan sebelumnya, deformasi vertikal kolom batu selalu disertai dengan penggelembungan (*expansion*) lateral pada bagian atas kolom di bawah beban vertikal. penggelembungan (*expansion*) lateral ini menyebabkan pembungkus dari *Geotextile* meregang dan mengembangkan tegangan tarik melingkar untuk memberikan tambahan tegangan batas untuk kolom. *Geotextile coating* (radius r_{geo}) memiliki perilaku material-linear elastis dengan J sebagai kuat tariknya. Penambahan radius kolom (Δr_c) akibat deformasi adalah sebagai berikut.

$$\Delta r_c = \frac{\sigma_{rc} - \sigma_{rs} + \frac{(r_g - r_c)J}{r_g^2}}{\frac{a_s E^*}{(1 - a_s)r_c} + \frac{J}{r_g^2}} \quad (2.89)$$

$$E^* = \left(\frac{1}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \frac{1}{a_s} \right) E_i \quad (2.90)$$

Dengan asumsi mengabaikan tegangan geser antara kolom dan *Geotextile* serta antara *Geotextile* dan tanah dalam arah melingkar. Tegangan horizontal $\sigma_{h,geo}$ yang ditentukan oleh *Geotextile* adalah sebagai berikut.

$$\sigma_{h.geo} = \frac{\Delta r_c - (r_g - r_c)}{r_{geo}^2} \quad (2.91)$$

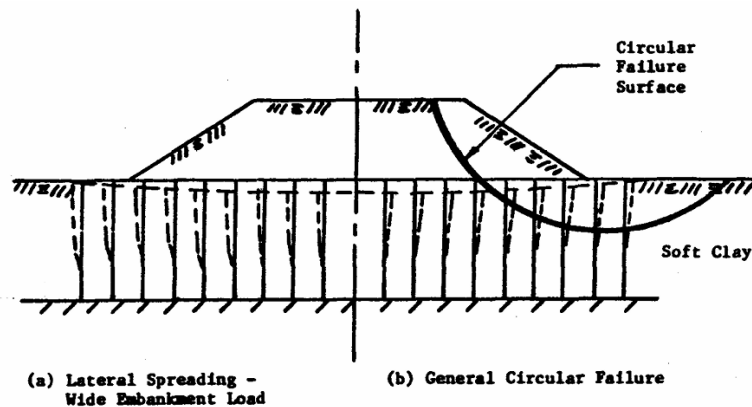
2.2.16.4 Keseimbangan Tegangan Horizontal

Untuk kolom batu terbungkus yang tertanam dalam tanah lunak, tegangan batas yang bekerja pada kolom (σ_{hs}) berasal dari dua pendekatan, yaitu tegangan batas lateral yang disediakan oleh tanah sekitarnya (σ_{hs}) dan tambahan tegangan batas yang disediakan oleh *Geotextile* ($\sigma_{h.geo}$). Dengan kondisi ini perbedaan tegangan horizontal ($\sigma_{h.diff}$) dapat ditentukan, yaitu:

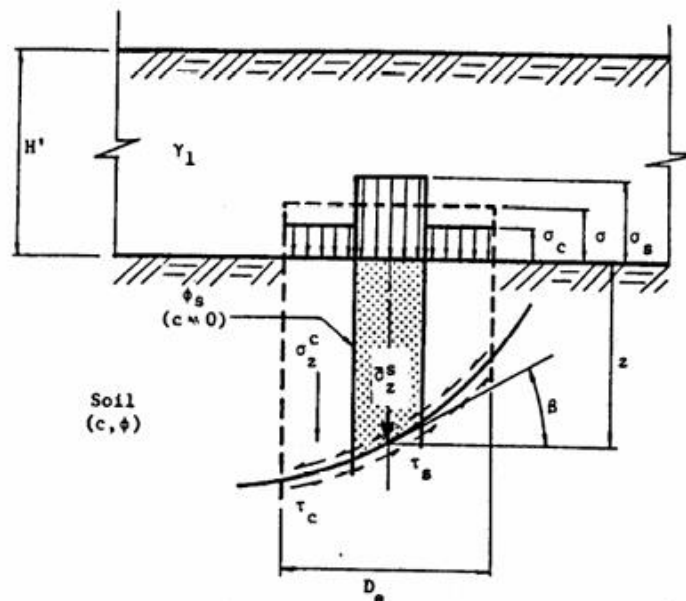
$$\sigma_{h.diff} = \sigma_{h,c} - (\sigma_{h,s} + \sigma_{h.geo}) \quad (2.92)$$

2.2.16.5 GESC Sebagai Stabilitas Timbunan

Analisis stabilitas timbunan (*embankment*) yang diperkuat dengan *stone column* (kolom batu) pada tanah lunak dapat dihitung dengan dengan garis-garis lengkung yang menunjukkan kemungkinan bidang longsor melingkar (*circular slip surface*) seperti pada Gambar



Gambar 2.44 Bidang Longsor Melingkar Timbunan
Sumber: Federal Highway Administration (1983)



Gambar 2.45 Ilustrasi Parameter Stabilitas
Sumber: Federal Highway Administration (1983)

Untuk mencari kestabilan timbunan diperlukan dahulu besaran tegangan efektif dalam *stone column* yang bekerja pada longsor (σ_zs) yang dapat dihitung dengan Persamaan 2.93.

$$\sigma_zc = \sigma_c + \gamma_c \times z \quad (2.93)$$

$$\sigma_c = \gamma_{timb} \times zc \quad (2.94)$$

Dimana:

σ_zc = tegangan efektif dalam *stone column* yang bekerja pada longsor (t/m^2)

σ_c = tegangan yang diterima kolom (t/m^2)

γ_c = berat volume efektif *stone column* (t/m^3)

z = panjang *stone column* yang terpotong bidang longsor (m)

zc = tinggi timbunan di atas *stone column* (m)

Setelah itu, dicari nilai kuat geser pada *stone column* dengan Persamaan 2.95.

$$\tau_c = \sigma N_c \times tg\phi_c + c \quad (2.95)$$

$$\sigma N_c = \sigma_zc \times \cos^2\beta \quad (2.96)$$

Dimana:

τ_c = kuat geser pada *stone column* (t/m^2)

σN_c = tegangan normal efektif pada bidang miring (t/m^2)

ϕ_c = sudut geser dalam *stone column* ($^\circ$)

c = kohesi (t/m^2)

β = sudut antara garis singgung bidang longsor dengan bidang horizontal ($^\circ$)

Setelah harga σ_zc pada bidang gelincir untuk setiap *stone column* dihitung, besar gaya geser (P_c) maksimum akibat *stone column* pada bidang gelincir akan didapatkan dengan menggunakan Persamaan 2.97.

$$P_c = \tau_c \times \frac{A}{\cos\beta} \quad (2.97)$$

Dimana:

P_c = gaya geser maksimum akibat *stone column* (ton)

A = luas penampang melintang *stone column* (m^2)

Dari besar gaya geser maksimum akan bisa didapatkan tambahan momen penahan (ΔM_R) akibat adanya *stone column* dengan Persamaan 2.98.

$$\Delta M_R = \sum_1^n (P_c) \times R \quad (2.98)$$

Dimana:

n = banyak *stone column* yang terpotong oleh bidang longsor

R = jari-jari kelongsoran

ΔM_R = tambahan momen penahan (ton.m)

Setelah diketahui nilai tambahan momen penahan dapat dicari angka keamanan terhadap kelongsoran (SF)

$$SF = \frac{\sum M_R}{M_D} \quad (2.99)$$

Dimana:

SF = angka keamanan terhadap kelongsoran

M_D = momen dorong (ton.m)

$\sum M_R$ = momen penahan setelah adanya *stone column* ($\Delta M_R + M_R$) (ton.m)

2.2.17 Jadwal Pelaksanaan

Penjadwalan merupakan proses pengalokasian waktu secara sistematis untuk setiap bagian pekerjaan dalam proyek, guna memastikan penyelesaian yang optimal dengan memperhatikan berbagai keterbatasan (Latif, 2001). Jadwal sendiri merupakan turunan dari perencanaan proyek, yang menguraikan urutan pelaksanaan kegiatan secara logis untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Agar perencanaan jadwal proyek menjadi realistis dan efektif, maka penyusunannya harus dilakukan secara bertahap melalui langkah-langkah berikut:

1. Menganalisis berbagai jenis aktivitas pada proyek.
2. Menghitung durasi setiap aktivitas sesuai dengan produktivitas dari sumber daya yang ada.
3. Menetapkan ketergantungan logis antar aktivitas serta urutan pelaksanaannya, kemudian melakukan evaluasi terhadap kelayakan durasi dan urutan tersebut agar sesuai dengan kondisi aktual di lapangan.

2.2.18 Settle3D

Settle3D merupakan perangkat lunak berbasis tiga dimensi yang dikembangkan oleh Rocscience untuk menganalisis penurunan dan konsolidasi vertikal akibat beban permukaan, fondasi, maupun tanggul. Program ini menggabungkan pendekatan analisis satu dimensi dengan visualisasi dan fleksibilitas pemodelan tiga dimensi. Settle3D mampu memodelkan profil tanah kompleks serta beban dalam bentuk melingkar, persegi panjang, maupun poligon, baik seragam maupun bervariasi. Beban dapat diaplikasikan secara bertahap, pada berbagai kedalaman (termasuk untuk simulasi tiang atau rakit), serta pada kondisi penggalian.

2.2.19 GeoStudio Slope/w

Program Geostudio merupakan paket perangkat lunak terintegrasi untuk analisis geoteknik dan geo-lingkungan yang dikembangkan oleh Geo-Slope International. Paket ini mencakup beberapa modul, antara lain: Slope/w, Seep/w, Sigma/w, Quake/w, Temp/w, dan Citran/w, yang dapat saling berinteraksi untuk melakukan analisis terpadu berbagai permasalahan teknik tanah dan lingkungan geoteknikal, seperti stabilitas lereng, aliran air tanah, konsolidasi, deformasi tanah, serta perpindahan panas dan kontaminan. Slope/W adalah modul yang digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng dengan menghitung faktor keamanan (FS) terhadap kelongsoran. Metode yang digunakan mencakup berbagai pendekatan kesetimbangan batas, seperti metode Bishop, Janbu, Morgenstern-Price, Spencer, dan lainnya.

2.2.20 Microsoft Project

Microsoft Project perangkat lunak manajemen proyek yang dikembangkan oleh Microsoft, digunakan untuk merencanakan, menjadwalkan, mengelola sumber daya, serta memantau pelaksanaan proyek secara efektif. Aplikasi ini memungkinkan pengguna untuk membuat diagram Gantt, menetapkan hubungan antar aktivitas, mendefinisikan durasi, serta mengatur dan mengontrol pelaksanaan proyek berdasarkan baseline dan realisasi. Dalam perencanaan dan penjadwalan menggunakan Microsoft Project, terdapat beberapa istilah kunci, antara lain:

1. *Task* merupakan formula lembar kerja pada Microsoft Project berisi informasi yang rinci tentang item pekerjaan proyek.
2. *Duration* adalah waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan Proyek
3. *Start* adalah tanggal dimulainya pekerjaan.
4. *Finish* adalah waktu penyelesaian pekerjaan yang dilakukan secara otomatis, dihitung dari tanggal mulai ditambah dengan durasi pelaksanaan pekerjaan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Bahan dan Peralatan yang Digunakan

3.1.1 Bahan

1. Data

Berikut merupakan data yang dibutuhkan dalam Proyek Akhir ini.

Tabel 3.1 Data yang Dibutuhkan

No	Data	Keterangan	Fungsi	Sumber
1	Data Investigasi Tanah Dasar	Hasil uji lapangan dan laboratorium tanah pada Segmen 1 sampai Segmen 11	Untuk perencanaan perkuatan tanah dasar	Dokumen <i>Soil Investigation Eastport Breakwater Works</i> (EBW)
2	Data Gelombang	Tinggi dan periode gelombang rencana Arah dominan	Untuk perencanaan struktur <i>breakwater</i>	<i>Employer Requirements</i> EBW
3	Data Batimetri	Koordinat XYZ pada <i>seabed</i> di Segmen 1 sampai 11 berasal dari data survei batimetri dan analisis lokasi yang berada di luar deformasi segmen berasal dari satelit gelombang	Untuk penentuan <i>seabed</i> dan analisis	Dokumen Survey Batimetri EBW https://tanahair.indonesia.go.id
4	Data Pasang Surut	Elevasi HHWL, MHWL, MSL, MLWL, dan LLWL	Penentuan muka air laut rencana	<i>Hydraulic Studies Report</i> Lamongan Shorebase

2. Dokumen Studi Literatur

- Artikel dan jurnal penelitian terkait topik yang diambil.
- Buku-buku yang relevan dengan topik yang diambil.

3.1.2 Alat

1. Perangkat Keras

Laptop atau komputer yang memadai untuk menjalankan seluruh perangkat lunak yang dibutuhkan.

2. Perangkat Lunak

- *Software* GeoStudio untuk pemodelan stabilitas struktur *breakwater*.
- *Software* Settle3D untuk pemodelan *settlement* pada pekerjaan perkuatan tanah dasar.
- *Software* Microsoft Project untuk penyusunan waktu pelaksanaan proyek.
- *Software* Google Earth Pro untuk mengetahui kondisi lapangan melalui satelit.
- *Software* ArcMap dan Global Mapper untuk melihat, mengedit, membuat, dan menganalisis data geospasial.
- *Software* AutoCad untuk membuat dan menggambar desain struktur.

3.2 Urutan Pelaksanaan Proyek Akhir

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur adalah proses pengumpulan beberapa referensi yang berkaitan dengan topik pembahasan. Referensi tersebut dapat diperoleh dari literatur, jurnal, dan buku yang akan dijadikan sebagai acuan dalam melakukan perencanaan. Konsep dan teori yang dipelajari

dari referensi tersebut antara lain mengenai pantai, perencanaan *breakwater*, karakteristik dan parameter tanah, jenis-jenis metode perbaikan tanah, dan perencanaan konstruksi perbaikan tanah.

3.2.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan proses yang digunakan untuk mengumpulkan beberapa data yang digunakan dalam perencanaan struktur *breakwater* dan perkuatan tanah dasar. Data tersebut adalah data sekunder yang diperoleh dari instansi terkait. Data yang didapatkan antara lain sebagai berikut.

1. Data Pasang Surut
Data pasang surut meliputi elevasi HHWL, MHWL, MSL, MLWL, dan LLWL.
2. Data Batimetri
Data batimetri meliputi koordinat XYZ pada *seabed* di lokasi Segmen 1 hingga Segmen 11 dan sekitarnya.
3. Data Gelombang
Data gelombang meliputi tinggi dan periode gelombang rencana serta arah dominannya.
4. Data Tanah
Data tanah meliputi seluruh hasil uji sampel tanah pada Segmen 1 hingga 11 di lapangan dan laboratorium.

3.2.3 Pengolahan Data

Dari data yang telah diperoleh, terdapat data yang memerlukan proses pratinjau dan pengolahan sebagai berikut.

1. Analisis Batimetri
Analisis data batimetri diperlukan untuk perhitungan tinggi dan kedalaman gelombang pecah, yang kemudian akan digunakan untuk menghitung dimensi dari struktur *breakwater*. Data survei batimetri pada proyek hanya tersedia pada lokasi *breakwater*, sehingga untuk data di luar lokasi *breakwater* menggunakan data dari DEMNAS. Dengan demikian, perlu dilakukan penggabungan serta integrasi dari kedua data dengan menyamakan sistem koordinat dan elevasi datum.
2. Data Tanah
Analisis data tanah dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan daya dukung tanah pada lokasi dibangunnya struktur *breakwater* yang dapat memengaruhi stabilitasnya. Data yang digunakan berasal dari uji lapangan dan laboratorium pada Proyek EBW. Dari data tersebut kemudian ditentukan nilai parameter tanah setiap lapisan di seluruh segmen.

3.2.4 Perencanaan *Breakwater*

Perencanaan desain *breakwater* berpedoman pada buku yang berjudul Teknik Pantai oleh Triatmodjo (1999). Desain *breakwater* direncanakan dengan mengacu pada beberapa syarat berdasarkan ketentuan *owner* di dokumen *Employer Requirements* of EBW sebagai berikut.

- Tinggi gelombang rencana (H_s) = 2,80 m
- Periode gelombang rencana (T_p) = 8,90 detik
- Arah angin dominan = *Northwest*
- Lebar puncak minimum = 6,0 m
- Eelevasi pasang surut
 - HHWL = +2,190 m
 - MHWL = +1,745 m
 - MSL = +1,000 m
 - MLWL = +0,255 m
 - LLWL = +0,000 m

- *Safety factor*
 - Gempa = 1,0
 - Tanpa Gempa = 1,3

Perencanaan struktur *breakwater* memerlukan analisis komprehensif dari data batimetri, pasang surut, dan gelombang untuk menentukan *layout* serta desain yang optimal. Ketika merencanakan dimensi *toe* atau kaki pelindung dari *breakwater*, perlu diperhatikan pengaruhnya terhadap area *turning circle* atau manuver kapal dari pelabuhan yang dilindungi. Desain yang direncanakan harus dapat menciptakan perlindungan yang efektif tanpa mengganggu operasional kapal.

Selain itu, desain *breakwater* harus memenuhi *safety factor* dari stabilitas struktur terhadap keruntuhan. Analisis stabilitas terhadap keruntuhan dilakukan dengan cara perhitungan konvensional dan simulasi menggunakan *software* GeoStudio. Apabila *safety factor* tidak terpenuhi, maka perlu dilakukan perencanaan ulang struktur *breakwater*.

3.2.5 Perencanaan Perkuatan Tanah Dasar

Pada penelitian ini juga dilakukan perencanaan metode perkuatan tanah dasar untuk meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi *settlement*. Namun, perlu dilakukan analisis kondisi *existing* terlebih dahulu untuk mengetahui permasalahan yang ada pada tanah dasar. Metode perkuatan tanah dasar yang dipilih adalah *Geotextile-Encased Stone Column* (GESC). Analisis akan dilakukan dengan menggunakan metode konvensional, *software* Settle3D serta GeoStudio. Dalam perencanaannya, optimasi dalam desain GESC tetap diperlukan untuk menghindari kerugian finansial yang signifikan. Daya dukung yang dihasilkan dari GESC harus memenuhi *safety factor* sebesar 2,5. Apabila *safety factor* tidak terpenuhi, maka perlu dilakukan perencanaan ulang metode perkuatan tanah dasar.

3.2.6 Penyusunan Waktu Pelaksanaan Proyek

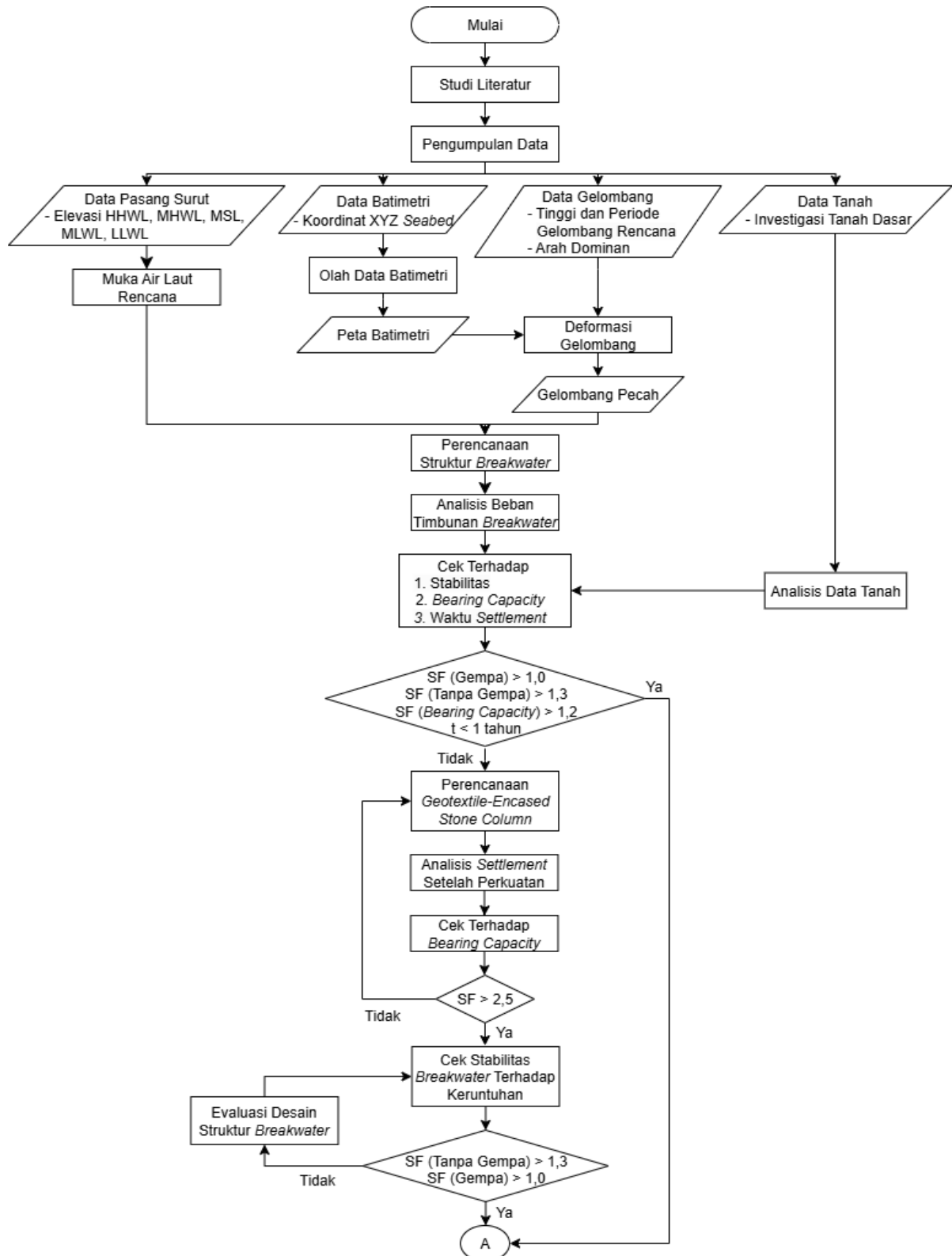
Penyusunan waktu pelaksanaan proyek dilakukan untuk mengetahui efektivitas pemilihan desain struktur *breakwater* dan metode perkuatan tanah dasar terhadap waktu pelaksanaan proyek. Penyusunan dapat dilakukan dengan menyusun metode pelaksanaan, memperhitungkan volume pekerjaan, produktivitas alat berat, dan durasi pekerjaan. Waktu pelaksanaan proyek disusun dengan bantuan *software* Microsoft Project. Apabila pelaksanaan proyek selesai tepat waktu pada bulan Februari tahun 2026, maka hasil perencanaan dapat diterima. Namun, apabila proyek tidak dapat selesai pada waktu tersebut, maka perlu dilakukan percepatan dengan mengubah spesifikasi alat berat atau menambah jumlah alat berat serta jam kerja hingga pelaksanaan proyek selesai tepat waktu.

3.2.7 Kesimpulan dan Saran

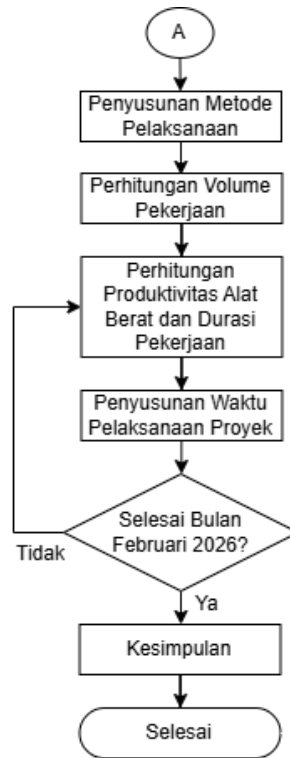
Penyimpulan hasil perencanaan yang telah dilakukan dan saran dalam Proyek Akhir.

3.3 Bagan Alir

Gambar 3.1 merupakan diagram alir dari pelaksanaan, pengerjaan, dan penyelesaian Proyek Akhir ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian (1)



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (2)

Halaman ini sengaja dikosongkan

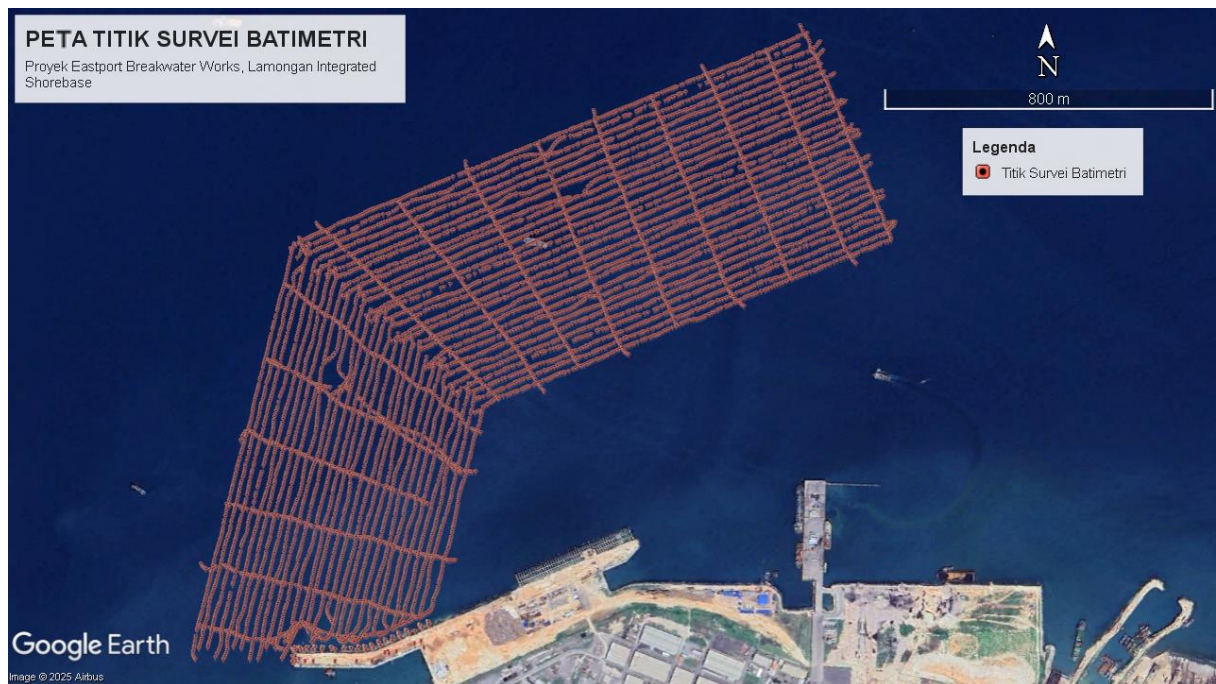
BAB 4 PENGOLAHAN DATA

Dalam Proyek Akhir ini, terdapat beberapa data sekunder yang dibutuhkan dalam analisis perencanaan. Data sekunder seperti pasang surut, tinggi gelombang, sudut datang gelombang, periode gelombang, dan spesifikasi material dapat digunakan secara langsung dalam analisis tanpa diolah terlebih dahulu. Namun, terdapat data yang memerlukan proses pratinjau dan pengolahan seperti data batimetri serta data tanah. Berikut merupakan pengolahan dan proses pratinjau dari kedua data tersebut.

4.1 Data Batimetri

Analisis data batimetri dalam Proyek akhir ini bertujuan untuk menghasilkan model topografi dasar laut pada area yang akan dianalisis. Data survei batimetri pada Proyek EBW hanya terbatas pada lokasi rencana *breakwater*. Data batimetri di luar lokasi *breakwater* yang diperlukan untuk menganalisis gelombang laut dapat diperoleh dari *Digital Elevation Model Nasional* (DEMNAS). Oleh karena itu, perlu dilakukan penggabungan data batimetri yang diperoleh dari data survei Proyek EBW dan DEMNAS.

Pada data proyek, sistem proyeksi koordinat yang digunakan adalah UTM (Universal Transverse Mercator) WGS 84 dengan koordinat $X=656709,762$ dan $Y=9240811,238$ pada *existing benchmark*, sedangkan elevasi *existing benchmark* adalah $+7,143$ m diukur dari *chart datum* yang ada di Lamongan *Integrated Shorebase*. Pengambilan data batimetri dilakukan setiap 0 sampai 1 m dengan total 13.134 titik sepanjang lokasi *breakwater*. Pada data DEMNAS, sistem proyeksi koordinat yang digunakan sama dengan data proyek, yaitu WGS 84 untuk koordinat X dan Y, sedangkan datum elevasi yang digunakan menggunakan *Earth Gravitational Model 2008*. Pengambilan data batimetri dilakukan setiap 500 m dengan total 42.714 titik sejauh radius 100 km dari lokasi *breakwater*. Dengan datum elevasi yang berbeda, perlu dilakukan kalibrasi datum pada kedua data tersebut.

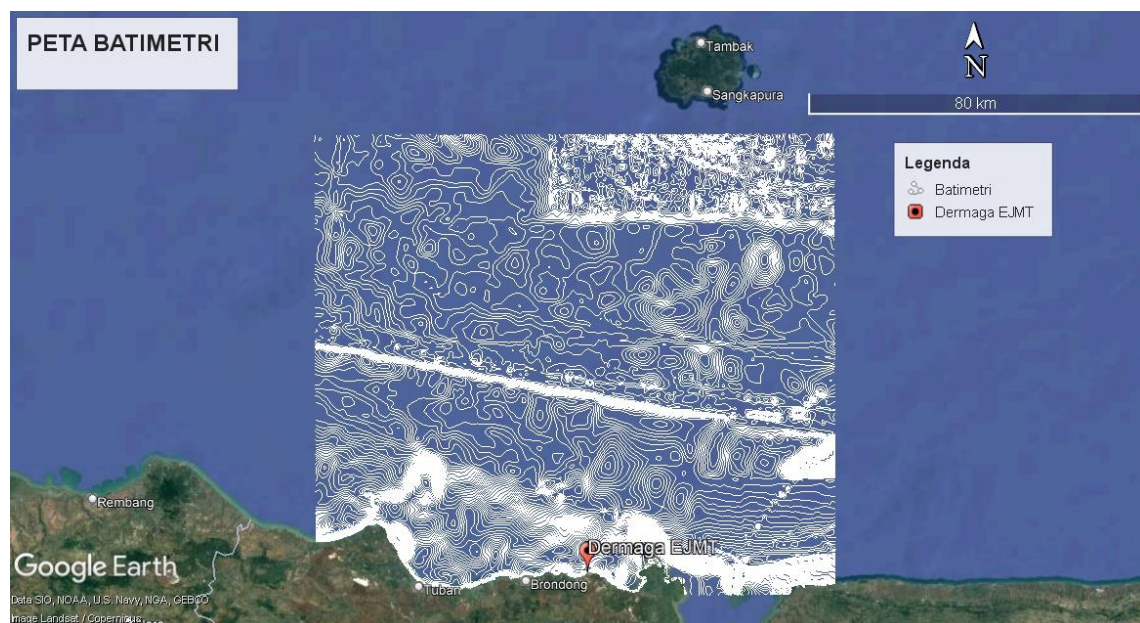


Gambar 4.1 Peta Sebaran Titik Batimetri Proyek EBW



Gambar 4.2 Peta Sebaran Titik Batimetri DEMNAS

Gambar 4.1 merupakan sebaran titik batimetri dari data Proyek EBW sepanjang lokasi *breakwater*, sedangkan Gambar 4.2 adalah sebaran data yang diperoleh dari DEMNAS. Datum elevasi yang dipilih sebagai pedoman adalah datum elevasi dari *benchmark* Lamongan *Integrated Shorebase* karena seluruh data termasuk pasang surut dan *borehole* menggunakan datum tersebut. Koreksi elevasi dilakukan dengan membandingkan elevasi titik *benchmark* yang dipakai pada proyek dengan elevasi DEMNAS di lokasi yang sama dengan *benchmark*. Berdasarkan analisis spasial, elevasi pada titik *benchmark* di DEMNAS adalah +6,143 m. Maka, perbedaan elevasi antara elevasi *existing benchmark* dan elevasi pada DEMNAS adalah 1 m, sehingga seluruh data elevasi pada DEMNAS perlu ditambah 1 m. Setelah dilakukan koreksi, penggabungan antara data batimetri proyek dan DEMNAS dapat dilakukan. Hasil analisis data batimetri dari penggabungan kedua data dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Peta Batimetri

4.2 Data Tanah

Dalam proses pekerjaan perbaikan tanah di Proyek EBW, telah dilakukan investigasi tanah pada 11 segmen dan masing-masing segmen memiliki satu *borehole* yang digunakan untuk pengujian. Titik *borehole* pada investigasi tanah Proyek EBW dapat dilihat pada Gambar 4.3 Beberapa pengujian yang dilakukan pada setiap sampel antara lain sebagai berikut.

1. Tes Laboratorium
2. *Vane Shear Test*
3. *Piezocene Penetration Test* (CPTu)
4. *Standars Penetration Test* (SPT)



Gambar 4.4 Peta Sebaran *Borehole*

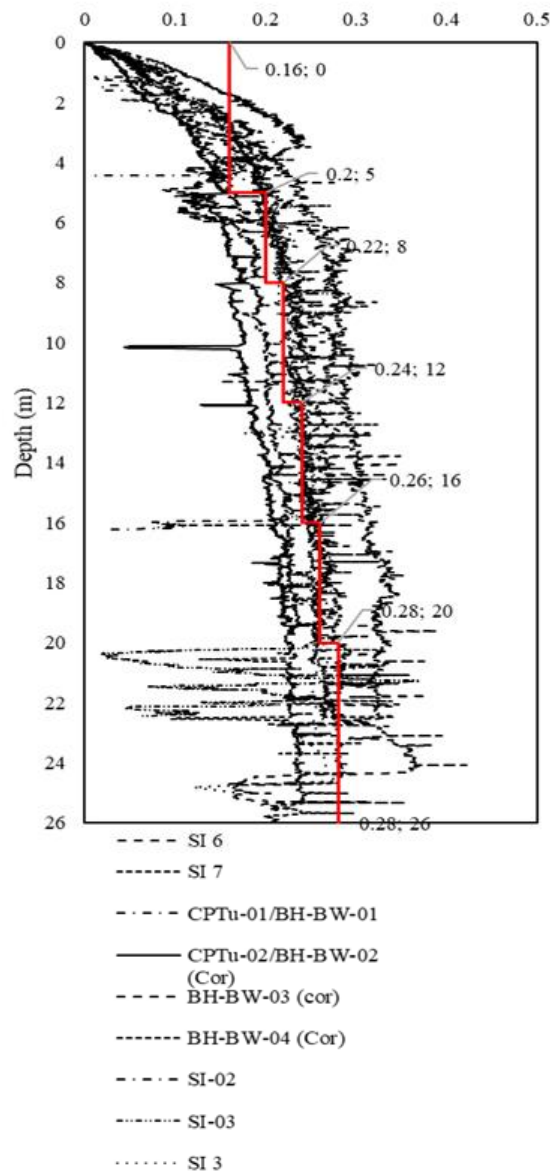
Dari seluruh pengujian tersebut, terdapat beberapa jenis lapisan tanah pada Segmen 1 sampai Segmen 11 yang dapat diklasifikasikan sebagai berikut.

1. *Upper Marine Clay*
2. *Lower Marine Clay/Deep Clay*
3. *Loose Sand*
4. *Coral*
5. *Limestone*

Nilai paramter setiap lapisan tanah dapat dilihat pada Lampiran B. Berdasarkan *Geotechnical Interpretative Repor* Proyek EBW, lapisan tanah didominasi oleh *upper marine clay* yang berada pada kedalaman 0 – 5 m hingga 0 - 24 m. Klasifikasi tersebut dilakukan menggunakan nilai N-SPT, sehingga untuk tanah jenis *upper marine clay* perlu diklasifikasikan kembali menggunakan nilai parameter dan fisik tanah karena dengan kedalaman tersebut sifat homogen tanah lempung relatif kecil. Klasifikasi *upper marine clay* ditentukan berdasarkan nilai parameter *settlement*, yaitu $C_c/(1+e_0)$. Nilai tersebut berdasarkan persamaan sebagai berikut..

$$\frac{c_c}{(1 + e_0)} = 2,3\sigma'_v \frac{1}{q_c a} \quad (4.1)$$

Dari persamaan yang disebutkan di atas, distribusi $C_c/(1+e_0)$ ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik $C_c/(1+e_0)$ Vs Kedalaman
Sumber: PT. Atria Swascipta Rekayasa (2024)

Oleh karena itu, rekomendasi klasifikasi lapisan *upper marine clay* adalah sebagai berikut.

1. $C_c/(1+e_0) = 0.16$
2. $C_c/(1+e_0) = 0.20$
3. $C_c/(1+e_0) = 0.22$
4. $C_c/(1+e_0) = 0.24$
5. $C_c/(1+e_0) = 0.26$
6. $C_c/(1+e_0) = 0.28$

Dari hasil analisis tersebut, maka dapat disimpulkan pada lokasi terdapat beberapa lapisan tanah antara lain 6 lapisan *upper marine clay*, *deep clay*, *loose sand*, *coral*, dan *limestone*. Nilai parameter tanah pada setiap lapisan disesuaikan dengan *Geotechnical Interpretative Report* Proyek EBW dan pendekatan iterasi. Berikut merupakan lapisan tanah pada setiap segmen.

Tabel 4.1 Lapisan Tanah Segmen 1

BH-SI 01 (S1)		
No	Lapisan Tanah	Kedalaman (m)
1	<i>Loose Sand</i>	0 – 3
2	<i>M.Clay 1</i>	3 – 6
3	<i>M.Clay 2</i>	6 – 9
4	<i>M.Clay 3</i>	9 – 14
5	<i>Coral</i>	14 – 16

Tabel 4.2 Lapisan Tanah Segmen 2

BH-SI 02 (S2)		
No	Lapisan Tanah	Kedalaman (m)
1	<i>M.Clay 1</i>	0 – 4
2	<i>M.Clay 2</i>	4 – 5
3	<i>Coral</i>	5 – 8

Tabel 4.3 Lapisan Tanah Segmen 3

BH-BW 01 (S3)		
No	Lapisan Tanah	Kedalaman (m)
1	<i>M.Clay 1</i>	0 – 4
2	<i>M.Clay 2</i>	4 – 7
3	<i>M.Clay 3</i>	7 – 11
4	<i>M.Clay 4</i>	11 – 14
5	<i>M.Clay 5</i>	14 – 16
6	<i>M.Clay 6</i>	16 – 19
7	<i>Limestone</i>	19 – 21

Tabel 4.4 Lapisan Tanah Segmen 4

BH-SI 03 (S4)		
No	Lapisan Tanah	Kedalaman (m)
1	<i>M.Clay 1</i>	0 – 5
2	<i>M.Clay 2</i>	5 – 8
3	<i>M.Clay 3</i>	8 – 11
4	<i>M.Clay 4</i>	11 – 15
5	<i>M.Clay 5</i>	15 – 18
6	<i>M.Clay 6</i>	18 – 21
7	<i>Limestone</i>	21 – 26

Tabel 4.5 Lapisan Tanah Segmen 5

BH-SI 04 (S5)		
No	Lapisan Tanah	Kedalaman (m)
1	<i>M.Clay 1</i>	0 – 4
2	<i>M.Clay 2</i>	4 – 7
3	<i>M.Clay 3</i>	7 – 11
4	<i>M.Clay 4</i>	11 – 14
5	<i>M.Clay 5</i>	14 – 17
6	<i>M.Clay 6</i>	17 – 21
7	<i>Coral</i>	21 – 22
8	<i>Limestone</i>	22 – 26

Tabel 4.6 Lapisan Tanah Segmen 6

BH-BW 02 (S6)		
No	Lapisan Tanah	Kedalaman (m)
1	<i>M.Clay 1</i>	0 – 4
2	<i>M.Clay 2</i>	4 – 7
3	<i>M.Clay 3</i>	7 – 11
4	<i>M.Clay 4</i>	11 – 15
5	<i>M.Clay 5</i>	15 – 18
6	<i>M.Clay 6</i>	18 – 21
7	<i>Deep Clay</i>	21 – 24
8	<i>Limestone</i>	24 – 26

Tabel 4.7 Lapisan Tanah Segmen 7

BH-SI 05 (S7)		
No	Lapisan Tanah	Kedalaman (m)
1	<i>M.Clay 1</i>	0 – 5
2	<i>M.Clay 2</i>	5 – 8
3	<i>M.Clay 3</i>	8 – 12
4	<i>M.Clay 4</i>	12 – 16
5	<i>M.Clay 5</i>	16 – 19
6	<i>M.Clay 6</i>	19 – 21
7	<i>Deep Clay</i>	21 – 24
8	<i>Limestone</i>	24 – 26

Tabel 4.8 Lapisan Tanah Segmen 8

BH-BW 03 (S8)		
No	Lapisan Tanah	Kedalaman (m)
1	<i>M.Clay 1</i>	0 – 4
2	<i>M.Clay 2</i>	4 – 7
3	<i>M.Clay 3</i>	7 – 11
4	<i>M.Clay 4</i>	11 – 15
5	<i>M.Clay 5</i>	18 – 18
6	<i>M.Clay 6</i>	18 – 22
7	<i>Deep Clay</i>	22 – 29

Tabel 4.9 Lapisan Tanah Segmen 9

BH-SI 06 (S9)		
No	Lapisan Tanah	Kedalaman (m)
1	<i>M.Clay 1</i>	0 – 4
2	<i>M.Clay 2</i>	4 – 7
3	<i>M.Clay 3</i>	7 – 11
4	<i>M.Clay 4</i>	11 – 15
5	<i>M.Clay 5</i>	15 – 18
6	<i>M.Clay 6</i>	18 – 22
7	<i>Deep Clay</i>	22 – 25
8	<i>Coral</i>	25 – 27
9	<i>Limestone</i>	27 – 28

Tabel 4.10 Lapisan Tanah Segmen 10

BH-BW 04 (S10)		
No	Lapisan Tanah	Kedalaman (m)
1	<i>M.Clay 1</i>	0 – 5
2	<i>M.Clay 2</i>	5 – 8
3	<i>M.Clay 3</i>	8 – 12
4	<i>M.Clay 4</i>	12 – 16
5	<i>M.Clay 5</i>	16 – 19
6	<i>M.Clay 6</i>	19 – 23
7	<i>Deep Clay</i>	23 – 29
8	<i>Limestone</i>	29 – 31

Tabel 4.11 Lapisan Tanah Segmen 11

BH-SI 07 (S11)		
No	Lapisan Tanah	Kedalaman (m)
1	<i>M.Clay 1</i>	0 – 4
2	<i>M.Clay 2</i>	4 – 7
3	<i>M.Clay 3</i>	7 – 11
4	<i>M.Clay 4</i>	11 – 15
5	<i>M.Clay 5</i>	15 – 19
6	<i>M.Clay 6</i>	19 – 22
7	<i>Deep Clay</i>	22 – 28

Berdasarkan nilai parameter tanah pada Lampiran B, dapat disimpulkan bahwa tanah yang paling berisiko dan kritis berada di Segmen 10 dengan lapisan *compressible* sebesar 29 m dan N-SPT berkisar antara 0-6. Selain itu, berdasarkan analisis geoteknik yang dilakukan pada Proyek EBW, nilai *settlement* yang paling besar pada tanah yang telah diperbaiki menggunakan PVD juga berada pada Segmen 10, yaitu 5,16 m. Oleh karena itu, untuk perencanaan perkuatan tanah direkomendasikan menggunakan data parameter tanah dari Segmen 10.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5 PERENCANAAN *BREAKWATER*

5.1 Deformasi Gelombang

5.1.1 Refraksi Gelombang

Refraksi dan pendangkalan gelombang dapat menentukan tinggi gelombang di suatu tempat berdasarkan karakteristik gelombang datang. Refraksi mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap tinggi dan arah gelombang serta distribusi energi gelombang pada sepanjang dermaga EJMT. Oleh karena itu, refraksi perlu dianalisis untuk mengetahui tinggi dan arah gelombang pada area manuver kapal. Nilai tinggi gelombang laut dangkal (H) pada dermaga dapat dicari menggunakan Persamaan 2.8. Nilai sudut datang gelombang (α) dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.3. Data yang dipakai serta langkah-langkah untuk menganalisis refraksi gelombang adalah sebagai berikut.

- Tinggi gelombang rencana (H_0) = 2,80 m
- Periode gelombang rencana (T_0) = 8,90 s
- Arah gelombang laut dalam (α_0) = 45°

1. Menghitung Panjang Gelombang Laut Dalam (L_0)

Perhitungan nilai panjang gelombang laut dalam menggunakan Persamaan 2.16 adalah sebagai berikut.

$$L_0 = 1,56T^2$$

$$L_0 = 1,56 \times 8,90^2$$

$$L_0 = 123,568 \text{ m}$$

2. Menghitung Cepat Rambat Gelombang Laut Dalam (C_0)

Perhitungan nilai cepat rambat gelombang laut dalam menggunakan Persamaan 2.17 adalah sebagai berikut.

$$C_0 = \frac{L_0}{T_0}$$

$$C_0 = \frac{123,568}{8,90}$$

$$C_0 = 13,884 \text{ m/s}$$

3. Menghitung Kedalaman Laut Dalam (d_0)

Berdasarkan kedalaman relatif, gelombang dapat diklasifikasikan menjadi gelombang laut dalam jika $d_0/L_0 \geq 1/2$. Maka, perhitungan nilai kedalaman laut dalam dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.18 sebagai berikut.

$$\frac{d_0}{L_0} = \frac{1}{2}$$

$$d_0 = \frac{1}{2} \times 123,568$$

$$d_0 = 61,784 \text{ m} \approx 62,000 \text{ m}$$

Dari perhitungan di atas, maka untuk wilayah dengan kedalaman kurang dari 62 m merupakan laut transisi dan laut dangkal. Penggambaran garis refraksi dapat dimulai pada garis kontur -62,000 m dengan sudut α_0 .

4. Menentukan Kedalaman Laut (d)

Nilai kedalaman laut (d) yang dipakai pada analisis ini ditentukan memiliki interval 2 m. Maka, untuk nilai d yang dianalisis serta digambar pada garis refraksi setelah $d_0 = 62 \text{ m}$ adalah $d = 60 \text{ m}$.

5. Menghitung Nilai d/L_0

Dengan nilai $d = 60 \text{ m}$, maka d/L_0 dapat dihitung sebagai berikut.

$$\frac{d}{L_0} = \frac{60}{123,568} = 0,486$$

Berdasarkan perhitungan di atas, nilai d/L_0 sebesar 0,486.

6. Mencari Nilai d/L

Dengan nilai d/L_0 , dapat dicari nilai d/L menggunakan Tabel L-1 pada buku berjudul “Teknik Pantai” oleh Bambang Triatmodjo. Berdasarkan tabel tersebut, nilai d/L ditentukan sebesar 0,488. Nilai d/L akan digunakan untuk perhitungan sudut datang gelombang.

7. Mencari Nilai K_s (Koefisien Pendangkalan)

Dengan nilai d/L_0 , dapat dicari juga nilai K_s menggunakan Tabel L-1 pada buku berjudul “Teknik Pantai” oleh Bambang Triatmodjo. Berdasarkan tabel tersebut, nilai K_s ditentukan sebesar 0,989. Nilai K_s akan digunakan untuk menghitung tinggi gelombang.

8. Menghitung Panjang Gelombang Laut (L)

Perhitungan nilai panjang gelombang laut pada kedalaman 60 m dihitung menggunakan nilai d/L sebesar 0,488 adalah sebagai berikut.

$$\frac{d}{L} = 0,488$$

$$L = \frac{60}{0,488}$$

$$L = 123,034 \text{ m}$$

Dengan nilai d/L sebesar 0,488, maka panjang gelombang pada kedalaman 60 m sebesar 123,034 m.

9. Menghitung Cepat Rambat Gelombang (C)

Perhitungan nilai cepat rambat gelombang laut pada kedalaman 60 m menggunakan Persamaan 2.17 adalah sebagai berikut.

$$C = \frac{L}{T_0}$$

$$C = \frac{123,034}{8,90}$$

$$C = 13,824 \text{ m/s}$$

Dengan nilai C sebesar 13,824, maka cepat rambat gelombang pada kedalaman 60 m sebesar 13,824 m/s.

10. Menghitung Arah Datang Gelombang (a)

Arah datang gelombang (a) pada kedalaman 60 m dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.3 sebagai berikut.

$$\sin a = \left(\frac{C}{C_0} \right) \sin a_0$$

$$\sin a = \left(\frac{13,824}{13,884} \right) \times \sin 45$$

$$\sin a = 0,704$$

$$a = 44,753^\circ$$

Dari perhitungan di atas, maka sudut datang gelombang pada kedalaman 60 sebesar $44,753^\circ$. Sudut datang gelombang tersebut dapat dipakai untuk menggambar garis refraksi sampai kedalaman selanjutnya, yaitu 58 m.

11. Menghitung Koefisien Refraksi (K_r)

Nilai K_r digunakan untuk menghitung tinggi gelombang pada kedalaman tertentu. Nilai K_r pada kedalaman 60 m dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.5 sebagai berikut.

$$Kr = \sqrt{\frac{\cos a_0}{\cos a}}$$

$$Kr = \sqrt{\frac{\cos 45}{\cos 44,753}}$$

$$Kr = 0,998$$

Maka, berdasarkan perhitungan di atas nilai K_r pada kedalaman 60 m sebesar 0,998.

12. Menghitung Tinggi Gelombang (H)

Persamaan 2.8 dapat digunakan untuk menghitung tinggi gelombang di laut transisi dan dangkal. Perhitungan nilai tinggi gelombang (H) pada kedalaman 60 m adalah sebagai berikut.

$$H = K_s \times K_r \times H_0$$

$$H = 0,989 \times 0,998 \times 2,8$$

$$H = 2,515 \text{ m}$$

Maka, nilai tinggi gelombang pada kedalaman 60 m dengan pengaruh refraksi dan pendangkalan sebesar 2,515 m.

Langkah-langkah perhitungan di atas perlu dilakukan hingga kedalaman lokasi dermaga EJMT dibangun, yaitu 8 m. Perhitungan selengkapnya dari refraksi gelombang dari laut dalam kedalaman 62 m sampai kedalaman 8 m dapat dilihat pada Tabel 5.1 sebagai berikut.

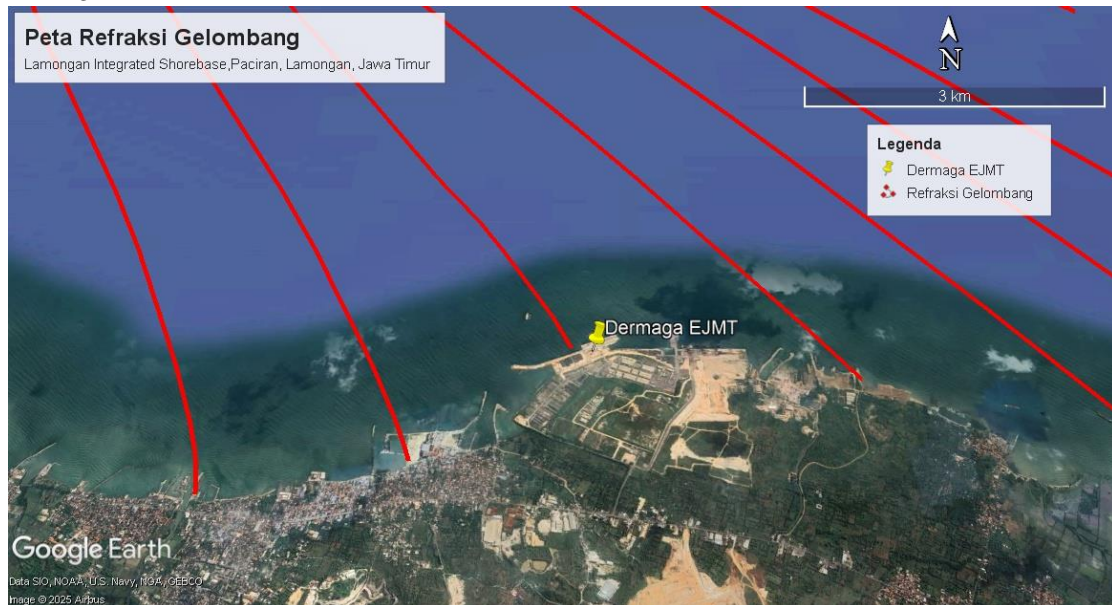
Tabel 5.1 Rekapitulasi Refraksi Gelombang

L_0	C_0	d_0	d	d/L_0	d/L	K_s	L	C	α	K_r	H
(m)	(m/s)	(m)	(m)				(m)	(m/s)	°		(m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
123,568	13,884	62,0	62,0	0,502	0,502	0,990	123,548	13,882	44,991	1,000	2,520
			60,0	0,486	0,488	0,989	123,034	13,824	44,753	0,998	2,515
			58,0	0,469	0,472	0,987	122,920	13,811	44,701	0,997	2,513
			56,0	0,453	0,456	0,985	122,783	13,796	44,637	0,997	2,512
			54,0	0,437	0,441	0,983	122,585	13,774	44,546	0,996	2,510
			52,0	0,421	0,425	0,980	122,382	13,751	44,453	0,995	2,508
			50,0	0,405	0,409	0,977	122,133	13,723	44,339	0,994	2,506
			48,0	0,388	0,394	0,974	121,834	13,689	44,202	0,993	2,503
			46,0	0,372	0,379	0,970	121,471	13,648	44,036	0,992	2,499
			44,0	0,356	0,364	0,966	121,042	13,600	43,841	0,990	2,495
			42,0	0,340	0,348	0,961	120,527	13,542	43,607	0,988	2,490
			40,0	0,324	0,334	0,956	119,879	13,470	43,314	0,986	2,484
			38,0	0,308	0,319	0,951	119,148	13,387	42,986	0,983	2,478
			36,0	0,291	0,304	0,946	118,285	13,290	42,600	0,980	2,470
			34,0	0,275	0,290	0,941	117,270	13,176	42,150	0,977	2,461
			32,0	0,259	0,276	0,935	116,077	13,042	41,624	0,973	2,451
			30,0	0,243	0,262	0,930	114,683	12,886	41,016	0,968	2,440
			28,0	0,227	0,248	0,925	113,063	12,704	40,315	0,963	2,427
			26,0	0,210	0,234	0,921	111,140	12,488	39,493	0,957	2,412
			24,0	0,194	0,220	0,917	108,957	12,242	38,572	0,951	2,397
			22,0	0,178	0,207	0,914	106,440	11,960	37,524	0,944	2,379
			20,0	0,162	0,193	0,913	103,530	11,633	36,331	0,937	2,361
			18,0	0,146	0,180	0,914	100,184	11,257	34,980	0,929	2,341
			16,0	0,129	0,166	0,917	96,328	10,823	33,451	0,921	2,320

L_0	C_0	d_0	d	d/L_0	d/L	K_s	L	C	α	K_r	H
(m)	(m/s)	(m)	(m)				(m)	(m/s)	°		(m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
			14,0	0,113	0,152	0,924	91,870	10,322	31,717	0,912	2,298
			12,0	0,097	0,138	0,917	86,649	9,736	29,725	0,902	2,274
			10,0	0,081	0,124	0,924	80,600	9,056	27,466	0,893	2,250
			8,0	0,065	0,109	0,935	73,442	8,252	24,851	0,883	2,225

Berdasarkan Tabel 5.1, maka nilai tinggi gelombang (H) pada area manuver kapal di dermaga EJMT pada kedalaman 8 m sebesar 2,225 m. Pada kedalaman tersebut nilai d/H lebih besar daripada 1,28, sehingga gelombang akan pecah pada lokasi tersebut. Gelombang yang pecah pada lokasi tersebut akan mengganggu operasional pelabuhan, sehingga perlu dibangun *breakwater* dan diperlukan analisis lebih lanjut mengenai gelombang pecah tersebut.

Dengan menggunakan nilai sudut datang gelombang (α), garis refraksi dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5.1 Refraksi Gelombang

Berdasarkan gambar di atas, dapat disimpulkan bahwa sudut gelombang datang pada area manuver kapal di dermaga EJMT sebesar $24,851^\circ$.

5.1.2 Gelombang Pecah

Karakteristik gelombang akan mengalami perubahan atau deformasi ketika gelombang bergerak merambat menuju ke pantai. Pada saat mendekati pantai, puncak gelombang akan semakin tajam hingga akhirnya menjadi tidak stabil dan pecah pada kedalaman tertentu yang disebut kedalaman gelombang pecah (d_b). Penempatan *breakwater* pada lokasi sebelum gelombang pecah memungkinkan bangunan dapat menyerap dan memecah energi gelombang sebelum mencapai pantai atau pelabuhan, sehingga perairan di belakang *breakwater* menjadi lebih tenang. Kondisi ini sangat penting untuk kelancaran aktivitas bongkar muat kapal dan mencegah kerusakan fasilitas pelabuhan akibat gelombang besar.

Dalam analisis gelombang pecah, diperlukan data tinggi gelombang rencana (H_0) dan periode gelombang rencana (T_0) periode ulang 50 tahun karena bangunan *breakwater* direncanakan memiliki umur desain 50 tahun. Nilai H_0 dan T_0 yang digunakan berasal dari arah dominan gelombang laut dalam (α_0), yaitu barat laut atau 45° . Data tersebut antara lain sebagai berikut.

- Tinggi gelombang rencana (H_0) = 2,80 m
- Periode gelombang rencana (T_0) = 8,90 s

Langkah-langkah untuk mencari nilai kedalaman gelombang pecah (d_b) adalah sebagai berikut.

1. Nilai Kemiringan Dasar Laut (m)

Kemiringan dasar laut (m) sangat berpengaruh terhadap pembentukan puncak gelombang. Nilai m diukur dari batas kedalaman laut dalam, yaitu pada elevasi -62,000 hingga bibir pantai. Dari hasil analisis pada *software* AutoCAD didapatkan nilai m sebesar 0,0028. Dengan nilai kemiringan dasar laut tersebut, maka perhitungan d_b dan H_b disarankan menggunakan Persamaan 2.12 daripada grafik pada Gambar 2.10 dan Gambar 2.11. Hal tersebut dikarenakan nilai m berada pada daerah III (*spilling*) dengan kemiringan dasar laut yang landai.

