

Evaluasi Perkuatan Lereng dengan Dinding Penahan dan Borepile pada Lokasi Menara SUTET

Evaluation of Slope Reinforcement Using Retaining Wall and Bored Pile at a SUTET Tower Site

William Wijaya^{1*}, Yuli Fajarwati², Mikel Darren Manason³

^{1,3}Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta.

²Departemen Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta.

*Corresponding Author: William.wijaya@uajy.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng pada titik T.367 jalur SUTET 500 KV Tanjung Jati B-Pemalang menggunakan metode elemen hingga dengan perangkat lunak Plaxis 2D. Data yang digunakan berupa data sekunder hasil uji laboratorium tanah, CPT, serta kontur lereng dari drone. Tanah di lokasi didominasi oleh silty clay yang cenderung lemah saat jenuh. Dua potongan lereng (A-A dan B-B) dianalisis dalam kondisi eksisting dan setelah perkuatan menggunakan dinding penahan tanah setinggi 5 m dan borepile sepanjang 10 m. Hasil menunjukkan bahwa kondisi eksisting memiliki faktor keamanan (SF) 1,892 dan 1,986 (statik), serta 0,228 dan 0,249 (seismik), yang tidak memenuhi kriteria aman terhadap gempa. Setelah perkuatan, nilai FS meningkat menjadi 2,462 dan 2,627 (statik), serta 1,115 dan 1,134 (seismik). Bidang longsor menunjukkan bahwa perkuatan efektif mereduksi deformasi dan mencegah bidang keruntuhan. Sistem perkuatan kombinasi dinding penahan dan borepile mampu meningkatkan kestabilan lereng secara signifikan pada tanah silty clay, khususnya terhadap pengaruh beban dinamik.

Kata kunci: stabilitas lereng, Plaxis 2D, dinding penahan tanah, borepile

ABSTRACT

This study aims to analyze the slope stability at point T.367 along the 500 kV SUTET transmission line in the Tanjung Jati B-Pemalang corridor using the finite element method with Plaxis 2D software. The data used are secondary data, including results from laboratory soil tests, Cone Penetration Tests (CPT), and slope contours obtained from drone surveys. The site is dominated by silty clay, which tends to weaken under saturated conditions. Two slope sections (A-A and B-B) were analyzed under existing conditions and after reinforcement using a 5-meter-high retaining wall and 10-meter-deep bored piles. The results show that the existing conditions have safety factors (SF) of 1.892 and 1.986 (static), and 0.228 and 0.249 (seismic), which do not meet safety criteria for seismic conditions. After reinforcement, the FS values increased to 2.462 and 2.627 (static), and 1.115 and 1.134 (seismic). The failure surfaces indicate that the reinforcement is effective in reducing deformation and preventing failure propagation. The combined reinforcement system of retaining wall and bored pile significantly improves slope stability in silty clay soils, particularly under dynamic loading conditions.

Keywords: Slope stability, Plaxis 2D, retaining wall, bored pile

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan industrialisasi menjadikan pembangunan infrastruktur kelistrikan sebagai salah satu prioritas utama dalam agenda pembangunan nasional. Di Indonesia, distribusi energi listrik dalam skala besar antarwilayah sebagian besar disalurkan melalui jaringan transmisi tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi (High Voltage Transmission Line dan Extra High Voltage Transmission Line), yang salah satu bentuknya adalah Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) (Sungkono dkk., 2024). Jaringan ini berfungsi untuk mengalirkan listrik dari pusat-pusat

pembangkit utama ke berbagai wilayah konsumsi melalui menara-menara transmisi yang membentang melintasi topografi dan kondisi geologi yang sangat beragam.

Pembangunan infrastruktur SUTET tidak lepas dari tantangan geoteknik yang kompleks, terutama ketika lintasannya melewati wilayah perbukitan atau daerah dengan karakteristik tanah yang tidak stabil. Salah satu permasalahan yang paling sering dihadapi adalah ketidakstabilan lereng, yang berpotensi mengganggu kestabilan konstruksi menara transmisi (Cahyono dkk., 2024; Sungkono dkk., 2024). Gangguan terhadap konstruksi menara dapat menyebabkan gangguan distribusi energi berskala luas, kerugian ekonomi besar, hingga membahayakan keselamatan masyarakat di sekitar lokasi. Oleh karena itu, aspek stabilitas lereng menjadi krusial dalam perencanaan dan desain jalur transmisi, khususnya pada lokasi-lokasi rawan seperti lereng curam, daerah pelapukan intensif, maupun zona longsor sedang-tinggi (Wen dkk., 2025).

