

EVALUASI STABILITAS DAN DEFLEKSI SECANT PILE AKIBAT BEBAN ERECTION PYLON BAJA BERDASARKAN METODE ELEMEN HINGGA

Dhimas Adi Permana¹, Dyah Ayu Rahmawati Cupasindy², Raden Ajeng Mariyana³

Mahasiswa Manajemen Rekayasa Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang^{2,3}

adhimasadipermana@gmail.com¹, dyahayu.rahmawati@polinema.ac.id², raden.ajeng@polinema.ac.id³

ABSTRAK

Pembangunan Jembatan Kaca Bendungan Sukamahi di Megamendung, Kabupaten Bogor menghadapi tantangan topografi berupa perbedaan elevasi ekstrem yang menuntut dinding penahan tanah berupa secant pile mampu menahan beban tambahan (transient load) akibat erection pylon steel box dan tower crane. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi stabilitas dinding secant pile melalui studi parametrik tiga variasi diameter (1,2 m; 1,0 m; 0,9 m) menggunakan analisis empiris dan pemodelan elemen hingga PLAXIS 2D, mengacu pada SNI 8460:2017. Hasil menunjukkan seluruh variasi aman terhadap guling dan geser dengan margin besar, namun kontrol daya dukung kelompok tiang dan analisis numerik menjadi faktor pembatas. Diameter 1,0 m dan 0,9 m tidak memenuhi syarat daya dukung kelompok maupun SF Global $\geq 1,5$, dan diameter 0,9 m melampaui batas izin defleksi 77 mm (81,45 mm). Diameter 1,2 m dengan kedalaman tertanam 23 m terbukti sebagai dimensi optimal yang memenuhi seluruh kriteria keamanan struktural

Kata kunci : secant pile, PLAXIS 2D, stabilitas, defleksi

ABSTRACT

The construction of the Sukamahi Dam Glass Bridge in Megamendung, Bogor Regency faces topographical challenges in the form of extreme elevation differences that require a soil retaining wall in the form of a secant pile capable of withstanding additional loads (transient load) due to the erection of pylon steel boxes and tower cranes. This study aims to evaluate the stability of the secant pile wall through a parametric study of three variations in diameter (1.2 m; 1.0 m; 0.9 m) using empirical analysis and element modeling up to PLAXIS 2D, referring to SNI 8460:2017. The results showed that all variations were safe against rolls and shear by large margins, but the control of the bearing capacity of the pole groups and numerical analysis were limiting factors. The diameters of 1.0 m and 0.9 m do not meet the group's carrying capacity or SF Global ≥ 1.5 requirements, and the diameter of 0.9 m exceeds the deflection clearance limit of 77 mm (81.45 mm). A diameter of 1.2 m with an embedded depth of 23 m proves to be the optimal dimension that meets all structural safety criteria

Keywords : secant pile, PLAXIS 2D, stability, deflection.

1. PENDAHULUAN

Menurut [1] Sektor pariwisata merupakan penggerak ekonomi nasional yang mampu menciptakan lapangan kerja serta meningkatkan Pendapatan Asli Daerah (PAD). Sejalan dengan kebijakan Kemenko Bidang Perekonomian dan Kementerian Pekerjaan Umum (2025), pembangunan Jembatan Kaca Bendungan Sukamahi di Megamendung, Kabupaten Bogor, hadir sebagai ikon ekowisata baru sekaligus solusi pemecah arus kemacetan di jalur Gadog–Cipayung. Namun, lokasi pembangunan yang memiliki perbedaan elevasi ekstrem pada struktur bawah menuntut sistem perkuatan tanah yang mumpuni guna mencegah risiko

kelongsoran akibat beban vertikal maupun lateral selama masa konstruksi.

Secara teknis, pembangunan jembatan ini menghadapi tantangan topografi berupa perbedaan elevasi yang signifikan pada struktur bawah jembatan. Kondisi ini menimbulkan risiko kelongsoran akibat terganggunya stabilitas tanah oleh beban vertikal maupun beban luar tambahan selama konstruksi. Oleh karena itu, diperlukan Dinding Penahan Tanah (DPT) yang mampu menahan tekanan tanah lateral dan menjaga stabilitas bangunan dari risiko guling maupun geser sesuai standar SNI 8460:2017 [2].