2. Menghitung Fungsi a dan b (Kemiringan Pantai (m))

Nilai a dan b merupakan fungsi kemiringan pantai (m) yang diberikan pada grafik Gambar 2.10 dan Gambar 2.11. Perhitungan nilai fungsi a dan b menggunakan Persamaan 2.14 dan 2.15 adalah sebagai berikut.

$$a = 43,75(1 - e^{-19 \times m})$$

$$a = 43,75(1 - e^{-19 \times 0,0028})$$

$$a = 2,289$$

$$b = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5m})}$$

$$b = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5 \times 0,0028})}$$

$$b = 0,802$$

3. Menghitung Tinggi Gelombang Laut Dalam Ekuivalen (H'_0)

Nilai tinggi gelombang laut dalam ekuivalen dianalisis pada keadaan dimana gelombang tidak mengalami difraksi. Nilai K_r yang digunakan berasal dari nilai refraksi pada lokasi kontur yang tidak dipengaruhi oleh dermaga *existing*, yaitu pada kedalaman 8 meter sebesar 2,225. Perhitungan H'_0 menggunakan Persamaan 2.19 adalah sebagai berikut.

$$H'_0 = H_0 \times K_r$$

$$H'_0 = 2,8 \times 2,225$$

$$H'_0 = 2,472 \text{ m}$$

4. Menghitung Tinggi Gelombang Pecah (H_b)

Perhitungan nilai tinggi gelombang pecah menggunakan Persamaan 2.20 adalah sebagai berikut.

$$\frac{H_b}{H'_0} = \frac{1}{3,3 \left(\frac{H'_0}{L_0} \right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$H_b = \frac{1}{3,3 \left(\frac{2,472}{123,568} \right)^{\frac{1}{3}}} \times 2,472$$

$$H_b = 2,759 \text{ m}$$

5. Menghitung Kedalaman Gelombang Pecah (d_b)

Grafik pada Gambar 2.10 dan Gambar 2.11 dapat ditulis dengan menggunakan Persamaan 2.12 Perhitungan nilai d_b adalah sebagai berikut.

$$\frac{d_b}{H_b} = \frac{1}{b - \left(\frac{aH_b}{gT_0^2} \right)}$$
$$d_b = \frac{1}{0,802 - \left(\frac{2,289 \times 2,759}{9,81 \times 7,8^2} \right)} \times 2,759$$
$$d_b = 3,478 \text{ m}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, didapatkan hasil gelombang akan pecah pada saat mencapai kedalaman dasar laut (d_b) sebesar 3,478 m dengan tinggi gelombang pecah (H_b) sebesar 2,759 m. Dermaga EJMT dibangun pada kedalaman 8 m, sehingga gelombang akan pecah pada bangunan dermaga yang dapat menyebabkan kapal terombang-ambing saat melakukan muat dan bongkar. Oleh karena itu, berdasarkan hasil analisis refraksi dan gelombang pecah, *breakwater* perlu dibangun tegak lurus arah 22,5°- 45° pada kedalaman lebih dari 8 m dan disesuaikan dengan kebutuhan area *turning circle* kapal dengan radius 500 m.

5.2 Fluktuasi Muka Air Laut

Fluktuasi muka air laut perlu dipertimbangkan untuk menentukan elevasi dari struktur *breakwater*. Perlu dilakukan beberapa perhitungan antara lain *wave set-up*, *wind set-up*, pemanasan global, dan *run up*. Hal tersebut perlu diperhitungkan karena *breakwater* harus dapat mereduksi gelombang dan melindungi area dermaga dari pendangkalan atau sedimentasi. Selain itu, pada bagian atas dari *breakwater* akan digunakan untuk jalur pemeliharaan dari struktur *breakwater* dan pos jaga. Oleh karena itu, air tidak diizinkan untuk *overtopping* atau melimpah hingga puncak dari *breakwater*.

5.2.1 Wave Set-Up

Wave set-up terjadi karena gelombang datang dari laut menuju pantai yang menyebabkan fluktuasi muka air terhadap muka air diam. Kenaikan muka air yang disebabkan oleh gelombang dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.25 sebagai berikut.

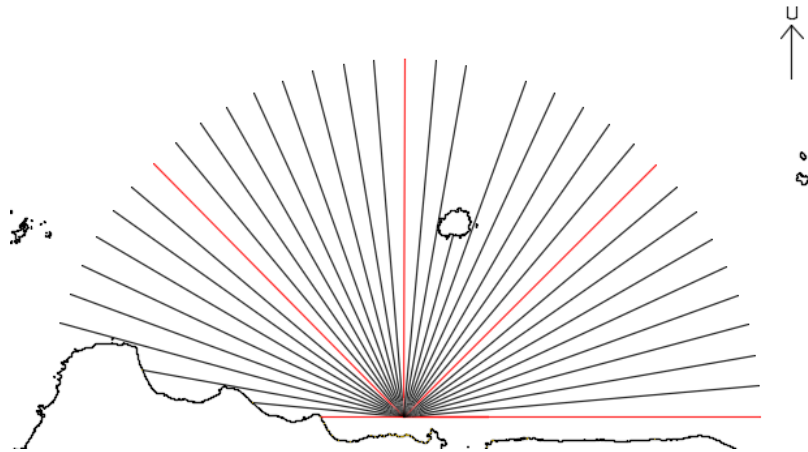
$$Sw = 0,19 \left[1 - 2,82 \sqrt{\frac{H_b}{gT_0^2}} \right] H_b$$
$$Sw = 0,19 \left[1 - 2,82 \sqrt{\frac{2,759}{9,81 \times 8,9^2}} \right] 2,759$$
$$Sw = 0,436 \text{ m}$$

Dari perhitungan tersebut, diperoleh nilai kenaikan muka air laut akibat gelombang (*wave set-up*) sebesar 0,436 m.

5.2.2 Wind Set-Up

Wind set-up terjadi karena angin dengan kecepatan besar (badai) di atas permukaan laut yang dapat membangkitkan fluktuasi muka air laut. Kenaikan muka air yang disebabkan oleh angin dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.27 sebagai berikut.

$$\Delta h = Fc \frac{v^2}{2gd}$$



Gambar 5.2 Analisis Fetch

Dalam analisis *fetch* pada Gambar 5.2, jarak tempuh angin di atas air pada arah sudut datang atau 45° sejauh lebih dari 200 km. Kecepatan angin yang memengaruhi pembentukan gelombang cenderung konsisten hanya dalam jarak hingga 200 km (Suhana dkk, 2018). Maka, angka *fetch* yang dipakai sebesar 200 km.

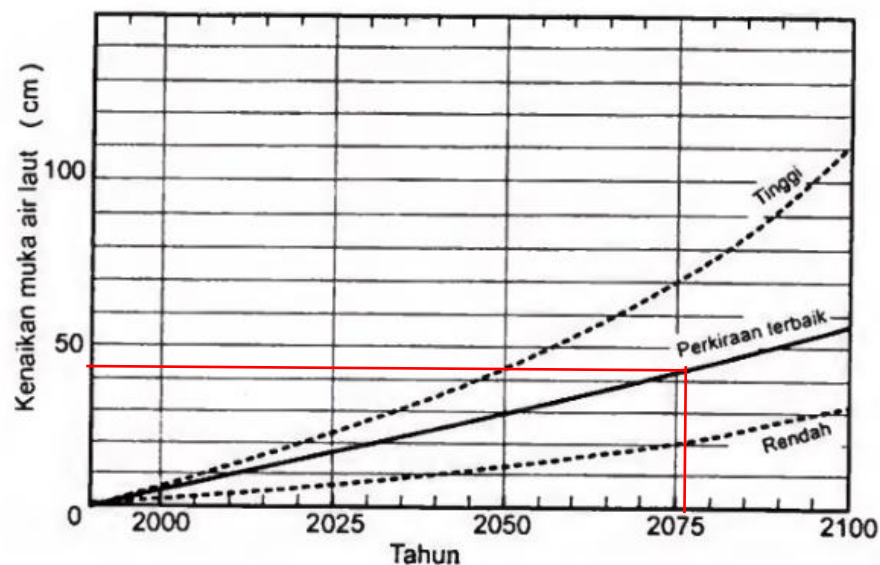
$$\Delta h = 200.000 \times 3,5 \times 10^{-6} \frac{15,3^2}{2 \times 9,81 \times 8}$$

$$\Delta h = 0,894 \text{ m}$$

Dari perhitungan tersebut, diperoleh nilai kenaikan muka air laut akibat angin (*wind set-up*) sebesar 0,894 m.

5.2.3 Pemanasan Global

Kenaikan muka air laut akibat pemanasan global dapat terjadi karena pemuain air laut dan mencairnya gunung-gunung es di kutub. Hal tersebut perlu diperhitungkan karena bangunan pantai direncanakan memiliki umur desain yang cenderung lama. Nilai kenaikan muka air laut akibat pemanasan global dapat diprediksi menggunakan grafik pada Gambar 2.14.



Gambar 5.3 Grafik Penentuan *Run Up* Gelombang

Breakwater direncanakan memiliki umur desain 50 tahun dan dapat berfungsi secara optimal mulai tahun 2026, sehingga perlu dianalisis kenaikannya hingga tahun 2076 dengan

perkiraan terbaik. Dengan demikian, berdasarkan pembacaan grafik pada Gambar 5.3 didapatkan nilai kenaikan muka air laut akibat pemanasan global sebesar 42 cm atau 0,42 m.

5.2.4 Run Up

Run up terjadi saat gelombang menghantam suatu bangunan yang menyebabkan gelombang naik pada permukaan bangunan. Hal tersebut perlu diperhitungkan karena bagian atas *breakwater* akan difungsikan untuk jalur pemeliharaan dan pos jaga. *Run up* dapat dihitung dengan mencari bilangan Iribaren (I_r) menggunakan Persamaan 2.28 sebagai berikut.

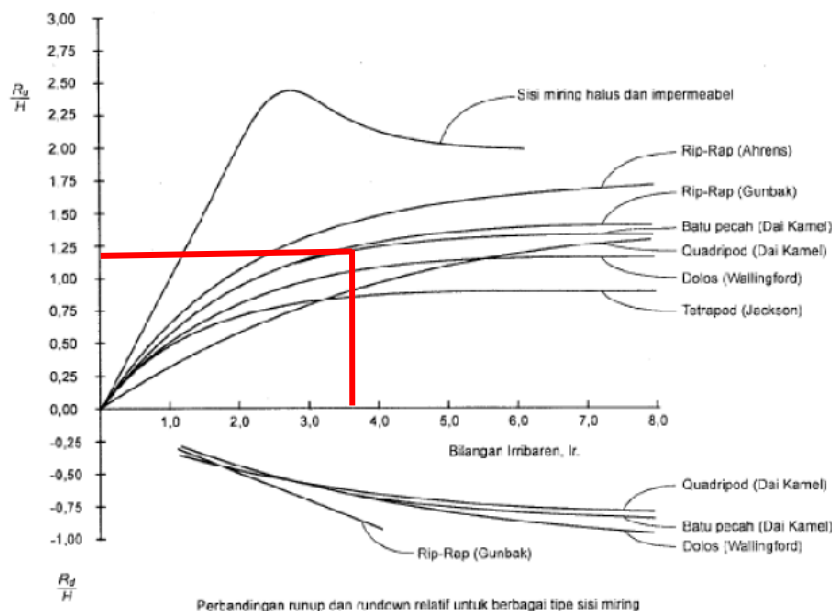
$$I_r = \frac{tg \theta}{\left(\frac{H}{L_0}\right)^{0,5}}$$

Dimana θ ditentukan berdasarkan kemiringan sisi *breakwater* yang direncanakan. Dengan mempertimbangkan sisi dalam *breakwater* yang berdekatan dengan area manuver kapal, maka kemiringan yang terlalu landai tidak diizinkan untuk menghindari pendangkalan akibat struktur. Namun, kemiringan yang terlalu curam juga tidak diizinkan karena akan memengaruhi stabilitas dari *breakwater*. Oleh karena itu, kemiringan sisi *breakwater* ditentukan sebesar 1:2. Nilai H yang digunakan merupakan tinggi gelombang pada lokasi bangunan yang telah dihitung pada refraksi gelombang, yaitu 2,225 m pada kedalaman 8 m.

$$I_r = \frac{0,5}{\left(\frac{2,225}{123,568}\right)^{0,5}}$$

$$I_r = 3,7$$

Dengan nilai I_r sebesar 3,7 dan material batu pecah, maka dapat dicari nilai R_u/H dengan grafik pada Gambar 2.15.



Gambar 5.4 Grafik Penentuan Bilangan Iribaren

Berdasarkan Gambar 5.4, didapatkan nilai R_u/H sebesar 1,16 Kemudian disubstitusikan untuk mendapatkan nilai R_u (*run up*).

$$\frac{R_u}{H} = 1,16$$

$$R_u = 1,16 \times 2,225$$

$$R_u = 2,552 \text{ m}$$

Maka, nilai R_u (*run up*) adalah sebesar 2,552 m.

5.2.5 Elevasi Muka Air Laut Rencana

Parameter yang digunakan untuk menghitung elevasi muka air laut rencana adalah HHWL, *wave set-up* (S_w), *wind set-up* (Δh), pemanasan global, dan *run up* (R_u) seperti pada Gambar 2.17. Kondisi tsunami tidak diperhitungkan karena gempa yang menyebabkan tsunami dapat terjadi di cuaca cerah (tidak ada badai/angin besar), sehingga penggabungan tsunami dengan parameter lainnya saat air pasang memiliki kemungkinan yang kecil terjadi. Selain itu, dipertimbangkan juga potensi gempa dari lokasi *breakwater* berdasarkan Gambar 2.17 yang memiliki koefisien *seismic* relatif kecil. Maka, nilai elevasi muka air laut rencana atau puncak *breakwater* adalah sebagai berikut.

$$\text{Elevasi Puncak Breakwater} = \text{HHWL} + S_w + \Delta h + P_{\text{manasan Global}} + R_u$$

$$\text{Elevasi Puncak Breakwater} = +2,190 + 0,436 + 0,894 + 0,42 + 2,552$$

$$\text{Elevasi Puncak Breakwater} = +6,493 \text{ m} \approx +6,5 \text{ m}$$

5.3 Desain Struktur Breakwater

Dalam merencanakan desain struktur *breakwater*, perlu diperhatikan beberapa hal antara lain fungsi dari bangunan serta kondisi *existing* lokasi *breakwater*. *Breakwater* harus dapat difungsikan sebagai bangunan penahan sedimen untuk menghindari pendangkalan pada area dermaga serta harus dapat mereduksi gelombang untuk melancarkan aktivitas bongkar muat kapal. Selain itu, arah gelombang datang yang berkisar antara utara barat laut dan barat laut ($22,5^\circ - 45^\circ$) menjadi salah satu kunci penting dalam penentuan jenis *breakwater*. Berdasarkan hal tersebut, jenis *breakwater* yang dipilih adalah *shore connected breakwater* dengan kedua sisi miring. Tampilan potongan dari rencana *breakwater* seperti pada Gambar 5.5.



Gambar 5.5 Pemecah Gelombang Sisi Miring Dengan Serangan Gelombang Pada Kedua Sisi
Sumber: Triatmodjo (1999)

Material yang digunakan dalam desain adalah *lime stone* yang merupakan hasil *blasting* dari kawasan *Lamongan Integrated Shorebase*. Dalam merencanakan desain struktur *breakwater* diperlukan beberapa tahapan sebagai berikut.

5.3.1 Berat Butir Batu

Perencanaan struktur *breakwater* perlu menggunakan 2 desain, yaitu desain bagian lengan dan bagian kepala (ujung) *breakwater*. Perhitungan berat butir batu untuk lapis pertama dan kedua dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.29.

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta}$$

Data:

γ_r : 2,648 ton/m³ (hasil uji laboratorium)

γ_a : 1,027 ton/m³

S_r : $\gamma_r / \gamma_a = 2,578$

$K_{D(Lengan)}$: 2 (berdasarkan Tabel 2,3)

$K_{D(Kepala)}$: 1,6 (berdasarkan Tabel 2,3)

$\cot \theta$: 2 (berdasarkan Tabel 2,3)

1. Bagian Lengan *Breakwater*

Perhitungan berat butir batu untuk lapis lindung pertama (W) adalah sebagai berikut.

$$W = \frac{2,648 \times 2,225^3}{2 \times (2,578 - 1)^3 \times 2}$$

$$W = 1,854 \text{ Ton} \approx 1,9 \text{ Ton} = 1900 \text{ Kg}$$

Selanjutnya dihitung berat butir batu untuk kaki/*berm* serta lapis lindung kedua (W/10) dan untuk bagian inti dasar (W/4000) sebagai berikut.

$$\frac{W}{10} = \frac{1,854}{10} = 0,1854 \text{ Ton} \approx 190 \text{ Kg}$$

$$\frac{W}{4000} = \frac{1,854}{4000} = 0,0005 \text{ Ton} \approx 1 \text{ Kg}$$

2. Bagian Ujung (Kepala) *Breakwater*

Perhitungan berat butir batu untuk lapis lindung pertama (W) adalah sebagai berikut.

$$W = \frac{2,648 \times 2,225^3}{1,6 \times (2,578 - 1)^3 \times 2}$$

$$W = 2,318 \text{ Ton} \approx 2,4 \text{ Ton} = 2400 \text{ Kg}$$

Selanjutnya dihitung berat butir batu untuk kaki/*berm* serta lapis lindung kedua (W/10) dan untuk bagian inti dasar (W/4000) sebagai berikut.

$$\frac{W}{10} = \frac{2,318}{10} = 0,232 \text{ Ton} \approx 240 \text{ Kg}$$

$$\frac{W}{4000} = \frac{2,318}{4000} = 0,0006 \text{ Ton} \approx 1 \text{ Kg}$$

5.3.2 Lebar Puncak *Breakwater*

Lebar puncak minimum *breakwater* untuk akses lalu lintas pemeliharaan telah ditentukan sebesar 6 meter pada dokumen *Employer Requirements* of EBW. Namun, tetap perlu dihitung lebar puncak menurut Persamaan 2.31. Apabila lebar puncak yang dihitung lebih besar daripada 6 meter, maka dalam desain yang digunakan adalah hasil perhitungan dan sebaliknya.

$$B = n \cdot k \Delta \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Data:

γ_r : 2,648 ton/m³ (hasil uji laboratorium)
 K_Δ : 1,1 (berdasarkan Tabel 2.4)
 n : 2 (berdasarkan Tabel 2.4)

Dari nilai berat butir batu (W) telah diketahui sebelumnya, dapat dihitung lebar puncak (B) pada bagian lengan dan ujung *breakwater* sebagai berikut.

1. Bagian Lengan *Breakwater*

Perhitungan lebar puncak *breakwater* pada bagian lengan adalah sebagai berikut.

$$B = 2 \times 1,1 \left(\frac{1.854}{2,648} \right)^{\frac{1}{3}}$$
$$B = 1,954 \text{ m} \approx 2,0 \text{ m}$$

2. Bagian Ujung (Kepala) *Breakwater*

Perhitungan lebar puncak *breakwater* pada bagian ujung adalah sebagai berikut.

$$B = 2 \times 1,1 \left(\frac{2.318}{2,648} \right)^{\frac{1}{3}}$$
$$B = 2,105 \text{ m} \approx 2,2 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan didapatkan nilai B sebesar 2,0 m dan 2,2 m. Nilai tersebut lebih kecil dari nilai yang telah ditentukan untuk jalan akses pemeliharaan, yaitu 6 m. Oleh karena itu, dimensi lebar puncak yang dipakai adalah 6 m ditambah dengan 2 m pada bagian kanan serta kiri sebagai bahu jalan. Dengan demikian, dimensi lebar puncak yang dipakai adalah 10 m pada lengan dan 12 m pada kepala.

5.3.3 Tebal Lapis Pelindung

Tebal lapis pelindung dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.31 sebagai berikut.

$$t = n \cdot k \Delta \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Data:

γ_r : 2,648 ton/m³ (hasil uji laboratorium)
 K_Δ : 1,1 (berdasarkan Tabel 2.4)
 n : 2 (berdasarkan Tabel 2.4)

Perhitungan tebal lapis pelindung (t) menggunakan berat butir batu (W) untuk lapis pelindung pertama dan W/10 untuk lapis pelindung kedua adalah sebagai berikut.

1. Bagian Lengan *Breakwater*

Perhitungan tebal lapis pelindung *breakwater* pada bagian lengan adalah sebagai berikut.

$$t_{W(Lengan)} = 2 \times 1,1 \left(\frac{1,854}{2,648} \right)^{\frac{1}{3}}$$
$$t_{W(Lengan)} = 1,954 \text{ m} \approx 2,000 \text{ m}$$

$$t_{W/10(Lengan)} = 2 \times 1,1 \left(\frac{0,185}{2,648} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$t_{W/10(Lengan)} = 0,907 \text{ m} \approx 1,000 \text{ m}$$

Maka, tebal lapis lindung pertama sebesar 2,0 m dan lapis lindung kedua sebesar 1 m.

2. Bagian Ujung (Kepala) *Breakwater*

Perhitungan tebal lapis lindung *breakwater* pada bagian ujung adalah sebagai berikut.

$$t_{W(Kepala)} = 2 \times 1,1 \left(\frac{2,318}{2,648} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$t_{W(Kepala)} = 2,105 \text{ m} \approx 2,200 \text{ m}$$

$$t_{W/10(Kepala)} = 2 \times 1,1 \left(\frac{0,232}{2,648} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$t_{W/10(Kepala)} = 1,065 \text{ m} \approx 1,100 \text{ m}$$

Maka, tebal lapis lindung pertama sebesar 2,2 m dan lapis lindung kedua sebesar 1,1 m.

5.3.4 Jumlah Butir Batu

Dalam pelaksanaan konstruksi *breakwater*, jumlah butir batu setiap satuan luas (N) berfungsi untuk meningkatkan kaitan satu batu dengan batu lainnya. Nilai N yang dihitung hanya digunakan pada batu berukuran besar atau batu pada lapis pertama. Jumlah butir batu setiap satuan luas (N) dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.32. sebagai berikut.

$$N = A \cdot n \cdot k_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{\gamma_r}{W} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Data:

γ_r : 2,648 ton/m³ (hasil uji laboratorium)

A : 100 m²

P : 40

K_{Δ} : 1,1 (berdasarkan Tabel 2.4)

n : 2 (berdasarkan Tabel 2.4)

Nilai N pada bagian lengan dan ujung *breakwater* adalah sebagai berikut.

1. Bagian Lengan *Breakwater*

Perhitungan nilai N pada *breakwater* bagian lengan adalah sebagai berikut.

$$N = 100 \times 2 \times 1,1 \left(1 - \frac{40}{100} \right) \left(\frac{2,648}{1,854} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$N = 167,368 \text{ buah} \approx 168 \text{ buah}$$

Maka, jumlah butir batu setiap 100 m² pada lapis lindung pertama sebanyak 168 buah.

2. Bagian Ujung (Kepala) *Breakwater*

Perhitungan nilai N pada *breakwater* bagian ujung adalah sebagai berikut.

$$N = 100 \times 2 \times 1,1 \left(1 - \frac{40}{100} \right) \left(\frac{2,648}{2,318} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$N = 144,233 \text{ buah} \approx 144 \text{ buah}$$

Maka, jumlah butir batu setiap 100 m² pada lapis lindung pertama sebanyak 144 buah.

5.3.5 Dimensi Kaki Pelindung (Toe)

Bangunan yang terbuka dari gelombang pecah memerlukan kaki pelindung. Berat butir batu yang digunakan adalah $W/10$. Berdasarkan Gambar 5.5, untuk dimensi lebar *toe* adalah $3-4,5 H$ dan untuk tinggi *toe* adalah $2r$, yang mana r dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.30 sebagai berikut.

$$r = n \cdot k \Delta \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Dimensi *toe* pada bagian lengan dan ujung *breakwater* sebagai berikut.

1. Bagian Lengan *Breakwater*

Perhitungan dimensi *toe breakwater* pada bagian lengan adalah sebagai berikut.

$$r = 2 \times 1,1 \left(\frac{0,185}{2,648} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$r = 0,907 \text{ m}$$

$$2r = 2 \times 0,907 = 1,814 \text{ m} \approx 1,900 \text{ m}$$

$$3H = 3 \times 2,225 = 6,674 \text{ m} \approx 6,700 \text{ m}$$

Maka, tinggi *toe* sebesar 1,9 m dan lebar *toe* sebesar 6,7 m.

2. Bagian Ujung (Kepala) *Breakwater*

Perhitungan dimensi *toe breakwater* pada bagian ujung adalah sebagai berikut.

$$r = 2 \times 1,1 \left(\frac{0,232}{2,648} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$r = 0,977 \text{ m}$$

$$2r = 2 \times 0,977 = 1,954 \text{ m} \approx 2,000 \text{ m}$$

$$4H = 4 \times 2,225 = 8,898 \text{ m} \approx 8,900 \text{ m}$$

Maka, tinggi *toe* sebesar 2,0 m dan lebar *toe* sebesar 8,9 m.

5.3.6 Tekanan Gelombang Pada Struktur *Breakwater*

Gelombang laut menghasilkan gaya dinamis yang dapat memberikan beban besar secara berulang ke struktur. Beban tersebut dapat memengaruhi stabilitas dari struktur, sehingga tanpa analisis yang tepat, *breakwater* berisiko mengalami keruntuhan. Perhitungan tekanan gelombang (P_m) dapat menggunakan Permasaam 2.33 sebagai berikut.

$$P_m = 101\gamma \frac{H_b}{L_D} \frac{d_s}{D} (D + d_s)$$

$$F_w = \frac{P_m}{B}$$

Data:

$$H_b = 2,759 \text{ m (Sub Bab 5.1.2)}$$

$$L_D = 86,649 \text{ m (Tabel 5.1)}$$

$$d_s = 11,510 \text{ m (kedalaman kaki pada STA 1+600)}$$

$$\begin{aligned}\gamma &= 10,27 \text{ kN/m}^3 \\ D &= 12 \text{ m} \\ B &= 180 \text{ m (lebar struktur pada STA 1+600)}\end{aligned}$$

Perhitungan tekanan gelombang (P_m) pada STA 1+600 adalah sebagai berikut.

$$P_m = 101 \times 10,27 \times \frac{2,759}{86,649} \times \frac{11,510}{12} \times (12 + 11,510)$$

$$P_m = 600,508 \text{ kN/m}^2$$

Dari nilai P_m sebesar 600,508 kN/m² tersebut, kemudian dapat diubah menjadi nilai beban gelombang sebagai berikut.

$$F_w = \frac{600,508 \text{ kN/m}^2}{180 \text{ m}}$$

$$F_w = 3,336 \text{ kN/m}^3$$

Maka, beban gelombang yang diterima oleh dinding struktur *breakwater* pada *seaside* sebesar 3,336 kN/m³. Nilai tersebut dapat digunakan untuk analisis selanjutnya dalam perhitungan stabilitas struktur *breakwater*.

5.3.7 Desain Struktur *Breakwater*

Berdasarkan seluruh perhitungan yang telah dilakukan, desain dari struktur *breakwater* dapat dilihat selengkapnya pada Lampiran C. Selain itu, ukuran, berat, dan jumlah batu keseluruhan pada setiap lapisan dapat dilihat pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Berat, Diameter, dan Jumlah Batu

Lapis Batu	Berat Batu		Diameter Batu			Jumlah Batu
	(Ton)		(m)			
<i>Armour Rock (Trunk)</i>	1,5	- 2,5	0,6	- 1		240.792
<i>Secondary Layer Armour Rock (Trunk)</i>	0,2	- 1,5	0,1	- 0,6		182.701
<i>Sea Side Toe Rock (Trunk)</i>	0,2	- 1,5	0,1	- 1		33.017
<i>Harbour Side Toe Rock (Trunk)</i>	0,2	- 1,5	0,1	- 1		36.992
<i>Armour Rock (Head)</i>	2	- 3	0,8	- 1,2		242
<i>Secondary Layer Armour Rock (Head)</i>	0,3	- 2	0,2	- 0,8		7.212
<i>Sea Side Toe Rock (Head)</i>	0,3	- 2	0,2	- 1,2		1.449
<i>Core Rock</i>	0,001	- 0,3	0,01	- 0,2		38.26.758
<i>Topping Layer</i>	0,001	- 0,005	0,01	- 0,1		34.076

BAB 6 PERENCANAAN PERKUATAN TANAH

6.1 Pembebanan

Beban timbunan (q_{timbunan}) dalam analisis geoteknik diperlukan untuk mengetahui daya dukung, *settlement*, stabilitas, serta merencanakan perkuatannya. Beban dari timbunan sangat dipengaruhi oleh berat jenis material dan tinggi timbunan. Selain itu, berdasarkan dokumen *Employer Requirements* EBW, beban lalu lintas ($q_{\text{lalulintas}}$) perlu diaplikasikan sebesar $1,53 \text{ t/m}^2$. Timbunan dari struktur *breakwater* menggunakan material *limestone* dengan berat jenis (γ_{batu}) sebesar $2,648 \text{ t/m}^3$. Pada analisis berikut, dipilih segmen dengan parameter tanah paling berisiko dan kritis berdasarkan analisis data tanah, yaitu Segmen 10. Contoh perhitungan beban timbunan (q_{timbunan}) pada Segmen 10 STA 1+600 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} H_{\text{timbunan}} &= 17,964 \text{ m} \\ H_{\text{total}} &= H_{\text{timbunan}} + H_{\text{lalulintas}} \\ H_{\text{lalulintas}} &= q_{\text{lalulintas}} / \gamma_{\text{batu}} \\ &= 1,53 / 2,648 \\ &= 0,578 \text{ m} \\ H_{\text{total}} &= 17,964 + 0,578 \\ &= 18,542 \text{ m} \\ q_{\text{timbunan}} &= \gamma_{\text{batu}} \times H_{\text{total}} \\ &= 2,648 \times 18,542 \\ &= 48,099 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Maka, beban yang diterima tanah dasar akibat berat timbunan dan beban lalu lintas sebesar $48,099 \text{ t/m}^2$.

6.2 Analisis *Settlement* Tanpa Perkuatan

Penurunan tanah atau *settlement* merupakan hasil dari adanya beban yang diterapkan di atas permukaan tanah yang menekan lapisan tanah di bawahnya. Lapisan tanah *compressible* yang dapat mengalami penurunan adalah lapisan tanah dengan $N\text{-SPT} \leq 10$. Pada Segmen 10, lapisan tanah yang mengalami penurunan berada pada kedalaman 0-29 m. Dengan lapisan *compressible* yang besar, maka analisis *settlement* penting untuk dilakukan.

Analisis dilakukan pada lapisan tanah *compressible* dengan menggunakan metode konvensional berupa perhitungan manual dan metode *software* Settle3D. Kedua hasil analisis kemudian dibandingkan dengan nilai deviasi harus $\leq 5\%$. Dari hasil penurunan yang telah didapatkan, kemudian dapat dicari waktu penurunannya. Analisis *settlement* pada Segmen 10 adalah sebagai berikut.

6.2.1 Perhitungan *Settlement* Metode Konvensional

6.2.1.1 Tegangan *Overburden* (σ'_0)

Tegangan *overburden* adalah tegangan yang diakibatkan oleh beban tanah sendiri. Maka, perlu dianalisis tegangannya pada setiap lapisan tanah *compressible*. Perhitungan tegangan *overburden* dapat dilakukan menggunakan Persamaan 2.42 dan Persamaan 2.43 sebagai berikut.

$$\sigma'_0 = \gamma' \times H_i$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

Berikut merupakan contoh perhitungan tegangan *overburden* (σ'_0) pada Segmen 10 STA 1+600. Data tanah yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran B.10.

- Lapisan 1 ($H_i = 5$ m)
 $\sigma'_0 = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \times H_i$
 $\sigma'_0 = (1,45 - 1,027) \times 5$
 $\sigma'_0 = 2,115 \text{ t/m}^2$
- Lapisan 2 ($H_i = 3$ m)
 $\sigma'_0 = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \times H_i$
 $\sigma'_0 = (1,45 - 1,027) \times 3$
 $\sigma'_0 = 1,269 \text{ t/m}^2$
- Lapisan 3 ($H_i = 4$ m)
 $\sigma'_0 = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \times H_i$
 $\sigma'_0 = (1,50 - 1,027) \times 4$
 $\sigma'_0 = 1,892 \text{ t/m}^2$

Perhitungan tegangan *overburden* (σ'_0) Segmen 10 STA 1+600 selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Tegangan *Overburden* (σ'_0) Segmen 10 STA 1+600

Lapisan Tanah	Tinggi Lapisan Tanah (H_i)	Berat Jenis Tanah Jenuh (γ_{sat})	Berat Jenis Air (γ_w)	Berat Jenis Efektif (γ')	Tegangan <i>Overburden</i> (σ'_0)
	m	t/m ³	t/m ³	t/m ³	t/m ²
1	2	3	4	5	6
1	5	1,45		0,423	2,115
2	3	1,45		0,423	1,269
3	4	1,50		0,473	1,892
4	4	1,50	1,027	0,473	1,892
5	3	1,55		0,523	1,569
6	4	1,60		0,573	2,292
7	6	1,60		0,573	3,438

Keterangan:

- [1]: Lapisan tanah
[2]: Kedalaman setiap lapisan tanah (m)
[3]: Berat jenis tanah jenuh (t/m³)
[4]: Berat jenis air laut = 1,025 – 1,030 (t/m³)
[5]: Berat jenis tanah efektif = [3] - [4] (t/m³)
[6]: Tegangan *overburden* = [4] × [5] (t/m²)

6.2.1.2 Penambahan Tegangan Vertikal ($\Delta\sigma'$)

Penambahan tegangan vertikal ($\Delta\sigma'$) adalah kenaikan tegangan vertikal yang terjadi pada tanah akibat adanya beban timbunan. Perhitungan penambahan tegangan vertikal dapat dilakukan menggunakan Persamaan 2.45 sebagai berikut.

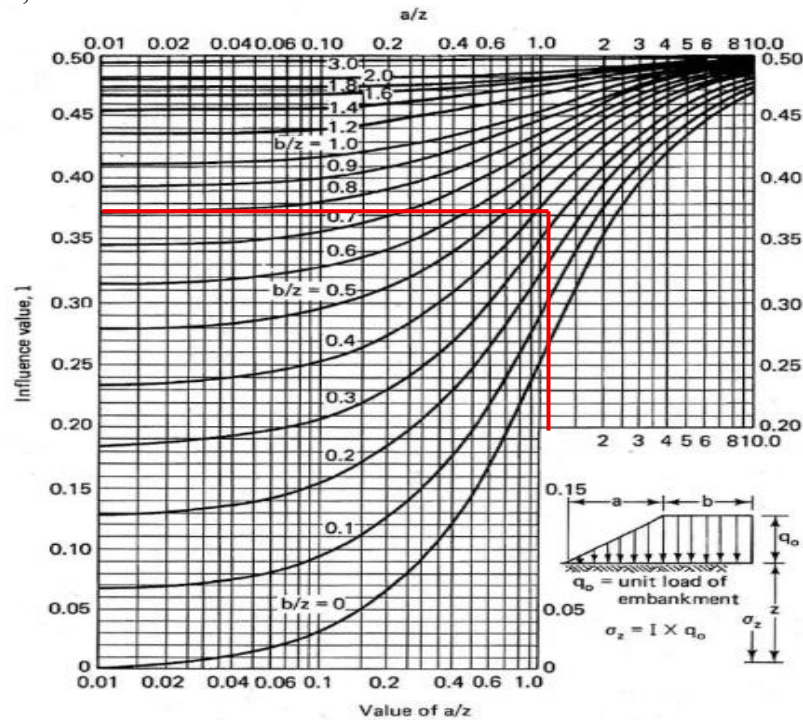
$$\Delta\sigma' = \gamma_{timbunan} \times 2 \times I \times H_r$$

Besarnya nilai pengaruh I dapat diketahui menggunakan grafik OSTERBERG dengan menentukan lebar timbunan (b), lebar kemiringan timbunan (a), serta kedalaman lapisan tanah (z).

Dimana:

$$a/z = 35,928/29 = 1,24$$

$$b/z = 10/29 = 0,34$$



Gambar 6.1 Analisis Grafik Osterberg

Dari Gambar 6.1, didapatkan nilai pengaruh I sebesar 0,37. Maka, penambahan tegangan vertikal adalah sebagai berikut.

$$\Delta\sigma' = 2,648 \times 2 \times 0,375 \times 17,964$$

$$\Delta\sigma' = 34,725 \text{ t/m}^2$$

Dari hasil perhitungan di atas, maka nilai penambahan tegangan vertikal ($\Delta\sigma'$) sebesar 34,725 t/m².

6.2.1.3 Immediate Settlement (S_i)

Immediate settlement (S_i) adalah penurunan tanah yang terjadi secara instan akibat deformasi elastis tanah setelah beban diterapkan, tanpa perubahan kadar air. Perhitungan S_i dapat dilakukan menggunakan Persamaan 2.50 dan Persamaan 2.51 sebagai berikut.

$$S_i = q \times \sum \left(\frac{H_i}{E'_i} \right)$$

$$E'_i = E_i / \left(1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu} \right)$$

Berikut merupakan contoh perhitungan *immediate settlement* (S_i) pada Segmen 10 STA 1+600. Data tanah yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran B.10.

- Lapisan 1 ($H_i = 5 \text{ m}$)

$$\frac{H_i}{E'_i} = \frac{5}{\frac{203,943}{\left(1 - \frac{2 \times 0,25^2}{1 - 0,25} \right)}}$$

$$\frac{H_i}{E'_i} = \frac{5}{244,732}$$

$$\frac{H_i}{E'_i} = 0,0204$$

- Lapisan 2 ($H_i = 3$ m)

$$\frac{H_i}{E'_i} = \frac{3}{\frac{282,257}{\left(1 - \frac{2 \times 0,25^2}{1 - 0,25}\right)}}$$

$$\frac{H_i}{E'_i} = \frac{3}{379,962}$$

$$\frac{H_i}{E'_i} = 0,0079$$

- Lapisan 3 ($H_i = 4$ m)

$$\frac{H_i}{E'_i} = \frac{4}{\frac{282,257}{\left(1 - \frac{2 \times 0,35^2}{1 - 0,35}\right)}}$$

$$\frac{H_i}{E'_i} = \frac{4}{620,592}$$

$$\frac{H_i}{E'_i} = 0,0064$$

Perhitungan tersebut dilakukan seterusnya hingga lapisan tanah terakhir. Setelah nilai H_i/E'_i diketahui kemudian dijumlahkan dari hasil lapisan satu hingga terakhir. Untuk mendapatkan nilai *immediate settlement* (S_i), maka total jumlah H_i/E'_i dikalikan dengan nilai q_{timbunan} . Perhitungan *immediate settlement* (S_i) Segmen 10 STA 1+600 selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 6.2.

Tabel 6.2 *Immediate settlement* (S_i) Segmen 10 STA 1+600

Lapisan Tanah	Tinggi Lapisan Tanah (H_i)	Modulus Elastisitas Tanah (E_i)	Angka Poisson (μ)	Modulus Elastisitas Oedometrik (E'_i)	H_i/E'_i	Beban Timbunan (q_{timbunan})	<i>Immediate Settlement</i> (S_i)
	m	t/m ²		t/m ²		t/m ²	m
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5	203,943	0,25	244,732	0,0204		
2	3	282,257	0,25	379,962	0,0079		
3	4	386,676	0,35	620,592	0,0064		
4	4	491,095	0,40	1052,347	0,0038	49,099	2,107
5	3	595,514	0,45	2430,707	0,0012		
6	4	752,143	0,45	3070,016	0,0013		
7	6	815,773	0,45	3329,735	0,0018		

Keterangan:

[1]: Lapisan tanah

[2]: Kedalaman setiap lapisan tanah (m)

[3]: Modulus elastisitas tanah (t/m²)

[4]: Angka pori

[5]: Modulus elastisitas tanah oedometrik = $[3] / \left(1 - \frac{2[4]^2}{1-[4]}\right)$ (t/m²)

[6]: [2]/[5]

[7]: Beban timbunan (t/m^2)

[8]: *Immediate settlement* = $\Sigma[6] \times [7]$

Dari hasil perhitungan total jumlah H_i/E'_i dikalikan dengan nilai q_{timbunan} , maka didapatkan nilai *immediate settlement* (S_i). Berdasarkan Tabel 6.2, nilai *immediate settlement* pada Segmen 10 STA 1+600 sebesar 2,107 m.

6.2.1.4 Konsolidasi Primer (S_c)

Konsolidasi primer (S_c) adalah penurunan tanah akibat keluarnya air dari pori-pori tanah yang menyebabkan perubahan volume. Dalam menentukan konsolidasi primer perlu mengetahui nilai *overconsolidation* (*Overconsolidation Ratio*, OCR) yang didefinisikan sebagai nilai banding tekanan prakonsolidasi terhadap tegangan *overburden* efektif seperti dalam Persamaan 2.46. Tanah yang memiliki nilai OCR=1 termasuk ke dalam *Normally Consolidated* (NC), sedangkan OCR>1 termasuk ke dalam *Overconsolidated* (OC).

$$OCR = \frac{P_c}{\sigma'_0}$$

Berikut merupakan contoh perhitungan OCR pada Segmen 10 STA 1+600. Data tanah yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran B.10.

- Lapisan 1 ($H_i = 5$ m)

$$OCR = \frac{2,8}{2,115}$$

$$OCR = 1,324 > OK$$

Maka, tanah lapisan 1 termasuk ke dalam *Overconsolidated* (OC).

- Lapisan 2 ($H_i = 3$ m)

$$OCR = \frac{3}{1,269}$$

$$OCR = 2,364 > OK$$

Maka, tanah lapisan 2 termasuk ke dalam *Overconsolidated* (OC).

- Lapisan 3 ($H_i = 4$ m)

$$OCR = \frac{5}{1,892}$$

$$OCR = 2,643 > OK$$

Maka, tanah lapisan 3 termasuk ke dalam *Overconsolidated* (OC).

Perhitungan OCR selengkapnya pada setiap lapisan tanah dapat dilihat pada Tabel 6.3.

Tabel 6.3 Nilai OCR Tanah

Lapisan Tanah	Tekanan Prakonsolidasi (P_c') t/m^2	Tegangan <i>Overburden</i> (σ'_0) t/m^2	OCR (P_c'/σ'_0)	Ket
1	2	3	4	5
1	2,8	2,115	1,324	OC
2	3	1,269	2,364	OC
3	5	1,892	2,643	OC
4	6	1,892	3,171	OC
5	6,5	1,569	4,143	OC
6	7	2,292	3,054	OC
7	7,5	3,438	2,181	OC

Keterangan:

[1]: Lapisan tanah

[2]: Tekanan prakonsolidasi (t/m^2)

[3]: Tegangan *overburden* (t/m^2)

[4]: Nilai OCR = [2]/[3]

[5]: Keterangan NC atau OC

Berdasarkan Tabel 6.3 dapat disimpulkan bahwa seluruh lapisan tanah yang dianalisis termasuk ke dalam *Overconsolidated* (OC). Selanjutnya dapat dihitung nilai S_c dengan menggunakan Persamaan 2.53 dan Persamaan 2.54. Penggunaan kedua persamaan tersebut ditentukan dari nilai $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$. Apabila $\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq P_c$, maka yang dipakai adalah Persamaan 2.53. Jika $P_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$, maka yang dipakai adalah Persamaan 2.54. Berikut merupakan contoh perhitungan nilai $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ pada Segmen 10 STA 1+600. Data yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran B.10. dan perhitungan sebelumnya.

- Lapisan 1 ($H_i = 5$ m)

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma' = 2,115 + 34,725$$

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma' = 36,840 > 2,8$$

Maka, untuk perhitungan S_c tanah lapisan 1 menggunakan Persamaan 2.54.

- Lapisan 2 ($H_i = 3$ m)

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma' = 1,269 + 34,725$$

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma' = 35,994 > 3$$

Maka, untuk perhitungan S_c tanah lapisan 2 menggunakan Persamaan 2.54.

- Lapisan 3 ($H_i = 4$ m)

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma' = 1,892 + 34,725$$

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma' = 36,617 > 5$$

Maka, untuk perhitungan S_c tanah lapisan 3 menggunakan Persamaan 2.54.

Penentuan rumus S_c selengkapnya pada setiap lapisan tanah dapat dilihat pada Tabel 6.4.

Tabel 6.4 Penentuan Rumus Konsolidasi Primer

Lapisan Tanah	Tekanan Prakonsolidasi (P_c')	Tegangan <i>Overburden</i> (σ'_0)	Penambahan Tegangan Vertikal ($\Delta\sigma'$)	$\sigma'_0 + \Delta\sigma'$	Ket
	t/m^2	t/m^2	t/m^2	t/m^2	
1	2	3	4	5	6
1	2,8	2,115	34,725	36,840	$P_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$
2	3	1,269		35,994	$P_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$
3	5	1,892		36,617	$P_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$
4	6	1,892		36,617	$P_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$
5	6,5	1,569		36,294	$P_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$
6	7	2,292		37,017	$P_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$
7	7,5	3,438		38,163	$P_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$

Keterangan:

[1]: Lapisan tanah

[2]: Tekanan prakonsolidasi (t/m^2)

[3]: Tegangan *overburden* (t/m^2)

[4]: Penambahan tegangan vertikal (t/m^2)

[5]: [3]+[4] (t/m^2)

[6]: Penentuan rumus

Dari Tabel 6.4 dapat disimpulkan bahwa seluruh lapisan tanah yang dianalisis memiliki nilai $P_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$. Oleh karena itu, perhitungan S_c menggunakan Persamaan 2.54 sebagai berikut.

$$S_c = \frac{C_r H_i}{1 + e_0} \log\left(\frac{P_c}{\sigma'_0}\right) + \frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{P_c}\right) ; \sigma'_0 < P_c < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$$

Berikut merupakan contoh perhitungan konsolidasi primer (S_c) pada Segmen 10 STA 1+600. Data yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran B.10 dan perhitungan sebelumnya.

- Lapisan 1 ($H_i = 5$ m)

$$S_c = \frac{0,06 \times 5}{1 + 3} \log\left(\frac{2,8}{2,115}\right) + \frac{0,64 \times 5}{1 + 3} \log\left(\frac{36,840}{2,8}\right)$$

$$S_c = 0,572 \text{ m}$$

Maka, lapisan tanah 1 mengalami konsolidasi primer sebesar 0,572 m.

- Lapisan 2 ($H_i = 3$ m)

$$S_c = \frac{0,07 \times 3}{1 + 2,75} \log\left(\frac{3}{1,269}\right) + \frac{0,75 \times 3}{1 + 2,75} \log\left(\frac{35,994}{3}\right)$$

$$S_c = 0,667 \text{ m}$$

Maka, lapisan tanah 2 mengalami konsolidasi primer sebesar 0,667 m.

- Lapisan 3 ($H_i = 4$ m)

$$S_c = \frac{0,07 \times 4}{1 + 2,5} \log\left(\frac{5}{1,892}\right) + \frac{0,77 \times 4}{1 + 2,5} \log\left(\frac{36,617}{5}\right)$$

$$S_c = 0,586 \text{ m}$$

Maka, lapisan tanah 3 mengalami konsolidasi primer sebesar 0,586 m.

Perhitungan nilai konsolidasi primer (S_c) selengkapnya pada setiap lapisan tanah dapat dilihat pada Tabel 6.5.

Tabel 6.5 Nilai Konsolidasi Primer Setiap Lapisan Tanah

Lapisan Tanah	Tinggi Lapisan Tanah (H_i) m	Tekanan Pra-konsolidasi (P_c') t/m ²	Indeks Re-kompresi (C_r)	Indeks Kompresi (C_c)	Angka Pori (e_0)	$\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ t/m ²	Konsolidasi Primer (S_c) m
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5	2,8	0,06	0,64	3,00	36,840	0,572
2	3	3	0,07	0,75	2,75	35,994	0,667
3	4	5	0,07	0,77	2,50	36,617	0,586
4	4	6	0,07	0,78	2,25	36,617	0,555
5	3	6,5	0,08	0,85	2,25	36,294	0,574
6	4	7	0,08	0,85	2,00	37,017	0,551
7	6	7,5	0,08	0,86	2,00	38,163	0,556
Total							4,061

Keterangan:

[1]: Lapisan tanah

[2]: Kedalaman setiap lapisan tanah

[3]: Tekanan prakonsolidasi (t/m²)

[4]: Indeks rekompresi

[5]: Indeks kompresi

[6]: Angka pori

[7]: Tegangan *overburden* + tegangan penambahan vertikal (t/m^2)

$$[8]: \text{Konsolidasi primer} = \frac{[4] \times [2]}{1+[6]} \log\left(\frac{[3]}{[7]}\right) + \frac{[5] \times [2]}{1+[6]} \log\left(\frac{[7]}{[3]}\right) \text{ (m)}$$

Berdasarkan Tabel 6.5, total konsolidasi primer (S_c) dari 7 lapisan tanah pada Segmen 10 STA 1+600 sebesar 4,061 m.

6.2.1.5 Total Settlement (S_T)

Total *settlement* atau penurunan tanah merupakan total dari nilai *immediate settlement*, konsolidasi primer, dan konsolidasi sekunder. Penurunan konsolidasi sekunder sangat kecil dan tidak signifikan pada jenis tanah lempung anorganik *overconsolidated*. Oleh karena itu, berdasarkan hasil analisis sebelumnya bahwa seluruh lapisan tanah termasuk ke dalam OC, maka konsolidasi sekunder diasumsikan nol. Nilai *total settlement* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.47.

$$S_T = S_i + S_c$$

$$S_T = 2,107 + 4,061$$

$$S_T = 6,168 \text{ m}$$

Maka, nilai penurunan total berdasarkan perhitungan konvensional pada Segmen 10 STA 1+600 sebesar 6,168 m.

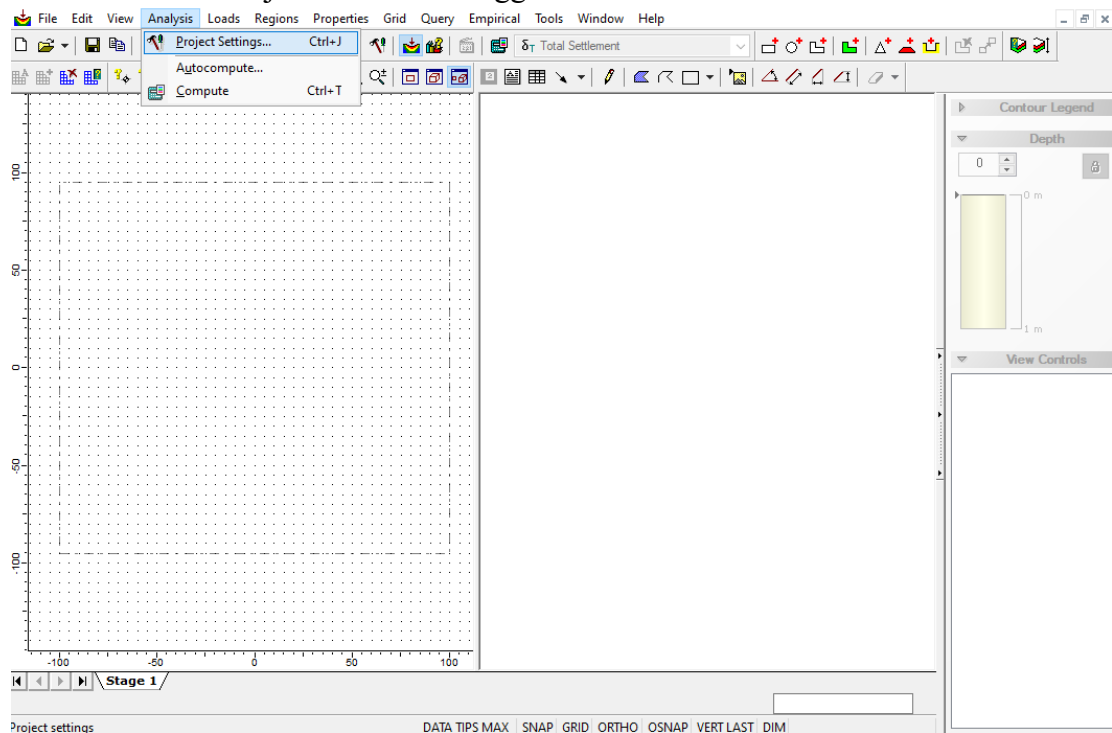
6.2.2 Analisis Settlement Pada Software Settle3D

6.2.2.1 Pemodelan Software Settle3D

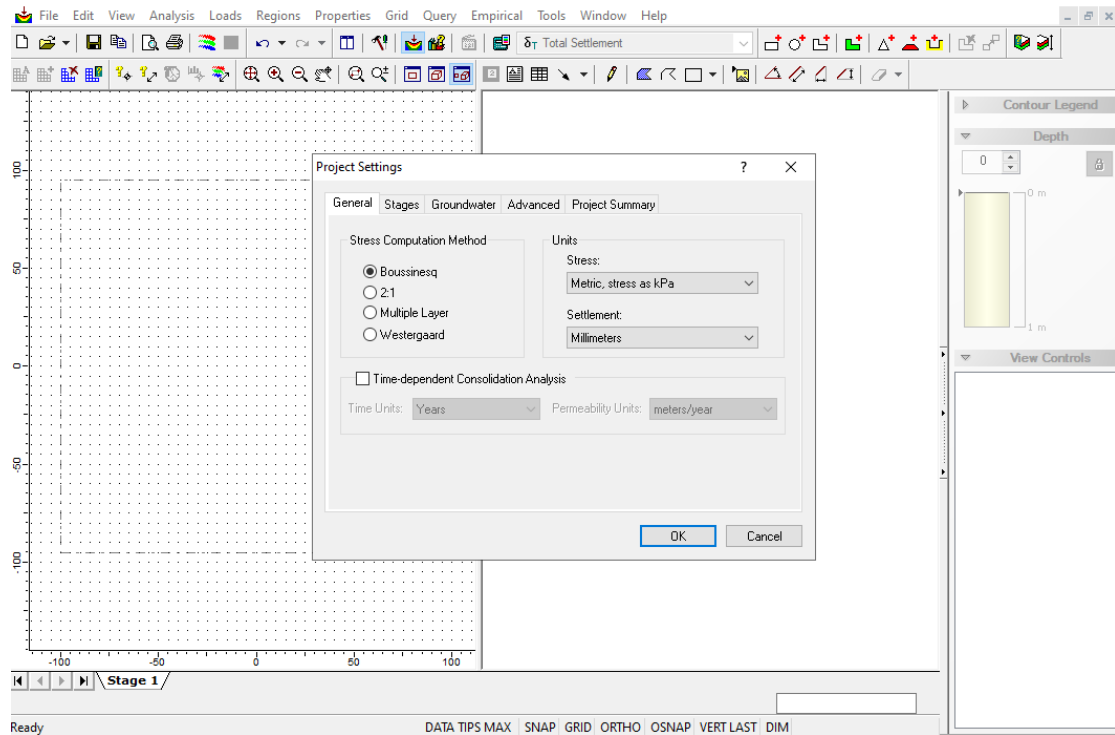
Software Settle3D digunakan untuk menganalisis besarnya *settlement* pada suatu kondisi tanah. Langkah-langkah dalam pemodelannya adalah sebagai berikut.

1. Membuka dan Mengatur File

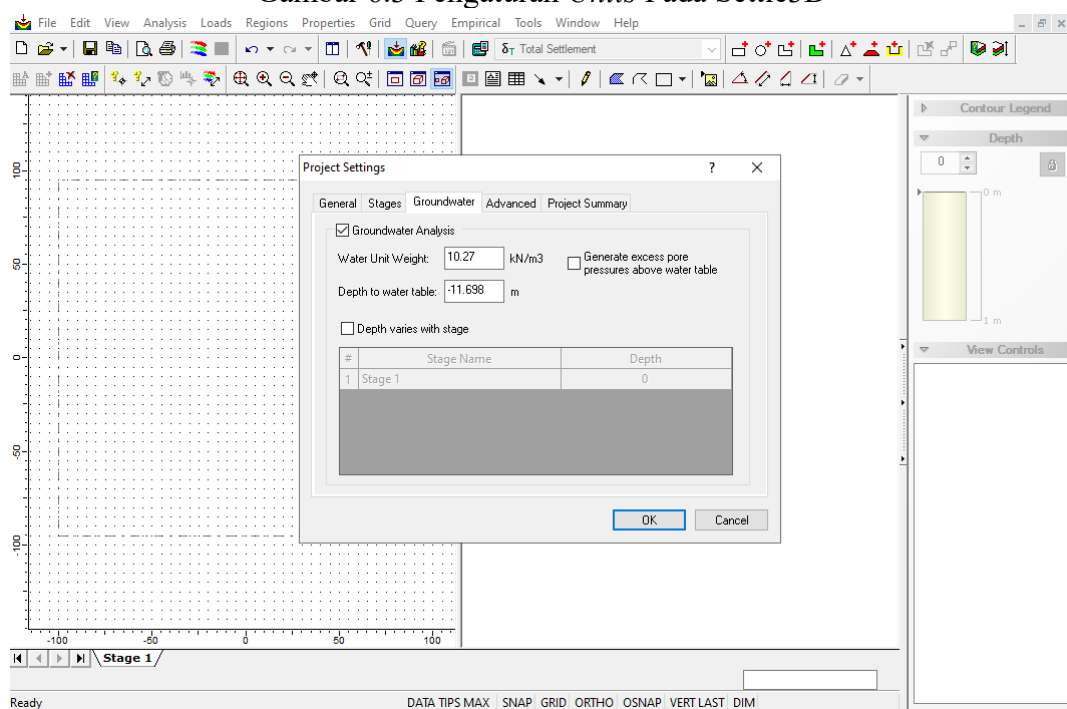
Buka *file* baru kemudian pilih “*Analysis*” dan “*Project Settings*”. Sesuaikan satuan serta masukkan data berat jenis air dan ketinggian muka air dari tanah dasar.



