

Kajian Kegagalan Pondasi Jembatan Di Atas Tanah Lunak: Dampak Terhadap Stabilitas dan Rekomendasi Perkuatan Pada Proyek Jembatan di Kalimantan Timur

Anna Dewi^{a,1}, Altho Sagara^{b,2,*}, Try Kurniawan Akhbar^{c,3}, Lindung Zalbuin Mase^{d,4}

^a PT Enjiniring Pilar Cakrawala, Jalan Setra Dago Utama Nomor 47, Bandung, 40291

^b Universitas Katolik Parahyangan, Jalan Ciumbuleuit Nomor 94, Bandung, 40281

^c Politeknik Negeri Bandung, Jalan Gegerkalong Hilir, Kabupaten Bandung Barat, 40559

^d Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu, Jalan WR Supratman Nomor 2, Bengkulu, 38371

¹ Annadewi197@gmail.com; ² Altho.sagara@unpar.ac.id*; ³ try.kurniawan@polban.ac.id, ⁴ lmase@unib.ac.id

* Corresponding Author

ABSTRACT

Banyak terjadi kasus kegagalan pondasi jembatan di kota besar Indonesia akibat keberadaan tanah lunak. Pengambilan keputusan membuat praktisi dan engineer berhadapan dengan berbagai kondisi yang mempengaruhi pemilihan jenis perkuatan tanah dan perkuatan struktur jembatan. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian terhadap penyebab kegagalan struktur pondasi yang berada di tanah lunak. Studi ini menyelidiki tentang faktor penyebab kegagalan pondasi jembatan pada Proyek X di Kalimantan Timur yang ditinjau terhadap tekanan air pori dan stabilitas tanah. Tujuannya, untuk memberikan perkuatan tanah dan rekomendasi struktur yang telah memenuhi kriteria desain geoteknik untuk diterapkan pada jembatan. Pada studi ini, telah dilakukan interpretasi data dan analisis stabilitas tanah menggunakan program bantu metode elemen hingga (FEA). Analisis dilakukan pada kondisi aktual dan setelah dilakukan perkuatan tanah. Hasil temuan menunjukkan bahwa kegagalan pondasi terjadi akibat perubahan tekanan air pori dan adanya tanah timbunan di atas tanah lunak. Akibat penambahan perkuatan tanah dan struktur, FK dapat meningkatkan stabilitas tanah masing-masing sebesar 51.89% dan 26.42%.

ABSTRACT

Many cases of bridge foundation failure happen in major Indonesian cities due to soft soil conditions. The option of soil improvement and structural reinforcement is influenced by many conditions that engineers and professionals have to consider when using technical solutions. Therefore, it is important to investigate the factors which cause foundation construction fail in soft soil. This study examines factors contributing to bridge foundation failure in Project X in East Kalimantan, focusing on pore water pressure and soil stability. The aim is to provide soil reinforcement and structural recommendations that comply with the geotechnical design standards applicable to bridges. This study used a finite element analysis (FEA) method for data interpretation and soil stability analysis. The analysis was conducted under real conditions and after soil reinforcement. The results indicate that foundation failure is caused by variations in pore air pressure and the condition of embankment soil on soft soil. The use of soil reinforcement and structure allowed FK to increase soil stability by 51.89% and 26.42%, respectively.



KATA KUNCI

Kegagalan pondasi
Tanah lunak
Metode elemen hingga
Pile embankment
Stabilitas

KATA KUNCI

Finite Element Method
Foundation failure
Pile embankment
Pore water pressure
Structure reinforcement



This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

1. Pendahuluan

Pesatnya perkembangan urbanisasi menyebabkan pemanfaatan ruang di kota besar Indonesia meningkat sehingga membutuhkan bangunan teknik sipil untuk mendukung prasarana transportasi, salah satunya adalah jembatan [1]. Jembatan terdiri dari struktur atas dan struktur bawah. Struktur bagian bawah adalah pondasi yang berperan sebagai bangunan pendukung untuk menerima seluruh beban yang bekerja di atasnya [2]. Untuk itu, diperlukan pondasi yang kuat yang dapat menjaga kestabilan terhadap berat sendiri, beban aksial, beban lateral, dan beban gempa [3], [4]. Pekerjaan pondasi merupakan pekerjaan yang krusial karena pondasi harus didesain lebih kuat daripada struktur atas agar kuat memikul beban di atasnya dan mencegah kegagalan bangunan struktur [5], [6]. Bowles menjelaskan bahwa pondasi terbagi menjadi dua jenis, yaitu pondasi dangkal dan pondasi dalam, hal tersebut dikategorikan berdasarkan kedalaman pondasi [7]. Dibutuhkan pondasi dalam jika letak kedalaman tanah keras melebihi 8 meter.

Beberapa daerah di kota besar berada di atas tanah lunak yang kedalamannya mencapai 20 meter. Satu diantara banyak daerah yang memiliki karakteristik tanah lunak ditemukan pada Proyek X di daerah Kalimantan Timur. Pada daerah yang memiliki karakteristik tanah lunak dengan kedalaman mencapai 20 meter, pemilihan pondasi tiang pancang (*driven pile*) menjadi alternatif yang baik untuk menopang suatu bangunan [8]. Namun, perlu dilakukan tinjauan lebih lanjut terhadap stabilitas jembatan, daya dukung tanah, dan daya dukung pondasi [9]. Selain itu, kinerja jembatan sangat bergantung pada pondasi sebagai bangunan penopang yang memberikan stabilitas dan daya dukung.

