

Evaluasi Desain Fondasi Eksisting Jembatan Kayu Tipe Pelengkung Menggunakan Metode Elemen Hingga

D. Kusumaningrum¹, S. Ismanti^{1*}, A. Rifa'i¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: sito.ismanti@ugm.ac.id

INTISARI

Jembatan kayu tipe pelengkung yang terletak di Kalimantan Tengah adalah prasarana transportasi penting bagi pejalan kaki dan kendaraan roda dua. Kondisi saat ini menunjukkan bahwa jembatan tersebut mengalami kerusakan dan tidak dapat digunakan. Rekonstruksi jembatan direncanakan memanfaatkan fondasi eksisting di atas lapisan tanah lunak, sehingga kemampuan fondasi eksisting tersebut perlu dievaluasi. Studi ini mengevaluasi kelayakan fondasi eksisting tersebut dimana kapasitas dukung tanah dihitung menggunakan metode Skempton, sedangkan penurunan fondasi dianalisis menggunakan metode elemen hingga menggunakan SAP2000, berdasarkan data uji tanah, dimensi fondasi, dan pembebanan jembatan baru. Fondasi dimodelkan sebagai *shell* dengan interaksi tanah berupa pegas elastis dengan konstanta pegas diasumsikan sebanding dengan nilai modulus reaksi tanah, yang kemudian dianalisis pada kondisi batas *service* untuk menilai kekuatan, deformasi, dan distribusi tegangan. Hasil menunjukkan tekanan didasar fondasi (q) di sisi barat dan timur berturut-turut 26,40 kN/m² dan 27,78 kN/m², melebihi kapasitas dukung *ijin* (q_a), di sisi barat sebesar 19,67 kN/m² dan sisi timur 17,16 kN/m². Sementara itu, penurunan maksimum pada kondisi *service* sebesar 28,9 mm di sisi barat dan 33,9 mm di sisi timur, dimana nilai penurunan tersebut melampaui batas izin penurunan yaitu sebesar 25 mm. Dengan demikian, fondasi eksisting tidak memenuhi persyaratan keamanan geoteknik dalam analisis fondasi. Akibatnya, fondasi eksisting tersebut memungkinkan tidak mampu mendukung struktur baru tanpa dilakukan modifikasi atau perkuatan. Salah satu alternatif solusi adalah penerapan sistem fondasi *raft-pile*.

Kata kunci: Daya Dukung Tanah, Penurunan, SAP2000, Modulus Reaksi Tanah, Perkuatan Fondasi

1 PENDAHULUAN

Jembatan kayu tipe pelengkung yang terletak di Kalimantan Tengah merupakan prasarana transportasi lokal yang digunakan masyarakat sekitarnya. Keberadaan jembatan ini sangat penting dalam mendukung mobilitas masyarakat dan distribusi barang di wilayah tersebut. Kondisi jembatan saat ini mengalami kerusakan, sehingga tidak dapat difungsikan. Perencanaan rekonstruksi jembatan, dirancang dengan memanfaatkan fondasi eksisting berupa fondasi *raft*. Fondasi tersebut berada di atas lapisan tanah lunak dengan ketebalan lebih dari 28 m. Lapisan tanah lunak memiliki karakteristik daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, serta permeabilitas rendah (Liu et al., 2025; Naibaho & Waruwu, 2021). Kondisi tanah lunak lebih dari 28 m ini menyebabkan masalah stabilitas tanah dan penurunan pada fondasi (*settlement*), sehingga memerlukan evaluasi terhadap fondasi eksisting karena berhubungan langsung dengan keselamatan, umur layanan, serta biaya pemeliharaan jangka panjang.

Fondasi merupakan elemen struktur penting dalam suatu struktur bangunan, berfungsi untuk mentransfer beban dari struktur ke tanah (Khaliq et al., 2024; Hardiyatmo, 2014). Fondasi eksisting berupa fondasi *raft* memiliki fungsi untuk mendistribusikan beban secara merata ke tanah dasar, namun pada kondisi tanah lunak yang cukup dalam, performa fondasi *raft* dipengaruhi oleh daya dukung tanah serta potensi penurunan tidak seragam (*differential settlement*) yang terjadi (Eslami, 2024). Hal ini sangat berisiko terhadap keamanan struktur jembatan, maka perlu dilakukan perkuatan tanah pada tanah lunak sebelum memulai pekerjaan konstruksi (Naibaho & Waruwu, 2021; Kazemian et al., 2011).