Struktur secant pile dipilih sebagai dinding penahan tanah (DPT) karena keunggulannya dalam keterbatasan lahan serta

efisiensi mobilisasi alat berat yang terintegrasi dengan fondasi *pylon* utama. Tantangan teknis muncul ketika struktur ini harus menahan beban tambahan (*transient load*) yang tidak direncanakan pada tahap awal, yaitu beban *erection pylon steel box* dan aktivitas *tower crane*. Mengacu pada SNI 8460:2017, faktor keamanan (SF) harus dipastikan di atas 1,5 untuk menghindari kegagalan struktur pada momen kritis pengangkatan *pylon*.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi stabilitas dinding *secant pile* melalui studi parametrik terhadap variasi dimensi diameter. Untuk mengetahui nilai faktor keamanan terhadap geser, guling, daya dukung, serta besarnya defleksi yang terjadi. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan dimensi optimal yang memenuhi standar keamanan teknis sekaligus memberikan tinjauan dari sisi metode pelaksanaan dan rencana anggaran biaya pada proyek tersebut.

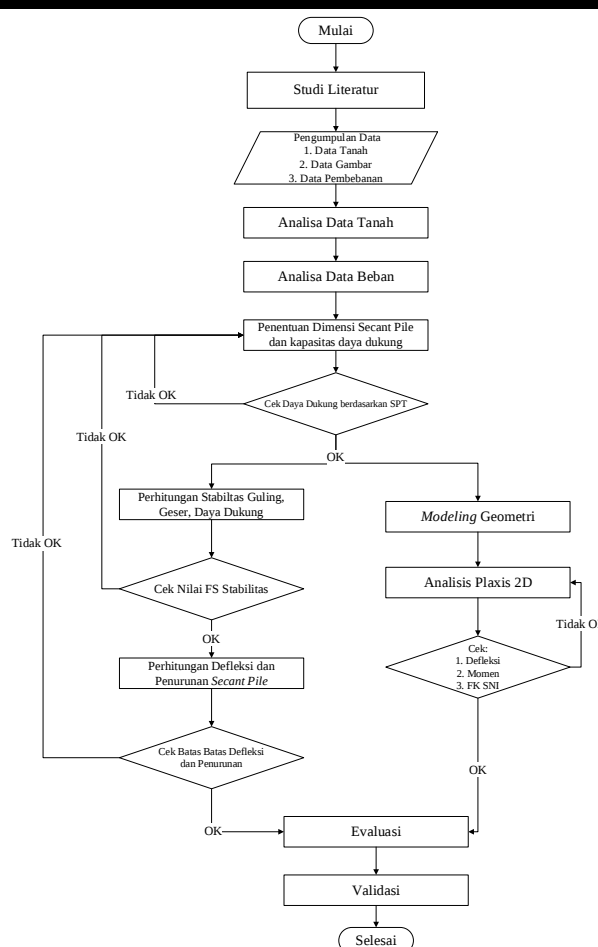
2. METODE

Penelitian ini diawali dengan pengumpulan data primer dan sekunder yang meliputi data uji SPT, hasil pengujian laboratorium, gambar *detail engineering design* (DED), serta data beban pekerjaan *erection pylon*. Data tersebut kemudian dianalisis dan dikoreksi untuk menentukan parameter tanah dan beban yang akan digunakan dalam pemodelan. Berdasarkan literatur dan hasil pengeboran, ditentukan variasi diameter tiang secant yang akan diuji stabilitasnya. Tahap selanjutnya adalah pembuatan model geometri dan penginputan data tanah serta beban ke dalam perangkat lunak PLAXIS 2D untuk dilakukan *running analysis*. PLAXIS 2D merupakan perangkat lunak berbasis elemen hingga yang dirancang khusus untuk analisis numerik geoteknik untuk merepresentasikan kondisi lapangan, diterapkan kondisi batas di mana sisi kiri dan kanan model dikunci secara horizontal (perpindahan nol) dan hanya diizinkan bergerak secara vertikal [3]. Seluruh hasil analisis diinterpretasikan dalam bentuk perbandingan, lalu dilakukan pengecekan batas keamanan sesuai SNI 8460:2017 terkait stabilitas dinding penahan tanah[4]. Dengan Tabel 1.

