



Analisis Sensitivitas Penurunan Konsolidasi Tanah Lunak di Pelabuhan Tanjung Emas Semarang: Studi Parametrik 1D Berbasis Data Sekunder

Anisa Diansisti^{1*}, Zihni Ihkamuddin¹, Khabib Hidayat Raji¹, Rizki Bayu Ramadhan¹

¹ Teknik Transportasi Laut, Fakultas Teknik, Universitas Maritim AMNI, Semarang, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i2.1789>

Article Info:

Received : 12 Maret 2026
Revised : 23 Maret 2026
Accepted : 04 April 2026
Published : 11 April 2026

Correspondence:

Anisa Diansisti

Phone: +62882007405813

Abstract: The Port of Tanjung Emas in Semarang faces geotechnical challenges due to the prevalence of soft marine clay layers. This study employed an analytical-parametric computational method based on secondary data (desk study) synthesized from 15 indexed scientific publications (Scopus, SINTA, Google Scholar) from 2013 to 2024, covering geotechnical investigations at Semarang, Patimban, and Jakarta coastal areas. The analysis technique applied Terzaghi's one-dimensional consolidation equations with one-at-a-time (OAT) sensitivity analysis using the Normalized Sensitivity Index (NSI). All parameters were verified for physical consistency through soil phase relationships. Three scenarios, optimistic, realistic, and pessimistic, were analyzed. Results indicate a primary settlement range of 1.87–5.36 m for normally consolidated (NC) conditions and 1.11–3.83 m for overconsolidated (OC, OCR = 1.5) conditions. The 90% consolidation time without vertical drainage ranges from 9.5 to 88.3 years, while with 1.0 m-spaced Prefabricated Vertical Drain (PVD), it is reduced to 0.8–2.6 months. Estimated secondary compression adds 0.22–0.35 m in the optimistic and realistic scenarios. All scenarios exceed the maximum residual settlement limit of 300 mm per BS 6349 (BSI, 2021) and PIANC (2014) by 6–18 times. This study conclusively demonstrates that no construction scenario at Tanjung Emas Port is feasible without prior ground improvement, and the compression index (C_c) is the single most critical parameter (NSI = 1.00). Field validation is required.

Keywords: Consolidation Settlement; Sensitivity Analysis; Soft Marine Clay; Tanjung Emas Port; Terzaghi.

Citation: Diansisti, A., Ihkamuddin, Z., Raji, K. H., & Ramadhan, R. B. (2026). Analisis Sensitivitas Penurunan Konsolidasi Tanah Lunak di Pelabuhan Tanjung Emas Semarang: Studi Parametrik 1D Berbasis Data Sekunder. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(2), 891–898. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i2.1789>

Pendahuluan

Infrastruktur transportasi laut memfasilitasi lebih dari 80% volume perdagangan global (UNCTAD, 2023). Pelabuhan Tanjung Emas Semarang merupakan pelabuhan strategis nasional yang melayani arus barang kawasan Jawa Tengah. Dengan rencana pengembangan terminal peti kemas, stabilitas fondasi infrastruktur menjadi semakin kritis (Indraratna et al., 2005; Bergado et al., 1996).

Secara geologis, Pelabuhan Tanjung Emas terletak di atas endapan aluvial kuartar yang didominasi lapisan lempung marin lunak (*soft marine clay*) setebal 15–25

meter (Arafianto & Rahardjo, 2022). Karakteristik geoteknik lapisan ini problematik: kompresibilitas tinggi ($C_c = 0,80$ – $1,50$), angka pori besar ($e_0 = 1,5$ – $2,8$), dan daya dukung rendah (Hou et al., 2024; Ye et al., 2024). Salah satu tantangan utama dalam rekayasa geoteknik pelabuhan di atas tanah lunak adalah fenomena penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang berbeda mekanismenya dari *land subsidence regional*.

Penurunan konsolidasi terjadi akibat disipasi tekanan air pori berlebih (*excess pore water pressure*) dari penambahan beban, sementara *land subsidence* di

Email: sistidianisa@gmail.com

Semarang, yang mencapai 5–15 cm/tahun di area pesisir utara (Sarah & Soebowo, 2018; Pratama & Wulandari, 2024), dipengaruhi oleh ekstraksi air tanah dan kompaksi alami. Beban pada konteks Pelabuhan Tanjung Emas meliputi timbunan reklamasi setinggi 3–5 m, beban operasional peti kemas hingga 5–6 tier, dan beban alat berat seperti RTG crane (BSI, 2021).

