



ANALISIS PERBAIKAN STABILITAS TIANG PANCANG SPSP DI TANJUNG PRIOK DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

FATCHUR RAHMAN^{1*}, FUAD ARDIAN NURUDIN², VIA AZIZUL SAPUTRI
KHALIFAH³, ANASYA ARSITA LAKSMI⁴

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Kabupaten Bogor

²Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Kabupaten Bogor

³Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Kabupaten Bogor

⁴Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Kabupaten Bogor

*Corresponding Author: adikfatur1@gmail.com

Naskah diterima: 24 November 2025. Disetujui: 19 Mei 2026. Diterbitkan: 31 Juli 2026

ABSTRAK

Pelabuhan Tanjung Priok, pelabuhan tersibuk di Indonesia, menghadapi tantangan operasional berupa lamanya waktu tinggal (*dwelling time*) serta permasalahan stabilitas struktur pada dermaga Ex-JICT 2. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan mengevaluasi stabilitas struktur dinding dermaga melalui penerapan teknologi *Steel Pipe Sheet pile* (SPSP). Tujuan utama penelitian ini adalah menilai kinerja struktur dan menentukan kedalaman optimal SPSP untuk memenuhi persyaratan keamanan dan operasional. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode *Finite Element Method* (FEM) yang disimulasikan menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D. Metodologi meliputi analisis data tanah, perhitungan kapasitas beban ultimit, serta simulasi berbagai tahapan konstruksi seperti pemasangan SPSP, pengurugan pasir, dan pengerukan (*dredging*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedalaman SPSP 40 meter memenuhi persyaratan beban rencana dengan *safety factor* melebihi standar 1,5. *Displacement* maksimum terjadi pada tahap *Deck on pile* sebesar 0,5181 meter, sementara pada tahap operasional akhir diperoleh *safety factor* sebesar 3,80. Temuan ini membuktikan bahwa teknologi SPSP efektif dalam meningkatkan stabilitas dinding dermaga.

Kata kunci : Plaxis 2D, Pelabuhan Tanjung Priok, SPSP, Faktor Keamanan, Dermaga

1. PENDAHULUAN

Pelabuhan Tanjung Priok merupakan pelabuhan yang menangani lebih dari 30% komoditas nonmigas di Indonesia, dan 50% arus barang impor maupun ekspor melewati pelabuhan ini (Romadhon, 2018). Sebagai pelabuhan tersibuk, kualitas pelayanan Pelabuhan Tanjung Priok masih tergolong rendah dengan *dwelling time* yang berkisar antara 4–7 hari (Gunawan S & Yahya, 2018). Dari kondisi tersebut, pengembangan pelabuhan menjadi sangat penting untuk mengatasi permasalahan ini.

Pelabuhan Tanjung Priok saat ini memiliki Rencana Induk Pelabuhan (RIP) sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Perhubungan Nomor KM 11 Tahun 2024 tentang Rencana Induk Pelabuhan Terpadu Tanjung Priok dan Marunda, yang berkaitan dengan pedoman pembangunan, pengoperasian, dan pengembangan pelabuhan. Tujuan RIP ini adalah untuk menata lahan eksisting Pelabuhan Tanjung Priok serta memperbarui data operasional setiap pelabuhan atau terminal. Kegiatan operasional utama Pelabuhan Tanjung Priok terbagi menjadi 9 wilayah, yaitu wilayah Kalijapat, wilayah Nusantara, wilayah Birai 1, wilayah Birai 2, wilayah Birai 3, wilayah Terminal Peti Kemas, wilayah Kalibaru Eksisting, wilayah Kalibaru New Priok, dan wilayah Lini 2 (Kementrian Perhubungan Direktorat Jendral Perhubungan Laut, 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk merancang penguatan struktur dermaga dan Container Yard (CY) di wilayah Birai 2 dengan menerapkan konsep Quay Wall bermaterial Steel Pipe Sheet Pile (SPSP) guna meningkatkan stabilitas dan kapasitas layanan operasional. Fokus pengembangan pada wilayah Birai 2 ini mencakup pekerjaan peningkatan elevasi dermaga melalui Proyek Ex-JICT 2 Infrastructure Improvement Design and Build. Analisis teknis dilakukan dengan menggunakan metode FEM untuk memastikan keamanan struktur dermaga.

Dermaga merupakan bangunan pelabuhan yang digunakan untuk tambat kapal yang melakukan kegiatan bongkar muat barang serta naik-turun penumpang (Triadmodjo, 2010). Berdasarkan jenis konstruksinya, dermaga dibedakan menjadi tiga, yaitu *Deck on pile*, *sheet pile*, dan *kaison*. Berikut penjelasan masing-masing jenis konstruksi (Springer, 2020):

1) Struktur *Deck on Pile*

Menggunakan tiang pancang sebagai pondasi lantai dermaga. Lantai dermaga umumnya menggunakan beton, baik beton pracetak maupun beton bertulang. Setelah terpasang, dapat dipasang perlengkapan pelabuhan seperti fender, bollard, dan crane.

2) *Sheet pile*

Konsep *quay wall* secara langsung merujuk pada *sheet pile*. Pada *quay wall* yang dirancang untuk *Deck on pile* perlu diperhatikan beban yang diteruskan secara vertikal maupun horisontal ke tanah. *Sheet pile steel pipe* banyak digunakan di pelabuhan karena kemudahan pemasangannya.