Menurut penelitian sebelumnya, tiang pancang dikategorikan sebagai tiang yang berpindah (*displacement pile*) yang artinya pada saat proses pemancangannya, tiang akan mendesak tanah di sekitarnya sehingga dapat mempengaruhi daya dukung pondasi akibat adanya tegangan lateral [10]. Dari proses pemancangan juga mengakibatkan pergerakan pada tanah. Jika pergerakan tersebut melebihi daya dukung izin, maka akan terjadi kegagalan pada pondasi [11]. Selain itu, proses pemancangan menyebabkan perpindahan material tanah yang mendesak tiang disekelilingnya yang dapat menyebabkan kegagalan pondasi, satu diantaranya adalah pergeseran tiang. Kegagalan dalam pondasi dapat mempengaruhi integritas seluruh struktur, ditambah lagi akibat adanya tanah lunak.

Keberadaan tanah lunak menjadi salah satu masalah dalam bidang konstruksi karena memiliki kadar air tinggi dan daya dukung rendah sehingga dapat merusak konstruksi di atasnya [12], [13]. Pada konstruksi jembatan khususnya di area oprit, perlu dilakukan penimbunan untuk memenuhi elevasi akhir jalan [14]. Apabila penimbunan dilakukan di atas tanah lunak, maka akan terjadi perubahan tekanan air pori [15]. Hal tersebut akan mempengaruhi kestabilan oprit pada masa konstruksi. Oleh karena itu, diperlukan pemilihan penanganan tanah yang tepat untuk mencegah kelongsoran pada oprit yang dapat mengakibatkan kegagalan pondasi, salah satunya adalah perkuatan tanah dengan sistem *pile embankment*. Menurut penelitian sebelumnya [16], [17], [18], *pile embankment* menjadi salah satu solusi terbaik untuk memperkuat tanah timbunan yang berdiri di atas tanah lunak. Penanganan tersebut tentunya mempengaruhi biaya konstruksi dan waktu pelaksanaan proyek [19].

Kasus kegagalan pondasi ditemukan pada Proyek X di Kalimantan Timur. Kegagalan pondasi yang terjadi adalah pergeseran tiang akibat pemancangan yang terjadi di atas tanah lunak. Keberadaan tanah lunak di area Kalimantan Timur dibuktikan pada peta sebaran tanah lunak seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Proses pemancangan tiang menghasilkan getaran yang mengakibatkan perubahan tekanan air pori dan pergerakan massa tanah pada tanah lunak [10], [11], [20]. Ilustrasi pengaruh pemancangan tiang yang mengakibatkan perubahan tekanan air pori dan pergeseran tiang ditunjukkan pada **Gambar 2**. Pergeseran tiang pancang terjadi dengan jarak yang bervariasi hingga 2 meter. Temuan ini dibuktikan dengan hasil kalenderiing dan pengujian *Pile Integrity Test* (PIT). Berdasarkan kondisi aktual, diperlukan perkuatan tanah dengan pondasi untuk menambah stabilitas tanah. Dari beberapa peneliti, hasilnya membuktikan bahwa *pile embankment* terbukti dapat meningkatkan stabilitas tanah dan mengurangi penurunan [17], [19]. Adapun rekomendasi perkuatan struktur jembatan terdiri dari penambahan struktur pile slab untuk mengurangi beban timbunan pada

oprit jembatan. Timbunan yang tinggi menjadi salah satu indikasi penyebab ketidakstabilan pada tanah [21]. **Gambar 3** menunjukkan ilustrasi timbunan sebagai beban yang bekerja di atas tanah lunak.

Tujuan dari penelitian ini untuk mengidentifikasi pengaruh kegagalan struktur pondasi akibat pemancangan pada tanah lunak yang ditinjau dari stabilitas tanah di area pondasi jembatan. Stabilitas tanah dinilai dari besarnya faktor keamanan (FK) minimal sebesar 1.3. Kemudian, dilakukan analisis perkuatan tanah dengan menggunakan pondasi tiang pancang kotak (*minipile*) yang dikombinasikan dengan geotekstil pada timbunan dan perkuatan struktur di area oprib jembatan menggunakan program bantu berbasis metode elemen hingga (FEM). Harapannya, dari perkuatan tanah dan perkuatan struktur yang telah dianalisis, dapat meningkatkan kinerja struktur jembatan di Proyek X dalam periode jangka panjang.

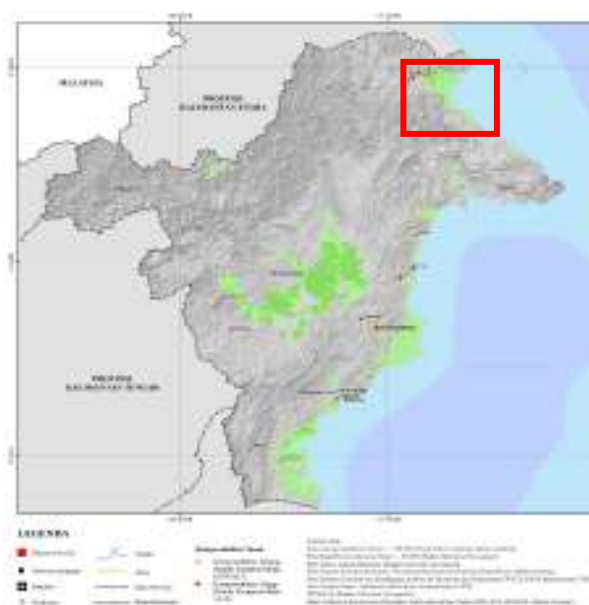


Fig. 1.Peta Sebaran Tanah Lunak di Daerah Kalimantan Timur [22]