Evaluasi desain fondasi eksisting perlu dilakukan karena peningkatan beban pada rekonstruksi jembatan dapat memengaruhi daya dukung dan penurunan fondasi eksisting. Secara prinsip, kapasitas dukung fondasi tidak berubah, namun peningkatan beban yang harus ditopang dapat memengaruhi kinerja fondasi dan meningkatkan potensi terjadinya penurunan (*settlement*) pada fondasi eksisting. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas dukung tanah pada fondasi eksisting, serta memprediksi besaran penurunan yang mungkin terjadi. Hasil evaluasi diharapkan dapat menjadi dasar teknis bagi pengambilan keputusan apakah fondasi dapat dipertahankan atau memerlukan perkuatan. Selain itu, penelitian ini memberikan kontribusi sebagai referensi dalam perencanaan infrastruktur di wilayah lain yang memiliki kondisi tanah lunak serupa.

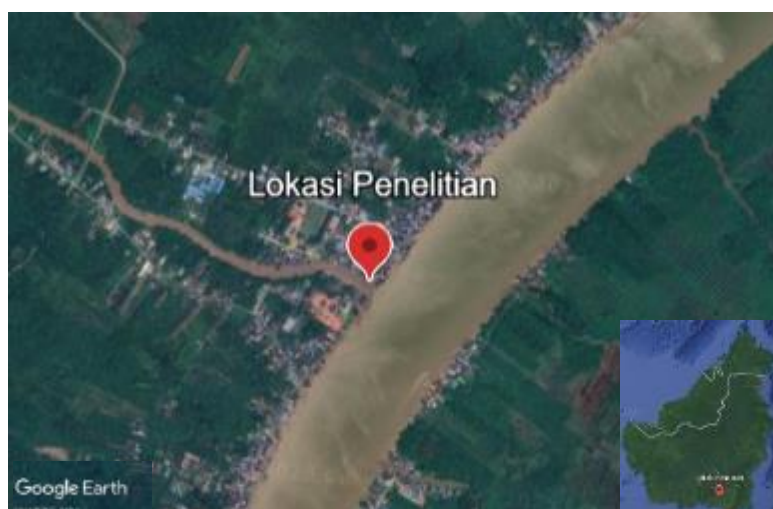
2 METODELOGI PENELITIAN

Penelitian ini berfokus pada evaluasi kapasitas dukung tanah dan penurunan fondasi dalam arah aksial, namun pengaruh beban lateral tetap diperhitungkan untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kinerja fondasi eksisting jembatan. Metode penelitian ini menggabungkan pendekatan analitis dan numeris untuk memperoleh hasil evaluasi yang lebih komprehensif terhadap kapasitas dukung dan penurunan fondasi. Pendekatan analitis digunakan sebagai langkah awal untuk menghitung kapasitas dukung tanah menggunakan persamaan Skempton (1951). Analisis kapasitas dukung Skempton merupakan pendekatan analitis yang digunakan untuk menghitung kapasitas dukung ultimit (*ultimate bearing capacity*) dari fondasi dangkal pada tanah lempung jenuh (*saturated cohesive soil*). Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan parameter-parameter tanah hasil uji laboratorium maupun uji lapangan, seperti uji SPT (Standard Penetration Test). Melalui metode ini diperoleh estimasi awal terhadap perilaku fondasi terhadap beban rencana.