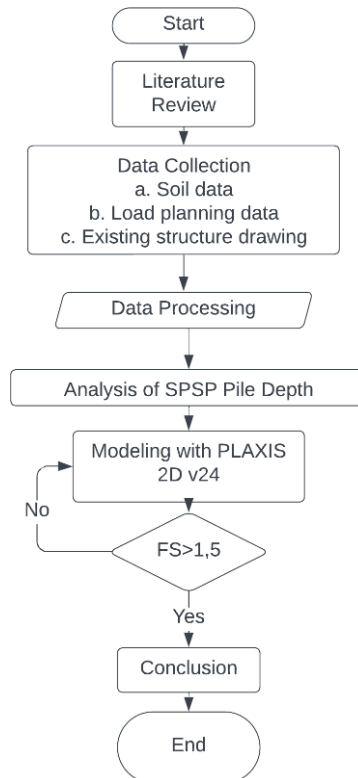
3) *Kaison*

Struktur *kaison* dibuat dengan mengandalkan beratnya sendiri sebagai pondasi untuk menahan beban dari struktur atas. Struktur ini banyak diaplikasikan pada kondisi tanah yang kurang baik.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Prosedur Penelitian

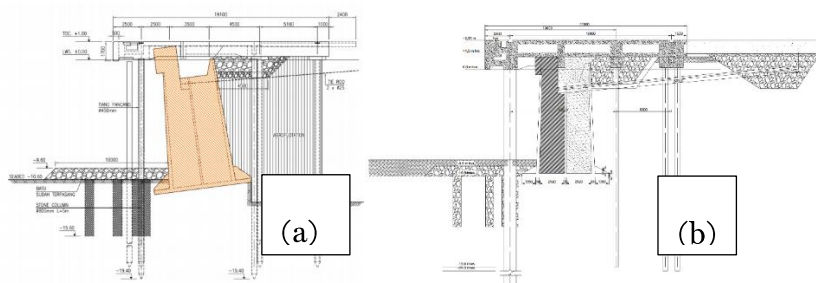
Penelitian ini memiliki dua proses perhitungan, yaitu perhitungan kedalaman *Steel Pipe Sheet Pile* (SPSP) dan perhitungan digitalisasi menggunakan Plaxis 2D yang ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan SNI 8460:2017 (Badan Standardisasi Nasional, 2017), nilai *safety factor* untuk analisis stabilitas global jangka panjang adalah sebesar 1,5.



Gambar 1. Prosedur Penelitian

2.2. Pengumpulan Data

Terminal Ex-JICT 2 terletak di Jl. Pasoso, Pelabuhan Tanjung Priok, Jakarta, Indonesia. Dimensi eksisting dermaga adalah ffl517,5 x ffl20,8 m. Dermaga ini telah mengalami perbaikan akibat indikasi kemiringan kaisan, sehingga ditambahkan struktur berupa *spun pile* pada *faceline* dermaga dan *tie rod* pada kaisan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2(a). Rencana peningkatan yang dilakukan adalah menaikkan elevasi dari +1,60 mLWS menjadi +2,85 mLWS. Selain itu, rencana jenis struktur dermaga yang digunakan adalah sistem *quay wall* dengan material SPSP sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2(b).

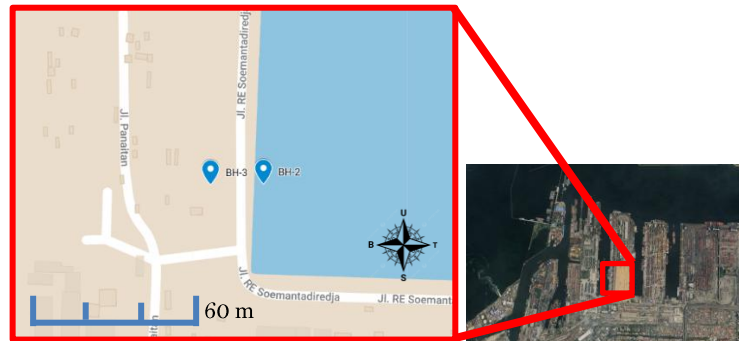


Gambar 2. Dermaga Eksisting (a) dan Dermaga Rencana (b)

Survei hidroceanografi dilakukan pada tahun 2023 oleh konsultan perencana untuk memetakan kontur dasar kolam dermaga. Kedalaman perairan di sekitar dermaga Ex-JICT

2 adalah 9,6 mLWS. Sementara itu, kolam direncanakan untuk dikeruk hingga kedalaman 12 mLWS pada saat operasional (Kementrian Perhubungan Direktorat Jendral Perhubungan Laut, 2024).

Data tanah diperoleh dari investigasi tanah oleh subkontraktor menggunakan metode bor (*borehole*) di dua lokasi, yaitu di darat (BH-3) dan di laut (BH-2). Dalam penelitian ini digunakan data hasil investigasi tanah dari BH-2 ($6,105757^{\circ}\text{LS}$ dan $106,886713^{\circ}\text{BT}$) dan BH-3 ($6,105776^{\circ}\text{LS}$ dan $106,886541^{\circ}\text{BT}$) yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Stratifikasi tanah beserta parameter tanah ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 3. Lokasi Investigasi Tanah, Terminal EX-JICT 2

Dari kedua titik *borehole*, ditemukan lapisan tanah dengan karakteristik yang berbeda pada setiap kedalaman. Dengan pendekatan geoteknik, tanah di antara kedua *borehole* tersebut dibagi menjadi tiga lapisan, yaitu lanau (*silt*), batu pasir (*sandstone*), dan lempung (*clay*) dengan stratifikasi tanah seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

Tabel 1. Tipe Tanah di BH-2 and BH-3

BH-2			BH-3		
Kedalaman (m)	Tipe Tanah	N-SPT	Kedalaman (m)	Tipe Tanah	N-SPT
0-1	GP	0	0-0.7	GP	0
1-2.45	CL	17	0.7-4	ML	31
2.45-6.45	SC	45	4-9	ML	75
6.45-10.45	MH	45	9-15	ML	18
10.45-16.45	MH	62	15-16.5	SM	30
16.45-20.45	SC	58	16.5-22	MH	66
20.45-22.45	SC	56	22-22.55	MH	45
22.45-28.45	CL/CH	44	22.55-24.25	ML	48
28.45-32.45	CL/CH	47	24.25-25.2	MH	66
32.45-36.45	SC	64	25.2-29.55	SM	45
36.45-38	CL/CH	56	29.55-40	CL	46
38-45	CL/CH	45	40-59.55	CL	44
45-67	CL/CH	64	59.55-68	CL	42
			68-75.55	CL	57
			75.55-78	CL	45
			78-80	CL	45

