

ANALISIS NUMERIK PERKUATAN LERENG DENGAN *SHEET PILE*: STUDI KASUS PLTMG PONTIANAK PEAKER MENGGUNAKAN PLAXIS 2D DAN GEO5

Naufaldy Febryant Hilmansyah^{1*}, Ricky Harianja², Yanda Dwira Firman Z³

^{1,2,3}Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Kawasan IPSC Sentul, Kabupaten Bogor, Jawa Barat

*Email: naufaldyant@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini membandingkan analisis stabilitas lereng dengan perkuatan sheet pile menggunakan metode elemen hingga (PLAXIS 2D V8.2) dan keseimbangan batas (GEO5) di kawasan PLTMG Pontianak Peaker. Simulasi dilakukan pada dua titik kritis, S-02 dan S-03, dengan tiga kondisi hidrologi: air surut, normal, dan pasang. Hasil menunjukkan bahwa pada titik S-02, faktor keamanan meningkat dari 3,93 saat air surut menjadi 5,61 saat air pasang. Sementara itu, pada titik S-03, pemasangan sheet pile dengan kedalaman lebih optimal menghasilkan faktor keamanan tertinggi sebesar 6,34 pada kondisi air pasang, dibandingkan dengan 4,38 saat air surut dan 4,91 saat air normal. Analisis perbandingan menunjukkan bahwa PLAXIS 2D menghasilkan estimasi faktor keamanan yang lebih konservatif dibandingkan GEO5 karena kemampuannya menangkap deformasi tanah dan distribusi tegangan yang lebih kompleks melalui metode phi/c reduction. Kontribusi utama penelitian ini adalah penyediaan analisis kuantitatif terhadap efektivitas sheet pile dalam meningkatkan stabilitas lereng serta evaluasi mengenai kelebihan dan keterbatasan kedua metode dalam menangani variasi hidrologi. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan standar desain perkuatan lereng yang lebih adaptif, terutama untuk daerah dengan fluktuasi muka air yang tinggi.

Kata kunci: GEO5, PLAXIS, faktor keamanan, turap, stabilitas lereng

Abstract

This study compares slope stability analyses reinforced with sheet piles using the finite element method (PLAXIS 2D V8.2) and the limit equilibrium method (GEO5) in the PLTMG Pontianak Peaker area. Simulations were conducted at two critical points, S-02 and S-03, under three hydrological conditions: low tide, normal, and high tide. Results indicate that at point S-02, the safety factor increased from 3.93 during low tide to 5.61 during high tide. At point S-03, installing sheet piles at a more optimal depth resulted in the highest safety factor of 6.34 during high tide, compared to 4.38 during low tide and 4.91 under normal conditions. Comparative analysis shows that PLAXIS 2D provides more conservative safety factor estimates than GEO5 due to its ability to capture more complex soil deformations and stress distributions through the phi/c reduction method. The main contribution of this research is providing a quantitative analysis of the effectiveness of sheet piles in enhancing slope stability, as well as an evaluation of the advantages and limitations of both methods in addressing hydrological variations. These findings can serve as a basis for developing more adaptive slope reinforcement design standards, especially for areas with high water level fluctuations.

Keywords: GEO5, PLAXIS, safety factor, sheet pile, slope stability

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, isu stabilitas lereng telah menjadi perhatian utama dalam dunia teknik sipil, mengingat potensi kegagalan lereng yang dapat menyebabkan kerugian ekonomi besar dan mengancam keselamatan jiwa (Greco et al., 2023). Kondisi geoteknik yang kompleks dan fluktuasi muka air yang ekstrem di wilayah seperti PLTMG Pontianak Peaker—yang terletak di koordinat 0°3'37.79" Lintang Utara dan 109°12'14.62" Bujur Timur—menjadi tantangan serius dalam mendesain sistem perkuatan lereng yang andal. Kompleksitas tersebut muncul dari variasi sifat tanah, distribusi tegangan yang tidak homogen, serta perubahan kondisi hidrologi yang drastis antara fase air surut, normal, dan pasang (Sajali et al., 2019).