Pendekatan numeris diterapkan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) dengan software SAP2000 untuk memodelkan interaksi antara tanah dan fondasi secara tiga dimensi. Pemodelan ini memungkinkan analisis distribusi tegangan, deformasi, serta pola penurunan yang lebih realistis dengan mempertimbangkan non-linier material tanah dan kondisi batas (*boundary conditions*) sesuai dengan keadaan lapangan. Dalam *software* SAP2000 fondasi eksisting dimodelkan sebagai pelat tipis (*shell-thin*) dengan interaksi tanah yang direpresentasikan melalui pegas elastis (*soil spring*). Tanah dimodelkan sebagai pegas elastis karena pada dasarnya respons tanah terhadap beban fondasi dapat dianggap bersifat elastis terhadap beban yang bekerja. Dengan pendekatan ini, hubungan antara gaya dan deformasi tanah diilustrasikan secara linier melalui nilai modulus reaksi tanah (*subgrade modulus*), sehingga semakin besar kekakuan tanah, semakin kecil deformasi yang terjadi. Dalam penelitian ini analisis nilai subgrade modulus menggunakan metode Bowles (1983). Meskipun terdapat beberapa metode lain dalam menganalisis nilai *subgrade modulus*, teori Bowles (1983) dipilih karena kemudahan penerapan, dan kesesuaiannya dengan data tanah yang tersedia.

2.1 Data Tanah

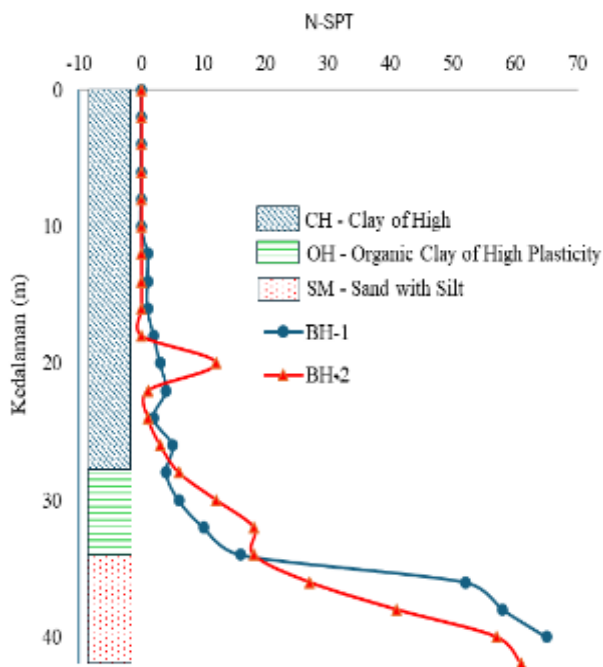
Fondasi eksisting berupa fondasi *raft* dan fondasi tersebut dikategorikan merupakan salah satu jenis fondasi dangkal. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Evaluasi desain fondasi eksisting jembatan dilakukan melalui pengujian tanah pada dua titik pengeboran (BH-1 dan BH-2) dapat dilihat pada Gambar 2. Stratigrafi tanah hasil investigasi lapangan ditunjukkan pada Gambar 3, hasil uji penetrasi standar (SPT) menunjukkan kesamaan jenis tanah di kedua lokasi. Analisis difokuskan pada kedalaman 0 – 28 m karena lapisan ini merupakan lapisan tanah lunak yang paling berpengaruh terhadap stabilitas struktur, sedangkan lapisan di bawahnya memiliki pengaruh yang lebih kecil. Pengujian pada titik BH-01, didapatkan hasil berupa jenis tanah *clay of high plasticity* (CH) dari kedalaman 0 – 28 meter dengan nilai N-SPT sebesar 3, dengan karakteristik tanah sangat lunak. Selanjutnya, pengujian SPT pada titik BH-02, didapatkan hasil berupa jenis tanah *clay of high plasticity* (CH) dari kedalaman 0 – 28 meter dengan nilai N-SPT sebesar 3, dengan karakteristik tanah sangat lunak. Data pengujian laboratorium pada Tabel 1 digunakan untuk melengkapi informasi sifat fisik dan mekanik tanah dalam analisis geoteknik.