2.3. Kriteria Desain dan Pemodelan Struktur

Kapasitas dukung tanah perlu diperhitungkan untuk merencanakan kedalaman pondasi struktur dermaga. Rumus perhitungan kapasitas dukung pondasi dalam menurut Meyerhof dapat dilakukan dengan beberapa metode sebagai berikut (Bowles, 1996):

1) Tahanan ujung ultimit

$$Q_b = A_b [\sigma' N_q^*] \leq A_b (50 N_q^*) \tan \phi \quad (\text{Pasir}) \quad (1)$$

$$Q_b = A_b [c N_c^* + \sigma' N_q^*] \quad (\text{Tanah Lempung}) \quad (2)$$

2) Tahanan gesek ultimit

$$Q_s = p(\Delta L) K \sigma_v' \tan \delta \quad (\text{Pasir}) \quad (3)$$

$$Q_s = p(\Delta L) (\alpha c_u) \quad (\text{Tanah Lempung}) \quad (4)$$

3) Tahanan load ultimit

$$Q_{all} = Q_b/3 + \sum Q_s / 1.5 \quad (5)$$

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa kombinasi beban seperti beban hidup (*live load*), beban mati (*dead load*), dan beban gempa (*seismic load*) untuk menghitung kedalaman optimal pondasi dalam dari kapasitas dukung yang dibutuhkan. Adapun kombinasi pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut (ASCE, 2021):

1) Metode tegangan ultimit (LRFD)

$$Q_u = 1,2D + Ev + Eh + L \quad (6)$$

$$Q_u = 0,9D - Ev + Eh \quad (7)$$

2) Metode tegangan ijin (ASD)

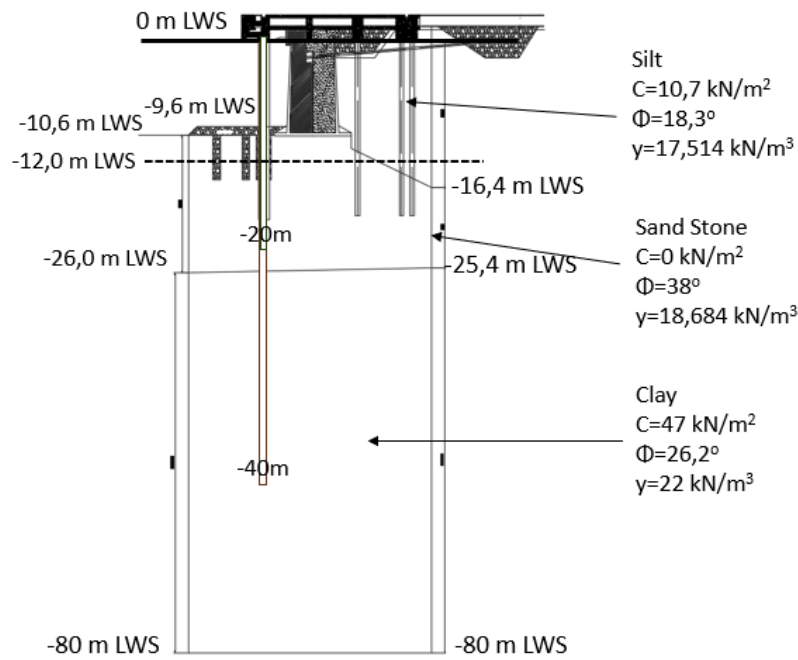
$$Q_u = 1,0D + 0,7Ev + 0,7Eh \quad (8)$$

$$Q_u = 1,0D + 0,525Ev + 0,525Eh + 0,75L \quad (9)$$

$$0,6D - 0,7Ev + 0,7Eh \quad (10)$$

Analisis stabilitas pondasi dapat diperiksa menggunakan Plaxis 2D dengan kedalaman pondasi dalam yang dipilih. Sifat setiap komponen dapat dimodelkan sesuai dengan tipe model yang tersedia di Plaxis 2D, seperti *Linear Elastic model*, *Hardening Soil model*, dan *Modified Cam Clay*. Beberapa fitur yang terdapat pada Plaxis 2D meliputi parameter material, struktur, meshing, kondisi aliran (*flow conditions*), serta tahapan konstruksi (*construction stages*) (Bentley, 2023a).

Berdasarkan dua lokasi investigasi tanah pada Gambar 3, ditemukan lapisan tanah dengan karakteristik yang berbeda pada setiap kedalaman. Dengan pendekatan geoteknik, tanah di antara kedua borehole tersebut dibagi menjadi tiga lapisan, yaitu lanau (*silt*), batu pasir (*sandstone*), dan lempung (*clay*) dengan stratifikasi tanah seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Stratifikasi Tanah

Beban yang terdapat di pelabuhan dapat berupa beban hidup (*live load*) dan beban mati (*dead load*). Beban mati berasal dari berat struktur itu sendiri, sedangkan beban hidup terdiri dari beban merata sebesar 4 ton/m² (Hasheminasab & Kashi, 2021), beban truk sebesar 500 kN (Badan Standardisasi Nasional, 2005), beban STS crane sebesar 40 ton/roda dengan bentang rel 16 m (Liebherr, 2020), beban sandar kapal (*berthing load*) (The British Standards Institution, 2014), dan beban tali tambat (*mooring load*) (Trelleborg, 2024). Dari hasil perhitungan beban, metode tegangan batas pada persamaan (6) menghasilkan nilai terbesar yaitu 3970,125 kN. Sementara itu, perhitungan kedalaman optimal tiang SPSP berdasarkan Tabel 2 menunjukkan bahwa kedalaman 40 m sudah mencukupi untuk menahan beban yang terjadi pada dermaga.

