

Analisis Stabilitas Timbunan Oprit Jembatan Menggunakan Dinding Penahan Tanah dan Bored Pile pada Kondisi Tanah Lunak

Dea Ayu Maharanie* & Syahril

Program Studi Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Bandung – 40559, Indonesia

Email: dea.maharanie@polban.ac.id

Dikirim: 26 Mei 2026

Direvisi: 20 Juli 2026

Diterima: 22 Juli 2026

ABSTRAK

Oprit jembatan pada kondisi tanah lunak rentan terhadap ketidakstabilan lereng, penurunan konsolidasi yang berlebih. Penelitian ini menganalisis perencanaan oprit Jembatan Cicangor Hilir, Karawang, yang berada di atas lapisan tanah lunak. Penyelidikan tanah pada empat titik bor (BH-01 hingga BH-04) menunjukkan lapisan tanah lempung lunak setebal 4–6 meter dan tanah keras ditemukan pada kedalaman 4-18 meter. Parameter tanah dari uji SPT dan pengujian laboratorium digunakan sebagai dasar analisis. Pada kondisi tanpa perkuatan, analisis stabilitas menunjukkan bahwa faktor keamanan terhadap guling, geser, daya dukung, dan stabilitas global tidak memenuhi persyaratan minimum, baik untuk kondisi statis maupun gempa. Kondisi ini mengharuskan penerapan sistem perkuatan berupa dinding penahan tanah beton kantilever yang dikombinasikan dengan *bored pile* berdiameter 600 mm pada oprit sisi Abutmen 1 (Oprit A1). Stabilitas internal dianalisis menggunakan perangkat lunak ASDIP, sedangkan stabilitas global dievaluasi dengan metode elemen hingga pada program PLAXIS model tanah Soft Soil. Setelah perkuatan diterapkan, seluruh kriteria keamanan terpenuhi: faktor keamanan terhadap guling ≥ 2 , geser $\geq 1,5$, daya dukung ≥ 3 , dan stabilitas global $\geq 1,5$ untuk kondisi statis serta $\geq 1,1$ untuk kondisi gempa. Penurunan konsolidasi tercatat sebesar 0,071 m (S100%), masih dalam batas toleransi 10 cm. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi dinding penahan tanah kantilever dan *bored pile* Ø600 mm efektif meningkatkan stabilitas oprit pada kondisi tanah lunak di lokasi tersebut.

Kata kunci: *bored pile*, dinding penahan tanah, metode elemen hingga, oprit jembatan, tanah lunak

1. PENDAHULUAN

Pembangunan jembatan di kawasan dengan kondisi tanah lunak menghadirkan tantangan geoteknik yang kompleks, khususnya pada perencanaan oprit sebagai struktur transisi antara jalan pendekat dan badan jembatan. Oprit jembatan yang tidak direncanakan dengan baik berpotensi menimbulkan permasalahan berupa penurunan konsolidasi berlebih, ketidakstabilan lereng timbunan, serta kegagalan struktur penahan tanah (Hardiyatmo, 2011). Permasalahan ini semakin signifikan apabila lapisan tanah di bawah oprit didominasi oleh tanah kohesif dengan konsistensi lunak hingga teguh yang memiliki kapasitas daya dukung rendah dan kompresibilitas tinggi.

Jembatan Cicangor Hilir berlokasi di ruas Jalan Palumbonsari–Johar–Tegalloya (Loji), Kabupaten Karawang, Jawa Barat. Berdasarkan hasil plot terhadap peta geologi Lembar Karawang, lokasi proyek berada pada formasi geologi Qa (Endapan Sungai Muda) yang tersusun dari material pasir, lumpur, kerikil, dan kerakal. Kondisi ini mengindikasikan potensi keberadaan lapisan tanah lunak yang memerlukan penanganan khusus pada perencanaan oprit jembatan.

Perencanaan oprit pada tanah lunak umumnya memerlukan sistem perkuatan tanah dasar dan/atau struktur penahan tanah yang memadai. Dinding penahan tanah beton kantilever merupakan salah satu solusi yang lazim digunakan untuk mengatasi permasalahan perbedaan elevasi antara permukaan tanah eksisting dan elevasi timbunan oprit. Namun, pada kondisi tanah dasar yang lemah, dinding penahan tanah saja sering kali tidak mencukupi sehingga diperlukan perkuatan tambahan berupa pondasi tiang bor (*bored pile*) (Das dan Sobhan, 2014). Kombinasi sistem ini diharapkan mampu meningkatkan stabilitas keseluruhan sistem oprit terhadap berbagai mekanisme kegagalan, baik kondisi statis maupun dinamis akibat gempa.

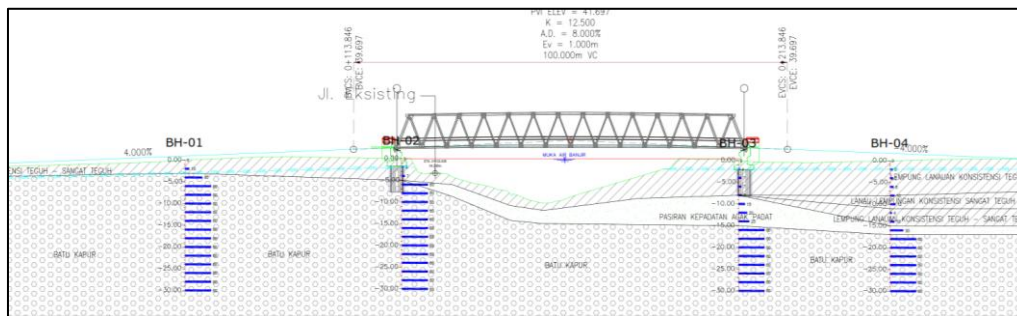
Beberapa penelitian terdahulu telah membahas perencanaan dinding penahan tanah dan pondasi tiang bor pada kondisi tanah lunak. Zhao et al. (2022) menunjukkan bahwa analisis elemen hingga dengan model tanah yang sesuai mampu memprediksi perilaku dinding penahan tanah secara akurat pada berbagai kondisi pembebanan. Sementara itu, Khalid et al. (2021) mengkaji efektivitas pondasi *bored pile* sebagai perkuatan dinding penahan tanah dan menyimpulkan bahwa konfigurasi geometri tiang sangat menentukan efektivitas

reduksi deformasi lateral. Di tingkat nasional, penelitian oleh Wulandari dan Tjandra (2021) mengkonfirmasi bahwa pendekatan elemen hingga menggunakan PLAXIS memberikan hasil yang relevan untuk perencanaan geoteknik pada tanah lunak di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas sistem dinding penahan tanah dan *bored pile* pada Oprit A1 (sisi Abutmen 1) Jembatan Cicangor Hilir berdasarkan data penyelidikan tanah aktual, mengkaji penurunan konsolidasi yang terjadi, serta melakukan verifikasi terhadap kriteria desain yang berlaku..