Penelitian terdahulu yang menggunakan GEO5 telah memberikan kontribusi dalam menganalisis efektivitas *sheet pile* sebagai metode perkuatan lereng (Bokade et al., 2021). Namun, metode GEO5 yang berbasis pada pendekatan keseimbangan batas memiliki keterbatasan dalam menangkap perilaku nonlinier tanah, terutama pada kondisi hidrologi yang fluktuatif (Padhy et al., 2024). Hal ini mengakibatkan estimasi nilai *Safety Factor* (SF) yang belum sepenuhnya akurat dalam merepresentasikan interaksi kompleks antara beban struktural dan sifat material tanah.

Gap penelitian yang ada adalah kurangnya studi komparatif yang secara menyeluruh membandingkan hasil analisis stabilitas lereng antara metode konvensional (GEO5) dengan simulasi numerik berbasis elemen hingga (*finite element method*), seperti yang diimplementasikan dalam PLAXIS 2D V8.2. PLAXIS, dengan kemampuannya untuk memodelkan respons nonlinier dan interaksi tanah-struktur secara lebih detail, menawarkan potensi untuk memberikan estimasi SF yang lebih konservatif dan representatif terhadap kondisi lapangan (Nalawade et al., 2024).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengisi gap tersebut dengan membandingkan hasil analisis antara PLAXIS 2D dan GEO5, sehingga dapat mengidentifikasi kelebihan dan keterbatasan masing-masing metode dalam variasi kondisi hidrologi dan parameter tanah. Pendekatan komparatif ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam pengembangan standar desain perkuatan lereng yang lebih optimal dan adaptif terhadap kondisi lingkungan yang dinamis.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

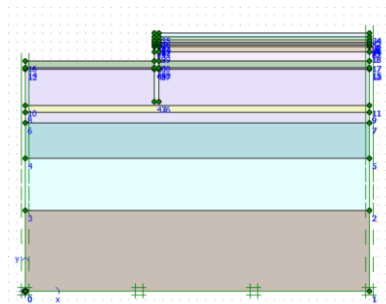
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data sekunder dari studi sebelumnya yang berjudul "Analisa *Safety Factor Sheet Pile* pada PLTMG Pontianak Peaker dengan Aplikasi GEO5" (Sajali et al., 2019). Lokasi penelitian berada di kawasan PLTMG Pontianak Peaker, dengan koordinat $0^{\circ}3'37.79''$ Lintang Utara dan $109^{\circ}12'14.62''$ Bujur Timur. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, area ini terletak di Sei Nipah, Kecamatan Jongkat, Kabupaten Mempawah, Kalimantan Barat.



Gambar 1. Kawasan PLTMG Pontianak Peaker di Sei Nipah, Kec. Jongkat, Kab. Mempawah, Kalimantan Barat

2.2 Proses Pemodelan

Penelitian ini memanfaatkan perangkat lunak PLAXIS 2D V8.2 untuk melakukan simulasi analisis stabilitas lereng dengan perkuatan *sheet pile*. Geometri lereng di kawasan studi ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Geometri Lereng di Kawasan PLTMG Pontianak Peaker

Proses pemodelan dilakukan dengan mengubah kondisi penempatan *sheet pile* dan variasi kondisi air di lokasi studi, sehingga diperoleh gambaran mengenai respons lereng terhadap perubahan lingkungan. Sebelum memaparkan tahapan simulasi secara terperinci, perlu dijelaskan bahwa dalam PLAXIS 2D digunakan metode *phi/c reduction* (Irianto et al., 2022). Metode ini dipilih karena dapat menangkap penurunan kapasitas geser tanah akibat beban tambahan dengan cara mereduksi nilai sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) secara bertahap (Hibatulloh dan Hamdan, 2023). Pendekatan ini memungkinkan simulasi respons nonlinier tanah yang lebih realistis terhadap perubahan kondisi hidrologi dan distribusi beban, serta memberikan estimasi *Safety Factor* yang mendekati kondisi kegagalan aktual (Pramulandani dan Hamdhan, 2020). Tahapan simulasi yang dilakukan adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Tahap Analisis