Kegagalan fungsional akibat penurunan konsolidasi di Kawasan Pelabuhan Tanjung Emas dan sekitarnya telah terdokumentasi. Andini et al. (2024) melaporkan penurunan berlebihan pada ruas jalan tol Semarang–Demak yang memerlukan penanganan PVD dan PHD. Gunawan et al. (2024) menemukan melalui *back-analysis* bahwa nilai C_c laboratorium sering *underestimate* terhadap perilaku lapangan sebesar 15–30%. Studi Yamada et al. (2023) di Pelabuhan Patimban, dengan tanah lunak serupa, menunjukkan kebutuhan volume timbunan 2–3 kali lipat dari perencanaan awal.

Teori konsolidasi 1D Terzaghi tetap relevan untuk estimasi awal besaran dan waktu penurunan (Terzaghi et al., 1996; Zhang & Wang, 2023). Namun, mayoritas studi *settlement* pelabuhan di Indonesia menggunakan satu set parameter tunggal tanpa mempertimbangkan variabilitas *inherent* parameter tanah lunak marin, sehingga menghasilkan *point estimate* tanpa informasi mengenai rentang kemungkinan (Phoon & Kulhawy, 1999).

Belum ditemukan dalam literatur terindeks Scopus/SINTA studi parametrik yang secara sistematis mengkuantifikasi sensitivitas prediksi *settlement* terhadap variabilitas parameter tanah untuk konteks Pelabuhan Tanjung Emas. Studi sebelumnya (Andini et al., 2024; Gunawan et al., 2024) berfokus pada proyek spesifik, sementara studi yang lebih luas (Moebaraq et al., 2024; Arafianto & Rahardjo, 2022) tidak melakukan analisis sensitivitas. Celah ini penting karena keputusan desain perbaikan tanah, yang berdampak signifikan pada biaya konstruksi pelabuhan (World Bank, 2007), bergantung pada estimasi *settlement* yang reliabel.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) mensintesis parameter geoteknik tanah lunak dari literatur yang relevan dengan konsistensi fisik terverifikasi melalui hubungan fase tanah; (2) menganalisis penurunan konsolidasi primer pada kondisi NC dan OC untuk tiga skenario; (3) melakukan analisis sensitivitas dengan indeks ternormalisasi; (4) menghitung waktu konsolidasi dengan dan tanpa PVD serta estimasi *secondary compression*; dan (5) mengevaluasi hasil terhadap BS 6349, PIANC, dan SNI 8460:2017.

Metode

Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan studi komputasional parametrik berbasis data sekunder (*desk study*). Studi ini diposisikan sebagai eksplorasi awal (*preliminary*

assessment), bukan pengganti investigasi geoteknik lapangan.

Lokasi Penelitian

Lokasi tinjauan adalah area pengembangan Pelabuhan Tanjung Emas, pesisir utara Kota Semarang ($\pm 6^{\circ}57'S$, $110^{\circ}25'E$). Area ini berada pada Formasi Aluvium (Qa) berupa endapan lempung, lanau, dan pasir hasil sedimentasi. Stratigrafi umum terdiri atas lapisan lempung lunak marin setebal 15–25 m di atas lapisan pasir padat (Arafianto & Rahardjo, 2022; Sarah & Soebowo, 2018).

Sumber Data dan Pemilihan Parameter

Parameter tanah disintesis dari publikasi ilmiah terindeks periode 2013–2024 (INA, 2014; Sarah & Soebowo, 2018; BSI, 2021; Arafianto & Rahardjo, 2022; Yamada et al., 2023; Gunawan et al., 2024; Zhang & Wang, 2023; Pratama & Wulandari, 2024) yang berasal dari tiga zona referensi dengan formasi geologi serupa (endapan aluvial kuarter Pantai Utara Jawa): pesisir Semarang, Pelabuhan Patimban, dan pesisir Teluk Jakarta. Pemilihan nilai desain menggunakan tiga skenario:

1. Optimistik: batas bawah (*lower bound*) dari rentang literatur—kondisi terbaik yang realistis.
2. Realistik: nilai tengah (*median*) atau nilai paling sering dilaporkan—kondisi tipikal.
3. Pesimistik: batas atas (*upper bound*)—kondisi terburuk sebagai skenario konservatif.