2. METODE PENELITIAN

2.1. Data Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah dilakukan di lokasi Jembatan Cicangor Hilir (Gambar 1) dengan melaksanakan empat titik pengujian bor teknik, yaitu BH-01, BH-02, BH-03, dan BH-04. Muka air tanah (MAT) hasil pengukuran lapangan menunjukkan kedalaman antara -2,00 m dan -3,00 m dari permukaan tanah. Analisis data SPT dan hasil uji laboratorium mencakup parameter indeks dan parameter rekayasa tanah yang meliputi kadar air, batas Atterberg, berat jenis, angka pori, indeks pemampatan, indeks rekompresi, kohesi, sudut geser dalam, dan koefisien konsolidasi (Tabel 1).



Gambar 1. Stratifikasi Pelapisan Tanah Jembatan Cicangor Hilir

Tabel 1. Resume Hasil Pengujian Laboratorium

No	Tipe Sampel	Sample No.	Kedalaman (m)	Physical Properties						
				Kadar Air, Ws (%)	Berat isi, γ_m (gr/cm ³)	Berat isi kering, γ_d (gr/cm ³)	Angka pori, e	Porositas n	Saturasi S (%)	Specific Gravity Gs (gr/cm ³)
1	DS	BH-01	5.50 – 6.00	16.73	1.88	1.61	0.69	0.41	66.32	2.72
2	UDS	BH-02	2.50 – 3.00	24.32	1.87	1.51	0.70	0.41	89.04	2.56
3	UDS	BH-03	5.50 – 6.00	43.77	1.68	1.17	1.20	0.55	93.60	2.56
4	UDS	BH-04	5.50 – 6.00	33.14	1.78	1.34	0.91	0.48	93.10	2.56

No	Tipe Sampel	Sample No.	Kedalaman (m)	Grain Size Analysis (Analisis Ukuran Butir)			
				Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
1	DS	BH-01	5.50 – 6.00	0.00	84.93	13.42	1.64
2	UDS	BH-02	2.50 – 3.00	0.00	1.84	26.03	72.13
3	UDS	BH-03	5.50 – 6.00	0.00	1.87	27.75	70.38
4	UDS	BH-04	5.50 – 6.00	0.00	1.82	23.51	74.67

No	Tipe Sampel	Sample No.	Kedalaman (m)	Atterberg Limit (Batas-Batas Atterberg)			Direct Shear	
				WL (%)	Wp (%)	Ip (%)	Class	ϕ (deg)
1	DS	BH-01	5.50 – 6.00	-	NP	-	SP	35.693
2	UDS	BH-02	2.50 – 3.00	95.28	31.02	64.26	CH	37.788
3	UDS	BH-03	5.50 – 6.00	93.15	34.51	58.64	CH	32.619
4	UDS	BH-04	5.50 – 6.00	94.38	30.94	63.44	CH	35.502

No	Kedalaman	Triaxial UU	Konsolidasi
----	-----------	-------------	-------------

	Tipe Sampel	Sample No.			ϕ (deg)	c (kg/cm ²)	e ₀	C _v (cm ² /det)	Cc (α)
			(m)						
1	DS	BH-01	5.50 – 6.00	-	-	-	0.687	5.86E-03	0.138
2	UDS	BH-02	2.50 – 3.00	22.231	0.397	0.699	5.29E-03	0.217	
3	UDS	BH-03	5.50 – 6.00	13.682	0.244	1.198	3.73E-03	0.361	
4	UDS	BH-04	5.50 – 6.00	19.871	0.311	0.911	4.94E-03	0.281	

2.2. Standar dan Acuan Perencanaan

Seluruh analisis geoteknik dalam penelitian ini mengacu pada standar dan pedoman yang berlaku, meliputi: SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik; Pedoman Kimpraswil No. Pt T-10-2002-B tentang Desain dan Konstruksi Timbunan Jalan pada Tanah Lunak; SE Dirjen Bina Marga Nomor 05/SE/Db/2017 tentang Penyampaian Desain dan Revisi Desain Jalan dan Jembatan; FHWA-NHI-10-016 tentang Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods; serta Braja M. Das (2007), Principles of Foundation Engineering edisi ketujuh.

2.3. Kriteria Desain

Kriteria desain yang diterapkan dalam penelitian ini mengacu pada ketentuan yang berlaku untuk perencanaan dinding penahan tanah dan pondasi dalam sebagai berikut.

- Perencanaan dinding penahan tanah: Faktor keamanan (FK) terhadap guling $\geq 2,0$; FK terhadap geser lateral $\geq 1,5$; FK terhadap daya dukung $\geq 3,0$; FK terhadap stabilitas global $\geq 1,5$; FK terhadap kondisi gempa $\geq 1,1$.
- Perencanaan pondasi dalam: Angka keamanan daya dukung aksial tekan kondisi statik $\geq 2,5$; kondisi gempa $\geq 1,6$; defleksi lateral kondisi layan ≤ 12 mm; defleksi lateral kondisi gempa ≤ 25 mm.
- Perencanaan timbunan oprit: FK stabilitas global $\geq 1,5$; FK gempa $\geq 1,1$; penurunan total maksimum 100 mm (setelah pelaksanaan perkerasan); perbedaan penurunan $\leq 0,6\%$.

2.4. Tahapan Analisis

Analisis geoteknik dilakukan secara sistematis dalam enam tahap, mencakup kondisi tanpa penanganan dan dengan penanganan.