No.	Tahap	Detail Kalkulasi
1.	Tahap 1: Penempatan <i>sheet pile</i> pada titik S-02 dengan kondisi air surut	<i>Calculation type: Phi/c reduction</i> <i>Loading input: Incremental multipliers</i> <i>Control parameter: Reset displacements to zero</i>
2.	Tahap 2: Penempatan <i>sheet pile</i> pada titik S-02 dengan kondisi air normal	<i>Calculation type: Phi/c reduction</i> <i>Loading input: Incremental multipliers</i> <i>Control parameter: Reset displacements to zero</i>
3.	Tahap 3: Penempatan <i>sheet pile</i> pada titik S-02 dengan kondisi air pasang	<i>Calculation type: Phi/c reduction</i> <i>Loading input: Incremental multipliers</i> <i>Control parameter: Reset displacements to zero</i>
4.	Tahap 4: Penempatan <i>sheet pile</i> pada titik S-03 dengan kondisi air surut	<i>Calculation type: Phi/c reduction</i> <i>Loading input: Incremental multipliers</i> <i>Control parameter: Reset displacements to zero</i>
5.	Tahap 5: Penempatan <i>sheet pile</i> pada titik S-03 dengan kondisi air normal	<i>Calculation type: Phi/c reduction</i> <i>Loading input: Incremental multipliers</i> <i>Control parameter: Reset displacements to zero</i>
6.	Tahap 6: Penempatan <i>sheet pile</i> pada titik S-03 dengan kondisi air pasang	<i>Calculation type: Phi/c reduction</i> <i>Loading input: Incremental multipliers</i> <i>Control parameter: Reset displacements to zero</i>

2.3 Parameter Material

Parameter material yang digunakan dalam pemodelan lereng pada kawasan PLTMG Pontianak Peaker diperoleh dari studi dan literatur yang telah dipublikasikan sebelumnya (Sajali et al., 2019). Data ini merupakan hasil pengujian laboratorium dan analisis stabilitas yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, sehingga parameter yang digunakan merupakan data sekunder. Adapun parameter material yang diterapkan dalam pemodelan dibagi menjadi dua kategori, yaitu:

2.3.1 Model Tanah

Dalam pemodelan, tanah diwakili oleh 16 lapisan yang masing-masing memiliki karakteristik material yang berbeda. Rincian lengkap parameter tanah untuk masing-masing kelompok lapisan ditampilkan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Parameter Tanah Lapisan 1-8

No.	Parameter	Satuan	Lapisan Tanah							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	<i>Material Model</i>		MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC
2	E_{oed}	kN/m ²	4500	5000	8000	10500	8000	4500	5000	4500
3	ν_{ref}		0.4	0.35	0.35	0.35	0.35	0.4	0.35	0.4

No.	Parameter	Satuan	Lapisan Tanah							
			1	2	3	4	5	6	7	8
4	C_{ref}	kN/m ²	12	14	14	18	14	12	14	12
5	<i>Friction Angle, ϕ</i>	Deg.	19	24.5	24.5	24.5	24.5	19	24.5	19
6	γ_{sat}	kN/m ³	21	18.5	18.5	18.5	18.5	21	18.5	21
7	Kedalaman	m	0.20-0.40	0.40-0.80	0.80-1.00	1.00-1.20	1.20-1.40	1.40-1.60	1.60-2.20	2.20-3.20

Tabel 3. Parameter Tanah Lapisan 9-16

No.	Parameter	Satuan	Lapisan Tanah							
			9	10	11	12	13	14	15	16
1	<i>Material Model</i>		MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC
2	E_{oed}	kN/m ²	5000	4500	5000	8000	5000	8000	10500	67500
3	v_{ref}		0.35	0.4	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.3
4	C_{ref}	kN/m ²	14	12	14	14	14	14	18	6
5	<i>Friction Angle, ϕ</i>	Deg.	24.5	19	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	30
6	γ_{sat}	kN/m ³	18.5	21	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	19.5
7	Kedalaman	m	3.20-4.00	4.00-4.20	4.20-8.40	8.40-9.20	9.20-10.40	10.40-14.60	14.60-20.60	20.60-30.00

2.3.2 Elemen *Sheet Pile* Beton

Parameter material untuk elemen *sheet pile* beton diambil dari literatur industri. Spesifikasi bahan yang digunakan mengacu pada data dari PT. Adhimix Precast Indonesia, seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.