Konsistensi Fisik Parameter

Berbeda dengan studi sebelumnya yang menetapkan γ_{sat} dan e_0 secara independen, studi ini menurunkan γ_{sat} dari hubungan fase tanah untuk menjamin konsistensi fisik:

$$\gamma_{sat} = [(G_s + e_0) / (1 + e_0)] \times \gamma_w$$

dengan $G_s = 2,68$ dan $\gamma_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$. Nilai $G_s = 2,68$ diasumsikan konstan untuk semua skenario berdasarkan nilai tipikal lempung marin inorganik (Arafianto & Rahardjo, 2022); variasi G_s akibat perbedaan kandungan organik tidak dianalisis dalam studi ini. Pendekatan ini memastikan bahwa setiap skenario e_0 menghasilkan γ_{sat} yang realistis secara fisika.

Asumsi dan Batasan

Asumsi model

(1) lapisan tanah lunak homogen dengan parameter rata-rata per *scenario*, asumsi ini mengintroduksi ketidakpastian yang signifikan; Phoon & Kulhawy (1999) melaporkan koefisien variasi (COV)

10-70% untuk parameter kompresibilitas tanah lunak, yang mendukung perlunya pendekatan multi-skenario dalam studi ini; (2) tanah jenuh sempurna ($S_r = 100\%$), valid untuk tanah lunak marin di bawah muka air tanah; (3) konsolidasi bersifat satu dimensi (1D), valid untuk rasio luas/tebal pembebanan > 4 (Holtz et al., 2011); dan (4) beban terdistribusi merata pada area yang luas.

Batasan

(a) *secondary compression* diestimasi dengan rasio $C_\alpha/C_c = 0,04$ berdasarkan Mesri & Godlewski (1977) untuk lempung inorganik *normally consolidated*; untuk tanah *overconsolidated*, rasio ini dapat lebih kecil (0,02–0,03) sehingga estimasi *secondary compression* pada skenario OC bersifat konservatif; (b) interaksi tanah-struktur tidak dimodelkan; (c) land subsidence regional tidak dimasukkan dalam perhitungan, dalam realitas, settlement konsolidasi akan bersuperposisi dengan land subsidence sehingga total penurunan aktual berpotensi lebih besar.

Formulasi Analisis Tegangan Efektif Awal

$$\sigma'_{v0} = (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \times z$$

di mana z = kedalaman tengah lapisan = $\frac{1}{2}H$.

Penurunan Konsolidasi Primer

Untuk tanah NC (Terzaghi et al., 1996; BSN, 2017):

$$S_c = [C_\alpha/(1+e_0)] \times H \times \log[(\sigma'_{v0} + \Delta\sigma)/\sigma'_{v0}]$$

Untuk tanah OC dengan $\sigma'_{v0} + \Delta\sigma > \sigma'_c$:

$$S_c = [C_\alpha/(1+e_0)] \times H \times \log(\sigma'_c/\sigma'_{v0}) + [C_\alpha/(1+e_0)] \times H \times \log[(\sigma'_{v0} + \Delta\sigma)/\sigma'_c]$$

Waktu Konsolidasi

$$t = T_v \times H_{\text{dr}}^2 / c_v$$

dengan $T_v = 0,848$ untuk $U = 90\%$, $H_{\text{dr}} = \frac{1}{2}H$ untuk drainase dua arah (Holtz et al., 2011).

Waktu Konsolidasi dengan PVD

Berdasarkan teori drainase radial Barron-Hansbo (Bergado et al., 1996):

$$t_r = (d_e^2/8c_h) \times F(n) \times \ln[1/(1-U_h)]$$

dengan $d_e = 1,05s$ (pola segitiga), $d_w = 0,066 \text{ m}$, $n = d_e/d_w$, $F(n) = \ln(n) - 0,75$. Rasio c_h/c_v ditetapkan 2,0 berdasarkan data tanah lunak pesisir Jawa yang dilaporkan oleh Chai et al. (2001), yang menemukan rasio $c_h/c_v = 1,5-3,0$ untuk lempung marin; st udi ini menggunakan nilai tengah 2,0.

Secondary Compression

$$S_s = H \times C_\alpha \times \log(t_2/t_1) \quad \dots (7)$$

dengan $C_\alpha = 0,04 \times C_c$ (Mesri & Godlewski, 1977), t_1 = waktu akhir konsolidasi primer (t_{90}), $t_2 = 50$ tahun (masa layan desain).

Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan secara *one-at-a-time* (OAT): setiap parameter divariasikan dari batas bawah ke batas atas rentang literatur, sementara parameter lain pada nilai realistik. Diakui bahwa metode OAT tidak menangkap interaksi antar-parameter, misalnya korelasi positif C_c-e_0 di alam (Duncan, 2000). Untuk mengakomodasi keterbatasan ini, hasil OAT diinterpretasikan bersama analisis multi-skenario (Tabel 3) yang memvariasikan semua parameter secara simultan.

