

ANALISIS STABILITAS *COFFERDAM* JEMBATAN DENGAN KOMBINASI PERKUATAN PADA JEMBATAN WAMPU SUMATERA UTARA

Novia Komala Sari¹, Zakwan Gusnadi², dan Fitriana Sarifah³

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Siliwangi, Jl. Siliwangi No. 24 Tasikmalaya
viakomala@unsil.ac.id

²Jurusan Teknik Sipil, Universitas Siliwangi, Jl. Siliwangi No. 24 Tasikmalaya
zakwangusnadi@unsil.ac.id

³Jurusan Teknik Sipil, Universitas Siliwangi, Jl. Siliwangi No. 24 Tasikmalaya
fitriana.sarifah@unsil.ac.id

Masuk: 12-08-2023, revisi: 30-10-2023, diterima untuk diterbitkan: 02-11-2023

ABSTRACT

Soil strength can be reduced through saturation on the slopes beneath bridge and excessive loading. This reduction can undoubtedly affect the stability of these slopes with the possibility of causing landslide issues in the future. In Addition, it has been observed that the issues of landslides on slopes are generally caused by reduced soil shear strength or the addition of shear forces with subsequent effects on the overall bridge structure. This means there is a need for an early prediction mechanism for the landslide to plan and design the appropriate reinforcement system to minimize the potential instability of slopes in the future. Therefore, this research was conducted to determine the effective reinforcement system by creating the cofferdam to address the issues of soil saturation and increased load caused by heavy machinery operations. The process involved the adoption of the PLAXIS software based on 2-dimensional finite element analysis to model the quite complex combination of loads and reinforcement. The reinforcement used in the cofferdam system include sheet piles, piles, and gabions. The results showed that the reinforcement combination placed the safety factor into the stable category and met the allowed safety requirements. Moreover, the internal forces within the sheet piles were found to be smaller than their structural capacity.

Keywords: cofferdam; finite element method; reinforcement; stability

ABSTRAK

Penjenuhan tanah pada lereng di bawah jembatan dan pembebanan yang berlebih dapat menyebabkan pengurangan kekuatan tanah. Pengurangan kekuatan tanah tentu saja akan berdampak pada kestabilan lereng di bawah jembatan, serta dapat mengakibatkan masalah longsor pada lereng dikemudian hari. Secara umum masalah longsor pada lereng diakibatkan oleh pengurangan kuat geser tanah atau penambahan gaya geser yang terjadi. Pada kasus lereng jembatan tentu saja masalah longsor ini akan mempengaruhi struktur jembatan secara keseluruhan. Apabila mekanisme longsor dapat diprediksi sejak awal maka sistem perkuatan dapat direncanakan sesuai kebutuhan, sehingga dapat memperkecil potensi ketidakstabilan lereng dimasa yang akan datang. Penelitian ini bertujuan untuk mencari sistem perkuatan yang efektif dengan membuat *cofferdam* untuk menangani masalah penjenuhan tanah dan penambahan beban akibat alat berat yang bekerja. Untuk memodelkan kombinasi beban dan perkuatan yang cukup kompleks digunakan bantuan *software* PLAXIS berbasis elemen hingga 2 dimensi dalam proses analisis. Tipe perkuatan yang digunakan pada sistem *cofferdam* diantaranya *sheet pile*, cerucuk, dan Gabion. Hasil analisis menunjukkan bahwa dengan kombinasi perkuatan tersebut faktor keamanan yang dihasilkan masuk dalam kategori stabil dan memenuhi syarat aman yang diijinkan. Kemudian gaya dalam yang terjadi pada *sheet pile* masih lebih kecil dari kapasitas strukturalnya.