Tabel 2. Kapasitas Dukung Beban Ultimit SPSP

Kedalaman (m)	Q_b (kN)	Q_s (kN)	Q_{all} (kN)
20-25	2161.90	1189.23	1935.57
25-30	2789.30	1589.67	2554.10
30-35	4115.70	2345.60	3731.47
35-40	5576.35	3983.97	4514.76

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui *Finite Element Method* (FEM). Dengan metode kuantitatif, data numerik dapat dianalisis secara efektif. FEM menyediakan kerangka kerja untuk menyelesaikan persamaan diferensial kompleks terkait analisis dan desain struktur. Dalam penelitian ini, digunakan perangkat lunak PLAXIS 2D v24 untuk menilai nilai faktor keamanan struktur dermaga. PLAXIS 2D sangat cocok untuk analisis geoteknik karena dapat menampilkan deformasi akibat pembebanan menggunakan metode elemen hingga dua dimensi (Teguh et al., 2022). Parameter yang dimasukkan ke dalam perangkat lunak meliputi:

a. Properti Tanah

Data tanah yang diperoleh diolah dalam model PLAXIS 2D. Pada *Hardening Soil Model*, parameter input adalah nilai koefisien E_{50} , E_{oed} , dan E_{ur} dari hasil uji laboratorium

(Kempfert & Gebreselassie, 2006), sedangkan pada *Modified Cam-Clay Model* digunakan koefisien λ dan κ (Rocscience, 2015).

b. Sifat Struktur

Data struktur yang dimodelkan meliputi beton spun pile untuk kondisi awal dan spesifikasi SPSP untuk kondisi rencana (Nippon Steel Corp., 2020).

c. Kondisi Batas

Pada pemodelan ini, batas x_{min} dan x_{max} ditetapkan sebagai *normally fixed*, batas y_{min} *fully fixed*, sedangkan batas y_{max} *free* (Bentley, 2023b).

d. Beban

Beban yang diterapkan berupa beban statis baik pada tahap konstruksi maupun tahap operasional (OCDI, 2002).

e. Meshing

Kualitas mesh (*refinement*) berpengaruh signifikan terhadap akurasi simulasi dan waktu komputasi (Kahlström, 2013).

f. Proses Simulasi

Setelah geometri, kondisi batas, dan sifat material didefinisikan, digunakan pendekatan *staged construction* di PLAXIS 2D untuk mensimulasikan proses nyata seperti penerapan beban dan penguatan struktur. Untuk menentukan faktor keamanan pada pemodelan, digunakan metode pengurangan ϕ/c (ϕ/c reduction) (Sofistik, 2020).

$$\eta_{\phi} = \frac{\tan \phi_{inp}}{\tan \phi_{lim}} \quad (11)$$

$$\eta_c = \frac{c_{inp}}{c_{lim}} \quad (12)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Skema Model

Gambar 5 menunjukkan pemodelan dermaga menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D v24 dengan metode *stage construction*. Proses ini melibatkan serangkaian langkah yang diatur untuk mencerminkan kondisi nyata mulai dari tahap konstruksi hingga tahap operasional dermaga.

Tabel 3. Parameter Tanah Pada Plaxis 2D

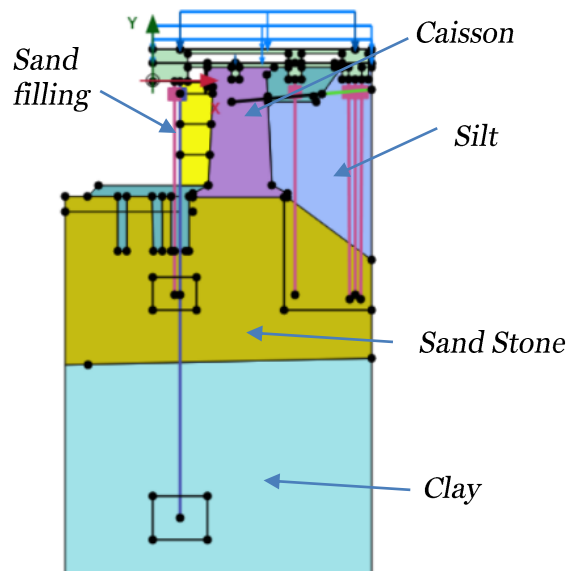
General			SCP	Sand Filling	Rock	Caisson
No	Parameter	Satuan				
1 Model Plaxis	-		HSM	MCC	HSM	LE
2 Tipe Drainase	-		Drained	Drained	Drained	Non-Porous
3 Unsaturated unit weight	γ_{unsat}	kN/m ³	-	-	-	5,12
4 Saturated unit weight	γ_{sat}	kN/m ³	20	18	22	-
Mechanical						
1 Secant stiffness in standard drained triaxial test	E_{50}^{ref}	kN/m ²	58.533 ^B	-	28.400 ^B	-
2 Tangent stiffness for primary oedometer loading	E_{oed}^{ref}	kN/m ²	58.533 ^B	-	28.400 ^B	-
3 Unloading / reloading stiffness	E_{ur}^{ref}	kN/m ²	175.600	-	85.200	2x10 ⁷
4 Poisson's ratio	ν_{ur}		0,3 ^A	0,3 ^A	0,3 ^A	0,2
5 Power for stress-level dependency of stiffness	m		1 ^A	1,42	0,5	-
6 Cohesion (constant)	c_{ref}'	kN/m ²	0,1	0,1	0,1	-
7 Friction Angle	ϕ'	°	36,5	-	40	-
8 Dilatancy Angle	ψ	°	6,5	-	10	-
9 Lambda	λ	-	-	0,035	-	-
10 Kappa	κ	-	-	0,00345	-	-
Groundwater						
4 Permeability in horizontal Direction	k_x	m/day	3,456 ^B	8,64 ^B	86,4 ^B	
5 Permeability in vertical Direction	k_y	m/day	3,456 ^B	8,64 ^B	86,4 ^B	

Tabel 3 menyajikan tabel parameter teknis untuk empat material berbeda, yaitu *SCP*, *Sand Filling*, *Rock*, dan *Caisson*, yang dibagi ke dalam kategori *General*, *Mechanical*, dan *Groundwater*.

