

UPAYA MITIGASI KELONGSORAN LERENG PADA JALUR PIPA PENSTOCK EKSIKSTING

Asrinia Desilia¹⁾, Fritz R. P. Nababan²⁾, dan Zakwan Gusnadi³⁾

¹⁾Program Studi Teknik Sipil Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan Universitas Pendidikan Indonesia

^{1,2)}PT. Suarluna Tripana Rekayasa

³⁾Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Siliwangi

e-mail: asrinia@upi.edu

Abstrak

Kondisi kestabilan lereng sangat tergantung dari berbagai faktor yang mempengaruhi, salah satunya adalah kondisi saturasi tanah. Tanah eksisting yang mengalami saturasi akibat intensitas hujan tinggi menyebabkan tambahan beban pada material tanah dan mereduksi kekuatan tanah. Dalam jangka waktu tertentu hal tersebut dapat menjadi penyebab pergerakan tanah dan kelongsoran lereng. Pergerakan tanah yang terjadi berdekatan dengan struktur eksisting tentu saja akan turut berpengaruh terhadap kestabilan struktur tersebut. Penelitian ini mengkaji tentang upaya mitigasi struktur pipa *penstock* yang mengalami kerusakan akibat pergerakan tanah yang terjadi. Upaya mitigasi yang dilakukan adalah dengan pemasangan soldier pile dan relokasi abutment fondasi pipa *penstock*. Pemasangan soldier pile diameter 1,2 m panjang 20 m dan jarak 2,4 m dimaksudkan untuk memotong bidang pergerakan lereng agar dapat menghentikan pergerakan lanjutan. Sedangkan relokasi abutment pipa *penstock* bertujuan untuk menempatkan abutment pada lokasi yang tidak terjadi pergerakan tanah. Proses analisis upaya mitigasi dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan bantuan program Plaxis 2D dan Ensoft Group. Hasil analisis menunjukkan faktor keamanan stabilitas meningkat dari semula 1,3 menjadi 1,5. Respon gaya yang terjadi pada soldier pile yaitu bending moment sebesar 239,9 kNm dan total displacement 4,1 cm. Defleksi lateral tanah terhadap pipa sebesar 0,8 cm, masih berada di bawah batas izin 2,0 cm untuk kondisi tegangan izin.

Kata Kunci : Longsor, Mitigasi, Pipa *Penstock*, Stabilitas Lereng.

Abstract

The stability of a slope is highly dependent on various influencing factors, one of which is the saturation condition of the soil. Existing soil that becomes saturated due to high rainfall intensity adds additional load to the soil material and reduces soil strength. Over time, this can be a cause of soil movement and slope failure. Soil movement occurring near existing structures will undoubtedly affect the stability of those structures. This research investigates mitigation efforts for a penstock pipe structure that has been damaged due to soil movement. Mitigation efforts involve the installation of soldier piles and the relocation of the penstock pipe abutment foundation. The installation of 1.2 m diameter, 20 m long soldier piles at 2.4 m intervals is intended to intersect the slope movement plane to halt further movement. Meanwhile, the relocation of the penstock pipe abutment aims to place the abutment in a location unaffected by soil movement. The mitigation efforts are analyzed using the finite element method with the Plaxis 2D and Ensoft Group programs. The analysis results indicate that the stability safety factor increased from 1.3 to 1.5. The response of forces on the soldier pile includes a bending moment of 239.9 kNm and a total displacement of 4.1 cm. The lateral deflection of the soil against the pipe is 0.8 cm, still below the permissible limit of 2.0 cm for allowable stress conditions.

Keywords: Landslide, Mitigation, Penstock Pipe, Slope Stability.

I. PENDAHULUAN

Kestabilan lereng merupakan salah satu aspek yang sangat penting dalam ilmu teknik sipil. Aspek

ini selalu dipertimbangkan diberbagai pekerjaan sipil yang bersinggungan dengan lereng, termasuk diantaranya pekerjaan galian, timbunan, dan berbagai fasilitas transportasi seperti jalan raya,

jalur kereta api, bandara, pelabuhan, dan lainnya.