Studi geoteknik dilakukan untuk mengevaluasi kondisi lereng dan merumuskan mitigasinya. Salah satu area yang menjadi fokus penelitian ini adalah lokasi T.367 pada jalur SUTET 500 KV Tanjung Jati B-Pemalang. Titik ini berada di wilayah dengan morfologi berbukit dan kemiringan lereng yang signifikan, yang berpotensi mengalami ketidakstabilan terutama pada musim penghujan atau akibat gangguan aktivitas konstruksi (Sriwijaya Minaka dkk., 2023). Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis stabilitas lereng pada lokasi tersebut menggunakan pendekatan numerik berbasis metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) dengan bantuan perangkat lunak Plaxis 2D.

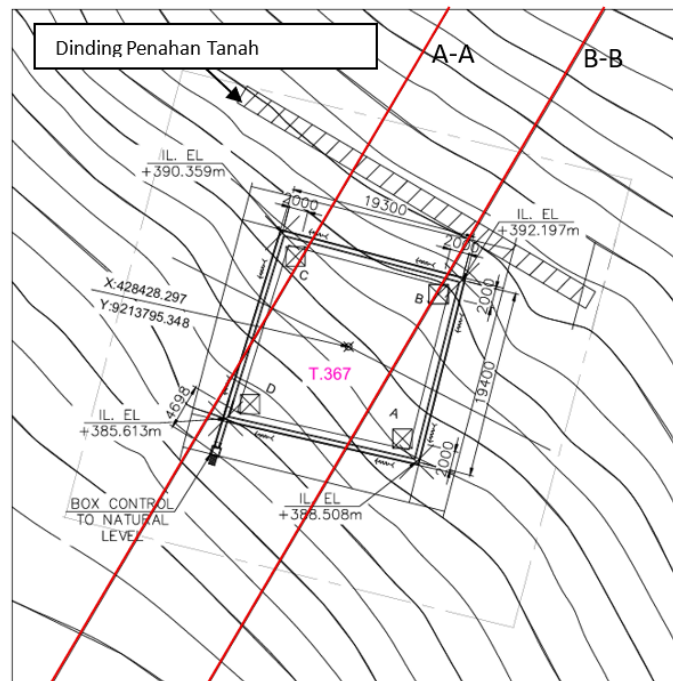
Analisis stabilitas lereng pada proyek transmisi seperti SUTET memiliki perbedaan pendekatan dengan proyek umum lainnya karena mempertimbangkan kombinasi beban dinamis, risiko getaran elektromagnetik, serta keterbatasan ruang untuk intervensi struktur. Oleh karena itu, studi ini mengedepankan pendekatan numerik karena mampu mengakomodasi perilaku nonlinier tanah, variasi geometri kompleks, serta interaksi tanah-struktur secara lebih realistis. Metode elemen hingga (FEM) memungkinkan simulasi deformasi dan tegangan pada lereng secara berlapis dan bertahap, termasuk untuk mengevaluasi pengaruh pemasangan dinding penahan tanah sebagai sistem perkuatan (Ramadhan dkk., 2025). Data yang digunakan dalam studi ini berasal dari sumber sekunder mencakup hasil pengujian laboratorium, pengujian *Cone Penetration Test* (CPT), serta data geometri lereng yang dihasilkan dari pemodelan topografi berbasis drone. Pada studi ini, dianalisis dua skenario untuk mengevaluasi stabilitas lereng, yaitu kondisi eksisting tanpa perkuatan dan kondisi dengan perkuatan menggunakan dinding penahan tanah maupun borepile (Hartono, 2020). Perkuatan dipilih berdasarkan pendekatan konservatif yang mempertimbangkan keterbatasan serta efektivitas struktur penahan dalam mengurangi deformasi lateral dan meningkatkan nilai faktor keamanan (Akhmudiyanto dkk., 2021).