- Tahap I – Interpretasi Data Tanah dan Penentuan Parameter Geoteknik. Data uji SPT dan laboratorium diinterpretasi untuk menetapkan profil stratifikasi tanah, muka air tanah, kedalaman tanah keras, dan parameter desain geoteknik (γ , c_u , ϕ , C_c , C_r , c_v , e_0), disertai pengecekan kesesuaian terhadap korelasi empiris (Ameratunga et al., 2016).
- Tahap II – Penentuan Kelas Situs dan Beban Gempa. Kelas situs ditentukan berdasarkan N-SPT rata-rata terbobot menggunakan aplikasi Pusjatan LINI, menghasilkan kelas situs SD dengan $A_s = 0,361$ g. Koefisien gempa horizontal untuk analisis pseudostatik ditetapkan sebesar $k_h = \frac{1}{2} \times PGA = 0,1805$ g.
- Tahap III – Analisis Kondisi Tanpa Penanganan. Dilakukan dua analisis untuk mengidentifikasi ketidakcukupan kondisi existing: (a) analisis tinggi timbunan izin dan kritis menggunakan rumus daya dukung tanah Terzaghi; dan (b) analisis penurunan konsolidasi 1D untuk menghitung $S_{100\%}$, $S_{90\%}$, dan $T_{90\%}$. Apabila $S_{90\%}$ melampaui toleransi 100 mm atau kecepatan penurunan tidak memenuhi kriteria, sistem oprit dinyatakan memerlukan penanganan tambahan.
- Tahap IV – Analisis Daya Dukung Aksial Pondasi *Bored Pile*. Daya dukung aksial *bored pile* Ø600 mm dihitung menggunakan metode O'Neill dan Reese (1999) serta Reese dan Wright (1977), mencakup tahanan ujung (Q_p), tahanan selimut (Q_s), *negative skin friction*, dan daya dukung izin (Q_{all}) dengan SF = 2,5 (statik) dan SF = 1,6 (gempa). Daya dukung lateral juga dianalisis untuk memverifikasi kemampuan tiang menahan gaya horizontal dari dinding penahan tanah.
- Tahap V – Analisis Stabilitas Internal Dinding Penahan Tanah. Stabilitas internal dinding beton kantilever dianalisis menggunakan ASDIP untuk ketinggian 1 m hingga 4,5 m, meliputi pengecekan guling (FK $\geq 2,0$), geser (FK $\geq 1,5$), dan daya dukung (FK $\geq 3,0$) pada kondisi layan dan gempa (FK $\geq 1,1$). Bila FK belum terpenuhi pada dinding tinggi ≥ 2 m, perkuatan *bored pile* Ø600 mm ditambahkan dan analisis diulang.
- Tahap VI – Analisis Stabilitas Global dan Penurunan Konsolidasi (MEH). Verifikasi akhir dilakukan menggunakan PLAXIS 2D dengan model tanah Soft Soil untuk tiga kondisi: statik jangka pendek (undrained), statik jangka panjang (drained), dan gempa ($k_h = 0,1805$ g). *Output* yang dievaluasi meliputi FK dari analisis *phi-c reduction*, defleksi, gaya aksial, gaya geser, momen lentur elemen *bored pile* dan dinding DPT, serta penurunan konsolidasi, kemudian dibandingkan dengan seluruh kriteria desain yang berlaku.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Interpretasi Data Tanah dan Parameter Desain

Semua profil tanah di lokasi Oprit A1 diperoleh berdasarkan dua titik bor yang paling representatif di sisi Abutmen 1, yaitu BH-01 dan BH-02. Berdasarkan hasil pengujian SPT dan pengamatan visual, profil tanah di BH-01 menunjukkan lapisan lempung lanauan berkonsistensi sangat teguh dari permukaan hingga kedalaman 4 meter ($N-SPT = 10$), kemudian beralih ke lapisan batu kapur sangat padat dengan nilai $N-SPT$ berkisar 40–110 hingga kedalaman 22 meter. Sementara itu, BH-02 memperlihatkan lapisan lempung lanauan berteguh dari permukaan hingga kedalaman 5 meter ($N-SPT = 4-7$), diikuti oleh batu kapur sangat padat ($N-SPT = 60-108$) hingga kedalaman 20 meter. Muka air tanah terukur pada kedalaman -3,00 m (BH-01) dan -2,00 m (BH-02).

Pengklasifikasian konsistensi tanah lempung mengacu pada korelasi $N-SPT$ menurut Das (2007). Nilai $N-SPT = 4-7$ dikategorikan sebagai konsistensi teguh (stiff) dengan rentang kohesi *undrained* (c_u) sekitar 50–75 kPa, dan $N-SPT = 10$ dikategorikan sebagai konsistensi sangat teguh (very stiff) dengan c_u sekitar 100 kPa. Parameter sudut geser dalam (ϕ) untuk lapisan non-kohesif diperoleh melalui korelasi Terzaghi terhadap nilai $N-SPT$.

Hasil pengujian laboratorium diinterpretasikan untuk memeriksa konsistensi parameter terhadap korelasi empiris (Ameratunga et al., 2016). Nilai indeks pemampatan (C_c) yang diperoleh dari uji konsolidasi laboratorium menunjukkan kesesuaian dengan korelasi terhadap angka pori awal (e_0), sehingga nilai dari korelasi e_0 digunakan sebagai nilai desain yang lebih konservatif. Berdasarkan klasifikasi kompresibilitas, tanah di lokasi Oprit A1 termasuk kategori *moderate of intermediate* hingga *high compressibility*, yang mengindikasikan perlunya evaluasi cermat terhadap potensi penurunan konsolidasi.

3.2. Identifikasi Kondisi Tanpa Penanganan

Sebelum menetapkan solusi penanganan, dilakukan terlebih dahulu analisis terhadap kondisi oprit tanpa intervensi struktural. Tujuannya adalah untuk membuktikan bahwa kondisi existing tidak memenuhi kriteria desain, sehingga kebutuhan sistem penanganan berupa dinding penahan tanah dan *bored pile* dapat dipertanggungjawabkan secara teknis.

a. Analisis Tinggi Timbunan Izin dan Kritis

Tinggi timbunan izin dihitung menggunakan rumus daya dukung tanah Terzaghi untuk kondisi $\phi = 0$ (beban tak terdrainase), dengan faktor keamanan $SF = 1,5$ dan berat volume timbunan $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$H_{i_{in}} = (5,7 \times c_u) / (\gamma \times SF) \quad (1)$$

Berdasarkan nilai c_u lapisan lempung di Oprit A1, tinggi timbunan izin tanpa penanganan khusus berkisar pada nilai tertentu dan tidak selalu mencukupi kebutuhan tinggi oprit rencana. Kondisi ini menegaskan perlunya sistem penahan tanah untuk mendistribusikan tekanan lateral secara struktural ke lapisan tanah yang lebih dalam. Tinggi timbunan rencana di Oprit A1 mencapai 3,758 meter. Analisis awal menunjukkan bahwa tanpa struktur penahan tanah, tekanan lateral aktif yang bekerja pada tepi timbunan berpotensi melebihi kapasitas dukung lateral tanah dasar, sehingga perlu dipasang dinding penahan tanah sebagai elemen struktural penahan tekanan tanah aktif. Analisis ini menjadi dasar pemilihan sistem dinding penahan tanah beton kantilever sebagai solusi penanganan di Oprit A1.