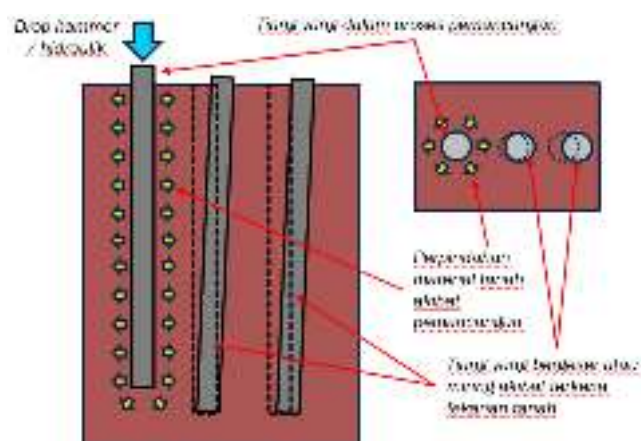


Fig. 2. Ilustrasi Pengaruh Pemancangan Pondasi pada Tanah Lunak

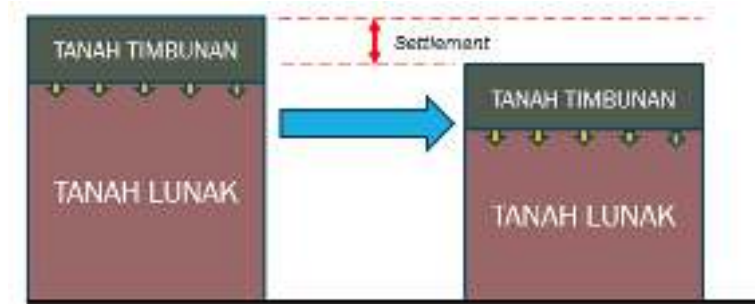


Fig. 3. Ilustrasi Timbunan sebagai Beban pada Tanah Lunak

2. Metode

2.1. Lokasi Tinjauan

Lokasi tinjauan penelitian terletak di Kota Berau, Provinsi Kalimantan Timur yang ditunjukkan pada **Gambar 4**.

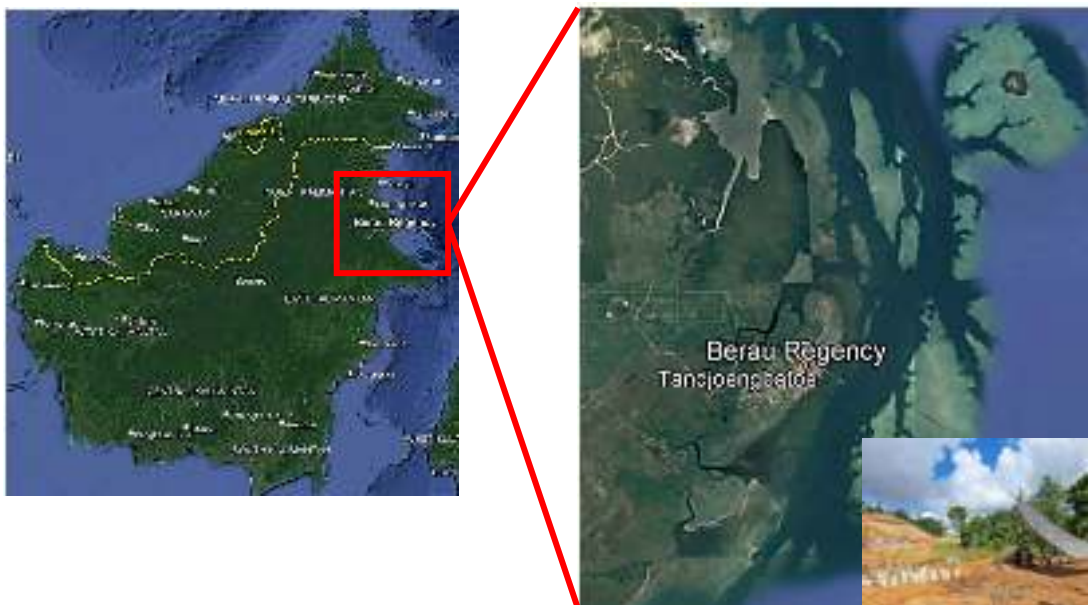


Fig. 4. Lokasi Tinjauan Penelitian (Dokumentasi Proyek X)

2.2. Tahapan Penelitian

Studi ini terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu interpretasi data tanah, menganalisis stabilitas tanah berdasarkan kondisi eksisting, analisis setelah diberi perkuatan *pile embankment*, dan analisis setelah diberi perkuatan struktur pileslab. Dari beberapa rekomendasi perkuatan, telah dipilih satu alternatif penanganan struktur yang dapat dibangun untuk mencegah kegagalan struktur akibat adanya tanah lunak.

Tahapan awal yaitu pengumpulan data tanah dari hasil investigasi tanah di lapangan. Investigasi tanah terdiri dari pengeboran standar penetrasi (SPT) dan uji sondir elektrik (CPTu). Selanjutnya, pengumpulan data hasil pengujian tanah di laboratorium untuk membuat parameter tanah yang digunakan pada analisis stabilitas oprit. Semua data tanah yang diperoleh telah digunakan sebagai parameter tanah eksisting, sedangkan parameter tanah timbunan diperoleh dari hasil pendekatan propertis tanah.