Tabel 4. Parameter Beton Pada Plaxis 2D

General				Pelat	Pile cap
No	Parameter	Parameter	Satuan		
1	Model Plaxis	-		LE	LE
2	Tipe Drainase	-		Non-Porous	Non-Porous
3	Unsaturated unit weight	y_unsat	kN/m ³	-	-
4	Saturated unit weight	y_sat	kN/m ³	24	24
Mechanical					
1	Modulus young	E	kN/m ²	27.805.574,9	27.805.574,9
2	Poisson's ratio	v		0,2 ^A	0,2 ^A

Tabel 4 menetapkan parameter input untuk elemen struktur beton berupa Pelat dan Pile cap yang dimodelkan sebagai material *Linear Elastic* (LE) dengan sifat *Non-Porous*.



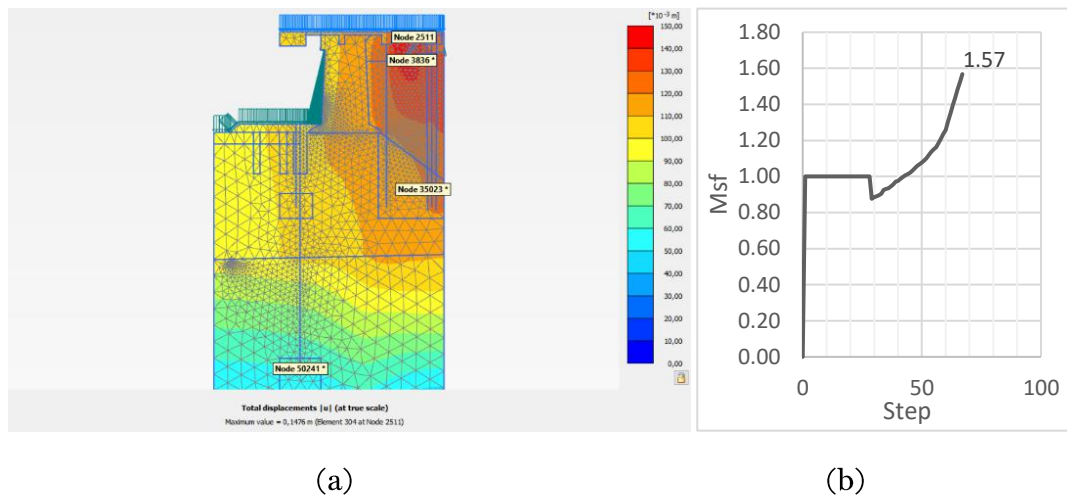
Gambar 5. Model Dermaga Ex-JICT 2 pada Plaxis 2D v24

Gambar 5 menampilkan model penampang melintang struktur dermaga eksisting di Dermaga Ex-JICT 2 yang dibedakan berdasarkan warnanya.

3.2. Hasil Simulasi

Hasil simulasi disajikan dalam beberapa tahap konstruksi, yang meliputi kondisi eksisting, kondisi pelepasan CSP, kondisi pemasangan SPSP, kondisi pengurugan pasir, kondisi *Deck on pile*, dan kondisi pengerukan (*dredging*).

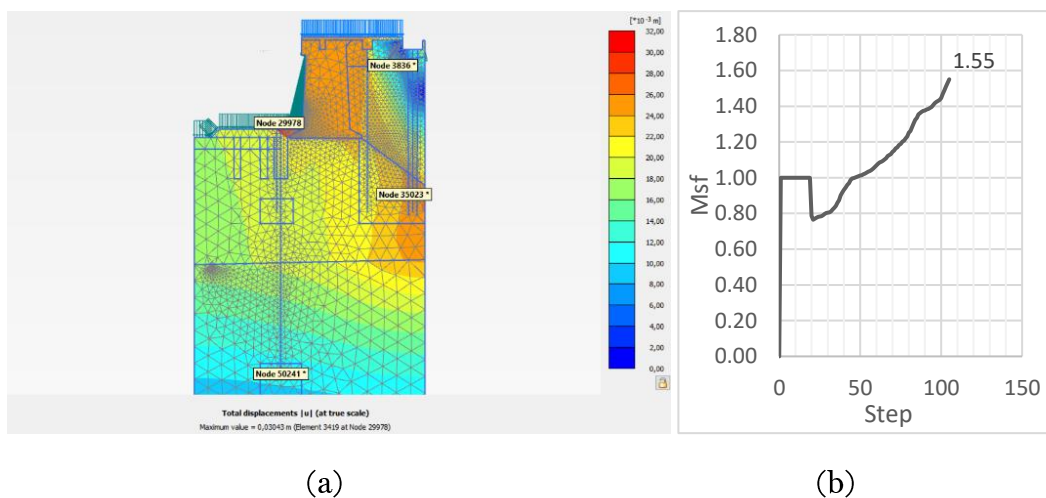
3.2.1 Kondisi Eksisting



Gambar 6. *Total Displacement* (a) dan *Factor of Safety* (b) pada Tahap Eksisting

Pada tahap Gambar 6, beban distribusi truk diinput hingga menghasilkan *Total Displacement* terbesar di belakang kaison sebesar 0,1476 m pada node 2511. Nilai *Factor of Safety* yang diperoleh dari hasil simulasi adalah 1,57. Sesuai dengan standar SNI, faktor keamanan minimum untuk daya dukung tanah, yaitu 1,5.