b. Analisis Tinggi Timbunan Izin dan Kritis

Analisis penurunan konsolidasi pada kondisi tanpa penanganan dilakukan menggunakan persamaan satu dimensi Terzaghi untuk *normally consolidated* dengan referensi data tanah BH-01.

$$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \times \log\left(\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma'}{\sigma_0'}\right) \quad (2)$$

di mana:

- S_c = penurunan konsolidasi primer (m)
- C_c = indeks pemampatan (*compression index*)
- H = tebal lapisan tanah terkonsolidasi (m)
- e_0 = angka pori awal
- σ_0' = tegangan efektif overburden awal (kN/m^2)
- $\Delta\sigma'$ = tambahan tegangan efektif akibat beban (kN/m^2)

Tinggi timbunan yang dianalisis adalah tinggi timbunan maksimum di lokasi Oprit A1 sebesar 3,758 meter. Tambahan tegangan vertikal ($\Delta\sigma$) akibat beban timbunan dihitung berdasarkan berat volume dan ketinggian timbunan rencana. Berdasarkan Tabel 2, penurunan total $S_{100\%} = 0,105$ m pada kondisi tanpa penanganan sedikit melampaui batas toleransi 0,100 m (100 mm). Meskipun nilai penurunan ini tidak jauh melampaui batas, karakteristik tanah dengan kategori *moderate to high compressibility* menuntut penanganan struktural yang tepat agar performa jangka panjang oprit dapat terjamin. Selain itu, tekanan lateral aktif dari timbunan cukup tinggi dan tidak tertahan oleh struktur apa pun, sehingga menjadi pertimbangan utama dalam penggunaan sistem dinding penahan tanah. Dengan demikian, kondisi tanpa penanganan dinyatakan tidak memenuhi kriteria desain secara keseluruhan dan penerapan sistem DPT dan *bored pile* dibenarkan secara teknis.

Tabel 2. Analisis Penurunan Konsolidasi Kondisi Tanpa Penanganan (Ref. BH-01)

Parameter Penurunan	Hasil Analisis	Batas Toleransi	Keterangan
Tinggi timbunan, H	3,758 m	–	–
Penurunan total, $S_{100\%}$	0,105 m	0,100 m	TIDAK OK
Penurunan $S_{90\%}$	0,095 m	0,100 m	OK
Waktu konsolidasi $T_{90\%}$	0,11 tahun	–	–
Kecepatan penurunan	< 25 mm/tahun	25 mm/tahun	OK

3.3 Analisis Daya Dukung Aksial Pondasi *Bored Pile* Ø600 mm

Bored pile berdiameter 600 mm dipilih sebagai elemen perkuatan dinding penahan tanah di Oprit A1. Analisis daya dukung aksial dilakukan menggunakan metode O'Neill dan Reese (1999) yang merupakan metode standar FHWA untuk pondasi *bored pile* pada tanah berlapis. Referensi data tanah yang digunakan adalah BH-02 sebagai titik yang paling representatif untuk sisi Abutmen 1. Daya dukung ultimit tiang bor merupakan penjumlahan tahanan ujung (Q_p) dan tahanan selimut (Q_s) sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 3.

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (3)$$

Untuk lapisan lempung dengan $S_u \geq 96$ kPa, tahanan ujung per satuan luas dihitung menggunakan Persamaan 4 (O'Neill dan Reese, 1999).

$$q_{max} = 9 \times S_u \quad (4)$$

Tahanan selimut pada tanah kohesif dihitung menggunakan Persamaan 5 dengan nilai faktor adhesi $\alpha = 0,55$ sesuai rekomendasi Reese dan Wright (1977).

$$f_s = \alpha \times c_u \quad (5)$$

Koreksi *negative skin friction* diperhitungkan pada lapisan lempung yang berpotensi mengalami konsolidasi akibat beban timbunan di atasnya. Daya dukung *bored pile* lateral juga dianalisis untuk memverifikasi kemampuannya menahan gaya horizontal dari dinding penahan tanah. Panjang *bored pile* bervariasi antara 6 dan 8 meter, disesuaikan dengan tinggi dinding dan besar tekanan lateral yang bekerja. Hasil analisis lateral menunjukkan bahwa panjang 8 meter memberikan kapasitas lateral memadai untuk dinding dengan ketinggian 3–4,5 meter (Tabel 3). Pengecekan efisiensi tiang kelompok (*pile group efficiency*) dilakukan menggunakan formula Converse-Labarre untuk konfigurasi tiang dengan spasi antar tiang 2,5D hingga 3D. Hasil analisis efisiensi kelompok menunjukkan bahwa kapasitas daya dukung kelompok tiang masih memenuhi angka keamanan yang disyaratkan baik untuk kondisi layan maupun kondisi gempa, sehingga konfigurasi yang direncanakan dinyatakan layak.

Tabel 3. Parameter dan Kriteria Analisis Daya Dukung *Bored Pile* Ø600 mm

Parameter	Nilai / Kriteria	Satuan
Diameter <i>bored pile</i>	600	mm
Variasi panjang tiang	6 dan 8	m
Metode perhitungan	O'Neill & Reese (1999), Reese & Wright (1977)	–

Parameter	Nilai / Kriteria	Satuan
Faktor adhesi (α) tanah kohesif	0,55	–
Angka keamanan aksial – kondisi statik	$\geq 2,5$	–
Angka keamanan aksial – kondisi gempa	$\geq 1,6$	–
Batas defleksi lateral – kondisi layan	≤ 12	mm
Batas defleksi lateral – kondisi gempa	≤ 25	mm
Status daya dukung aksial	Memenuhi kriteria	–
Status daya dukung lateral	Memenuhi kriteria	–

3.4 Analisis Stabilitas Internal Dinding Penahan Tanah dengan Perkuatan *Bored Pile*

Analisis stabilitas internal dinding penahan tanah beton kantilever dilakukan menggunakan perangkat lunak ASDIP untuk lima tipe ketinggian dinding yang direncanakan. Pada setiap tipe, pengecekan dilaksanakan terhadap tiga moda kegagalan, yaitu guling, geser lateral, dan daya dukung tanah, untuk kondisi layan (statis) dan kondisi gempa. Data tanah yang digunakan mengacu pada BH-01 sebagai data yang paling konservatif di lokasi Oprit A1.