Secara umum, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap mitigasi risiko pada wilayah transmisi dan titik-titik kritis di sepanjang jalur SUTET. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka penelitian ini difokuskan pada analisis stabilitas lereng di lokasi T.367 jalur transmisi SUTET 500 KV Tanjung Jati B-Pemalang menggunakan pendekatan numerik berbasis perangkat lunak Plaxis 2D. Penelitian ini difokuskan pada dua tujuan utama: (1) mengevaluasi kondisi stabilitas lereng eksisting berdasarkan data sekunder, dan (2) menganalisis efektivitas perkuatan lereng menggunakan struktur dinding penahan tanah dan borepile terhadap peningkatan nilai faktor keamanan. Hasil analisis ini diharapkan dapat menjawab kebutuhan teknis dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi menara transmisi pada lereng yang tidak stabil.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di titik T.367 sepanjang jalur transmisi SUTET 500 KV Tanjung Jati B-Pemalang (Gambar 1). Area ini memiliki topografi dengan kontur lereng yang cukup terjal dan berada dalam wilayah yang secara geologis tersusun atas tanah *silty clay* dengan ketebalan bervariasi. Berdasarkan pengamatan drone, geometri lereng memiliki kemiringan antara 30°-45°.



Gambar 1. Kontur geometri lereng

Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder, yang terdiri dari data laboratorium, *data Cone Penetration Test* (CPT), dan data drone.

1. Data pengujian laboratorium, meliputi parameter tanah seperti berat volume (γ), kohesi (c), dan sudut geser dalam (ϕ).
2. Data *Cone Penetration Test* (CPT), digunakan untuk mendapatkan menginterpretasikan profil stratigrafi dan kekuatan tanah.
3. Data drone, digunakan untuk memperoleh bentuk dan geometri lereng secara detail, kemudian dijadikan input pembuatan model geometri dalam simulasi numerik.

Pemodelan Numerik

Pemodelan stabilitas lereng dilakukan menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D, dengan pendekatan Metode Elemen Hingga (FEM). Simulasi dilakukan dalam dua skenario yaitu kondisi eksisting (tanpa perkuatan) dan kondisi setelah perkuatan dengan dinding penahan tanah. Geometri lereng disusun berdasarkan hasil drone, dengan lapisan tanah mengikuti hasil interpretasi data CPT. Adapun parameter dalam pemodelannya sebagai berikut:

1. Pemilihan *soil model* menggunakan Mohr-Coulomb. Model konstitutif tanah yang digunakan adalah Mohr-Coulomb, yang secara umum cukup representatif untuk analisis awal kestabilan lereng (Hastuty & Prambudi, 2020).

2. Penentuan geometri muka air tanah (mat) berdasarkan data CPT.
3. Analisis stabilitas dilakukan menggunakan teknik *phi-c reduction* untuk memperoleh nilai Faktor Keamanan (SF) pada masing-masing kondisi. Nilai SF yang diperoleh kemudian dibandingkan terhadap standar desain, seperti SNI 8460:2017, yang menyatakan bahwa nilai SF minimum untuk lereng dalam kondisi statik adalah 1,5 dan kondisi seismik 1,1 (Badan Standardisasi Nasional, 2017).

Parameter Tanah

Parameter tanah yang diinputkan berdasarkan hasil uji laboratorium dan korelasi dengan data CPT dapat dilihat pada Tabel 1. Model dinding penahan tanah dimasukkan sebagai elemen struktur *plate* dengan parameter sesuai karakteristik beton bertulang yang digunakan (Tabel 2 dan 3). Sedangkan untuk parameter borepile menggunakan elemen Embedded Beam (Tabel 4) Hasil analisis mencakup nilai SF, deformasi, serta bidang keruntuhan.