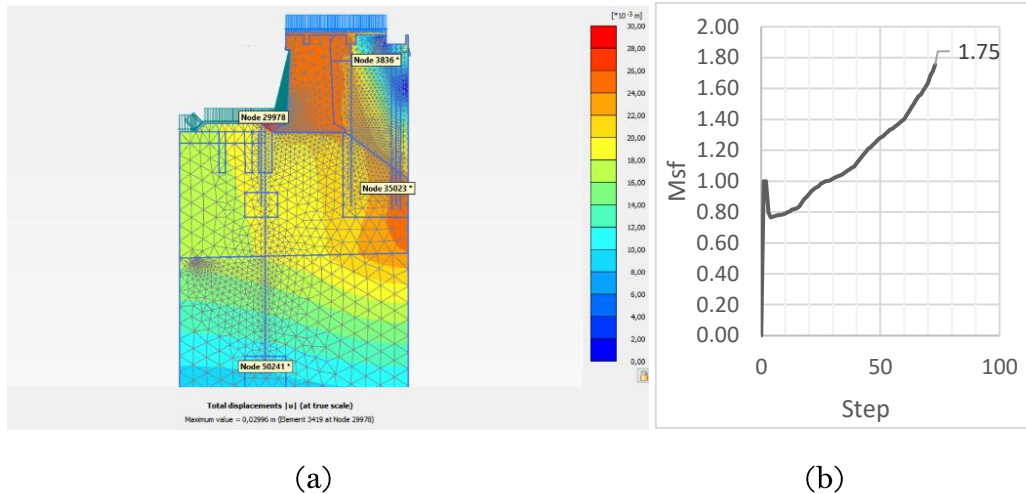
3.2.2 Tahap pelepasan CSP



Gambar 7. *Total Displacement* (a) dan *Factor of Safety* (b) pada Tahap Pelepasan CSP

Pelepasan CSP di sisi *faceline* dermaga dilakukan seperti pada Gambar 7. Beban yang diberikan adalah beban distribusi truk dan beban titik dari *heavy equipment crane* sebesar 88 kN untuk mengangkat CSP. *Total Displacement* terbesar sebesar 0,03043 m terjadi pada node 29978 dengan *Factor of Safety* 1,55. Dibanding tahap sebelumnya, terjadi penurunan *Factor of Safety* karena pondasi penahan *faceline* telah dilepas. Sesuai dengan standar SNI, faktor keamanan minimum untuk daya dukung tanah, yaitu 1,5.

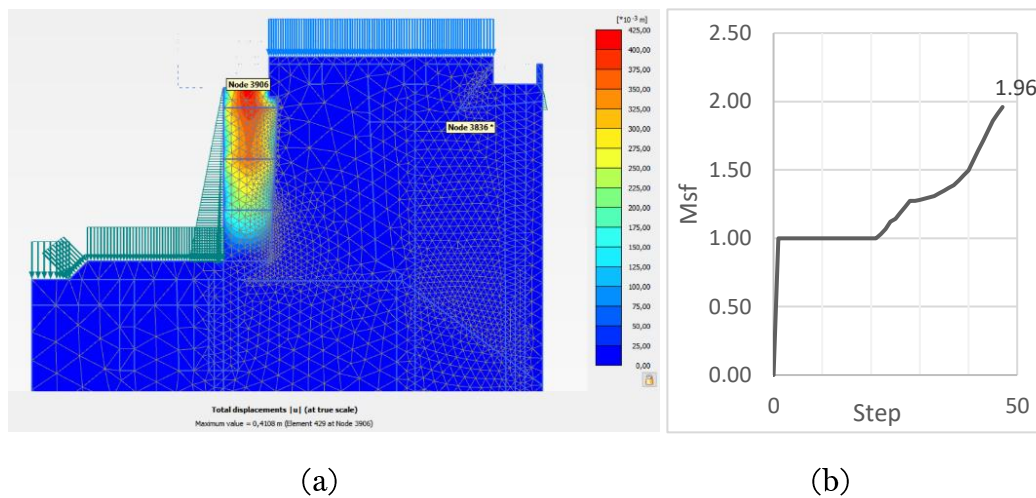
3.2.3 Tahap pemasangan CSP



Gambar 8. Total Displacement (a) dan Factor of Safety (b) pada Tahap Pemasangan SPSP

Pada Gambar 8, dilakukan pemancangan di sisi faceline dermaga menggunakan SPSP berdiameter 1200 mm dan tebal 14 mm. Total Displacement terbesar sebesar 0,02996 m pada node 29978. Terlihat dari grafik bahwa nilai Factor of Safety meningkat menjadi 1,75. Sesuai dengan standar SNI, faktor keamanan minimum untuk daya dukung tanah, yaitu 1,5.