Hasil awal analisis tanpa perkuatan *bored pile* menunjukkan bahwa untuk dinding dengan ketinggian ≥ 2 meter, faktor keamanan terhadap guling dan geser tidak mencapai nilai minimum yang disyaratkan akibat besarnya tekanan tanah aktif lateral. Faktor keamanan terhadap guling (FK_{π}) dan geser (FK^G) dihitung berdasarkan Persamaan 6 dan Persamaan 7.

$$FK_{\pi} = \Sigma M^O / \Sigma M^N \quad (6)$$

$$FK^G = \Sigma F^O / \Sigma F^G \quad (7)$$

Kondisi ini mempertegas perlunya perkuatan *bored pile* Ø600 mm untuk dinding tipe 2–3 m, 3–4 m, dan 4–4,5 m. Setelah perkuatan *bored pile* ditambahkan, seluruh moda kegagalan berhasil dipenuhi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Faktor Keamanan DPT Beton Kantilever Setelah Penanganan

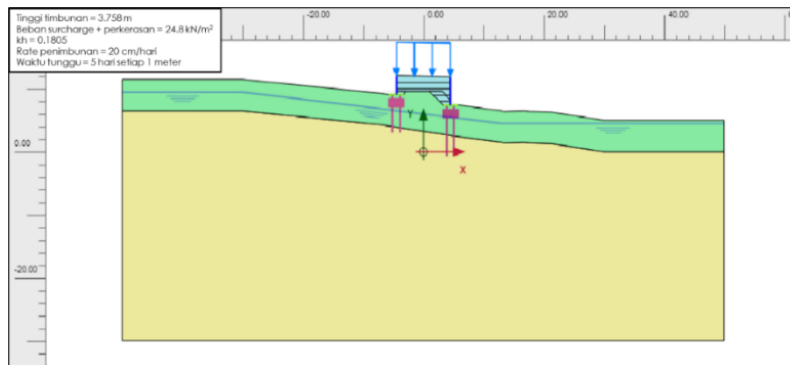
Type DPT	Perkuatan	FK Guling	FK Geser	FK Daya Dukung	FK Gempa	Status
4 – 4,5 m	<i>Bored Pile</i> Ø600 mm, L=8 m	$\geq 2,0$	$\geq 1,5$	$\geq 3,0$	$\geq 1,1$	OK
3 – 4 m	<i>Bored Pile</i> Ø600 mm, L=8 m	$\geq 2,0$	$\geq 1,5$	$\geq 3,0$	$\geq 1,1$	OK
2 – 3 m	<i>Bored Pile</i> Ø600 mm, L=6 m	$\geq 2,0$	$\geq 1,5$	$\geq 3,0$	$\geq 1,1$	OK
1 – 2 m	Tanpa perkuatan tiang	$\geq 2,0$	$\geq 1,5$	$\geq 3,0$	$\geq 1,1$	OK
0 – 1 m	Tanpa perkuatan tiang	$\geq 2,0$	$\geq 1,5$	$\geq 3,0$	$\geq 1,1$	OK

Peran *bored pile* dalam sistem dinding penahan tanah dapat dijelaskan melalui mekanisme transfer gaya. Tekanan tanah aktif bekerja pada badan dinding (stem wall) dan menghasilkan gaya lateral serta momen, kemudian ditransfer melalui *base slab* dan *pile cap* menuju *bored pile* sebagai elemen perkuatan tertanam di dalam tanah. *Bored pile* memikul sebagian besar gaya lateral tersebut melalui mobilisasi tahanan pasif tanah di sepanjang tiang, sehingga momen guling pada *base slab* dinding berkurang secara signifikan dan faktor keamanan terhadap guling meningkat. Mekanisme ini sejalan dengan penjelasan Khalid et al. (2021). Pada tanah lunak, tiang bor di bawah dinding penahan tanah mampu mereduksi deformasi lateral dinding secara efektif melalui mobilisasi tahanan lateral tanah di sekitar tiang.

3.5 Analisis Stabilitas Global dan Gaya Dalam Elemen Struktural (PLAXIS)

Verifikasi terhadap lokasi opit A1 dilakukan melalui analisis elemen hingga menggunakan program PLAXIS 2D (Gambar 2). Model numerik dibangun berdasarkan potongan melintang opit yang mencakup seluruh lapisan tanah, geometri timbunan, dinding DPT, *pile cap*, dan *bored pile* Ø600 mm. Model tanah Soft Soil dipilih untuk merepresentasikan perilaku tanah lempung lunak secara lebih realistis dibandingkan model

elastoplastik sederhana Mohr-Coulomb, khususnya dalam mensimulasikan penurunan konsolidasi jangka panjang (Brinkgreve et al., 2020).



Gambar 2. Pemodelan Oprit A1 menggunakan DPT dan Bored Pile

Beban pada model meliputi berat sendiri timbunan dan beban lalu lintas ekuivalen (surcharge) sebesar 24,8 kN/m². Analisis dilaksanakan dalam tiga tahap kondisi: (a) statik jangka pendek (undrained), merepresentasikan kondisi sesaat setelah konstruksi selesai; (b) statik jangka panjang (drained), merepresentasikan kondisi setelah konsolidasi selesai; dan (c) gempa dengan beban pseudostatik $k_h = 0,1805$ g sebagai beban ekuivalen horizontal (Tabel 5).