Gambar 6.2 Project Settings Pada Settle3D



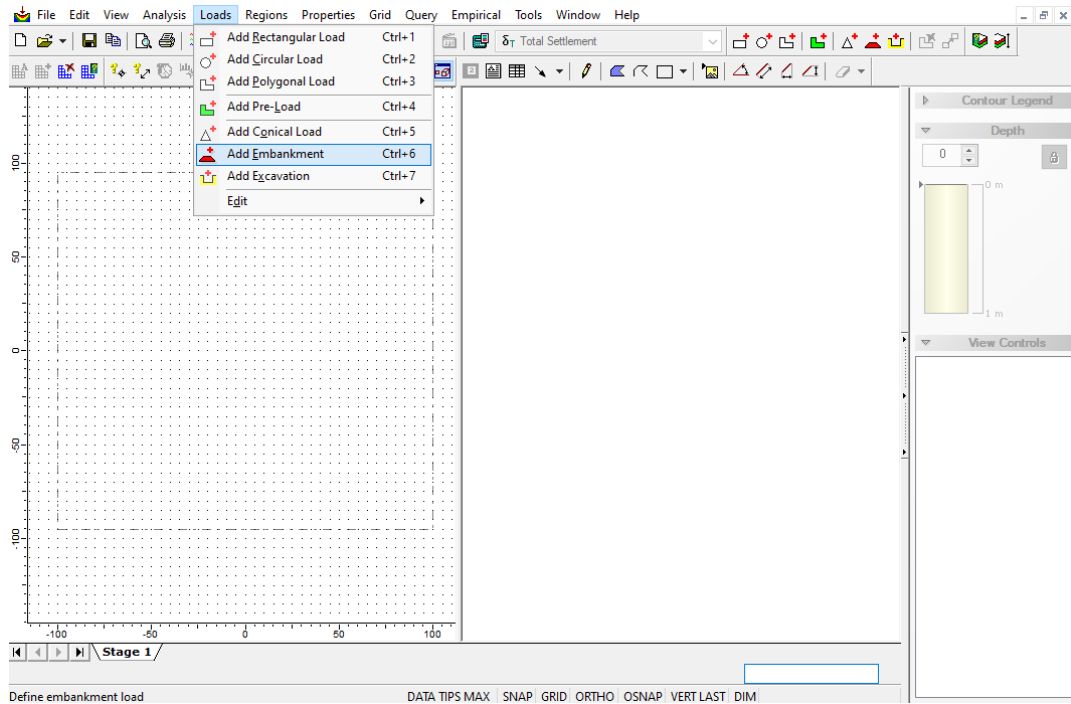
Gambar 6.3 Pengaturan *Units* pada Settle3D



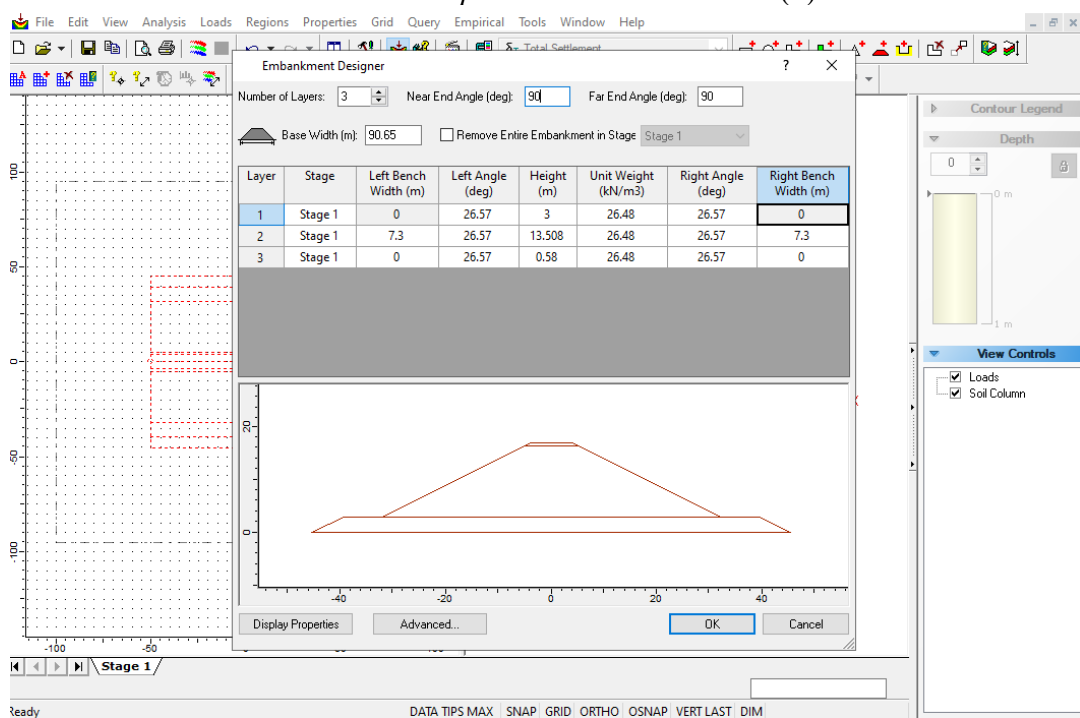
Gambar 6.4 *Input Data Muka Air*

2. Menambahkan Beban Timbunan

Pilih “*Loads*” kemudian “*Add Embankment*”. Sesuaikan posisi timbunan pada titik koordinat berdasarkan kondisi *existing*.



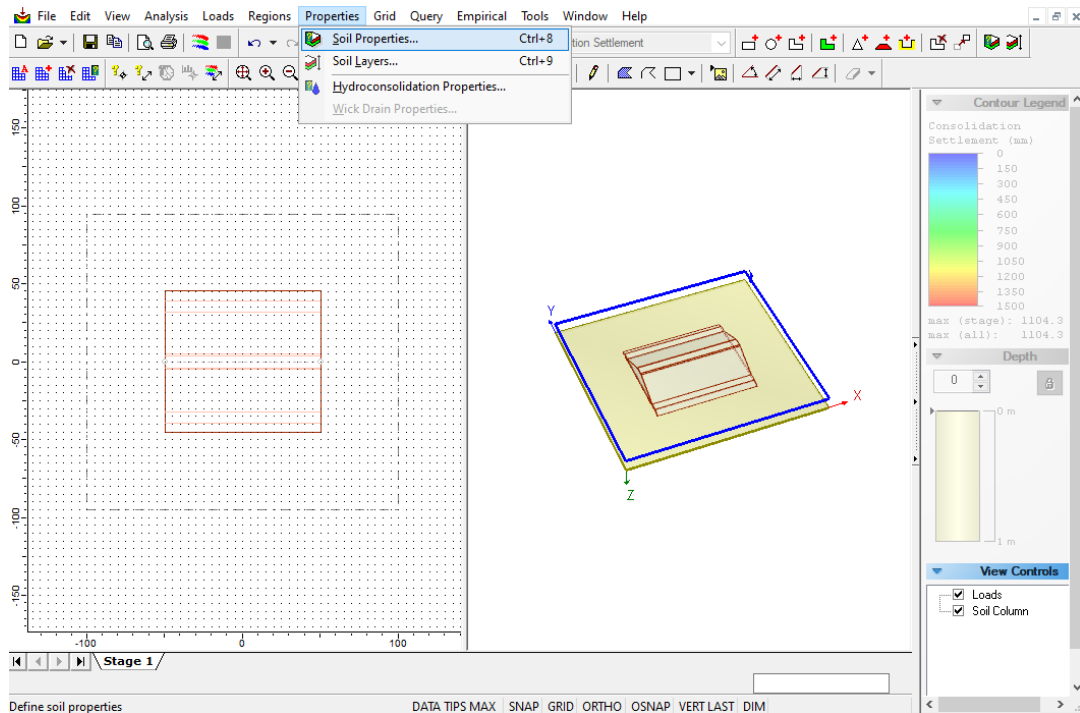
Gambar 6.5 *Input Geometri Timbunan (1)*



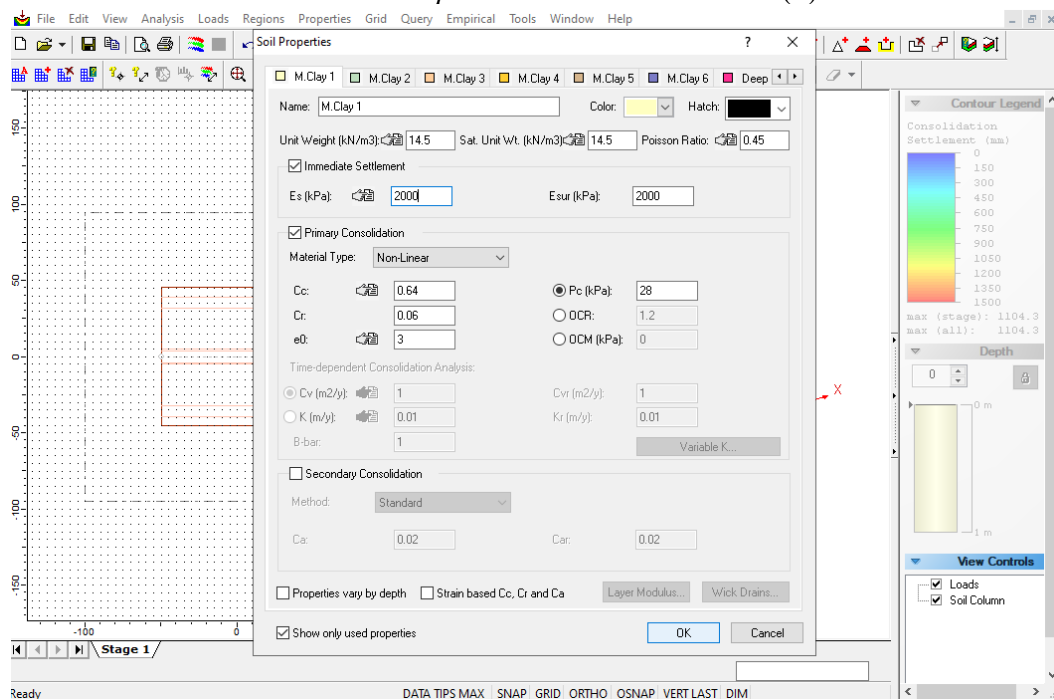
Gambar 6.6 *Input Geometri Timbunan (2)*

3. Masukkan Parameter Tanah

Pilih “*Properties*” kemudian “*Soil Properties*”. Masukkan parameter pada setiap jenis tanah sesuai data uji. Pada bagian tersebut juga perlu ditentukan jenis tanah yang mengalami konsolidasi primer dan sekunder. Parameter tanah pada *software* Settle3D dapat dilihat pada Lampiran B.



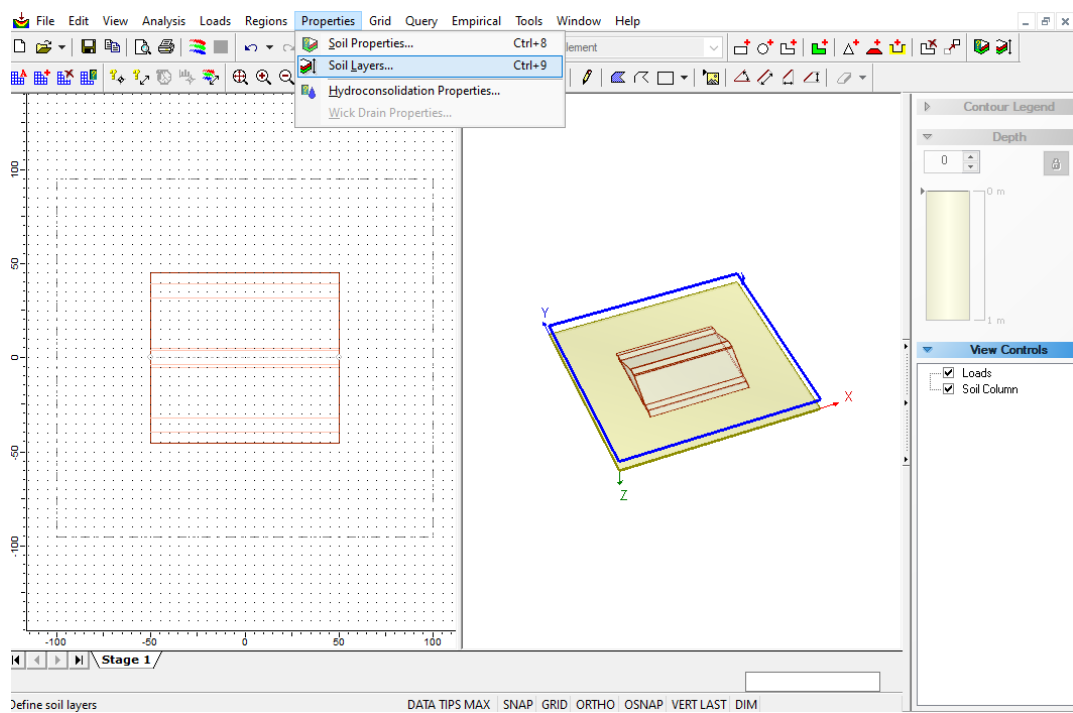
Gambar 6.7 Input Data Parameter Tanah (1)



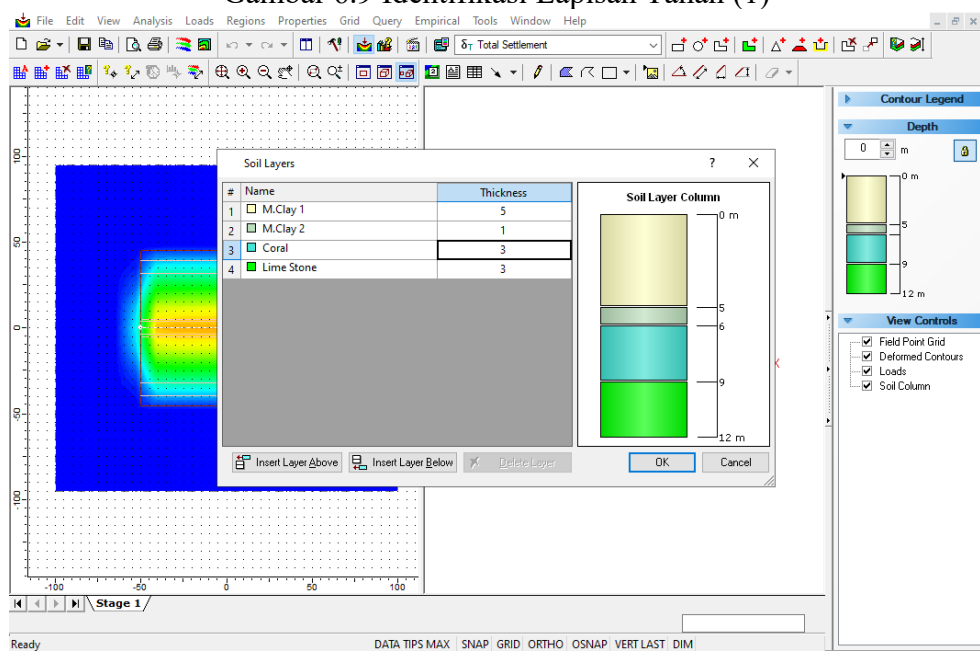
Gambar 6.8 Input Data Parameter Tanah (2)

4. Identifikasi Jenis Tanah Pada Setiap Lapisan

Pilih “*Properties*” kemudian “*Soil Layers*”. Identifikasi jenis tanah dari lapisan paling atas hingga paling bawah. Masukkan kedalaman dari setiap lapisan tanah.



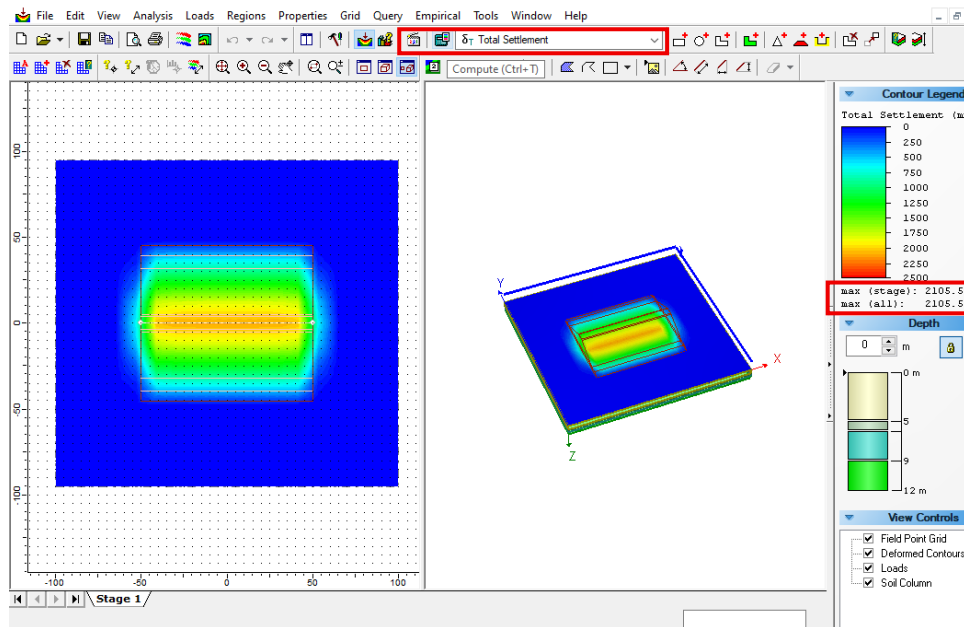
Gambar 6.9 Identifikasi Lapisan Tanah (1)



Gambar 6.10 Identifikasi Lapisan Tanah (2)

5. Compute Total Settlement

Pada “Data Type” pilih *Total Settlement*, kemudian klik “Compute” dan hasil dari *Total Settlement* akan muncul pada bagian kanan layar.



Gambar 6.11 Compute Hasil *Total Settlement*

6.2.2.2 *Total Settlement*

Pada *software* Settle3D, analisis dilakukan pada seluruh segmen menggunakan parameter tanah pada Lampiran B.10. Tabel 6.6 berikut merupakan rekap nilai S_i , S_c , dan S_T dari setiap segmen.

Tabel 6.6 *Total Settlement* Pada Settle3D

Segmen	Penurunan Segera (S_i)	Konsolidasi Primer (S_c)	Total Penurunan (S_T)
	m	m	m
1	2	3	4
1	1,499	2,001	3,500
2	1,001	1,104	2,106
3	1,873	3,092	4,965
4	1,839	3,487	5,326
5	1,838	3,853	5,691
6	1,980	3,996	5,976
7	2,129	3,984	6,114
8	2,101	4,037	6,138
9	2,204	4,167	6,371
10	2,264	4,184	6,449
11	2,168	4,221	6,389

Keterangan:

[1]: Segmen setiap *borehole*

[2]: Penurunan segera (m)

[3]: Konsolidasi primer (m)

[4]: [2]+ [3] (m)

Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa Segmen 10 memiliki nilai penurunan total (S_T) yang paling besar, yaitu 6,449 m. Sebaliknya, Segmen 2 memiliki nilai penurunan total (S_T) yang paling kecil, yaitu 2,106 m.

6.2.3 Perbandingan Hasil *Settlement*

Dari hasil analisis *settlement* menggunakan perhitungan konvensional dan *software* Settle3D dapat ditentukan Kesalahan Absolut Rerata (KAR). Apabila nilai KAR kurang dari 5%, maka kedua hasil analisis dianggap akurat. Namun, jika $KAR > 5\%$, maka perlu dilakukan analisis ulang dari nilai *settlement*. Berikut merupakan perhitungan KAR dari kedua nilai *settlement* pada Segmen 10.

$$KAR = \frac{6,168 - 6,449}{6,168}$$

$$KAR = 0,04554 = 4,6\%$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, didapatkan nilai KAR sebesar 4,6%. Maka, kedua hasil analisis dianggap akurat dan dapat digunakan untuk analisis selanjutnya.

6.2.4 Waktu Konsolidasi (*t*)

Waktu konsolidasi adalah periode yang dibutuhkan tanah (terutama tanah lempung) untuk mengalami pemampatan akibat keluarnya air dari pori-pori tanah setelah diberi beban. Jika waktu konsolidasi tidak diperhitungkan, struktur yang didirikan di atas tanah yang masih mengalami penurunan dapat mengalami kerusakan struktural. Selain itu, waktu konsolidasi juga memiliki pengaruh penting terhadap durasi pekerjaan serta perencanaan jadwal proyek. Waktu konsolidasi dipengaruhi oleh derajat konsolidasi (*U*) dan koefisien konsolidasi vertikal (*C_v*). Pada analisis ini dipilih derajat konsolidasi sebesar 90% karena pada titik ini sebagian besar penurunan primer telah terjadi, sementara sisa penurunan selanjutnya (konsolidasi sekunder) berlangsung sangat lambat dan tidak terlalu berpengaruh terhadap stabilitas bangunan. Waktu konsolidasi (*t*) dan koefisien konsolidasi vertikal gabungan (*C_{v gab}*) dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.59 dan 2.62.

$$t = \frac{T_v \times H_i^2}{C_v}$$

$$C_{v_{gab}} = \frac{(H_1 + H_2 + \dots + H_n)^2}{\left[\frac{H_1}{\sqrt{C_{v_1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v_2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{v_n}}} \right]^2}$$

Data yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran B.10. Berikut merupakan perhitungan nilai *C_{v gab}* pada Segmen 10 STA 1+600.

$$C_{v_{gab}} = \frac{(5 + 3 + \dots + 6)^2}{\left[\frac{5}{\sqrt{8,7, E - 08}} + \frac{3}{\sqrt{6,1, E - 08}} + \dots + \frac{6}{\sqrt{6,6, E - 08}} \right]^2}$$

$$C_{v_{gab}} = 6,9, E - 08 \text{ m}^2/\text{s}$$

Maka, *C_{v gab}* pada Segmen 10 STA 1+600 sebesar 6,9,E-08 m²/s. Selanjutnya dapat dihitung nilai *t* dengan derajat konsolidasi 90% sebagai berikut.

$$t = \frac{0,848 \times 29^2}{6,9 \times 10^{-8}}$$

$$t = 331,284 \text{ tahun}$$

Maka, lapisan tanah memerlukan waktu 331,284 tahun untuk mencapai nilai U sebesar 90%. Selanjutnya dihitung penurunan lapisan tanah pada waktu ke- t (S_t) menggunakan Persamaan 2.60 sebagai berikut.

$$S_t = U \times S_c$$

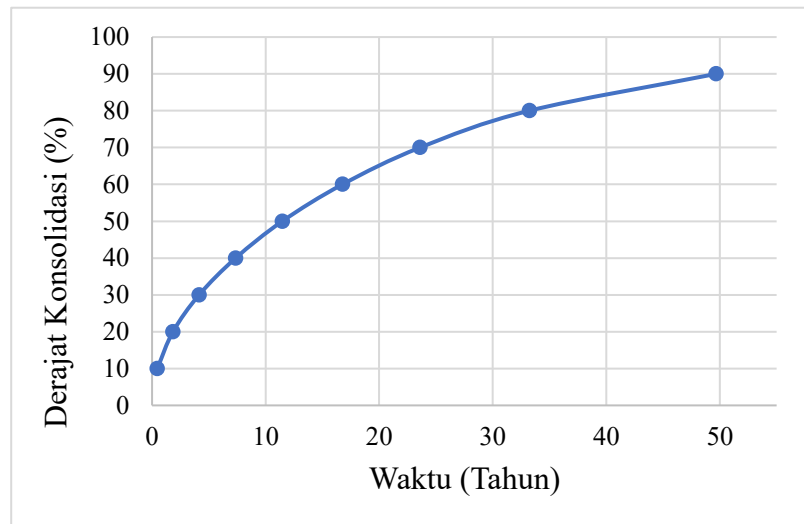
$$S_t = 90\% \times 4,184$$

$$S_t = 3,766 \text{ m}$$

Perhitungan waktu konsolidasi (t) dan penurunan lapisan tanah pada waktu ke- t (S_t) Segmen 10 STA 1+600 selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 6.7.

Tabel 6.7 Waktu Penurunan

Lapisan Tanah	Tinggi Lapisan (H _i)	Koef. Konsolidasi Vertikal (C _v)	C _v gab	Derajat Konsolidasi (U%)	Waktu Konsolidasi(t)									
					10	20	30	40	50	60	70	80	90	
	m	m ² /s	m ² /s	Faktor Waktu (T _v)	0,008	0,031	0,071	0,126	0,196	0,286	0,403	0,567	0,848	
1	5	8,7,E-08												
2	3	6,1,E-08												
3	4	8,8,E-08												
4	4	7,5,E-08	6,9,E-08	Tahun (t)	3,070	12,278	27,626	49,112	76,516	111,839	157,378	221,562	331,284	
5	3	5,1,E-08												
6	4	6,1,E-08												
7	6	6,6,E-08												
Penurunan Pada Waktu ke-t (S _t)					0,418	0,837	1,255	1,674	2,092	2,511	2,929	3,347	3,766	



Gambar 6.12 Grafik Derajat Konsolidasi Pada Waktu ke- t

Berdasarkan Tabel 6.7 dan Gambar 6.12, untuk mencapai derajat konsolidasi 90% membutuhkan waktu 49,675 tahun pada Segmen 10 STA 1+600. Pada waktu tersebut konsolidasi yang diperoleh sebesar 3,766 m dari total 4,184 m. Proyek EBW dimulai pada tahun 2024 dan direncanakan akan selesai pada tahun 2026. Dari waktu konsolidasi tersebut dapat disimpulkan bahwa proyek akan mengalami kemunduran jadwal karena durasi pekerjaan yang bertambah apabila *settlement* tidak dikendalikan. Oleh karena itu, diperlukan perkuatan tanah dasar untuk mengurangi *settlement* pada Proyek EBW.

6.3 Analisis Daya Dukung Tanah Tanpa Perkuatan

Analisis daya dukung tanah dasar dilakukan untuk mengetahui kemampuan tanah dasar dalam menahan beban di atasnya. Perhitungan daya dukung pada tanah heterogen dapat dilakukan menggunakan rumus Terzaghi dengan asumsi kegagalan akan terjadi pada lapisan tanah terlemah. Tanah yang paling lemah pada Segmen 10 berada pada lapisan pertama karena memiliki kuat geser paling rendah. Daya dukung tanah dasar tanpa perkuatan dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.63. Dengan kohesi (c) berdasarkan Lampiran B.10 sebesar $1,356 \text{ t/m}^2$ dan N_c berdasarkan Tabel 2.18 sebesar 7,87, maka daya dukung tanah adalah sebagai berikut.

$$q_u = cN_c$$

$$q_u = 1,356 \times 7,87$$

$$q_u = 10,673 \text{ t/m}^2$$

$$SF = \frac{q_u}{q_{izin}}$$

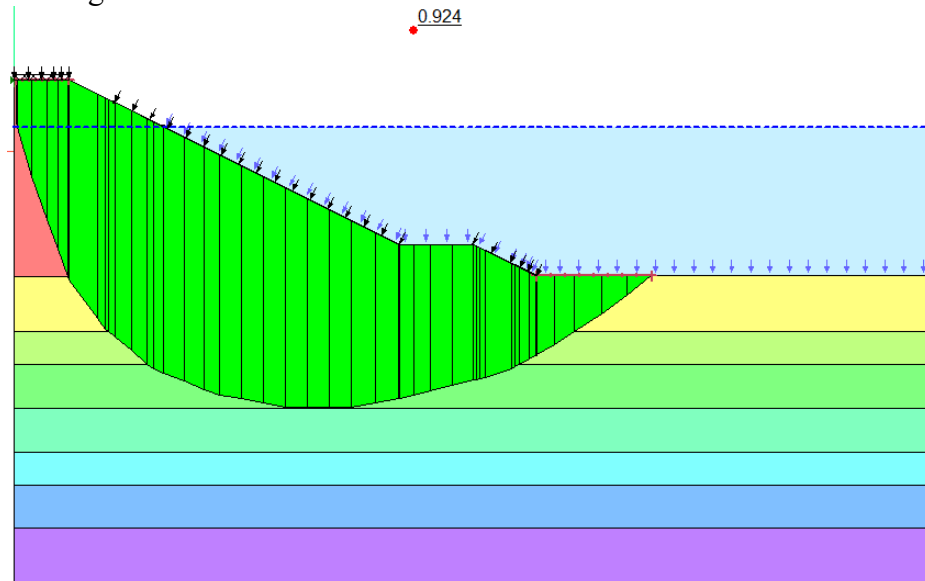
$$SF = \frac{10,673}{49,099}$$

$$SF = 0,22 < 1,2 \text{ (Tidak OK)}$$

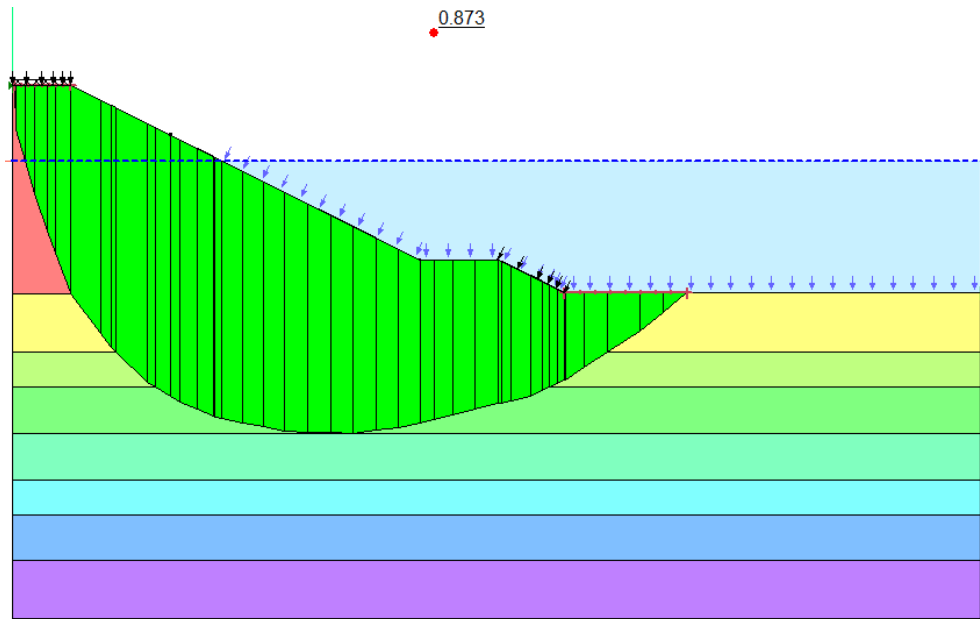
Berdasarkan perhitungan di atas, didapatkan nilai SF daya dukung tanah dasar sebesar 0,22 yang lebih kecil dari nilai 1,2 yang diisyaratkan pada Proyek EBW. Maka, dapat disimpulkan tanah dasar tidak dapat menahan beban dari timbunan di atasnya, sehingga diperlukan perkuatan tanah dasar.

6.4 Analisis Stabilitas Timbunan Tanpa Perkuatan

Analisis stabilitas timbunan *breakwater* tanpa perkuatan dilakukan menggunakan program SLOPE/W Geostudio 2018. Tahapan yang dilakukan dimulai dengan pemodelan lereng pada aplikasi sesuai dengan data geometri potongan melintang, memasukkan data yang sudah diperoleh, dan selanjutnya dianalisis hingga memperoleh nilai SF (*safety factor*). Nilai SF yang disyaratkan pada Proyek EBW sebesar 1,0 untuk gempapada dan 1,3 untuk tanpa gempapada. Kondisi yang dianalisis adalah muka air laut pada posisi HHWL dan LLWL. Berikut merupakan analisis stabilitas pada Segmen 10 STA 1+600.

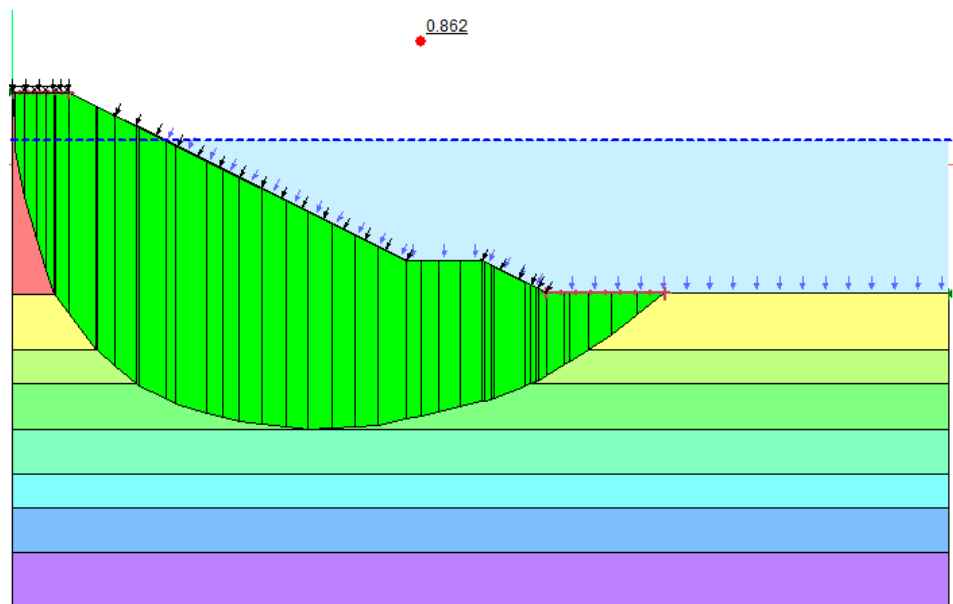


Gambar 6.13 Stabilitas Struktur *Existing* Tanpa Gempa Kondisi HHWL

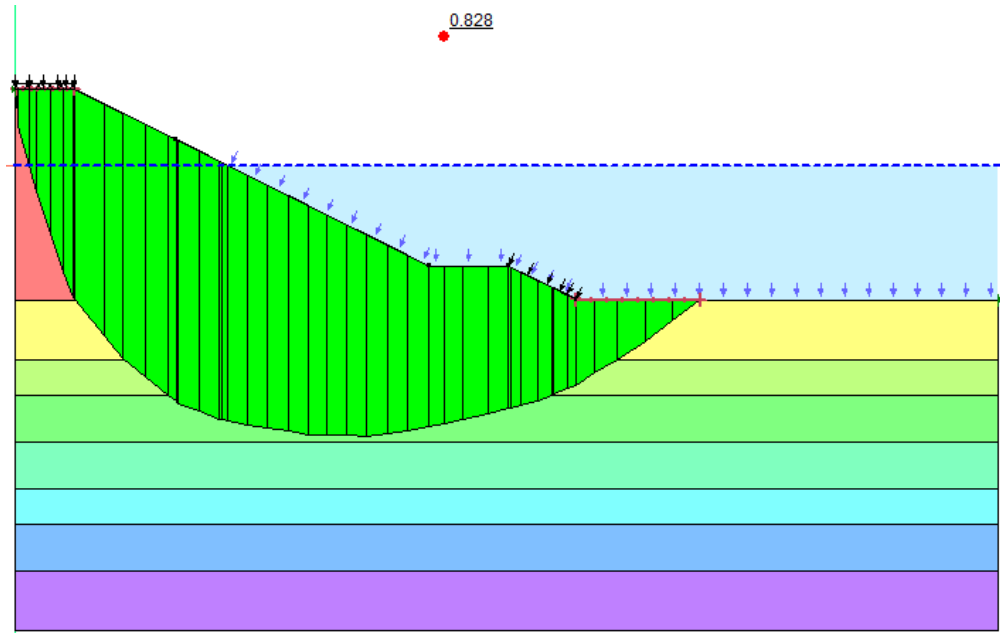


Gambar 6.14 Stabilitas Struktur *Existing* Tanpa Gempa Kondisi LLWL

Gambar 6.13 dan 6.14 merupakan analisis stabilitas lereng *breakwater* pada Segmen 10 STA 1+600 dengan kondisi tanpa gempa. Beban yang bekerja pada timbunan ditambahkan sebesar 15 kN/m^3 pada bagian atas *breakwater* sebagai beban hidup untuk kendaraan dan $3,336 \text{ kN/m}^3$ pada dinding *seaside* untuk beban gelombang. Geometri timbunan dan lapisan tanah dasar disesuaikan pada desain dengan data tanah dengan elevasi muka air berada di +2,19 m. Hasil analisis pada SLOPE/W Geostudio 2018 menunjukkan nilai SF sebesar 0,924 pada kondisi HHWL dan 0,873 pada kondisi LLWL tanpa gempa. Oleh karena itu, nilai SF lebih kecil dari yang disyaratkan, sehingga *breakwater* akan mengalami keruntuhan.



Gambar 6.15 Stabilitas Struktur *Existing* Dengan Gempa Kondisi HHWL



Gambar 6.16 Stabilitas Struktur *Existing* Dengan Gempa Kondisi LLWL

Gambar 6.15 dan 6.16 merupakan analisis stabilitas lereng *breakwater* pada Segmen 10 STA 1+600 dengan kondisi gempa. Beban, geometri timbunan dan tanah dasar, serta elevasi muka air disesuaikan dengan analisis kondisi tanpa gempa. Berdasarkan SNI 8460:2017 dan SNI 1726:2019, analisis stabilitas timbunan direkomendasikan menggunakan pengaruh dari koefisien horizontal gempa dengan menggunakan Persamaan 2.35 dan 2.36 sebagai berikut.

$$kh = 0,5 \times \frac{PGA_M}{g}$$

$$PGA_M = F_{PGA} \times PGA$$

Nilai PGA didapatkan dari Gambar 2.22 dengan PGA sebesar 0,275 dan F_{PGA} sebesar 1,1 berdasarkan Tabel 2.5. Perhitungan nilai kh adalah sebagai berikut.

$$kh = 0,5 \times \frac{(0,275 \times 1,1)}{9,81}$$

$$kh = 0,015$$

Maka, beban gempa koefisien horizontal ditambahkan sebesar 0,015. Hasil analisis pada SLOPE/W Geostudio 2018 menunjukkan nilai SF sebesar 0,862 pada kondisi HHWL dan 0,828 pada kondisi LLWL dengan gempa. Oleh karena itu, nilai SF lebih kecil dari yang disyaratkan, sehingga *breakwater* akan mengalami keruntuhan.

Berdasarkan analisis *settlement* dan stabilitas yang dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa tanah dasar pada lokasi *breakwater* tidak dapat menopang timbunan di atasnya. Oleh karena itu, diperlukan perkuatan tanah dasar untuk meningkatkan stabilitas serta mengurangi *settlement* agar sesuai dengan SF yang disyaratkan dan proyek dapat diselesaikan tepat waktu.

6.5 Perencanaan *Geotextile-Encased Stone Column* (GESC)

Dari hasil analisis sebelumnya diketahui tanah dasar berpotensi mengalami penurunan yang besar dalam waktu lama serta stabilitas timbunan kurang dari SF yang disyaratkan. Hal tersebut menandakan bahwa tanah dasar tidak mampu menahan timbunan secara memadai. Oleh karena itu, perlu dilakukan perkuatan tanah dasar.

Perkuatan tanah dasar yang dipilih adalah *stone column*. Namun, dengan tanah yang sangat lunak dengan kekuatan gaya geser *undrained* di bawah 15 kPa, *stone column* konvensional tidak dianjurkan karena batas tegangan efektif dari tanah tidak akan tercapai (FHWA, 1983). Dengan demikian, dipilih *Geotextile-Encased Stone Column* (GESC) sebagai perkuatan tanah dasar sesuai dengan kebutuhannya dalam meningkatkan stabilitas dan memperkecil *settlement* berdasarkan Gambar 2.37 dan Gambar 2.38.

Desain dari GESC berdasar pada kondisi tanah yang paling kritis, yaitu Segmen 10. Perhitungan desain GESC pada STA 1+600 adalah sebagai berikut.

6.5.1 Tegangan yang Bekerja pada *Unit Cell*

Stone column dapat direncanakan dengan dua pola, yaitu bujur sangkar dan segitiga. Hal pertama yang dilakukan adalah perhitungan tegangan pada *stone column* dan tanah akibat beban yang berada di atas *stone column*. Selain pola pemasangan, nilai tegangan yang terjadi pada *stone column* dan tanah dipengaruhi juga oleh jarak pemasangan serta diameter kolom. Berikut merupakan contoh perhitungan tegangan menggunakan pola segitiga dengan diameter 0,8 m dan jarak pemasangan 1,5 m.

- Diameter Ekuivalen

$$D_e = 1,05S$$

$$D_e = 1,05 \times 1,50$$

$$D_e = 1,575 \text{ m}$$

- Luasan melintang kolom

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_c = \frac{\pi \times 0,8^2}{4}$$

$$A_c = 0,670 \text{ m}^2$$

- Luasan satu *unit cell*

$$A_e = \frac{\pi D_e^2}{4}$$

$$A_e = \frac{\pi \times 1,575^2}{4}$$

$$A_e = 2,599 \text{ m}^2$$

- *Area replacement ratio stone column*

$$a_c = \frac{A_c}{A_e}$$

$$a_c = \frac{0,670}{2,599}$$

$$a_c = 0,258$$

- *Area replacement ratio* pada tanah di sekitarnya

$$a_s = 1 - a_c$$

$$a_s = 1 - 0,258$$

$$a_s = 0,742$$

- Rasio tegangan pada kolom

$$\mu_c = \frac{n}{1 + (n - 1)a_c}$$

$$\mu_c = \frac{3}{1 + (3 - 1) \times 0,258}$$

$$\mu_c = 1,979$$

- Rasio tegangan pada tanah

$$\mu_s = \frac{1}{1 + (n - 1)a_s}$$

$$\mu_s = \frac{1}{1 + (3 - 1) \times 0,742}$$

$$\mu_s = 0,403$$

Akibat adanya rasio tegangan pada kolom dan tanah, maka dapat dihitung tegangan yang diterima oleh keduanya.

- a. Tegangan Pada Kolom (σ_{vc})

$$\sigma_{v,c} = q_{timbunan} \times \mu_c$$

$$\sigma_{v,c} = 49,099 \times 1,979$$

$$\sigma_{v,c} = 97,161 \text{ t/m}^2$$

Maka, tegangan vertikal yang diterima oleh kolom sebesar 97,161 t/m².

- b. Tegangan Pada Tanah Sekitarnya (σ_{vs})

$$\sigma_{v,s} = q_{timbunan} \times \mu_s$$

$$\sigma_{v,s} = 49,099 \times 0,403$$

$$\sigma_{v,s} = 19,766 \text{ t/m}^2$$

Maka, tegangan vertikal yang diterima oleh tanah sekitarnya sebesar 19,766 t/m².

6.5.2 Tegangan Horizontal Kolom dan Tanah

Tegangan vertikal dari beban yang ada menghasilkan tegangan horizontal yang dihitung menggunakan Persamaan 2.84 untuk tegangan horizontal akibat kolom dan Persamaan 2.85 untuk tegangan horizontal akibat tanah di sekitar kolom. Untuk menghitung tegangan horizontal diperlukan koefisien aktif kolom (K_{ac}) dan koefisien *at rest* pada tanah ($K_{0,s}$) menggunakan persamaan Persamaan 2.86 dan Persamaan 2.88.

Material yang dipakai untuk *stone column* sama dengan material timbunan dengan ukuran yang lebih kecil (*crushed stone*). Nilai parameter material *crushed stone* adalah sebagai berikut.

$$\gamma_{batu} = 2,648 \text{ t/m}^3$$

$$\phi_{batu} = 40^\circ$$

Berikut merupakan contoh perhitungan pada lapisan tanah pertama ($H_i = 5 \text{ m}$).

$$K_{ac} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$K_{0,s} = (1 - \sin \phi_s) OCR^{0.5}$$

- a. Tegangan Horizontal Pada Kolom (σ_{hc})

$$\sigma_{h,c} = \sigma_{v,c} \cdot K_{ac} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{ac}$$

Nilai tegangan vertikal kolom *at rest* dapat dilihat pada Lampiran D.2, sehingga nilai $\sigma_{h,c}$ adalah sebagai berikut.

$$\sigma_{h,c} = 97,161 \times 0,217 + 33,100 \times 0,217$$

$$\sigma_{h,c} = 28,324 \text{ t/m}^2$$

Maka, tegangan horizontal yang diterima oleh kolom sebesar 28,324 t/m².

- b. Tegangan Horizontal Pada Tanah Sekitarnya (σ_{hs})

$$\sigma_{h,s} = \sigma_{v,s} \cdot K_{0,s} + \sigma_{v,0,s} \cdot K_{0,s}$$

Nilai tegangan vertikal tanah *at rest* dapat dilihat pada Lampiran D.1, sehingga nilai $\sigma_{h,s}$ adalah sebagai berikut.

$$\sigma_{h,s} = 19,766 \times 0,961 + 5,288 \times 0,961$$

$$\sigma_{h,s} = 24,069 \text{ t/m}^2$$

Maka, tegangan horizontal yang diterima oleh tanah sekitarnya sebesar 24,069 t/m².

Perhitungan tegangan horizontal selengkapnya pada setiap lapisan tanah dapat dilihat pada Tabel 6.8 sebagai berikut.

Tabel 6.8 Tegangan Horizontal Tanah dan Kolom

Lapisan Tanah	Koefisien Aktif Column (K_{ac})	Koefisien Tekanan Tanah Diam (K_{0s})	Tegangan Vertikal Kolom ($\sigma_{v,c}$)	Tegangan Vertikal Awal Tanah ($\sigma_{v,s}$)	Tegangan Vertikal Awal Pada Kolom ($\sigma_{v,0,c}$)	Tegangan Vertikal Awal Pada Tanah ($\sigma_{v,0,s}$)	Tegangan Horizontal Kolom ($\sigma_{h,c}$)	Tegangan Horizontal Tanah ($\sigma_{h,s}$)
			t/m ²	t/m ²	t/m ²	t/m ²	t/m ²	t/m ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0,961			33,100	5,288	28,324	24,069
2		0,990			15,723	5,711	24,546	25,234
3		1,040			34,720	17,320	32,677	38,581
4	0,217	1,080	97,161	19,766	42,288	24,888	33,322	48,242
5		1,090			28,044	18,482	31,225	41,704
6		1,096			58,224	41,624	39,787	67,308
7		1,110			151,632	114,282	60,098	148,853

Keterangan:

[1]: Lapisan tanah

[2]: Koefisien aktif kolom

[3]: Koefisien tekanan tanah diam

[4]: Tegangan vertikal kolom (t/m²)

[5]: Tegangan vertikal tanah (t/m²)

[6]: Tegangan vertikal awal kolom (t/m²)

[7]: Tegangan vertikal awal tanah (t/m²)

[8]: Tegangan horizontal kolom = [2] × [4] + [2] × [6] (t/m²)

[8]: Tegangan horizontal tanah = [3] × [5] + [3] × [7] (t/m²)

Dalam penentuan perlu atau tidaknya penerapan *Geotextile-Encased Stone Column* untuk menunjang tegangan horizontal yang dihasilkan oleh kolom, maka dibandingkan tegangan horizontal akibat kolom ($\sigma_{h,c}$) dan tegangan horizontal akibat tanah sekitarnya ($\sigma_{h,s}$), sehingga menghasilkan perbedaan tegangan ($\sigma_{h,diff}$). Dengan asumsi mengabaikan tegangan geser antara kolom dan *geotextile* serta antara *geotextile* dan tanah dalam arah melingkar. Perbedaan tegangan ($\sigma_{h,diff}$) dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.92. Berikut merupakan contoh perhitungan $\sigma_{h,diff}$ pada lapisan tanah pertaman.

$$\sigma_{h,diff} = \sigma_{h,c} - \sigma_{h,s}$$

$$\sigma_{h,diff} = 28,324 - 24,069$$

$$\sigma_{h,diff} = 4,256 \text{ t/m}^2$$

Maka, kolom sedalam lapisan pertama memerlukan *Geotextile* sebagai selimut atau GESC. Perhitungan selengkapnya perbedaan tegangan ($\sigma_{h,diff}$) pada setiap lapisan tanah adalah sebagai berikut.

Tabel 6.9 Perbedaan Antara Kolom dan Tanah

Lapisan Tanah	Tegangan Horizontal Kolom ($\sigma_{h.c}$)	Tegangan Horizontal Tanah ($\sigma_{h.s}$)	Perbedaan Tegangan ($\sigma_{h.diff}$)	Keterangan
	t/m ²	t/m ²	t/m ²	
1	2	3	4	5
1	28,324	24,069	4,256	<i>Encased</i>
2	24,546	25,234	-0,688	<i>No Encased</i>
3	32,677	38,581	-5,905	<i>No Encased</i>
4	33,322	48,242	-14,920	<i>No Encased</i>
5	31,225	41,704	-10,479	<i>No Encased</i>
6	39,787	67,308	-27,520	<i>No Encased</i>
7	60,098	148,853	-88,754	<i>No Encased</i>

Keterangan:

[1]: Lapisan tanah

[2]: Tegangan horizontal kolom (t/m²)

[3]: Tegangan horizontal tanah (t/m²)

[4]: Perbedaan tegangan = [2] – [3] (t/m²)

[5]: Keterangan (apabila positif perlu pembungkus, apabila negatif tidak perlu pembungkus)

Berdasarkan analisis tegangan pada Tabel 6.9, kolom sepanjang lapisan tanah pertama memerlukan pembungkus untuk menambah tegangan horizontal pada tanah. Dalam tanah yang sangat lunak dengan kekuatan gaya geser *undrained* di bawah 1,53 t/m², kolom batu konvensional tidak dianjurkan karena batas tegangan efektif dari tanah tidak akan tercapai (FHWA, 1983). Analisis menunjukkan hasil yang sejalan dengan pernyataan tersebut karena tanah pada Segmen 10 yang memiliki kekuatan gaya geser *undrained* di bawah 1,53 t/m² hanya berada pada tanah lapisan pertama. Oleh karena itu, perlu dihitung kebutuhan pembungkus kolom pada lapisan tanah pertama.

6.5.3 Penambahan Tegangan Menggunakan *Geotextile*

Geotextile pada *GESC* berperan sebagai tegangan horizontal tambahan dari tanah yang tidak mampu menahan tegangan horizontal dari kolom (Rajagopal, 2010). Deformasi horizontal dan vertikal pada tanah serta kolom dianggap sama pada setiap jenis lapisan tanah dengan berpedoman pada penambahan radius kolom (Δr_c). Nilai penambahan radius kolom (Δr_c) dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.89. Dengan asumsi mengabaikan tegangan geser antara kolom dan *Geotextile* serta antara *Geotextile* dan tanah dalam arah melingkar, tegangan horizontal tambahan dari *Geotextile* ($\sigma_{h.geo}$) yang ditentukan oleh daya tarik izin *Geotextile* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2,91.

Data yang dipakai dapat dilihat pada Lampiran B.10 serta perhitungan sebelumnya. *Geotextile* yang dipilih adalah *Geotextile Woven* dari PT. Prima Geotx Indo dengan daya tarik izin sebesar 5,5 t/m. *Geotextile* jenis tersebut dipilih karena memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi serta lebih cocok digunakan sebagai separator daripada *Geotextile Non Woven*. Berikut merupakan contoh perhitungan $\sigma_{h.geo}$ pada lapisan tanah 1 ($H_i = 5$ m).

- $E^* = \left(\frac{1}{1-\mu} + \frac{1}{1+\mu} \frac{1}{a_s} \right) E_i$

$$E^* = \left(\frac{1}{1 - 0,25} + \frac{1}{1 + 0,25} \frac{1}{0,742} \right) \times 203,943$$

$$E^* = 475,240 \text{ t/m}^2$$

Maka, modulus elastisitas tanah efektif pada lapisan tanah 1 sebesar 475,240 t/m². Perhitungan selengkapnya pada setiap lapisan dapat dilihat pada Tabel 6.10.

Tabel 6.10 Modulus Elastisitas Tanah Efektif

Lapisan Tanah	Area Replacement Ratio Pada Tanah Disekitarnya (a _s)	Modulus Elastisitas Tanah (E _i)	Porositas (μ)	Modulus Elastisitas Tanah Efektif (E*)
		t/m ²		t/m ²
1		203,943	0,250	475,240
2		282,257	0,300	673,791
3		386,676	0,350	951,819
4	0,742	491,095	0,400	1255,621
5		595,514	0,454	1601,072
6		752,143	0,454	2022,176
7		815,773	0,454	2193,250

$$\bullet \Delta r_c = \frac{\sigma_{h,c} - \sigma_{h,s} + \frac{(r_g - r_c)J}{r_g^2}}{\frac{a_s E^*}{(1 - a_s)r_c} + \frac{J}{r_g^2}}$$

$$\Delta r_c = \frac{97,161 - 19,766 + \frac{(0,4 - 0,4)5,5}{0,4^2}}{\frac{0,742 \times 475,240}{(1 - 0,742) \times 0,4} + \frac{5,5}{0,4^2}}$$

$$\Delta r_c = 0,008 \text{ m}$$

Maka, penambahan radius pada kolom pada lapisan tanah 1 sebesar 0,008 m. Perhitungan selengkapnya pada setiap lapisan dapat dilihat pada Tabel 6.11.

Tabel 6.11 Penambahan Radius Kolom

Lapisan Tanah	Tegangan Horizontal Kolom (σ _{h,c})	Tegangan Horizontal Tanah (σ _{h,s})	Area Replacement Ratio Pada Tanah Disekitarnya (a _s)	Radius Kolom = Geotextile (r _c = r _g)	Kuat Tarik (J)	Modulus Elastisitas Tanah Efektif (E*)	Penambahan Radius Kolom (Δr _c)
	t/m ²	t/m ²		m	t/m	t/m ²	m
1	28,324	24,069				475,240	0,008
2	24,546	25,234				673,791	0,005
3	32,677	38,581				951,819	0,002
4	33,322	48,242	0,742	0,4	5,5	1255,621	0,002
5	31,225	41,704				1601,072	0,005
6	39,787	67,308				2022,176	0,002
7	60,098	148,853				2193,250	0,002

$$\bullet \sigma_{h.geo} = J \frac{\Delta r_c + r_c}{r_g^2}$$

$$\sigma_{h.geo} = 5,5 \frac{0,008 + 0,4}{0,4^2}$$

$$\sigma_{h.geo} = 14,026 \text{ t/m}^2$$

Maka, penambahan tegangan horizontal akibat *Geotextile* pada lapisan tanah 1 sebesar 14,026 t/m². Perhitungan selengkapnya pada setiap lapisan dapat dilihat pada Tabel 6.12.

Tabel 6.12 Penambahan Tegangan Horizontal Akibat *Geotextile*

Lapisan Tanah	Radius Kolom = <i>Geotextile</i> (r _c = r _g)	Kuat Tarik (J)	Penambahan Radius Kolom (Δr _c)	Penambahan Tegangan <i>Geotextile</i> (σ _{h.geo})
	m	t/m	m	t/m ²
1			0,008	14,026
2			0,005	13,922
3			0,002	13,834
4	0,4	5,5	0,002	13,829
5			0,005	13,935
6			0,002	13,830
7			0,002	13,816

Berdasarkan analisis perbedaan tegangan yang telah dihitung sebelumnya, kolom yang memerlukan pembungkus *Geotextile* hanya sepanjang tanah lapisan pertama. Selanjutnya dihitung kebutuhan lapis *Geotextile* pada lapisan tanah 1 sebagai berikut.

$$\frac{\sigma_{h.diff}}{\sigma_{h.geo}} = \text{jumlah lapis}$$

$$\frac{4,256}{14,026} = 1 \text{ lapis}$$

Maka, kolom pada Segmen 10 sedalam 5 m (lapisan tanah pertama) membutuhkan 1 lapis *Geotextile* untuk menambah tegangan horizontal tanah.

6.5.4 Daya Dukung Kolom Tunggal GESC

Dengan adanya beban timbunan yang mengenai *stone column*, *stone column* akan mengalami keruntuhan *bulging* sedalam 2-3 kali diameter kolom dari permukaan tanah. Pada saat *bulging*, material-material kolom tertekan dan sebagian masuk ke dalam tanah lunak di sekelilingnya. Perhitungan daya dukung *ultimate* (q_u) fondasi tunggal seperti GESC mengacu pada dua komponen utama, yaitu daya dukung ujung (q_p) dan daya dukung selimut (q_s). Dalam metode Meyerhof, kedua komponen tersebut dirumuskan berdasarkan data nilai *Standard Penetration Test* (SPT) dengan menggunakan Persamaan 2.68, 2.69, dan 2.70 sebagai berikut.

$$q_u = q_p + q_s$$

$$q_u = 40 \cdot N \cdot A_p + (N_{av} \cdot A_s) / 5$$

$$q_{izin} = q_u / SF$$

Data tanah yang digunakan dapat dilihat selengkapnya pada Lampiran B.10. Nilai N pada ujung kolom yang dipakai sebesar 17 (lapisan tanah 8) sesuai dengan kedalaman GESC. Perhitungan daya dukung GESC tunggal adalah sebagai berikut.

- Daya dukung ujung (q_p)
 $q_p = 40 \cdot N \cdot A_p$
 $q_p = 40 \times 17 \times 0,503$
 $q_p = 341,943 \text{ t/m}^2$
- Daya dukung selimut (q_s)
 $q_s = (N_{av} \cdot A_s)/5$
 $q_s = (2,03 \times 72,914)/5$
 $q_s = 29,669 \text{ t/m}^2$
- Daya dukung *ultimate* (q_u)
 $q_u = q_p + q_s$
 $q_u = 341,943 + 29,669$
 $q_u = 371,611 \text{ t/m}^2$
- *Safety Factor* (SF)
 $SF = \frac{q_u}{q_{izin}} = \frac{371,611}{97,161}$
 $SF = 3,825 > 2,5 \text{ (OK)}$

Dari analisis perhitungan daya dukung kolom tunggal didapatkan nilai SF lebih dari 2,5, yaitu 3,825. Maka, kolom tunggal dari GESC yang direncanakan dapat menahan beban timbunan dari *breakwater*.

6.6 Analisis Settlement Dengan GESC

GESC adalah metode perkuatan tanah yang sangat efektif untuk mengurangi *settlement* secara drastis. *Settlement* yang terjadi pada bagian atas kolom pada GESC sama dengan tanah lunak di sekitarnya (Han, 2015). Hal tersebut menunjukkan bahwa *settlement* yang terjadi pada tanah dasar setelah diperkuat menggunakan GESC bergantung kepada *settlement* dari kolom itu sendiri. *Settlement* pada bagian atas kolom disebabkan karena terjadi penggelembungan atau penambahan radius kolom (Δr_c) akibat tegangan horizontal kolom. Oleh karena itu, *settlement* pada GESC (S') dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.93.

$$S' = \left(1 - \frac{r_c^2}{(r_c + \Delta r_c)^2}\right) H_i$$

Contoh perhitungan S' lapisan tanah pertama Segmen 10 STA 1+600 sebagai berikut.