Tabel 1. Data Properties Tanah

No	Jenis tanah	density	depth (m)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	ν	E (kN/m ³)	ϕ (°)	c' (kN/m ²)
Lapis 1	Silty Clay	Stiff	0 - 5	17,02	16,528	0,35	4200	22,64	7,85
Lapis 2	Silty Clay	Stiff	5 - 10	16,45	16,253	0,35	4200	26,59	4,90
Lapis 3	Silty Clay	Very Stiff	10 - 15	17,01	16,420	0,35	10200	25,15	11,77
Lapis 4	Silty Clay	Hard	15 - 20	17,81	17,048	0,35	17200	30,57	17,65
Lapis 5	Batuan	Dense	20 - 25	17,20	21	0,2	56800	36	17,65
Lapis 6	Sandy Clay	Hard	25 - 30	18,51	17,410	0,35	17200	24,26	16,67

Tabel 2. Data Propertis Pilecap

f_c' (N/mm ²)	γ_{beton} (kN/m ³)	d (m)	E (kN/m ²)	A (m ²)	w (kN/m ²)	I (m ⁴)	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)
30	24	0,5	25742960,2	0,5	12	0,01042	12871480,1	268155,84

Tabel 3. Data Propertis Dinding Penahan Tanah

f_c' (N/mm ²)	γ_{beton} (kN/m ³)	b (m)	h (m)	L (m)	E (kN/m ²)	A (m ²)	w (kN/m ²)	I (m ⁴)	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)
30	24	2	0,5		25742960,2	84,81	1017,77	0,021	2,18 10 ⁹	536311,7

Tabel 4. Data Properties Borepile

f_c' (N/mm ²)	γ_{beton} (kN/m ³)	d (m)	E (kN/m ²)	A (m ²)	w (kN/m/m)	I (m ⁴)	T_{skin} (kN/m)	$T_{lateral}$ (kN/m)	F_{max} (kN)
25	24	0,4	23500000	0,126	45,239	0,053	300,92	157,75	160,38

Pembebanan

Beban-beban yang bekerja dalam analisis stabilitas lereng ini berupa:

1. Beban Mati, beban sendiri material tanah, struktur *plate* dan tower.
2. Beban *Surcharge*, beban hidup dari pekerja saat konstruksi DPT

3. Beban gempa, didapatkan dari pergerakan tanah (PGA) diambil dari peta gempa desain spektra Indonesia (<https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>) untuk perhitungan koefisien vertial (k_v) dan koefisien horizontal (k_H). Sebelum dilakukan pengecekan pergerakan tanah (PGA), perlu dilakukan pengecekan klasifikasi situs yang dapat dilihat pada Tabel 5. Nilai dari pergerakan tanah dapat dilihat pada Tabel 6 dan diinputkan ke dalam Plaxis.

Tabel 5. Klasifikasi Kelas Situs Tanah

Lokasi Koordinat		SPT		Kelas Situs
Lintang	-6.982573	BH-01	$\bar{N} = 18.07$	SD (Tanah Sedang)
Bujur	110.945006		$\bar{V}_s = 225.59$ m/detik	SD (Tanah Sedang)

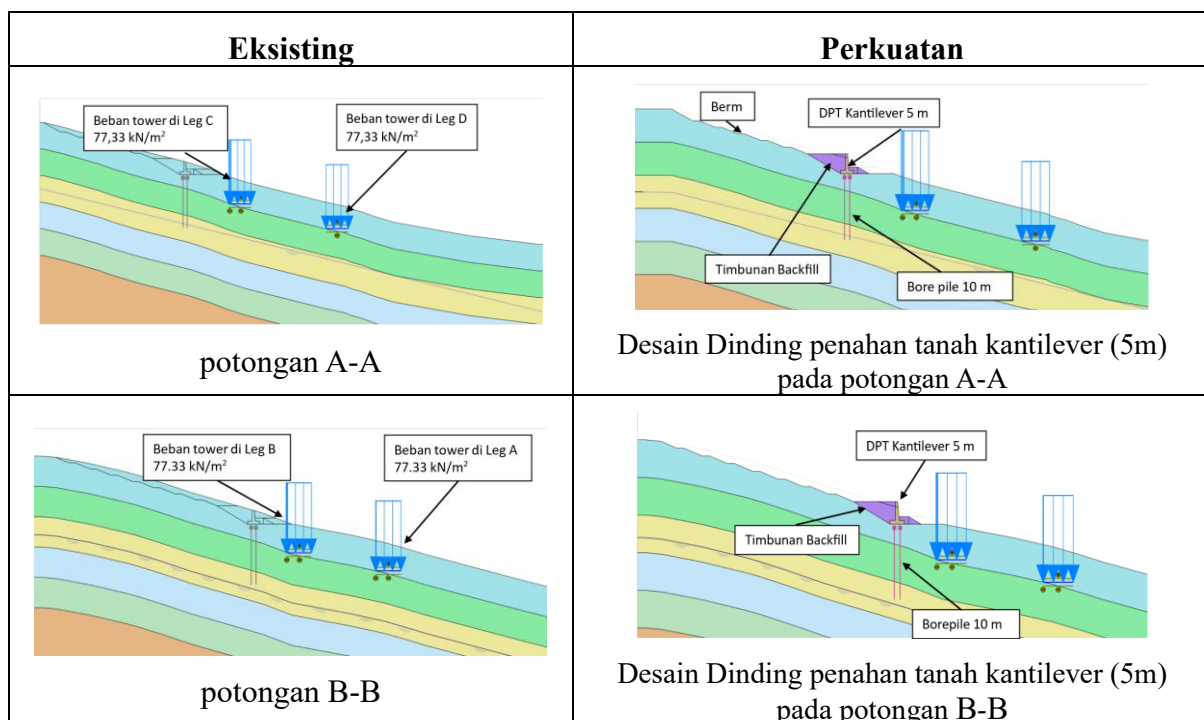
Tabel 6. Percepatan Gempa dan Faktor Amplifikasi