Tabel 1. Persyaratan Stabilitas Dinding *Secant Pile*

Faktor keamanan yang disyaratkan	Nilai minimum
Terhadap guling	2
Terhadap geser	1,5
Terhadap daya dukung	3
Stabilitas global	1,5
Terhadap gempa	1,1

Sumber: SNI 8460:2017



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Hasil dari metode empiris dan PLAXIS 2D kemudian divalidasi menggunakan perhitungan manual berbasis *Microsoft Excel*. Dilanjutkan pengecekan untuk batas maksimum defleksi dinding *secant pile* sebagaimana persyaratan tersebut sebagai bentuk persyaratan dalam SNI 8460:2017, dengan Tabel 2.

Tabel 2. Persyaratan Batas Defleksi Tiang

Batas maksimum deformasi lateral pada dinding	Lokasi gedung dan infrastruktur eksisting terdekat			
	Zona 1 ($x/H < 1$)	Zona 2 ($1 \leq x/H \leq 2$)	Zona 3 ($x/H > 2$)	
			Tanah Tipe A	Tanah Tipe B
Batas izin maksimum deformasi ($\delta w/H$)	0,5%	0,7%	0,7%	1,0%

Sumber: SNI 8460:2017

Analisis metode empiris dilakukan untuk mengevaluasi parameter stabilitas yang mencakup faktor keamanan (SF)

global, stabilitas guling, geser serta daya dukung dengan formula stabilitas terhadap guling sebagai berikut:

$$Fgl = \frac{\sum Mw}{\sum Mgl} \geq 2 \quad (1)$$

$$Fgs = \frac{\sum RH}{\sum PH} \geq 1,5 \quad (2)$$

$$FDd = \frac{\sum Qu}{\sum Qall} \geq 3 \quad (3)$$

Dengan:

Fgl = faktor keamanan terhadap guling

Fgs = faktor kemananan terhadap geser

FDd = faktor keamanan terhadap daya dukung

Mw = momen penahan (kN/m)

Mgl = momen pengguling (kN/m)

Rh = gaya penahan (kN)

Ph = gaya penggeser (kN)

Qu = daya dukung ultimit (kN)

Qall = daya dukung yang izinkan (kN)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Data Tanah

Analisis data tanah menggunakan hasil pengujian SPT (*Standard Penetration Test*) pada titik BH-03 Zona P1 Proyek Jembatan Kaca Bendungan Sukamahi tahun 2024. Profil stratigrafi tanah hingga kedalaman 40,15 meter menunjukkan variasi sebagai berikut:

- 1) 0,00 – 7,95 m: Dominasi material lanau berlempung (*clayey silt*) dengan konsistensi lunak hingga sedang (NSPT 3–6)
- 2) 7,95 – 12,00 m: Transisi menuju material *clayey sandy silt* yang lebih stabil dengan peningkatan nilai NSPT ke angka 24–25
- 3) 12,00 – 40,15 m: Lapisan tanah sangat keras/batuan dasar (*boulder, sandstone*, dan pasir kerikilan padat) dengan nilai NSPT maksimal 60 secara kontinu

B. Parameter Struktur dan Pembebanan

Penelitian ini mengevaluasi tiga variasi dimensi *secant pile* dengan mutu beton f'c 30 Mpa:

- 1) Variasi 1: Diameter 1,2 m, kedalaman 23 m
- 2) Variasi 2: Diameter 1,0 m, kedalaman 18 m
- 3) Variasi 3: Diameter 0,9 m, kedalaman 18 m

Berikut adalah uraian mendalam mengenai jenis-jenis pembebanan yang bekerja pada struktur *secant pile* pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Beban

Nama Beban	Jumlah Beban	Satuan
Beban Capping Beam	64,8	kN/m ²
Beban Permukaan	10	kN/m ²

Beban <i>Erection Pylon</i>	142	kN/m ²
Beban Lalu Lintas	12	kN/m ²
Beban Gempa Aks. Y	0,2628	g
Beban Gempa Aks. X	0,1314	g

Sumber: Hasil Analisis

C. Analisis Daya Dukung dan Penurunan Secara Empiris

1) Daya Dukung Tiang Tunggal

Evaluasi daya dukung dilakukan menggunakan metode Meyerhof (1976) berbasis data N-SPT, dengan faktor keamanan FS = 3 sesuai SNI 8460:2017. Total beban vertikal kerja per tiang (Qv) sebesar 3.732,48 kN dibandingkan terhadap daya dukung izin (Qall) pada masing-masing variasi diameter, dengan hasil sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Daya Dukung Tiang Tunggal