Kata kunci: *cofferdam*; metode elemen hingga; perkuatan; stabilitas

1. PENDAHULUAN

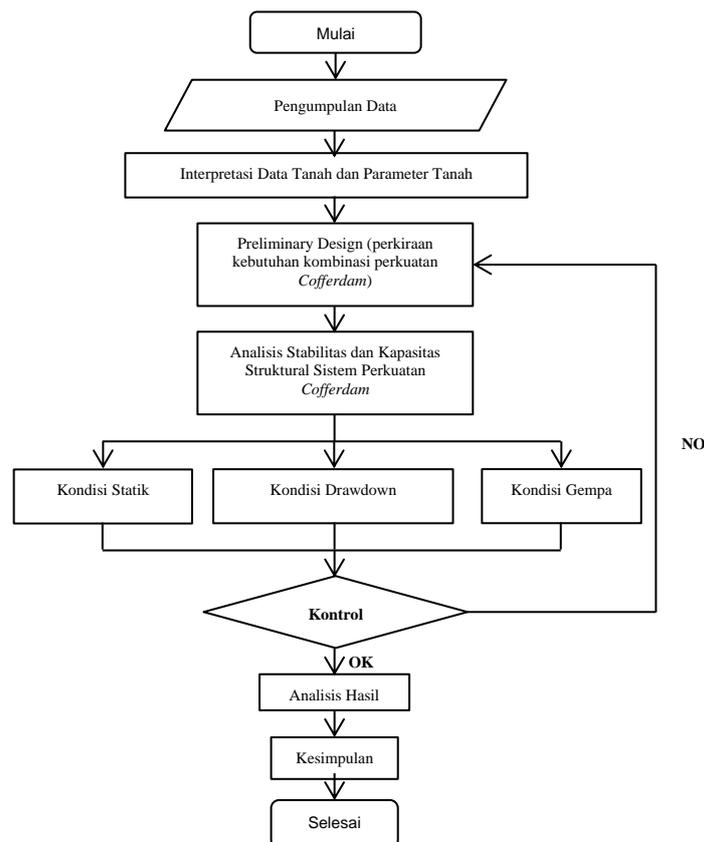
Wilayah Indonesia yang memiliki kondisi geografis beragam merupakan salah satu alasan jembatan menjadi infrastruktur yang sangat dibutuhkan. Dimana struktur jembatan ini nantinya akan terkoneksi dengan abutment, pilar, dan fondasi yang akan menyalurkan beban ke tanah dasar. Dalam proses pembangunannya seringkali digunakan alat berat untuk mempermudah dan mempercepat waktu konstruksi. Alat berat ini biasanya ditempatkan di area permukaan diatas lereng abutment atau lereng pilar jembatan. Pada lokasi jembatan yang sebagiannya adalah tanah timbunan dibutuhkan suatu sistem perkuatan untuk menjaga area tanah di sekitarnya tetap stabil.

Masalah stabilitas merupakan salah satu aspek utama yang harus diperhitungkan dalam merencanakan lereng timbunan tanah di sekitar jembatan. Apabila kondisi stabilitas lereng tidak diperhitungkan risiko terjadi kegagalan kedepan akan semakin besar. Masalah stabilitas pada lereng harus ditinjau pada kondisi statik dan kondisi gempa. Selain itu juga perlu diperhitungkan terhadap pasang surutnya air sungai berkaitan dengan penjeñuhan tanah di sekitar *cofferdam* yang dapat mengurangi stabilitas sistem perkuatan *cofferdam* serta memperbesar deformasi yang terjadi. (Luanga & J.Susilo, 2022) mengungkapkan berdasarkan hasil penelitiannya melalui simulasi numeris, kondisi penjeñuhan tanah dapat membuat deformasi pada dinding penahan tanah.

Dalam metode perhitungan stabilitas lereng umumnya ada dua metode yang sering digunakan yaitu *Limit Equilibrium Method* (LEM) dan *Finite Element Method* (FEM). LEM merupakan metode perhitungan stabilitas lereng yang membandingkan kondisi kesetimbangan gaya pendorong dan gaya penahan lereng (Fredlund & Krahn, 1977). Sedangkan FEM merupakan metode perhitungan dengan mereduksi kuat geser tanah hingga mengalami keruntuhan (Dawson et al., 1999). Perbedaan mendasar dari kedua metode ini adalah pada bidang keruntuhannya, pada metode LEM bidang keruntuhan yang didapat merupakan asumsi awal, sedangkan pada metode FEM bidang keruntuhan diperoleh secara otomatis dari hasil perhitungan pada bidang paling kritis (Matsui & San, 1992) (Duncan, 1996). (Liong & Herman, 2012) dalam penelitiannya membandingkan antara kedua metode tersebut dan menyimpulkan bahwa nilai faktor keamanan dan prediksi pola keruntuhan dari kedua metode tersebut memiliki kecenderungan yang sama.

Penelitian ini akan membahas mengenai kombinasi perkuatan yang digunakan dalam sistem *cofferdam* jembatan menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Melalui analisis yang dilakukan perilaku stabilitas dari lereng jembatan dapat diprediksi secara lebih baik sehingga dapat diketahui sistem perkuatan yang efektif dan memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI). Lebih lanjut reaksi gaya yang terjadi pada sistem perkuatan *cofferdam* dapat diprediksi dan dikontrol terhadap kapasitas struktural yang diijinkan.