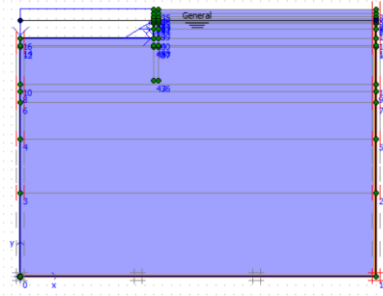
Tabel 4. Parameter Tanah Lapisan 9-16

No.	Parameter	Satuan	Nilai
1	Jenis		<i>Sheet Pile</i>
2	<i>Material Model</i>		Linear Elastic
3	<i>Material Type</i>		Non-porous
4	Bahan		Beton
5	Berat Jenis	kN/m ³	24
6	E	kN/m ²	30000000
7	v_{ref}		0.1

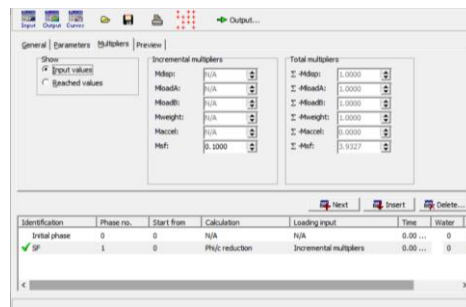
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa pemasangan *sheet pile* pada kawasan PLTMG Pontianak Peaker mempengaruhi stabilitas lereng di bawah berbagai kondisi hidrologi. Data analisis dengan PLAXIS 2D mengungkapkan bahwa pada titik S-02, nilai *Safety Factor* (SF) meningkat dari 3,93 pada kondisi air surut menjadi 5,61 pada kondisi air pasang, menandakan perbaikan distribusi tegangan dan pengurangan deformasi di sekitar struktur. Di sisi lain, di titik S-03, dengan kedalaman pemasangan yang lebih optimal, SF mencapai nilai tertinggi, yaitu 6,34 pada kondisi air pasang, dibandingkan dengan 4,38 pada kondisi air surut dan 4,91 pada kondisi air normal.

3.1.1 Tahap 1: Penempatan *Sheet Pile* pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Surut



Gambar 3. *Input Groundwater* Tahap 1: Penempatan *Sheet Pile* pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Surut

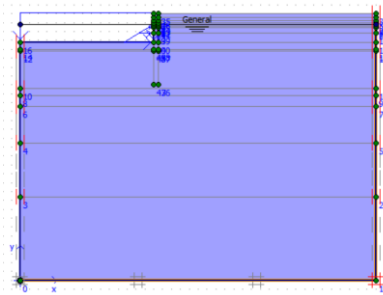


Gambar 4. Hasil *Safety Factor* Tahap 1: Penempatan *Sheet Pile* pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Surut

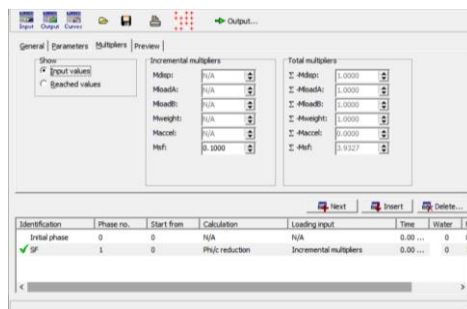
Output analisis *sheet pile* dengan PLAXIS menghasilkan:

1. *Deformed Mesh* : 47.20×10^9 m
2. *Total Displacement* : 47.20×10^9 m
3. *Effective Stresses* : -289.64 kN/m²
4. *Incremental Shear Strains* : 10.00×10^9 %
5. *Safety Factor (SF)* : 3.9327