Tahapan selanjutnya yaitu menganalisis stabilitas tanah di area oprit jembatan. Analisis stabilitas oprit dilakukan pada tiga kondisi yaitu pada kondisi aktual (saat pemancangan), setelah diberi perkuatan tanah, dan setelah diberi perkuatan struktur, sehingga terbagi menjadi empat variabel. Penamaan pada masing-masing variabel ditunjukkan pada **Tabel 1**. Analisis stabilitas tanah dilakukan menggunakan program bantu Plaxis 2D dengan prinsip metode elemen hingga (FEM) untuk memperoleh nilai penurunan tanah (U), faktor keamanan (FK), dan tekanan air pori. Analisis FEM diawali dengan pembuatan geometri tanah sesuai dengan statigrafi tanah, input elemen struktur pondasi, input beban surcharge sebesar 15 kPa, input kedalaman muka air tanah, dan menyusun tahapan konstruksi. Tahapan konstruksi direncanakan sesuai dengan kondisi lapangan. Material tanah eksisting dan timbunan menggunakan model Mohr-Coulomb yang ditunjukkan pada tabel parameter tanah (**Tabel 2**). Semua data yang digunakan pada analisis FEM telah disesuaikan dengan ketersediaan data yang ada sehingga harapannya pemodelan FEM sudah mewakili kondisi aktual di lapangan. Setelah melakukan analisis stabilitas, tahapan akhir dari studi ini yaitu menyajikan satu rekomendasi penanganan tanah dan satu rekomendasi perkuatan struktur jembatan yang telah diverifikasi dari hasil analisis FEM.

Table 1. Variabel Penelitian

No.	Deskripsi	Variabel
1	Kondisi eksisting dengan adanya timbunan di atas tanah lunak pada oprit	K-1
2	Kondisi timbunan setelah diberi perkuatan pondasi	K-2
3	Kondisi oprit dengan perkuatan struktur pile slab dengan pondasi tiang bor	K-3
4	Kondisi oprit dengan perkuatan struktur pile slab dengan pondasi tiang baja	K-4

Table 2. Parameter Tanah

Parameter	Lempung Lanauan (Sangat Lunak) (0 – 8 m)	Lanau Pasiran (Kaku) (8 – 9 m)	Lempung Lanauan (Lunak) (9 – 16 m)	Pasir Lanauan (Sedang) (16 – 18 m)	Pasir (Sedang) (18 – 39 m)	Lempung (Sangat Kaku) (39 – 42 m)	Pasir (Sangat Padat) (42 – 60 m)
NSPT	1	13	2	18	21	16	50
γ (kN/m ³)	15	17	15	18	18	19	20
E' (kPa)	1260	6703	2520	9384	10992	14000	26810
c' (kPa)	2	8	3	5	5	10	5
ϕ (°)	10	20	10	32	32	25	37
v	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
kH (m/hari)	0.0008	0.0006	0.0006	0.0864	0.0864	0.008	0.0864

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kondisi Tanah

Investigasi tanah yang terdiri dari pengujian bor SPT dan sondir elektrik (CPTu) dilakukan setelah pemancangan pondasi tiang. Pengeboran dalam (SPT) telah dilakukan dengan ditemukannya tanah lempung konsistensi lunak pada kedalaman 0 sampai 15 meter, pasir konsistensi sedang pada kedalaman 15 sampai 39 meter, lempung konsistensi kaku pada kedalaman 40 sampai 42, dan pasir

konsistensi sangat padat pada kedalaman 42 sampai 50 meter. Dari hasil CPTu, diperoleh kedalaman tanah lunak pada kedalaman 0 sampai 15 meter. Kedua pengujian menunjukkan hasil yang relatif sama yang dibuktikan dengan jenis dan konsistensi tanah.

3.2. Data Teknis Pondasi Tiang Pancang

Pada perencanaan pondasi jembatan, berikut adalah data teknis yang digunakan.

Jenis pondasi : Tiang Pancang/*Spun Pile* (CSP)

Diameter pondasi : 40 cm

Ketebalan pondasi : 75 mm

Kedalaman rencana : 35 m

Kedalaman aktual : 36 m

Daya dukung aksial tekan : 720.99 kN

Daya dukung aksial tarik : 368.41 kN

Kapasitas momen crack : 90 kN.m

Kapasitas momen break : 180 kN.m

Sketsa konfigurasi tiang ditunjukkan pada **Gambar 5**.

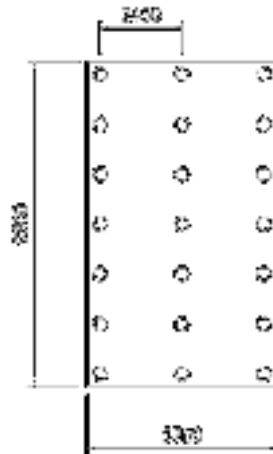


Fig. 5.Konfigurasi Pondasi Tiang Jembatan di Proyek X

3.3. Analisis Stabilitas Tanah pada Kondisi Eksisting

Faktor keamanan (FK), deformasi lateral (U_x), dan tekanan air pori telah ditinjau di area jembatan karena terjadi kegagalan pondasi akibat pemancangan di area tanah lunak. Pada variabel K-1, telah dimodelkan pondasi dalam keadaan miring, kondisi ini telah sesuai dengan permasalahan yang terjadi di lapangan. Pemodelan geometri menggambarkan posisi pondasi yang miring dengan menambahkan beban *surcharge* sebesar 15 kPa. Ilustrasi bidang keruntuhan, nilai FK, dan deformasi lateral ditunjukkan pada **Gambar 6** dan **Tabel 3**. Selain itu, telah dilakukan perbandingan terhadap grafik tekanan air pori dari hasil CPTu dan analisis FEM, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 7**.