Peak Ground Acceleration		Faktor Amplifikasi	
PGA	0,3207	F_a	1,206
F_{PGA}	1,2793	F_v	0,3302
AS	0,6	S_s	0,7425
k_H	0,50	S_1	0,3302
a_x	0,2051 g	S_{ds}	0,6
a_y	0,1026 g	S_{d1}	0,43

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi numerik menggunakan Plaxis 2D dilakukan untuk dua potongan lereng, yaitu potongan A-A dan B-B, dengan skenario tanpa perkuatan sebagai kondisi eksisting (Tabel 7).

Tabel 7. Geometri lereng eksisting dan perkuatan



Hasil Simulasi Stabilitas Kondisi Eksisting

Tanah pada lokasi didominasi oleh silty clay yang memiliki kohesi sedang namun rentan mengalami penurunan kekuatan saat jenuh air (Tabel 1). Untuk kondisi statik, nilai faktor keamanan (SF) yang diperoleh adalah pada potongan A-A nilai SF sebesar 1,892, sedangkan pada potongan B-B nilai SF adalah 1,986. Nilai ini menunjukkan bahwa lereng dalam kondisi eksisting masih berada dalam kategori *marginally stable* menurut standar SNI 8460:2017 yang menyarankan $SF \geq 1,5$. Namun, untuk infrastruktur penting seperti SUTET, nilai ini dinilai belum mencukupi margin keamanan yang diperlukan, khususnya terhadap gangguan eksternal seperti beban seismik.