- Lapisan 1 ($H_i = 5 \text{ m}$)
 $S' = \left(1 - \frac{0,4^2}{(0,4 + 0,008)^2}\right) 5$
 $S' = 0,195 \text{ m}$
Maka, *settlement* yang terjadi pada kolom sedalam lapisan pertama adalah 0,195 m.
- Lapisan 2 ($H_i = 3 \text{ m}$)
 $S' = \left(1 - \frac{0,4^2}{(0,4 + 0,005)^2}\right) 3$
 $S' = 0,074 \text{ m}$
Maka, *settlement* yang terjadi pada kolom sedalam lapisan kedua adalah 0,074 m.

- Lapisan 3 ($H_i = 4$ m)

$$S' = \left(1 - \frac{0,4^2}{(0,4 + 0,002)^2} \right) 4$$

$$S' = 0,049 \text{ m}$$

Maka, *settlement* yang terjadi pada kolom sedalam lapisan kedua adalah 0,049 m.

Perhitungan selengkapnya dari *settlement* yang terjadi pada GESC dapat dilihat pada Tabel 6.13 berikut.

Tabel 6.13 Total *Settlement* Setelah Menggunakan Perkuatan GESC

Lapisan Tanah	Tinggi Lapisan Tanah (H_i)	Radius Kolom (r_c)	Penambahan r Kolom Saat Pembebanan (Δr_c)	<i>Settlement</i> (S')	Total <i>Settlement</i> (S')
	m	m	m	m	m
1	2	3	4	5	6
1	5		0,008	0,195	
2	3		0,005	0,074	
3	4		0,002	0,049	
4	4	0,4	0,002	0,045	0,5453
5	3		0,005	0,079	
6	4		0,002	0,046	
7	6		0,002	0,057	

Keterangan:

[1]: Lapisan Tanah

[2]: Tinggi lapisan tanah (m)

[3]: Jari-jari kolom (m)

[4]: Penambahan jari-jari kolom akibat penggelembungan (m)

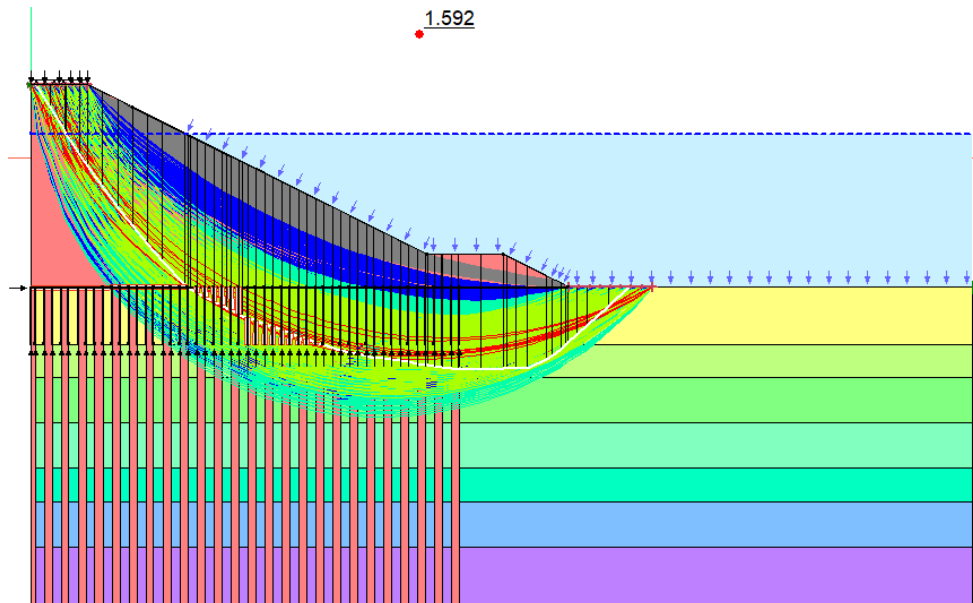
[5]: *Settlement* setiap lapisan tanah = $\left(1 - \frac{[3]^2}{([3]+[4])^2} \right) \times [2]$ (m)

[6]: *Total settlement* = $\Sigma[5]$ (m)

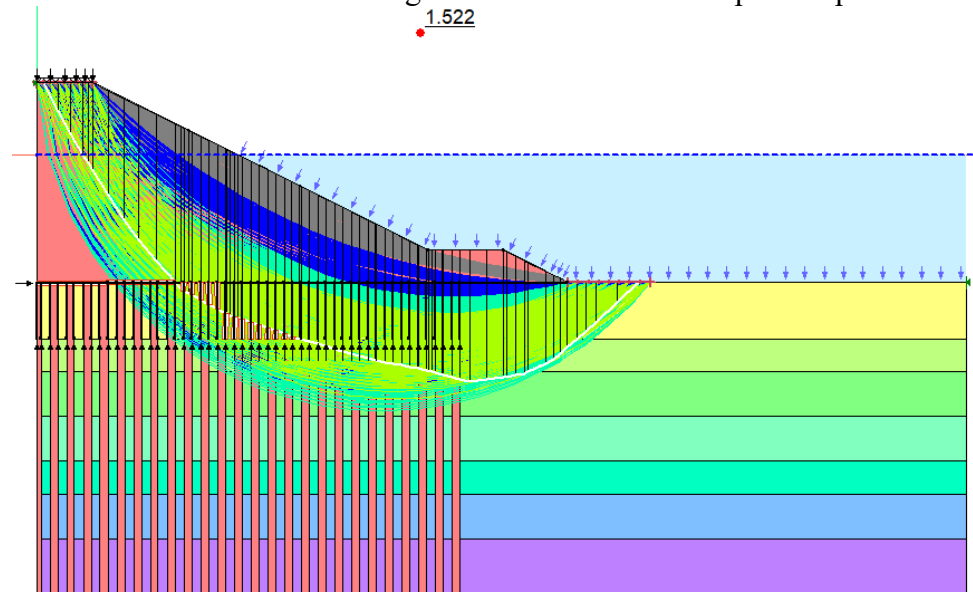
Berdasarkan Tabel 6.13, maka total *settlement* yang terjadi sepanjang kolom sebesar 0,545 m. *Settlement* yang terjadi berkurang lebih dari 90% dari *settlement* tanah dasar yang tidak diperkuat dengan GESC. Selain itu, *settlement* pada GESC berlangsung selama masa konstruksi saat kolom mulai dibebani oleh timbunan, sehingga *settlement* dapat dicapai bersamaan dengan selesainya masa konstruksi.

6.7 Analisis Stabilitas Timbunan Dengan GESC

Analisis stabilitas timbunan *breakwater* dengan perkuatan GESC dilakukan menggunakan program SLOPE/W Geostudio 2018 dan perhitungan konvensional. Pada program GeoStudio, tahapan dimulai dengan pemodelan lereng dan GESC pada aplikasi sesuai dengan data geometri potongan melintang, memasukkan data yang telah diperoleh, dan selanjutnya dianalisis hingga memperoleh nilai SF (*safety factor*). Nilai SF yang disyaratkan pada Proyek EBW sebesar 1,0 untuk kondisi gempal dan 1,3 untuk kondisi tanpa gempal. Kondisi yang dianalisis adalah muka air laut pada posisi HHWL dan LLWL. Berikut merupakan analisis stabilitas pada Segmen 10 STA 1+600.

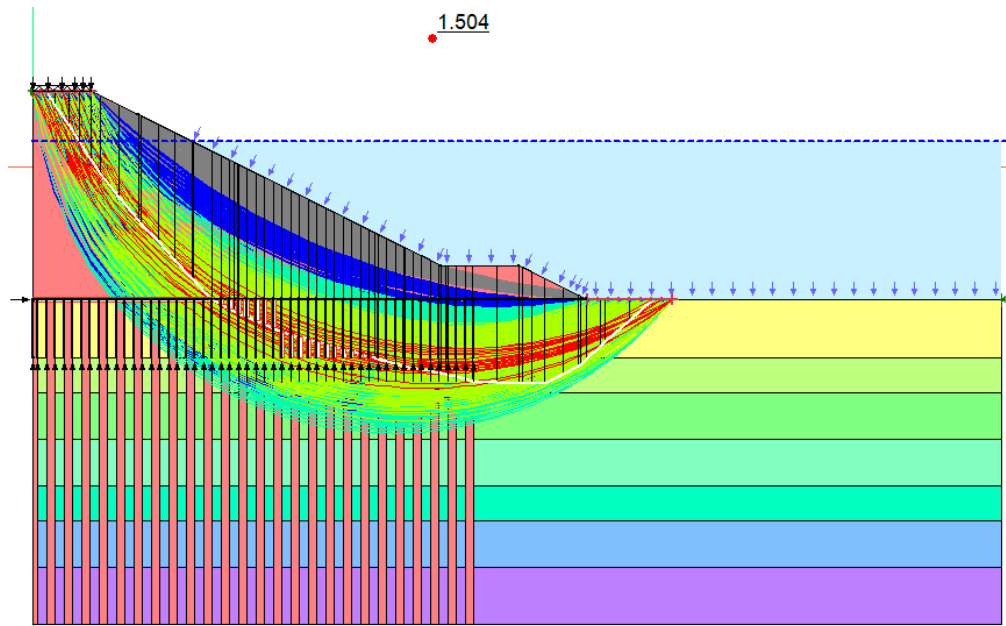


Gambar 6.17 Stabilitas Timbunan Dengan Perkuatan GESC Tanpa Gempa Kondisi HHWL

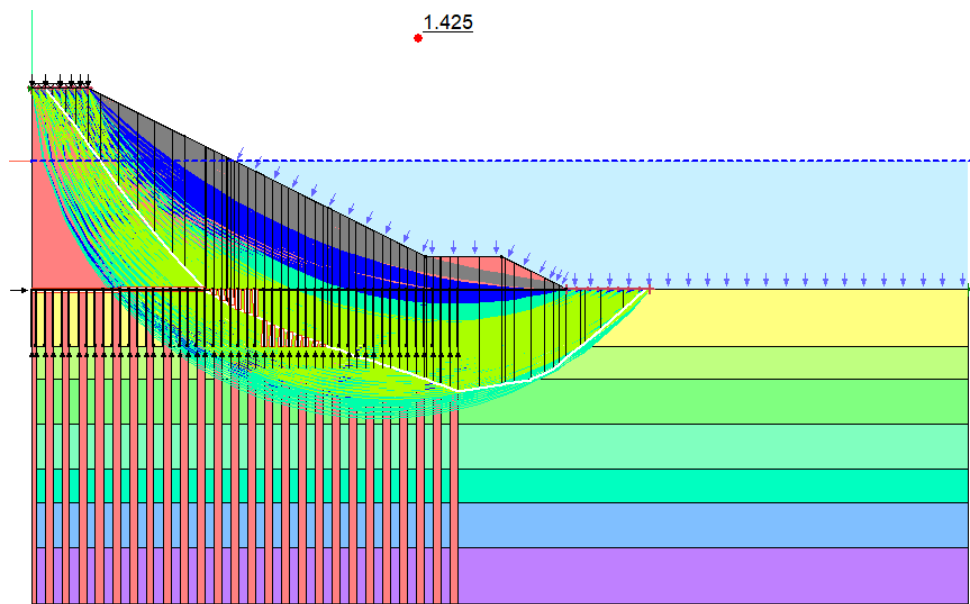


Gambar 6.18 Stabilitas Timbunan Dengan Perkuatan GESC Tanpa Gempa Kondisi LLWL

Gambar 6.17 dan 6.18 merupakan analisis stabilitas lereng *breakwater* dengan perkuatan GESC pada Segmen 10 STA 1+600 kondisi tanpa gempa. Beban yang bekerja pada timbunan ditambahkan sebesar 15 kN/m^3 pada bagian atas *breakwater* sebagai beban hidup untuk kendaraan dan $3,336 \text{ kN/m}^3$ pada dinding *seaside* untuk beban gelombang. Geometri timbunan, perkuatan GESC, dan lapisan tanah dasar disesuaikan pada desain dengan data tanah serta elevasi muka air berada di +2,19 m. Hasil analisis pada SLOPE/W Geostudio 2018 menunjukkan nilai SF sebesar 1,592 pada kondisi HHWL dan 1,522 pada kondisi LLWL tanpa gempa. Oleh karena itu, nilai SF lebih besar dari yang disyaratkan, sehingga *breakwater* aman terhadap keruntuhan.



Gambar 6.19 Stabilitas Timbunan Dengan Perkuatan GESC Dengan Gempa Kondisi HHWL



Gambar 6.20 Stabilitas Timbunan Dengan Perkuatan GESC Dengan Gempa Kondisi LLWL

Gambar 6.19 dan 6.20 merupakan analisis stabilitas lereng *breakwater* dengan perkuatan GESC pada Segmen 10 STA 1+600 kondisi gempa. Beban, geometri timbunan, GESC, dan tanah dasar, serta elevasi muka air disesuaikan dengan analisis kondisi tanpa gempa. Beban gempa koefisien horizontal ditambahkan sebesar 0,015. Hasil analisis pada SLOPE/W Geostudio 2018 menunjukkan nilai SF sebesar 1,504 pada kondisi HHWL dan 1,425 pada kondisi LLWL. Maka, nilai SF lebih besar dari syarat, sehingga *breakwater* aman terhadap keruntuhan.

Dalam memastikan keakuratan hasil simulasi dari program GeoStudio, diperlukan perhitungan stabilitas secara konvensional menggunakan pendekatan bidang longsor lengkung. Perhitungan stabilitas secara manual akan menggunakan kondisi paling kritis, yaitu LLWL dengan gempa. Dengan bantuan program GeoStudio pada simulasi *existing*, didapatkan momen dorong (M_D), momen penahan (M_R), dan jari-jari (R) serta titik keruntuhan di SF yang paling kritis sebagai berikut.

$$SF = 0,828$$

$$M_D = 11.331,495 \text{ ton.m}$$

$$M_R = 9,800 \text{ ton.m}$$

$$R = 33,764 \text{ m}$$

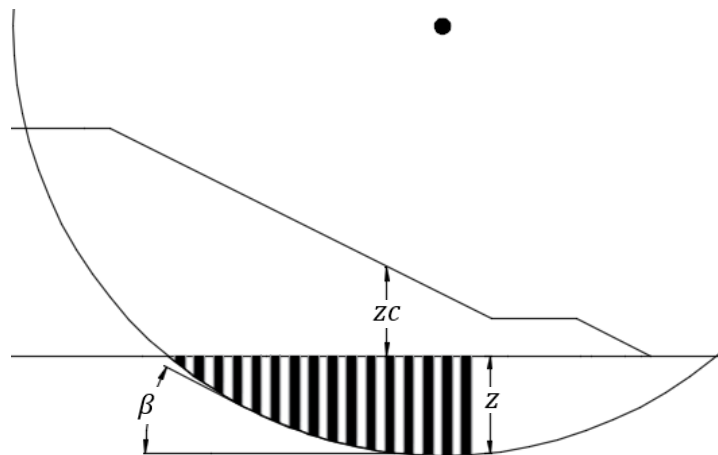
Parameter *stone column*:

$$\text{Berat volume limestone } (\gamma_c = \gamma_{timb}) = 2,648 \text{ (t/m}^3\text{)}$$

$$\text{Sudut geser dalam } (\phi_c) = 40 \text{ (}^\circ\text{)}$$

$$\text{Koheesi } (c) = 0 \text{ (t/m}^2\text{)}$$

Mencari tegangan efektif dalam *stone column* yang bekerja pada bidang longsor (σ_{zc}) menggunakan Persamaan 2.931. Untuk mencari tegangan efektif diperlukan sudut kemiringan antara garis singgung permukaan bidang longsor dengan bidang horizontal (β), tinggi tanah di atas kolom (z_s), dan tinggi kolom pada bidang longsor (z) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6.21.



Gambar 6.21 Bidang Longsor Pada Timbunan

Dari hasil analisis menggunakan AutoCad dapat dicari nilai parameter β , z , dan z_s . Hasil perhitungan tegangan efektif *stone column* pada bidang longsor dapat dilihat pada Tabel 6.14.

Tabel 6.14 Tegangan Efektif Kolom Pada Bidang Longsor

<i>Stone Column</i>	Tinggi Timbunan Atas Bidang Longsor (z_c)	Panjang Kolom Bidang Longsor (z)	Tegangan Vertikal Pada Kolom (σ_{vc})	Tegangan Efektif Kolom (σ_{zc})
	m	m	t/m ²	t/m ²
1	2	3	4	5
1	15,387	0,457	40,744	41,955
2	14,600	1,594	38,661	42,881
3	13,843	2,607	36,657	43,560
4	13,087	3,509	34,653	43,946
5	12,330	4,311	32,650	44,065
6	11,575	5,018	30,650	43,937
7	10,827	5,631	28,669	43,580
8	10,078	6,163	26,687	43,005
9	9,330	6,616	24,705	42,225
10	8,581	6,996	22,723	41,248
11	7,833	7,303	20,742	40,079
12	7,121	7,540	18,856	38,822
13	6,371	7,708	16,870	37,282
14	5,621	7,809	14,884	35,563

<i>Stone Column</i>	Tinggi Timbunan Atas Bidang Longsor (zc)	Panjang Kolom Bidang Longsor (z)	Tegangan Vertikal Pada Kolom (σ_{vc})	Tegangan Efektif Kolom (σ_{zc})
	m	m	t/m ²	t/m ²
1	2	3	4	5
15	4,871	7,844	12,898	33,668
16	4,121	7,811	10,912	31,596

Keterangan:

[1]: Urutan lokasi *stone column* dari kiri pada Gambar 6.21

[2]: Tinggi timbunan di atas *stone column* (m)

[3]: Panjang bagian tengah kolom yang terpotong bidang longsor (m)

[4]: Tegangan vertikal kolom = $2,648 \times [2]$ (t/m²)

[5]: Tegangan efektif kolom = $2,648 \times [3] \times [4]$ (t/m²)

Langkah selanjutnya menghitung nilai kuat geser pada *stone column* menggunakan Persamaan 2.95. Hasil perhitungan nilai kuat geser ditunjukkan pada Tabel 6.15.

Tabel 6.15 Kuat Geser Kolom Sepanjang Bidang Longsor

<i>Stone Column</i>	Sudut Garis Singgung dan Bidang Horizontal (β)	Tegangan Kolom Pada Bidang Longsor (σ_{zc})	Tegangan Sepanjang Bidang Longsor (σ_{Nc})	Kuat Geser Kolom Sepanjang Bidang Longsor (τ_c)
	°	t/m ²	t/m ²	t/m ²
1	2	3	4	5
1	39,150	41,955	1,985	1,666
2	36,127	42,881	3,306	2,774
3	33,035	43,560	5,249	4,405
4	30,047	43,946	7,777	6,526
5	27,148	44,065	10,859	9,112
6	24,321	43,937	11,961	10,037
7	21,557	43,580	15,790	13,250
8	18,844	43,005	19,887	16,688
9	16,175	42,225	23,988	20,129
10	13,541	41,248	27,797	23,324
11	10,936	40,079	29,893	25,083
12	8,354	38,822	32,730	27,464
13	5,788	37,282	34,354	28,827
14	3,235	35,563	34,667	29,089
15	2,065	33,668	33,320	27,959
16	1,002	31,596	31,519	26,447

Keterangan:

[1]: Urutan lokasi *stone column* dari kiri pada Gambar 6.21

[2]: Sudut garis singgung dan bidang horizontal (°)

[3]: Tegangan efektif kolom (t/m²)

[4]: Tegangan sepanjang bidang longsor = $[3] \times \cos^2 [2]$ (t/m²)

[5]: Kuat geser kolom sepanjang bidang longsor = $[4] \times \tan(40) + 0$ (t/m²)

Selanjutnya dihitung besar gaya geser maksimum akibat *stone column* pada bidang gelincir (Pc) menggunakan Persamaan 2.97. Hasil Perhitungan Pc dapat dilihat pada Tabel 6.16.

Tabel 6.16 Gaya Geser Maksimum

<i>Stone Column</i>	Sudut Garis Singgung dan Bidang Horizontal (β) °	Kuat Geser Kolom Sepanjang Bidang Longsor (τ_c) t/m ²	Luas Penampang Melintang (A) m ²	Gaya Geser Maksimum (Pc) ton
1	2	3	4	5
1	39,150	1,666	0,593	1,274
2	36,127	2,774	1,475	4,172
3	33,035	4,405	2,261	7,901
4	30,047	6,526	2,961	12,973
5	27,148	9,112	3,582	19,380
6	24,321	10,037	4,127	22,375
7	21,557	13,250	4,600	30,554
8	18,844	16,688	5,008	39,460
9	16,175	20,129	5,355	48,499
10	13,541	23,324	5,643	56,990
11	10,936	25,083	5,874	61,914
12	8,354	27,464	6,049	68,268
13	5,788	28,827	6,169	71,965
14	3,235	29,089	6,235	72,755
15	2,065	27,959	6,249	69,934
16	1,002	26,447	6,208	65,908

Keterangan:

[1]: Urutan lokasi *stone column* dari kiri pada Gambar 6.21

[2]: Sudut garis singgung dan bidang horizontal (°)

[3]: Kuat geser kolom sepanjang bidang longsor (t/m²)

[4]: Luas penampang melintang kolom pada bidang longsor (m²)

[5]: Gaya geser maksimum = [3] $\times \frac{[4]}{\cos [2]}$ (ton)

Dari besar gaya geser maksimum akan bisa didapatkan tambahan momen penahan (ΔM_R) akibat adanya *stone column* dengan Persamaan 2.98 sebagai berikut.

$$\Delta M_R = \Sigma P_c \times R$$

$$\Delta M_R = 654,320 \times 33,764$$

$$\Delta M_R = 22.102,246 \text{ ton.m}$$

Setelah diketahui nilai tambahan momen penahan dapat dicari angka keamanan terhadap keruntuhan (SF) menggunakan Persamaan 2.99 sebagai berikut.

$$SF = \frac{\Sigma M_R}{M_D}$$

$$SF = \frac{9,800 + 22.102,246}{11.331,495}$$

$$SF = 1,95 > 1,0 \text{ (OK)}$$

Berdasarkan hasil analisis, didapatkan nilai SF sebesar 1,95 dengan kondisi gempa. Meskipun hasil analisis stabilitas dengan program GeoStudio dan perhitungan manual memiliki hasil yang berbeda, tetapi keduanya menunjukkan nilai yang lebih besar dari SF yang disyaratkan, yaitu 1,0. Oleh karena itu, timbunan dari struktur *breakwater* dengan perkuatan tanah dasar menggunakan GESK aman terhadap keruntuhan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 7 PENYUSUNAN METODE DAN JADWAL PELAKSANAAN

7.1 Metode Pelaksanaan

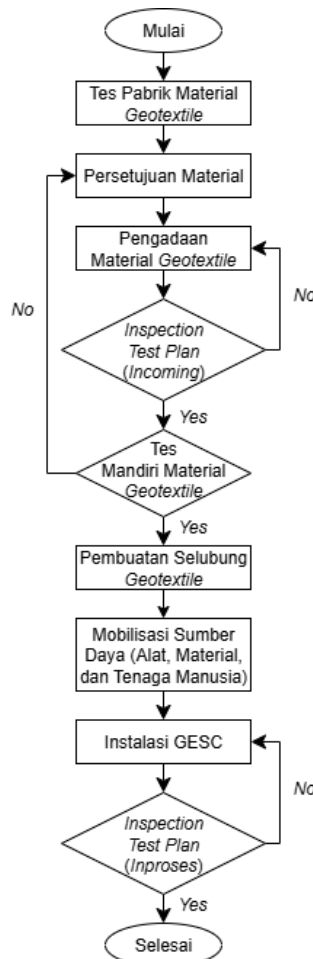
Metode pelaksanaan adalah penerapan konsep rekayasa yang didasarkan pada hubungan antara persyaratan dalam dokumen pengadaan, kondisi teknis dan ekonomis di lapangan, serta sumber daya yang tersedia. Pelaksanaan proyek konstruksi memerlukan sebuah sistem manajemen yang baik sehingga dapat mencapai tujuan dan target kerja yang telah direncanakan. Dalam pembahasan ini, akan dijelaskan mengenai metode pelaksanaan dari pekerjaan perbaikan tanah dan pekerjaan struktur *breakwater* dari Proyek Eastport *Breakwater Works* yang sebelumnya telah direncanakan..

7.1.1 Pekerjaan Perbaikan Tanah

Proyek Eastport *Breakwater Works* direncanakan menggunakan *Geotextile-Encased Stone Column* (GESC) untuk perkuatan tanah dasarnya. *Geotextile* digunakan untuk melindungi kolom dari tanah lunak yang dapat masuk ke celah batu sehingga menghindari penggelembungan pada kolom. Material batu yang dipakai adalah *crushed stone* dengan ukuran diameter 10 - 70 mm. Selain itu, *Geotextile* juga akan digunakan sebagai *layer* pelindung struktur *breakwater* dari tanah dasar untuk mengurangi *loose material*. Seluruh pekerjaan perbaikan tanah akan dilakukan melalui jalur darat dan laut.

7.1.1.1 Pengadaan dan Instalasi *Geotextile-Encased Stone Column* (GESC)

Pekerjaan ini mencakup kegiatan pengadaan dan instalasi GESC untuk perkuatan tanah.



Gambar 7.1 Pekerjaan Pengadaan dan Instalasi GESC

Tahapan dari pekerjaan pengadaan dan instalasi GESC adalah sebagai berikut.

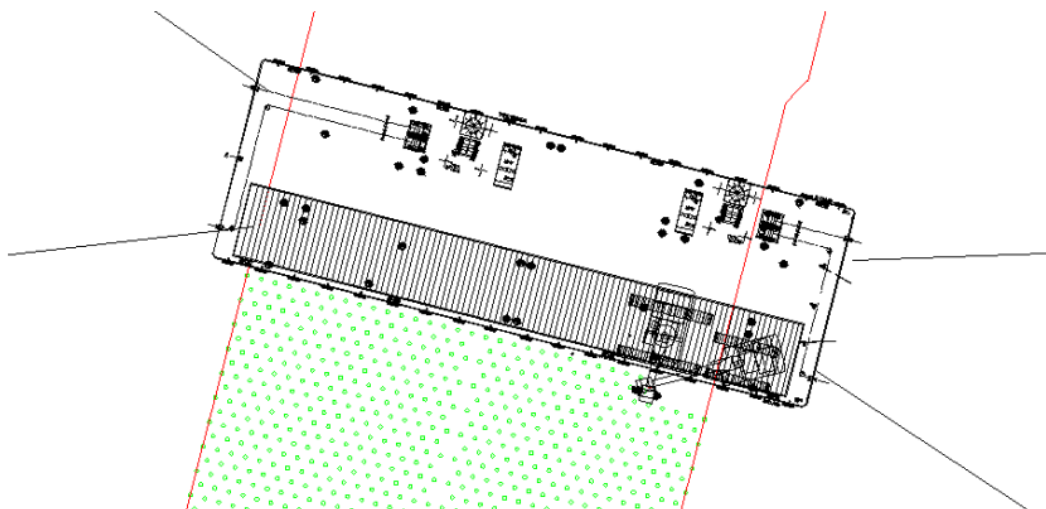
- a) Pengujian pabrik material *Geotextile Woven* pada *Geotextile-Encased Stone Column* sesuai dengan indikator pengujian Tabel 7.1.
- b) Pengadaan material *Geotextile Woven*.
- c) Pengujian independen lapangan material *Geotextile Woven* dengan indikator pengujian sesuai pengujian pabrik.
- d) *Geotextile Woven* dibentuk menjadi selongsong silinder dengan lapis dan panjang yang telah ditentukan. Pembentukan dilakukan dengan meletakkan *plastic tube* di atas *Geotextile Woven* kemudian tempelkan ujungnya pada *plastic tube* dan gulung. Putar hingga mencapai lapis yang ditentukan dengan overlap 0,5 m kemudian potong dan sambungkan dengan mesin jahit *portable*.
- e) Mobilisasi alat berat, material, dan tenaga kerja untuk instalasi GESC.

Tabel 7.1 Daftar Alat Instalasi GESC

Jenis Alat	Tipe
<i>Crane Barge</i>	Onasis-11
<i>Stock Barge</i>	KALTIM FT 36-08
<i>Crane Hydraulic</i>	<i>Crane Tona 1</i>
<i>Excavator</i>	<i>Standart</i> ; 1,2 m ³ ; 165 HP
<i>Excavator</i>	<i>Long Arm</i> PC-200; 165 HP
<i>Dumptruck</i>	10 m ³ ; 130 HP
<i>Vibro-rig</i>	-
<i>Steel Tube</i>	Diameter 0,8 m
<i>Guide-rig</i>	-
<i>Base Excavator</i>	Hitachi X670LCH
<i>Multibeam Sonar</i>	SeaBat T50 R

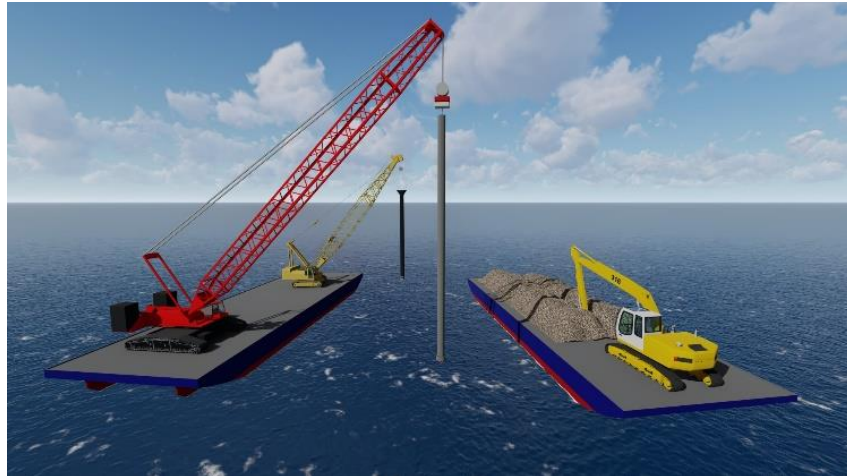
Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

- f) Dasar laut harus dipastikan bebas dari penghalang/bangkai kapal untuk memungkinkan instalasi GESC. Selain itu, ruang yang cukup harus disediakan untuk menempatkan jangkar agar ponton tetap pada posisinya.
- g) Posisi dan arah ponton harus disesuaikan dengan arah pemasangan GESC.



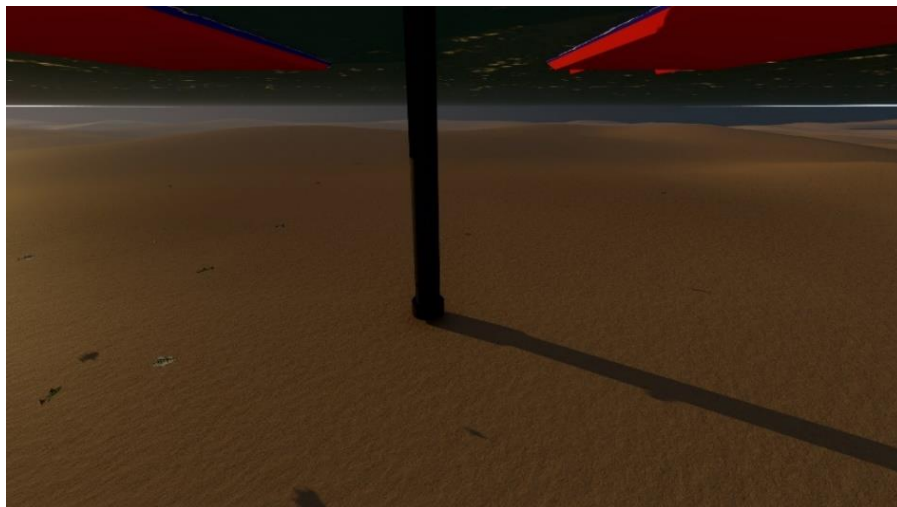
Gambar 7.2 Penyesuaian Posisi dan Arah Tongkang (1)

Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)



Gambar 7.3 Penyesuaian Posisi dan Arah Tongkang (2)

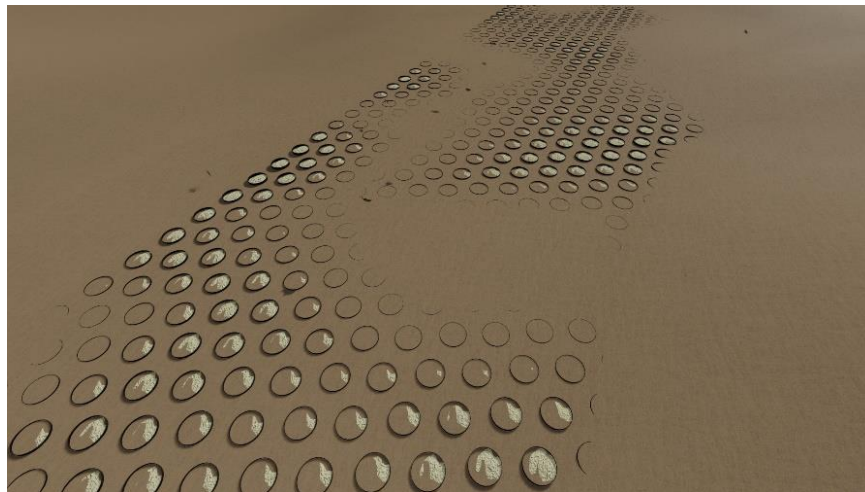
- h) Pada instalasi GESC dibutuhkan kerja sama antara *guide-rig* dan *vibro-rig* yang masing-masing memiliki fungsi sebagai berikut.
1. *Guide-rig* dapat memastikan posisi instalasi di dasar laut dengan GPS dan sonar *multibeam* yang tersedia.
 2. *Steel tube* (diameter kolom) akan menembus tanah lunak hingga kedalaman tanah keras dengan cara ditekan secara hidrolik oleh *crane*.
 3. *Steel tube* dilengkapi dengan sepatu yang dapat membuka secara otomatis saat ditarik ke atas dan menutup saat didorong ke bawah.
 4. Siapkan *steel tube* dengan diameter lebih kecil yang sebelumnya telah diselimuti oleh selongsong *Geotextile Woven* dan bagian atasnya ditahan oleh *steel belt*.
 5. Masukkan *steel tube* dengan diameter lebih kecil ke dalam *steel tube* pada *vibro-rig*, dan *bucket* pada bagian atas untuk memudahkan pengisian batu.
 6. Pengisian batu dilakukan dengan bantuan *excavator* yang dituang pada *bucket* kemudian ditransfer melalui *steel tube* dari ujung sepatu hingga sejajar tanah dasar.
 7. Setelah batu terisi, lepas *steel belt* kemudian tarik *steel tube* dengan diameter kecil ke atas.
 8. Tarik *steel tube* pada *vibro-rig* ke atas yang menyebabkan sepatu terbuka secara otomatis dan GESC telah selesai diinstal.



Gambar 7.4 *Steel Tube* Menembus Tanah Dasar



Gambar 7.5 Penuangan Material Pengisi Pada GESC

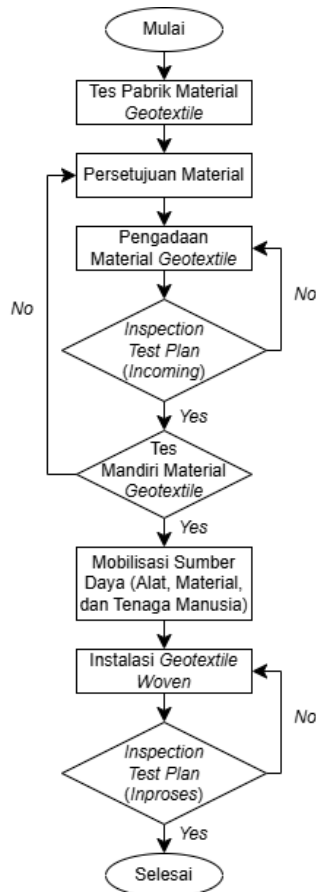


Gambar 7.6 GESC yang Sudah Diinstal

- i) Langkah-langkah pengecekan ITP dari GESC adalah sebagai berikut.
1. Melakukan survei koordinat GESC yang telah diinstal dengan metode *multibeam*. Peralatan *sonar multibeam* yang dipakai adalah SeaBat T50 R dengan lokasi *bench mark* yang telah disepakti untuk inspeksi gabungan.
 2. Bila kedalaman yang dituju tidak tercapai akibat adanya hambatan dalam menekan *steel tube*, maka digantikan dengan melakukan penetrasi ulang pada titik yang berdekatan dengan titik sebelumnya.

7.1.1.2 Pengadaan dan Instalasi *Geotextile Woven*

Pekerjaan ini mencakup kegiatan pengadaan dan instalasi *Geotextile Woven* pada *seabed*. Pekerjaan instalasi *Geotextile Woven* dilakukan dengan *marine construction*. Berikut pada Gambar 7.1 merupakan diagram alir atau *flowchart* pekerjaan pengadaan dan pemasangan *Geotextile Woven*.



Gambar 7.7 Pekerjaan Pengadaan dan Instalasi *Geotextile Woven*

Tahapan dari pekerjaan pengadaan dan instalasi *Geotextile Woven* adalah sebagai berikut.

- a) Pengujian pabrik material *Geotextile Woven* dengan indikator pengujian sebagai berikut.

Tabel 7.2 Indikator Pengujian *Geotextile Woven*

<i>Properties</i>	<i>Test Method</i>	<i>Unit</i>	<i>Project Requirement</i>
<i>Wide Width Tensile Strength - Machine Direction</i>	ASTM 4595	kN/m	≥ 55

Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

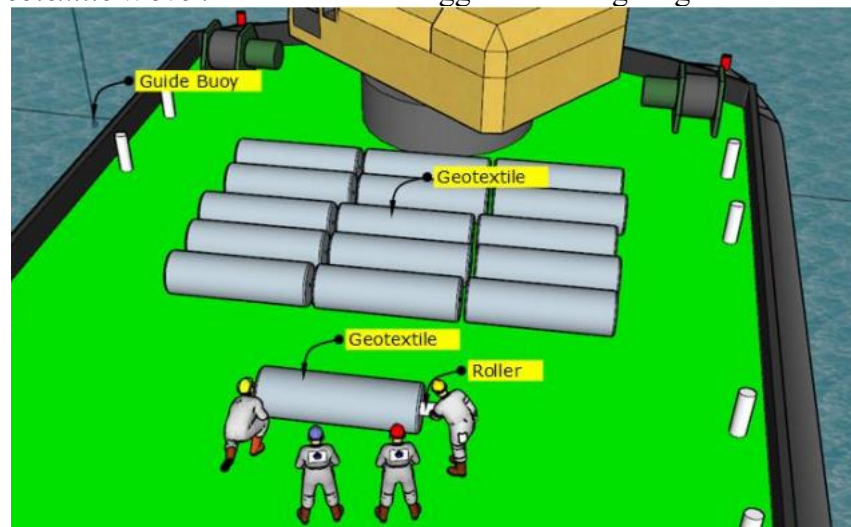
- b) Pengadaan material *Geotextile Woven*.
 c) Pengujian independen lapangan material *Geotextile Woven* dengan indikator pengujian sesuai pengujian pabrik.
 d) Mobilisasi alat berat, material, dan tenaga kerja untuk instalasi *Geotextile Woven*.

Tabel 7.3 Daftar Alat Instalasi *Geotextile Woven*

Jenis Alat	Tipe
<i>Tugboat</i>	Kaltim Dolphin 1009
<i>Service Boat</i>	MD-14
Tongkang	<i>Crane Barge</i> Tona 1
Patok	Pasak Besi
<i>Guide Buoy</i>	Dan Fender <i>Mini Buoy</i>
<i>Guideline</i>	Tali Manila
<i>Total Station</i>	TOPCON GTS-235N

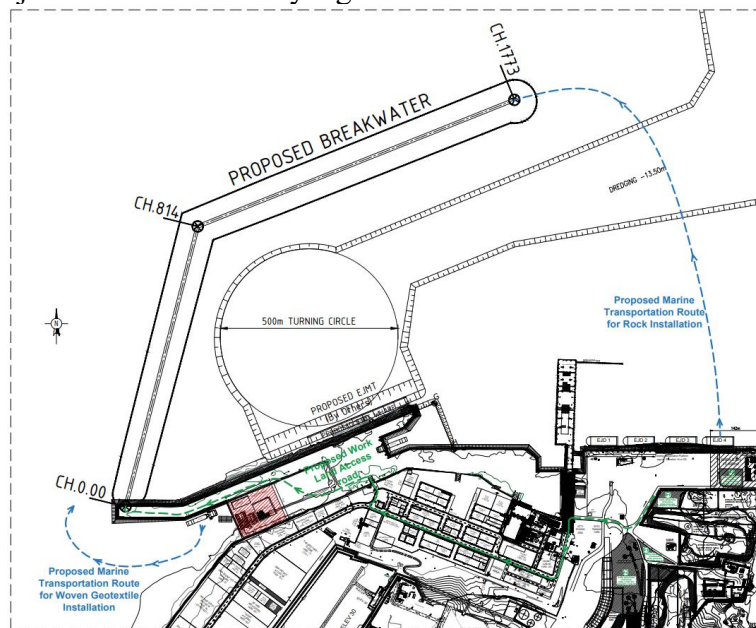
Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

- e) Material *Geotextile Woven* akan dimuat menggunakan tongkang.



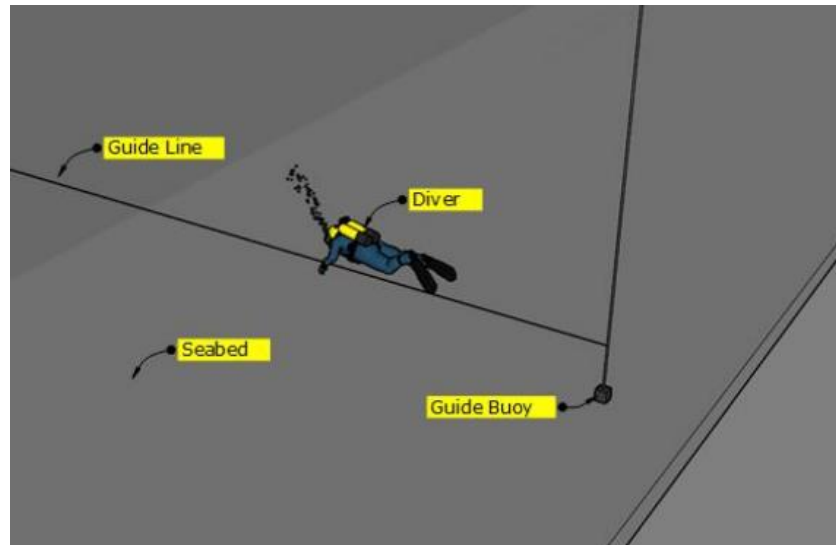
Gambar 7.8 Pemuatan Material *Geotextile Woven*
Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

- f) Instalasi *Geotextile Woven* dilakukan melalui jalur laut yang diangkut menggunakan tongkang menuju lokasi *breakwater* yang telah direncanakan.

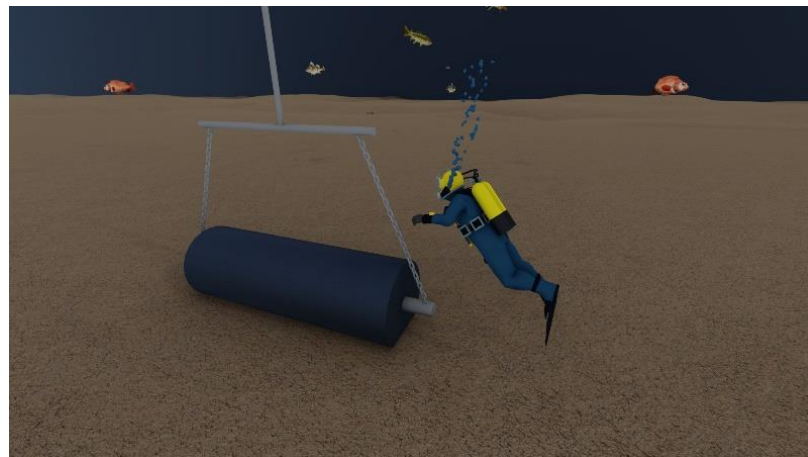


Gambar 7.9 Lalu Lintas Jalur Darat dan Laut
Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

- g) *Geotextile Woven* dipasang pada roller yang dikaitkan dengan boom pada crane untuk memudahkan pemasangan di bawah air. Pemasangan dilakukan oleh penyelam dengan menenggelamkan *Geotextile Woven* kemudian menggelarnya saat *Geotextile Woven* sudah berada di seabed. Penggelaran dilakukan sesuai dengan batas-batas area yang telah ditandai dengan *guide line*. Patok dipasang setiap 3 m dan kantong pasir setiap 5 m untuk memastikan *geotextile* tidak terbawa arus laut.



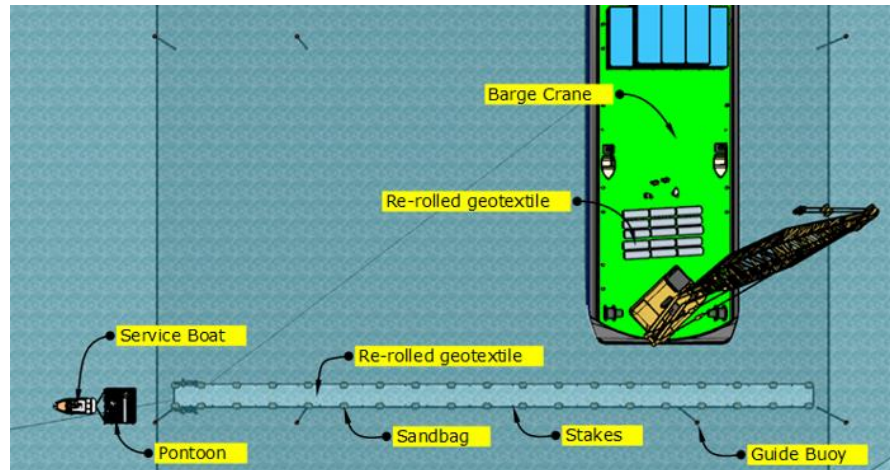
Gambar 7.10 Pemasangan *Guide Line*
 Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)



Gambar 7.11 Penenggelaman *Geotextile Woven* (1)

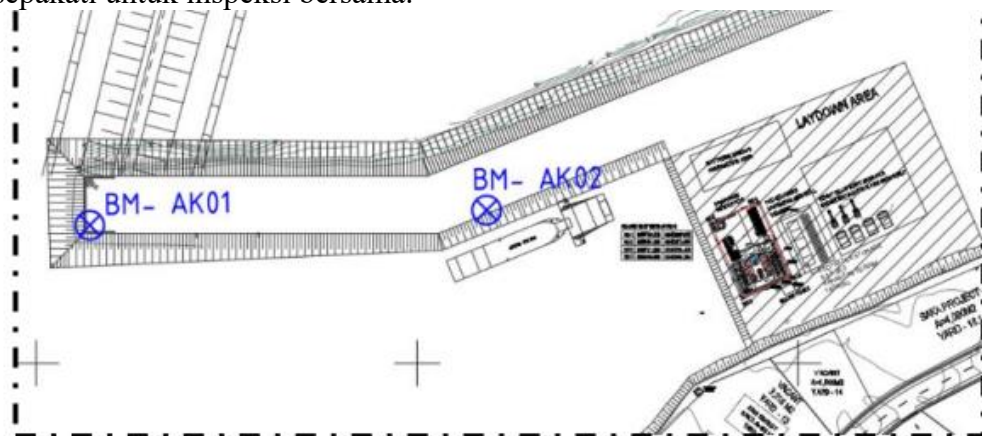


Gambar 7.12 Penggelaran *Geotextile Woven* (2)



Gambar 7.13 Posisi Instalasi *Geotextile Woven*
Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

- h) Setelah instalasi selesai, dilakukan ITP dari *Geotextile Woven*. Langkah-langkah pengecekan ITP adalah sebagai berikut.
1. Menyiapkan peralatan survei *multi beam* dengan lokasi *bench mark* yang telah disepakati untuk inspeksi bersama.



Gambar 7.14 Posisi *Bench Mark*
Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

2. Memeriksa *overlap* menggunakan kamera di bawah air.
Surveyor memeriksa lebar *Geotextile Woven* menggunakan alat survei

7.1.2 Pekerjaan *Breakwater*

Pekerjaan *breakwater* mencakup seluruh proses konstruksi struktur *breakwater*. Pekerjaan instalasi *breakwater* dikerjakan menggunakan *land construction* dan *marine construction* sesuai gambar rencana yang telah disetujui oleh *owner*.

7.1.2.1 Pekerjaan *Excavation* STA 0+00

Pekerjaan ini mencakup kegiatan pengerukan pada STA 0+00. Pekerjaan *breakwater* akan dibangun terhubung dengan lokasi reklamasi yang ada, sehingga perlu disesuaikan dengan kondisi *existing*. Penyesuaian dilakukan dengan melakukan pengerukan di lereng reklamasi untuk menciptakan konektivitas yang aman dan stabil dengan struktur *breakwater*. Pengerukan akan dilakukan di sepanjang lebar *breakwater*. Pada desain *breakwater*, STA 0+00 dibuat membulat untuk memperkuat struktur di area tersebut. Area STA 0+00 termasuk STA 0+00 hingga STA 0+35. Berikut merupakan diagram alir pekerjaan *excavation* STA 0+00.



Gambar 7.15 Diagram Alir Pekerjaan *Excavation* STA 0+00

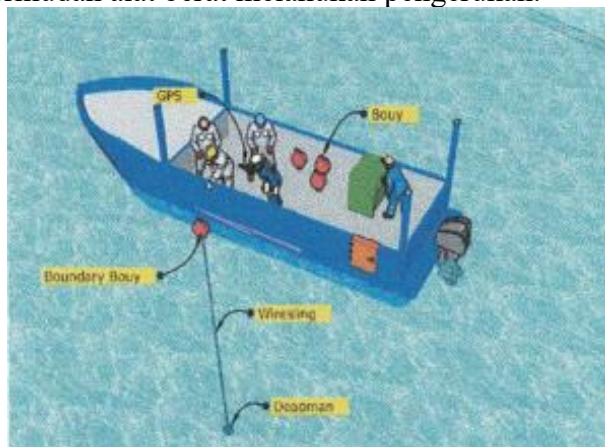
Tahapan dari pekerjaan *excavation* adalah sebagai berikut.

- a) Mobilisasi alat berat, material, dan tenaga kerja untuk *excavation*.

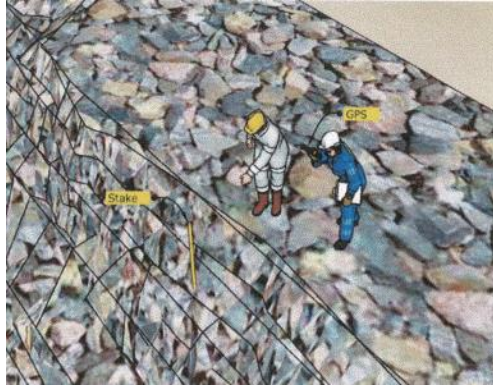
Tabel 7.4 Daftar Alat *Excavation*

Jenis Alat	Tipe
<i>Clamshell Crane</i>	Tona 1
<i>Excavator</i>	<i>Standart</i> ; 1,2 m3; 165 HP
<i>Excavator</i>	<i>Long Arm</i> PC-200; 165 HP
<i>Dumptruck</i>	10 m3; 130 HP
GPS RTK	GPS Geodetik Acnovo GX9
<i>Total Station</i>	TOPCON GTS-235N

- b) Memasang *guide bouy* pada sisi galian yang berada di laut, sedangkan pada sisi darat dipasang patok berupa bambu. *Guide bouy* dan patok tersebut digunakan sebagai penanda lokasi untuk mempermudah alat berat melakukan pengerukan.



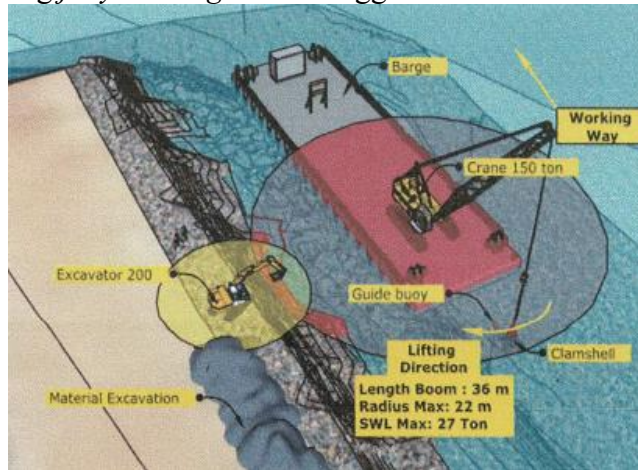
Gambar 7.16 Pemasangan *Guide Bouy*
Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)



Gambar 7.17 Pemasangan Patok STA 0+00

Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

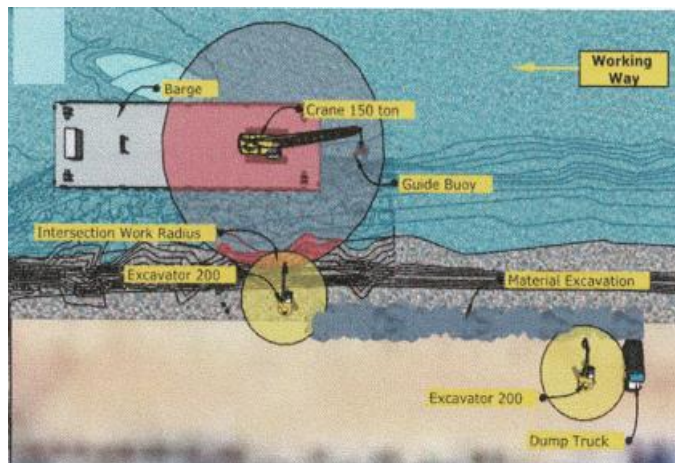
- c) Untuk pengerukan pada *seabed* akan dilakukan menggunakan *clamshell crane*, sedangkan pada lereng *jetty existing* akan menggunakan alat berat *excavator*.



Gambar 7.18 Pengerukan *Seabed*

Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

- d) Material galian akan ditimbun sementara di lahan terdekat yang terjangkau oleh lengan alat berat. Material yang ditimbun sementara tersebut kemudian diangkut ke *disposal area*.



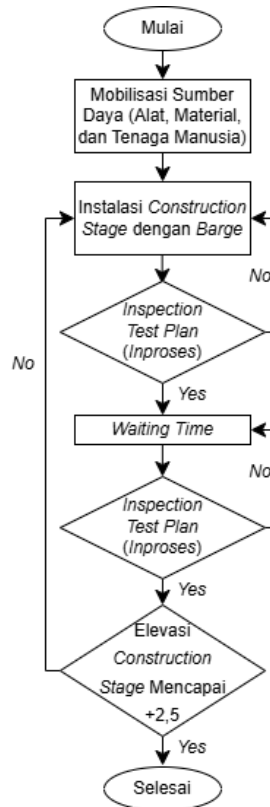
Gambar 7.19 Pengangkutan Galian Menuju *Disposal Area*

Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

- e) Inspeksi dilakukan dengan alat GPS RTK dan *total station* untuk mengetahui koordinat hasil *excavation*.

7.1.2.2 Instalasi Tubuh *Breakwater* (*Marine Construction*)

Pekerjaan ini mencakup kegiatan instalasi tubuh *breakwater* dengan timbunan batu menggunakan jalur laut. Pekerjaan instalasi tubuh *breakwater* menggunakan *marine construction* dilakukan mulai dari *seabed* sampai dengan elevasi +3,5 (seluruh jenis batu kecuali *topping layer*). Berikut merupakan diagram alir pekerjaan instalasi tubuh *breakwater* dengan jalur laut.



Gambar 7.20 Diagram Alir Instalasi Tubuh *Breakwater* (*Marine Construction*)

Tahapan dari pekerjaan instalasi tubuh *breakwater* dengan jalur laut adalah sebagai berikut.

- f) Mobilisasi alat berat, material, dan tenaga kerja untuk instalasi tubuh *breakwater*.

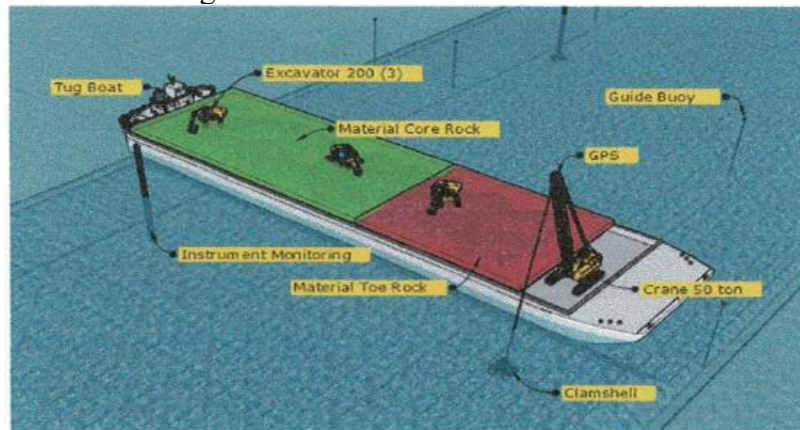
Tabel 7.5 Daftar Alat Instalasi Tubuh *Breakwater* (*Marine Construction*)

Jenis Alat	Tipe
<i>Tug Boat</i>	Kanaka 10
<i>Crane Barge</i>	Onasis-11
<i>Stock Barge</i>	KALTIM FT 36-08
<i>Clamshell</i>	Tona 1
<i>Excavator</i>	Standart; 1,2 m3; 165 HP
<i>Excavator</i>	Long Arm PC-200; 165 HP
<i>Dumptruck</i>	10 m3; 130 HP
GPS RTK	GPS Geodetik Acnovo GX9
<i>Total Station</i>	TOPCON GTS-235N
<i>Multibeam Sonar</i>	SeaBat T50 R

Sumber: Analisis Peulis (2024)

- g) Material batu pada *marine consruction* akan dimuat menggunakan tongkang dari *stockpile* menuju lokasi *breakwater* yang telah direncanakan.
h) Untuk mengontrol posisi batu yang akan diinstal, surveyor memasang *guide buoy* dan GPS (di atas *boom crane*).

i) Instalasi batu dilakukan dengan *clamshell crane*.