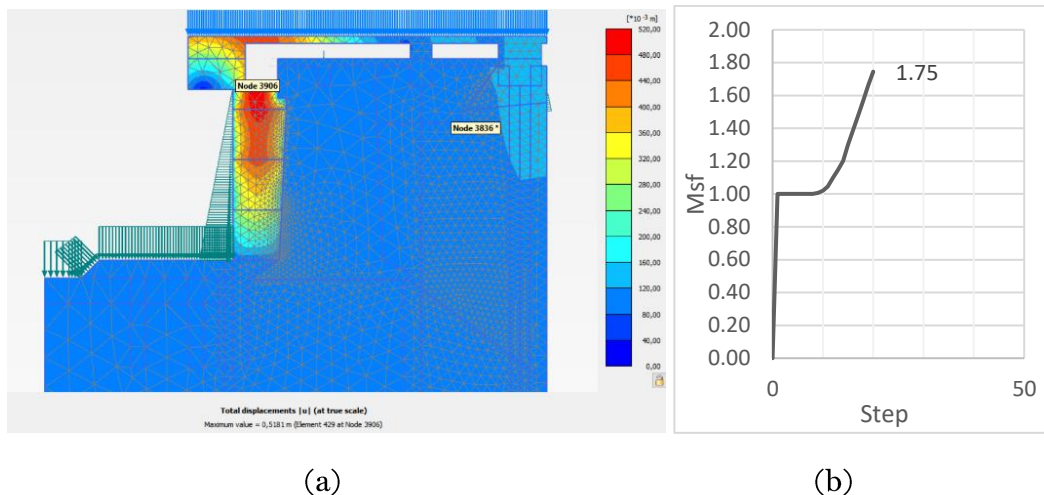
3.2.4 Tahap pengerukan pasir



Gambar 9. Total Displacement (a) dan Factor of Safety (b) pada Tahap Pengurukan Pasir

Tahap pengurukan dilakukan di antara kaisan dan SPSP dengan material pasir. Beban pada Gambar 9 hanya berasal dari beban distribusi truk. Total Displacement terbesar terjadi pada node 3906 sebesar 0,4108 m. Meskipun pergeseran cukup besar, Factor of Safety yang diperoleh adalah 1,96. Sesuai dengan standar SNI, faktor keamanan minimum untuk daya dukung tanah, yaitu 1,5.

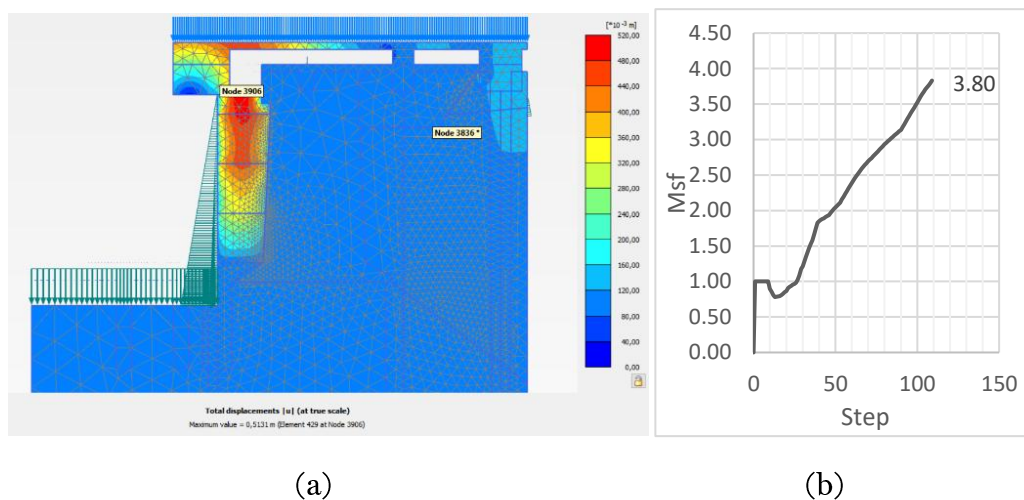
3.2.5 Tahap Deck on Pile



Gambar 10.) *Total Displacement* (a) dan *Factor of Safety* (b) pada Tahap *Deck on pile*

Peningkatan elevasi dari 1,6 mLWS menjadi 2,85 mLWS dilakukan pada tahap *Deck on pile*. Pada Gambar 10, beban STS crane ditambahkan pada dua titik sesuai bentang rel crane yang direncanakan sepanjang 16 m. *Total Displacement* terbesar terjadi pada node 3906 sebesar 0,5181 m. Meskipun terjadi peningkatan pergeseran, *Factor of Safety* yang diperoleh tetap di atas rencana, yaitu 1,75. Sesuai dengan standar SNI, faktor keamanan minimum untuk daya dukung tanah, yaitu 1,5.

3.2.6 Tahap pengerukan (*dredging*)



Gambar 11. *Total Displacement* (a) dan *Factor of Safety* (b) pada Tahap Pengerukan (*Dredging*)

Pada Gambar 11, operasi penuh telah dilakukan di dermaga seperti bongkar muat barang dan penumpang. *Total Displacement* terbesar sebesar 0,5131 m terjadi pada node 3906. Pada tahap ini terjadi penurunan tanah (*settlement*) sehingga diperoleh *Factor of Safety* sebesar 3,80. Sesuai dengan standar SNI, faktor keamanan minimum untuk daya dukung tanah, yaitu 1,5.

Tabel 5 menyajikan nilai *Total Displacement* dan *Factor of Safety* (FoS) pada setiap tahap konstruksi. Pada tahap pelepasan CSP di sisi *faceline*, nilai FoS menurun menjadi 1,55, mendekati batas minimum persyaratan SNI sebesar 1,5. Pergeseran terbesar, yaitu 0,5181 m,

terjadi pada tahap *Deck on pile*. Meskipun nilai FoS menurun pada tahap ini, pada tahap pengerukan (*dredging*) nilainya meningkat signifikan menjadi 3,80 seiring tercapainya kestabilan struktur. Secara keseluruhan, nilai FoS pada setiap tahap melebihi standar SNI 1,5, sehingga membuktikan bahwa penerapan SPSP efektif dalam meningkatkan stabilitas struktur Dermaga Ex-JICT 2.