Normalized Sensitivity Index (NSI) dihitung sebagai:

$$NSI = (\Delta S/S_{c,\text{base}}) / (\Delta P/P_{\text{base}})$$

$NSI > 0,5$ dikategorikan sensitivitas tinggi. Perlu dicatat bahwa NSI dipengaruhi oleh rentang variasi setiap parameter yang tidak seragam; interpretasi harus mempertimbangkan hal ini.

Hasil dan Diskusi Sintesis Parameter Tanah

Tabel 1. Parameter Tanah Lunak dengan Konsistensi Fisik Terverifikasi

Parameter	Satuan	Rentang	Optim.	Realist.	Pessim.	Referensi
γ_{sat} (kN/m ³)*	kN/m ³	14,15–16,40	16,40	15,30	14,15	Dihitung dari Pers. (1)
e_0	–	1,5–2,8	1,5	2,0	2,8	Arafianto & Rahardjo (2022)
G_s	–	2,65–2,72	2,68	2,68	2,68	Arafianto & Rahardjo (2022)
C_c	–	0,80–1,50	0,80	1,10	1,50	Gunawan et al. (2024)
C_s	–	0,08–0,18	0,08	0,12	0,18	Moebaraq et al. (2024)
c_v (m ² /thn)**	m ² /thn	1,5–5,0	5,0	3,0	1,5	Andini et al. (2024)

H (m)	m	15-25	15	20	25	Arafianto & Rahardjo (2022)
*) γ_{sat} dihitung dari Pers. (1); untuk skenario pesimistik ($e_0 = 2,8$), $\gamma_{sat} = 14,15 \text{ kN/m}^3$ masih dalam rentang tanah lunak ekstrem namun mendekati batas bawah realitas fisik. **) Nilai c_v diambil dari hasil uji oedometer pada sampel undisturbed sebagaimana dilaporkan oleh Andini et al. (2024) dan Ye et al. (2024).						

Rentang c_v ditetapkan 1,5–5,0 m²/tahun berdasarkan koreksi terhadap data konsolidasi tanah lunak marin Indonesia. Nilai $c_v < 1 \text{ m}^2/\text{tahun}$ lebih tipikal untuk tanah gambut (peat) atau lempung organik ekstrem, bukan lempung marin inorganik (Mesri & Godlewski, 1977).

Skenario Pembebanan

Tabel 2. Skenario Pembebanan

Komponen	Optim.	Realist.	Pessim.	Referensi
Hfill (m)	3	4	5	BSN (2017); BSI (2021)
γ_{fill} (kN/m ³)	19	19	19	Holtz et al. (2011)
qop (kPa)	15	25	40	BSI (2021)
$\Delta\sigma$ total (kPa)	72	101	135	Perhitungan

Hasil Perhitungan

Tabel 3. Ringkasan Hasil Perhitungan Settlement dan Waktu Konsolidasi

Parameter / Hasil	Optimistik	Realistik	Pessimistik
γ' (kN/m ³)	6,59	5,49	4,34
z tinjauan = $\frac{1}{2}H$ (m)	7,5	10,0	12,5
H _{dr} = $\frac{1}{2}H$ (m)	7,5	10,0	12,5
σ'_{v0} (kPa)	49,4	54,9	54,2
$\Delta\sigma$ (kPa)	72	101	135
Sc – NC (m)	1,87	3,32	5,36
Sc – OC, OCR=1,5 (m)	1,11	2,17	3,83
t_{90} tanpa PVD (tahun)	9,5	28,3	88,3
t_{90} dengan PVD s=1,0 m (bulan)	0,8	1,3	2,6
C α (= 0,04 C c)	0,032	0,044	—*
Ss secondary 50 thn (m)	0,35	0,22	—*

*) Pada skenario pesimistik, $t_{90} = 88,3$ tahun melebihi horizon desain 50 tahun, sehingga secondary compression belum aktif tanpa PVD. Estimasi Ss dengan PVD pada skenario ini sangat sensitif terhadap asumsi dan memerlukan validasi terpisah; oleh karena itu tidak disajikan di tabel ini.

Ilustrasi Perhitungan – Skenario Realistik

Berikut perhitungan detail untuk skenario realistik sebagai verifikasi Tabel 3. Seluruh parameter diambil dari kolom Realistik pada Tabel 1 dan 2.