Gambar 1 Lokasi penelitian



Gambar 2 Titik pengujian borhole



Gambar 3. Stratigrafi tanah BH-1 dan BH-2

Tabel 1. Data tanah laboratorium

Pengujian Laboratorium		Barat	Timur
Kadar Air (w , %)		91,673	1,493
Berat Volume Tanah (γ , gr/cm^3)		1,429	1,493
Berat Jenis (G_s)		2,623	2,627
Distribusi Butiran	Lanau (%)	45,14	42,93
	Lempung (%)	51,46	52,52
	Pasir (%)	3,39	4,55
Batas Cair (LL , %)		65,70	51,70
Batas Plastis (PL , %)		24,99	21,09
Indeks Plastisitas (PI , %)		40,72	30,61
Klasifikasi USCS		CH	CH
Geser Langsung	Kohesi (c , kg/cm^2)	0,099	0,058
	Sudut Geser (ϕ , $^\circ$)	15,50	16,03

Tabel 2. Joint reaction sisi barat dan sisi timur

Titik	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kN.m)	MY (kN.m)	MZ (kN.m)
Barat Utara						
BU-1	-148,062	-0,133	95,402	-4,501	-153,511	0,052
BU-2	-98,446	-1,676	66,337	-2,142	-54,600	-0,020
BU-3	-72,405	-3,607	121,863	-0,288	-68,919	0,059
BU-3'	-40,344	17,250	149,654	-8,674	-20,060	-0,176
BU-4	-0,523	41,656	122,399	-47,512	-0,469	-0,289
Barat Selatan						
BS-1	-141,939	0,912	97,043	3,843	-147,340	0,081
BS-2	-95,580	1,725	55,307	2,178	-52,938	0,022
BS-3	-71,613	0,182	128,258	3,091	-68,548	-0,068
BS-3'	-40,123	-19,290	151,033	9,896	-19,898	0,187
BS-4	-0,489	-44,506	126,145	50,312	-0,435	0,286
Timur Utara						
TU-1	144,867	-0,454	97,586	-4,517	150,080	0,020
TU-2	97,495	-1,454	55,805	-2,375	54,407	0,022
TU-3	72,333	-1,899	126,611	-1,874	68,909	-0,062
TU-3'	40,345	17,208	147,703	-8,662	20,049	0,186
TU-4	0,534	41,595	122,194	-47,439	0,480	0,288
Timur Selatan						
TS-1	145,234	-0,041	97,831	4,925	150,465	-0,017
TS-2	97,525	1,972	55,953	1,951	54,432	-0,020
TS-3	72,054	1,447	125,514	2,254	68,600	0,068
TS-3'	40,175	-19,303	151,205	9,897	19,955	-0,183
TS-4	0,493	-44,508	126,099	50,315	0,440	-0,287

2.3 Kapasitas Dukung

Hardiyatmo (2014) menjelaskan kapasitas dukung ultimit (q_u) fondasi *raft* diatas tanah lempung homogen dapat dianalisis seperti fondasi dangkal menggunakan persamaan Skempton (1951). Dalam metode Skempton hanya berlaku untuk fondasi berbentuk fondasi memanjang dan bujur sangkar, sedangkan fondasi dalam penelitian ini memiliki bentuk asimetris, maka analisis kapasitas dukung dilakukan melalui pendekatan bentuk fondasi menjadi bujur sangkar dengan dimensi 5,27 x 10,20 meter, oleh karena perhitungan kapasitas dukung ultimit (q_u) untuk fondasi eksiting ditunjukkan dalam Persamaan 1 dan kapasitas dukung izin (q_a) pada persamaan 4.

Kapasitas dukung ultimit fondasi menurut Skempton (1951) dalam Hardiyatmo (2014), sebagai berikut:

$$q_u = \left(0,84 + 0,16 \frac{B}{L}\right) c_u N_c + D_f \gamma \tag{1}$$

dengan, B adalah lebar fondasi, L adalah panjang fondasi, c_u adalah kohesi tanah dibawah dasar fondasi, N_c merupakan faktor kapasitas dukung Skempton, D_f adalah kedalaman fondasi, dan γ adalah berat volume tanah.

Faktor kapasitas dukung N_c untuk bentuk fondasi tertentu diperoleh dari mengalikan faktor bentuk dengan N_c pada fondasi memanjang yang besarnya dipengaruhi pula oleh kedalaman fondasi D_f .

a. Fondasi di permukaan ($D_f = 0$)