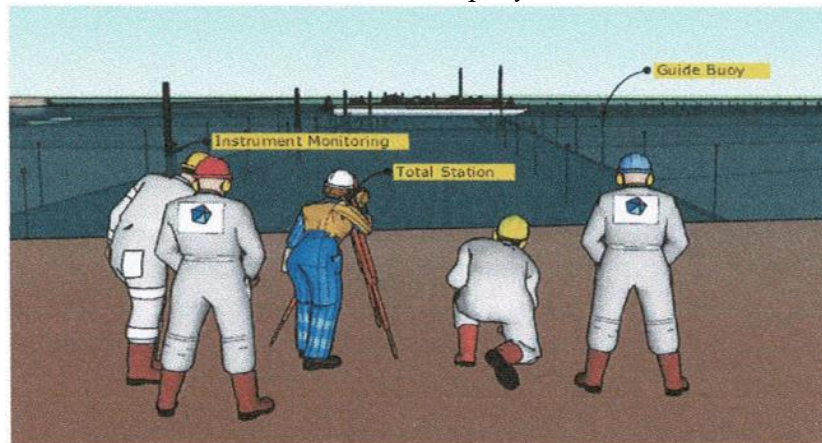


Gambar 7.21 Instalasi Batu (*Marine Construction*)

Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

j) Instalasi dilakukan bertahap hingga mencapai elevasi +3,5.

k) Pada setiap instalasi *construction stage* dilakukan inspeksi bersama untuk mengetahui akurasi posisi, elevasi, dan ketebalan dari setiap *layer* batu.

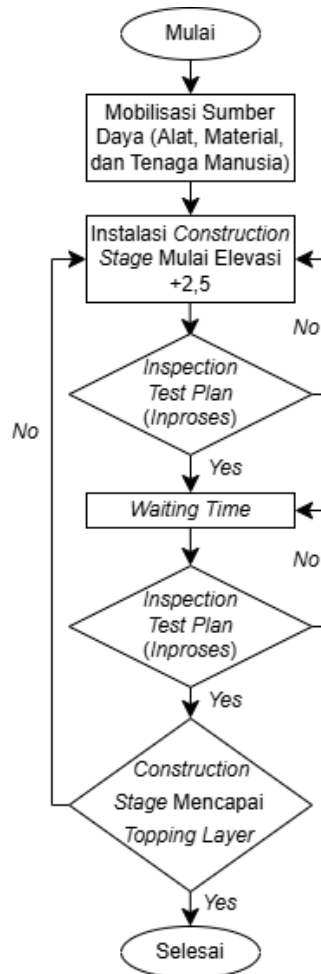


Gambar 7.22 *Join Inspection*

Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

7.1.2.3 Instalasi Tubuh *Breakwater* (*Land Construction*)

Pekerjaan ini mencakup kegiatan instalasi tubuh *breakwater* dengan timbunan batu menggunakan jalur darat. Pekerjaan instalasi tubuh *breakwater* menggunakan *land construction* dilakukan mulai dari elevasi +3,5 sampai dengan *topping layer* sesuai gambar rencana. Jenis batu yang diinstal menggunakan jalur darat antara lain *secondary layer armour rock*, *armour rock (trunk dan head)*, serta *topping layer*. Berikut pada Gambar 7.18 merupakan diagram alir pekerjaan instalasi tubuh *breakwater* dengan jalur darat.



Gambar 7.23 Diagram Alir Instalasi Tubuh *Breakwater* (Land Construction)

Sumber: Analisis Peulis (2024)

Tahapan dari pekerjaan instalasi tubuh *breakwater* dengan jalur darat adalah sebagai berikut.

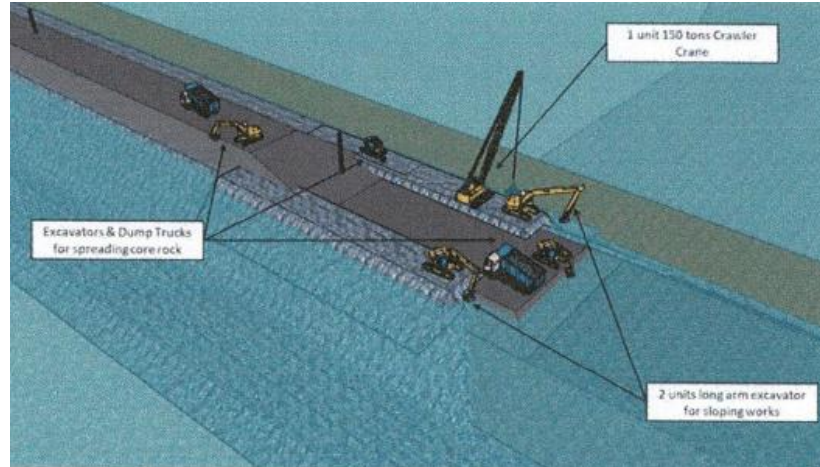
- a) Mobilisasi alat berat, material, dan tenaga kerja untuk instalasi tubuh *breakwater*.

Tabel 7.6 Daftar Alat Instalasi Tubuh *Breakwater* (Land Construction)

Jenis Alat	Tipe
<i>Excavator</i>	<i>Standart</i> ; 1,2 m ³ ; 165 HP
<i>Excavator</i>	<i>Long Arm</i> PC-200; 165 HP
<i>Dumptruck</i>	10 m ³ ; 130 HP
GPS RTK	GPS Geodetik Acnovo GX9
<i>Total Station</i>	TOPCON GTS-235N

Sumber: Analisis Peulis (2024)

- b) Material batu pada *land consruction* akan dimuat menggunakan *dumptruck* dari *stockpile* menuju lokasi *breakwater* yang telah direncanakan.
- c) Instalasi *topping layer* dilakukan menggunakan *excavator*, sedangkan *armour rock*, *core rock*, dan *toe rock* menggunakan *crawler crane*. Instalasi dilakukan bertahap +3,5 hingga instalasi *topping layer*.



Gambar 7.24 Instalasi Batu (*Land Construction*)

Sumber: *Method Statement* Proyek EBW (2024)

- d) Pada setiap instalasi *construction stage* dilakukan inspeksi bersama untuk mengetahui akurasi posisi, elevasi, dan ketebalan dari setiap *layer* batu hingga mencapai instalasi *topping layer* selesai.

7.2 Volume Pekerjaan

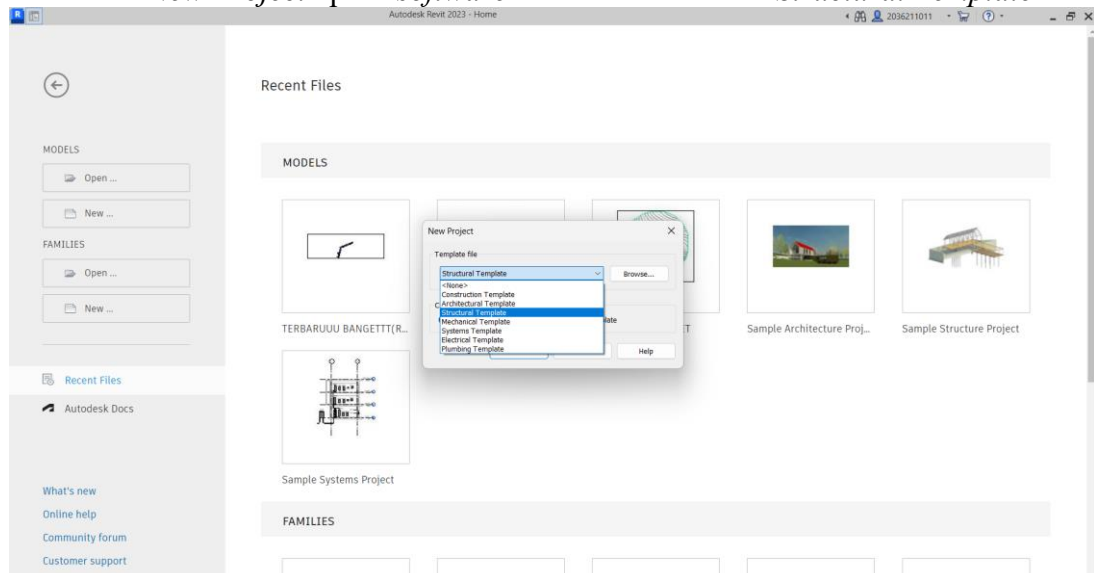
7.2.1 Pemodelan Autodesk Revit 2025

Pemodelan 3D struktur *breakwater* pada laporan ini menggunakan *software* Autodesk Revit 2023. Setelah dimodelkan dalam bentuk 3D, selanjutnya akan dilakukan pemodelan 5D untuk menghasilkan *report quantity take off* atau volume pada BIM. Langkah-langkah dalam pemodelan adalah sebagai berikut.

1. Memodelkan Gambar Kerja *Breakwater*

a. Membuka *Structural Template* pada Revit

Membuka "New Project" pada *software* Revit dan memilih "Structural Template".

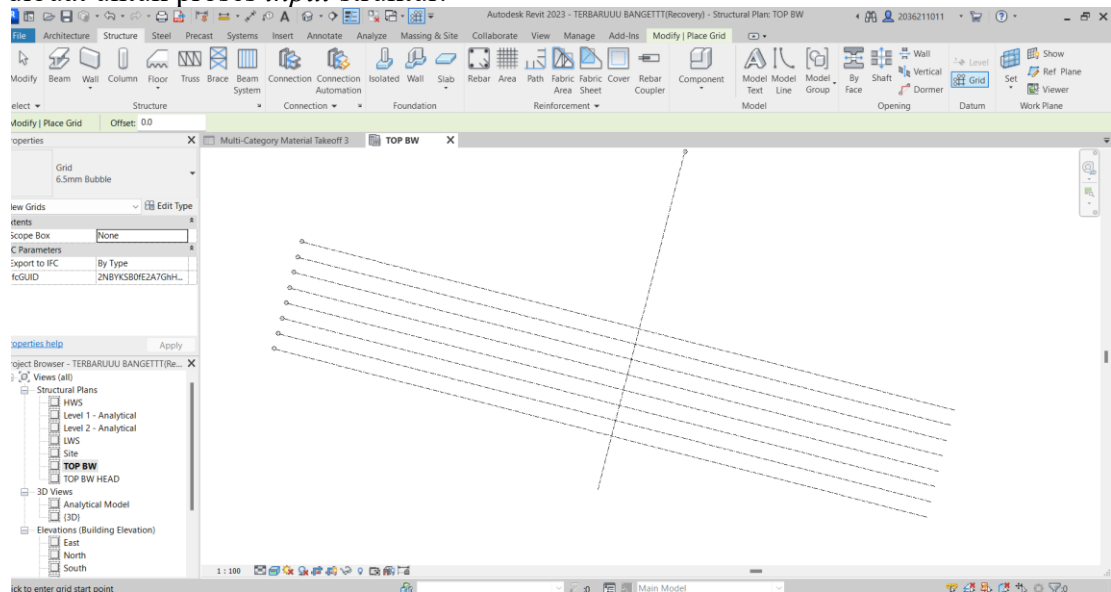


Gambar 7.25 *Structural Template* pada Revit

b. Membuat *Grid*

Membuat *grid* dilakukan dengan membuka "Structure" dan pada bagian "Datum" pilih "Grid". Pembuatan *grid* bertujuan untuk memberi tanda pada perletakan tiap komponen

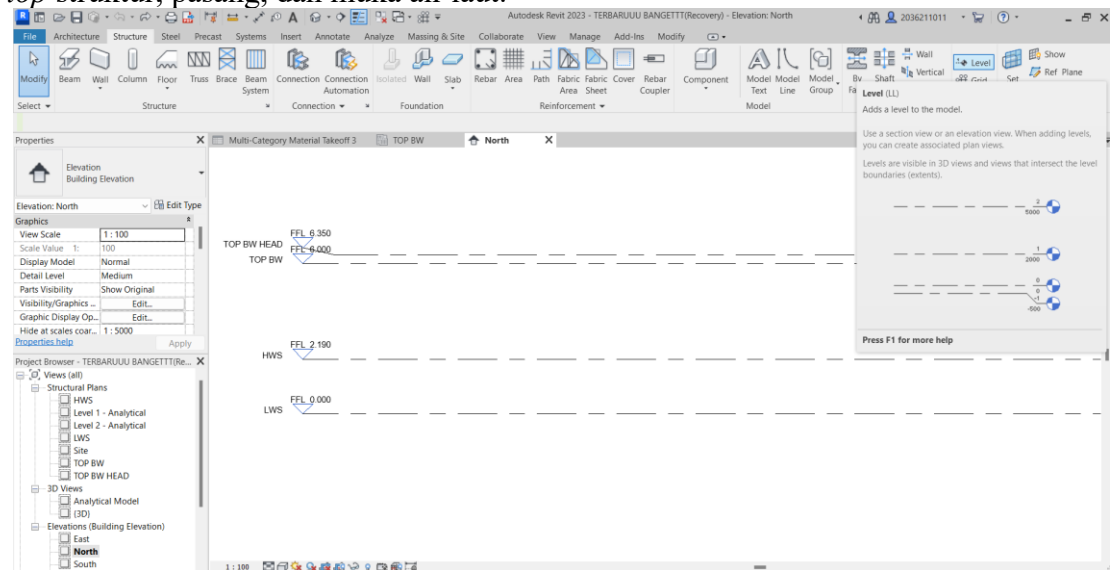
pemodelan. *Grid* tersebut juga akan membantu penamaan *section*/potongan yang akan dibuat untuk proses *input* struktur.



Gambar 7.26 Membuat *Grid*

c. Membuat *Level*

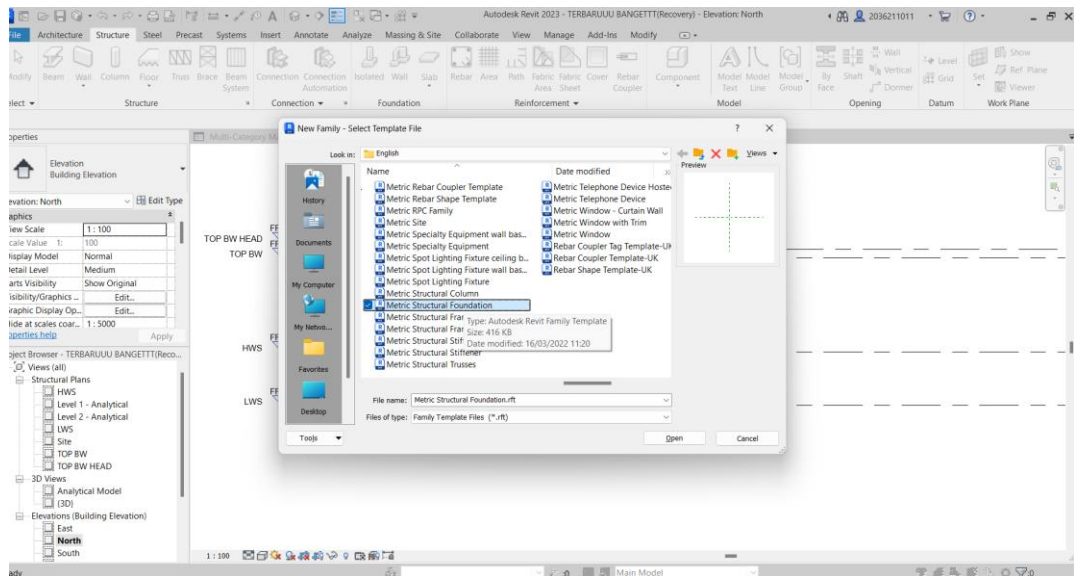
Membuat *level* dilakukan dengan membuka “*Structure*” dan pada bagian “*Datum*” pilih “*Level*”. Pembuatan *level* bertujuan untuk memberi acuan elevasi perletakan tiap komponen pemodelan. Pada bagian ini elevasi yang perlu di-*input* antara lain elevasi *top* struktur, pasang, dan muka air laut.



Gambar 7.27 Membuat *Level*

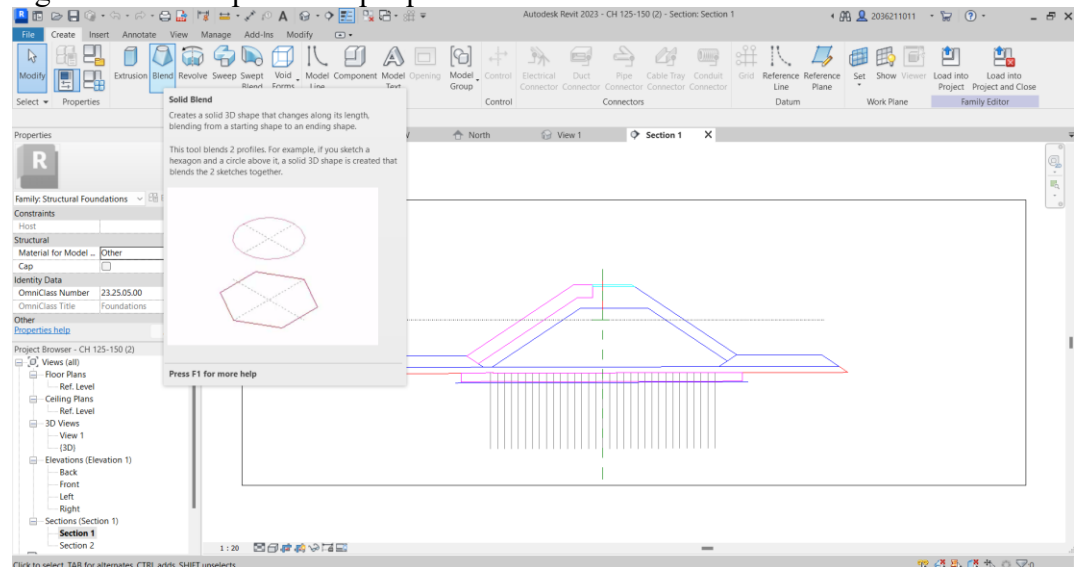
d. Membuka *Family Template* pada Revit

Pemodelan yang dilakukan berdasarkan tiap *cross section breakwater* dengan menggunakan “*Family Template*” tipe “*Structural Foundation*”.



Gambar 7.28 *Family Template* pada Revit

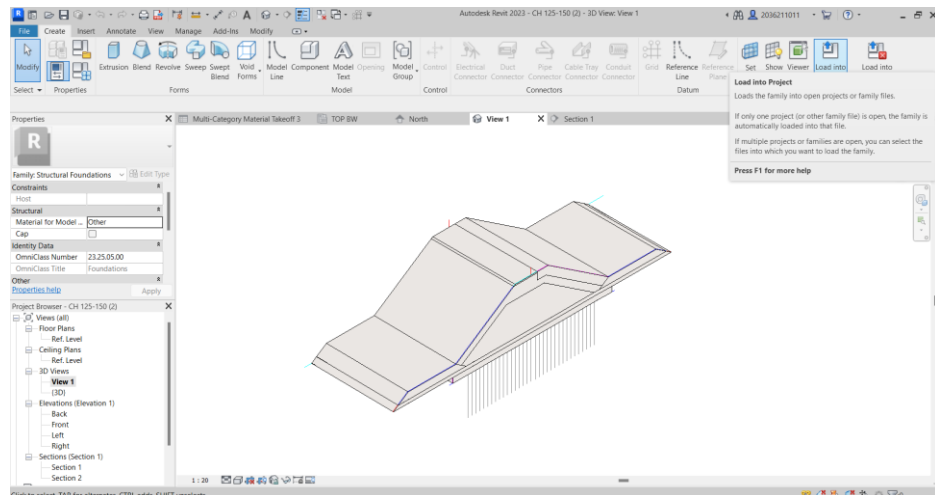
Tool yang digunakan untuk *modeling* adalah *blend*. Untuk menggunakan *tool* tersebut perlu menggambar dua *cross section* yang bersambung kemudian ditarik searah gambar kerja sesuai dengan panjangnya. Setelah pemodelan selesai, kemudian dilakukan pengisian material pada setiap lapisan.



Gambar 7.29 Fitur *Blend* pada Revit

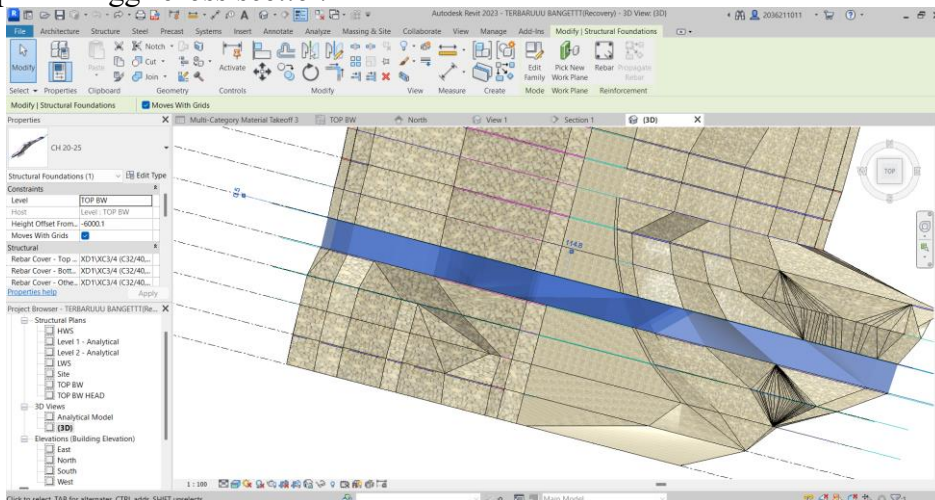
e. *Load Into Project*

Melakukan *input model* dari "*Family Template*" ke "*Project*" menggunakan *tool* "*Load Into Project*".



Gambar 7.30 Load Into Project

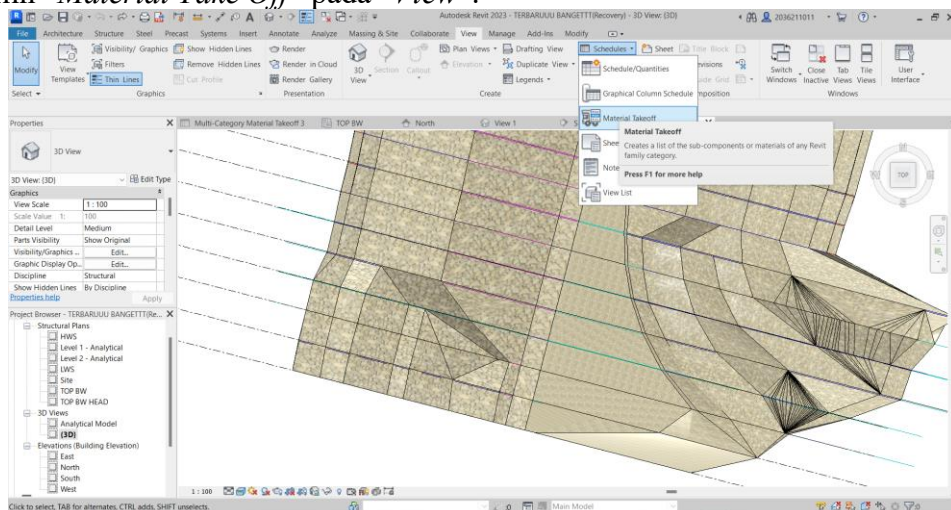
Setelah model ter-input, selanjutnya menyesuaikan perletakan dengan bantuan "Grid" dan "Level" yang telah dibuat. Untuk menyelesaikan pemodelan struktur ulangi langkah b sampai d hingga cross section terakhir.



Gambar 7.31 Penempatan Section pada Revit

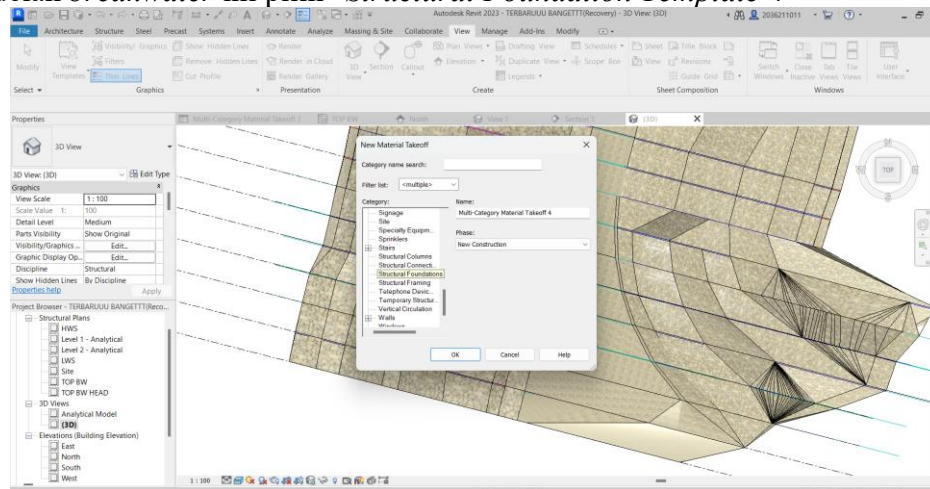
2. Volume Quantity Take Off

Untuk memunculkan quantity take off pada breakwater dapat dilakukan dengan memilih "Material Take Off" pada "View".



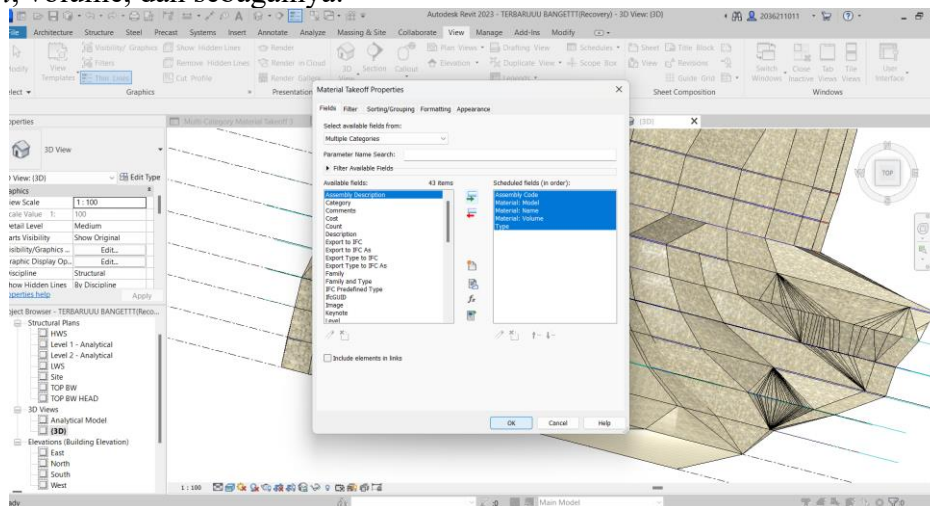
Gambar 7.32 Proses Quantity Take Off pada Revit (1)

Pilih *template* pada pemodelan yang akan dilakukan analisis volumenya. Untuk pemodelan *breakwater* ini pilih "*Structural Foundation Template*".



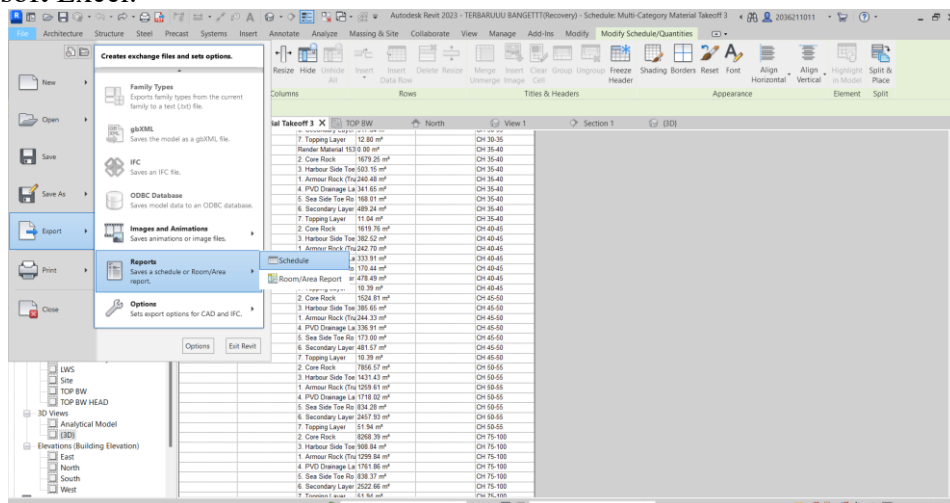
Gambar 7.33 Proses *Quantity Take Off* pada Revit (2)

Pada *properties* pilih informasi yang diperlukan meliputi nama material, lokasi *cross section*, volume, dan sebagainya.



Gambar 7.34 Proses *Quantity Take Off* pada Revit (3)

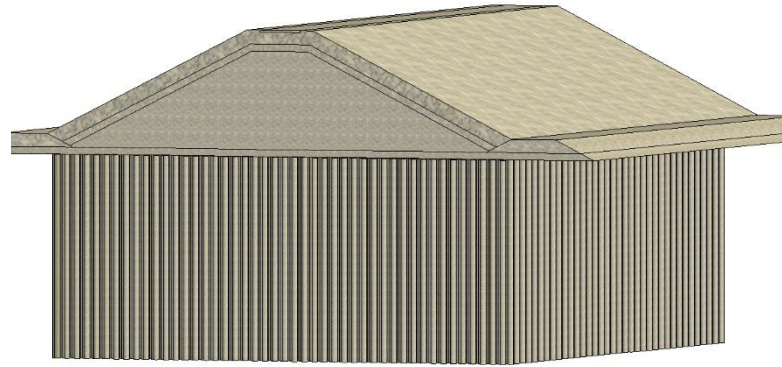
Setelah analisis *Quantity Take Off* pada BIM muncul, kemudian *export* data pada Microsoft Excel.



Gambar 7.35 Proses *Export Quantity Take Off* pada Revit

7.2.2 Quantity Take Off Pada Autodesk Revit 2025

Setelah pemodelan struktur *breakwater* dilakukan, maka selanjutnya perlu dikalkulasikan *quantity take off* dari setiap material sesuai dengan model. Berikut merupakan contoh dari hasil pemodelan dan *quantity take off* pada STA 1+500 sampai dengan STA 1+600.



Gambar 7.36 Pemodelan Pada Revit STA 1+500 Sampai STA 1+600

<Material Take Off>		
A	B	C
Lokasi	Material	Volume
STA 1500 -1600	Crushed Stone	40429.26 m ³
STA 1500 -1600	Core Rock	59939.20 m ³
STA 1500 -1600	Harbour Side Toe Rock	1990.92 m ³
STA 1500 -1600	Armour Rock (Trunk)	14898.47 m ³
STA 1500 -1600	Sea Side Toe Rock	1999.81 m ³
STA 1500 -1600	Secondary Layer Armour Rock	7101.66 m ³
STA 1500 -1600	Topping Layer	180.00 m ³

Gambar 7.37 Output Quantity Take Off STA 1+500 - 1+600 Pada Revit

Quantity take off dari setiap STA dapat dilihat selengkapnya pada Lampiran E.1. Berdasarkan kalkulasi tersebut, total volume setiap material dari desain yang telah direncanakan adalah sebagai berikut.

Tabel 7.7 Rekapistulasi Volume Material Pada Revit

No	Material	Volume (m ³)
1	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	241.081,27
2	<i>Core Rock</i>	765.351,44
3	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	36.991,03
4	<i>Seaside Toe Rock</i>	34.754,52
5	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	115.389,65
6	<i>Topping Layer</i>	3.407,52
7	<i>Armour Rock (Head)</i>	5.796,12
8	<i>Crushed Stone</i>	640.069,35

Dengan volume yang tertera pada Tabel 7.7, dapat dihitung produktivitas alat berat dan durasi pekerjaan dari instalasi setiap material.

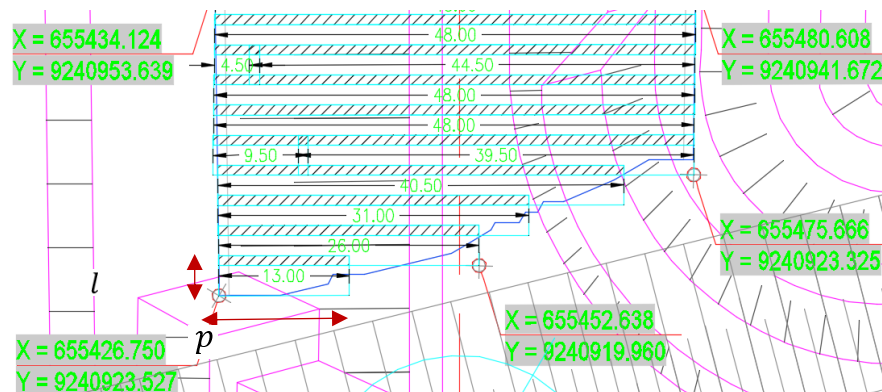
7.2.3 Volume Metode Konvensional

Metode konvensional dalam perhitungan volume digunakan dalam 2 item pekerjaan, yaitu *geotextile* sebagai separator pada dasar timbunan dan *geotextile* sebagai pembungkus

stone column atau GESC. Perhitungan volume pekerjaan menggunakan metode konvensional adalah sebagai berikut.

1. *Geotextile Woven* Pada Dasar Timbunan

Volume pekerjaan instalasi *Geotextile Woven* pada dasar timbunan memiliki satuan luas (m^2) karena material tersebut berbentuk lembaran yang akan dipasang di atas *seabed* mulai dari STA 0+020 sampai ujung *breakwater*. Gambar rencana instalasi *Geotextile Woven* pada dasar timbunan dapat dilihat pada Lampiran Gambar Kerja. *Geotextile* diinstal dengan *overlap* 1 meter pada setiap lapisan. Perhitungan volume dilakukan dengan menghitung total panjang *Geotextile* pada setiap segmen kemudian dikalikan dengan lebar 5 meter (termasuk *overlap*). Perhitungan volume *Geotextile Woven* menggunakan rumus sebagai berikut.



Gambar 7.38 Plan of *Geotextile Woven*

$$L = p \times l$$

Dimana:

L = Luas (m^2)

p = Panjang (m)

l = Lebar (m)

Contoh perhitungan luas *Geotextile Woven* baris pertama adalah sebagai berikut.

$$L = 13 \text{ m} \times 5 \text{ m}$$

$$L = 65 \text{ m}^2$$

Jadi kebutuhan lembar *Geotextile Woven* pada baris pertama pada Segmen 1 adalah 52 m^2 . Berikut merupakan rekapitulasi perhitungan volume pekerjaan instalasi *Geotextile* pada setiap segmen.

Tabel 7.8 Volume *Geotextile Woven* Pada Dasar Timbunan

Segmen	Lebar (m)	Panjang (m)	Luas (m^2)
1	2	3	4
1		2.507	12.535,0
2		1.587	7.935,0
3		1.572,5	7.862,5
4		2.373	11.865,0
5		1.516	7.580,0
6	5	1.531,5	7.657,5
7		3.073,5	15.367,5
8		3.096,5	15.482,5
9		3.580,5	17.902,5
10		3.173,5	15.867,5
11		1.533,5	7.667,5
Total			127.723

Keterangan:

[1]: Segmen

[2]: Lebar *Geotextile Woven* setiap lembar (m)

[3]: Panjang *Geotextile Woven* (m)

[4]: Luas kebutuhan *Geotextile Woven* setiap segmen = $\Sigma ([2] \times [3])$ (m)

2. Selubung *Geotextile* Pada GESC

Titik instalasi GESC berdasarkan Lampiran Gambar Kerja sejumlah 59.501 titik. Berdasarkan analisis sebelumnya, GESC membutuhkan 1 lapis *Geotextile* sebagai pembungkus dengan pemasangan *overlap* 0,5 meter. Maka, total kebutuhan *Geotextile* adalah 403.380 m².

Segmen	Lebar (m)	Panjang (m)	Titik	Luas (m ²)
1	2	3	4	5
1		6	6.283	56.547,0
2		4	4.414	26.484,0
3		4	4.478	26.868,0
4		5	6.084	45.630,0
5		4	4.316	25.896,0
6	1,5	4	4.316	25.896,0
7		5	6.283	47.122,5
8		4	6.283	37.698,0
9		4	6.283	37.698,0
10		5	6.283	47.122,5
11		4	4.478	26.868,0
Total			59.501	403.830

Keterangan:

[1]: Segmen

[2]: Lebar *Geotextile Woven* setiap 1 lapis (m)

[3]: Tanah dengan gaya geser *undrained* < 1,53 t/m² (m)

[4]: Jumlah titik instalasi GESC setiap segmen

[5]: Luas Kebutuhan *Geotextile Woven* Setiap Segmen = $\Sigma ([2] \times [3] \times [4])$ (m)

7.3 Produktivitas Alat Berat

Produktivitas alat berat diperhitungkan sebagai salah satu acuan dalam membuat jadwal pelaksanaan proyek konstruksi. Volume yang dipakai dalam analisis produktivitas adalah volume metode BIM untuk instalasi batu pada struktur *breakwater* dan GESC. Selain itu, juga digunakan volume dari metode konvensional pada pekerjaan instalasi *Geotextile Woven* serta pembuatan selubung *Geotextile* pada GESC. Hasil perhitungan produktivitas alat berat dapat digunakan untuk menentukan kebutuhan alat berat serta durasi pada setiap pekerjaan. Berikut merupakan contoh perhitungan produktivitas alat berat pada setiap pekerjaan di Segmen 10.

7.3.1 Pekerjaan Perbaikan Tanah

7.3.1.1 Instalasi *Geotextile Woven*

A. Data

- Volume Pekerjaan = 13.368 m²
- Rencana Waktu = 15 hari/segmen
- Jam Kerja = 8 jam/hari

B. Perhitungan Produktivitas

Tabel 7.9 Produktivitas Alat Berat Instalasi *Geotextile Woven*

No	Uraian Peralatan	Kode	Koefisien	Satuan	Ket
1	<i>Tugboat dan Ponton</i>				
	Mengangkut <i>Geotextile</i> dari <i>Stockpile</i> ke Lokasi Pekerjaan				
-	Kapasitas	V	3.000	m ²	
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Jarak Angkut	L	1,5	km	
-	Kecepatan Rerata Muat	V1	20	km/jam	
-	Kecepatan Rerata Kosong	V2	40	km/jam	
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4+T5)	CT1	33,75	menit	
-	Waktu Tempuh Isi (L/V1) x (60)	T1	4,5	menit	
-	Waktu Tempuh Kosong (L/V2) x (60)	T2	2,25	menit	
-	Waktu Muat	T3	20	menit	
-	Waktu Bongkar	T4	5	menit	
-	Waktu Lain-Lain	T5	2	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fa x 60)/(CT1)	Q1	4.426,667	m ² /jam	
			35.413,333	m ² /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q1)		0,001	jam	
2	<i>Diving Works</i>				
	Penggelaran <i>Geotextile</i> pada <i>Seabed</i> (2 Diver)				
	Kapasitas per <i>Roll</i>	V	40	m ²	
-	Waktu Persiapan	T1	2	menit	
-	Waktu Penarikan <i>Geotextile</i>	T2	10	menit	
-	Waktu Penyesuaian Posisi	T3	5	menit	
-	Waktu Penggelaran	T4	15	menit	
-	Waktu Pemasangan Patok	T5	3	menit	
-	Waktu Pemasangan <i>Sandbag</i>	T6	5	menit	
-	Waktu Lain-lain	T7	2	menit	
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7)	CT2	42	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x 60) /(CT2)	Q2	57,143	m ² /jam	
			457,143	m ² /hari	
	Koefisien Alat (1/Q2)		0,018	jam	

C. Kebutuhan Jumlah Alat/Kelompok Kerja

Perhitungan jumlah alat dari pekerjaan instalasi *Geotextile Woven* adalah sebagai berikut.

- *Tug Boat dan Ponton* (Mengangkut *Geotextile* dari *Stockpile* ke Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{13.368 \text{ m}^2}{35.413,333 \text{ m}^2/\text{hari} \times 15 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 0,025$$

$$\text{Jumlah Alat} = 1 \text{ alat}$$

- *Diving Works* (Instalasi *Geotextile* pada Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{13.368 \text{ m}^2}{457,143 \text{ m}^2/\text{hari} \times 15 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 1,949$$

$$\text{Jumlah Alat} = 2 \text{ kelompok kerja}$$

D. Perhitungan Durasi

Perhitungan durasi dari pekerjaan instalasi *Geotextile Woven* adalah sebagai berikut.

- *Tug Boat* dan *Ponton* (Mengangkut *Geotextile* dari *Stockpile* ke Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{13.368 \text{ m}^2}{35.413,333 \text{ m}^2/\text{hari} \times 1 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 0,377$$

$$\text{Durasi} = 1 \text{ hari}$$

- *Diving Works* (Instalasi *Geotextile* pada Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{KKapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Kel. Kerja}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{13.368 \text{ m}^2}{457,143 \text{ m}^2/\text{hari} \times 2 \text{ kelompok kerja}}$$

$$\text{Durasi} = 14,621$$

$$\text{Durasi} = 15 \text{ hari}$$

Jadi durasi yang dibutuhkan untuk melakukan pekerjaan instalasi *Geotextile Woven* pada Segmen 10 adalah 15 hari.

7.3.1.2 Penggulungan *Geotextile Woven* Pada GESC

A. Data

- Volume Pekerjaan = 403.830 m²
- Rencana Waktu = 6 hari
- Jam Kerja = 8 jam/hari

B. Perhitungan Produktivitas

Tabel 7.10 Produktivitas Penggulungan *Geotextile Woven* Pada GESC

No	Uraian Peralatan	Kode	Koefisien	Satuan Ket
1 Land Works				
Penggulungan <i>Geotextile</i> Untuk GESC				
	Kapasitas per <i>Roll</i>	V	300	m ²
-	Waktu Persiapan	T1	1	menit
-	Waktu Penyesuaian Posisi <i>Geotextile</i>	T2	1	menit
-	Waktu Penggelaran <i>Geotextile</i>	T3	2	menit
-	Waktu Peletakan <i>Plastic Tube</i>	T4	2	menit
	Waktu Penggulungan Tiap Diameter 1			
-	m	T5	1	menit
-	Waktu Penjahitan	T6	1	menit
-	Waktu Lain-lain	T7	1	menit
	Waktu Siklus			
-	(T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7)	CT1	9	menit
	Kapasitas Produksi (Vx60)/(CT2)	Q1	2.000,000	m ² /jam

No	Uraian Peralatan	Kode	Koefisien	Satuan	Ket
			16.000,000	m ² /hari	
	Koefisien Alat (1/Q2)		0,001	jam	
2 Tugboat dan Ponton					
	Mengangkut Selubung <i>Geotextile</i> dari <i>Stockpile</i> ke Lokasi Pekerjaan				
-	Kapasitas	V	6.000	m ²	
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Jarak Angkut	L	1,5	km	
-	Kecepatan Rerata Muat	V1	20	km/jam	
-	Kecepatan Rerata Kosong	V2	40	km/jam	
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4+T5)	CT2	33,75	menit	
-	Waktu Tempuh Isi (L/V1) x (60)	T1	4,5	menit	
-	Waktu Tempuh Kosong (L/V2) x (60)	T2	2,25	menit	
-	Waktu Muat	T3	20	menit	
-	Waktu Bongkar	T4	5	menit	
-	Waktu Lain-Lain	T5	2	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fax 60)/(CT2)	Q2	8853,333	m ² /jam	
			70826,667	m ² /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q)		0,000	jam	baik

C. Kebutuhan Jumlah Alat

Perhitungan jumlah alat dari pekerjaan pembuatan selubung *Geotextile Woven* adalah sebagai berikut.

- *Land Works* (Penggulungan *Geotextile Woven*)

$$\text{Jumlah Kelompok Kerja} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Kelompok Kerja} = \frac{403.830 \text{ m}^2}{16.000 \text{ m}^2/\text{hari} \times 6 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Kelompok Kerja} = 4,207$$

$$\text{Jumlah Kelompok Kerja} = 5 \text{ kelompok kerja}$$

- *Tugboat dan Ponton* (Mengangkut Selubung dari *Stockpile* ke Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{403.830 \text{ m}^2}{70.826,667 \text{ m}^2/\text{hari} \times 6 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 0,950$$

$$\text{Jumlah Alat} = 1 \text{ alat}$$

D. Perhitungan Durasi

Perhitungan durasi dari pekerjaan pembuatan selubung *Geotextile Woven* adalah sebagai berikut.

- *Land Works* (Penggulungan *Geotextile Woven*)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Kelompok Kerja}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{403.830 \text{ m}^2}{16000 \text{ m}^2/\text{hari} \times 5 \text{ kelompok kerja}}$$

$$\text{Durasi} = 5,048 \text{ hari}$$

Durasi = 6 hari

- *Tugboat* dan *Ponton* (Mengangkut Selubung dari *Stockpile* ke Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$= \frac{403.830 \text{ m}^2}{70.826,667 \text{ m}^2/\text{hari} \times 1 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 5,702 \text{ hari}$$

$$\text{Durasi} = 6 \text{ hari}$$

$$\text{Durasi} = 6 \text{ hari}$$

Jadi durasi yang dibutuhkan untuk melakukan pekerjaan penggulangan *Geotextile Woven* adalah 6 hari.

7.3.1.3 Instalasi *Geotextile-Encased Stone Column* (GESC)

A. Data

- Volume Pekerjaan = 76.624,091 m³
- Rencana Waktu = 48 hari/segmen
- Jam Kerja = 8 jam/hari

B. Perhitungan Produktivitas

Tabel 7.11 Produktivitas Alat Berat Instalasi GESC

No	Uraian Peralatan	Kode	Koefisien	Satuan	Ket
1	Excavator Standart PC-200: 0.8 m3: 125 HP				
	Pemuatan Batu ke <i>Dump Truck</i> di <i>Stockpile</i>				
-	Kapasitas <i>Bucket</i>	V	1,2	m ³	
-	Faktor <i>Bucket</i>	Fb	1		agak sulit
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Faktor Material Asli ke Lepas	Fk	1,7		batu keras
-	Waktu Siklus (T1+T2)	CT1	1	menit	
-	Mengeruk Material, <i>Swing</i> , dan Dimuat ke DT	T1	0,7	menit	
-	<i>Swing</i> Kembali dan Lain-Lain	T2	0,3	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fb x Fax 60) / (CT1 x Fk)	Q1	35,153	m ³ /jam	
			281,224	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q1)		0,028	jam	
2	DumpTruck; 20 m3; 130HP				
	Mengangkut Batu dari <i>Stockpile</i> ke <i>Ponton</i>				
-	Kapasitas Bak	V	20	m ³	
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Faktor Material Asli ke Lepas	Fk	1		batu keras
-	Jarak Angkut	L	1,2	km	
-	Kecepatan Rerata Muat	V1	20	km/jam	
-	Kecepatan Rerata Kosong	V2	40	km/jam	
-	Produktivitas <i>Excavator</i>	Q1	35,15	m ³ /jam	
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4)	CT2	40,54	menit	
-	Waktu Muat (V/Q1) x (60)	T1	34,14	menit	
-	Waktu Tempuh Isi (L/V1) x (60)	T2	3,6	menit	
-	Waktu Tempuh Kosong (L/V2) x (60)	T3	1,8	menit	

No	Uraian Peralatan	Kode	Koefisien	Satuan	Ket
-	Waktu Lain-Lain	T4	1	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fax 60) / (CT2 x Fk)	Q2	24,570	m ³ /jam	
			196,563	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q2)		0,041	jam	
3 Tugboat dan Ponton					
Mengangkut Batu dari Stockpile ke Lokasi Pekerjaan					
-	Kapasitas	V	2100	m ³	
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Faktor Material Asli ke Lepas	Fk	1,7		batu keras
-	Jarak Angkut	L	1,8	km	
-	Kecepatan Rerata Muat	V1	10	km/jam	
-	Kecepatan Rerata Kosong	V2	20	km/jam	
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4+T5)	CT3	48,2	menit	
-	Waktu Tempuh Isi (L/V1) x (60)	T1	10,8	menit	
-	Waktu Tempuh Kosong (L/V2) x (60)	T2	5,4	menit	
-	Waktu Muat	T3	30	menit	
-	Waktu Lain-Lain	T4	2	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fax 60) I (CT3x Fk)	Q3	1276,300	m ³ /jam	
			10210,398	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q3)		0,001	jam	
4 Crane Hydraulic with Vibro Rig and Guide Rig					
Instalasi <i>Steel Tube</i> pada Tanah Dasar					
-	Kapasitas	V	15	m ³	
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4+T5)	CT4	15	menit	
-	Waktu Persiapan	T1	1	menit	
-	Mengarahkan <i>Guide Rig</i> pada Posisi Koordinat	T2	2	menit	
-	Mendorong <i>Steel Tube</i> ke Bawah	T3	5	menit	
-	Waktu Bongkar	T4	5	menit	
-	Waktu lain-lain	T5	2	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fax 60) / (CT4)	Q4	50,085	m ³ /jam	
			400,677	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q4)		0,01997	jam	
5 Base Excavator with Smaller Steel Tube					
Instalasi <i>Steel Tube</i> Untuk Transfer Batu dan <i>Geotextile</i>					
-	Kapasitas	V	15	m ³	
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4+T5+T6)	CT5	36	menit	
-	Memasang <i>Geotextile</i> pada <i>Steel Tube</i>	T1	2	menit	
-	Mengarahkan <i>Steel Tube</i> pada Posisi Koordinat	T2	5	menit	
-	Mendorong <i>Steel Tube</i> ke Bawah	T3	8	menit	

No	Uraian Peralatan	Kode	Koefisien	Satuan	Ket
-	Memasang <i>Corong</i>	T4	2	menit	
-	Waktu Bongkar	T5	9	menit	
-	Waktu lain-lain	T6	10	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fax 60) / (CT5)	Q5	53,662	m ³ /jam	
			429,296	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q5)		0,01864	jam	
6 Excavator Long Arm PC-200: 0.8 m3: 125 HP					
Memuat Material ke Corong <i>Steel Tube</i>					
-	Kapasitas Bucket	V	1,2	m ³	
-	Faktor Bucket	Fb	1		agak sulit
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Faktor Material Asli ke Lepas	Fk	1		batu keras
-	Waktu Siklus (T1+T2)	CT6	1	menit	
-	Mengeruk Material, Swing dan Dituang ke Corong	T1	0,7	menit	
-	Swing Kembali dan Lain-Lain	T2	0,3	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fb x Fax 60) / (CT6 x Fk)	Q6	59,760	m ³ /jam	
			478,080	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1 /Q6)		0,017	jam	

C. Kebutuhan Jumlah Alat

Perhitungan jumlah alat dari pekerjaan instalasi GESC adalah sebagai berikut.

- *Excavator Standart* (Pemuatan Batu ke *Dumptruck* di *Stockpile*)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{281,224 \text{ m}^3/\text{hari} \times 48 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 5,263$$

$$\text{Jumlah Alat} = 6 \text{ alat}$$

- *Dumptruck* (Mengangkut Batu dari *Stockpile* ke Ponton)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{196,563 \text{ m}^3/\text{hari} \times 48 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 8,731$$

$$\text{Jumlah Alat} = 9 \text{ alat}$$

- *Tugboat & Ponton* (Mengangkut Batu dari *Stockpile* ke Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{10.210,398 \text{ m}^3/\text{hari} \times 48 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 0,008$$

$$\text{Jumlah Alat} = 1 \text{ alat}$$

- *Crane Hydraulic with Vibro Rig and Guide Rig* (Instalasi *Steel Tube* pada Tanah Dasar)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{400,677 \text{ m}^3/\text{hari} \times 48 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 3,914$$

$$\text{Jumlah Alat} = 4 \text{ alat}$$

- *Base Excavator with Smaller Steel Tube* (Instalasi *Smaller Steel Tube* Untuk Transfer Batu dan Selubung *Geotextile*)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{429,296 \text{ m}^3/\text{hari} \times 48 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 3,780$$

$$\text{Jumlah Alat} = 4 \text{ alat}$$

- *Excavator Long Arm* (Memuat Batu ke *Steel Tube*)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{478,080 \text{ m}^3/\text{hari} \times 48 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 3,263$$

$$\text{Jumlah Alat} = 4 \text{ alat}$$

D. Perhitungan Durasi

Perhitungan durasi dari pekerjaan instalasi GESC adalah sebagai berikut.

- *Excavator Standart* (Memuat Batu ke *Dump Truck* ke Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{281,224 \text{ m}^3/\text{hari} \times 6 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 46 \text{ hari}$$

- *Dump Truck* (Mengangkut Batu dari *Stockpile* ke Ponton)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{196,563 \text{ m}^3/\text{hari} \times 9 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 44 \text{ hari}$$

- *Tugboat & Ponton* (Memuat Batu ke Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{10.210,398 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 8 \text{ hari}$$

- *Crane Hydraulic with Vibro Rig and Guide Rig* (Instalasi *Steel Tube* pada Tanah Dasar)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{400,677 \text{ m}^3/\text{hari} \times 4 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 48 \text{ hari}$$

- *Base Excavator with Smaller Steel Tube* (Instalasi *Smaller Steel Tube* Untuk Transfer Batu dan Selubung *Geotextile*)

$$\text{Durasi} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{429,296 \text{ m}^3/\text{hari} \times 4 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 45 \text{ hari}$$

- *Excavator Long Arm* (Memuat Batu ke *Steel Tube*)

$$\text{Durasi} = \frac{76.624,09 \text{ m}^3}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{76.624,091 \text{ m}^3}{478,080 \text{ m}^3/\text{hari} \times 4 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 41 \text{ hari}$$

Jadi durasi yang dibutuhkan untuk melakukan pekerjaan instalasi GESC pada Segmen 10 adalah 48 hari.

7.3.2 Pekerjaan *Breakwater*

7.3.2.1 Instalasi Batu Jalur Laut

A. Data

- Volume Pekerjaan = 91.395,718 m³
- Rencana Waktu = 34 hari/segmen
- Jam Kerja = 8 jam/hari

B. Perhitungan Produktivitas

Tabel 7.12 Produktivitas Alat Berat Instalasi Batu Jalur Laut

No	Uraian Peralatan	Kode	Koefisien	Satuan	Ket
1	Excavator Standart PC-200: 0.8 m3: 125 HP				
	Pemuatan Batu ke <i>Dump Truck</i> di <i>Stockpile</i>				
-	Kapasitas <i>Bucket</i>	V	1,2	m ³	
-	Faktor <i>Bucket</i>	Fb	1		agak sulit
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Faktor Material Asli ke Lepas	Fk	1,7		batu keras
-	Waktu Siklus (T1+T2)	CTI	1	menit	
-	Mengeruk Material, <i>Swing</i> , dan Dimuat ke DT	T1	0,7	menit	
-	<i>Swing</i> Kembali dan Lain-lain	T2	0,3	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fb x Fa x 60) / (CTI x Fk)	QI	35,153	m ³ /jam	
			281,224	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q1)		0,028	jam	
2	Dump Truck; 20 m3; 130HP				
	Mengangkut Batu dari <i>Stockpile</i> ke Ponton				
-	Kapasitas Bak	V	20	m ³	
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Faktor Material Asli ke Lepas	Fk	1,7		batu keras

No	Uraian Peralatan	Kode	Koefisien	Satuan	Ket
-	Jarak Angkut	L	1,2	km	
-	Kecepatan Rerata Muat	VI	20	km/jam	
-	Kecepatan Rerata Kosong	V2	40	km/jam	
-	Produktivitas <i>Excavator</i>	Q1	18,03	m ³ /jam	
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4)	CT2	72,97	menit	
-	Waktu Muat (V/Q1) x (60)	T1	66,57	menit	
-	Waktu Tempuh Isi (L/VI) x (60)	T2	3,6	menit	
-	Waktu Tempuh Kosong (L/V2) x (60)	T3	1,8	menit	
-	Waktu Lain-Lain	T4	1	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fa x 60) / (CT2 x Fk)	Q2	8,029	m ³ /jam	
			64,236	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q2)		0,125	jam	
3 Tugboat dan Ponton					
Mengangkut Batu dari <i>Stockpile</i> ke Lokasi Pekerjaan					
-	Kapasitas	V	2.100	m ³	
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Faktor Material Asli ke Lepas	Fk	1,7		batu keras
-	Jarak Angkut	L	1,8	km	
-	Kecepatan Rerata Muat	VI	10	km/jam	
-	Kecepatan Rerata Kosong	V2	20	km/jam	
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4)	CT3	48,2	menit	
-	Waktu Tempuh Isi (L/VI) x (60)	T1	10,8	menit	
-	Waktu Tempuh Kosong (L/V2) x (60)	T2	5,4	menit	
-	Waktu Muat	T3	30	menit	
-	Waktu Lain-Lain	T4	2	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fa x 60)/(CT3 x Fk)	Q3	1.276,300	m ³ /jam	
			10.210,398	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q3)		0,001	jam	
4 Crawler Crane dan Clamshell					
Instalasi Batu pada Lokasi Pekerjaan					
-	Kapasitas Angkat <i>Hoist</i> Pada Ujung <i>Boom</i>	V	6	m ³	
-	Faktor <i>Bucket</i>	Fb	0,9		agak sulit
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4+T5)	CT4	1,6	menit	
-	<i>Arm Crane Swing</i> 90 dan <i>Hoist</i> Turun ke <i>Stock Barge</i>	T1	0,5	menit	
-	Mengeruk Material Batu	T2	0,25	menit	
-	Naikkan <i>Hoist</i> Ke Ujung <i>Arm</i> , <i>Swing</i> Ke Penempatan	T3	0,5	menit	
-	<i>Hoist</i> Turun Menempatkan Batu di Lokasi Rencana	T4	0,25	menit	
-	<i>Arm</i> Kembali ke Posisi Awal dan Lain-lain	T5	0,1	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fb x Fa x 60)/(CT4)	Q4	168,075	m ³ /jam	
			1.344,600	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q4)		0,006	jam	

C. Kebutuhan Jumlah Alat

Perhitungan jumlah alat dari pekerjaan instalasi batu jalur laut adalah sebagai berikut.