2. METODE PENELITIAN



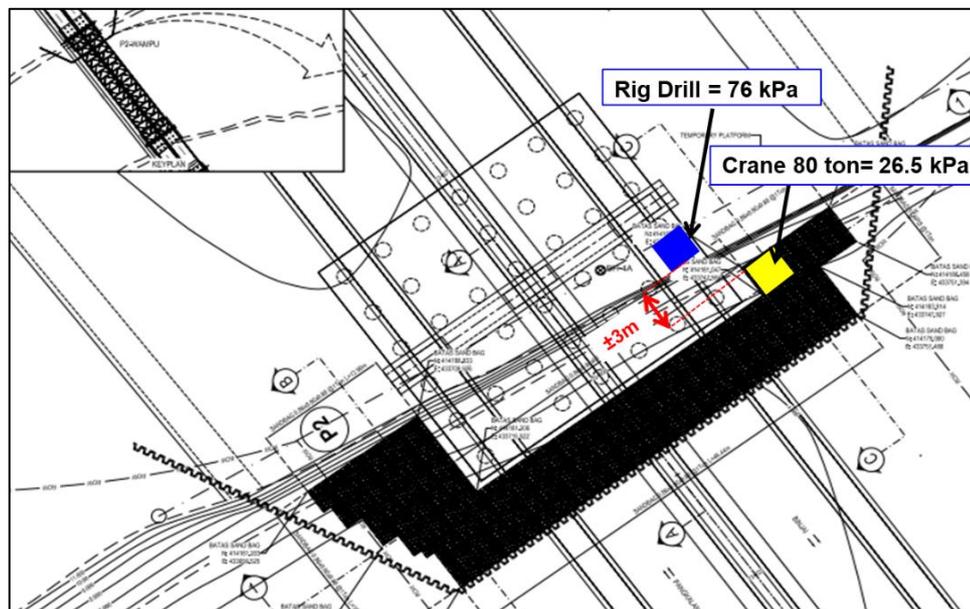
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Gambar 1 menunjukkan alur dan metode penelitian yang dilakukan. Metode penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Pengumpulan data : merupakan tahap awal penelitian yang dilakukan untuk mengumpulkan data dan referensi. Data-data yang dikumpulkan diantaranya data tanah, gambar rencana, pembebanan.
2. Interpretasi Data : Data-data yang telah dikumpulkan diinterpretasi menjadi geometri yang akan dimodelkan dalam analisis.
3. *Preliminary Design* : merupakan perkiraan awal kebutuhan yang akan dimodelkan dalam analisis.
4. Analisis Stabilitas : model kemudian dianalisis dengan beberapa kondisi dan dikontrol terhadap syarat yang diijinkan dalam SNI.

Studi kasus

Lokasi penelitian yaitu di Jembatan Wampu Provinsi Sumatera Utara. *Cofferdam* dimaksudkan untuk penahan timbunan dan pelindung dari gerusan air sungai serta sebagai pijakan alat berat bekerja. Timbunan dibelakang *cofferdam* dimaksudkan untuk melindungi sebagian fondasi yang berada di lereng sungai. Gambar 2 menunjukkan sketsa tampak atas *cofferdam* jembatan dan posisi penempatan alat berat. Dalam pekerjaan fondasi digunakan *Rig Drill* dengan beban merata 76 kPa dan *Crane* 80 ton dengan beban merata 26.5 kPa.



Gambar 2. Cofferdam Jembatan Wampu

Faktor keamanan stabilitas

Faktor keamanan stabilitas merupakan batasan aman yang diijinkan dalam merencanakan lereng perkuatan. Berdasarkan SNI 8460:2017 faktor keamanan stabilitas untuk kondisi statik harus memenuhi minimal 1,5 dan untuk kondisi gempa harus memenuhi minimal 1,1.