$N_{c(permukaan)} = 5,14$, untuk fondasi memanjang

$N_{c(permukaan)} = 6,20$, untuk fondasi lingkaran dan bujur sangkar

b. Fondasi pada kedalaman $0 < D_f < 2,5 B$

$$N_c = \left(1 + 0,2 \frac{D_f}{B}\right) N_{c(permukaan)} \tag{2}$$

a. Fondasi pada kedalaman $D_f > 2,5 B$

$$N_c = 1,5 N_{c(permukaan)} \tag{3}$$

Kapasitas dukung izin (q_a) pada persamaan 4 diperoleh dari kapasitas dukung ultimit dibagi *safety factor* (SF). Menurut ketentuan SNI 8460-2017, nilai (SF) untuk fondasi dangkal sebesar 3.

$$q_a = \frac{q_u}{SF} \tag{4}$$

Tekanan yang bekerja pada dasar *fondasi* (q) tidak diijinkan melampaui nilai kapasitas dukung ijin (q_a), untuk memastikan fondasi tidak mengalami kegagalan akibat melebihi kapasitas dukung. Dimana tekanan yang bekerja pada dasar fondasi total (q) dirumuskan dalam persamaan (5), sebagai berikut:

$$q = \frac{P}{A} \tag{5}$$

dengan, P adalah beban ultimit yang bekerja diatas fondasi dan A adalah luas fondasi.

2.4 Modulus Reaksi Tanah Dasar (k_s)

Dalam rekayasa geoteknik, tanah sebagai elemen pendukung fondasi memiliki pengaruh terhadap stabilitas struktur diatasnya. Sifat mekanis serta perilaku tanah sangat kompleks karena bersifat non-linier, anisotropik, dan heterogen, serta besarnya nilai deformasi tergantung pada tegangan yang bekerja. Pendekatan empiris untuk memodelkan reaksi tanah terhadap struktur dengan menggunakan modulus reaksi tanah dasar (k_s) yang diperkenalkan oleh Winkler (1867) dalam Naeni & Moayed (2014). Tanah dianggap sebagai deretan pegas linear (elastis) yang merespons beban dengan perbandingan tekanan terhadap penurunan. Dengan demikian, k_s menyatakan kekakuan reaksi tanah terhadap deformasi:

$$k_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\delta} \tag{6}$$

dengan $\Delta\sigma$ = tekanan kontak tanah dan $\Delta\delta$ = penurunan vertikal yang terjadi.

Menurut Bowles (1983), nilai modulus reaksi tanah dasar (k_s) dapat ditentukan secara empiris berdasarkan nilai kapasitas dukung allowale tanah (q_a) dan *safety factor* (SF). Rumus pendekatan yang diajukan sebagai berikut:

$$k_s = 40 \cdot (SF) \cdot q_a \tag{7}$$

Angka 40 bukan merupakan nilai mutlak, namun dalam studi ini dianggap tepat karena sesuai dengan asumsi yang dikemukakan oleh Bowles (1983), bahwa nilai 40 merepresentasikan kondisi penurunan sebesar 1 inch atau 2,54 mm. Dengan demikian, penggunaan nilai tersebut dianggap relevan untuk menggambarkan kondisi penurunan yang masih dalam batas yang dapat diterima secara teknis.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kapasitas Dukung Tanah

Kapasitas dukung tanah menurut Lestari et al. (2023); Kristyanto et al. (2022), merupakan kemampuan tanah dalam menahan beban dari struktur yang berada diatasnya tanpa mengalami keruntuhan geser maupun penurunan yang berlebihan. Studi yang dilakukan oleh Cruz & Briaud (2025); Wei et al. (2020), menjelaskan bahwa nilai tekanan yang bekerja didasar fondasi tidak boleh melebihi nilai kapasitas dukung ijin fondasi (q_a). Hasil analisi kapasitas dukung tanah pada fondasi sisi barat dan timur sesuai dengan teori yang sudah dijelaskan. Hasil ditunjukkan pada Tabel 2, bahwa nilai tekanan yang bekerja didasar fondasi (q) pada sisi barat dan sisi timur berturut-turut 26,40 kN dan 27,78 kN lebih besar dari nilai kapasitas dukung ijin (q_a) pada sisi barat 19,67 kN/m² dan sisi timur 27,78 kN/m². Oleh karena itu, kapasitas dukung tanah baik fondasi sisi barat maupun fondasi sisi timur tidak mampu menahan beban rencana.