Tabel 5. Total Displacement and Factor of Safety Pada Tiap Fase

No	Stage	Load	u (m)	FoS
1	Tahap Eksisting	Truk	0.1476	1.57
2	Tahap Pelepasan CSP	Truk + Alat Berat	0.0304	1.55
3	Tahap Pemasangan SPSP	Truk + Alat Berat	0,0299	1.75
4	Tahap Pengerukan Pasir	Truk	0.4108	1.96
5	Tahap <i>Deck on pile</i>	Truk + Crane	0.5181	1.75
6	Tahap Pengerukan	Truk + Crane	0.5131	3.80

4. KESIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan struktur quay wall menggunakan material Steel Pipe Sheet Pile (SPSP) pada pengembangan Dermaga Ex-JICT 2 di Pelabuhan Tanjung Priok mampu meningkatkan stabilitas struktur dermaga secara efektif. Berdasarkan analisis kapasitas dukung pondasi, kedalaman SPSP 40 m dinilai mampu menahan beban ultimit sebesar 4514,76 kN, lebih besar dari kebutuhan beban rencana sebesar 3970,125 kN. Hasil simulasi menggunakan metode Finite Element Method (FEM) pada PLAXIS 2D menunjukkan bahwa seluruh tahapan konstruksi memenuhi persyaratan faktor keamanan minimum SNI 8460:2017 sebesar 1,5. Nilai Factor of Safety (FoS) berkisar antara 1,55 hingga 3,80, dengan kondisi paling kritis terjadi pada tahap pelepasan CSP. Meskipun terjadi displacement maksimum sebesar 0,5181 m pada tahap *deck on pile*, struktur tetap berada dalam kondisi aman dan stabil. Dengan demikian, penggunaan SPSP terbukti efektif dalam mendukung peningkatan elevasi dermaga, menjaga kestabilan tanah dan struktur, serta mendukung peningkatan kapasitas operasional Pelabuhan Tanjung Priok.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Via Azizul Saputri, S.T., M.T. dan Anasya Arsita Laksmi, S.T., M.Sc.Eng. atas bimbingan dan dukungan yang diberikan selama proses penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada PT Pelabuhan Indonesia (PELINDO) atas pemberian akses data dan fasilitas yang sangat membantu kelancaran studi ini. Kontribusi dan dorongan mereka sangat berperan dalam keberhasilan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ASCE. (2021). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. In *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784415788>
- Badan Standardisasi Nasional. (2005). *SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan*. BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. In *Standar Nasional Indonesia*. BSN.
- Bentley. (2023a). *PLAXIS 2D 2024.1: 2 - Reference Manual*. 1–670. https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sys_kb_id=082fe67a97668a1081d373b0f053afbc
- Bentley. (2023b). *PLAXIS 2D 2024.1 General Information Manual*. Bentley.

- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design*. In *Civil Engineering Materials* (5th ed.). McGraw-Hill Companies, Inc.
- Gunawan S, D., & Yahya, G. Y. (2018). Transformasi Pelabuhan Tanjung Priok Dalam Masyarakat Ekonomi Asean (Mea). *Jurnal Dinamika Global*, 3(01), 132–167. <https://doi.org/10.36859/jdg.v3i01.60>
- Hasheminasab, S., & Kashi, E. (2021). Finite element analysis of ports pavement under container loading. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 19(2), 497–508. <https://doi.org/10.1108/JEDT-07-2020-0301>
- Kahlström, M. (2013). *Plaxis 2D Comparison of Mohr-Coulomb and Soft Soil Material* [Luleå University of Technology]. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1023278/FULLTEXT02.pdf>
- Kementerian Perhubungan Direktorat Jendral Perhubungan Laut. (2024). *RENCANA INDUK PELABUHAN TANJUNG PRIOK DAN MARUNDA TERINTEGRASI* (Issue 8). Kementerian Perhubungan Direktorat Jendral Perhubungan Laut.
- Kempfert, H. G., & Gebreselassie, B. (2006). Excavations and foundations in soft soils. In *Excavations and Foundations in Soft Soils*. <https://doi.org/10.1007/3-540-32895-5>
- Liebherr. (2020, February). *Technical Description Ship to Shore Gantry Cranes*. <http://www.konecranes.com/equipment/container-handling-equipment/ship-to-shore-gantry-cranes>
- Nippon Steel Corp. (2020). *Steel Pipe Piles*. https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/K011en.pdf
- OCDI. (2002). Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan. In Y. Goda; T. Tabata; S. Yamamoto (Ed.), *Sustainability* (Switzerland). Japan Port and Harbour Association.
- Rocscience. (2015). *Cam Clay and Modified Cam Clay Material Models* (pp. 1–11). rocscience.
- Romadhon, Y. (2018). Optimalisasi Pelabuhan Tanjung Priok Menuju Pelabuhan Berkelas Dunia. *Jurnal Logistik Indonesia*, 2(1), 37–43. <https://doi.org/10.31334/jli.v2i1.217>
- Sofistik. (2020). *Calculation of Slope Stability by Phi-C Reduction* (Issue 38).
- Springer. (2020). Handbook of Terminal Planning. In J. W. Böse (Ed.), *Operations Research/Computer Science Interfaces Series* (2nd ed.). Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39990-0_12
- Teguh, R., Rusbandi, R., Sudiadi, S., Novita, D., & Mardiani, M. (2022). Penerapan Aplikasi Plaxis Pada Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tridinanti Palembang. *Fordicate*, 1(2), 124–132. <https://doi.org/10.35957/fordicate.v1i2.2406>
- The British Standards Institution. (2014). BSI Standards Publication Maritime works-Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems. In *BSI Standards Publication Maritime works* (3rd ed., pp. 1–54). BSI Standards Limited 2014.
- Trelleborg. (2024, November). *Bollards Installation and Maintenance Manual*. *TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE*, 1–28.
- Triadmodjo, B. (2010). *Perencanaan Pelabuhan*. Beta Offset Yogyakarta.