3.1.2 Tahap 2: Penempatan *Sheet Pile* pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Normal



Gambar 5. *Input Groundwater* Tahap 2: Penempatan *Sheet Pile* pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Normal

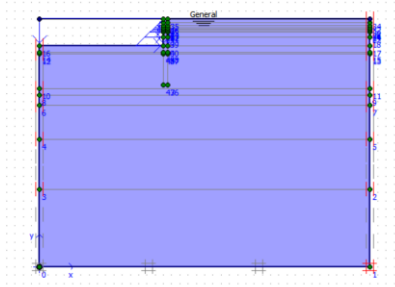


Gambar 6. Hasil Safety Factor Tahap 2: Penempatan Sheet Pile pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Normal

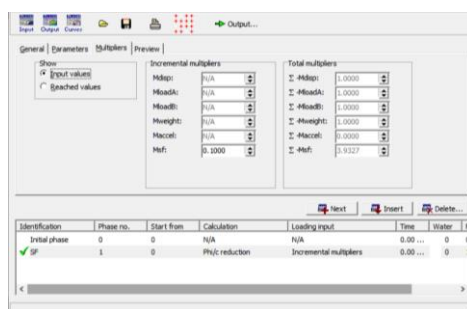
Output analisis dengan PLAXIS untuk tahap ini menghasilkan:

1. *Deformed Mesh* : 224.04×10^3 m
2. *Total Displacement* : 224.04×10^3 m
3. *Effective Stresses* : -399.13 kN/m²
4. *Incremental Shear Strains* : 2.63×10^6 %
5. *Safety Factor (SF)* : 4.3422

3.1.3 Tahap 3: Penempatan Sheet Pile pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Pasang



Gambar 7. Input Groundwater Tahap 3: Penempatan Sheet Pile pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Pasang

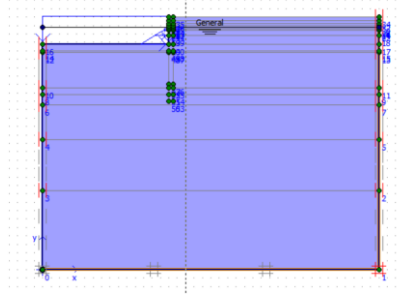


Gambar 8. Hasil Safety Factor Tahap 3: Penempatan Sheet Pile pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Pasang

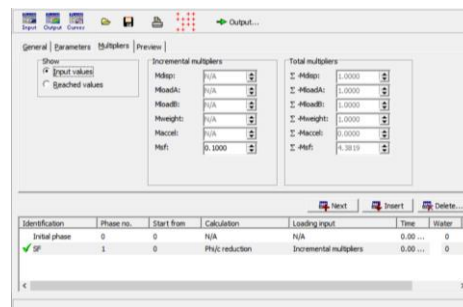
Output analisis dengan PLAXIS menghasilkan:

1. *Deformed Mesh* : 11.19×10^3 m
2. *Total Displacement* : 11.19×10^3 m
3. *Effective Stresses* : -498.94 kN/m²
4. *Incremental Shear Strains* : 82.19×10^3 %
5. *Safety Factor (SF)* : 5.6065

3.1.4 Tahap 4: Penempatan *Sheet Pile* pada Titik S-03 dengan Kondisi Air Surut



Gambar 9. *Input Groundwater* Tahap 4: Penempatan *Sheet Pile* pada Titik S-03 dengan Kondisi Air Surut

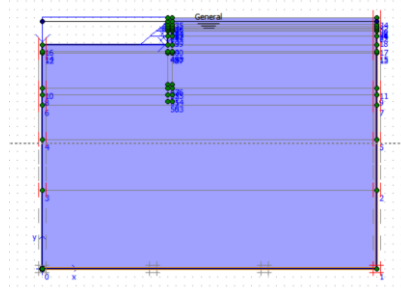


Gambar 10. Hasil *Safety Factor* Tahap 4: Penempatan *Sheet Pile* pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Surut