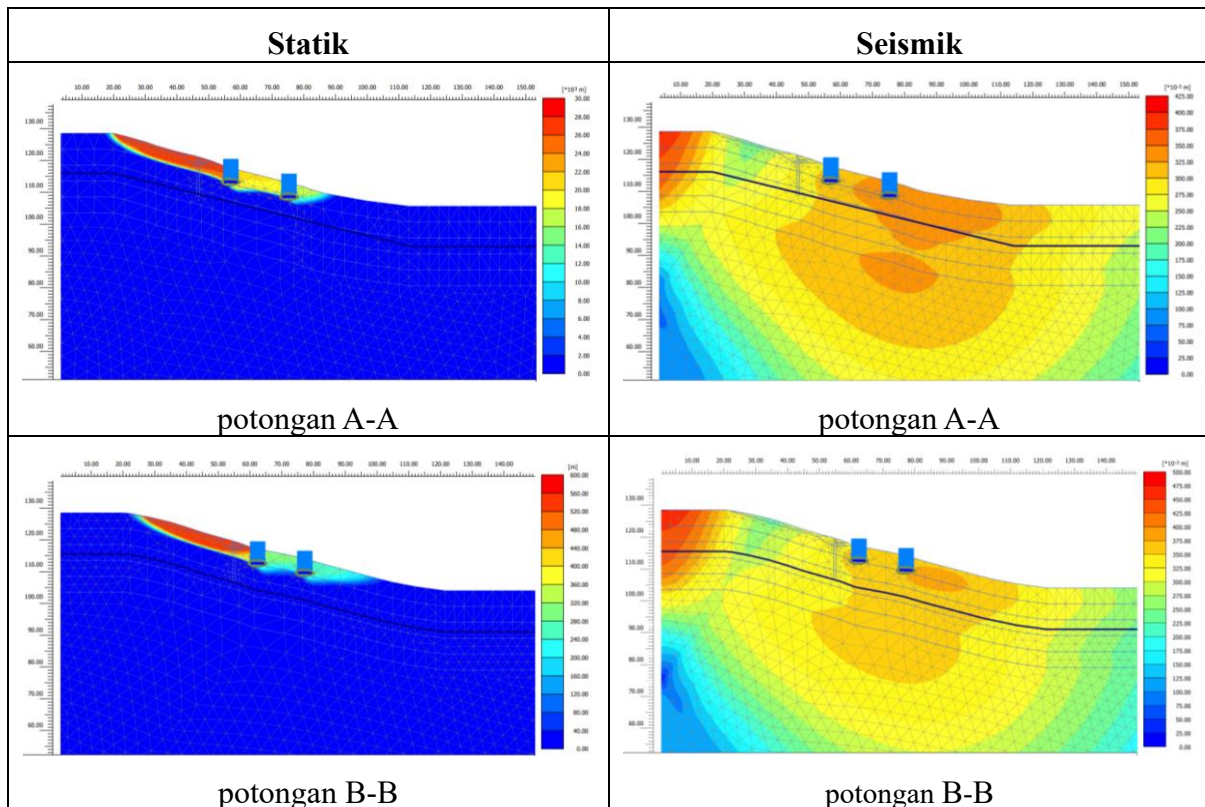
Pada analisis kondisi seismik, faktor keamanan menunjukkan penurunan signifikan. Dimana pada potongan A-A nilai SF sebesar 0,228 dan pada potongan B-B diperoleh nilai SF 0,249. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kedua potongan mengalami kondisi tidak stabil saat diberikan beban gempa, dengan $SF < 1,1$ yang merupakan batas minimum kestabilan seismik. Dimana potensi keruntuhan lereng sangat tinggi apabila terjadi gempa, bahkan dengan skala rendah-menengah.

Tabel 8 menunjukkan bidang keruntuhan yang terbentuk pada lereng berdasarkan simulasi Plaxis. Pada kondisi statik, daerah plastis terkonsentrasi di sekitar permukaan lereng bagian atas dan belakang fondasi menara, dengan pola melengkung yang mengidentifikasi potensi longsoran rotasional dangkal hingga menengah baik pada potongan A-A maupun B-B.

Bidang longsor pada potongan A-A statik terdapat distribusi warna merah hingga oranye menunjukkan zona plastis yang berada di sekitar kaki fondasi menara pada Leg C dan D. Nilai SF sebesar 1,8, terlihat bahwa kontur deformasi plastis sudah mulai berkembang secara kontinu menuju permukaan lereng, menandakan bahwa lereng berada dalam kondisi batas stabil dan sensitif terhadap peningkatan beban atau gangguan eksternal. Sedangkan bidang longsor pada potongan B-B statik, di mana zona plastis terkonsentrasi di sekitar fondasi menara pada Leg A dan B. Regangan plastis membentuk pola elips memanjang dari tengah lereng menuju permukaan, dengan indikasi mekanisme keruntuhan translasi-rotasi.

Kondisi seismik menunjukkan penyebaran bidang keruntuhan yang lebih luas dan dalam. Warna kuning dan oranye yang membentuk bidang melengkung dari bagian atas hingga ke kaki lereng mengindikasikan bahwa pada kondisi ini, lereng sangat tidak stabil, dan bidang longsor dapat menjangkau seluruh badan lereng. Dimana nilai SF seismik yang sangat rendah ($SF < 0,25$), sehingga diperlukan perkuatan.