Kelongsoran lereng melibatkan berbagai proses dan faktor penyebab sehingga memberikan kemungkinan tidak terbatas mengenai klasifikasinya. Sebagai contoh kelongsoran dapat dibagi berdasarkan bentuk kegagalan, jenis material kelongsoran, ataupun penyebab terjadinya longsor[1]. Dalam penelitian ini dikaji penyebab terjadinya longsor akibat dari saturasi air hujan pada lereng eksisting. Selanjutnya lereng yang berpotensi terjadi pergerakan direncanakan penanganan menggunakan perkuatan *soldier pile*. *soldier pile* merupakan barisan tiang bor yang dipasang dengan jarak tertentu yang berfungsi untuk memotong bidang kelongsoran lereng[2][3][4][5]. Dalam beberapa penelitian sebelumnya perkuatan lereng menggunakan *soldier pile* dapat dimodelkan dengan metode elemen hingga pada kondisi 2D maupun 3D [6][7][8][9]. Tidak hanya terbatas dalam pemodelan *soldier pile* metode elemen hingga juga dapat digunakan untuk analisis permasalahan geoteknik lainnya, salah satunya yang dilakukan untuk metode perkuatan timbunan[10]. Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan metode elemen hingga cukup *powerfull* dalam memodelkan perkuatan lereng. Kemudian dalam proses analisisnya metode perkuatan dikontrol terhadap syarat batas yang ditetapkan dalam standar [11]. Dengan demikian penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu rujukan dalam aplikasi metode penanganan kelongsoran pada lereng tanah.

II. METODOLOGI

Kronologi Pergerakan Tanah pada Lereng di Jalur *Penstock*

Pada bulan Oktober 2022 terjadi intensitas curah hujan yang cukup tinggi di daerah Tinjauan. Daerah tinjauan merupakan lereng dengan relief topografi bergelombang dengan kemiringan lereng 10 – 30° dengan ketinggian lokasi terletak di antara 550 – 737,5 m DPL. Intensitas curah hujan tinggi menyebabkan kondisi tanah dasar tersaturasi penuh. Adanya massa tambahan, pergerakan curah hujan tinggi, dan kebocoran saluran irigasi menjadi indikasi pemicu pergerakan tanah di area lereng di luar area *Penstock*.



Gambar 1. Kondisi lapangan area lereng perkebunan masyarakat di luar penstock (Bagian 1)



Gambar 2. Kondisi lapangan area lereng perkebunan masyarakat di luar penstock (Bagian 2)

Gambar 1 dan Gambar 2 merupakan kondisi lapangan di area lereng perkebunan masyarakat. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa lokasi pipa *penstock* berada kaki lereng dan kemungkinan pergerakan pada abutment pipa *penstock* akibat dari pergerakan lereng di atas pipa *penstock*.

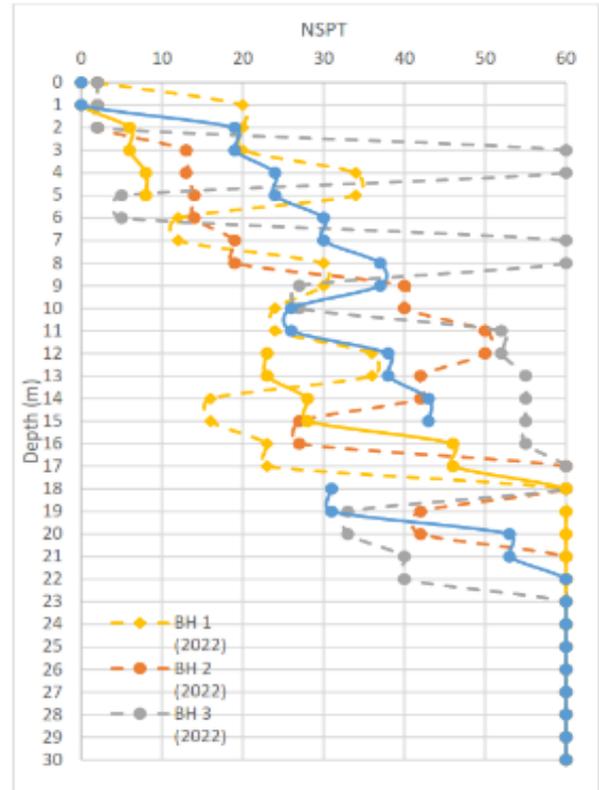


Gambar 3. Kondisi penstock : (a) ikatan penstock terhadap *saddle support* terlepas; (b) kondisi plasteran yang retak di bawah penstock; dan (c) kondisi retak memanjang pada area plasteran