Kondisi tanah dasar dan kegempaan area penelitian

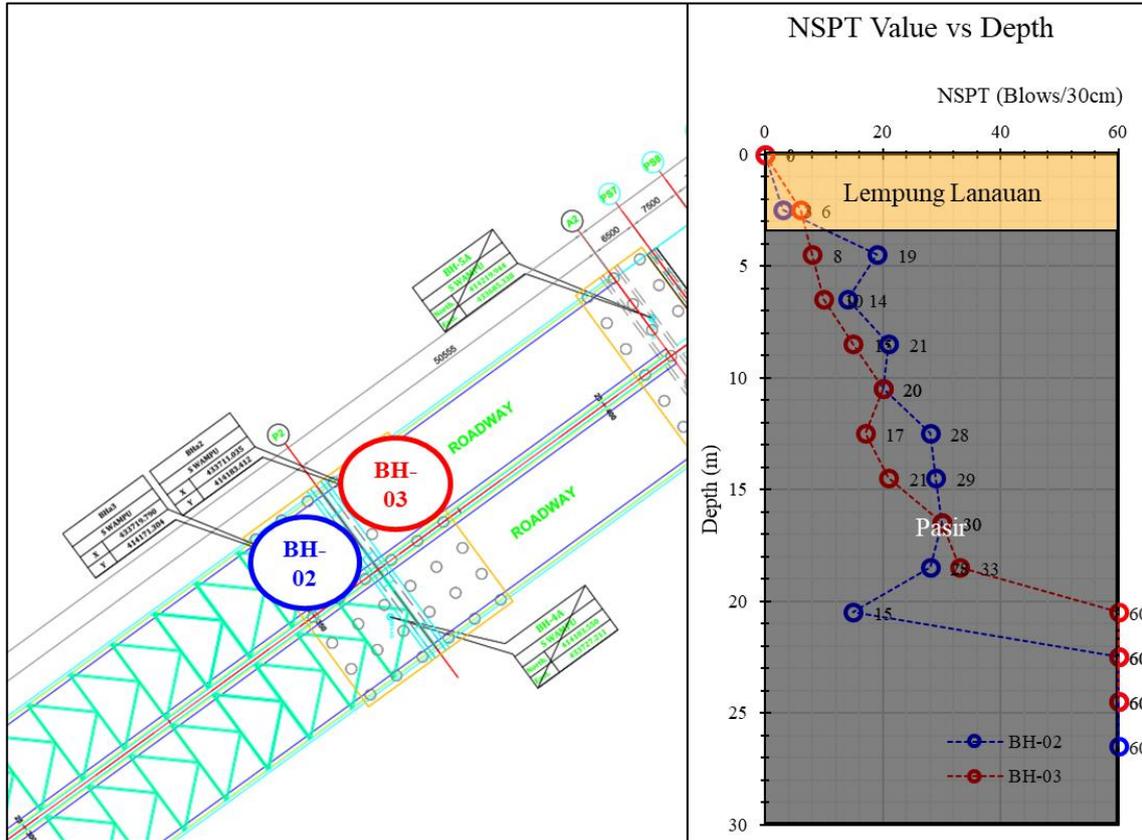
Dilokasi rencana *cofferdam* dilakukan 2 titik penyelidikan tanah berupa bor dalam dan uji SPT (BH-02 dan BH-03). Posisi titik penyelidikan tanah dan grafik hasil uji SPT ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil penyelidikan tanah menunjukkan tanah permukaan (0-3,5 m) merupakan jenis tanah Lempung Lanauan dengan konsistensi lunak hingga sedang. Kemudian pada kedalaman 3,5 m hingga akhir pemboran merupakan jenis tanah pasir, dimana pada kedalaman 3,5 – 20 m merupakan pasir dengan densitas lepas hingga padat dan kedalaman 20 – 27 m merupakan pasir dengan densitas sangat padat. Tanah keras dari hasil pemboran berada pada kedalaman 20 m dengan nilai pembacaan SPT >60.

Sesuai ketentuan yang tercantum dalam SNI 8460:2017 pada konstruksi timbunan perlu dilakukan pengecekan terhadap kondisi gempa dengan menggunakan percepatan batuan dasar berdasarkan peta gempa periode 500 tahun (10% dalam periode ulang 50 tahun) (BSNI, 2017). Berdasarkan peta sebaran gempa yang ditunjukkan pada Gambar 4 diketahui nilai percepatan gempa di batuan dasar (PGA) lokasi penelitian sebesar 0,15 – 0,2 g. Kemudian nilai amplifikasi ditentukan berdasarkan klasifikasi situs terhadap nilai \bar{N} (BSNI, 2019). Dilokasi ini klasifikasi situs masuk dalam kategori SD (Tanah Sedang). Sehingga nilai f_{PGA} adalah sebesar 1,4 – 1,5. Dengan demikian nilai percepatan di permukaan (PSA) dapat dicari dengan persamaan 1:

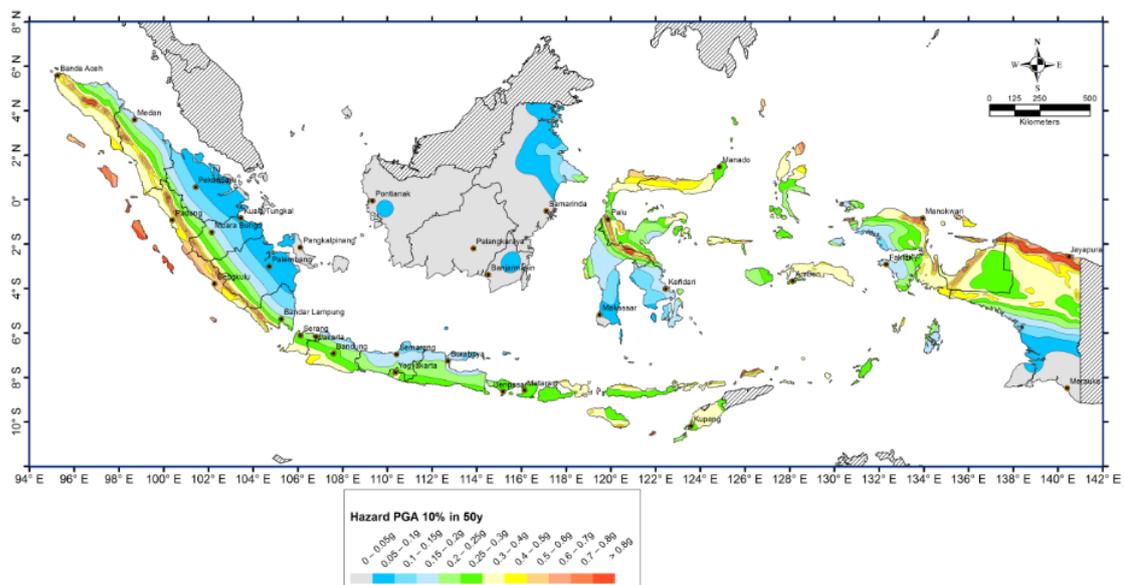
$$PSA = PGA \times fPGA \quad (1)$$

dengan PGA = percepatan di batuan dasar (g), $fPGA$ = faktor amplifikasi, dan PSA = percepatan di permukaan (g).

Berdasarkan persamaan di atas nilai PSA diperoleh sebesar 0,21 – 0,3 dan dalam pemodelan digunakan nilai PSA maksimum sebesar 0,3.



Gambar 3. Titik Penyelidikan Tanah dan Hasil Pengujian



Gambar 4. Peta PGA 10% dalam 50 tahun(Pusat Studi Gempa Nasional, 2017)

Model elemen hingga

Analisis dilakukan dengan program bantu Plaxis 2D. tipe model dua dimensi yang digunakan adalah *plane strain* dimana kondisi tegangan-regangan disimulasikan hanya pada sumbu x dan y (Yulianti et al., 2023). Geometri pemodelan seperti yang ditampilkan pada Gambar 5. *Cofferdam* menggunakan kombinasi perkuatan berupa *Sheet Pile* Beton tipe CPC-W-600-B dengan panjang 12 dan kapasitas *moment crack* 596 kN, Cerucuk baja profil IWF 150x100 dengan panjang 4m dan spasi pemasangan 50 cm, Gabion dengan dimensi 100 x 50 cm dengan tinggi total 4,5 m dan lebar *base* 7 m, serta *geotextile woven* T200 yang dipasang pada tanah timbunan per 2m.

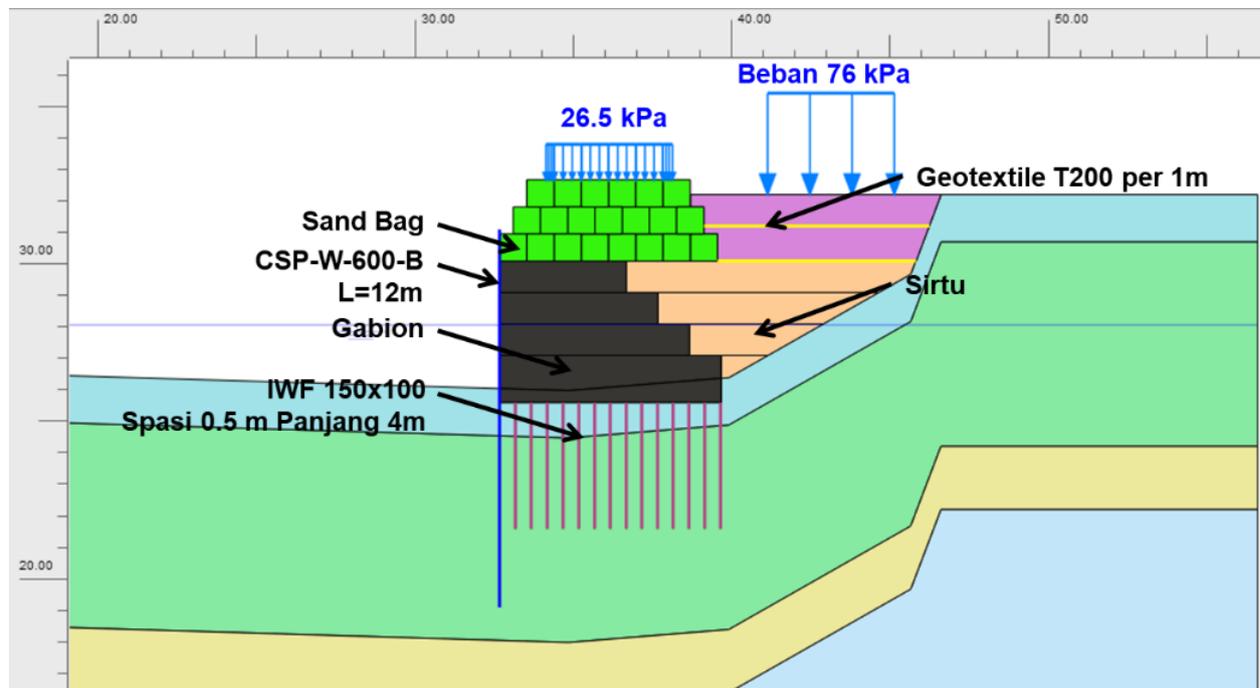
Model konstitutif tanah dasar yang digunakan dalam analisis adalah *Hardening Soil*, dimana dalam model konstitutif ini tanah memiliki nilai kekakuan yang berbeda untuk kondisi *loading* dan *unloading*. Tipe mesh yang digunakan dalam model adalah *fine* dengan 15 node pada tiap elemennya.