Diameter	Qu (kN)	Qall (kN)	Qv (kN)	Ket.
1,2 m	25.254,06	8.418,02	3.732,48	Aman
1,0 m	19.132,29	6.377,43	3.732,48	Aman
0,9 m	15.692,26	5.230,75	3.732,48	Aman

Sumber: Hasil Analisis

2) Daya Dukung Tiang Kelompok

Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa secara individu, ketiga variasi diameter tiang memiliki daya dukung izin yang jauh melebihi beban kerja yang bekerja, sehingga seluruhnya dinyatakan aman ditinjau dari kapasitas tiang tunggal. Namun demikian, karena konfigurasi *secant pile* tersusun secara berdempetan (spasi antar pusat tiang sama dengan diameter tiang), interaksi antar tiang menimbulkan reduksi kapasitas kelompok yang dihitung menggunakan persamaan efisiensi Converse–Labarre. Hasil evaluasi daya dukung kelompok tiang disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Daya Dukung Kelompok

Diameter	n	(Eg)	Qug (kN)	Qall,g (kN)	ΣQv (kN)	Ket.
1,2 m	48	0,5104	618.724	206.241	179.159	Aman
1,0 m	58	0,5086	564.402	188.134	216.483	Tidak Aman
0,9 m	64	0,5078	509.998	169.999	238.878	Tidak Aman

Sumber: Hasil Analisis

Tabel 4 memperlihatkan temuan penting bahwa meskipun kapasitas tiang tunggal aman pada seluruh variasi, kontrol daya dukung kelompok justru menjadi kriteria pembatas yang menggugurkan variasi diameter 1,0 m dan 0,9 m. Hal ini terjadi karena semakin kecil diameter tiang, semakin banyak jumlah tiang yang dibutuhkan untuk menutup panjang dinding sepanjang 57,6 m, sehingga total beban kelompok bertambah lebih cepat dibandingkan pertambahan kapasitas kelompoknya sendiri. Dengan demikian, variasi

diameter 1,2 m menjadi satu-satunya konfigurasi yang memenuhi syarat daya dukung kelompok tiang.

3) Kontrol Penurunan Tiang

Kontrol penurunan (*settlement*) dievaluasi menggunakan metode semi-empiris Vesic (1977) yang membagi penurunan total tiang tunggal menjadi komponen kompresi elastis tubuh tiang, penurunan akibat beban ujung tiang, dan penurunan akibat beban selimut tiang. Penurunan kelompok tiang diturunkan dari penurunan tiang tunggal dengan mempertimbangkan rasio dimensi kelompok. Hasil kontrol penurunan disajikan pada Tabel 6, dengan batas izin penurunan maksimum sebesar 40 mm sesuai SNI 8460:2017

Tabel 6. Rekapitulasi Penurunan Tiang Tunggal dan Kelompok

Variasi Diameter	Penurunan Tunggal S_e (mm)	Penurunan Kelompok S_{eGroup} (mm)	Penurunan Izin S_{izin} (mm)	Ket.
1,2 m	21,60	21,60	40	Aman
1,0 m	24,69	24,69	40	Aman
0,9 m	27,61	27,61	40	Aman

Sumber : Hasil Analisis

D. Analisis Stabilitas Metode Secara Empiris

Stabilitas dinding *secant pile* ditinjau terhadap dua mekanisme keruntuhan rigid-body, yaitu guling (*overturning*) dan geser (*sliding*), sesuai persyaratan faktor keamanan pada SNI 8460:2017 yakni FS guling ≥ 2 dan FS geser $\geq 1,5$. Momen pengguling bersumber dari tekanan tanah aktif dan beban *surchage erection*, sedangkan momen penahan bersumber dari tekanan tanah pasif dan berat sendiri struktur. Gaya pendorong pada kontrol geser berasal dari tekanan tanah aktif, sementara gaya penahan diperoleh dari tekanan tanah pasif pada sisi galian ditambah gaya adhesi tanah–dinding. Dari hasil perhitungan empiris pada setiap variasi dimensi didapatkan rekapitulasi kedua kontrol tersebut disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Rekapitulasi Stabilitas Guling dan Geser Dinding *Secant pile*