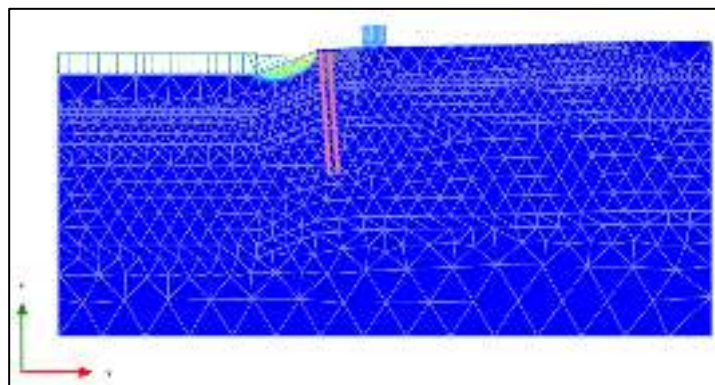


Fig. 6. Bidang Keruntuhan pada Kondisi Eksisting (K-1)

Table 3. Hasil Analisis FEM (K-1)

No.	Output	Nilai
1	Faktor Keamanan (FK)	1.06
2	Deformasi Lateral (m)	2.00
3	Momen (kN.m)	525.4

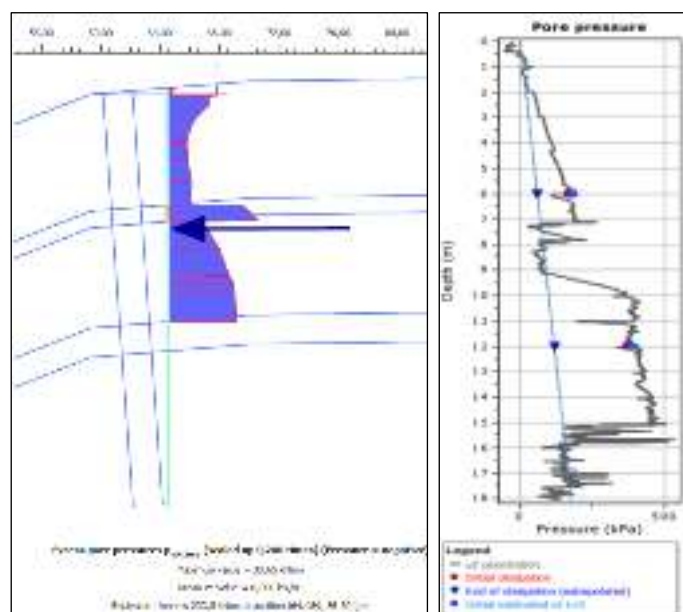


Fig. 7. Grafik Tekanan Air Pori Hasil CPTu dan Analisis FEM

Pada **Gambar 7**, terlihat bahwa bidang keruntuhan terjadi di area pondasi tiang yang dekat kemiringan tanah eksisting. Terbukti bahwa pergeseran pondasi yang terjadi sebesar 2 meter dengan faktor keamanan sebesar 1.06 yang artinya tanah tidak stabil dan rentan terjadi longsor. Momen maksimal yang terjadi pada pondasi sebesar 525.4 kN.m yang artinya telah melebihi kapasitas momen sebesar 180 kN.m sehingga dapat pondasi dapat terindikasi patah akibat tegangan horisontal yang terjadi. Hal ini dibuktikan pada penelitian sebelumnya dan hasil temuan pada pengujian PIT pada proyek X ini [23]. Dari hasil pengujian PIT, ditemukan bahwa pondasi telah mengalami patah.

Tinjauan terhadap tekanan air pori telah dilakukan. Hasilnya, grafik tekanan air pori dari program FEM relatif sama dengan hasil pengujian CPTu. Hal tersebut membuktikan bahwa faktor lain yang menyebabkan kegagalan pondasi akibat pemancangan yaitu terjadinya

perubahan tekanan air pori. Perubahan tekanan air pori menyebabkan ketidakstabilan tanah karena mengurangi kekuatan geser tanah dan menambah volume air pada tanah sehingga dapat menyebabkan longsor [24].

3.4. Analisis Stabilitas Tanah Dengan Perkuatan Pondasi

Penambahan pondasi direkomendasikan sebagai alternatif perkuatan tanah pada area oprit. Pondasi yang dibangun di bawah timbunan (*pile embankment*) direncanakan hingga kedalaman 9 meter. Dimensi pondasi yaitu 40x40 dengan jarak antar tiang 1 meter (2.5D). **Gambar 8** menunjukkan geometri perkuatan tanah dengan *pile embankment* (variabel K-2), dan **Gambar 9** menunjukkan pola keruntuhan pada potongan melintang.