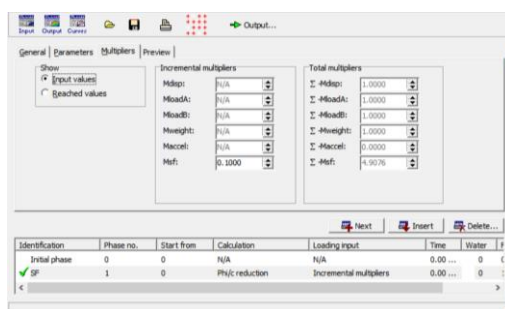
Output analisis dengan PLAXIS untuk tahap ini menunjukkan:

1. *Deformed Mesh* : 11.75×10^9 m
2. *Total Displacement* : 11.75×10^9 m
3. *Effective Stresses* : -764.04 kN/m^2
4. *Incremental Shear Strains* : 795.18×10^6 %
5. *Safety Factor (SF)* : 4.3819

3.1.5 Tahap 5: Penempatan *Sheet Pile* pada Titik S-03 dengan Kondisi Air Normal



Gambar 11. *Input Groundwater* Tahap 5: Penempatan *Sheet Pile* pada Titik S-03 dengan Kondisi Air Normal

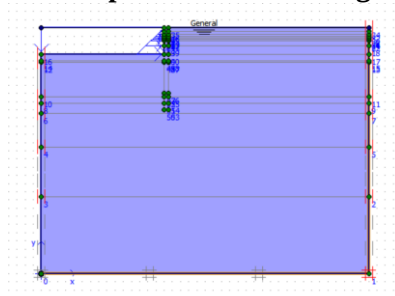


Gambar 12. Hasil Safety Factor Tahap 5: Penempatan Sheet Pile pada Titik S-03 dengan Kondisi Air Normal

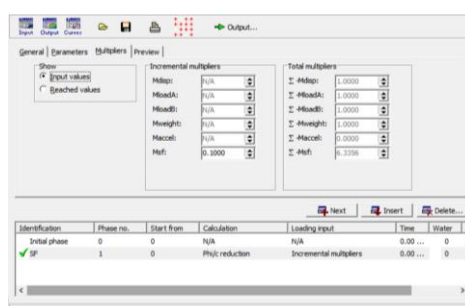
Output analisis dengan PLAXIS menghasilkan:

1. *Deformed Mesh* : 1.83×10^{12} m
2. *Total Displacement* : 1.83×10^{12} m
3. *Effective Stresses* : -868.80 kN/m^2
4. *Incremental Shear Strains* : $279.29 \times 10^{-3} \%$
5. *Safety Factor (SF)* : 4.9076

3.1.6 Tahap 6: Penempatan Sheet Pile pada Titik S-03 dengan Kondisi Air Pasang



Gambar 13. Input Groundwater Tahap 6: Penempatan Sheet Pile pada Titik S-03 dengan Kondisi Air Pasang



Gambar 14. Hasil Safety Factor Tahap 6: Penempatan Sheet Pile pada Titik S-03 dengan Kondisi Air Pasang

Output analisis dengan PLAXIS menghasilkan:

1. *Deformed Mesh* : 1.87×10^9 m
2. *Total Displacement* : 1.87×10^9 m
3. *Effective Stresses* : -917.34 kN/m^2
4. *Incremental Shear Strains* : $129.09 \times 10^6 \%$
5. *Safety Factor (SF)* : 6.3356

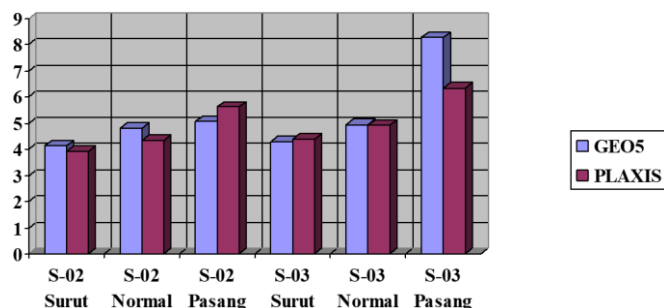
3.1.7 Perbandingan Hasil Analisis dengan GEO5 dan PLAXIS