Diameter	FS Guling (≥ 2)	Ket.	FS Geser ($\geq 1,5$)	Ket.
1,2 m	5,08	Aman	9,17	Aman
1,0 m	4,81	Aman	8,93	Aman
0,9 m	4,66	Aman	8,82	Aman

Sumber: Hasil Analisis

Hasil pada Tabel 7 menunjukkan bahwa penambahan diameter *secant pile* dari 0,9 m menjadi 1,2 m meningkatkan FS guling sebesar 5,61% dan FS geser sebesar 3,96%. Meskipun terdapat tren kenaikan FS yang konsisten seiring bertambahnya diameter, seluruh variasi menghasilkan nilai FS yang jauh melampaui batas minimum yang disyaratkan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa stabilitas guling dan

geser tidak menjadi parameter yang membedakan kelayakan antar variasi diameter, karena geometri dan kedalaman tertanam dinding secara keseluruhan telah cukup untuk menahan gaya dorong tanah aktif melalui mekanisme kesetimbangan gaya kaku (*rigid limit equilibrium*), sehingga diperlukan kriteria evaluasi lain yang lebih sensitif untuk membedakan performa antar variasi, yaitu analisis deformasi dan stabilitas global berbasis metode elemen hingga.

E. Analisis Stabilitas Metode Secara Numerik

Analisis numerik dilakukan menggunakan metode elemen hingga pada PLAXIS 2D untuk mengevaluasi perilaku defleksi dan stabilitas global dinding *secant pile* yang tidak dapat ditangkap oleh pendekatan *rigid-body* pada analisis empiris. Kedelapan belas lapisan tanah dimodelkan dengan model konstitutif Mohr–Coulomb dengan tipe drainase undrained maupun *non-porous* menyesuaikan karakteristik masing-masing lapisan, sedangkan elemen *secant pile* dimodelkan sebagai material elastis-linier dengan mutu beton f'_c 30 MPa sesuai DED perencanaan. Parameter kekakuan aksial (EA) dan kekakuan lentur (EI) untuk masing-masing variasi diameter disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Parameter Kekakuan Elemen *Secant pile*

Diameter	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)	Berat (w, kN/m/m)
1,2 m	$40,67 \times 10^6$	$4,887 \times 10^6$	1,071
1,0 m	$26,61 \times 10^6$	$1,36 \times 10^6$	0,8922
0,9 m	$19,69 \times 10^6$	$960,4 \times 10^3$	0,6029

Sumber: Hasil Analisis

Simulasi dilakukan melalui pentahapan konstruksi (*staged construction*) yang meliputi Kondisi Awal, Sebelum Terpasang, *Secant pile* Terpasang, Galian 1 hingga Galian 3, *Erection* (aktivasi beban *pylon* baja), Gempa (aktivasi beban pseudo-statis), dan tahap *Safety factor* menggunakan metode *Phi-C Reduction* untuk memperoleh nilai faktor keamanan global. Diskritisasi model menggunakan mesh dengan kerapatan medium dan opsi enhanced mesh refinement pada zona interface tanah–*pile*, dengan ukuran elemen rata-rata 2,972 m. Titik kontrol defleksi ditetapkan pada elevasi puncak dinding (node kritis) untuk merepresentasikan pergeseran horizontal (u_x) maksimum akibat beban *erection pylon* baja. Hasil defleksi maksimum dan faktor keamanan global maupun kondisi gempa untuk setiap variasi diameter disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Defleksi dan Faktor Keamanan Hasil PLAXIS 2D

Diameter	Defleksi (mm)	SF Global ($\geq 1,5$)	Ket. SF Global
1,2 m	42,55	1,52	Memenuhi

1,0 m	70,75	1,42	Tidak Memenuhi
0,9 m	81,45	1,32	Tidak Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis

Tabel 9 menunjukkan bahwa nilai defleksi meningkat secara tidak proporsional (tidak linear) terhadap penurunan diameter tiang. Pengurangan diameter dari 1,2 m menjadi 1,0 m meningkatkan defleksi sekitar 66%, sedangkan pengurangan menjadi 0,9 m meningkatkan defleksi hingga sekitar 92% dibandingkan variasi diameter 1,2 m. Fenomena ini konsisten dengan sensitivitas kekakuan lentur (EI) elemen pile terhadap diameter, di mana pengurangan diameter secara relatif kecil berdampak besar terhadap penurunan momen inersia penampang sehingga meningkatkan defleksi lateral secara signifikan. Selain itu, hasil *Phi-C Reduction* memperlihatkan bahwa syarat $SF_{Global} \geq 1,5$ hanya terpenuhi pada variasi diameter 1,2 m, sementara variasi 1,0 m dan 0,9 m tidak memenuhi syarat tersebut meskipun SF kondisi gempa keduanya masih di atas batas minimum 1,1.

F. Analisis Defleksi

Batas izin defleksi lateral ditentukan berdasarkan SNI 8460:2017 dengan mempertimbangkan tipe tanah galian dan rasio jarak bangunan eksisting terhadap kedalaman galian (x/H). Berdasarkan data proyek, jarak bangunan eksisting (x) sebesar 68,14 m dan kedalaman galian (H) sebesar 8,69 m menghasilkan rasio x/H sebesar 7,84 (> 2), sehingga lokasi tinjauan dikategorikan dalam Zona 3 dengan nilai defleksi izin (δ_w) sebesar 0,7% terhadap kedalaman galian, atau setara dengan batas izin defleksi maksimum sebesar 77 mm. Nilai batas ini kemudian digunakan untuk memvalidasi hasil defleksi maksimum dari simulasi PLAXIS 2D pada Tabel 8.

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak bangunan (x)} &= 68,14 \text{ m} \\
 \text{Kedalaman galian (H)} &= 8,69 \text{ m} \\
 \text{Rasio Jarak (x/H)} &= \frac{68,14}{8,69} \\
 &= 7,84 > 2 \text{ (Zona 3)} \\
 \delta_w \text{ Zona 3} &= 0,7 \% \\
 \text{Batas Izin Defleksi} &= 0,7 \% \times 11 \\
 \text{Max} &= 0,07700 \text{ meter} \\
 &= 77 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Meskipun secara stabilitas manual semua variasi dinyatakan aman, analisis elemen hingga menunjukkan perbedaan signifikan pada perilaku deformasi. Batas izin defleksi maksimum yang ditetapkan adalah 77 mm. Berdasarkan analisis defleksi pada Tabel 10.

Tabel 10. Validasi Hasil Defleksi Terhadap Batas Izin SNI 8460:2017

Diameter	Deformasi (mm)	Keterangan
1,2 m	42,55	Aman
1,0 m	70,75	Aman
0,9 m	81,45	Tidak Aman

Sumber: Hasil Analisis

Hasil validasi menunjukkan bahwa variasi diameter 1,2 m memberikan margin keamanan defleksi yang besar terhadap batas izin, variasi 1,0 m masih memenuhi batas izin namun dengan margin yang relatif tipis (sekitar 8% di bawah batas), sedangkan variasi 0,9 m melampaui batas izin defleksi sebesar $\pm 5,8\%$, sehingga dinyatakan tidak aman ditinjau dari kriteria deformasi lateral.

G. Interpretasi Hasil

Dari semua hasil memperlihatkan bahwa meskipun seluruh variasi diameter dinyatakan aman apabila hanya ditinjau dari kriteria stabilitas *rigid-body* berupa guling dan geser, dengan margin keamanan yang sangat besar terhadap batas minimum SNI 8460:2017, hasil kontrol daya dukung kelompok tiang serta analisis deformasi dan stabilitas global melalui PLAXIS 2D justru menjadi faktor pembatas yang menentukan kelayakan desain secara keseluruhan. Variasi diameter 1,0 m dan 0,9 m tidak memenuhi syarat daya dukung kelompok akibat reduksi efisiensi interaksi antar tiang yang berdempetan, sekaligus tidak memenuhi syarat $SF_{Global} \geq 1,5$ pada analisis *Phi-C Reduction*. Variasi diameter 0,9 m bahkan menghasilkan defleksi lateral yang melampaui batas izin SNI 8460:2017 sebesar 77 mm. Dengan demikian, variasi diameter 1,2 m dengan kedalaman tertanam 23 m merupakan satu-satunya konfigurasi yang memenuhi seluruh kriteria evaluasi, baik daya dukung tunggal dan kelompok, penurunan, stabilitas guling dan geser, stabilitas global, stabilitas kondisi gempa, maupun batas izin defleksi lateral. Dengan hasil pada Tabel 11.