Gambar 3 menunjukkan hasil tinjauan pada area penstock dimana terlihat adanya indikasi-indikasi pergerakan tanah pada lokasi tinjauan yang ditunjukkan dengan terlepasnya *saddle support* dan adanya retakan memanjang pada plasteran sepanjang *anchor block* 4 (AB4) sampai *anchor blok* 5 (AB5).

Kondisi Tanah

Kondisi tanah dilihat berdasarkan hasil penyelidikan tanah yang berupa pemboran dalam dan pengujian standar penetrasi (SPT) sebanyak 5 titik. 5 titik penyelidikan tanah ini terdiri dari 3 titik bor yang dilakukan pada tahun 2022 (BH 01, BH 02, dan BH 03) dan 2 titik bor yang dilakukan pada tahun 2021 (BH-02 dan BH-03).



Gambar 4. Hasil uji standar penetrasi

Berdasarkan data tanah BH 01, lapisan tanah pada kedalaman 0 m – 2 m didominasi oleh lempung lunak dengan NSPT 2. Lalu pada kedalaman 2 m – 18 m didominasi oleh lempung kaku sampai keras dengan NSPT yang bervariasi antara 13 – 36. Kemudian pada kedalaman 18 m sampai akhir pengeboran didominasi oleh lempung keras dengan NSPT >60. Ground water level terletak pada kedalaman 4 m dari permukaan tanah.

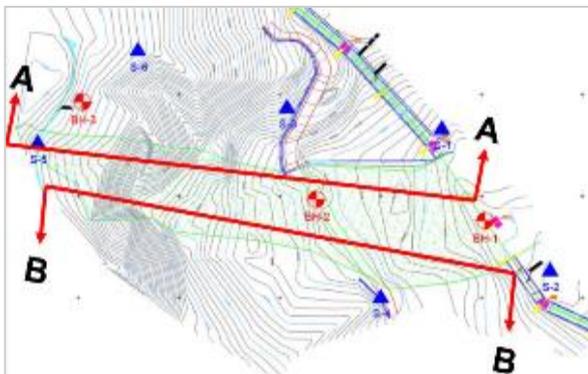
Berdasarkan data tanah BH 02, lapisan tanah pada kedalaman 0 m – 2 m didominasi oleh lempung lunak dengan NSPT 2. Lalu pada kedalaman 2 m – 18 m didominasi oleh lempung kaku sampai keras dengan NSPT yang bervariasi antara 12 – >60. Kemudian pada kedalaman 18 m sampai akhir pengeboran didominasi oleh lempung keras dengan NSPT >60. Ground water level terletak pada kedalaman 3 m dari permukaan tanah.

Berdasarkan data tanah BH 03, lapisan tanah pada kedalaman 0 m – 2 m didominasi oleh lempung lunak dengan NSPT 2. Lalu pada kedalaman 2 m – 22 m didominasi oleh lempung lunak sampai keras dengan NSPT yang bervariasi antara 5 – >60. Kemudian pada kedalaman 18 m

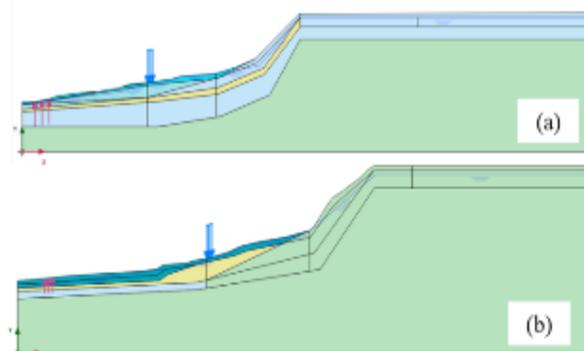
maupun hilir, dibutuhkan untuk mengakomodir perubahan sudut vertikal (*slope*) maupun horizontal (belokan) dari pipa *penstock*.