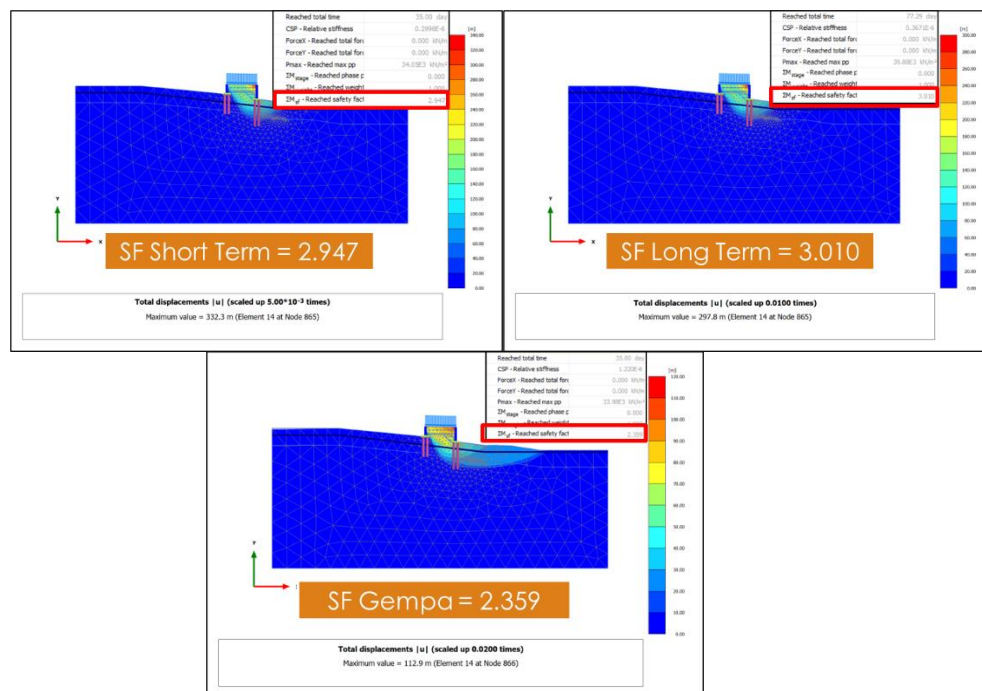
Tabel 5. Parameter Tanah dan Elemen Struktural dalam Pemodelan PLAXIS

Parameter	Satuan	Timbunan Biasa	Lempung Lanauan (0,00–30,00 m)	Batu Kapur (5,00–30,00 m)
NSPT Rata-Rata	–	6	6	60
Material Type				
Soil Model	–	Mohr Coulomb	Soft Soil	Mohr Coulomb
Drainage Type	–	<i>Drained</i>	<i>Undrained A</i>	<i>Drained</i>
Unit Weights				
γ_{unsat}	kN/m ³	16,00	18,724	17,000
γ_{sat}	kN/m ³	17,00	19,180	18,000
Stiffness				
ν_{ur}	–	–	0,330	–
C_c	–	–	0,259	–
C_s	–	–	0,058	–
e_{init}	–	–	0,699	–
E'_{ref}	kN/m ²	7.500,00	–	45.960,000
ν (nu)	–	0,33	–	0,330
Shear Strength				
c'_{ref}	kN/m ²	5,00	39,700	10,000
$Su_{,ref}$	kN/m ²	–	–	–
ϕ' (phi)	°	30,00	22,231	41,833
Permeabilities				
k_x	m/day	use defaults	0,0003383	use defaults
k_y	m/day	use defaults	0,0003383	use defaults
Overconsolidation				
OCR	–	–	3,754	–

Material	Material Type	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)	w (kN/m/m)	v
DINDING DPT	Elastic	11.250.000	189.844	3,15	0,15
PILE CAP DPT	Elastic	15.000.000	450.000	4,20	0,15

a. *Faktor Keamanan Stabilitas Global*

Angka keamanan stabilitas global (Gambar 3) diperoleh melalui prosedur *phi-c reduction* yang secara bertahap mereduksi parameter kuat geser tanah (c dan ϕ) hingga sistem mencapai kondisi runtuh. Hasil analisis memberikan nilai faktor keamanan yang seluruhnya melampaui persyaratan minimum sebagaimana disajikan pada Tabel 6. Nilai SF cukup tinggi pada kondisi statis, yaitu 2,947 *short-term* dan 3,010 *long-term*, mencerminkan efektivitas sistem DPT dan *bored pile* dalam mendistribusikan beban dan membatasi zona keruntuhan potensial. Pada kondisi gempa, penurunan SF dari 3,010 menjadi 2,359 (sekitar 21,6%) menunjukkan pengaruh beban seismik yang cukup signifikan, namun masih sangat jauh di atas batas minimum 1,1. Hasil ini konsisten dengan temuan Fatahi et al. (2021). Sistem perkuatan tiang pada tanah lunak mampu mempertahankan cadangan keamanan memadai bahkan di bawah beban gempa.



Gambar 3. Hasil Analisis Stabilitas Global

Tabel 6. Faktor Keamanan Stabilitas Global Oprit A1 (PLAXIS)

Kondisi Analisis	SF Hasil Analisis	SF Minimum	Status
Statik Jangka Pendek (undrained)	2,947	1,5	OK
Statik Jangka Panjang (drained)	3,010	1,5	OK
Gempa ($kh = 0,1805g$)	2,359	1,1	OK

b. *Gaya Dalam dan Defleksi Elemen Bored Pile Ø600 mm*

Output gaya dalam dan defleksi pada elemen *bored pile* Ø600 mm diperoleh dari analisis PLAXIS untuk ketiga kondisi pembebanan. Hasil rekapitulasi disajikan pada Tabel 7. Nilai gaya dalam ini menjadi acuan dalam perencanaan tulangan *bored pile* agar elemen tersebut mampu menahan kombinasi gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur yang bekerja.

Tabel 7. Rekapitulasi Gaya Dalam dan Defleksi Bored Pile Ø600 mm

Gaya Dalam / Defleksi	Statik JP	Statik JJP	Gempa	Satuan
Defleksi horizontal, ux	3,87	5,78	12,45	mm
Defleksi vertikal, uy	4,62	5,63	9,68	mm
Gaya aksial, N	222,7	266,4	269,6	kN
Gaya geser, Q	34,99	42,82	48,95	kN
Momen lentur, M	63,14	59,00	112,2	kN.m

Defleksi horizontal *bored pile* pada kondisi statis masih sangat jauh di bawah batas toleransi 12 mm, yakni 3,87 mm (jangka pendek) dan 5,78 mm (jangka panjang). Kondisi ini mengonfirmasi bahwa kekakuan lateral sistem DPT dan *bored pile* memadai untuk mengendalikan deformasi horizontal oprit dalam batas yang dapat diterima. Pada kondisi gempa, defleksi horizontal meningkat menjadi 12,45 mm. Nilai tersebut masih berada di bawah batas defleksi lateral pada kondisi gempa sebesar 25 mm sebagaimana ditetapkan pada kriteria desain, sehingga kinerja lateral *bored pile* tetap memenuhi persyaratan baik pada kondisi layan maupun pada kondisi gempa.