Tabel 2 Kapasitas dukung tanah

Keterangan	Fondasi sisi barat	Fondasi sisi timur	Satuan
Kapasitas dukung ultimit (q_u)	59,02	51,47	kN/m ²
Kapasitas dukung ijin (q_a)	19,67	17,16	kN/m ²
Takanan bekerja di dasar fondasi (q)	26,40	27,78	kN/m ²
Kesimpulan	Tidak aman	Tidak aman	

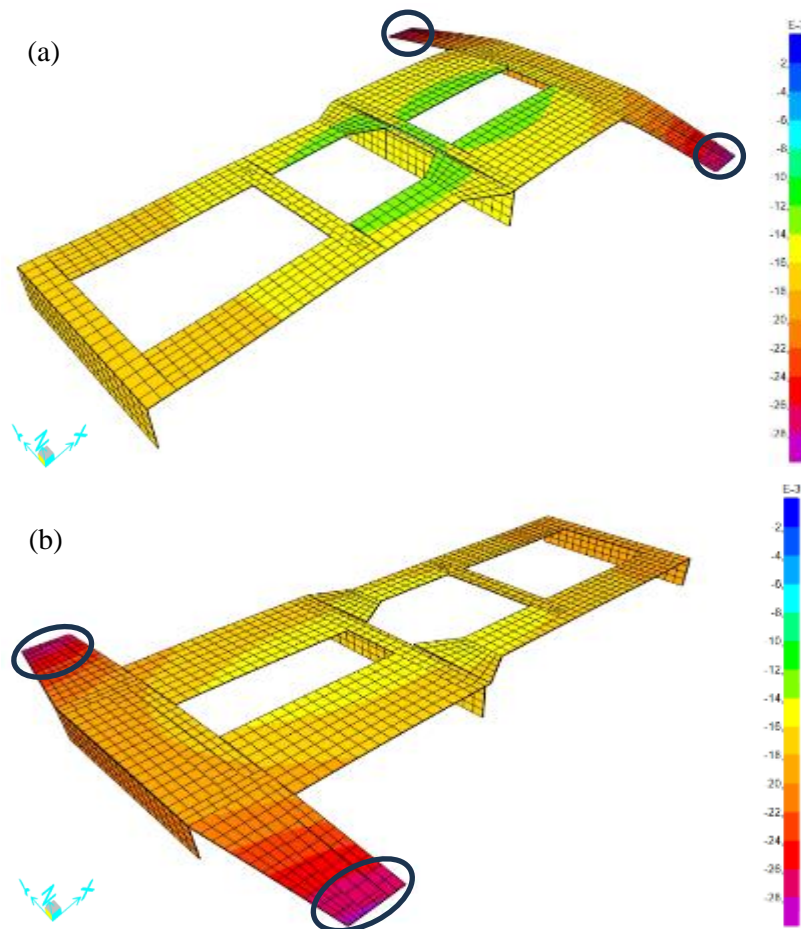
3.2 Modulus Reaksi Tanah Dasar (k_s)

Modulus reaksi tanah dasar merupakan parameter yang digunakan untuk menggambarkan kekakuan tanah terhadap beban yang bekerja di atasnya (Khairiatali et al., 2024; Imanzadeh et al., 2015). Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai modulus reaksi tanah dasar (k_s) pada sisi barat sebesar 2360,74 kN/m³, dan sisi timur sebesar 2058,84 kN/m³. Perbedaan nilai ini mengindikasikan bahwa tanah pada sisi barat memiliki kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan sisi timur. Dalam pemodelan SAP2000, interaksi tanah dengan struktur direpresentasikan dengan pendekatan elastik linier menggunakan nilai modulus reaksi tanah dasar (k_s). Nilai k_s tersebut dimasukkan ke dalam pemodelan SAP2000 sebagai *soil spring*, dimana tanah diasumsikan bersifat elastis menyerupai pegas yang bekerja secara vertikal terhadap elemen struktur.

3.3 Penurunan Fondasi Eksisting

Penurunan fondasi (*settlement*) terjadi akibat perubahan tegangan didalam tanah yang ditimbulkan oleh beban struktur di atasnya. Wei et al., (2020) menjelaskan bahwa *settlement* merupakan salah satu kriteria utama dalam perencanaan fondasi, karena deformasi tanah akibat beban tambahan dapat menyebabkan distribusi tegangan yang tidak merata sehingga berpotensi menimbulkan penurunan tidak seragam (*differential settlement*).