Tabel 8. Bidang longsor lereng eksisting statik dan seismik

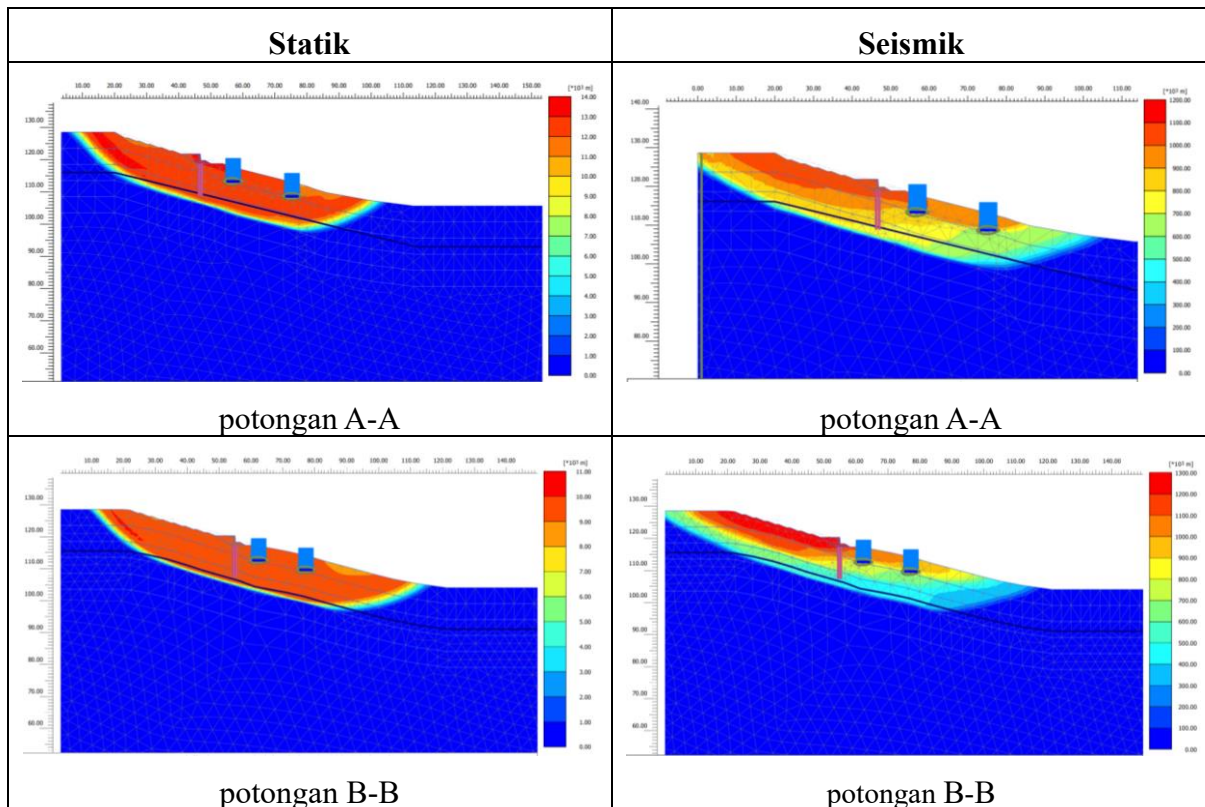


Hasil Simulasi Stabilitas Setelah Perkuatan

Perkuatan lereng dilakukan melalui penerapan dinding penahan tanah kantilever setinggi 5 meter dan fondasi borepile sepanjang 10 meter. Struktur ini dipasang pada kaki lereng, tepat di bawah titik beban menara transmisi, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7 (potongan A-A dan B-B). Setelah diberikan perkuatan, hasil simulasi menunjukkan peningkatan signifikan faktor keamanan pada kondisi statik pada potongan A-A diperoleh SF sebesar 2,462 dan potongan B-B sebesar 2,627. Sedangkan pada kondisi seismik nilai SF pada potongan A-A sebesar 1,115 dan potongan B-B adalah 1,134.

Kenaikan SF > 30% dalam kondisi statik dan > 350% dalam kondisi seismik mengindikasikan bahwa kombinasi dinding penahan dan borepile memberikan pengaruh signifikan dalam meningkatkan stabilitas lereng. Perkuatan tidak hanya mengurangi tekanan lateral, tetapi juga memperdalam zona penyaluran beban, menjangkau lapisan tanah lebih kuat.