Model Analisa Lereng dan Fondasi Abutment Penstock

Dalam pemodelan perkuatan lereng perlu ditentukan kondisi awal model. Kondisi awal model ini harus mencerminkan kondisi yang terjadi dilapangan. Dengan demikian sebelum masuk pada model perkuatan harus dilakukan pemodelan analisis balik terlebih dahulu untuk mendekati kondisi yang terjadi dilapangan.



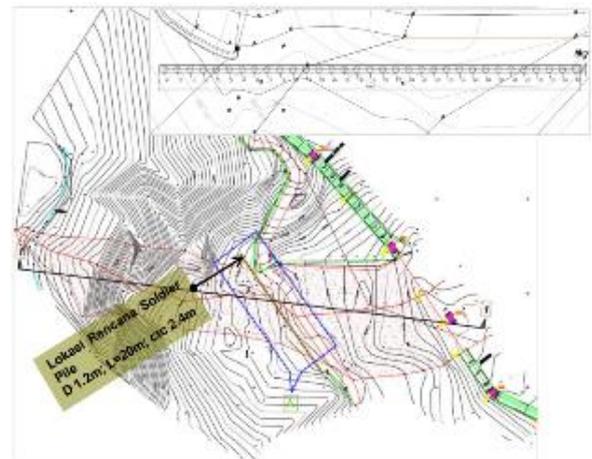
Gambar 6. Layout potongan analisis balik



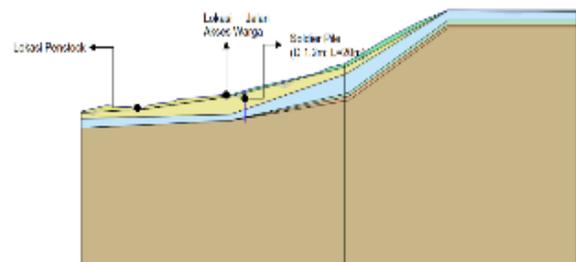
Gambar 7. Model analisis balik lereng : (a) potongan A-A dan (b) potongan B-B

Gambar 6 dan Gambar 7 memperlihatkan model pada potongan A-A dan potongan B-B. Dimana pada potongan A-A pelapisan tanah dibuat berdasarkan data BH 02 (2022), BH-02 (2021), dan Bh-03 (2021). Sedangkan pada potongan B-B pelapisan tanah dibuat berdasarkan

BH 03 (2022), BH-02 (2021), dan BH-03 (2021). Tahapan pemodelan yang dilakukan pada analisis balik dimulai dari kondisi awal yang bertujuan untuk mendefinisikan kondisi tegangan awal tanah dan air. Kemudian dilakukan pengaktifan beban jalan desa sebesar 5 kPa. Terakhir menaikkan muka air tanah di permukaan untuk mendekati kondisi saturasi tanah akibat air hujan.