Perbandingan antara hasil analisis menggunakan GEO5 dan PLAXIS 2D mengungkap perbedaan yang cukup mendalam terkait estimasi nilai *Safety Factor* (SF) dalam berbagai kondisi hidrologi dan lokasi pemasangan *sheet pile*. Pada titik S-02, pada kondisi air surut dan normal, GEO5 menghasilkan nilai SF yang sedikit lebih tinggi dibandingkan PLAXIS. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh metode keseimbangan batas pada GEO5 yang menyederhanakan asumsi mengenai permukaan kegagalan (Raharja, 2023), sehingga cenderung menghasilkan estimasi konservatif pada kondisi beban yang lebih rendah. Sebaliknya, pada kondisi air pasang, PLAXIS 2D menunjukkan peningkatan SF yang lebih signifikan, mengindikasikan kemampuannya dalam menangkap efek nonlinier serta redistribusi tegangan akibat tekanan hidraulis yang meningkat secara lebih mendetail (Chimdesa et al., 2023).

Pada titik S-03, perbedaan antara kedua metode relatif kecil pada kondisi air surut dan normal. Namun, pada kondisi air pasang, perbedaan menjadi mencolok, dengan GEO5 menghasilkan SF sebesar 8,27, sedangkan PLAXIS hanya 6,34. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa GEO5 mungkin menaksir terlalu tinggi kapasitas lereng karena tidak sepenuhnya mengakomodasi deformasi plastis dan perubahan distribusi tegangan yang terjadi pada kondisi ekstrem. Sementara itu, PLAXIS, dengan pendekatan elemen hingga (FEM) dan metode *phi/c reduction*, memberikan estimasi yang lebih realistis terhadap perilaku nonlinier tanah (Budianto, 2020).

Tabel 4. Perbandingan Nilai *Safety Factor* (SF) GEO5 dengan PLAXIS

No.	Kondisi	<i>Safety Factor</i>	
		GEO5	PLAXIS
1	Penempatan <i>Sheet Pile</i> pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Surut	4.12	3.93
2	Penempatan <i>Sheet Pile</i> pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Normal	4.8	4.34
3	Penempatan <i>Sheet Pile</i> pada Titik S-02 dengan Kondisi Air Pasang	5.06	5.61
4	Penempatan <i>Sheet Pile</i> pada Titik S-03 dengan Kondisi Air Surut	4.29	4.38
5	Penempatan <i>Sheet Pile</i> pada Titik S-03 dengan Kondisi Air Normal	4.93	4.91
6	Penempatan <i>Sheet Pile</i> pada Titik S-03 dengan Kondisi Air Pasang	8.27	6.34



Gambar 21. Kurva Perbandingan Nilai *Safety Factor* (SF) Lereng

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah mengungkap perbedaan mendasar dalam estimasi faktor keamanan (SF) lereng antara dua metode analisis, yaitu PLAXIS 2D dan GEO5, pada pemasangan *sheet pile* di kawasan PLTMG Pontianak Peaker. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada titik S-02, kondisi air surut menghasilkan SF sebesar 3,93 yang meningkat hingga 5,61 pada kondisi air pasang. Sementara itu, pada titik S-03, pemasangan *sheet pile* dengan kedalaman yang lebih optimal

memberikan peningkatan signifikan, dengan SF tertinggi sebesar 6,34 pada kondisi air pasang, dibandingkan dengan 4,38 pada kondisi air surut dan 4,91 pada kondisi air normal.

Perbandingan antara kedua metode mengungkap bahwa PLAXIS 2D cenderung menghasilkan nilai SF yang lebih konservatif dibandingkan GEO5, yang dapat dijelaskan oleh kemampuan PLAXIS dalam menangkap perilaku nonlinier tanah melalui metode *phi/c reduction*. Temuan ini menyoroti pentingnya pemodelan numerik yang mendetail untuk mendapatkan estimasi stabilitas lereng yang lebih realistis, terutama pada kondisi hidrologi yang fluktuatif dan parameter tanah yang bervariasi.