- *Excavator Standart* (Pemuatan Batu ke *Dump Truck* di *Stockpile*)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{91.395,718 \text{ m}^3}{281,224 \text{ m}^3/\text{hari} \times 34 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 10 \text{ alat}$$

- *Dumptruck* (Mengangkut Batu dari *Stockpile* ke Ponton)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{91.395,718 \text{ m}^3}{196,563 \text{ m}^3/\text{hari} \times 34 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 14 \text{ alat}$$

- *Tug Boat* dan Ponton (Mengangkut Batu dari *Stockpile* ke Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{91.395,718 \text{ m}^3}{10.698,721 \text{ m}^3/\text{hari} \times 34 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 1 \text{ alat}$$

- *Clamshell* dan *Crawler Crane* (Instalasi Batu pada Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{91.395,718 \text{ m}^3}{1.344,600 \text{ m}^3/\text{hari} \times 34 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 2 \text{ alat}$$

D. Perhitungan Durasi

Perhitungan durasi dari pekerjaan instalasi batu jalur laut adalah sebagai berikut.

- *Excavator Standart* (Pemuatan Batu ke *Dump Truck* di *Stockpile*)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{91.395,718 \text{ m}^3}{281,224 \text{ m}^3/\text{hari} \times 10 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 33 \text{ hari}$$

- *Dumptruck* (Mengangkut Batu dari *Stockpile* ke Ponton)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{91.395,718 \text{ m}^3}{196,563 \text{ m}^3/\text{hari} \times 14 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 34 \text{ hari}$$

- *Tug Boat* dan Ponton (Mengangkut Batu dari *Stockpile* ke Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{91.395,718 \text{ m}^3}{10.698,721 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 9 \text{ hari}$$

- *Clamshell* dan *Crawler Crane* (Instalasi Batu pada Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$Durasi = \frac{91.395,718 \text{ m}^3}{1.344,600 \text{ m}^3/\text{hari} \times 2 \text{ alat}}$$

$$Durasi = 34 \text{ hari}$$

Jadi durasi yang dibutuhkan untuk melakukan pekerjaan instalasi batu laur laut pada Segmen 10 adalah 34 hari.

7.3.2.2 Instalasi Batu Jalur Darat

A. Data

- Volume Pekerjaan = 10.050,692 m³
- Rencana Waktu = 6 hari/segmen
- Jam Kerja = 8 jam/hari

B. Perhitungan Produktivitas

Tabel 7.13 Produktivitas Alat Berat Instalasi Batu Jalur Darat

No	Uraian Peralatan	Kode	Koefisien	Satuan	Ket
1	Excavator Standart PC-200: 0.8 m3: 125 HP				
	Pemuatan Batu ke <i>Dump Truck</i> di <i>Stockpile</i>				
-	Kapasitas <i>Bucket</i>	V	1,2	m ³	
-	Faktor <i>Bucket</i>	Fb	1		agak sulit
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Faktor Material Asli ke Lepas	Fk	1,7		batu keras
-	Waktu Siklus (T1+T2)	CT1	1	menit	
-	Mengeruk Material, <i>Swing</i> , dan Dimuat ke DT	T1	0,7	menit	
-	<i>Swing</i> Kembali dan Lain-lain	T2	0,3	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fb x Fa x 60) / (CT1 x Fk)	Q1	35,153	m ³ /jam	
			281,224	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q1)		0,028	jam	
2	DumpTruck; 20 m3; 130HP				
	Mengangkut Batu dari <i>Stockpile</i> ke Lokasi Pekerjaan				
-	Kapasitas Bak	V	20	m ³	
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Faktor Material Asli ke Lepas	Fk	1		batu keras
-	Jarak Angkut	L	2,5	km	
-	Kecepatan Rerata Muat	V1	20	km/jam	
-	Kecepatan Rerata Kosong	V2	40	km/jam	
-	Produktivitas <i>Excavator</i>	Q1	35,15	m ³ /jam	
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4)	CT2	46,59	menit	
-	Waktu Muat (V/Q1) x (60)	T1	34,14	menit	
-	Waktu Tempuh Isi (L/V1) x (60)	T2	7,5	menit	
-	Waktu Tempuh Kosong (L/V2) x (60)	T3	3,75	menit	
-	Waktu Lain-Lain	T4	1,2	menit	
-	Kapasitas Produksi (V x Fa x 60) / (CT2 x Fk)	Q2	21,380	m ³ /jam	
			171,037	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q2)		0,047	jam	
3	Crawler Crane dan Clamshell				
	Instalasi Batu di Lokasi Pekerjaan				
-	Kapasitas Angkat <i>Hoist</i> Pada Ujung <i>Boom</i>	V	6	m ³	
-	Faktor <i>Bucket</i>	Fb	0,9		agak sulit
-	Faktor Efisiensi Alat	Fa	0,83		baik
-	Waktu Siklus (T1+T2+T3+T4+T5)	CT3	1,6	menit	

No	Uraian Peralatan	Kode	Koefisien	Satuan	Ket
-	<i>Arm Crane Swing 90 dan Hoist Turun ke Stock Barge</i>	T1	0,5	menit	
-	Mengeruk Material Batu	T2	0,25	menit	
-	Naikkan <i>Hoist</i> Ke <i>Ujung Arm, Swing</i> Ke Penempatan	T3	0,5	menit	
-	<i>Hoist</i> Turun Menempatkan Batu di Lokasi Rencana	T4	0,25	menit	
-	<i>Arm</i> Kembali ke Posisi Awal dan Lain-lain	T5	0,1	menit	
-	Kapasitas Produksi ($V \times F_b \times F_a \times 60$)/(CT3)	Q3	168,075	m ³ /jam	
			1344,600	m ³ /hari	
-	Koefisien Alat (1/Q3)		0,006	jam	

C. Kebutuhan Jumlah Alat

Perhitungan jumlah alat dari pekerjaan instalasi batu jalur darat adalah sebagai berikut.

- *Excavator Standart* (Pemuatan Batu ke *Dump Truck* di *Stockpile*)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{10.050,692 \text{ m}^3}{281,224 \text{ m}^3/\text{hari} \times 6 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 6 \text{ alat}$$

- *Dumptruck* (Mengangkut Batu dari *Stockpile* ke Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{10.050,692 \text{ m}^3}{171,037 \text{ m}^3/\text{hari} \times 6 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 10 \text{ alat}$$

- *Clamshell & Crawler Crane* (Instalasi Batu pada Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari} \times \text{Rencana Waktu}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = \frac{10.050,692 \text{ m}^3}{1.344,600 \text{ m}^3/\text{hari} \times 6 \text{ hari}}$$

$$\text{Jumlah Alat} = 2 \text{ alat}$$

D. Perhitungan Durasi

Perhitungan durasi dari pekerjaan instalasi batu jalur darat adalah sebagai berikut.

- *Excavator Standart* (Pemuatan Batu ke *Dump Truck* di *Stockpile*)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{10.050,692 \text{ m}^3}{281,224 \text{ m}^3/\text{hari} \times 6 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 6 \text{ hari}$$

- *Dumptruck* (Mengangkut Batu dari *Stockpile* ke Lokasi Pekerjaan)

$$\text{Durasi} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi per Hari} \times \text{Jumlah Alat}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{10.050,692 \text{ m}^3}{171,037 \text{ m}^3/\text{hari} \times 10 \text{ alat}}$$

$$\text{Durasi} = 6 \text{ hari}$$

- *Clamshell & Crawler Crane* (Instalasi Batu pada Lokasi Pekerjaan)

$$Durasi = \frac{Volume\ Pekerjaan}{Kapasitas\ Produksi\ per\ Hari \times Jumlah\ Alat}$$

$$Durasi = \frac{10.050,692\ m^3}{1.344,600\ m^3/hari \times 2\ alat}$$

$$Durasi = 4\ hari$$

Jadi durasi yang dibutuhkan untuk melakukan pekerjaan instalasi batu jalur darat pada Segmen 10 adalah 6 hari.

7.4 Waktu Pelaksanaan Proyek

Penyusunan jadwal pelaksanaan proyek dilakukan pada Ms. Project 2018. Setiap item pekerjaan dibagi ke dalam setiap segmen dengan durasi yang telah dianalisis sebelumnya. Tabel 7.14 berikut merupakan rekapitulasi durasi setiap pekerjaan dan segmen.

Tabel 7.14 Rekapitulasi Durasi Pekerjaan

Segmen	Durasi (Hari)					
	Batu (Jalur Darat)	Batu (Jalur Laut)	Crushed Stone (GESC)	Topping Layer	Geotextile Woven	Selubung Geotextile (GESC)
1	5	26	25		9	
2	5	25	4		9	
3	5	25	24		9	
4	5	29	37		13	
5	4	23	26		9	
6	5	23	30	3	9	6
7	6	34	42		15	
8	6	34	48		16	
9	6	34	40		16	
10	6	34	48		15	
11	3	15	30		9	

Jadwal pelaksanaan proyek dapat disusun berdasarkan nilai durasi pada Tabel 7.14. Penyusunan jadwal dimulai pada 22 Agustus 2024 sesuai dengan kondisi lapangan dan pekerjaan konstruksi pertama yang dilakukan adalah *dredging* STA 0+00. Jumlah hari kerja yang digunakan adalah 6 hari/minggu dengan jam kerja 8 jam/hari. Selain itu, pada penyusunan jadwal di Ms. Project 2018 juga dipertimbangkan Hari Libur Nasional dan Cuti Bersama di Indonesia. Penyusunan jadwal dilakukan dengan dua metode pekerjaan. Metode pertama dimulai dari darat (Segmen 1) dan laut atau ujung (Segmen 11) secara bersamaan hingga bertemu pada belokan *breakwater* (Segmen 6 dan 7). Metode kedua dimulai dari darat (Segmen 1) hingga selesai di bagian ujung atau kepala *breakwater* (Segmen 11).

Berdasarkan penyusunan jadwal menggunakan metode pertama yang dapat dilihat pada Lampiran D.4 dan D.5, didapatkan hasil bahwa proyek dapat selesai pada 24 September 2025. Berdasarkan penyusunan jadwal menggunakan metode kedua yang dapat dilihat pada Lampiran D.6 dan D.7, didapatkan hasil bahwa proyek dapat selesai pada 2 Februari 2026. Pemilihan metode pekerjaan dapat disesuaikan dengan kebutuhan kontraktor dalam menghemat biaya atau waktu. Dengan demikian, analisis jadwal pelaksanaan pada kedua metode pekerjaan menunjukkan proyek selesai tepat waktu dan pemilihan desain serta metode pelaksanaan dari *breakwater* dan perkuatan tanah dasar ditafsirkan efektif.

BAB 8 PENUTUPAN

8.1 Kesimpulan

Dari berbagai analisis yang telah dilakukan pada Proyek Akhir ini, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Desain dari struktur *shore connected breakwater* yang direncanakan tidak memungkinkan terjadinya *overtopping* dan seluruh lapisannya menggunakan material *limestone*. Struktur *breakwater* memiliki kemiringan 1:2 pada kedua sisi, elevasi puncak bagian lengan +6,5 m, elevasi puncak bagian kepala +6,8 m, lebar puncak bagian lengan 10 m, dan lebar puncak bagian kepala 12 m. Perkuatan tanah dasar yang direncanakan adalah *Geotextile-Encased Stone Column* (GESC) dengan pola pemasangan segitiga, diameter kolom sebesar 0,8 m, jarak spasi 1,5 m, serta dipasang hingga kedalaman tanah *uncompressible*. Setiap kolom memiliki 1 lapis *Geotextile Woven* yang digunakan sebagai pembungkus dengan tipe *polypropylene* 250 Gr dari PT. Prima Geotex Indo. Material pengisi kolom adalah *limestone* dengan diameter 20 sampai 75 mm.
2. Lapisan tanah dasar yang paling lunak berada pada Segmen 10 dengan $N-SPT \leq 1$ pada kedalaman 0 - 25 meter. Dengan lapisan tanah *compressible* tersebut, *settlement* yang dihasilkan dari timbunan struktur *breakwater* sebesar 6,449 meter dengan waktu *settlement* 34,714 tahun. Dengan adanya perkuatan tanah dasar menggunakan GESC, *settlement* yang dihasilkan dari timbunan struktur *breakwater* menjadi sebesar 0,545 meter.
3. Stabilitas struktur *breakwater* tanpa perkuatan dihasilkan sebesar 0,924 tanpa gempa dan 0,873 dengan gempa pada kondisi HHWL serta 0,862 tanpa gempa dan 0,828 dengan gempa pada kondisi LLWL. Nilai tersebut kurang dari SF yang disyaratkan, yaitu 1,3 untuk kondisi tanpa gempa dan 1,0 untuk kondisi gempa. Maka, dengan kondisi tanah dasar yang tidak diperbaiki atau diperkuat, timbunan *breakwater* akan mengalami keruntuhan. Stabilitas yang dihasilkan dengan adanya GESC sebesar 1,592 tanpa gempa dan 1,522 dengan gempa pada kondisi HHWL serta 1,504 tanpa gempa dan 1,425 dengan gempa pada kondisi LLWL. Nilai tersebut lebih besar dari SF yang disyaratkan, sehingga struktur *breakwater* aman dari keruntuhan.
4. Berdasarkan analisis produktivitas dan durasi pekerjaan, pekerjaan konstruksi Proyek EBW akan selesai pada September tahun 2025 menggunakan metode pekerjaan pertama dan Februari tahun 2026 menggunakan metode pekerjaan kedua. Pemilihan metode dapat didasarkan pada penghematan biaya atau waktu. Dengan demikian, rencana desain struktur *breakwater* dan perkuatan tanah dasar menggunakan GESC efektif untuk mempertahankan waktu pelaksanaan proyek sesuai dengan kontrak.

8.2 Saran

Berdasarkan analisis dan hasil yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran sebagai berikut.

1. Proyek Akhir ini hanya menganalisis efektivitas desain struktur *breakwater* dan perkuatan tanah dasar terhadap waktu pelaksanaan proyek. Perlu dilakukan peninjauan terhadap anggaran biaya yang dapat memengaruhi laba dari kontraktor.
2. Dengan kondisi tanah dasar yang sangat lunak, perlu mempertimbangkan pemilihan jenis *floating breakwater* yang tidak memerlukan perbaikan tanah dasar. Namun, jenis tersebut hanya dapat mereduksi gelombang dan tidak dapat melindungi dermaga dari sedimentasi. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis komparasi efektivitas serta efisiensi dari desain struktur *breakwater* dan perkuatan tanah dasar pada Proyek Akhir ini dengan struktur *floating breakwater* yang dikombinasikan dengan *dredging* untuk solusi sedimentasi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik Indonesia. (2023). *Jumlah Transaksi Peti Kemas pada 5 Pelabuhan Utama di Indonesia*. Jakarta: Badan Pusat Statistik Indonesia.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2021). *Peta Bahaya Gempa Bumi*. Jakarta Timur.
- Badan Standarisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017: Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Bowles, J. E. (1984). *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Jakarta: Erlangga.
- CERC. (1973). *Shore Protection Manual Volume I*. Washington: U.S. Army Coastal Engineering Research Center.
- CERC. (1984). *Shore Protection Manual Volume II*. Washington: U.S. Army Coastal Engineering Research Center.
- Das, Braja M. (diterjemahkan oleh Mochtar N.E, dan Mochtar I.B.). (1985). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik) Jilid I*. Jakarta: Erlangga.
- Das, Braja M. (diterjemahkan oleh Mochtar N.E, dan Mochtar I.B.). (1994). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik) Jilid II*. Jakarta: Erlangga.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. (2002). *Panduan Geoteknik 4:Desain dan Konstruksi*. Jakarta.
- Durgunoglu, H. T. & Mitchell, J. K. (1975). *Static penetration resistance of soils In Proceedings of 1st Proc. of the ASCE Specialty Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties*.
- Endah, N. (2012). *Modul Ajar Metode Perbaikan Tanah*. Surabaya. Jurusan Teknik Sipil FTSP ITS.
- FHWA. (1983). *Design and Constrution of Stone Columns Vol. I*. Department of Transportation Federal Highway Administration Design Manual.
- FHWA. (2013). *Deep Mixing for Embankment and Foundation Support*. Department of Transportation Federal Highway Administration Design Manual.
- Firdausi, N. (2019). *Perencanaan Ulang Metode Perbaikan Tanah Pada Tol Batang-Semarang Seksi III STA 419+700 – STA 424+000 dengan Menggunakan PVD, Geotekstil, Stone Column, dan Deep Mixing Cement*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. <https://repository.its.ac.id/65534/>
- Han, J. (2015). *Principles and Practice of Ground Improvement*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada.
- Hanif, A. A. (2020). *Perencanaan Timbunan Dan Perbaikan Tanah Dengan Menggunakan Metode Preloading Dan Geotextile Encased Stone Column Pada Tanah Organik Di Jalan Tol Trans Sumatera Pematang Panggang-Kayu Agung*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Hansbo, S. (1979). *Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains*. Ground Engineering, Vol 12.
- Hardiyatmo, H. C. (2007). *Mekanika Tanah II Edisi IV*. Yogyakarta.Gadjah Mada University Press. 162
- Hardiyatmo, H. C. (2010). *Teknik Fondasi 2*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hoek, E dan Bray, J.W. (1981). *Rock Slope Engineering 3rd Ed*. The Institution of Mining and Metallurgy London.

- Karima, D. A. (2017). *Perencanaan Bangunan Pemecah Gelombang Di Teluk Sumbreng, Kabupaten Trenggalek*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. <https://repository.its.ac.id/46672/>
- Kitazume, M. and Maruyama, K. (2005). *Collapse Failure Of Group Column Type Deepmixing Improved Ground Under Embankment*. Proc. of International Conference on Deep Mixing – Best Practice and Recent Advance.
- Latif, Y. (2001). *Estimasi dan Pengendalian Biaya Proyek Konstruksi*. Jurusan Sipil. Universitas Indonesia. Jakarta.
- Loukakis, K., & Yegian, M. K. (2015). *Quay Wall and Breakwater Design and Construction Of The New Port Of Patras*. Christiani & Nielsen Ltd.
- Meyerhof, G.G. (1956). *Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 82(1), 1-19.
- Prastiwi, H. A. (2016). Pengaruh Elektroosmosis pada Tanah Lempung Ditinjau dari Parameter Konsolidasi Tanah (*Electroosmosis Influence on The Clay Reviewed Consolidation of Soil*). Universitas Negeri Semarang.
- Pratikso. (2008). *Mekanika Tanah I*. Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Semarang.
- PT. Atria Swascipta Rekayasa. (2024). *Geotechnical Interpretative Report for Eastport Breakwater Works*. Lamongan, Jawa Timur.
- Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R. and Madhavi Latha, G. (1999). *Behaviour of Sand Confined with Single and Multiple Geocells*. *J. of Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 17, No. 3, 171-184.
- Souza, SA Márcio de, & Marques, MES (2013). *Design and Performance of Embankments On Very Soft Soils*. CRC Press.
- Sutra, N. (2014). *Perencanaan Perbaikan Tanah Dasar dan Analisa Stabilitas Tanggul Pada Area Reklamasi Proyek Pengembangan Pelabuhan Peti Kemas Belawan, Medan (Tahap II)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Taylor & Francis Group. Das, Braja M. (diterjemahkan oleh Mochtar N.E, dan Mochtar I.B.). (1985). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik) Jilid I*. Jakarta: Erlangga.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoritical Soil Mechanics*. New York USA: John Wiley and Sons.
- Triatmodjo, B. (1999). *Teknik Pantai*, Beta Offset, Yogyakarta
- Triatmodjo, B. (2008). *Teknik Pantai, cetakan kelima*. Beta Offset, Yogyakarta
- Wahyudi, H. (1999). *Daya Dukung Fondasi Dalam*. Surabaya: ITS Press.
- Yulianto, D. (2018). *Studi Perbaikan Tanah Lunak Dengan Variasi Ketebalan Platform Pada Metode Load Transfer Platform*. Doctoral Dissertation, Universitas Islam Sultan Agung.

LAMPIRAN

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LAMPIRAN A: DATA BATIMETRI
(TERLAMPIR GAMBAR KERJA)**

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B: DATA PARAMETER TANAH

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran B.1 Nilai Pramester Tanah Segmen 1

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5
Kedalaman	0-3	3-6	6-9	9-14	14-16
Jenis Tanah	Loose Sand	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Coral</i>
N-SPT	0	0	0	12	38
γ_n (t/m ²)	14,500	14,500	14,500	15,000	18,000
γ_d (t/m ²)	14,500	14,500	14,500	15,000	18,000
μ	0,100	0,250	0,300	0,350	0,200
E (t/m ²)	815,773	203,943	282,257	386,676	595,514
Cc	-	0,640	0,750	0,770	-
Cr	-	0,060	0,070	0,070	-
e0	-	3,000	2,750	2,500	-
Pc (t/m ²)	-	2,800	3,000	5,000	-
Cv (m ² /s)	-	8,650E-08	6,100E-08	8,770E-08	-
Cu (t/m ²)	-	1,356	1,820	2,340	-
ϕ (°)	25,000	9,500	8,000	5,500	35,000

Lampiran B.2 Nilai Pramester Tanah Segmen 2

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3
Kedalaman	0-4	4-5	5-8
Jenis Tanah	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Coral</i>
N-SPT	0-1	0-1	60
γ_n (t/m ²)	14,500	14,500	18,000
γ_d (t/m ²)	14,500	14,500	18,000
μ	0,250	0,300	0,200
E (t/m ²)	203,943	282,257	595,514
Cc	0,640	0,750	-
Cr	0,060	0,070	-
e0	3,000	2,750	-
Pc (t/m ²)	2,800	3,000	-
Cv (m ² /s)	8,650E-08	6,100E-08	-
Cu (t/m ²)	1,356	1,820	-
ϕ (°)	9,500	8,000	35,000

Lampiran B.3 Nilai Pramester Tanah Segmen 3

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7
Kedalaman	0-4	4-7	7-11	11-14	14-16	16-19	19 - 21
Jenis Tanah	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	Limestone
N-SPT	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	4	11
γ_n (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	20,000
γ_d (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	20,000
μ	0,250	0,300	0,350	0,400	0,454	0,454	0,400
E (t/m ²)	203,943	282,257	386,676	491,095	595,514	752,143	752,143
Cc	0,640	0,750	0,770	0,780	0,845	0,840	-
Cr	0,060	0,070	0,070	0,070	0,080	0,080	-
e0	3,000	2,750	2,500	2,250	2,250	2,000	-
Pc (t/m ²)	2,800	3,000	5,000	6,000	6,500	7,000	-
Cv (m ² /s)	8,650E-08	6,100E-08	8,770E-08	7,500E-08	5,100E-08	6,050E-08	-

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7
Cu (t/m ²)	1,356	1,820	2,340	3,120	3,569	3,671	-
φ (°)	9,500	8,000	5,500	3,500	3,000	2,700	40,000

Lampiran B.4 Nilai Pramester Tanah Segmen 4

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7
Kedalaman	0-5	5-8	8-11	11-15	15-18	18-21	21 - 26
Jenis Tanah	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	Limestone
N-SPT	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	60
γ _n (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	20,000
γ _d (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	20,000
μ	0,250	0,300	0,350	0,400	0,454	0,454	0,400
E (t/m ²)	203,943	282,257	386,676	491,095	595,514	752,143	752,143
Cc	0,640	0,750	0,770	0,780	0,845	0,840	-
Cr	0,060	0,070	0,070	0,070	0,080	0,080	-
e ₀	3,000	2,750	2,500	2,250	2,250	2,000	-
Pc (t/m ²)	2,800	3,000	5,000	6,000	6,500	7,000	-
Cv (m ² /s)	8,650E-08	6,100E-08	8,770E-08	7,500E-08	5,100E-08	6,050E-08	-
Cu (t/m ²)	1,356	1,820	2,340	3,120	3,569	3,671	-
φ (°)	9,500	8,000	5,500	3,500	3,000	2,700	40,000

Lampiran B.5 Nilai Pramester Tanah Segmen 5

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7	Lapisan 8
Kedalaman	0-4	4-7	7-11	11-14	14-17	17-21	21-22	23-29
Jenis Tanah	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	Coral	Limestone
N-SPT	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	1	31
γ_n (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000	20,000
γ_d (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000	20,000
μ	0,250	0,300	0,350	0,400	0,454	0,454	0,200	0,400
E (t/m ²)	203,943	282,257	386,676	491,095	595,514	752,143	595,514	752,143
Cc	0,640	0,750	0,770	0,780	0,845	0,840	-	-
Cr	0,060	0,070	0,070	0,070	0,080	0,080	-	-
e0	3,000	2,750	2,500	2,250	2,250	2,000	-	-
Pc (t/m ²)	2,800	3,000	5,000	6,000	6,500	7,000	-	-
Cv (m ² /s)	8,650E-08	6,100E-08	8,770E-08	7,500E-08	5,100E-08	6,050E-08	-	-
Cu (t/m ²)	1,356	1,820	2,340	3,120	3,569	3,671	-	-
ϕ (°)	9,500	8,000	5,500	3,500	3,000	2,700	35	40

Lampiran B.6 Nilai Pramester Tanah Segmen 6

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7	Lapisan 8
Kedalaman	0-4	4-7	7-11	11-15	15-18	18-21	21-24	23-29
Jenis Tanah	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Deep Clay</i>	Limestone
N-SPT	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	15-18
γ_n (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000	20,000
γ_d (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000	20,000
μ	0,250	0,300	0,350	0,400	0,454	0,454	0,454	0,400

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7	Lapisan 8
E (t/m ²)	203,943	282,257	386,676	491,095	595,514	752,143	815,773	752,143
Cc	0,640	0,750	0,770	0,780	0,845	0,840	0,860	-
Cr	0,060	0,070	0,070	0,070	0,080	0,080	0,080	-
e ₀	3,000	2,750	2,500	2,250	2,250	2,000	0,000	-
Pc (t/m ²)	2,800	3,000	5,000	6,000	6,500	7,000	7,500	-
Cv (m ² /s)	8,650E-08	6,100E-08	8,770E-08	7,500E-08	5,100E-08	6,050E-08	6,560E-08	-
Cu (t/m ²)	1,356	1,820	2,340	3,120	3,569	3,671	3,773	-
φ (°)	9,500	8,000	5,500	3,500	3,000	2,700	2,000	40,000

Lampiran B.7 Nilai Pramester Tanah Segmen 7

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7	Lapisan 8
Kedalaman	0-5	5-8	8-12	12-16	16-19	19-21	21-24	23-29
Jenis Tanah	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Deep Clay</i>	Limestone
N-SPT	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	32
γ _n (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000	20,000
γ _d (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000	20,000
μ	0,250	0,300	0,350	0,400	0,454	0,454	0,454	0,400
E (t/m ²)	203,943	282,257	386,676	491,095	595,514	752,143	815,773	752,143
Cc	0,640	0,750	0,770	0,780	0,845	0,840	0,860	-
Cr	0,060	0,070	0,070	0,070	0,080	0,080	0,080	-
e ₀	3,000	2,750	2,500	2,250	2,250	2,000	0,000	-
Pc (t/m ²)	2,800	3,000	5,000	6,000	6,500	7,000	7,500	-
Cv (m ² /s)	8,650E-08	6,100E-08	8,770E-08	7,500E-08	5,100E-08	6,050E-08	6,560E-08	-
Cu (t/m ²)	1,356	1,820	2,340	3,120	3,569	3,671	3,773	-
φ (°)	9,500	8,000	5,500	3,500	3,000	2,700	2,000	40,000

Lampiran B.8 Nilai Pramester Tanah Segmen 8

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7
Kedalaman	0-4	4-7	7-11	11-15	18-18	18-22	22-29
Jenis Tanah	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Deep Clay</i>
N-SPT	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	8-19
γ_n (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000
γ_d (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000
μ	0,250	0,300	0,350	0,400	0,454	0,454	0,454
E (t/m ²)	203,943	282,257	386,676	491,095	595,514	752,143	815,773
Cc	0,640	0,750	0,770	0,780	0,845	0,840	0,860
Cr	0,060	0,070	0,070	0,070	0,080	0,080	0,080
e0	3,000	2,750	2,500	2,250	2,250	2,000	0,000
Pc (t/m ²)	2,800	3,000	5,000	6,000	6,500	7,000	7,500
Cv (m ² /s)	8,650E-08	6,100E-08	8,770E-08	7,500E-08	5,100E-08	6,050E-08	6,560E-08
Cu (t/m ²)	1,356	1,820	2,340	3,120	3,569	3,671	3,773
ϕ (°)	9,500	8,000	5,500	3,500	3,000	2,700	2,000

Lampiran B.9 Nilai Pramester Tanah Segmen 9

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7	Lapisan 8	Lapisan 9
Kedalaman	0-4	4-7	7-11	11-15	15-18	18-22	22-25	27-28	23-29
Jenis Tanah	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Deep Clay</i>	<i>Coral</i>	<i>Limestone</i>
N-SPT	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	13-21
γ_n (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000	18,000	0,000
γ_d (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000	18,000	0,000
μ	0,250	0,300	0,350	0,400	0,454	0,454	0,454	0,200	0,400
E (t/m ²)	203,943	282,257	386,676	491,095	595,514	752,143	815,773	595,514	752,143
Cc	0,640	0,750	0,770	0,780	0,845	0,840	0,860	-	-
Cr	0,060	0,070	0,070	0,070	0,080	0,080	0,080	-	-
e0	3,000	2,750	2,500	2,250	2,250	2,000	0,000	-	-
Pc (t/m ²)	2,800	3,000	5,000	6,000	6,500	7,000	7,500	-	-
Cv (m ² /s)	8,650E-08	6,100E-08	8,770E-08	7,500E-08	5,100E-08	6,050E-08	6,560E-08	-	-

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7	Lapisan 8	Lapisan 9
Cu (t/m ²)	1,356	1,820	2,340	3,120	3,569	3,671	3,773	-	-
φ (°)	9,500	8,000	5,500	3,500	3,000	2,700	2,000	35,000	40,000

Lampiran B.10 Nilai Pramester Tanah Segmen 10

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7	Lapisan 8
Kedalaman	0-5	5-8	8-12	12-16	16-19	19-23	23-29	23-29
Jenis Tanah	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Deep Clay</i>	<i>Limestone</i>
N-SPT	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	4-6	17
γ _n (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	16,000	0,000
γ _d (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	16,000	0,000
μ	0,250	0,300	0,350	0,400	0,454	0,454	0,454	0,400
E (t/m ²)	203,943	282,257	386,676	491,095	595,514	752,143	815,773	752,143
Cc	0,640	0,750	0,770	0,780	0,845	0,840	0,860	-
Cr	0,060	0,070	0,070	0,070	0,080	0,080	0,080	-
e ₀	3,000	2,750	2,500	2,250	2,250	2,000	0,000	-
Pc (t/m ²)	2,800	3,000	5,000	6,000	6,500	7,000	7,500	-
Cv (m ² /s)	8,650E-08	6,100E-08	8,770E-08	7,500E-08	5,100E-08	6,050E-08	6,560E-08	-
Cu (t/m ²)	1,356	1,820	2,340	3,120	3,569	3,671	3,773	-
φ (°)	9,500	8,000	5,500	3,500	3,000	2,700	2,000	40,000

Lampiran B.11 Nilai Pramester Tanah Segmen 11

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7
Kedalaman	0-4	4-7	7-11	11-15	15-19	19-22	22-28
Jenis Tanah	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Marine Clay</i>	<i>Deep Clay</i>
N-SPT	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	13
γ _n (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000
γ _d (t/m ²)	14,500	14,500	15,000	15,000	15,500	16,000	18,000
μ	0,250	0,300	0,350	0,400	0,454	0,454	0,454
E (t/m ²)	203,943	282,257	386,676	491,095	595,514	752,143	815,773
Cc	0,640	0,750	0,770	0,780	0,845	0,840	0,860
Cr	0,060	0,070	0,070	0,070	0,080	0,080	0,080

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7
e0	3,000	2,750	2,500	2,250	2,250	2,000	0,000
Pc (t/m ²)	2,800	3,000	5,000	6,000	6,500	7,000	7,500
Cv (m ² /s)	8,650E-08	6,100E-08	8,770E-08	7,500E-08	5,100E-08	6,050E-08	6,560E-08
Cu (t/m ²)	1,356	1,820	2,340	3,120	3,569	3,671	3,773
ϕ (°)	9,500	8,000	5,500	3,500	3,000	2,700	2,000

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN C: PERENCANAAN STRUKTUR *BREAKWATER*
(TERLAMPIR GAMBAR KERJA)

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN D: PERENCANAAN PERKUATAN TANAH DASAR

Lampiran D.1 Tegangan Vertikal Awal Pada Tanah

Jenis Lapisan	Tinggi Lapisan Tanah (Hi)	Berat Jenis Tanah Efektif (γ_{sat})	Tegangan Vertikal Awal Pada Tanah (σ_{v0s})							$\Sigma\sigma_{v0s}$	
	m	t/m ³	t/m ²								t/m ²
1	5	0,423	5,2875							5,2875	
2	3	0,423	3,807	1,9035						5,7105	
3	4	0,473	6,768	6,768	3,784					17,32	
4	4	0,473	6,768	6,768	7,568	3,784				24,888	
5	3	0,523	3,807	3,807	4,257	4,257	2,3535			18,4815	
6	4	0,573	6,768	6,768	7,568	7,568	8,368	4,584		41,624	
7	6	0,573	15,228	15,228	17,028	17,028	18,828	20,628	10,314	114,282	

Lampiran D.2 Tegangan Vertikal Awal Pada Kolom

Jenis Lapisan	Tinggi Lapisan Tanah (Hi)	Berat Jenis Tanah Efektif (γ_{sat})	Tegangan Vertikal Awal Pada Kolom (σ_{v0s})							$\Sigma\sigma_{v0s}$	
	m	t/m ³	t/m ²								t/m ²
1	5	2,648	33,1							33,1	
2	3	2,648	3,807	11,916						15,723	
3	4	2,648	6,768	6,768	21,184					34,72	
4	4	2,648	6,768	6,768	7,568	21,184				42,288	
5	3	2,648	3,807	3,807	4,257	4,257	11,916			28,044	
6	4	2,648	6,768	6,768	7,568	7,568	8,368	21,184		58,224	
7	6	2,648	15,228	15,228	17,028	17,028	18,828	20,628	47,664	151,632	



TECHNICAL DATA SHEET OF WOVEN POLYPROPYLENE (PP)

12

ITEM	TEST METHODE	UNIT	150 Gr	200 Gr	250 Gr	300 Gr
PHYSICAL						
Mass	-	Gr/sqm	150	200	250	300
Thickness	-	mm	0.92 - 1.07	1.0 - 1.1	1.1 - 1.2	-
Polymer	-	-	PP	PP	PP	PP
Colour (Warna)	-	-	Hitam			
MECHANICAL						
Tensile Strength Machine Direction (Warp) Cross Machine Dir. (Weft)	ASTM D 4595	kN/m	30 30	45 40	60 55	70 60
Elongation Machine Direction (Warp) Cross Machine Dir. (Weft)	ASTM D 4595	%	21 20	20 19	19 18	18 17
Grab Tensile Machine Direction (Warp) Cross Machine Dir. (Weft)	ASTM D 4632	N	1023 948	1344 1251	1500 1300	2500 2000
Trapezoidal Tear Strength Machine Direction (Warp) Cross Machine Dir. (Weft)	ASTM D 4533	N	568 512	811 705	950 900	1600 1500
Trapezoidal Tear Strength	ASTM D 4833	N	284	494	650	800
HYDRAULIC						
Effective Opening Size	ASTM D 4751	mm	0.3	0.28	0.05	0.0081
Flow Rate		l/sqm/sec	22	20	18	17
Permeability	ASTM D 4491	Cm/sec	-	-	0.017	0.01
ENVIRONMENTAL						
Effect of Soil Alkalinity	-	-	nil	nil	nil	nil
Effect of Soil Acidity	-	-	nil	nil	nil	nil
Effect of U.V Light	-	-	nil	nil	nil	nil
DIMENSION						
Roll Width	-	m	4			
Roll Length	-	m	150	150	150	150
Roll Diameter	-	m	0.25	0.3	0.4	0.45

Geosynthetics
Specialist

www.primageotex.co.id

Lampiran D.3 Brosur Material *Geotextile Woven*
Sumber: PT. Prima Geotex Indo (2024)

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN E: METODE DAN JADAWAL PELAKSANAAN

Lampiran E.1 Material *Take Off* Setiap STA Pada Revit

Lokasi	Material	Volume (m³)
STA 0-5	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	468,150
STA 0-5	<i>Sea Side Toe Rock</i>	351,330
STA 0-5	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	370,830
STA 0-5	<i>Topping Layer</i>	57,640
STA 5-10	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	472,840
STA 5-10	<i>Core Rock</i>	287,520
STA 5-10	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	342,590
STA 5-10	<i>Sea Side Toe Rock</i>	410,100
STA 5-10	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	443,180
STA 5-10	<i>Topping Layer</i>	56,920
STA 10-15	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	526,760
STA 10-15	<i>Core Rock</i>	550,270
STA 10-15	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	753,810
STA 10-15	<i>Sea Side Toe Rock</i>	285,080
STA 10-15	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	193,050
STA 10-15	<i>Topping Layer</i>	35,370
STA 15-20	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	0,000
STA 15-20	<i>Core Rock</i>	1031,320
STA 15-20	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	623,490
STA 15-20	<i>Sea Side Toe Rock</i>	128,120
STA 15-20	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	229,530
STA 15-20	<i>Topping Layer</i>	26,440
STA 20-25	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	596,460
STA 20-25	<i>Core Rock</i>	1534,720
STA 20-25	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	588,020
STA 20-25	<i>Sea Side Toe Rock</i>	100,590
STA 20-25	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	241,930
STA 20-25	<i>Topping Layer</i>	20,500
STA 20-25	<i>Crushed Stone</i>	2780,420
STA 25-30	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	649,600
STA 25-30	<i>Core Rock</i>	1735,010
STA 25-30	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	652,170
STA 25-30	<i>Sea Side Toe Rock</i>	101,880
STA 25-30	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	273,500
STA 25-30	<i>Topping Layer</i>	18,220
STA 25-30	<i>Crushed Stone</i>	3240,20
STA 30-35	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	644,190
STA 30-35	<i>Core Rock</i>	1815,450
STA 30-35	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	553,650
STA 30-35	<i>Sea Side Toe Rock</i>	102,410
STA 30-35	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	281,810

Lokasi	Material	Volume (m³)
STA 30-35	<i>Topping Layer</i>	13,610
STA 35-40	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	591,520
STA 35-40	<i>Core Rock</i>	1841,140
STA 35-40	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	237,360
STA 35-40	<i>Sea Side Toe Rock</i>	106,450
STA 35-40	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	274,310
STA 35-40	<i>Topping Layer</i>	9,000
STA 35-40	<i>Crushed Stone</i>	2965,22
STA 40-45	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	582,810
STA 40-45	<i>Core Rock</i>	1903,500
STA 40-45	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	99,860
STA 40-45	<i>Sea Side Toe Rock</i>	106,140
STA 40-45	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	274,870
STA 40-45	<i>Topping Layer</i>	9,000
STA 40-45	<i>Crushed Stone</i>	1678,88
STA 45-50	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	0,000
STA 45-50	<i>Core Rock</i>	1928,730
STA 45-50	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	100,410
STA 45-50	<i>Sea Side Toe Rock</i>	103,690
STA 45-50	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	277,370
STA 45-50	<i>Topping Layer</i>	9,000
STA 45-50	<i>Crushed Stone</i>	1820,53
STA 50-100	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	6069,660
STA 50-100	<i>Core Rock</i>	20521,130
STA 50-100	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	994,610
STA 50-100	<i>Sea Side Toe Rock</i>	1031,390
STA 50-100	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	2868,250
STA 50-100	<i>Topping Layer</i>	90,000
STA 50-100	<i>Crushed Stone</i>	12623,50
STA 100-200	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	12711,450
STA 100-200	<i>Core Rock</i>	44569,400
STA 100-200	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1983,130
STA 100-200	<i>Sea Side Toe Rock</i>	2008,630
STA 100-200	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	6019,580
STA 100-200	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 100-200	<i>Crushed Stone</i>	30902,35
STA 200-300	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	13045,430
STA 200-300	<i>Core Rock</i>	46675,000
STA 200-300	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1995,530
STA 200-300	<i>Sea Side Toe Rock</i>	2003,320
STA 200-300	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	6184,820
STA 200-300	<i>Topping Layer</i>	180,000

Lokasi	Material	Volume (m³)
STA 200-300	<i>Crushed Stone</i>	37665,98
STA 300-400	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	13284,540
STA 300-400	<i>Core Rock</i>	48295,440
STA 300-400	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1997,830
STA 300-400	<i>Sea Side Toe Rock</i>	2002,590
STA 300-400	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	6303,130
STA 300-400	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 300-400	<i>Crushed Stone</i>	37625,47
STA 400-500	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	13514,590
STA 400-500	<i>Core Rock</i>	49872,030
STA 400-500	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	2003,140
STA 400-500	<i>Sea Side Toe Rock</i>	1994,430
STA 400-500	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	6416,950
STA 400-500	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 400-500	<i>Crushed Stone</i>	37554,87
STA 500-600	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	13757,200
STA 500-600	<i>Core Rock</i>	51584,890
STA 500-600	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1991,770
STA 500-600	<i>Sea Side Toe Rock</i>	2002,530
STA 500-600	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	6536,990
STA 500-600	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 500-600	<i>Crushed Stone</i>	38726,45
STA 600-700	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	13948,400
STA 600-700	<i>Core Rock</i>	52852,510
STA 600-700	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1993,240
STA 600-700	<i>Sea Side Toe Rock</i>	2004,900
STA 600-700	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	6631,590
STA 600-700	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 600-700	<i>Crushed Stone</i>	38552,12
STA 700-792	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	12828,100
STA 700-792	<i>Core Rock</i>	49115,530
STA 700-792	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1808,600
STA 700-792	<i>Sea Side Toe Rock</i>	1818,140
STA 700-792	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	6102,250
STA 700-792	<i>Topping Layer</i>	162,720
STA 700-792	<i>Crushed Stone</i>	38635,24
STA 792-837	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	2168,200
STA 792-837	<i>Core Rock</i>	4148,920
STA 792-837	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	131,130
STA 792-837	<i>Sea Side Toe Rock</i>	290,290
STA 792-837	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	1263,250
STA 792-837	<i>Topping Layer</i>	120,840

Lokasi	Material	Volume (m³)
STA 792-837	<i>Crushed Stone</i>	5697,41
STA 814-837	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	1950,500
STA 814-837	<i>Core Rock</i>	3925,740
STA 814-837	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	207,860
STA 814-837	<i>Sea Side Toe Rock</i>	417,560
STA 814-837	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	1425,630
STA 814-837	<i>Topping Layer</i>	45,300
STA 814-837	<i>Crushed Stone</i>	5876,28
STA 837-900	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	8944,570
STA 837-900	<i>Core Rock</i>	34746,540
STA 837-900	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1238,930
STA 837-900	<i>Sea Side Toe Rock</i>	1248,390
STA 837-900	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	4257,040
STA 837-900	<i>Topping Layer</i>	112,450
STA 837-900	<i>Crushed Stone</i>	32116,89
STA 900-1000	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	14375,190
STA 900-1000	<i>Core Rock</i>	56069,540
STA 900-1000	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1983,650
STA 900-1000	<i>Sea Side Toe Rock</i>	2017,840
STA 900-1000	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	6842,760
STA 900-1000	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 900-1000	<i>Crushed Stone</i>	37268,54
STA 1000-1100	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	14458,750
STA 1000-1100	<i>Core Rock</i>	56614,140
STA 1000-1100	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1984,900
STA 1000-1100	<i>Sea Side Toe Rock</i>	2013,770
STA 1000-1100	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	6884,100
STA 1000-1100	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 1000-1100	<i>Crushed Stone</i>	37698,44
STA 1100-1200	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	14538,280
STA 1100-1200	<i>Core Rock</i>	57127,940
STA 1100-1200	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1988,340
STA 1100-1200	<i>Sea Side Toe Rock</i>	1997,830
STA 1100-1200	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	6923,450
STA 1100-1200	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 1100-1200	<i>Crushed Stone</i>	38257,47
STA 1200-1300	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	14626,790
STA 1200-1300	<i>Core Rock</i>	57728,490
STA 1200-1300	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1986,290
STA 1200-1300	<i>Sea Side Toe Rock</i>	2001,530
STA 1200-1300	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	6967,240
STA 1200-1300	<i>Topping Layer</i>	180,000

Lokasi	Material	Volume (m³)
STA 1200-1300	<i>Crushed Stone</i>	35066,25
STA 1300-1400	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	14727,640
STA 1300-1400	<i>Core Rock</i>	58520,580
STA 1300-1400	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1988,710
STA 1300-1400	<i>Sea Side Toe Rock</i>	2003,130
STA 1300-1400	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	7017,140
STA 1300-1400	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 1300-1400	<i>Crushed Stone</i>	36728,69
STA 1400-1500	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	14818,850
STA 1400-1500	<i>Core Rock</i>	59365,860
STA 1400-1500	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1986,790
STA 1400-1500	<i>Sea Side Toe Rock</i>	1995,760
STA 1400-1500	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	7062,270
STA 1400-1500	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 1400-1500	<i>Crushed Stone</i>	38260,42
STA 1500-1600	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	14898,470
STA 1500-1600	<i>Core Rock</i>	59939,200
STA 1500-1600	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1990,920
STA 1500-1600	<i>Sea Side Toe Rock</i>	1999,810
STA 1500-1600	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	7101,660
STA 1500-1600	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 1500-1600	<i>Crushed Stone</i>	40429,26
STA 1600-1700	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	14974,950
STA 1600-1700	<i>Core Rock</i>	60372,020
STA 1600-1700	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	1996,080
STA 1600-1700	<i>Sea Side Toe Rock</i>	2005,770
STA 1600-1700	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	7139,500
STA 1600-1700	<i>Topping Layer</i>	180,000
STA 1600-1700	<i>Crushed Stone</i>	40429,26
STA 1700-1750	<i>Armour Rock (Trunk)</i>	7518,650
STA 1700-1750	<i>Core Rock</i>	30429,260
STA 1700-1750	<i>Harbour Side Toe Rock</i>	996,080
STA 1700-1750	<i>Sea Side Toe Rock</i>	1004,800
STA 1700-1750	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	3585,180
STA 1700-1750	<i>Topping Layer</i>	90,000
STA 1700-1750	<i>Crushed Stone</i>	19256,52
STA 1750-1773	<i>Armour Rock (Head)</i>	3507,430
STA 1750-1773	<i>Core Rock</i>	14704,330
STA 1750-1773	<i>Sea Side Toe Rock</i>	1052,560
STA 1750-1773	<i>Secondary Layer Armour Rock</i>	1685,370
STA 1750-1773	<i>Topping Layer</i>	48,280
STA 1750-1773	<i>Crushed Stone</i>	32698,76

Lampiran E.2 Kebutuhan Alat Berat dan Durasi Pekerjaan Instalasi GESC

Segmen	Kebutuhan Alat						Durasi (Hari)					
	Excavator Standart	Dump Truck	Tugboat & Ponton	Crane	Base	Excavator Long Arm	Excavator Standart	Dump Truck	Tugboat & Ponton	Crane	Base	Excavator Long Arm
				Hydraulic with Vibro Rig and Guide Rig	Excavator with Smaller Steel Tube					Hydraulic with Vibro Rig and Guide Rig	Excavator with Smaller Steel Tube	
1	6	8	1	4	4	4	24	25	4	25	23	21
2	6	8	1	4	4	4	4	4	1	4	4	4
3	6	9	1	4	4	4	23	22	4	24	23	20
4	6	9	1	4	4	4	36	34	6	37	35	31
5	6	8	1	4	4	4	25	26	4	26	24	22
6	6	8	1	4	4	4	28	30	5	30	28	25
7	6	9	1	4	4	4	40	38	7	42	40	36
8	6	9	1	4	4	4	46	44	8	48	45	41
9	6	9	1	4	4	4	38	37	7	40	38	34
10	6	9	1	4	4	4	46	44	8	48	45	41
11	9	12	1	4	5	5	28	30	7	30	28	30

Lampiran E.3 Kebutuhan Alat Berat dan Durasi Pekerjaan Instalasi *Geotextile Woven*

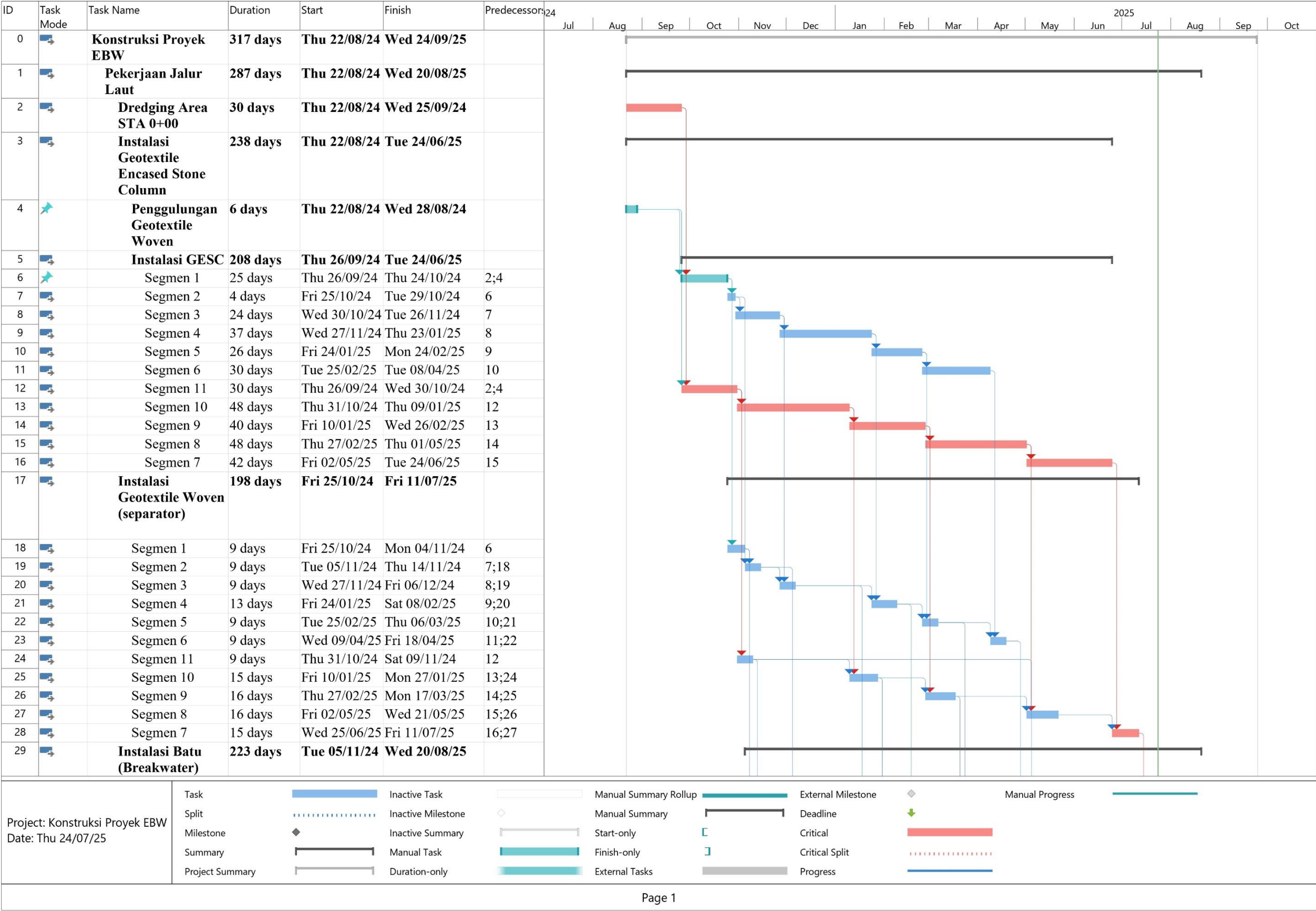
Segmen	Kebutuhan Alat		Durasi (Hari)	
	Tugboat & Ponton	Diving Works	Tugboat & Ponton	Diving Works
1	1	2	1	9
2	1	2	1	9
3	1	2	1	9
4	1	2	1	13
5	1	2	1	9
6	1	2	1	9
7	1	2	1	15
8	1	2	1	16
9	1	2	1	16
10	1	2	1	15
11	1	2	1	9

Lampiran E.4 Kebutuhan Alat Berat dan Durasi Pekerjaan Instalasi Batu Jalur Darat

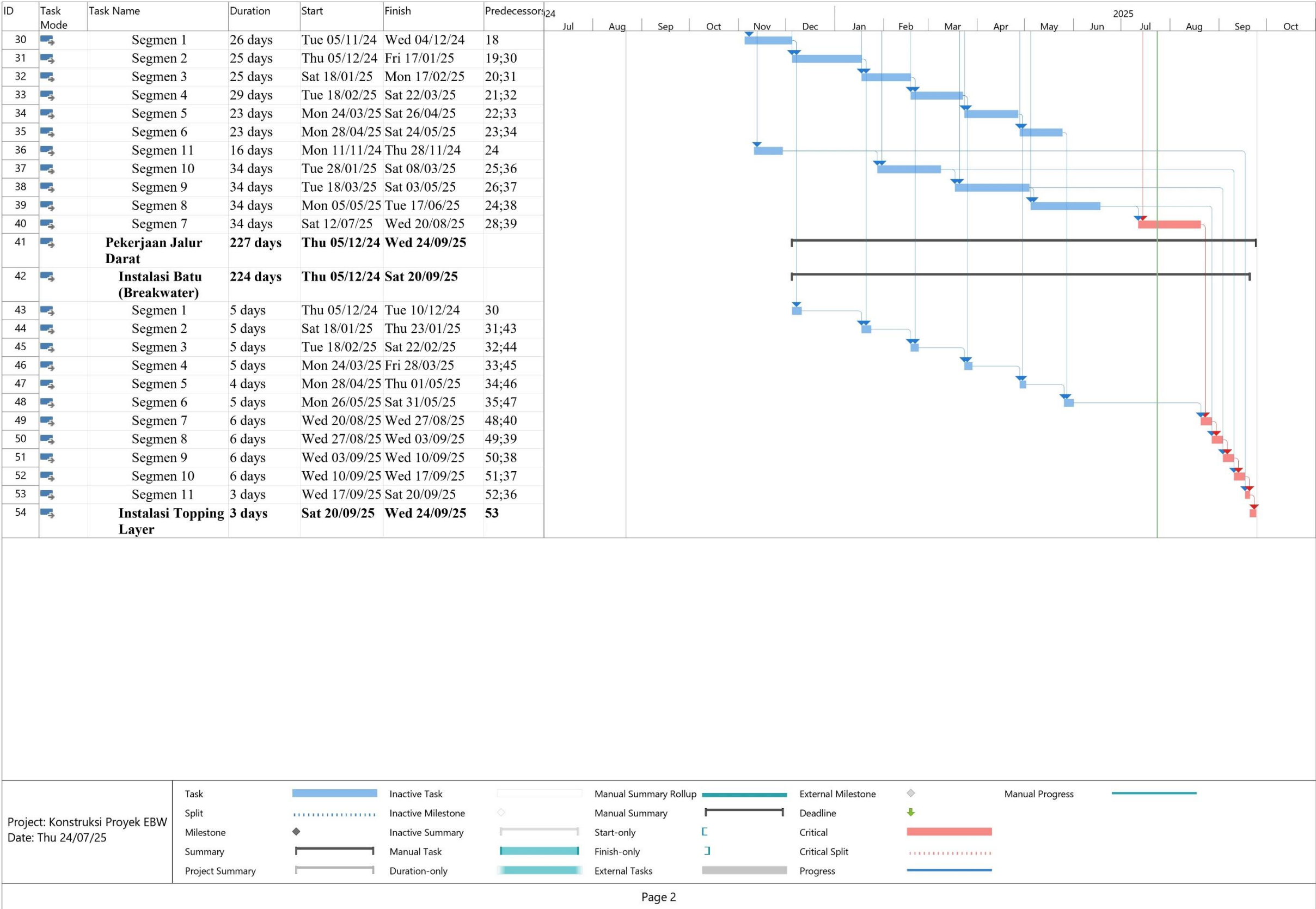
Segmen	Kebutuhan Alat			Durasi (Hari)		
	<i>Excavator Standart</i>	<i>Dump Truck</i>	<i>Crawler Crane & Clamshell</i>	<i>Excavator Standart</i>	<i>Dump Truck</i>	<i>Crawler Crane & Clamshell</i>
1	6	10	2	5	5	3
2	6	9	2	5	5	3
3	6	9	2	5	5	3
4	7	10	2	5	5	4
5	6	9	2	4	4	3
6	5	9	2	5	5	3
7	6	10	2	6	6	4
8	6	10	2	6	6	4
9	6	10	2	6	6	4
10	6	10	2	6	6	4
11	5	9	2	3	3	2

Lampiran E. 5 Kebutuhan Alat Berat dan Durasi Pekerjaan Instalasi Batu Jalur Laut