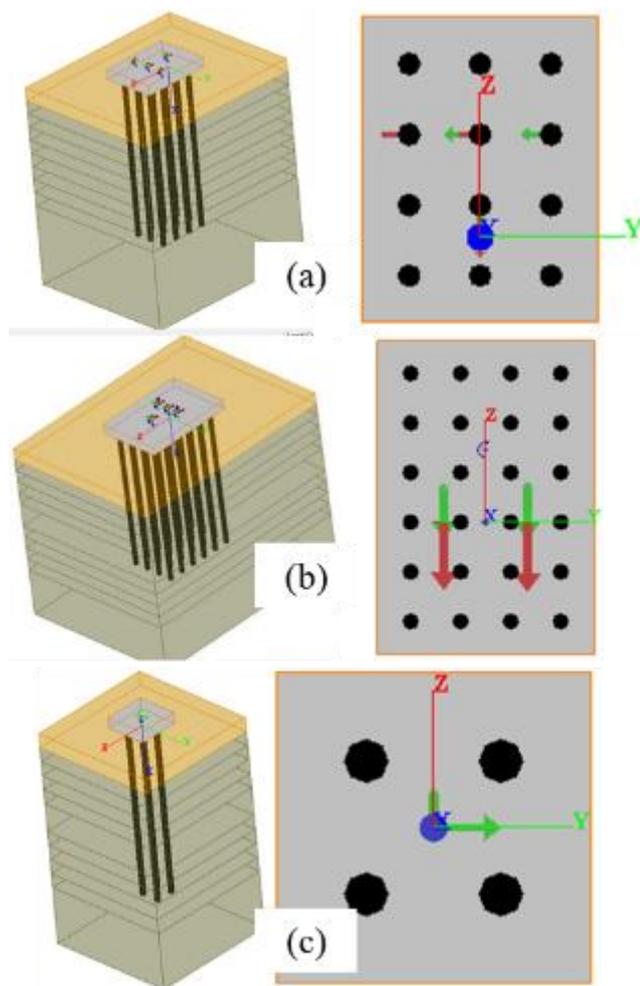
Gambar 8. Layout potongan perkuatan lereng dengan *soldier pile*



Gambar 9. Model perkuatan lereng dengan *soldier pile*

Gambar 8 dan Gambar 9 merupakan layout potongan dan model perkuatan dengan *soldier pile*. Pemodelan perkuatan dilakukan dengan tahapan kondisi awal (dimana air sudah berada di permukaan), kemudian pemasangan *soldier pile*, dan pengecekan faktor keamanan lereng setelah diperkuat. Pemodelan analisis balik dan perkuatan lereng dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan program Plaxis 2D. Faktor keamanan pada program Plaxis ditentukan berdasarkan reduksi nilai sudut geser dan nilai kohesi yang diinput

dalam pemodelan[10]. Material tanah dimodelkan sebagai klaster dengan model konstitutif hardening soil. Beban jalan dimodelkan sebagai beban merata. Sedangkan *soldier pile* dimodelkan sebagai elemen plate yang parameternya disesuaikan dengan konfigurasi *soldier pile*.



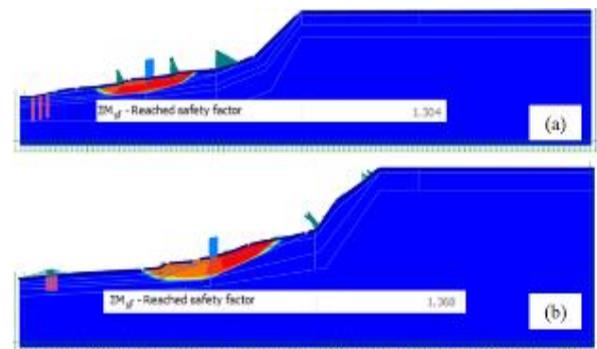
Gambar 10. Model analisis fondasi: (a) fondasi *abutment* sisi hulu, (b) fondasi *abutment* sisi hilir, dan (c) fondasi *anchor blok-5* (AB5)

Gambar 10 menunjukkan model analisis fondasi. Fondasi *abutment* pada sisi hulu direncanakan menggunakan tipe bored pile dengan diameter 800 mm, panjang tertanam 24 m, dan konfigurasi tiang 3x4. Fondasi *abutment* pada sisi hilir direncanakan menggunakan tipe bored pile dengan diameter 800 mm, panjang tertanam

24 m, dan konfigurasi tiang 4x6. Fondasi *Anchor Block-5* direncanakan menggunakan tipe bored pile dengan diameter 800 mm, panjang tertanam 24 m, dan konfigurasi tiang 2x2. Jumlah tiang ditentukan dari kebutuhan tiang terbanyak terhadap: gaya aksial, lateral, dan moment.