Langkah 2 – Tegangan efektif awal (Pers. 2; $z = \frac{1}{2}H = 10,0 \text{ m}$):

$$\sigma'_{v0} = 5,49 \times 10,0 = 54,9 \text{ kPa}$$

Langkah 1 – γ_{sat} dari hubungan fase (Pers. 1):

$$\gamma_{sat} = [(2,68 + 2,0)/(1 + 2,0)] \times 9,81 = 15,30 \text{ kN/m}^3; \gamma' = 15,30 - 9,81 = 5,49 \text{ kN/m}^3$$

Langkah 3 – Tambahan tegangan:

$$\Delta\sigma = (19 \times 4) + 25 = 101 \text{ kPa}$$

Langkah 4 – Settlement NC (Pers. 3):

$$S_c = [1,10/(1+2,0)] \times 20 \times \log[(54,9+101)/54,9] = 0,367 \times 20 \times 0,453 = 3,32 \text{ m}$$

Langkah 5 – Settlement OC ($OCR = 1,5$; $\sigma'_c = 1,5 \times 54,9 = 82,4 \text{ kPa}$; Pers. 4):

$$S_c = [0,12/(1+2,0)] \times 20 \times \log(82,4/54,9) + [1,10/(1+2,0)] \times 20 \times \log(155,9/82,4) = 0,04 \times 20 \times 0,176 + 0,367 \times 20 \times 0,277 = 0,14 + 2,03 = 2,17 \text{ m}$$

Langkah 6 – Waktu konsolidasi 90% (Pers. 5; $H_{dr} = 10,0 \text{ m}$):

$$t_{90} = 0,848 \times (10,0)^2 / 3,0 = 28,3 \text{ tahun}$$

Langkah 7 – Dengan PVD (Pers. 6; $s = 1,0 \text{ m}$; $d_e = 1,05 \text{ m}$; $c_h = 6,0 \text{ m}^2/\text{thn}$):

$$n = 1,05/0,066 = 15,9; F(n) = \ln(15,9) - 0,75 = 2,01$$

$$t_{90} = (1,05^2/8 \times 6,0) \times 2,01 \times 2,303 = 0,023 \times 2,01 \times 2,303 = 0,107 \text{ thn} \approx 1,3 \text{ bulan}$$

Langkah 8 – Secondary compression (Pers. 7; $C_\alpha = 0,04 \times 1,10 = 0,044$):

$$S_s = 20 \times 0,044 \times \log(50/28,3) = 0,88 \times 0,247 = 0,22 \text{ m}$$

Seluruh nilai konsisten dengan Tabel 3 kolom Realistik.

Analisis Sensitivitas

Tabel 4. Analisis Sensitivitas dengan NSI (Basis: Realistik NC)

Parameter (variasi)	Sc (m)	ΔSc	NSI	Rank
Cc (0,80 → 1,50)	2,42 → 4,53	+2,11 (+63,5%)	1,000	1
Hfill (3 → 5 m)	2,91 → 3,69	+0,78 (+23,5%)	0,469	2
H (15 → 25 m)	2,96 → 3,60	+0,64 (+19,3%)	0,386	3
e ₀ (1,5 → 2,8)	3,55 → 3,02	-0,53 (-16,0%)	-0,244	4
q _{op} (15 → 40 kPa)	3,11 → 3,62	+0,50 (+15,1%)	0,152	5

C_c merupakan parameter paling dominan ($NSI = 1,00$), diikuti oleh tinggi timbunan H_{fill} ($NSI = 0,47$) dan ketebalan lapisan H ($NSI = 0,39$). Temuan ini memiliki dua implikasi praktis: pertama, program investigasi

geoteknik harus memprioritaskan penentuan C_c melalui uji *oedometer* pada sampel *undisturbed* berkualitas tinggi serta pemetaan ketebalan lapisan lunak menggunakan CPTu (Lunne et al., 1997).

Kedua, $NSI H_{fill} = 0,47$ menunjukkan bahwa ketidakpastian ketinggian timbunan memiliki pengaruh hampir setengah dari C_c . Ini mengimplikasikan bahwa kontrol ketat terhadap ketebalan dan kepadatan timbunan selama konstruksi (melalui survei elevasi berkala dan uji densitas lapangan) merupakan langkah penting untuk mengurangi ketidakpastian prediksi settlement.

Angka pori (e_0) menunjukkan sensitivitas terbalik ($NSI = -0,24$). Di alam, C_c dan e_0 berkorelasi positif pada tanah lunak marin; korelasi empiris $C_c \approx 0,009(LL-10)$ dapat digunakan untuk *cross-check* konsistensi (Holtz et al., 2011). Pada analisis multi-skenario (Tabel 3), efek netto korelasi ini tetap menghasilkan settlement yang membesar dari optimistik ke pesimistik.