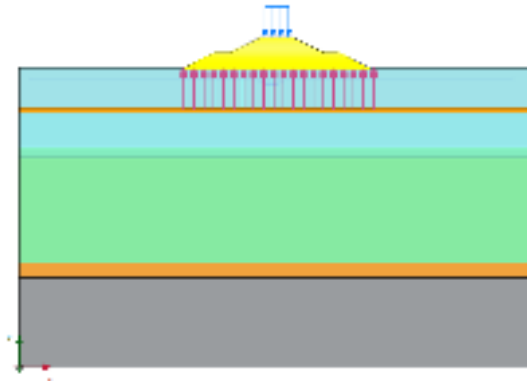


Fig. 8.Geometri Tanah pada Analisis FEM (K-2)

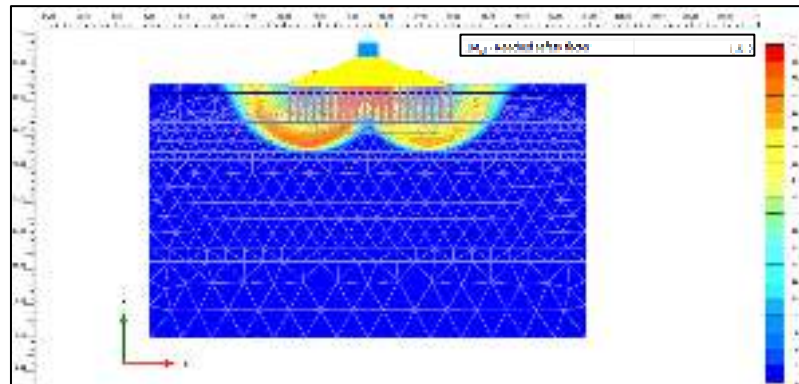


Fig. 9.Bidang Keruntuhan Setelah Diberi Perkuatan Pondasi

Dari hasil analisis, telah diperoleh nilai FK sebesar 1.61 pada variabel K-2. Nilai tersebut berada di atas syarat FK yaitu sebesar 1.3 sehingga perkuatan *pile embankment* dengan pondasi pancang 20x20 dapat digunakan karena aman untuk menahan beban yang bekerja di atasnya. Besarnya penurunan yang terjadi sebesar 3.58 cm yang nilainya tidak melebihi batasan penurunan tanah (10 cm) sehingga timbunan telah aman terhadap penurunan.

3.5. Analisis Stabilitas Tanah Kondisi Perkuatan Pileslab Dengan Pondasi Tiang Bor

Pada struktur, telah direkomendasikan perkuatan struktur pileslab di area oprit jembatan. Pileslab direncanakan dengan panjang bentang 7.5 meter dengan jumlah 4 bentang menggunakan pondasi tiang bor dengan diameter 0.6 m. Penambahan struktur pileslab bertujuan untuk mengurangi beban

timbunan yang ada di atas tanah eksisting. Geometri dan hasil dari pemodelan FEM ditunjukkan pada **Gambar 10** dan **Gambar 11** dengan kondisi perkuatan struktur dengan pileslab (variabel K-3).

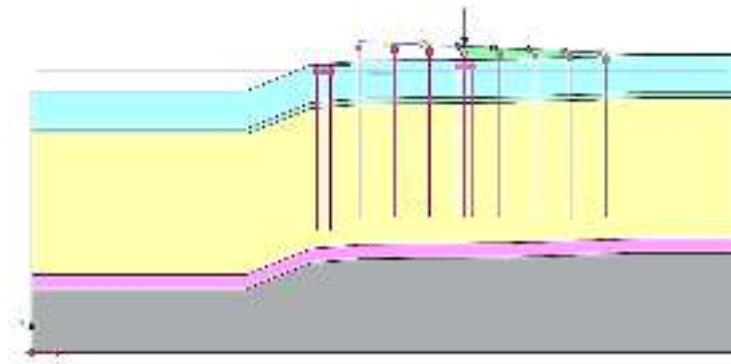


Fig. 10. Geometri Tanah pada Analisis FEM (K-3)

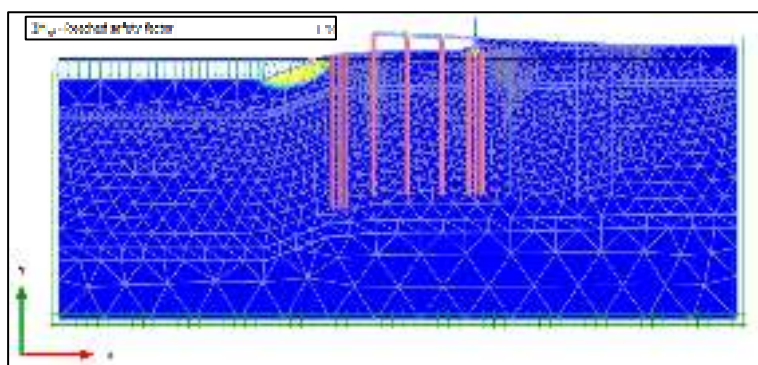


Fig. 11. Bidang Keruntuhan Oprit Dengan Perkuatan Pileslab (K-3)

Dari hasil analisis, telah diperoleh nilai FK sebesar 1.34. Nilai tersebut sama dengan syarat FK yaitu 1.3 sehingga perkuatan jembatan dengan pileslab dengan pondasi tiang bor dapat digunakan karena aman untuk menahan beban yang bekerja di atasnya. Besarnya penurunan yang terjadi sebesar 4.495 cm yang nilainya tidak melebihi batasan penurunan tanah (10 cm) sehingga timbunan telah stabil. Dari perkuatan struktur jembatan menggunakan pileslab empat bentang, tinggi timbunan berkurang yang awalnya 6 meter menjadi 2.8 meter.

3.6. Analisis Stabilitas Tanah Kondisi Perkuatan Pileslab Dengan Pondasi Tiang Baja

Alternatif selain pileslab dengan pondasi tiang bor adalah pileslab dengan pondasi tiang baja. Pondasi yang digunakan adalah jenis *steel pipe pile* (SPP) yang berdiameter 0.610 m. Geometri dan hasil pemodelan FEM ditunjukkan pada **Gambar 12** dan **Gambar 13** dengan kondisi perkuatan struktur pileslab pondasi tiang baja (variabel K-4).