Momen lentur maksimum pada kondisi gempa sebesar 112,2 kN·m meningkat sekitar 77,7% dibandingkan dengan kondisi statik jangka pendek (63,14 kN·m). Peningkatan momen tersebut menegaskan pentingnya mempertimbangkan efek seismik dalam perencanaan tulangan *bored pile*, khususnya di kawasan Karawang dengan tingkat aktivitas seismik yang cukup tinggi. Peningkatan gaya aksial dari 222,7 kN (statis JP) menjadi 269,6 kN (gempa) juga menunjukkan adanya redistribusi beban vertikal pada tiang akibat efek *overturning* beban gempa.

c. Gaya Dalam dan Defleksi Elemen Dinding DPT

Gaya dalam dan defleksi pada elemen dinding DPT juga dievaluasi untuk memastikan integritas struktural dinding penahan tanah di bawah beban yang bekerja. Tabel 8 menyajikan rekapitulasi output PLAXIS untuk elemen dinding.

Tabel 8. Rekapitulasi Gaya Dalam dan Defleksi Dinding DPT

Gaya Dalam / Defleksi	Statik JP	Statik JJP	Gempa	Satuan
Defleksi horizontal, ux	7,70	12,16	13,82	mm
Defleksi vertikal, uy	4,45	5,26	8,71	mm
Gaya aksial, N	81,58	76,30	64,41	kN
Gaya geser, Q	67,89	78,76	88,94	kN
Momen lentur, M	95,22	100,9	142,8	kN.m

Defleksi horizontal dinding DPT pada kondisi jangka panjang (12,16 mm) lebih besar dibandingkan dengan kondisi jangka pendek (7,70 mm). Hal ini disebabkan oleh konsolidasi tanah yang secara bertahap meningkatkan tegangan efektif dan redistribusi tegangan pada dinding. Pada kondisi gempa, defleksi horizontal dinding mencapai 13,82 mm dan masih berada di bawah batas defleksi kondisi gempa sebesar 25 mm. Momen lentur pada dinding mencapai nilai maksimum 142,8 kN·m pada kondisi gempa, meningkat 50% dari kondisi statik jangka panjang (100,9 kN·m). Gaya geser pada dinding terus meningkat dari kondisi jangka pendek (67,89 kN) hingga kondisi gempa (88,94 kN), mencerminkan meningkatnya beban lateral yang harus ditahan oleh dinding akibat pengaruh percepatan gempa. Seluruh nilai gaya dalam ini menjadi input penting dalam desain penulangan struktur dinding DPT.

3.6 Analisis Penurunan Konsolidasi dengan Penanganan

Analisis penurunan konsolidasi pada kondisi setelah penanganan dilakukan menggunakan kombinasi persamaan satu dimensi Terzaghi dan hasil simulasi PLAXIS. Besar penurunan konsolidasi primer (S_c) dihitung menggunakan Persamaan 8.

$$S_c = m_v \times H \times \Delta\sigma \quad (8)$$

Dengan adanya sistem dinding penahan tanah dan *bored pile*, distribusi tegangan vertikal pada lapisan tanah di bawah timbunan menjadi lebih terkontrol, sehingga besarnya penurunan yang terjadi dapat dikurangi dibandingkan dengan kondisi tanpa penanganan.

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Analisis Penurunan Konsolidasi Oprit A1 Setelah Penanganan

Parameter Penurunan	Kondisi Tanpa Penanganan	Kondisi dengan Penanganan	Batas Toleransi	Status
Tinggi timbunan, H (m)	3,758	3,758	—	—
Penurunan total, S100% (m)	0,105	0,071	0,100	OK
Penurunan S90% (m)	0,095	0,064	0,100	OK
Penurunan sisa, Sservis (m)	—	0,027	—	—
Waktu T90% (tahun)	0,11	0,11	—	—
Perbedaan penurunan (%)	—	0,003	0,6	OK

Perbandingan antara kondisi tanpa dan dengan penanganan pada Tabel 9 menunjukkan bahwa penerapan sistem DPT dan *bored pile* berhasil menurunkan penurunan total dari 0,105 m menjadi 0,071 m, atau berkurang sekitar 32,4%. Penurunan ini terjadi karena *bored pile* mengambil alih sebagian beban vertikal dari timbunan melalui mekanisme tahanan selimut dan ujung, sehingga tegangan yang diteruskan ke lapisan lempung lunak di bawahnya menjadi lebih kecil.

Penurunan sisa setelah konstruksi (Sservis) sebesar 0,027 m (27 mm) masih dapat ditoleransi untuk perkerasan jalan. Perbedaan penurunan antartitik pengamatan hanya sebesar 0,003%, jauh di bawah batas 0,6% bagi jalan dengan kecepatan rencana kurang dari 80 km/jam. Distribusi penurunan yang seragam ini mengindikasikan bahwa sistem penanganan berhasil mengendalikan penurunan diferensial, sehingga risiko kerusakan perkerasan dan penurunan kenyamanan berkendara dapat dihindari.

Waktu konsolidasi T90% = 0,11 tahun (sekitar 40 hari) yang relatif singkat pada Oprit A1 memberikan keuntungan signifikan dari sisi pelaksanaan konstruksi. Sebagian besar penurunan sudah terjadi sebelum perkerasan dipasang, sehingga risiko kerusakan perkerasan akibat penurunan sisa sangat kecil. Kondisi ini berbeda signifikan dengan Oprit A2 yang memiliki lapisan lempung lebih tebal dan membutuhkan penanganan tambahan berupa cerucuk minipile dan timbunan ringan.