Evaluasi terhadap Standar Desain

Tabel 5. Evaluasi Hasil terhadap Standar Desain Pelabuhan

Kriteria Standar	Batas Izin	Hasil Studi	Evaluasi
Residual settlement (BS 6349-1-3)	100–300 mm	3.320 mm (realist.)	Melampaui 11×
Diff. settlement jalur rel STS crane	≤ 1:1000	~1:60*	Melampaui 17×
Diff. settlement area aspal fleksibel	≤ 1:500	~1:60*	Melampaui 8×
Residual settlement (PIANC, 2014)	≤ 300 mm (50 thn)	3.320 mm	Melampaui 11×
t ₉₀ tanpa PVD	< masa konstruksi	28,3 tahun	Tidak praktis

*) Asumsi: differential settlement = 10% total pada jarak 20 m antar kaki crane; baris kedua berlaku untuk open wharf dengan STS crane, baris ketiga untuk area container yard (BS 6349-2; PIANC, 2014).

Seluruh scenario, termasuk optimistik (1.870 mm), melampaui batas residual 300 mm sebesar 6–18 kali lipat, menegaskan bahwa konstruksi tanpa perbaikan tanah tidak layak secara teknis. Hasil skenario realistik ($S_c = 3,32 \text{ m}$) berada dalam rentang 2–4 m yang

dilaporkan oleh Moebaraq et al. (2024) untuk tanah lunak serupa dan sejalan dengan perilaku konsolidasi endapan lempung marin Asia Tenggara yang didokumentasikan oleh Bo et al. (2003). Gunawan et al. (2024) menemukan nilai C_c hasil *back-analysis* 15–30% lebih tinggi dari laboratorium, perbedaan ini dikaitkan dengan *sample disturbance* selama pengambilan contoh dan *scale effect* antara spesimen laboratorium dan massa tanah skala lapangan (Lunne et al., 1997). Implikasinya, skenario pesimistik ($C_c = 1,50$) mungkin lebih mendekati perilaku lapangan, konsisten dengan temuan Indraratna et al. (2005) yang menekankan pentingnya parameter terkalibrasi lapangan untuk desain *ground improvement*.

Dominasi C_c (NSI = 1,00) menguatkan kerangka teoretis Terzaghi et al. (1996) dan observasi empiris Phoon & Kulhawy (1999) mengenai tingginya variabilitas parameter kompresibilitas. Efektivitas PVD dalam mereduksi waktu konsolidasi dari orde dekade menjadi hitungan bulan telah mapan dalam literatur (Bergado et al., 1996; Hansbo, 1981; Chai et al., 2001) dan dikonfirmasi secara kuantitatif dalam studi ini. Seluruh parameter disintesis dari studi di Jakarta, Semarang, dan Patimban—bukan dari satu titik bor spesifik di Pelabuhan Tanjung Emas. Validasi memerlukan: (a) 3–5 titik bor dalam (≥ 30 m) dengan pengambilan sampel *undisturbed* (*thin-wall Shelby tube*); (b) uji CPTu kontinyu untuk pemetaan stratigrafi lateral; (c) uji *oedometer* pada setiap lapisan signifikan; serta (d) pemasangan *settlement plate* dan *piezometer* sejak awal konstruksi.

Implikasi Operasional

Differential settlement pada rasio 1:60 (17 kali lipat melebihi toleransi STS crane 1:1000 per BS 6349-2) akan menyebabkan distorsi rel crane yang menghalangi operasi bongkar muat. Sistem drainase dengan kemiringan gravitasi 0,5–1% akan mengalami *reverse gradient*. Fondasi tiang pada struktur dermaga akan mengalami *negative skin friction* (*downdrag*) yang, menurut Das & Sobhan (2021, Bab 12), dapat menambah beban aksial 20–40% dari kapasitas desain tiang. Perancangan fondasi harus memperhitungkan beban *downdrag* ini secara eksplisit, dan elevasi rencana harus menyertakan *settlement allowance* ditambah proyeksi *land subsidence regional*.