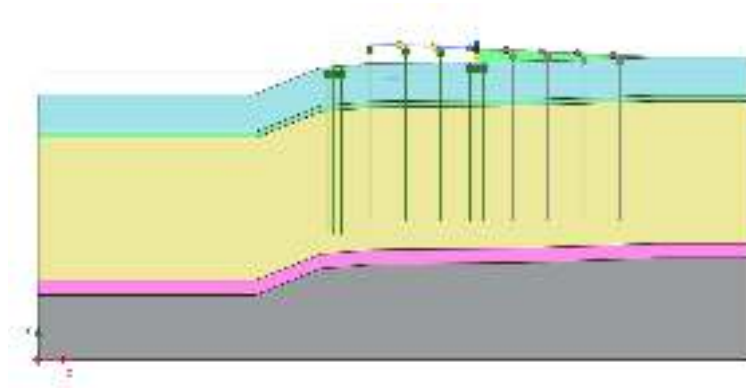


Fig. 12. Geometri Tanah pada Analisis FEM (K-4)

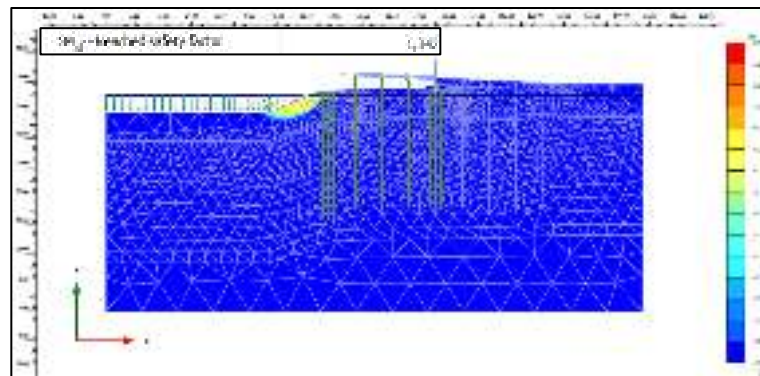


Fig. 13. Bidang Keruntuhan Oprit Dengan Perkuatan Pileslab (K-4)

Dari hasil analisis, telah diperoleh nilai FK sebesar 1.34. Nilai tersebut berada di atas syarat FK yaitu sebesar 1.3 sehingga perkuatan pileslab dengan pondasi tiang baja digunakan karena aman untuk menahan beban yang bekerja di atasnya. Besarnya penurunan yang terjadi maksimal sebesar 4.637 cm yang nilainya tidak melebihi batasan penurunan tanah (10 cm) sehingga oprit telah stabil. Sama halnya dengan penanganan struktur jembatan dengan pileslab empat bentang, tinggi timbunan berkurang yang awalnya 6 meter menjadi 2.8 meter.

4. Kesimpulan

Studi ini difokuskan pada penyebab pengaruh kegagalan pondasi akibat pemancangan di atas tanah lunak yang terjadi di pada Proyek X di Kalimantan Timur. Beberapa faktor penyebab kegagalan pondasi telah ditemukan, seperti perubahan tekanan air pori akibat pemancangan pondasi dan tekanan yang tinggi akibat adanya timbunan di atas tanah lunak. Hasil tersebut diperoleh dari analisis kondisi eksisting (variabel K-1). Untuk meningkatkan stabilitas tanah, telah dilakukan analisis perkuatan tanah timbunan dan perkuatan struktur yang terdiri dari tiga variabel (K-2, K-3, dan K-4). Perkuatan tanah dengan penambahan pondasi sebagai *pile embankment* (variabel K-2) telah diverifikasi. Penurunan tanah sebesar 3.58 cm menunjukkan bahwa tanah timbunan telah aman terhadap penurunan yang terjadi dengan batas maksimal 10 cm. Nilai FK pada variabel K-2 dibandingkan dengan K-1 meningkat sebesar 51.89%. Selain itu, variabel K-3 dan K-4 menghasilkan nilai penurunan kurang dari 10 cm yang artinya dengan adanya penambahan struktur pileslab, tanah masih aman dalam nilai batas penurunan. FK mengalami peningkatan sebesar 26.41%.

Dari hasil analisis, perkuatan pondasi sebagai *pile embankment* dapat diterapkan karena terbukti dapat meningkatkan stabilitas tanah timbunan. Adapun rekomendasi perkuatan struktur yang dipilih yaitu perkuatan pileslab dengan pondasi tiang baja dengan pengurangan beban timbunan. Keberhasilan konstruksi di atas tanah lunak membutuhkan pendekatan yang hati-hati untuk

pengambilan suatu keputusan sehingga diperlukan langkah yang tepat dalam proses pelaksanaannya, salah satunya dengan pemancangan di atas tanah lunak. Hal tersebut dilakukan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan pondasi dan meningkatkan stabilitas jangka panjang dari struktur yang akan dibangun.

Declarations

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Enjiniring Pilar Cakrawala yang telah memberikan dukungan penuh dalam penulisan makalah ini berupa referensi proyek. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Universitas Katolik Parahyangan dan Politeknik Negeri Bandung atas referensi penelitian yang telah diberikan sehingga studi ini dapat terselesaikan dengan baik.