3.7 Diskusi: Efektivitas Sistem Penanganan DPT dan Bored Pile

Hasil keseluruhan analisis membuktikan bahwa kombinasi dinding penahan tanah beton kantilever dengan perkuatan *bored pile* Ø600 mm merupakan solusi penanganan yang efektif untuk Oprit A1 Jembatan Cicangor Hilir. Efektivitas sistem ini dapat ditinjau dari tiga aspek utama. Pertama, dari aspek stabilitas struktural, penambahan *bored pile* sebagai perkuatan secara nyata meningkatkan faktor keamanan terhadap guling dan geser pada dinding dengan ketinggian ≥ 2 meter. Tanpa perkuatan, dinding tersebut tidak mampu memenuhi kriteria keamanan minimum. Dengan perkuatan *bored pile*, seluruh moda kegagalan berhasil dipenuhi dengan margin memadai. Hal ini sejalan dengan temuan Zhao et al. (2022). Tiang bor di bawah dinding penahan tanah meningkatkan faktor keamanan pada tanah lunak secara signifikan melalui mekanisme transfer beban ke lapisan tanah lebih dalam. Kedua, dari aspek stabilitas global, nilai SF yang jauh melampaui batas minimum pada seluruh kondisi analisis (statis dan gempa) menggambarkan bahwa sistem penanganan memiliki cadangan keamanan yang cukup terhadap variabilitas parameter tanah dan ketidakpastian dalam pemodelan. Penggunaan model tanah Soft Soil dalam PLAXIS memberikan representasi perilaku tanah yang lebih realistis dibandingkan dengan model Mohr-Coulomb sederhana, terutama dalam memodelkan kompresibilitas dan penurunan jangka panjang tanah lempung (Fatahi et al., 2021). Ketiga, dari aspek pengendalian penurunan, sistem DPT dan *bored pile* berhasil mereduksi penurunan konsolidasi total sebesar 32,4% dan mempertahankan perbedaan penurunan pada tingkat yang sangat rendah (0,003%). Keberhasilan ini menunjukkan bahwa mekanisme transfer beban vertikal melalui *bored pile* ke lapisan tanah keras di bawahnya berjalan efektif, sehingga beban yang ditanggung oleh lapisan lempung lunak yang kompresibel menjadi lebih kecil.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis geoteknik yang telah dilakukan pada Oprit A1 (sisi Abutmen 1) Jembatan Cicangor Hilir, Karawang, dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu hasil penyelidikan tanah menunjukkan bahwa lokasi proyek berada pada formasi geologi Qa dengan lapisan lempung lunak setebal 4–6 meter. Kondisi ini mengharuskan penggunaan sistem perkuatan tanah yang memadai untuk mendukung beban oprit jembatan. Lokasi termasuk kelas situs SD (tanah sedang) dengan nilai $A_s = 0,361g$ dan $k_h = 0,1805g$ untuk analisis pseudostatik. Sistem dinding penahan tanah beton kantilever dan *bored pile* Ø600 mm pada Oprit A1 berhasil memenuhi seluruh kriteria desain. Faktor keamanan terhadap guling, geser, dan daya dukung pada seluruh tipe dinding (ketinggian 2–4,5 meter) melampaui nilai minimum yang disyaratkan untuk kondisi statis

maupun gempa. Analisis stabilitas global menggunakan PLAXIS dengan model tanah Soft Soil memberikan nilai SF statis jangka pendek sebesar 2,947, SF statis jangka panjang sebesar 3,010, dan SF gempa sebesar 2,359, seluruhnya melampaui persyaratan minimum. Analisis penurunan konsolidasi menunjukkan penurunan total $S_{100\%} = 0,071$ m dan perbedaan penurunan sebesar 0,003%, keduanya berada di bawah batas toleransi yang disyaratkan. Proses konsolidasi berlangsung relatif cepat dengan $T_{90\%} = 0,11$ tahun. Pendekatan terpadu yang menggabungkan analisis stabilitas internal dinding (ASDIP), analisis gaya dalam elemen struktural, dan analisis stabilitas global elemen hingga (PLAXIS) terbukti efektif dan komprehensif dalam merancang sistem oprit jembatan pada kondisi tanah lunak. Kombinasi dinding penahan tanah dan *bored pile* sebagai perkuatan merupakan solusi yang tepat dan efisien untuk kondisi geoteknik di lokasi studi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini, khususnya kepada Politeknik Negeri Bandung atas fasilitas akademik yang telah disediakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ameratunga, J., Sivakugan, N. dan Das, B.M. (2016) *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. New Delhi: Springer India.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017) SNI 8460:2017 – Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: BSN.
- Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S. dan Swolfs, W.M. (2020) *PLAXIS 2D Reference Manual*. Delft: Plaxis bv.
- Das, B.M. (2007) *Principles of Foundation Engineering: Seventh Edition*. Stamford: Cengage Learning.
- Das, B.M. dan Sobhan, K. (2014) *Principles of Geotechnical Engineering: Eighth Edition*. Stamford: Cengage Learning.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2017) SE Dirjen Bina Marga Nomor 05/SE/Db/2017 tentang Penyampaian Desain dan Revisi Desain Jalan dan Jembatan. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2021) Pedoman No. 08/P/BM/2021 tentang Gambar Standar Pekerjaan Jalan dan Jembatan. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Fatahi, B., Khabbaz, H. dan Fatahi, B. (2021) 'Finite element analysis of geotechnical infrastructure on soft ground: challenges and practical applications', *Geotechnical Research*, 8(2), pp. 91–115. doi: 10.1680/jgere.20.00040.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2010) *Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods*. Report FHWA-NHI-10-016. Washington D.C.: U.S. Department of Transportation.
- Guo, P., Gong, X. dan Wang, Y. (2023) 'Displacement and force analyses of braced structure of deep excavation considering unsymmetrical surcharge effect', *Computers and Geotechnics*, 155, pp. 1–14. doi: 10.1016/j.compgeo.2022.105156.
- Hardiyatmo, H.C. (2011) *Analisis dan Perancangan Fondasi II*. Edisi ke-2. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Khalid, N., Arshad, M.F., Mukri, M., Kamarudin, F. dan Abdullah, A. (2021) 'Analysis of lateral load capacity of bored pile in soft clay', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 646(1), 012035. doi: 10.1088/1755-1315/646/1/012035.
- Kimpraswil. (2002) *Pedoman Kimpraswil No: Pt T-10-2002-B – Panduan Geoteknik 4: Desain dan Konstruksi Timbunan Jalan pada Tanah Lunak*. Jakarta: Kimpraswil.
- O'Neill, M.W. dan Reese, L.C. (1999) *Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods*. FHWA-IF-99-025. Dallas: U.S. Department of Transportation.
- Reese, L.C. dan Wright, S.J. (1977) 'Drilled shaft design and construction guidelines manual: volume I', in *US Department of Transportation Report FHWA-TS-77-207*. Washington D.C.: FHWA.
- Wulandari, P.S. dan Tjandra, D. (2021) 'Analisis stabilitas oprit jembatan pada tanah lunak dengan metode elemen hingga', *Jurnal Teknik Sipil*, 18(1), pp. 45–58. doi: 10.28932/jts.v18i1.3441.
- Zhao, L., Li, L., Yang, F. dan Luo, Q. (2022) 'Numerical study on reinforced concrete retaining walls with pile foundation on soft soils', *Computers and Geotechnics*, 144, pp. 1–16. doi: 10.1016/j.compgeo.2022.104631.