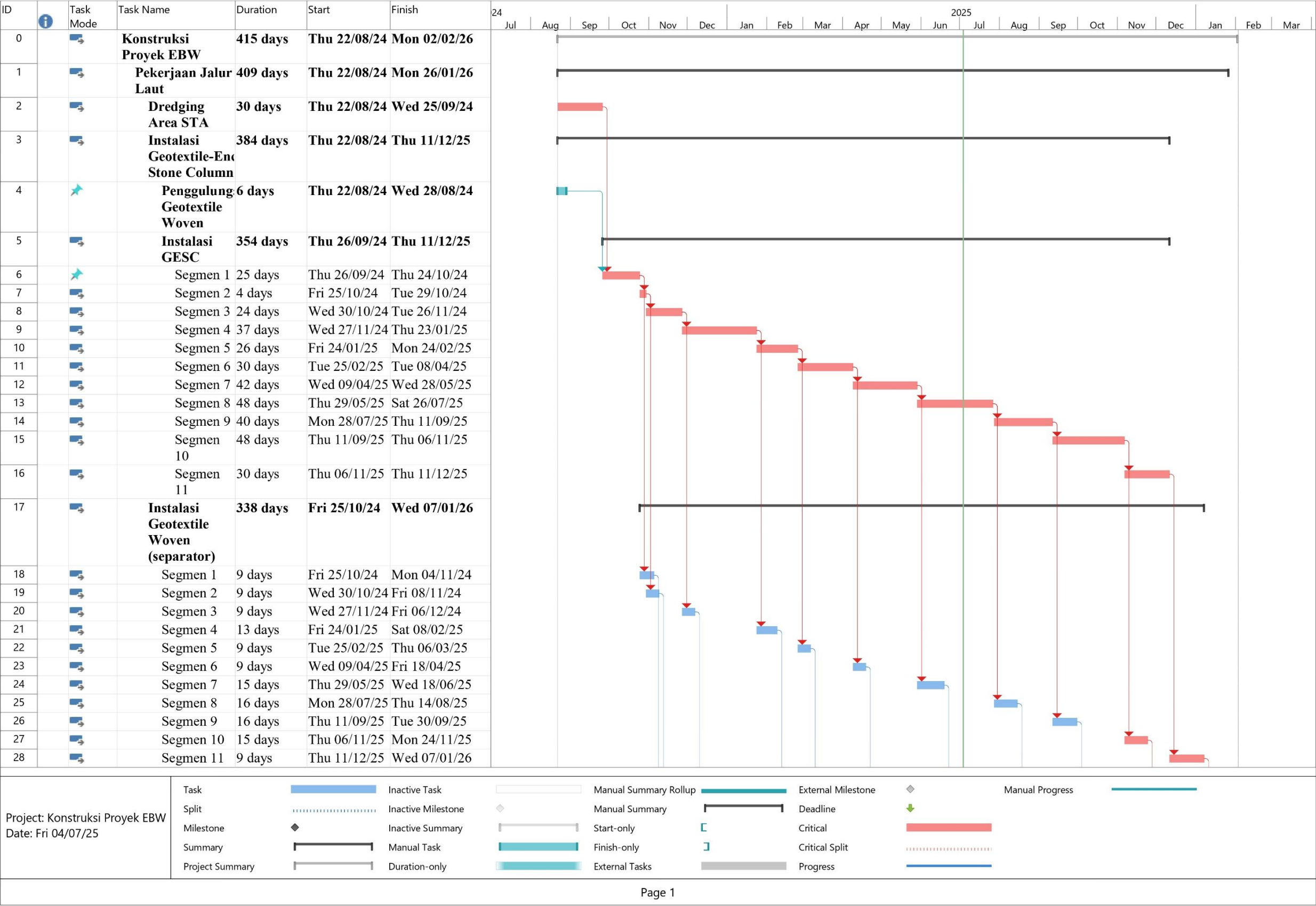
Segmen	Kebutuhan Alat				Durasi (Hari)			
	<i>Excavator Standart</i>	<i>Dump Truck</i>	<i>Tugboat & Ponton</i>	<i>Crawler Crane & Clamshell</i>	<i>Excavator Standart</i>	<i>Dump Truck</i>	<i>Tugboat & Ponton</i>	<i>Crawler Crane & Clamshell</i>
1	10	14	1	2	25	26	7	26
2	10	14	1	2	23	24	7	25
3	10	14	1	2	23	24	7	25
4	10	14	1	2	28	28	8	29
5	10	14	1	2	22	22	6	23
6	10	14	1	2	22	22	6	23
7	10	14	1	2	33	34	9	34
8	10	14	1	2	33	34	9	34
9	10	14	1	2	33	34	9	34
10	10	14	1	2	33	34	9	34
11	10	14	1	2	15	15	4	15



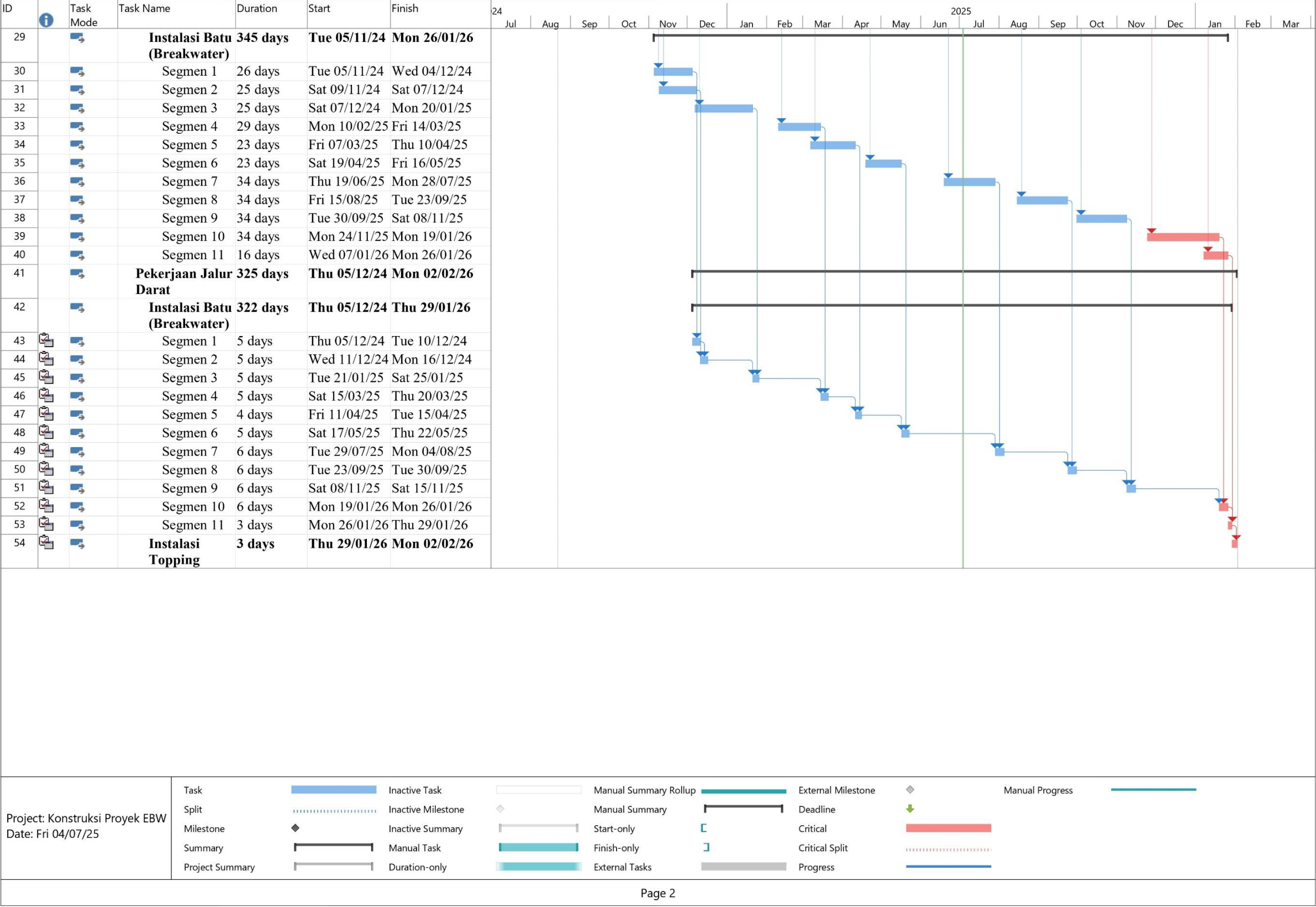
Lampiran D.4 Penjadwalan Proyek Pada Ms. Project Mulai Dari Jalur Darat & Laut (1)



Lampiran D.5 Penjadwalan Proyek Pada Ms. Project Mulai Dari Jalur Darat & Laut (2)

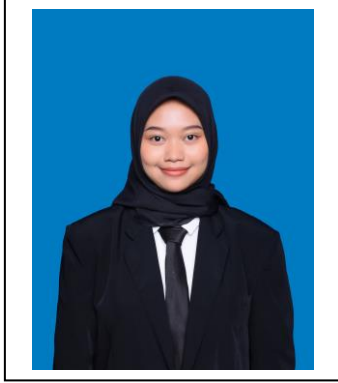


Lampiran D.6 Penjadwalan Proyek Pada Ms. Project Mulai Dari Jalur Darat (1)



Lampiran D.7 Penjadwalan Proyek Pada Ms. Project Mulai Dari Jalur Darat (2)

BIODATA PENULIS



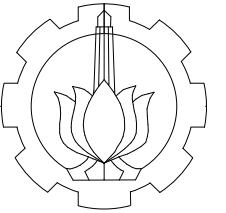
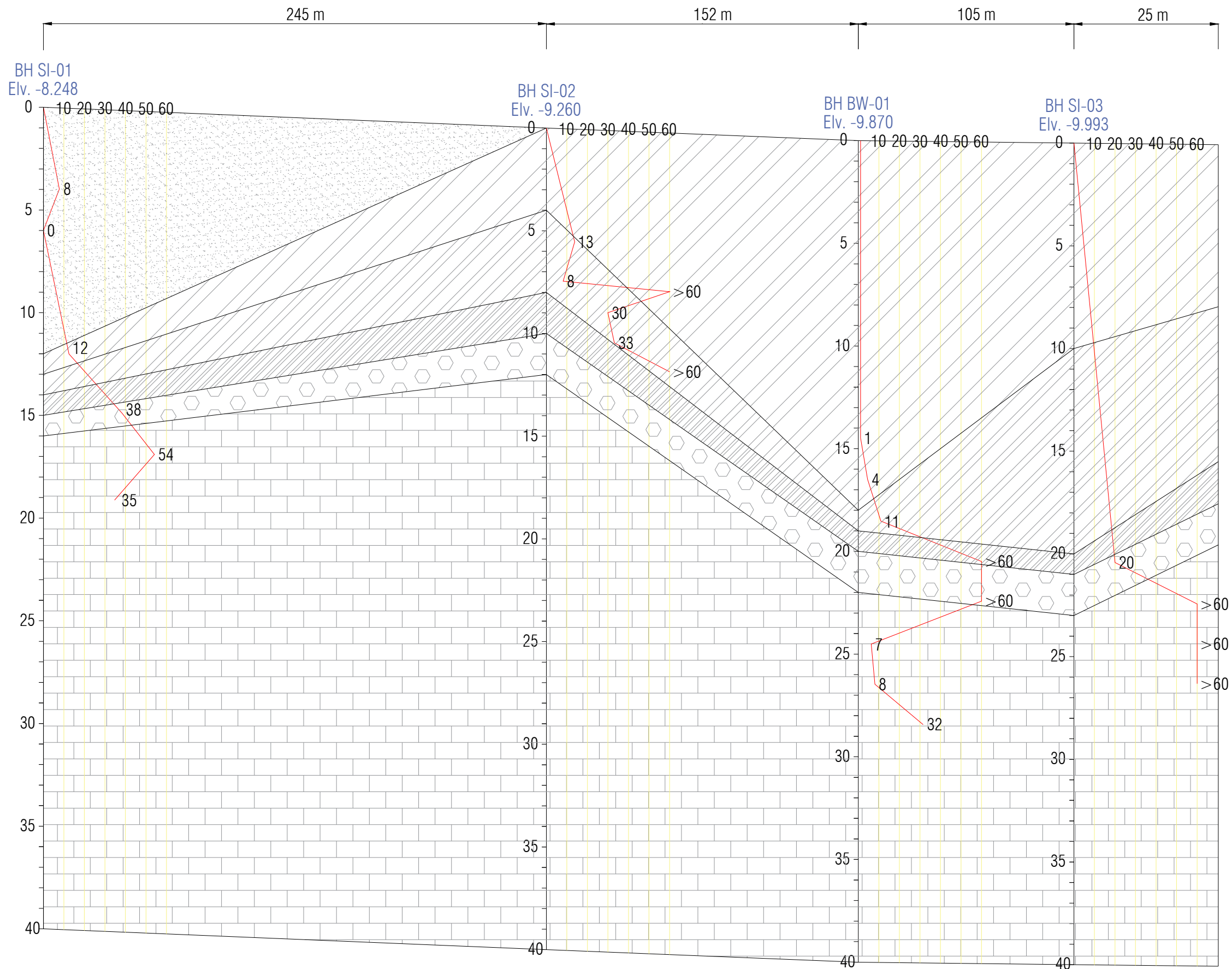
Penulis dilahirkan di Nganjuk, 31 Juli 2003, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Pertiwi Ringinanom, SDN Ringinanom, SMPN 1 Nganjuk, dan SMKN 1 Nganjuk. Setelah lulus dari SMKN 1 Nganjuk, Penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Departemen Teknik Infrastruktur Sipil FV - ITS pada tahun 2021 dan terdaftar dengan NRP 2036211003.

Di Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan organisasi dan kepanitiaan antara lain BSO D'Village yang diselenggarakan oleh Himpunan Mahasiswa Diploma Sipil, BEM FV ITS, BEM ITS, serta aktif sebagai Asisten Dosen dan Laboratorium Hidroteknik dan Surveying DTIS ITS. Pada tahun 2025, Penulis juga bergabung dengan PT. Adi Karya (Persero) Tbk. dan PDAM (Pemerintah Kota Surabaya) sebagai mahasiswa magang.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

NO. GAMBAR	NAMA GAMBAR	SKALA
1	STRATIGRAFI SEGMENT 1, 2, & 3	1:2000, 1:200
2	STRATIGRAFI SEGMENT 4, 5, 6, & 7	1:2000, 1:200
3	STRATIGRAFI SEGMENT 8, 9, 10, & 11	1:2000, 1:200
4	LAYOUT OF BREAKWATER	1:5000
5	CROSS SECTION OF BREAKWATER STA 0+837 & 0+900	1:500
6	CROSS SECTION OF BREAKWATER STA 1+600 & 1+700	1:500
7	LONG SECTION OF BREAKWATER	1:1250
8	PLAN OF GEOTEXTILE WOVEN	1:5000
9	DETAILS AREA OF GEOTEXTILE WOVEN SEGMENT 1, 2, & 3	1:1250
10	DETAILS AREA OF GEOTEXTILE WOVEN SEGMENT 4, 5, & 6	1:1250
11	DETAILS AREA OF GEOTEXTILE WOVEN SEGMENT 7 & 8	1:1250
12	DETAILS AREA OF GEOTEXTILE WOVEN SEGMENT 9, 10, & 11	1:1250
13	PLAN OF GESC	1:5000
14	DETAILS AREA OF GESC SEGMENT 1, 2, & 3	1:1250
15	DETAILS AREA OF GESC SEGMENT 4, 5, & 6	1:1250
16	DETAILS AREA OF GESC SEGMENT 7 & 8	1:1250
17	DETAILS AREA OF GESC SEGMENT 9, 10, & 11	1:1250
18	DETAILS OF GESC	1:1250
19	PETA BATIMETRI	1:10000



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN
DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE COLUMN
(GESC) PADA PROYEK EASTPORT
BREAKWATER WORKS

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

NAMA GAMBAR

PROFIL STATIGRAFI

KETERANGAN

Legenda

- Sand layer, grey, very loose
- Clay layer, grey, very soft
- Clay layer, grey, very stiff
- Clay layer, grey, very hard
- Coral layer
- Limestone

SKALA GAMBAR

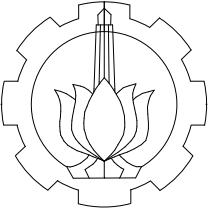
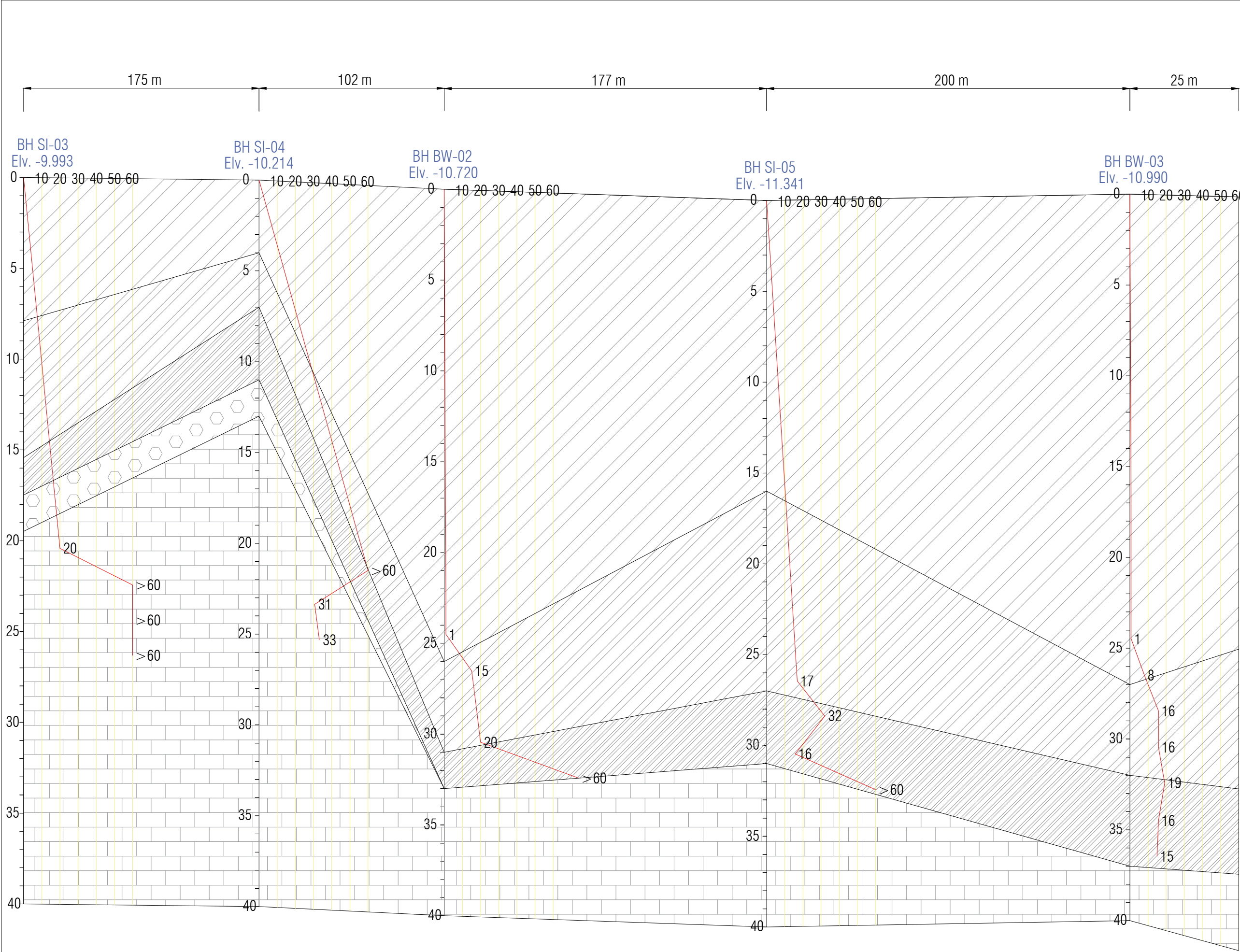
1:2000,1:200

NO GAMBAR

JUMLAH GAMBAR

01

03



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR
PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN
DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE COLUMN
(GESC) PADA PROYEK EASTPORT
BREAKWATER WORKS

DOSEN PEMBIMBING I
Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II
DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA
RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

NAMA GAMBAR

PROFIL STATIGRAFI

KETERANGAN

- Legenda
- Sand layer, grey, very loose
 - Clay layer, grey, very soft
 - Clay layer, grey, very stiff
 - Clay layer, grey, very hard
 - Coral layer
 - Limestone

SKALA GAMBAR

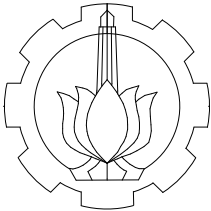
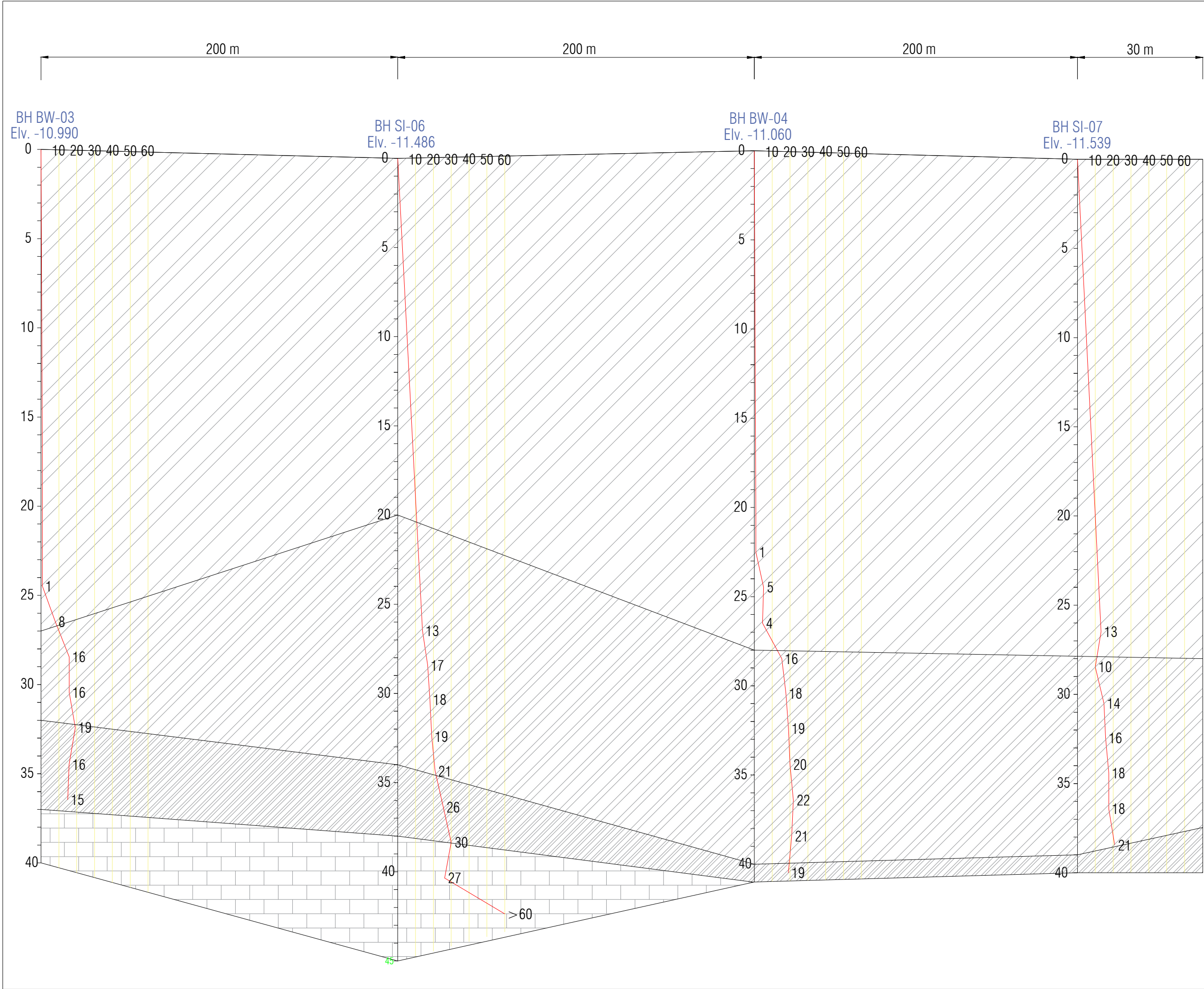
1:2000,1:200

NO GAMBAR

JUMLAH GAMBAR

02

03



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN
DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE COLUMN
(GESC) PADA PROYEK EASTPORT
BREAKWATER WORKS

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

NAMA GAMBAR

PROFIL STATIGRAFI

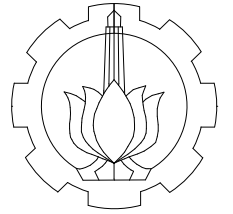
KETERANGAN

- Legenda
- Sand layer, grey, very loose
 - Clay layer, grey, very soft
 - Clay layer, grey, very stiff
 - Clay layer, grey, very hard
 - Coral layer
 - Limestone

SKALA GAMBAR

1:2000,1:200

NO GAMBAR	JUMLAH GAMBAR
03	03



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN
PERKUATAN DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE
COLUMN (GESC) PADA PROYEK
EASTPORT BREAKWATER WORKS

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

JUDUL GAMBAR

CROSS SECTION OF BREAKWATER

KETERANGAN GAMBAR

SKALA GAMBAR

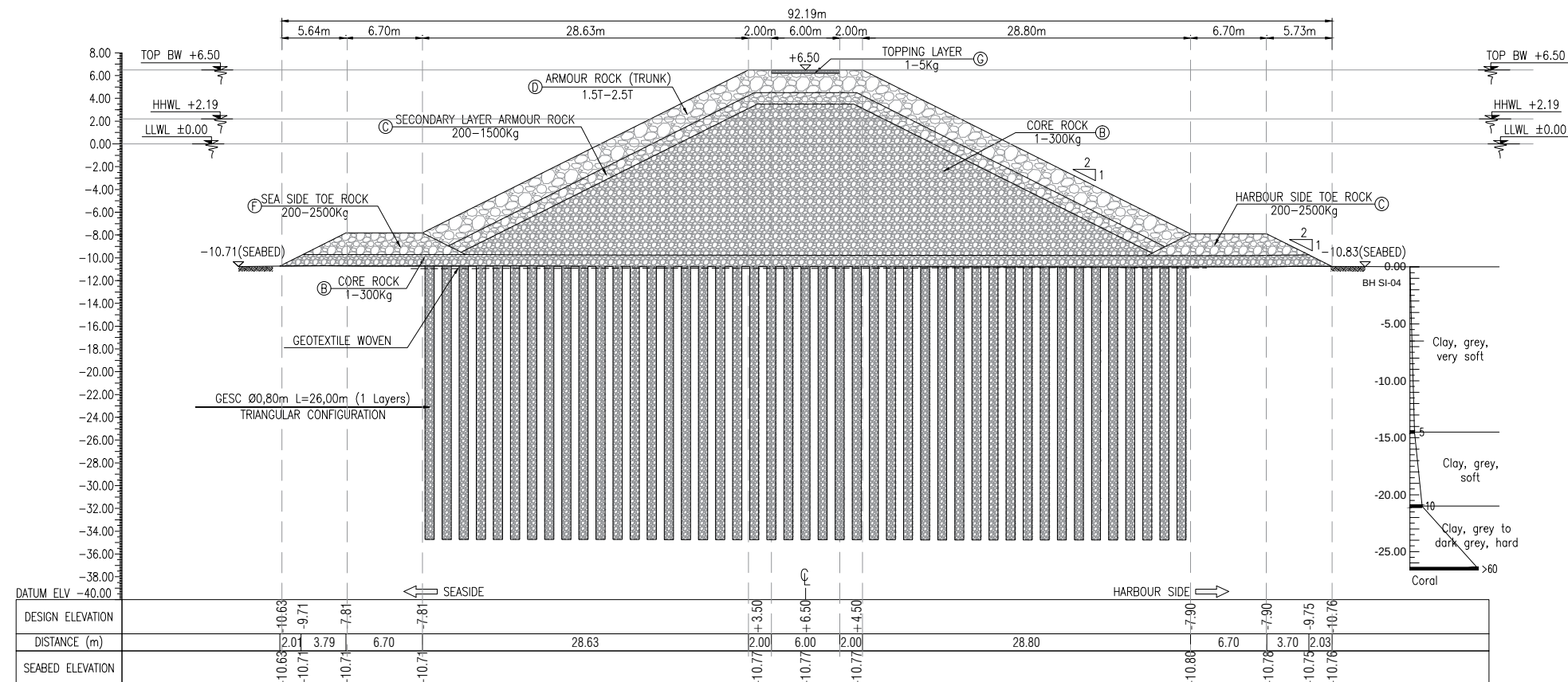
1:500

NO GAMBAR

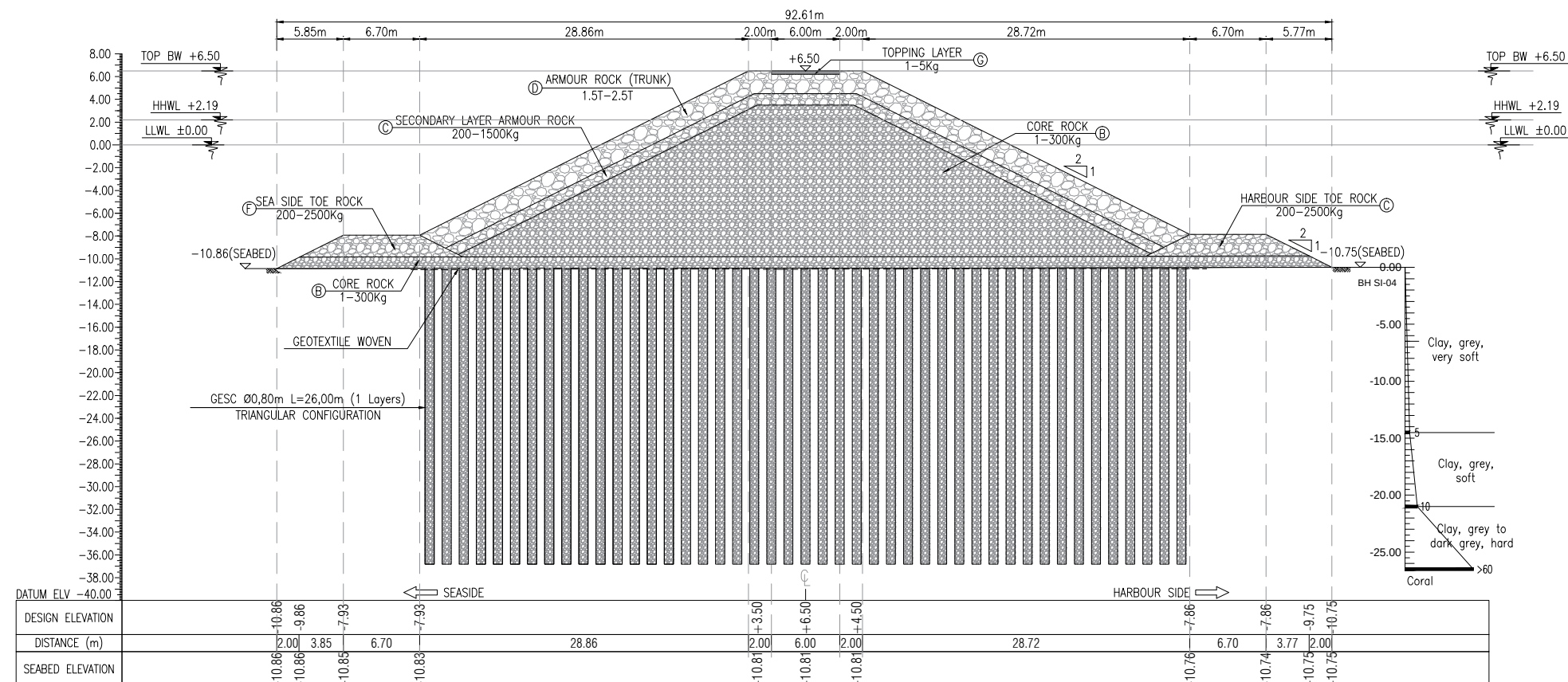
05

JUMLAH GAMBAR

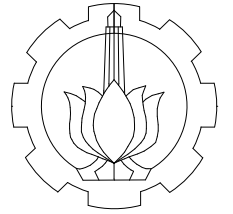
19



CROSS SECTION CH 0+837
SCALE 1 : 500



CROSS SECTION CH 0+700
SCALE 1 : 500



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN
PERKUATAN DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE
COLUMN (GESC) PADA PROYEK
EASTPORT BREAKWATER WORKS

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

JUDUL GAMBAR

CROSS SECTION OF BREAKWATER

KETERANGAN GAMBAR

SKALA GAMBAR

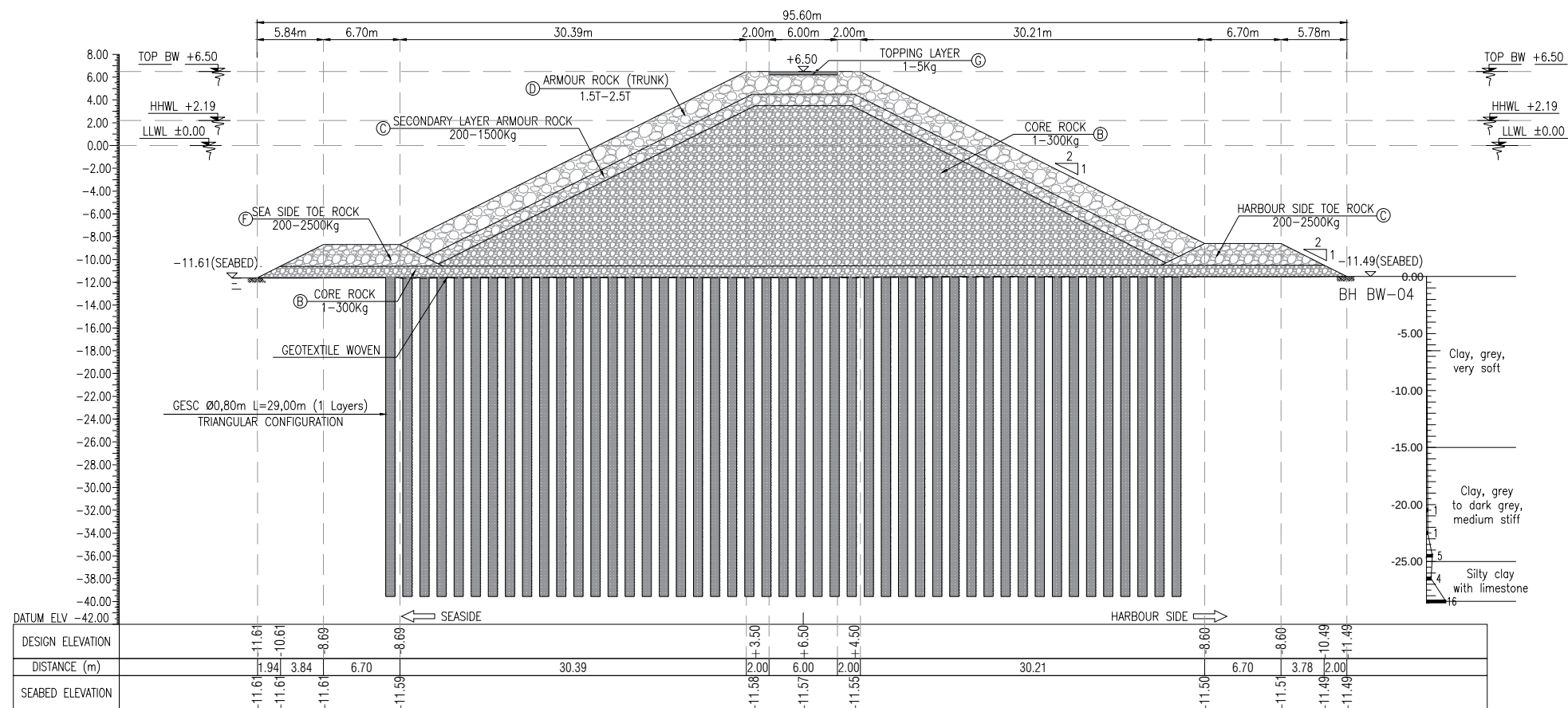
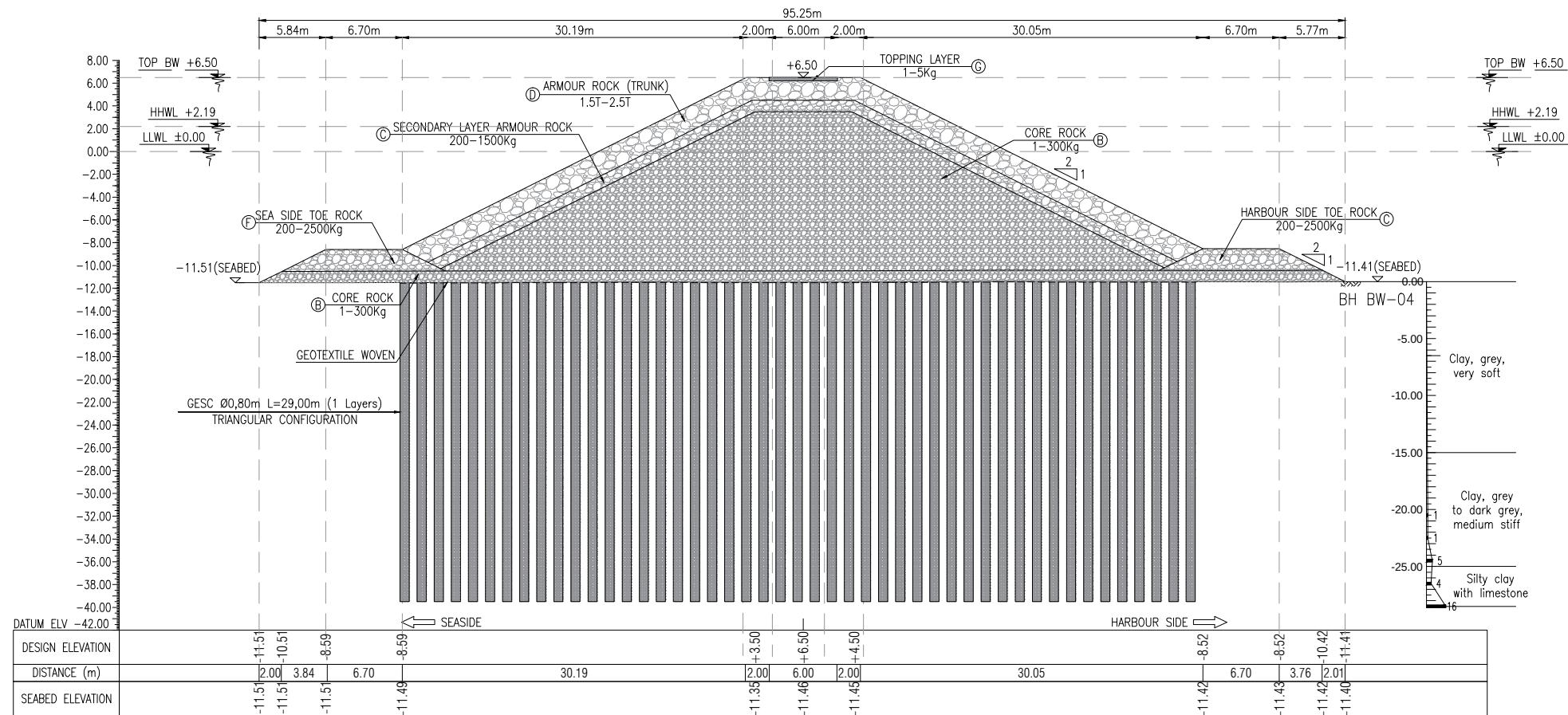
1:500

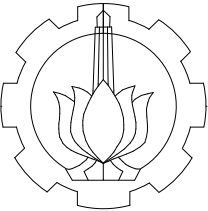
NO GAMBAR

06

JUMLAH GAMBAR

19





PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN PERKUATAN
DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE COLUMN
(GESC) PADA PROYEK EASTPORT
BREAKWATER WORKS

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

JUDUL GAMBAR

LONG SECTION OF BREAKWATER

KETERANGAN GAMBAR

SKALA GAMBAR

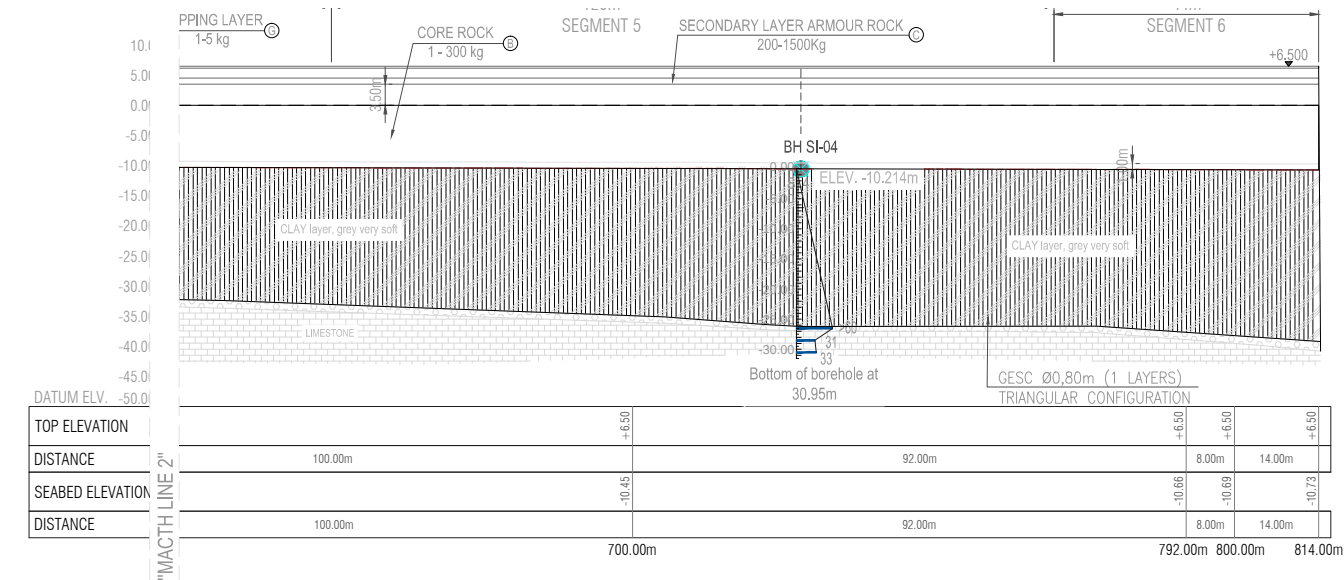
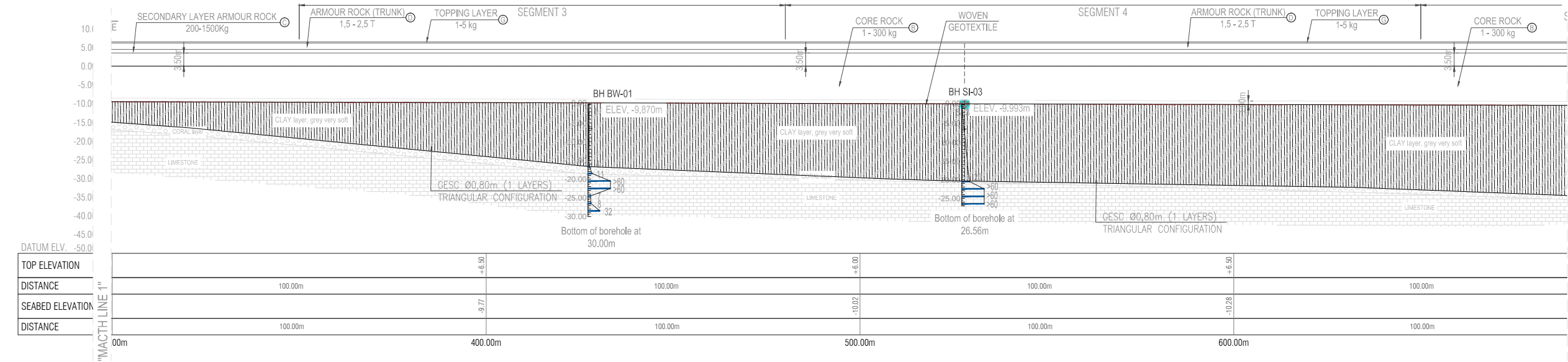
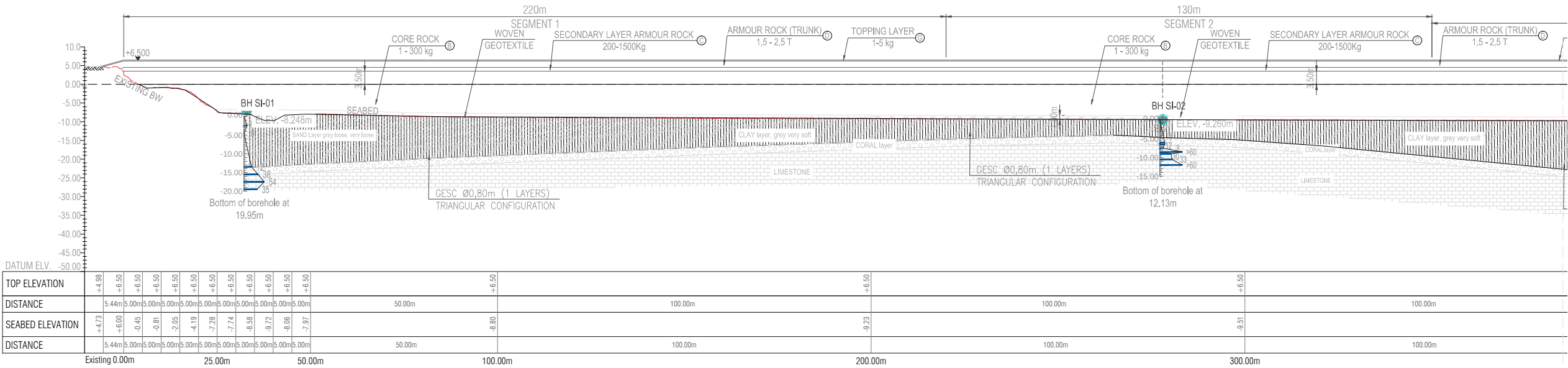
1:1250

NO GAMBAR

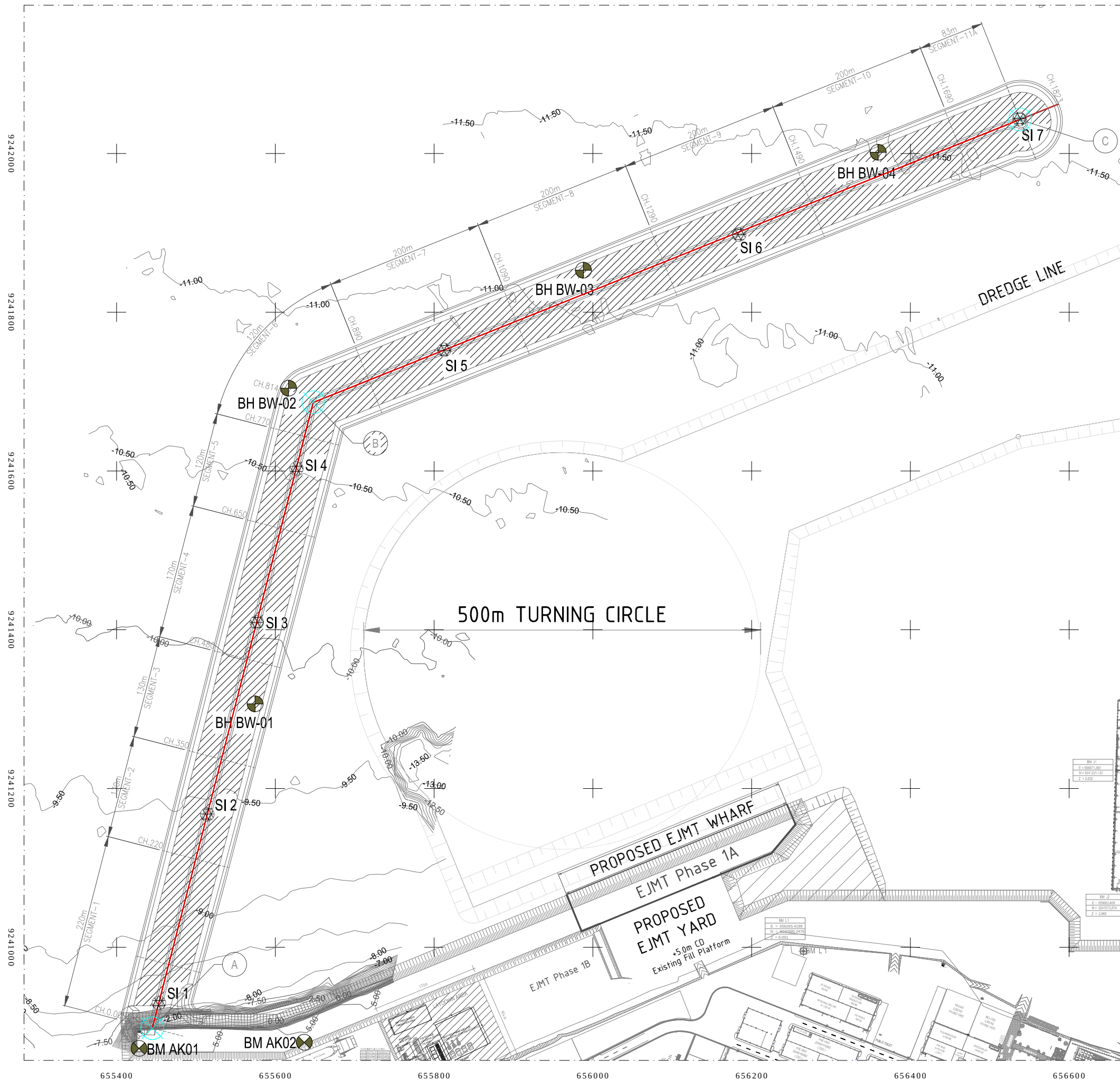
JUMLAH GAMBAR

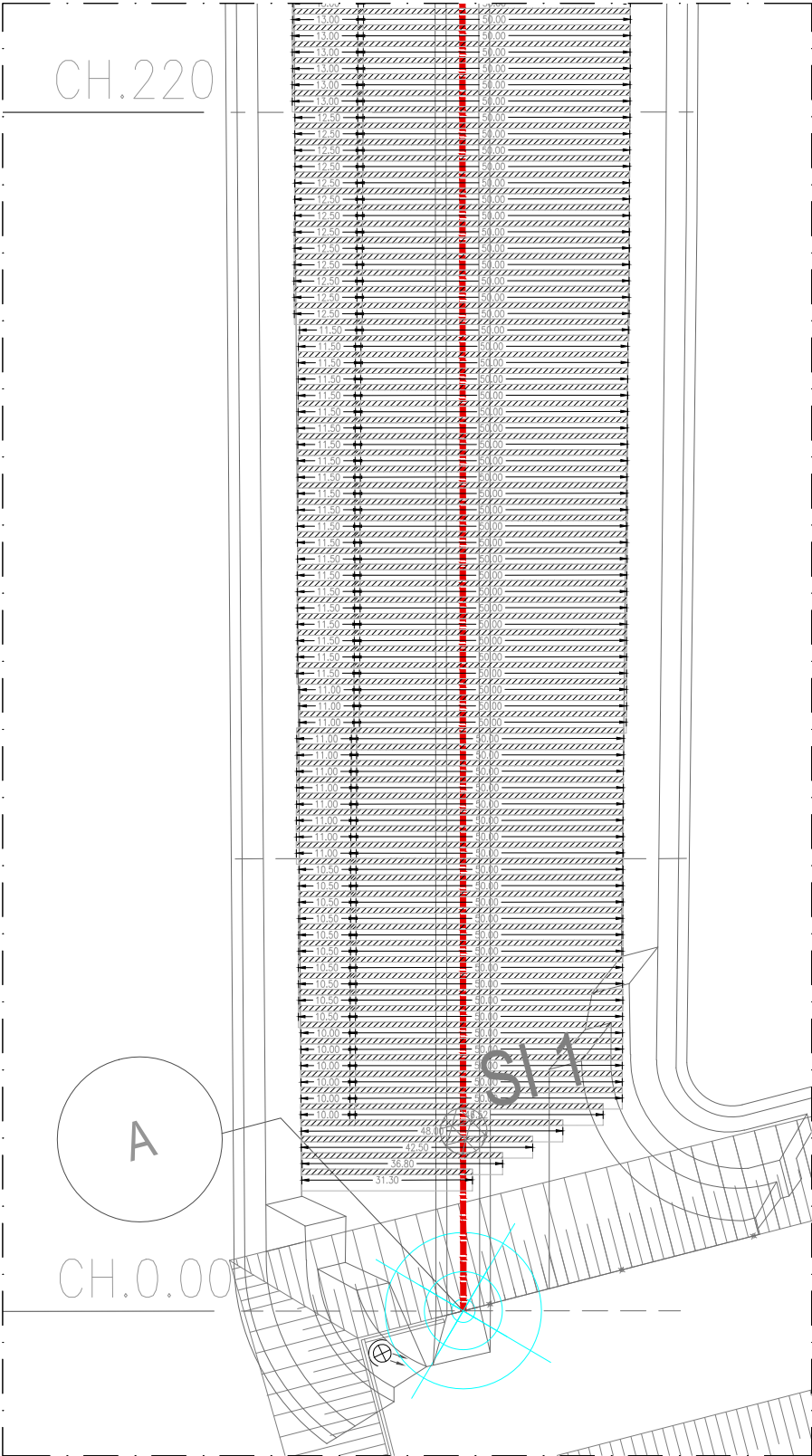
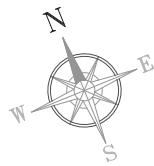
07

19

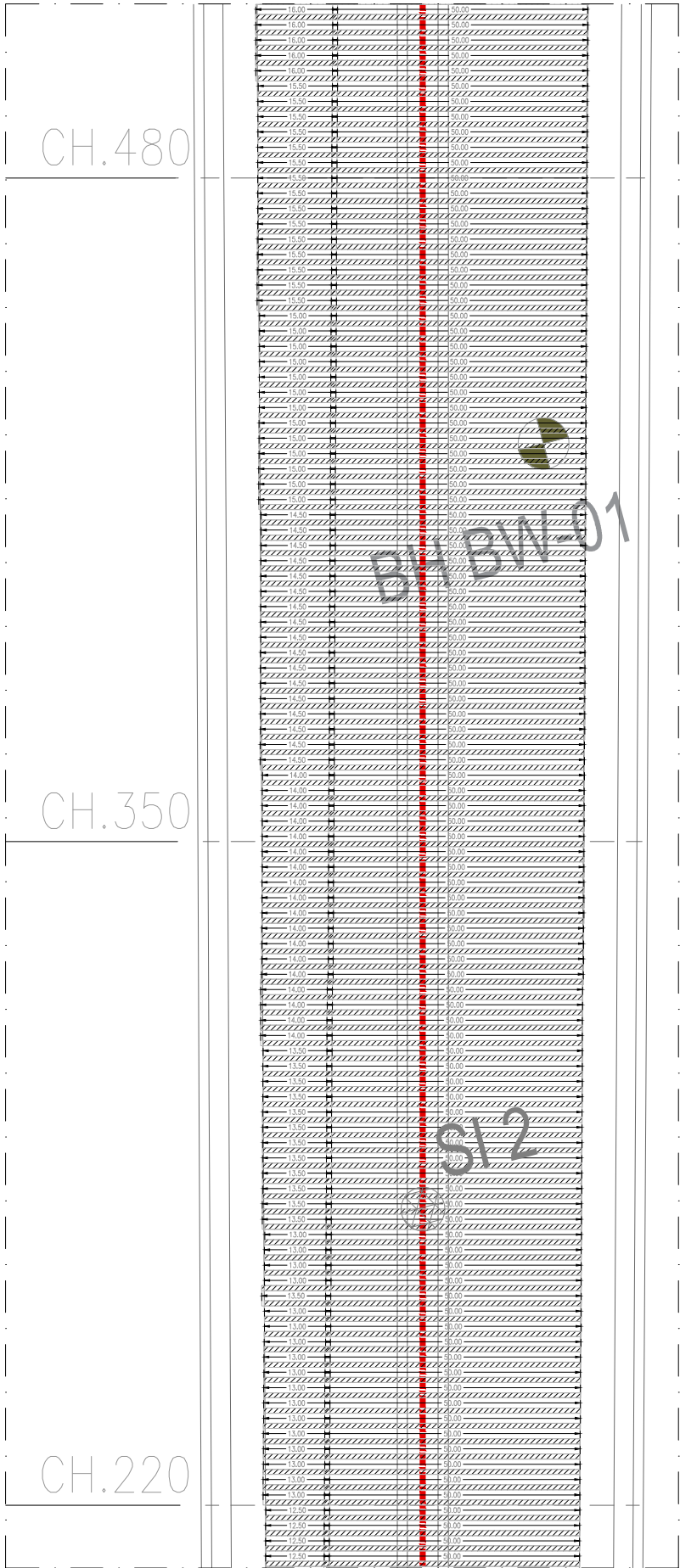


LONGITUDINAL SECTION CH 0+00 – 0+814
SCALE 1:1250

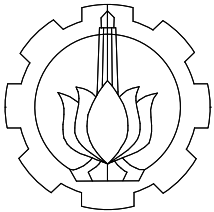




SEGMENT 1 (AREA COORDINATES WOVEN GEOTEXTILE)
SCALE 1 : 1250



SEGMENT 2&3 (AREA COORDINATES WOVEN GEOTEXTILE)
SCALE 1 : 1250



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN
PERKUATAN DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE
COLUMN (GESC) PADA PROYEK
EASTPORT BREAKWATER WORKS

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

JUDUL GAMBAR

DETAILS AREA OF GEOTEXTILE WOVEN

KETERANGAN GAMBAR

- CENTER LINE BREAKWATER
- ⊗ COORDINATE CENTER LINE BREAKWATER

Breakwater Centerline Coordinates		
Pt No.	Northing	Easting
A	9240897.881	655444.956