References

- [1] T. Yang, S. Liu, X. Wang, H. Zhao, Y. Liu, and Y. Li, "Analysis of the Deformation Law of Deep and Large Foundation Pits in Soft Soil Areas," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 10, no. February, pp. 1–11, 2022, doi: 10.3389/feart.2022.828354.
- [2] S. Srihandayani, "Pengaruh Daya Dukung Pondasi Tiang Beton Bertulang Bambu Terhadap Tanah Gambut," *SIKLUS: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 31–38, 2019.
- [3] D. Safira and P. A. Maha Agung, "Stabilitas Daya Dukung Lateral Struktur Kepala Jembatan Di Tanah Lunak," *Construction and Material Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 105–115, 2021, doi: 10.32722/cmj.v3i2.3514.
- [4] Braja M.Das, *Principles of Foundation Engineering*. 2002.
- [5] M. Rukmana, D. Chaidir, and A. Makarim, "Analisis Pemancangan Tiang Pada Konstruksi Offshore Pelabuhan Di Pulau Jawa Terhadap Scouring Effect," 2019.
- [6] K. Septrosha, V. Nelwan, S. Balamba, and A. N. Sarayar, "Analisis Kelelahan Struktur Pada Tiang Pancang Di Dermaga Belang Dengan Metode Fracture Mechanics," 2015.
- [7] J. E. Bowles, "Analisis Dan Desain Pondasi II," *Erlangga, Jakarta*, vol. 2, p. 474, 2005.
- [8] R. A. Rublico, B. Sheena, M. Dulag, and C. M. Florendo, "Sai Building Collapsed: A Case Study of Foundation Failure," 2024, doi: 10.5281/zenodo.10624795.
- [9] H. T. Santoso and J. Hartono, "Analisis Perbandingan Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Berdasar Hasil Uji SPT Dan Pengujian Dinamis," *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, vol. 4, no. 1, pp. 31–38, 2020.
- [10] B. Widjaja, "Kajian Pengaruh Setup Pada Tiang Pancang Terhadap Peningkatan Daya Dukung Pondasi (Studi Kasus Porto dan Jakarta)," *Jurnal Teknik Sipil Unika Soegijapranata*, vol. 3, no. 1, pp. 16–25, 2006, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/326804377>
- [11] S. Zaidan, "Typical Foundation Failures And Remediations," *Infrastructure and Facilities Remediation*. pp. 1–22, 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/354400090>
- [12] A. Dewi, D. Amalia, L. Z. Mase, E. R. Juarti, and A. Pudir, "Pengaruh Penambahan Polimer Poliakrilamida Terhadap Daya Dukung Tanah Lokal," vol. 6, no. 3, pp. 195–204, 2022, doi: <https://doi.org/10.35334/be.v1i1.2897>.

- [13] A. Salimah and I. Qaribullah, "Pengaruh Penambahan Kapur terhadap Nilai Plastisitas Tanah Lunak," *Journal Of Civil Engineering As Applied Science (Rigid)*, vol. 1, no. 1, pp. 26–30, 2022.
- [14] C. E. Putra and C. A. Makarim, "Analisis Alternatif Perbaikan Tanah Lunak dan Sangat Lunak pada Jalan Tol," *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 3, no. 4, p. 1137, 2020, doi: 10.24912/jmts.v3i4.8382.
- [15] A. Noor, P. #1, K. Basah, S. #2, and B. Suhendro, "Analisis Perubahan Tekanan Air Pori pada Tanah Lunak akibat Beban Trial Embankment dengan menggunakan Plaxis," vol. 5, no. 1, 2009.
- [16] H. Ma, Q. Luo, T. Wang, H. Jiang, and Q. Lu, "Numerical stability analysis of piled embankments reinforced with ground beams," *Transportation Geotechnics*, vol. 26, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.trgeo.2020.100427.
- [17] Q. Guo, B. Li, Z. Ye, and J. Xu, "Finite Element Analysis on the Behavior of Solidified Soil Embankments on Piled Foundations under Dynamic Traffic Loads," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 11, Jun. 2024, doi: 10.3390/app14114464.
- [18] X. Wang, X. Wang, G. Yang, C. Pu, and J. Jin, "Field Test on Deformation Characteristics of Pile-Supported Reinforced Embankment in Soft Soil Foundation," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/su14137805.
- [19] "Evaluation of Equal Settlements of Geosynthetic Reinforced Piled Embankment," 2023, doi: 10.37591/JoSEM.
- [20] W. Huang *et al.*, "Experimental study on influence of excess pore water pressure and unloading ratio on unloading mechanical properties of marine sedimentary soft soils," *Ocean Engineering*, vol. 195, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106680.
- [21] P. T. K. Sari and Y. Lastiasih, "The Empirical Prediction of the Critical Area of Road Embankment Landslide Using Limit Equilibrium Method," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2020. doi: 10.1088/1755-1315/506/1/012049.
- [22] Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral, *Atlas Sebaran Tanah Lunak Indonesia*, 2019th ed. Bandung: Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2019. [Online]. Available: www.geologi.go.id
- [23] P. N. Damarhadi, Y. P. Muslih, and R. Harya Dananjaya, "Analisis Kegagalan Pondasi Tiang Kelompok Pada Konstruksi Pilar Jembatan," *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, pp. 1121–1128, 2015.
- [24] J. Chunlin, W. Guangjin, L. Shujian, K. Fuqi, C. Binting, and Z. Lei, "Study on dynamic strength and liquefaction mechanism of silt soil in Castor earthquake prone areas under different consolidation ratios," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/feart.2023.1206252.