Umumnya dalam metode elemen hingga ada dua cara untuk analisis stabilitas lereng. Pertama dengan cara meningkatkan beban dan kedua dengan mereduksi kekuatan tanah dasar (Halder et al., 2016). Cara yang kedua merupakan metode yang digunakan dalam program PLAXIS. Faktor keamanan dalam program PLAXIS dihitung dengan cara (Brinkgreve et al., 2019):

$$\Sigma Msf = \frac{c}{c_r} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_r} \quad (2)$$

dengan ΣMsf = faktor keamanan, c = kohesi (kN/m^2), c_r = kohesi reduksi (kN/m^2), ϕ = sudut geser ($^\circ$), dan ϕ_r = sudut geser reduksi ($^\circ$).

Gambar 5 merupakan geometri model yang digunakan dalam analisis. Tahapan konstruksi yang dilakukan yaitu pemasangan cerucuk IWF 150x100, pemasangan gabion dan timbunan sirtu hingga diatas MAT (sebagai platform kerja), pemasangan Sheet Pile CSP-W-600-B, pemasangan sand bag dan penimbunan tanah dibelakangnya dengan *geotextile woven*, pengaplikasian beban alat berat berupa *rig drill* dan *crane* dengan bebann merata sebesar 76 kPa dan 26,5 kPa, serta analisis kondisi *drawdown* dan gempa pseudostatik. Kondisi *drawdown* yang dimaksud dalam analisis adalah kondisi dimana tanah dibelakang *cofferdam* terjadi penurunan akibat muka air sungai naik hingga elevasi banjir.



Gambar 5. Geometri Model

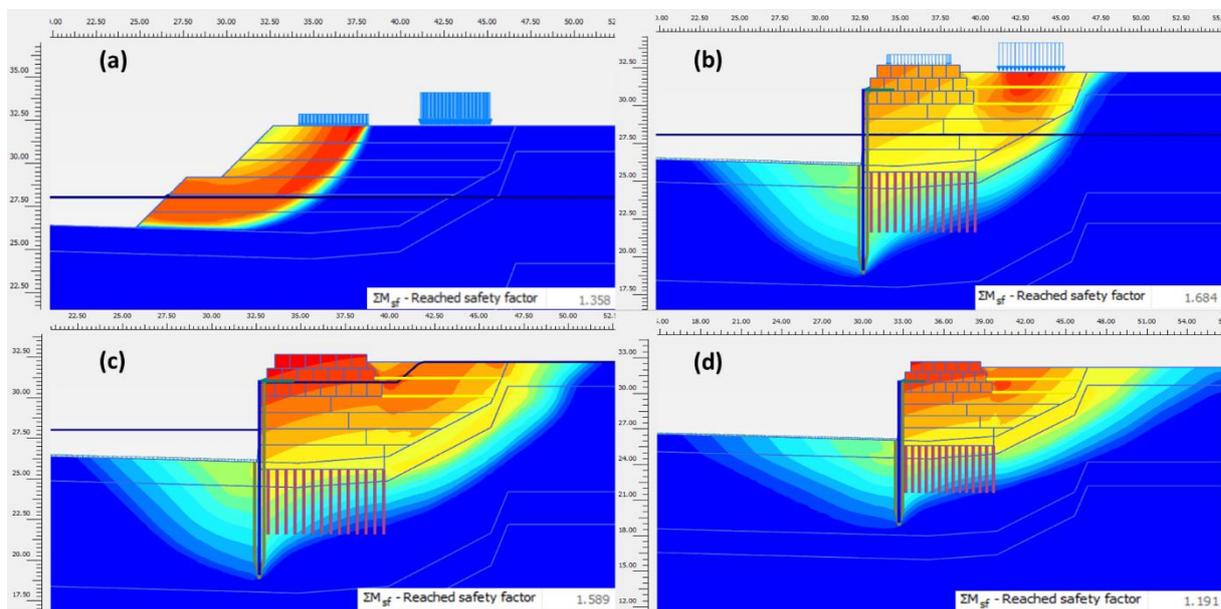
Tabel 1. merupakan parameter tanah input yang digunakan dalam proses analisis. Parameter tanah ini ditentukan berdasarkan korelasi nilai N_{SPT} sesuai lapisan tanah yang telah ditentukan dari hasil pemoran.