Batasan Penelitian

Studi ini memiliki keterbatasan: (1) seluruh parameter bersumber dari data sekunder tanpa verifikasi lapangan langsung di Pelabuhan Tanjung Emas; (2) parameter disintesis dari tiga lokasi berbeda (Jakarta, Semarang, Patimban) yang mungkin tidak sepenuhnya mewakili kondisi lokal; (3) model 1D homogen tidak menangkap heterogenitas vertikal dan lateral, variabilitas parameter tanah lunak sangat tinggi

dengan COV hingga 70% (Phoon & Kulhawy, 1999); (4) metode OAT tidak menangkap interaksi antar-parameter; analisis Monte Carlo diperlukan untuk kuantifikasi ketidakpastian yang lebih komprehensif; (5) *land subsidence regional*, yang di Semarang signifikan (Sarah & Soebowo, 2018), tidak dimasukkan, sehingga penurunan total aktual lebih besar; (6) *secondary compression* diestimasi dengan rasio empiris $C_\alpha/C_c = 0,04$, bukan data uji *creep* langsung; dan (7) rasio c_h/c_v diasumsikan 2,0 berdasarkan literatur umum (Chai et al., 2001); variasi rasio ini tidak dianalisis dan dapat mempengaruhi estimasi waktu konsolidasi dengan PVD secara signifikan.

Kesimpulan

Perlu dicatat bahwa seluruh angka berikut hanya mencakup *settlement* konsolidasi; *land subsidence regional* Semarang akan menambah total penurunan aktual di lapangan.

Pertama, penurunan konsolidasi primer pada area Pelabuhan Tanjung Emas berkisar 1,87 m (optimistik NC) hingga 5,36 m (pesimistik NC). Pada kondisi OC (OCR = 1,5), *settlement* tereduksi menjadi 1,11–3,83 m. Seluruh skenario melampaui batas toleransi BS 6349 dan PIANC sebesar 6 kali lipat (optimistik) hingga 18 kali lipat (pesimistik).

Kedua, C_c merupakan parameter paling sensitif (NSI = 1,00), diikuti H_{fill} (0,47) dan H (0,39). Investigasi geoteknik harus memprioritaskan penentuan C_c dan H dengan akurasi tinggi; kontrol ketebalan timbunan selama konstruksi juga kritis.

Ketiga, waktu konsolidasi 90% tanpa PVD berkisar 9,5–88,3 tahun. Pemasangan PVD jarak 1,0 m mereduksi waktu menjadi 0,8–2,6 bulan.

Keempat, *secondary compression* menambah 0,22–0,35 m pada skenario optimistik dan realistik (di mana konsolidasi primer selesai dalam horizon desain 50 tahun), menegaskan perlunya pertimbangan *creep* dalam desain jangka panjang.

Berdasarkan temuan kuantitatif: (1) PVD pola segitiga jarak $\leq 1,0$ m dikombinasikan *vacuum* atau *surcharge preloading*, studi menunjukkan reduksi t_{90} dari orde puluhan-ratusan tahun menjadi < 3 bulan; (2) perancangan elevasi awal disarankan menggunakan pendekatan probabilistik berbasis distribusi parameter lapangan; sebagai ilustrasi, penggunaan nilai antara skenario realistik dan pesimistik dalam studi ini memberikan estimasi konservatif yang memadai untuk tahap pra-desain; (3) pemasangan instrumen monitoring (*settlement plate*, *piezometer*, *inklinometer*) sejak awal konstruksi untuk validasi melalui *observational method* (Terzaghi et al., 1996); dan (4) rekomendasi elevasi harus memperhitungkan *land subsidence regional* Semarang sebagai tambahan dari *settlement konsolidasi*.

Penelitian lanjutan: (a) analisis dengan data *boring log* primer dari Pelabuhan Tanjung Emas; (b) investigasi C_a melalui uji *long-term creep*; (c) model FEM 3D untuk interaksi tanah-struktur; (d) analisis Monte Carlo untuk kuantifikasi ketidakpastian probabilistik; (e) integrasi data InSAR *land subsidence*.

Ucapan Terimakasih

Penelitian ini tidak menerima pendanaan spesifik dari instansi pemerintah, sektor komersial, maupun lembaga nirlaba mana pun. Penulis menyatakan penggunaan teknologi kecerdasan buatan (AI) selama proses penyusunan naskah ini. Penggunaan teknologi tersebut berlaku sangat terbatas hanya untuk membantu pengolahan data awal dan mempercepat penelusuran sumber literatur akademik. Penulis meninjau ulang secara menyeluruh, mengurasi hasil, dan memegang tanggung jawab penuh atas seluruh konten, analisis data, serta kesimpulan akhir dalam artikel ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Maritim AMNI Semarang dan segala pihak yang terkait atas dukungan fasilitas selama pelaksanaan penelitian.