Tabel 9. Bidang longsor lereng perkuatan statik dan seismik



KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerik yang telah dilakukan terhadap dua potongan lereng (A-A dan B-B) pada lokasi T.367 SUTET 500 KV Tanjung Jati B-Pemalang, dapat disimpulkan bahwa kondisi eksisting tanpa perkuatan secara umum masih tergolong stabil pada kondisi statik, dengan nilai faktor keamanan (SF) masing-masing sebesar 1,892 dan 1,986. Namun, saat lereng dikenai beban seismik, terjadi penurunan SF secara drastis hingga 0,228 dan 0,249, yang berada jauh di bawah ambang batas aman ($SF \geq 1,1$), mengindikasikan potensi keruntuhan yang tinggi. Setelah dilakukan perkuatan berupa pemasangan dinding penahan tanah kantilever setinggi 5 meter dan bore pile sepanjang 10 meter, hasil simulasi menunjukkan peningkatan signifikan terhadap kestabilan lereng. Nilai SF meningkat menjadi 2,462 dan 2,627 untuk kondisi statik, serta mencapai 1,115 dan 1,134 untuk kondisi seismik. Distribusi zona plastis menunjukkan bahwa perkuatan mampu menahan pergerakan lateral dan mencegah pembentukan bidang longsor yang kontinu. Dengan demikian, sistem perkuatan yang diterapkan terbukti efektif dalam meningkatkan keamanan lereng secara signifikan, baik terhadap beban statik maupun dinamik. Penelitian ini memberikan kontribusi nyata dalam penyusunan strategi mitigasi bencana geoteknik pada infrastruktur penting seperti jaringan transmisi listrik, serta merekomendasikan penggunaan sistem kombinasi dinding dan borpile pada lokasi-lokasi dengan karakteristik tanah silty clay dan risiko seismik yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhmudiyanto, A., Rahardjo, P. P., & Karlinasari, R. (2021). Repair Performance Landslide and Slope Using Bore pile and Ground Anchor on Cipali Toll Road Km 103. *Ukarst : Universitas Kadiri Riset Teknik Sipil*, 5. <https://doi.org/10.30737/ukarst.v3i2>
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik*. www.bsn.go.id
- Cahyono, M. S. D., Darmawan, K. C., Wibisono, R. E., & Ningrum, R. C. (2024). Analisis Kestabilan Dinding Penahan Tanah Tower Sutet 500 KV Ungaran – Pemalang. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, 6(1), 45–50. <https://doi.org/10.26740/proteksi.v6n1.p45-50>
- Hartono, J. (2020). Kajian Teknis Penanganan Longsoran Sta. 2+850 - 3+050 pada Pembangunan Jalan Tol Balikpapan Samarinda Menggunakan Bored Pile Metode Plaxis. *BENTANG: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 8(2), 59–70.
- Hastuty, I. P., & Prambudi, R. (2020). Analysis of slope stability by the planning of cantilever retaining wall reinforcement using the application of Plaxis (case study: Substation Panyabungan sta 0+060). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 851(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/851/1/012021>
- Ramadhan, A. G., Sefrina, A., & Farichah, H. (2025). Stabilitas Lereng Perkuatan Dinding Penahan Tanah Menggunakan Software GEO5 dan Perhitungan Empiris pada Proyek Jalan Lintas Selatan Lot 1A STA 4+600. *Jurnal Talenta Sipil*, 8(1), 205. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v8i1.814>
- Sriwijaya Minaka, U., Uanza, R., Nisumanti, S., & Amalia, G. (2023). Slope Stability Analysis of Sekayu-Mangun Jaya Road STA 127+350 Reinforced with Retaining Walls. *Journal of Civil Engineering and Vocational Education*, 10(3), 2622–6774. <http://cived.ppj.unp.ac.id/index.php/CIVED>
- Sungkono, K. K., Arbianto, R., Pande, M. E. P., & Gunarso, G. (2024). *ANALISIS GEOTEKNIK DAN KESTABILAN LERENG TOWER SUTT PT. PLN (Studi kasus TW. 203 Pembangunan TL 150 KV GI KAMBANG – GI TAPAN)*. 29(2), 9.
- Wen, Z., Xu, W., Yuan, B., Zhang, L., & Liang, Z. (2025). Numerical Analysis of Anti-Slide Pile Reinforcement for Slope Stability Under Rainfall Conditions. *Buildings*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/buildings15040638>