Meskipun penelitian ini memberikan kontribusi penting terhadap pemahaman mekanisme perkuatan lereng dengan *sheet pile*, serta menyajikan perbandingan kuantitatif antara dua metode analisis terkemuka, penelitian ini tidak memberikan rekomendasi spesifik untuk implementasi di lapangan. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan data yang digunakan, yang bersifat simulasi numerik tanpa validasi uji lapangan. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar implementasi lapangan dilakukan dengan melakukan *pilot test* di lokasi untuk mengkalibrasi hasil simulasi numerik dengan data pengukuran aktual. Khususnya, integrasi instrumen pemantauan seperti *piezometer*, *inclinometer*, dan *settlement gauge* direkomendasikan guna memvalidasi performa perkuatan serta mengevaluasi perbedaan antara nilai SF yang diprediksi dan yang terukur.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Bokade, P. A., Suradkar, V. S., Bokey, S. N., Ghindani, R., Berad, P. A., Modak, A. M., & Dhatrak, A. I. (2021). *Analysis and stabilization of slopes using Geo5 software*. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, 9(VIII), 1490.
- Budianto, E. (2019). *Permodelan numerik daya dukung tiang helixrakit pada tanah gambut dengan menggunakan metode FEM*. Universitas Hasanuddin. Makassar, Indonesia.
- Chimdesa, F. F., Chimdesa, F. F., Jilo, N. Z., Hulagabali, A., Babalola, O. E., Tiyasha, T., Ramaswamy, K., Kumar, A., & Bhagat, S. K. (2023). *Numerical analysis of pile group, piled raft, and footing using finite element software PLAXIS 2D and GEO5*. Scientific Reports, 13, Article 15875. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-15875-?>
- Greco, R., Marino, P., & Bogaard, T. A. (2023). *Recent advancements of landslide hydrology*. WIREs Water, 10(6), e1675. <https://doi.org/10.1002/wat2.1675>
- Hibatulloh, M. P., & Hamdan, I. N. (2023). *Pemodelan penanganan longsoran lereng dengan perkuatan dinding penahan tanah di kawasan Artha Industrial Hills – Karawang menggunakan PLAXIS 2D*. FTSP Series: Seminar Nasional dan Diseminasi Tugas Akhir 2023.
- Irianto, R., Rochmawati, R., & Sitorus, P. H. (2023). *Analisis stabilitas lereng ditinjau menggunakan metode elemen hingga di ruas Jalan Raya Abepura-Sentani*. Universitas Yapris Papua. Jayapura, Indonesia.
- Nalawade, R. D., Gurap, D. S., Hire, M. R., Doke, T. R., & Ghom, A. S. (2024). *Slope stability assessment of landslide using PLAXIS 2D*. ALOCHANA Journal, 13(4).
- Padhy, S., Dash, S., Kumar, N., & Dash, Y. (2024). *A comparative study of slope stability analysis via Geo5 using IoT framework*. International Journal of Hybrid Intelligent Systems. <https://doi.org/10.3233/HIS-240028>
- Pangemanan, V. G. M., Turangan, A. E., & Sompie, O. B. A. (2014). *Analisis kestabilan lereng dengan metode Fellenius (studi kasus: Kawasan Citraland)*. Jurnal Sipil Statik, 2(1), 37–46. ISSN: 2337-6732.
- Pramulandani, A., & Hamdhan, I. N. (2020). *Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan geocell menggunakan metode elemen hingga (PLAXIS 2D)*. RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil, 86.
- Raharja, D. S. (2023). *Sensitivity analysis of pile foundations under bridge abutments on high slope areas (Case study in Besakih, Bali)*. Jurnal Rekayasa dan Manajemen Konstruksi, 11(2), 69–78.
- Sajali, M. A., Lufira, R. D., Marsudi, S., & Hanan, A. (2019). *Analisa Safety Factor Sheet Pile Pada PLTMG Pontianak Peaker Dengan Aplikasi Geo5*. Jurnal Teknik Pengairan, 10(2), 74–83. <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2019.010.02.01>