Tabel 1. Parameter Tanah Input

Jenis Tanah	Model Konstitutif	Kedalaman (m)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E_{oed}^{ref} (kPa)	E_{50}^{ref} (kPa)	E_{ur}^{ref} (kPa)	m	γ (kN/m ³)
Lempung Lanauan	Hardening Soil	0 - 3,5	5	25	4320	4320	12960	1	16
Pasir	Hardening Soil	3,5 - 7	-	32	20427	20427	61280	0,5	17
Pasir	Hardening Soil	7 - 22	-	34	22980	22980	68940	0,5	17
Pasir	Hardening Soil	22 - 27	-	43	51067	51067	153200	0,5	18

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bidang keruntuhan dan faktor keamanan stabilitas *Cofferdam*



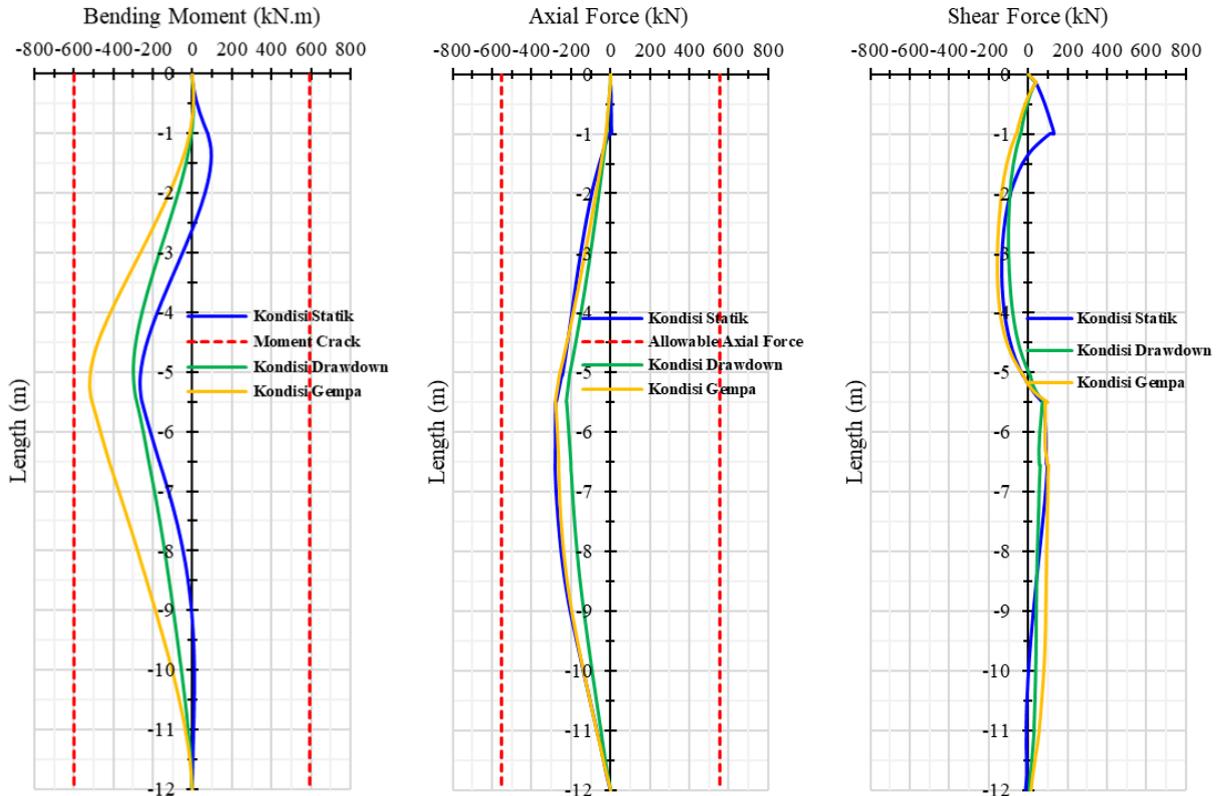
Gambar 6. Bidang Keruntuhan dan Faktor Keamanan: (a) Tanpa Perkuatan (b) Perkuatan Kondisi Statik (c) Perkuatan Kondisi *Drawdown* dan (d) Perkuatan Kondisi Gempa Pseudostatik