SKALA GAMBAR

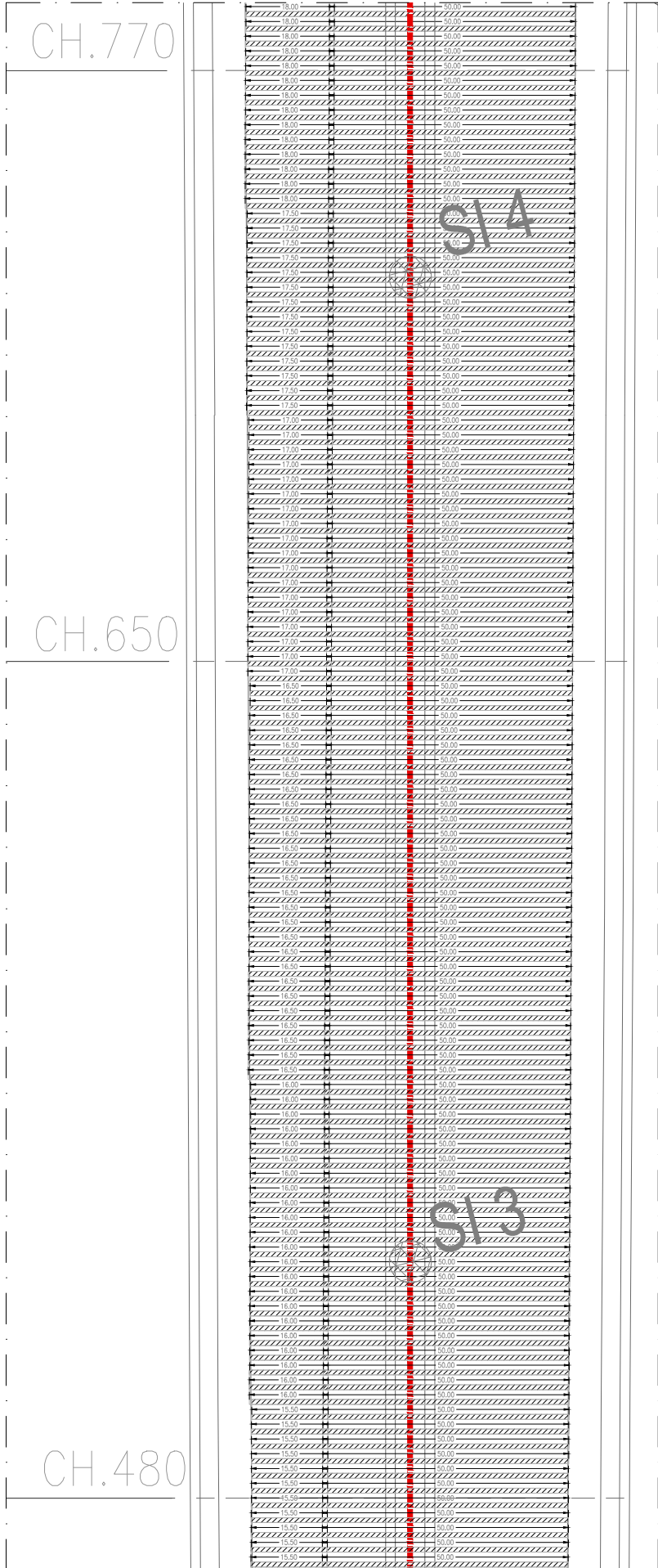
1:1250

NO GAMBAR

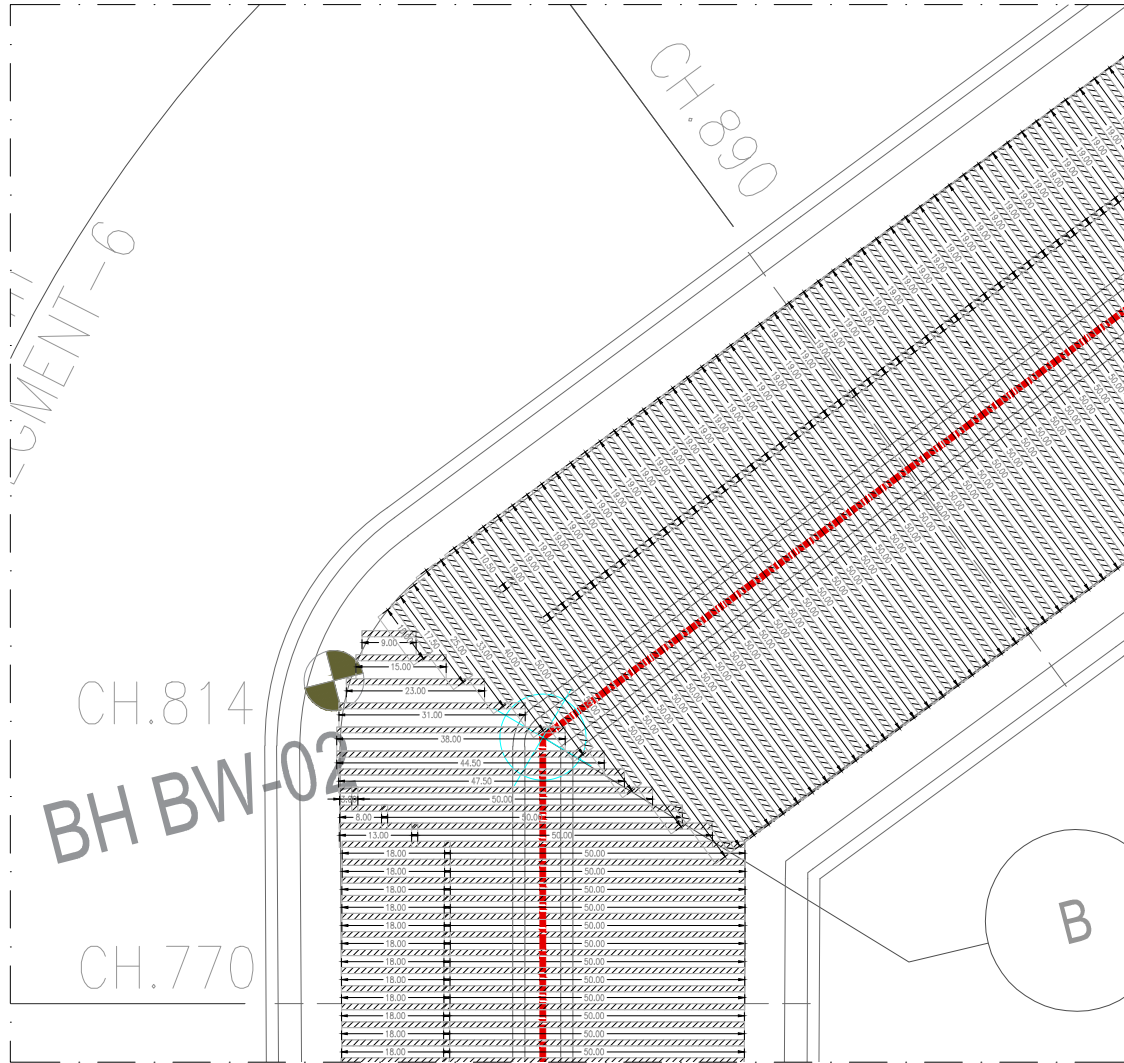
09

JUMLAH GAMBAR

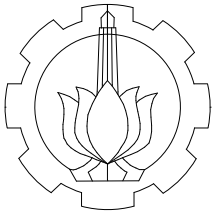
19



SEGMENT 4, 5 (AREA COORDINATES WOVEN GEOTEXTILE)
SCALE 1 : 1250



SEGMENT 6 (AREA COORDINATES WOVEN GEOTEXTILE)
SCALE 1 : 1250



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN
PERKUATAN DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE
COLUMN (GESC) PADA PROYEK
EASTPORT BREAKWATER WORKS

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

JUDUL GAMBAR

DETAILS AREA OF GEOTEXTILE WOVEN

KETERANGAN GAMBAR

--- CENTER LINE BREAKWATER

Breakwater Centerline Coordinates		
Pt No.	Northing	Easting
B	9241686.451	655647.975

SKALA GAMBAR

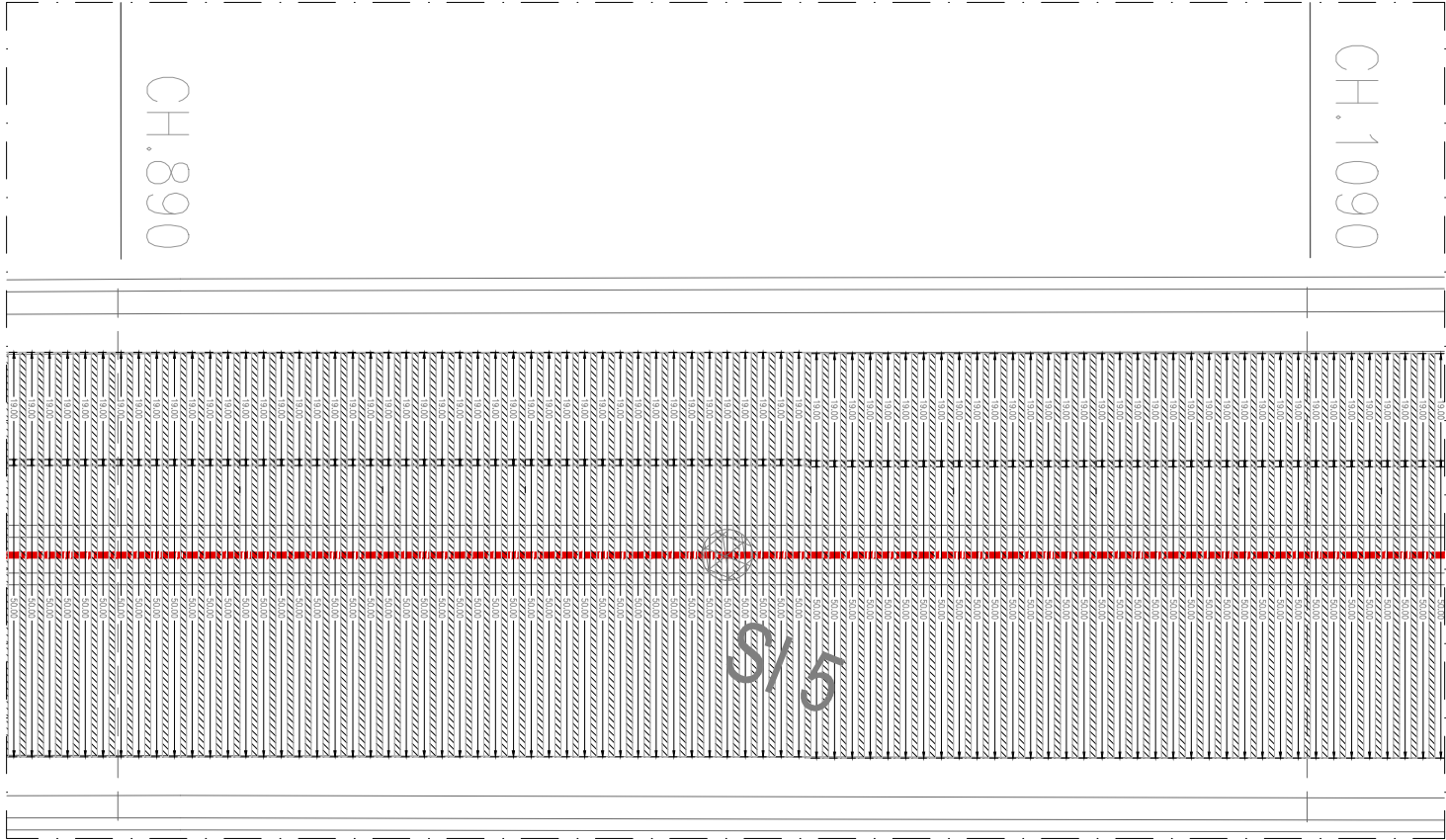
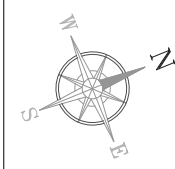
1:1250

NO GAMBAR

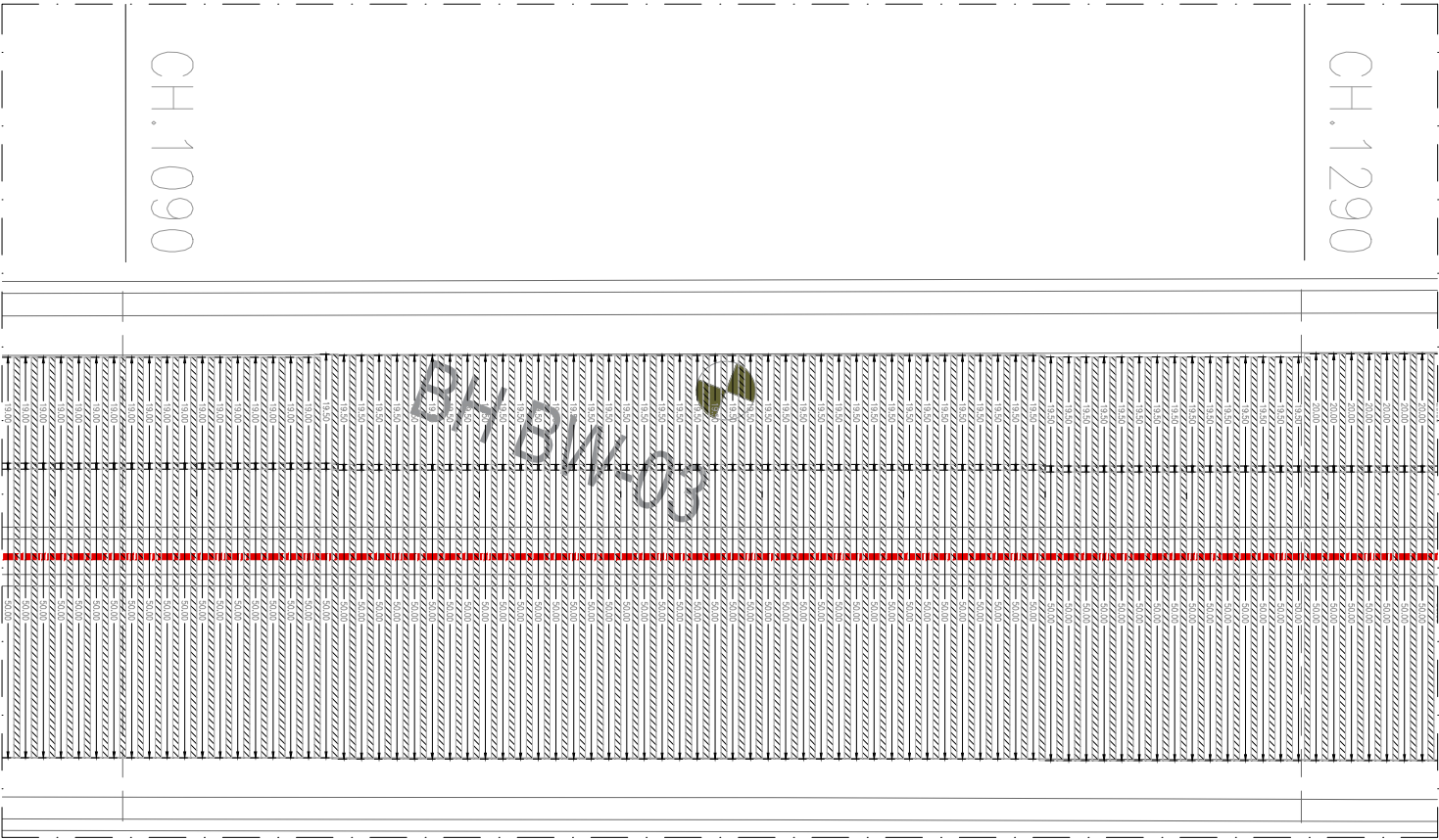
JUMLAH GAMBAR

10

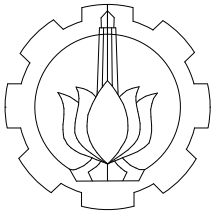
19



SEGMENT 7 (AREA COORDINATES WOVEN GEOTEXTILE)
SCALE 1 : 1250



SEGMENT 8 (AREA COORDINATES WOVEN GEOTEXTILE)
SCALE 1 : 1250



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN
PERKUATAN DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE
COLUMN (GESC) PADA PROYEK
EASTPORT *BREAKWATER WORKS*

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

JUDUL GAMBAR

DETAILS AREA OF GEOTEXTILE WOVEN

KETERANGAN GAMBAR

 CENTER LINE BREAKWATER

SKALA GAMBAR

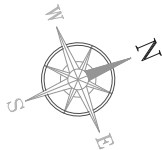
1:1250

NO GAMBAR

JUMLAH GAMBAR

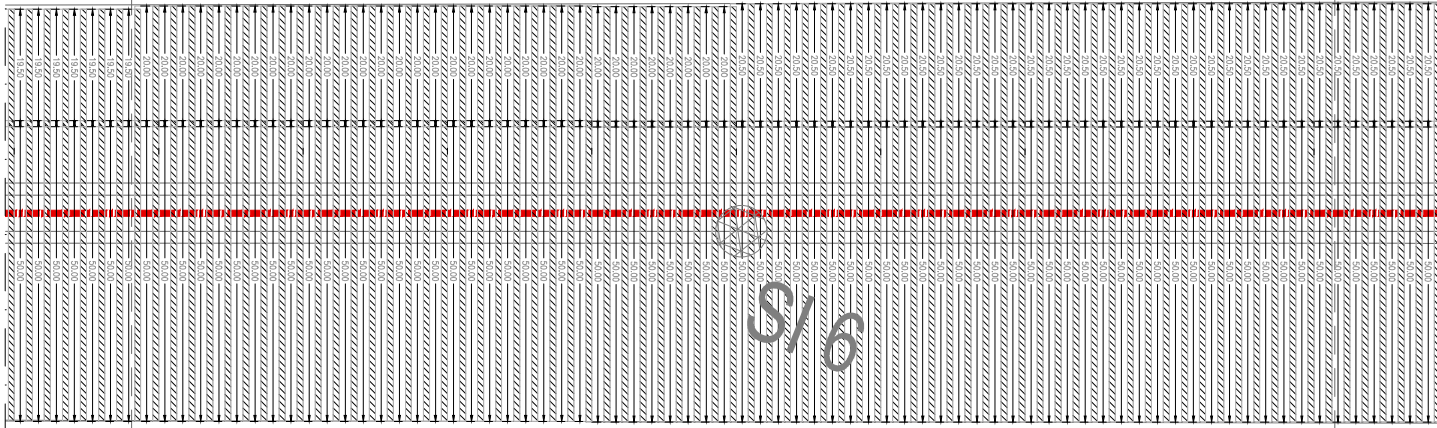
11

19



CH.1290

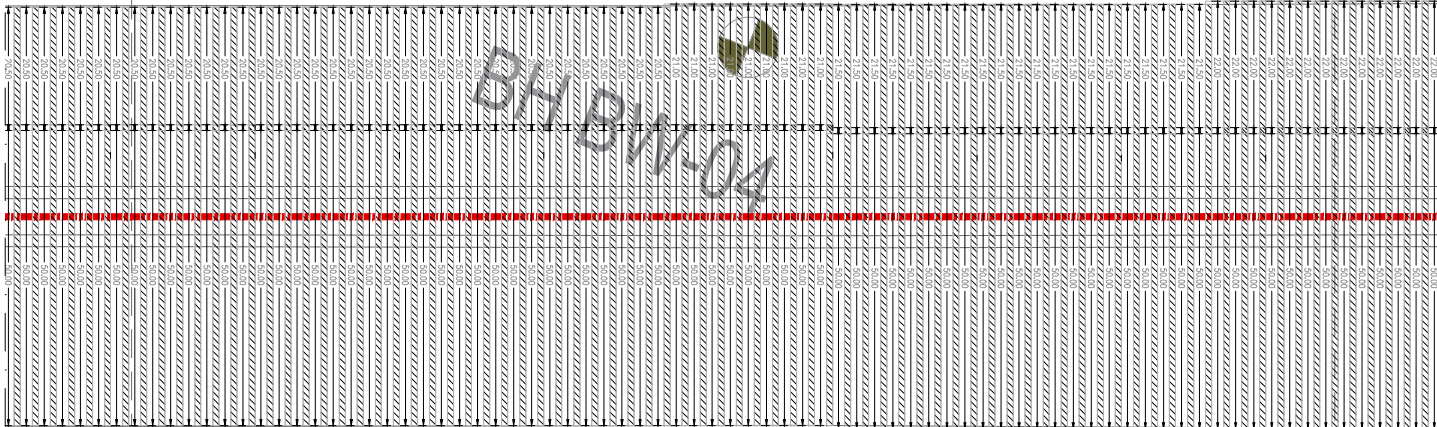
CH.1490



SEGMENT 9 (AREA COORDINATES WOVEN GEOTEXTILE)
SCALE 1 : 1250

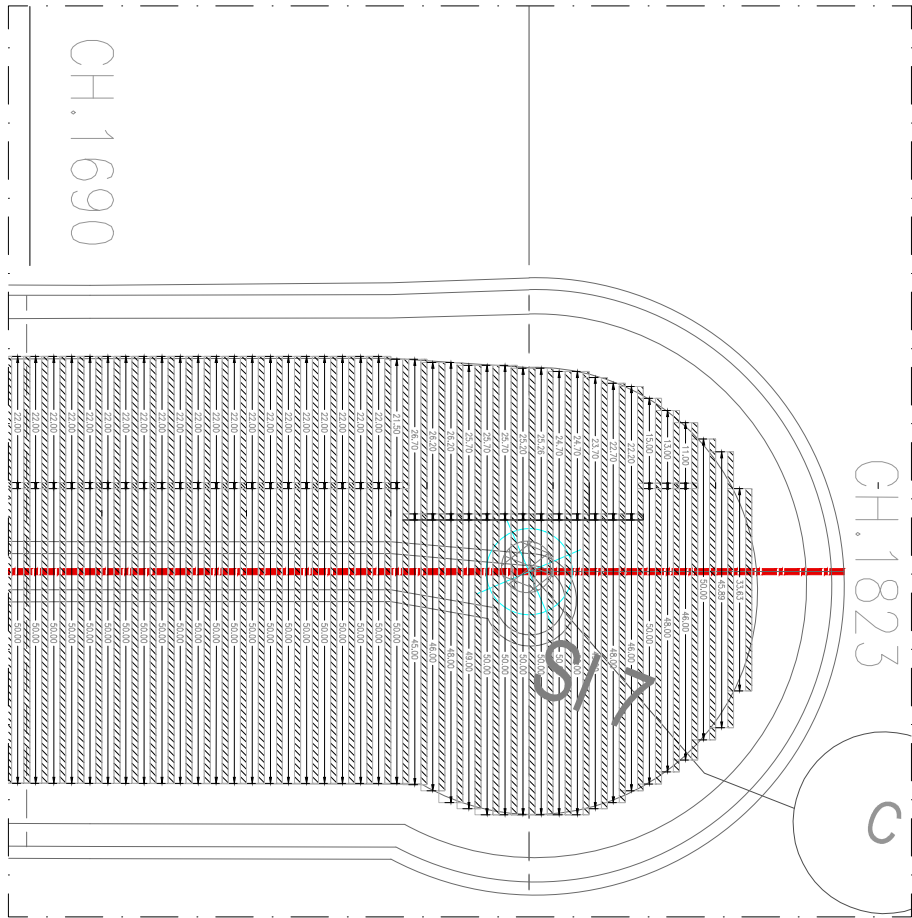
CH.1490

CH.1690

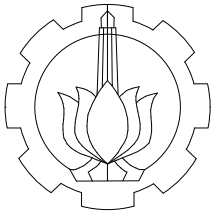


SEGMENT 10 (AREA COORDINATES WOVEN GEOTEXTILE)
SCALE 1 : 1250

CH.1690



SEGMENT 11A (AREA COORDINATES WOVEN GEOTEXTILE)
SCALE 1 : 1250



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN
PERKUATAN DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE
COLUMN (GESC) PADA PROYEK
EASTPORT *BREAKWATER WORKS*

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

JUDUL GAMBAR

DETAILS AREA OF GEOTEXTILE WOVEN

KETERANGAN GAMBAR

--- CENTER LINE BREAKWATER

Breakwater Centerline Coordinates

Pt No.	Northing	Easting
C	9242042.581	656538.096

SKALA GAMBAR

1:1250

NO GAMBAR

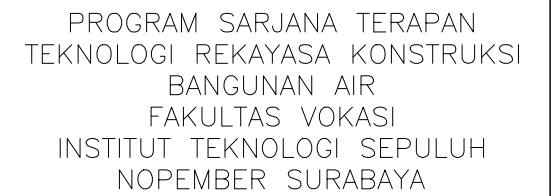
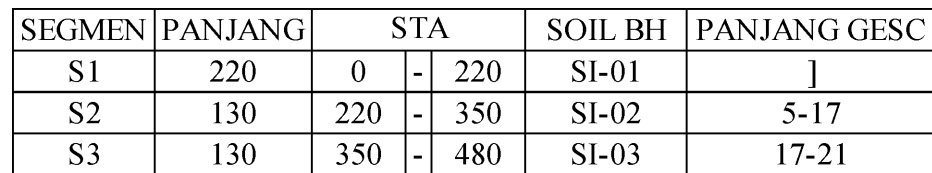
JUMLAH GAMBAR

12

19



19



JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN
PERKUATAN DASAR MENGGUNAKAN
**GEOETXTILE-ENCASED STONE
COLUMN** (GESC) PADA PROYEK
EASTPORT **BREAKWATER WORKS**

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

JUDUL GAMBAR

DETAILS AREA COORDINATES GESC

KETERANGAN GAMBAR

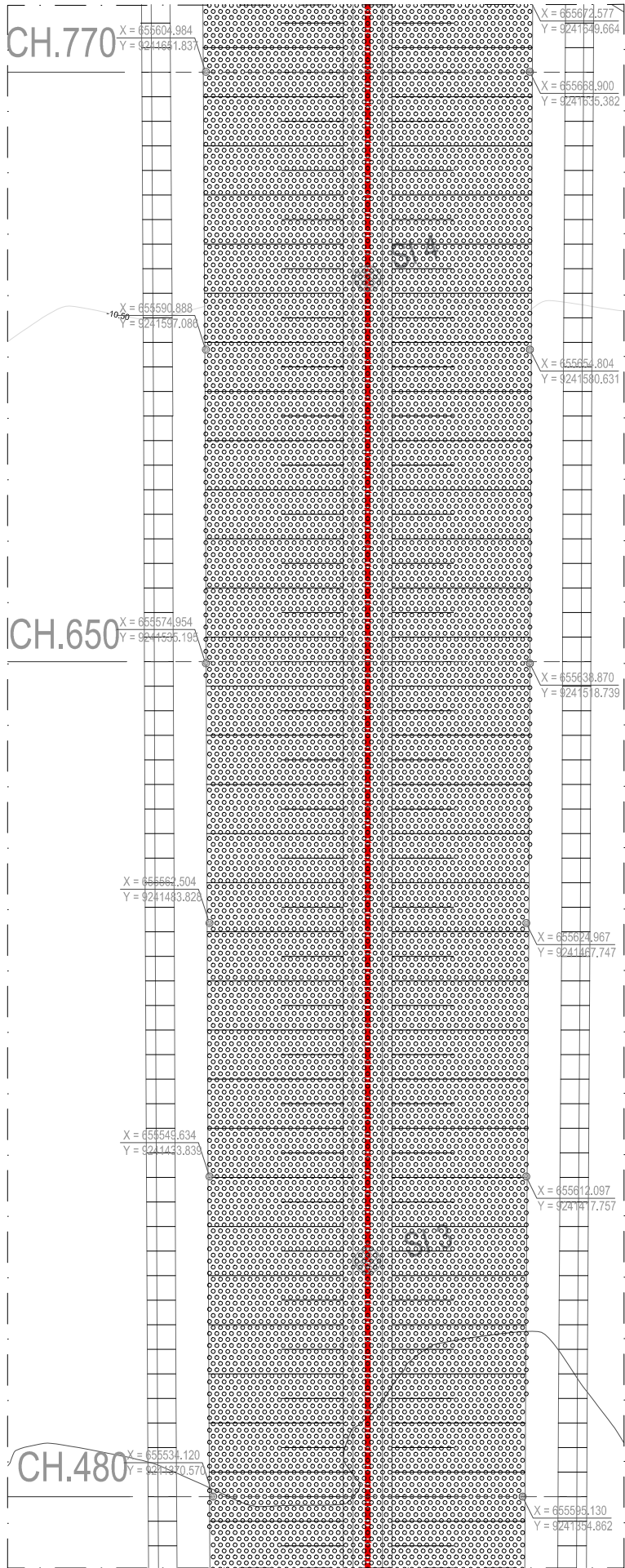
 CENTER LINE BREAKWATER
 COORDINATE CENTER LINE BREAKWATER

Breakwater Centerline Coordinates		
Pt No.	Northing	Easting
A	9240897.881	655444.956

SKALA GAMBAR

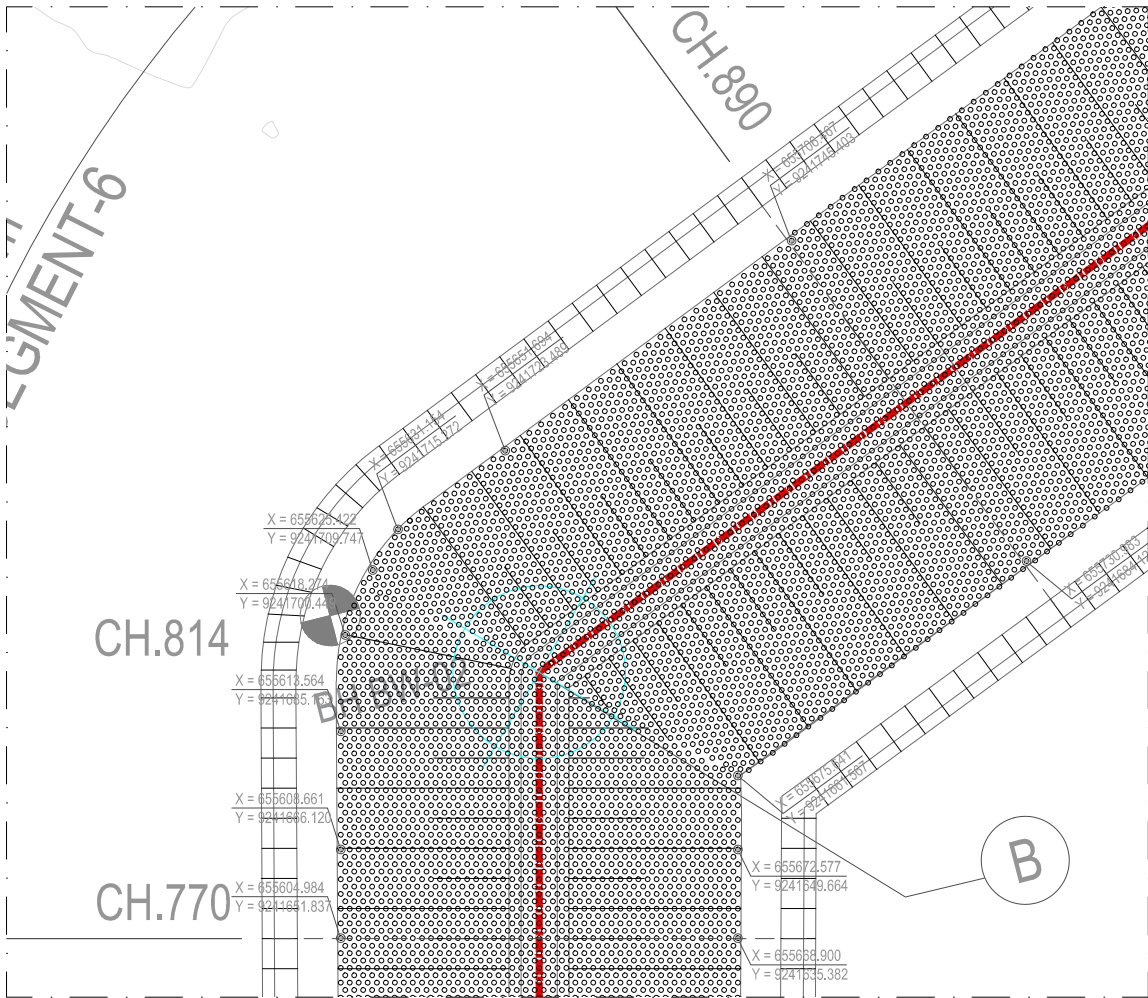
1:1250

NO GAMBAR	JUMLAH GAMBAR
14	19

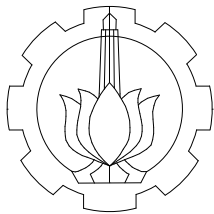


SEGMENT 4, 5 (AREA COORDINATES GESC)
SCALE 1 : 1250

SEGMENT	PANJANG	STA		SOIL BH	PANJANG GESC
S4	170	480	- 650	BH-BW-01	21-26,5
S5	120	650	- 770	SI-04	26,5-28
S6	120	770	- 890	BH-BW-02	26,5-28



SEGMENT 6 (AREA COORDINATES GESC)
SCALE 1 : 1250



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN
PERKUATAN DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE
COLUMN (GESC) PADA PROYEK
EASTPORT **BREAKWATER WORKS**

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

JUDUL GAMBAR

DETAILS AREA COORDINATES GESC

KETERANGAN GAMBAR

--- CENTER LINE BREAKWATER

Breakwater Centerline Coordinates		
Pt No.	Northing	Easting
B	9241686.451	655647.975

SKALA GAMBAR

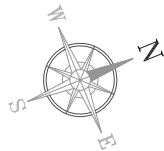
1:1250

NO GAMBAR

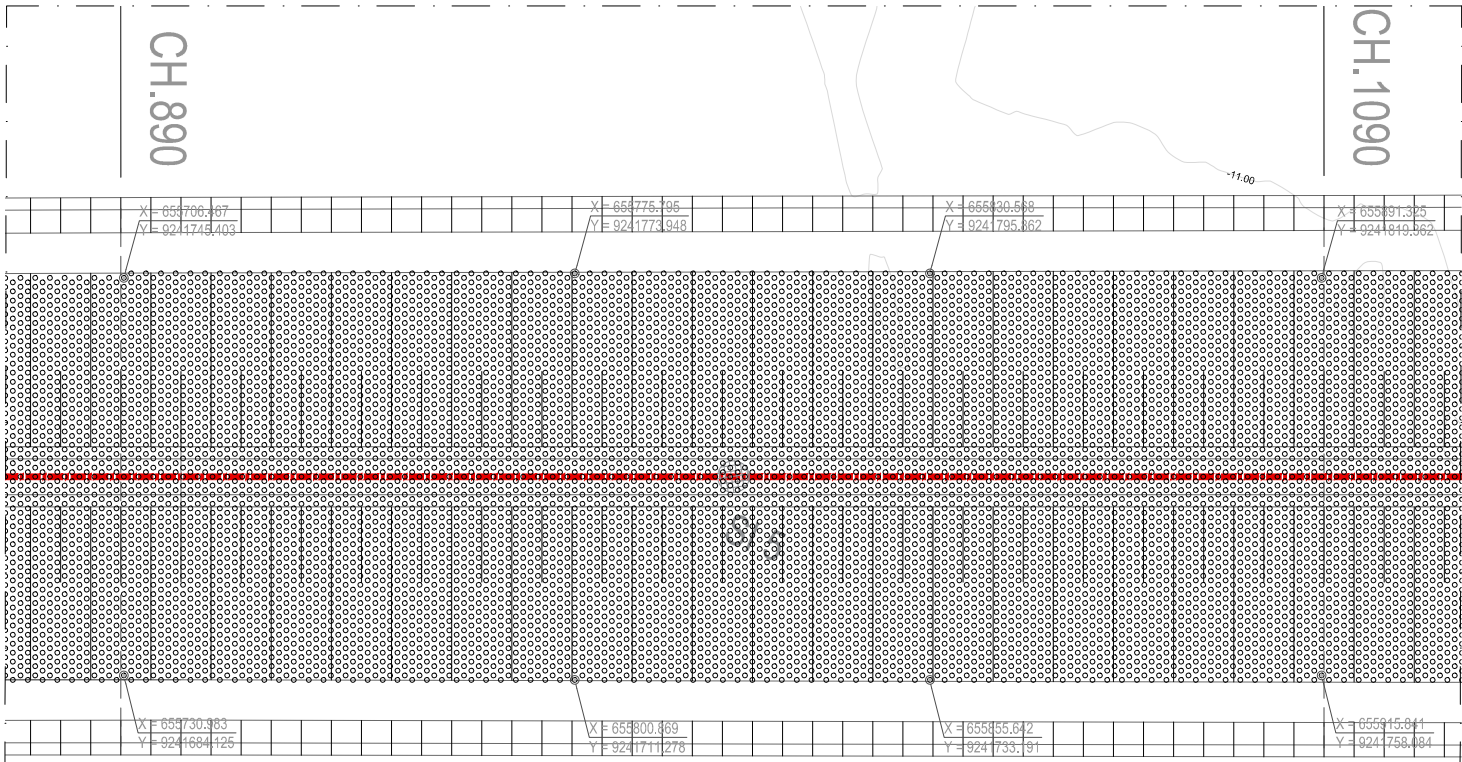
JUMLAH GAMBAR

15

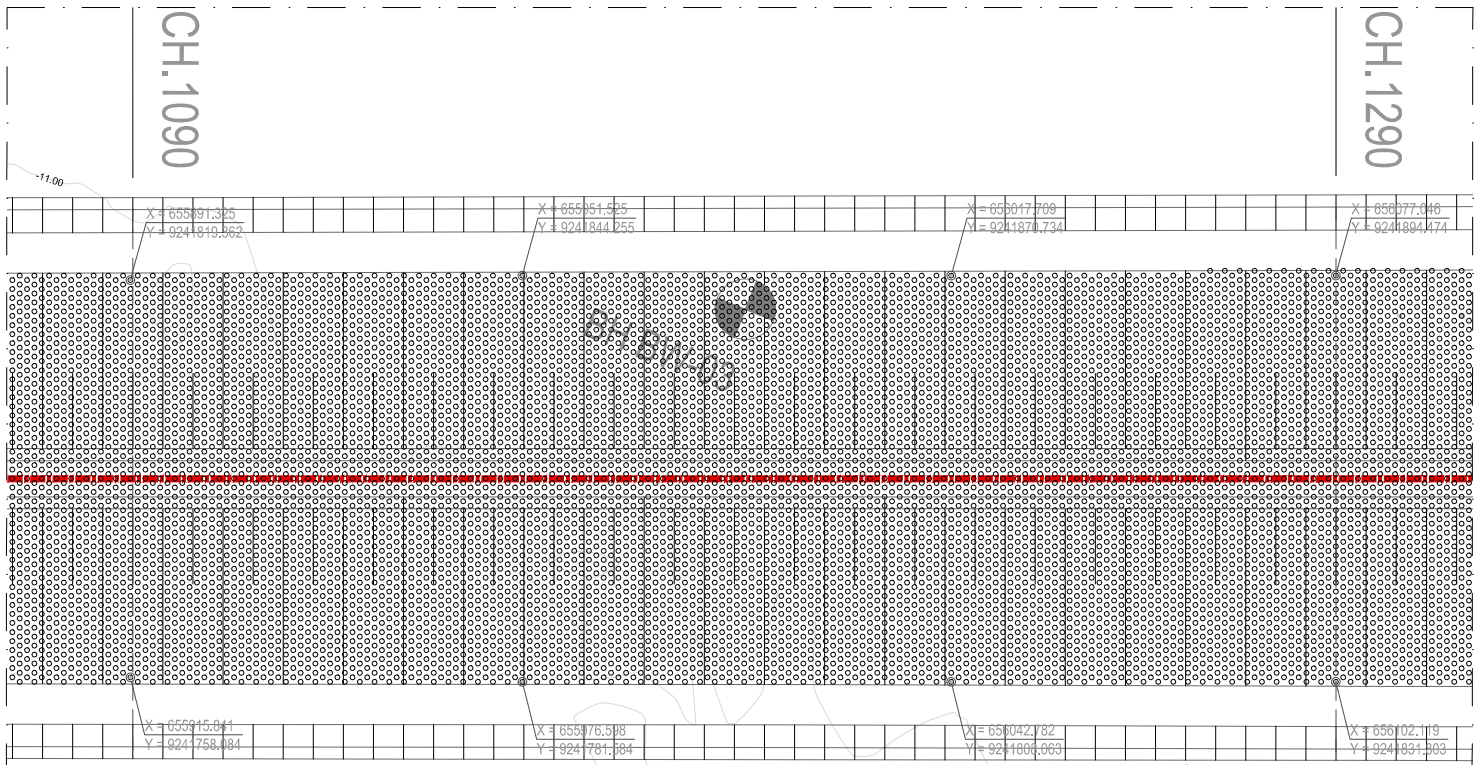
19



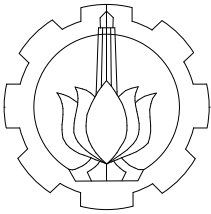
SEGMENT	PANJANG	STA		SOIL BH	PANJANG GESC
S7	200	890	- 1090	SI-05	26,5-28,5
S8	200	1090	- 1290	BH-BW-03	28,50



SEGMENT 7 (AREA COORDINATES GESC)
SCALE 1 : 1250



SEGMENT 8 (AREA COORDINATES GESC)
SCALE 1 : 1250



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN
PERKUATAN DASAR MENGGUNAKAN
**GEOETXTILE-ENCASED STONE
COLUMN** (GESC) PADA PROYEK
EASTPORT **BREAKWATER WORKS**

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

JUDUL GAMBAR

DETAILS AREA COORDINATES GESC

KETERANGAN GAMBAR

----- CENTER LINE BREAKWATER

SKALA GAMBAR

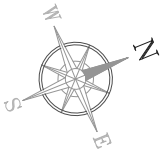
1:1250

NO GAMBAR

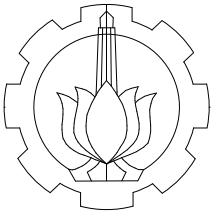
JUMLAH GAMBAR

16

19



SEGMENT	PANJANG	STA		SOIL BH	PANJANG GESC
S9	200	1290	- 1490	SI-06	28,50
S10	200	1490	- 1690	BH-BW-04	29,00
S11	83	1690	- 1773	SI-07	28,50



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN
PERKUATAN DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE
COLUMN (GESC) PADA PROYEK
EASTPORT **BREAKWATER WORKS**

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

JUDUL GAMBAR

DETAILS AREA COORDINATES GESC

KETERANGAN GAMBAR

--- CENTER LINE BREAKWATER

⊗ COORDINATE CENTER LINE BREAKWATER

Breakwater Centerline Coordinates		
Pt No.	Northing	Easting
C	9242042.860	656538.795

SKALA GAMBAR

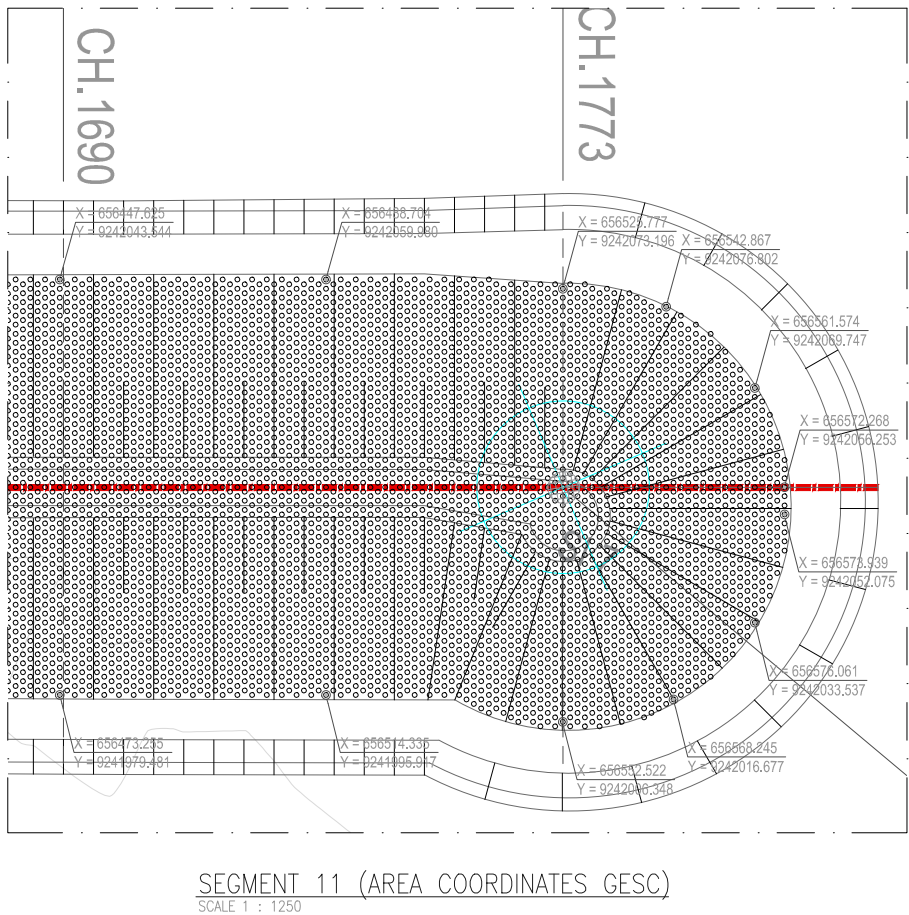
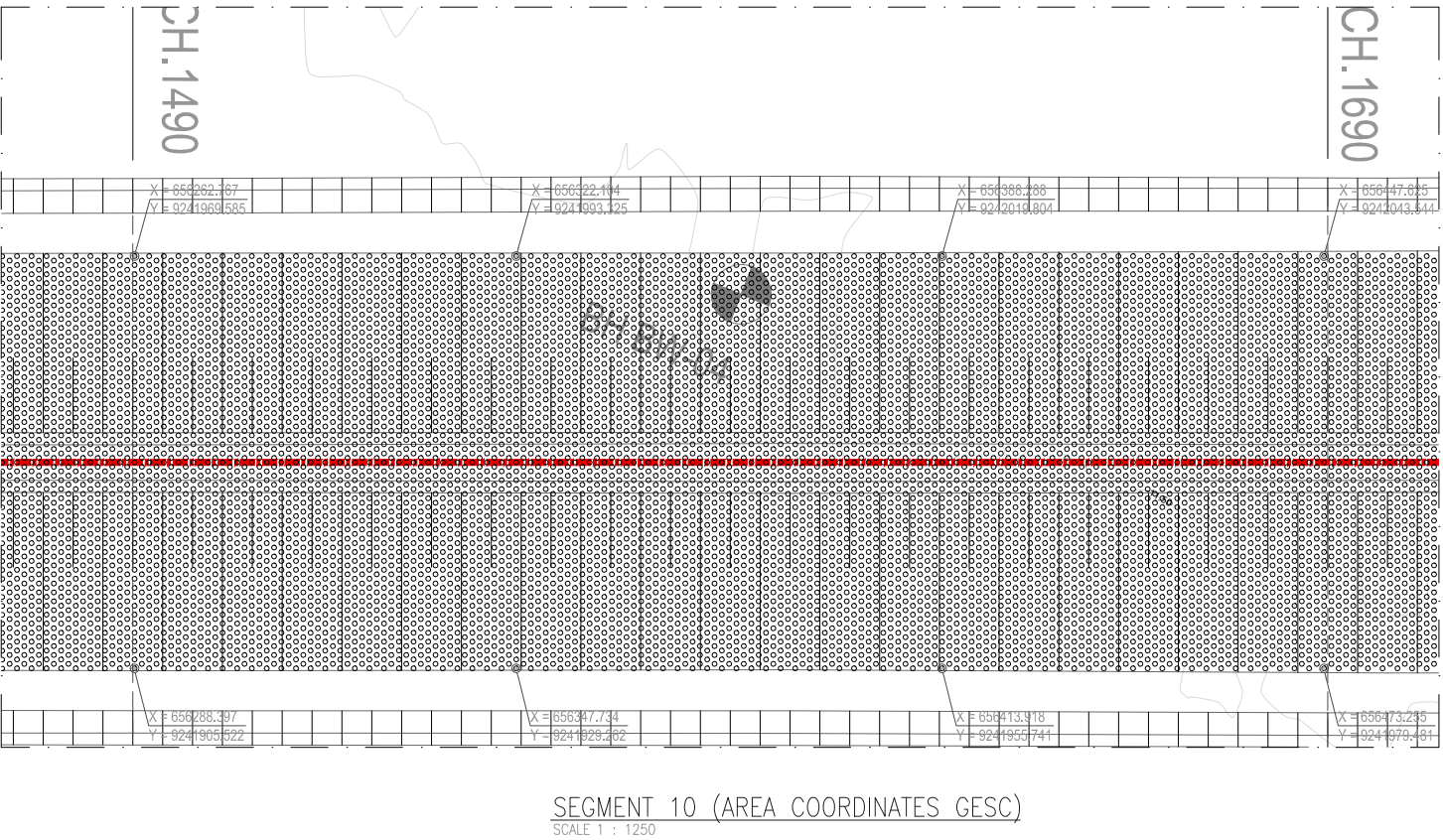
1:1250

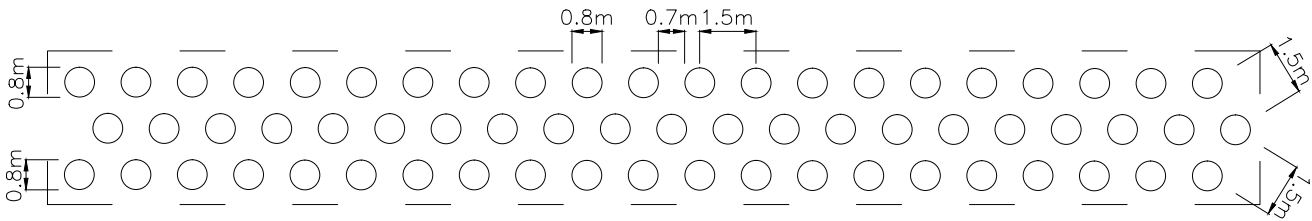
NO GAMBAR

JUMLAH GAMBAR

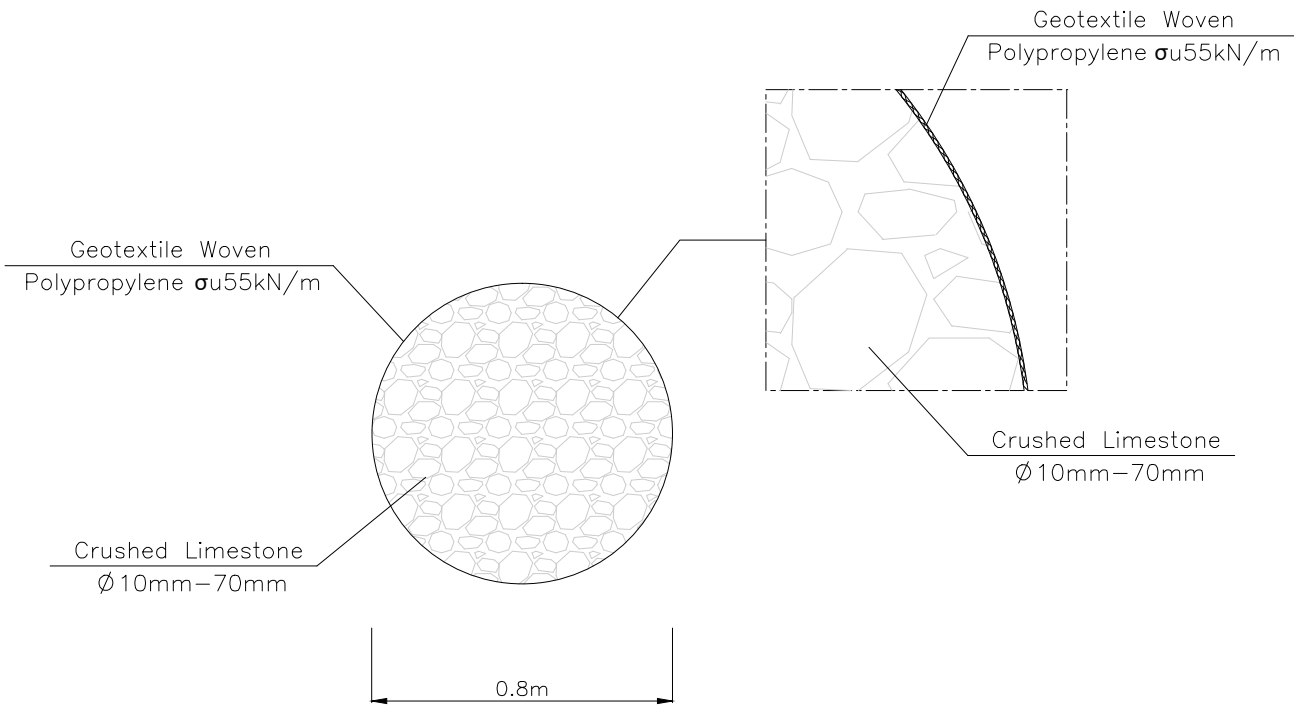
17

19

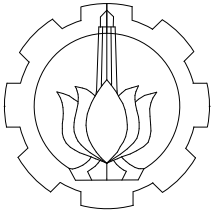




Area Coordinate Geotextile-Encased Stone Column
Scale 1:200



Detail Of Geotextile-Encased Stone Column
Scale 1:20,1:5



PROGRAM SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI
BANGUNAN AIR
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR
PEMECAH GELOMBANG DAN
PERKUATAN DASAR MENGGUNAKAN
GEOETXTILE-ENCASED STONE COLUMN
(GESC) PADA PROYEK EASTPORT
BREAKWATER WORKS

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. HENDRA WAHYUDI, M.T.
NIP. 196304261988031003

DOSEN PEMBIMBING II

DERIS FAISA RALINDRA, S.T., M.T.
NIP. 198912172024061001

NAMA MAHASISWA

RISTIYA RACHMA PRAMESTI
NRP. 2036211003

NAMA GAMBAR

DETAIL OF GESC

KETERANGAN

SKALA GAMBAR

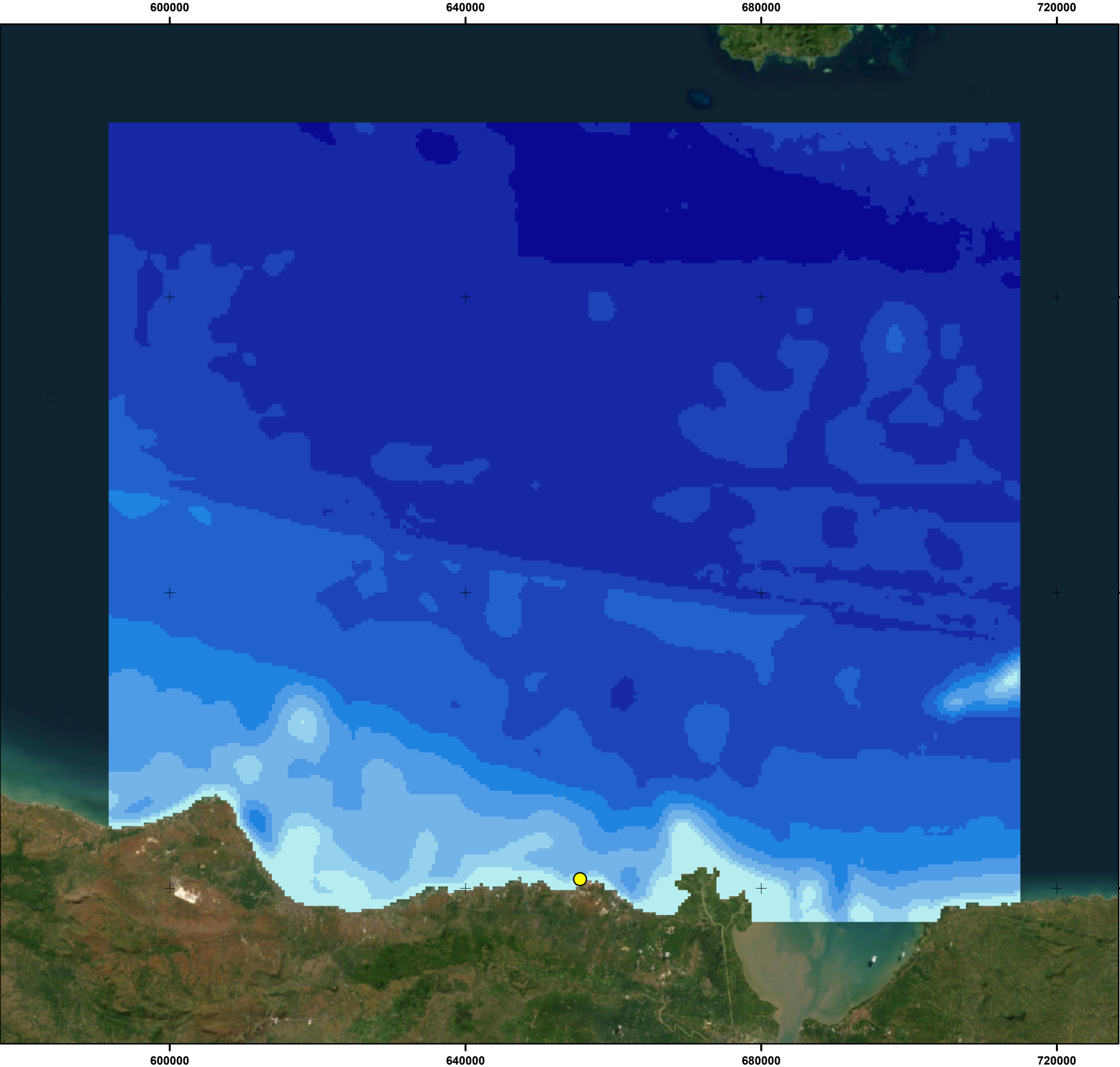
1:200,1:20,1:5

NO GAMBAR

18

JUMLAH GAMBAR

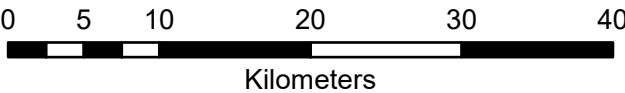
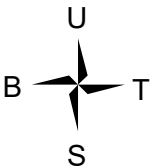
19



Departemen Teknik Infrastruktur Sipil
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Tahun 2025

PETA BATIMETRI

Disusun Oleh:
Ristiya Rachma Pramesti
2036211003



Sistem Proyeksi : WGS 1984 UTM Zona 49S
Sistem Grid : UTM
Sumber : Ina-Geoportal & PT. Hidronav
Tehnikatama

LOKASI



Paciran, Lamongan, Jawa Timur
(656024,214, 9241030,668)

● Proyek Eastport *Breakwater Works*

Legenda

● Proyek Eastport *Breakwater Works*

Elevasi Dasar Laut (Meter)