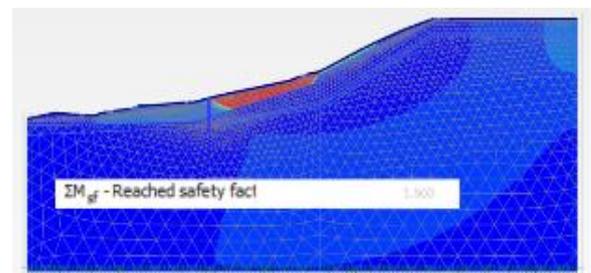
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkuatan Lereng



Gambar 11. Hasil analisis balik: (a) potongan A-A dan (b) potongan B-B

Hasil analisis balik yang ditunjukkan pada Gambar 11 memperlihatkan bahwa faktor keamanan stabilitas lereng pada potongan A-A dan potongan B-B secara berturut-turut sebesar 1,304 dan 1,368. Dimana nilai tersebut masih dibawah kriteria sebesar 1,5 untuk dikatakan aman. Selain itu posisi bidang keruntuhan berada pada lereng diatas lokasi *pipa penstock* yang mengalami pergerakan. Hal tersebut cocok dengan indikasi yang terlihat dilapangan. Dengan demikian hasil analisis balik dapat dikatakan cukup mendekati kondisi aktual yang terjadi dilapangan.



Gambar 12. Hasil analisis stabilitas dengan perkuatan *soldier pile*

Hasil analisis perkuatan lereng pada Gambar 12 menunjukkan bahwa panjang perkuatan sudah

sesuai, terlihat dari bidang gelincir yang sudah terlewati oleh *soldier pile*. Perkuatan dengan *soldier pile* memberikan efek yang signifikan terhadap faktor keamanan stabilitas lereng, dimana meningkat menjadi 1,503. Jika dibandingkan terhadap kriteria keamanan, maka lereng dengan *soldier pile* dapat dikatakan aman. Berdasarkan hasil analisis juga didapatkan respon gaya dalam yang terjadi pada *soldier pile*, yaitu bending moment maksimum sebesar 239.9 kN-m dan total displacement sebesar 4.1 cm. Defleksi lateral tanah terhadap pipa sebesar 0.8 cm, masih berada di bawah batas izin 2.0 cm untuk kondisi tegangan izin.

Fondasi *Abutment* dan *Block Anchor*

Nilai daya dukung tiang tunggal ditentukan berdasarkan data tanah yang terdekat dengan lokasi rencana. Fondasi *abutment* pada sisi hulu dihitung berdasarkan data tanah BH 01. Daya dukung yang dihasilkan untuk kondisi tekan adalah sebesar 2193 kN dan kondisi tarik sebesar 1272 kN. Kemudian untuk daya dukung fondasi *abutment* dan *block anchor-5* pada sisi hilir dihitung dengan data tanah BH 03. Daya dukung yang dihasilkan untuk kondisi tekan adalah sebesar 2512 kN dan kondisi tarik sebesar 1511 kN.

Tabel 1. Rekapitulasi pengecekan respon gaya aksial, *bending moment*, gaya geser, dan deformasi izin fondasi *abutment* sisi hulu

Jumlah Tiang	Load Case Combination	Diameter (mm)	Panjang Tiang (m)	Kontrol Kapasitas Aksial				Bending Moment				Kontrol Defleksi					
				Ultimate (kN)	FX Tekan (kN)	SF	Cek	Ultimate (kN)	FX Tarik (kN)	SF	Cek	Mmax (kN-m)	Shear Force (kN)	DY (mm)	DZ (mm)	Dizin (mm)	Cek
12 Tiang	1	800	24	5481.5	301.48	18.18	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			52.6	16.5	0.0102	0.0080	6.25	OK
12 Tiang	2	800	24	5481.5	584.28	8.23	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			67.1	28.9	0.1485	0.0484	6.25	OK
12 Tiang	3	800	24	5481.5	695.57	7.83	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			74.2	38.0	0.1315	0.2524	6.25	OK
12 Tiang	4	800	24	5481.5	678.14	8.11	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			88.5	47.6	0.0663	0.3750	6.25	OK
12 Tiang	5	800	24	5481.5	822.58	8.88	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			78.8	38.1	0.1201	0.2884	6.25	OK
12 Tiang	6	800	24	5481.5	823.78	6.65	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			75.7	39.3	0.1580	0.2738	6.25	OK
12 Tiang	7	800	24	5481.5	718.91	7.82	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			67.8	32.7	0.0232	0.2000	6.25	OK
12 Tiang	8	800	24	5481.5	695.57	7.88	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			74.2	38.0	0.1315	0.2524	6.25	OK
12 Tiang	9	800	24	5481.5	488.51	11.79	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			84.3	28.9	0.1900	0.0738	6.25	OK
12 Tiang	10	800	24	5481.5	482.38	11.26	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			74.3	31.9	0.0242	0.1686	6.25	OK
12 Tiang	11	800	24	5481.5	438.44	12.78	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			64.5	25.3	0.1127	0.0679	6.25	OK
12 Tiang	12	800	24	5481.5	427.9	12.81	OK	3179.2	Tidak terjadi Tarik			64.5	27.4	0.0642	0.0880	6.25	OK