Gambar 6 memperlihatkan bidang keruntuhan dan faktor keamanan dengan dan tanpa perkuatan *cofferdam*. Faktor keamanan timbunan *cofferdam* tanpa perkuatan sebesar 1,36 masih belum memenuhi kriteria desain sebesar 1,5. Bidang keruntuhan yang terbentuk berdasarkan hasil analisis memotong sistem perkuatan *Cofferdam*. Pada kondisi statik dan *drawdown* bidang keruntuhan cenderung lebih pendek dibanding pada kondisi gempa, hal ini dikarenakan pada kondisi statik dan *drawdown* beban yang terjadi pada lereng hanya disebabkan oleh timbunan, beban alat berat, serta beban akibat air. Sedangkan pada kondisi gempa beban pseudostatik teraplikasi pada seluruh geometri yang dimodelkan. Faktor keamanan yang diperoleh dengan kombinasi perkuatan untuk tiap kondisi yaitu 1,68 (kondisi statik), 1,59 (kondisi *drawdown*), dan 1,19 (kondisi gempa). Faktor keamanan yang diperoleh tersebut secara umum dapat dikategorikan aman dan memenuhi syarat keamanan minimum yaitu 1,5 untuk kondisi statik dan 1,1 untuk kondisi gempa.

Gaya dalam *sheet pile*

Gambar 7 menunjukkan besaran gaya dalam yang terjadi sepanjang kedalaman perkuatan. Jika meninjau gaya dalam yang terjadi pada sheet pile, gaya maksimum yang terjadi adalah pada kondisi. Hal tersebut sesuai dengan faktor keamanan yang dihasilkan berdasarkan hasil analisis dimana faktor keamanan terkecil diperoleh pada kondisi gempa pseudostatik. Posisi akumulasi gaya dalam terbesar pada sheet pile berada pada elevasi tanah dasar yaitu -5m (pada gambar 7). Pada posisi ini adalah batasan awal tahanan pasif oleh tanah dasar, sehingga akumulasi beban maksimum berada pada elevasi tersebut. Besaran gaya yang terjadi pada sheet pile yaitu 519 kN.m (*bending moment*), 282 kN

(axial force), dan 155 kN (shear force). Gaya dalam yang terjadi pada *sheet pile* masih lebih kecil dari batasan ijin strukturalnya. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa *sheet pile* yang digunakan masih dalam kategori aman.



Gambar 7. Gaya Dalam pada Sheet Pile

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dengan model elemen hingga dapat disimpulkan bahwa kombinasi perkuatan pada *cofferdam* dapat menyelesaikan permasalahan stabilitas. Faktor keamanan pada kondisi statik dan drawdown > 1,5 dan pada kondisi gempa > 1,1. Selain itu gaya dalam yang terjadi pada *sheet pile* masih dibawah kapasitas ijin strukturalnya. Kombinasi perkuatan juga terbukti efektif dalam menangani masalah stabilitas. Hal ini terlihat dari faktor keamanan yang dihasilkan dekat dengan batasan ijin yang disyaratkan serta selisih moment yang terjadi cukup kecil jika dibandingkan terhadap kapasitas ijin dari *sheet pile* itu sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

- Brinkgreve, R. B. J., Zampich, L. M., & Manoj, N. R. (2019). *Plaxis users manual*. Plaxis bv.
- Indonesia, S. N. (2017). Persyaratan perancangan geoteknik. *SNI, 8460*, 2017.
- Nasional, B. S. (2012). Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. *Sni, 1726*, 2012.
- Dawson, E. M., Roth, W. H., & Drescher, A. (1999). Slope stability analysis by strength reduction. *Geotechnique, 49*(6), 835-840.
- Duncan, J. M. (1996). State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. *Journal of Geotechnical Engineering, 122*(7), 577–596. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1996\)122:7\(577\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:7(577))
- Fredlund, D. G., & Krahn, J. (1977). Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian Geotechnical Journal, 14*(3), 429–439. <https://doi.org/10.1139/t77-045>
- Halder, S., Imam, M. O., & Basir, M. S. (2016, December). A detailed analysis of slope stability using finite element method (FEM). In *3rd International conference on advances in civil engineering* (pp. 21-23).
- Liong, G. T., & Herman, D. J. G. (2012). Analisa Stabilitas Lereng Limit Equilibrium vs Finite Element Method. In *HATTI Annual Scientific Meeting XVI*.
- Luanga, F., & Susilo, A. J. (2022). Analisis perbandingan desain inclined retaining wall pada kondisi tanah jenuh dan tanah tidak jenuh. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil, 5*(4), 781–790.

- Matsui, T., & San, K. C. (1992). Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique. *Soils and foundations*, 32(1), 59-70.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa indonesia tahun 2017*.
- Yulianti, S., Riza, M., & Pratiwi, V. (2023). Studi perbandingan analisis FEM 2D dan 3D pada stabilitas *sheet pile long storage* Kota Jakarta. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 6(2), 485-494. <https://doi.org/10.24912/jmts.v6i2.22574>