Tabel 11. Rekapitulasi Hasil Analisis

Diameter	FS Guling (≥ 2)	FS Geser ($\geq 1,5$)	SF Global ($\geq 1,5$)	SF Gempa ($\geq 1,1$)	Defleksi (mm)	Q_{allG} Kelompok
1,2 m	5,08	9,17	1,52	1,52	42,55	Aman
1,0 m	4,81	8,93	1,42	1,45	70,75	Tidak Aman
0,9 m	4,66	8,82	1,32	1,32	81,45	Tidak Aman

Sumber: Hasil Analisis

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis terhadap beban *erection* didapatkan hasil sebagai berikut:

1. Ditinjau dari kapasitas dukung tiang tunggal, ketiga variasi diameter (1,2 m; 1,0 m; 0,9 m) dinyatakan aman terhadap beban kerja. Namun, kontrol daya dukung kelompok tiang menjadi kriteria pembatas pertama — hanya diameter 1,2 m yang aman, sedangkan 1,0 m dan 0,9 m tidak memenuhi syarat akibat reduksi efisiensi interaksi antar tiang yang berdempetan.
2. Stabilitas guling dan geser secara empiris (SNI 8460:2017) aman pada seluruh variasi diameter dengan margin yang sangat besar (FS guling 4,66–5,08; FS geser 8,82–9,17), sehingga kedua parameter ini tidak cukup sensitif untuk membedakan kelayakan antar variasi dimensi.
3. Hasil PLAXIS 2D menunjukkan bahwa defleksi meningkat tajam seiring mengecilnya diameter tiang (42,55 mm pada D=1,2 m; 70,75 mm pada D=1,0 m; 81,45 mm pada D=0,9 m), dan syarat SF Global $\geq 1,5$ dari analisis numerik hanya terpenuhi pada diameter 1,2 m (1,52), sementara diameter 1,0 m (1,42) dan 0,9 m (1,32) tidak memenuhi.
4. Terhadap batas izin defleksi lateral SNI 8460:2017 (77 mm), diameter 0,9 m melampaui batas (81,45 mm) sehingga dinyatakan tidak aman, sedangkan diameter 1,0 m masih memenuhi namun dengan margin tipis.
5. Dengan demikian, diameter 1,2 m dan kedalaman tertanam 23 m ditetapkan sebagai dimensi optimal, karena merupakan satu-satunya variasi yang memenuhi seluruh kriteria: daya dukung tunggal & kelompok,

penurunan, stabilitas guling & geser, stabilitas global, stabilitas gempa, serta batas izin defleksi akibat beban *erection pylon* baja.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kemenko Bidang Perekonomian, “Pemerintah Terus Mendorong Pengembangan Pariwisata Indonesia Sebagai Penggerak Pertumbuhan Ekonomi.” [Daring]. Tersedia pada: <https://ekon.go.id/publikasi/detail/6145/pemerintah-terus-mendorong-pengembangan-pariwisata-indonesia-sebagai-penggerak-pertumbuhan-ekonomi>
- [2] A. Afriansyah, F. Hariati, F. M. L. Taqwa, dan A. Alimuddin, “Analisis Stabilitas Dan Biaya Perencanaan Dinding Penahan Tanah Tipe Bronjong di Sungai Ciliwung (Studi Kasus: Ruas Legok Nyenang Rt.01/03, Desa Leuwimalang, Kecamatan Cisarua, Kabupaten Bogor),” *J. Komposit*, vol. 7, no. 1, hal. 11–16, 2023, doi: 10.32832/komposit.v7i1.7369.
- [3] G. M. S. Abdullah, “Using Plaxis 2D finite element modeling to assess bearing capacity of Sultana’s soil in Najran Region, Kingdom of Saudi Arabia,” *Mater. Today Proc.*, vol. 49, hal. 2679–2687, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.051>.
- [4] SNI 8460:2017, *Persyaratan Perancangan Geoteknik*, vol. 8460. Indonesia, 2017, hal. 1–323. [Daring]. Tersedia pada: www.bsn.go.id