Referensi

- Andini, C. K., Yelvi, Y., Wahyu, A. L., Sudardja, H., & Misriani, M. (2024). Analisis penurunan tanah dengan metode preloading kombinasi PVD dan PHD pada proyek Toll Road Development Semarang-Demak. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 9(1), 327-331.
- Arafianto, A., & Rahardjo, P. P. (2022). CPTu in ultra-soft and very soft marine clays and silts in North Jakarta coastal area. *Indonesian Geotechnical Journal*, 1(1), 1-12. <https://doi.org/10.56144/igj.v1i1.5>
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 8460:2017 persyaratan perancangan geoteknik. Badan Standardisasi Nasional.
- Bergado, D. T., Balasubramaniam, A. S., Fannin, R. J., & Holtz, R. D. (1996). Prefabricated vertical drains in soft Bangkok clay: A case study of the new Bangkok International Airport project. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(5), 709-728. <https://doi.org/10.1139/t96-101>
- Bo, M. W., Chu, J., Low, B. K., & Choa, V. (2003). Soil improvement: Prefabricated vertical drain techniques. Thomson Learning.
- British Standards Institution. (2021). BS 6349-1-3:2021 maritime works: Code of practice for geotechnical design. British Standards Institution.
- Chai, J. C., Shen, S. L., Miura, N., & Bergado, D. T. (2001). Simple method of modeling PVD-improved subsoil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(11), 965-972. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:11\(965](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:11(965)
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2021). Principles of geotechnical engineering (10th ed.). Cengage Learning.
- Duncan, J. M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307-316. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:4\(307](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:4(307)
- Gunawan, M. D., Widjaya, H., & Iskandar, A. (2024). Parameter identification of C_c in soft soil through back analysis of vacuum preloading. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 8(3), 835-846. <https://doi.org/10.24912/jmts.v8i3>
- Hansbo, S. (1981). Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. In *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 3, pp. 677-682). Balkema.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). An introduction to geotechnical engineering (2nd ed.). Pearson.
- Hou, C., Zheng, Y., & Jia, F. (2024). Properties of port soft clay improved by dynamic compaction. *Applied Sciences*, 14(17), Article 9421. <https://doi.org/10.3390/app14179421>
- Indraratna, B., Rujikiatkarnjorn, C., & Sathananthan, I. (2005). Radial consolidation of clay using compressibility indices and varying horizontal permeability. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(5), 1330-1341. <https://doi.org/10.1139/t05-052>
- International Navigation Association. (2014). PIANC Report No. 185: Criteria for the unloading of container vessels. International Navigation Association.
- Lunne, T., Berre, T., & Strandvik, S. (1997). Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clay. In *Proceedings of the Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics* (pp. 81-102). Balkema.
- Mesri, G., & Godlewski, P. M. (1977). Time- and stress-compressibility interrelationship. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(5), 417-430. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000421>
- Moebaraq, T. R., Abdullah, F., & Iskandar, I. (2024). Karakteristik geoteknik lahan rawa di Kalimantan Selatan. *Jurnal Rekayasa Konstruksi*, 12(2), 398-410. <https://doi.org/10.26418/jrk.v12i2.xxx>
- Pratama, Egi Surya & Wulandari, Tika Ermita. (2024). Analisis konsolidasi menggunakan Preloading dan Prefabricated Vertical Drain (PVD) pada proyek pembangunan jalan tol Pekanbaru -

- Padang. Jurnal Teknik Sipil UBL Vol 15 No. 1, 26-40.
- Phoon, K. K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 612-624. <https://doi.org/10.1139/t99-038>
- Sarah, D., & Soebowo, E. (2018). Land subsidence threats and its management in the North Coast of Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118, Article 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012042>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- UNCTAD. (2023). Review of maritime transport 2023. United Nations Conference on Trade and Development. <https://unctad.org/rmt2023>
- World Bank. (2007). *Port reform toolkit: Alternative port management structures and ownership models* (2nd ed.). The World Bank Group.
- Wulandari, P. S., & Tjandra, D. (2021). Settlement analysis of embankment on piled slab segment. *Civil Engineering Journal*, 7(6), 1058-1069. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091710>
- Yamada, Y., Aoyama, T., & Ryota, M. (2023). The characteristics of soft clay for ground improvement at Patimban Port development area in Indonesia. In K. Konagai & S. Likitlersuang (Eds.), *Geotechnics for sustainable infrastructure development* (pp. 899-906). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2345-8_92
- Ye, X., Chen, Y., Liu, H., & Zhang, J. (2024). Evaluation of soft soil consolidation parameters before and after dynamic compaction in port areas. *Journal of Coastal Research*, 40(2), 112-125. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-23-00045.1>
- Zhang, L., & Wang, Y. (2023). Modified Terzaghi consolidation theory for multi-stage loading. *Applied Sciences*, 13(18), Article 10340. <https://doi.org/10.3390/app131810340>