Tabel 2. Rekapitulasi pengecekan respon gaya aksial, *bending moment*, gaya geser, dan deformasi izin fondasi *abutment* sisi hilir

Jumlah Tiang	Load Case Combination	Diameter (mm)	Panjang Tiang (m)	Kontrol Kapasitas Aksial				Bending Moment				Kontrol Defleksi					
				Ultimate (kN)	FX Tekan (kN)	SF	Cek	Ultimate (kN)	FX Tarik (kN)	SF	Cek	Mmax (kN-m)	Shear Force (kN)	DY (mm)	DZ (mm)	Dizin (mm)	Cek
24 Tiang	1	800	24	6280.8	131.32	47.83	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			29.2	22.6	0.0657	0.0400	6.25	OK
24 Tiang	2	800	24	6280.8	264.18	23.77	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			72.3	52.1	0.2115	0.1607	6.25	OK
24 Tiang	3	800	24	6280.8	196.34	31.89	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			21.5	16.7	0.0183	0.0638	6.25	OK
24 Tiang	4	800	24	6280.8	282.71	22.22	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			113.2	77.5	0.1538	0.3455	6.25	OK
24 Tiang	5	800	24	6280.8	271.88	23.09	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			98.1	88.7	0.2098	0.2741	6.25	OK
24 Tiang	6	800	24	6280.8	247.6	25.37	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			17.8	14.7	0.0408	0.0720	6.25	OK
24 Tiang	7	800	24	6280.8	380.59	17.42	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			85.8	48.0	0.0221	0.2219	6.25	OK
24 Tiang	8	800	24	6280.8	234.81	26.75	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			61.6	44.8	0.0363	0.1923	6.25	OK
24 Tiang	9	800	24	6280.8	284.18	22.77	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			72.3	52.1	0.2110	0.1007	6.25	OK
24 Tiang	10	800	24	6280.8	213.58	29.41	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			25.7	14.4	0.0197	0.0327	6.25	OK
24 Tiang	11	800	24	6280.8	216.54	28.01	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			25.3	21.0	0.0371	0.0745	6.25	OK
24 Tiang	12	800	24	6280.8	214.64	29.26	OK	3778.7	Tidak terjadi Tarik			84.4	59.4	0.1794	0.2077	6.25	OK

Tabel 3. Rekapitulasi pengecekan respon gaya aksial, *bending moment*, gaya geser, dan deformasi izin fondasi *anchor block-5*

Jumlah Tiang	Load Case Combination	Diameter (mm)	Panjang Tiang (m)	Kontrol Kapasitas Aksial				Bending Moment				Shear Force (kN)	Kontrol Defleksi				
				Ultimate (kN)	FX Tekan (kN)	SF	Cek	Ultimate (kN)	FX Tarik (kN)	SF	Cek		Mmax (kN-m)	DY (mm)	DZ (mm)	Dizin (mm)	Cek
4 Tiang	1	800	24	6280.8	788.62	7.86	OK	3778.7	894.22	4.70	OK	340.8	243.6	2.5797	0.8122	6.25	OK

Hasil analisis pada Tabel 1 – 3 menunjukkan konfigurasi fondasi yang digunakan masih aman terhadap beban yang terjadi. Pada fondasi *abutment* sisi hulu beban aksial paling kritis terjadi pada kombinasi pembebanan 6 dengan nilai faktor keamanan sebesar 6,65. *Moment* dan defleksi tiang terbesar terjadi pada kombinasi beban 4 sebesar 89,5 kN.m dan 0,375 mm. Kemudian pada fondasi *abutment* sisi hilir beban aksial paling kritis terjadi pada kombinasi pembebanan 7 dengan nilai faktor keamanan sebesar 17,42. *Moment* dan defleksi tiang terbesar terjadi pada kombinasi beban 4 sebesar 113,2 kN.m dan 0,349 mm. Selanjutnya pada fondasi *anchor block-5* faktor keamanan terhadap beban aksial sebesar 7,86. *Moment* dan defleksi tiang sebesar 340,9 kN.m dan 2,58 mm.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengamatan dilapangan kerusakan pada pipa *penstock* terindikasi diakibatkan oleh pergerakan lereng di atas lokasi jalur pipa. Hal ini terkonfirmasi dari hasil analisis dimana faktor keamanan lereng kurang dari kriteria dan bidang longsor yang terjadi berada di sekitar jalan akses warga yang berada di lereng atas jalur pipa *penstock*. Upaya mitigasi yang dilakukan dengan memasang perkuatan *soldier pile* dan membuat pipa elevated terbukti meningkatkan faktor keamanan lereng secara signifikan dan mengurangi resiko kerusakan pipa *penstock* di waktu yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. P. H. Huang, *Slope stability analysis by the limit equilibrium method: Fundamentals and methods*. ASCE PRESS, 2014. doi: 10.1061/9780784412886.
- [2] F. Van Der Merwe dan G. Consulting, "Stability of the temporary excavation between Soldier Piles in Unsaturated Residual Granites in Sandton CBD," 2019, no. May.
- [3] C. Huang, X. Wang, M. Zhang, H. Zhou, dan Y. Liang, "Supporting characteristics of soldier piles for foundation pits under rainfall infiltration," *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/1053576.
- [4] A. E. Irani dan A. Azadi, "Evaluating Soldier pile retaining walls behavior under static and Pseudo-static analysis Evaluating Soldier pile retaining walls behavior under static and Pseudo-static analysis," in *2nd Iranian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2022, no. September.
- [5] H. A. Perko dan J. J. Boulden, "Lateral Earth Pressure on Lagging in Soldier Pile Wall Systems," *DFI J. - J. Deep Found. Inst.*, vol. 2, no. 1, hal. 52–60, 2008, doi: 10.1179/dfi.2008.006.
- [6] F. Andersen dan M. R. Lodahl, "Modelling of soldier pile walls in Plaxis 2D," in *10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 2023, no. June, hal. 1–6. doi: 10.53243/NUMGE2023-25.
- [7] J. Chalmovsky, R. Fiala, dan L. Mica, "Soldier pile walls - 3D numerical analysis of soldier pile embedment," *Comput. Plast. XI - Fundam. Appl. COMPLAS XI*, no. March, hal. 1263–1272, 2011.
- [8] S. H. Hong, F. H. Lee, dan K. Y. Yong, "Three-dimensional pile-soil interaction in soldier-piled excavations," *Comput. Geotech.*, vol. 30, no. 1, hal. 81–107, 2003, doi: 10.1016/S0266-352X(02)00028-9.
- [9] J. Jalili dan M. Moosavi, "Evaluation of the Truncated Soldier Pile Behavior in an Anchored Deep Excavation Case Study By the Aid of 3D and 2D Finite Element Analyses," *J. Geengin.*, vol. 14, no. 3, hal. 191–202, 2019, doi: 10.6310/jog.201909_14(3).7.
- [10] Z. Gusnadi, I. Handiman, dan Fitriana sarifah, "ANALISA PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN CONTROLLED MODULUS COLUMNS (CMC) PADA KONSTRUKSI TIMBUNAN JALAN," *Akselerasi J. Ilm. Tek. Sipil*, vol. 2, no. 2, hal. 26–34, 2023.
- [11] BSNI, *Persyaratan perancangan geoteknik*. BSNI, 2017.