Hasil evaluasi penurunan dari pemodelan SAP2000 diketahui bahwa fondasi eksisting sisi barat maupun sisi timur mengalami penurunan tidak seragam (*differential settlement*). Penurunan maksimum fondasi eksisting yang terjadi melebihi batas penurunan yang diizinkan menurut SNI 8460:2017 sebesar 25 mm. Gambar 6 menunjukkan hasil penurunan tidak seragam (*differential settlement*) pada kondisi *service*. Nilai Penurunan maksimum fondasi kondisi *service* pada sisi barat dan sisi timur berturut-turut sebesar 28,9 mm 33,9 mm. Perbedaan besar penurunan ini dipengaruhi oleh dimensi pelat dan perbedaan beban per satuan luas, dimana area dengan dimensi lebih kecil dengan beban relatif besar mengalami deformasi yang lebih signifikan (Tolun, 2024); Vinay et al., 2024; Melese et al., 2023; Kacprzak et al., 2023).



Gambar 6 Kontur penurunan fondasi kondisi *service*
(a) sisi barat (b) sisi timur

3.4 Hasil evaluasi fondasi eksisting

Berdasarkan hasil evaluasi teknis, diketahui bahwa tanah di bawah fondasi eksisting sudah tidak mampu menahan beban struktur secara optimal, dan terjadi penurunan yang melebihi batas aman. Namun fondasi eksisting tersebut tetap dimanfaatkan untuk mendukung struktur jembatan, maka diperlukan strategi perkuatan agar fondasi tersebut bisa tetap digunakan sehingga dapat memenuhi persyaratan teknis.

Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah dengan menggunakan sistem fondasi *raft-pile*, yaitu gabungan antara pelat beton (*raft*) dan tiang pancang (*pile*) yang bekerja secara bersamaan. Sistem fondasi gabungan ini, *raft* menyalurkan sebagian besar beban ke tanah, sementara *pile* membantu mengurangi besarnya penurunan total maupun penurunan yang tidak merata, terutama jika fondasi berada di atas tanah lunak (Harpito, 2015).

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi desain fondasi eksisting jembatan kayu tipe pelengkung, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Hasil analisis kapasitas dukung tanah fondasi sisi barat tekanan yang bekerja di dasar fondasi sebesar 26,40 kN/m² dan kapasitas dukung yang diizinkan sebesar 19,67 kN/m². Pada sisi timur tekanan yang bekerja di dasar fondasi sebesar 27,78 kN/m² dan kapasitas dukung yang diizinkan sebesar 17,16 kN/m². Hal ini menunjukkan bahwa fondasi eksisting tidak memenuhi persyaratan keamanan geoteknik dan berada dalam kondisi tidak aman secara struktural untuk mendukung beban jembatan.
- Hasil analisis numeris dengan SAP2000 menunjukkan bahwa penurunan maksimum kondisi *service* sebesar 28,9 mm sisi barat dan 33,9 mm sisi timur. Nilai tersebut melebihi batas penurunan izin sehingga fondasi tidak memenuhi syarat penurunan fondasi.
- Hasil evaluasi menyeluruh, dapat disimpulkan bahwa fondasi eksisting tidak layak digunakan secara langsung untuk menopang struktur baru tanpa modifikasi atau perkuatan tambahan.
- Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah menggunakan sistem fondasi gabungan *raft-pile*.

REFERENSI

- Cruz, E. C. V., & Briaud, J.-L. (2025). *Long-Term vs Short-Term Bearing Capacity of Shallow Foundations on Clays*. 8(2), 1–18. <https://doi.org/10.4417/IJGCH-08-02-01>
- Eslami, A. (2024). *Form and load transfer aspects of foundation systems: Case - based implementation and adaptation for buildings*. June 2024, 1–17. <https://doi.org/10.1002/dug2.12146>
- Hardiyatmo, H. C. (2014). *Fondasi I* (3rd ed.). UGM Press.
- Harpito. (2015). Analisis Beban-Perpindahan Pondasi Raft Pile Dengan Menggunakan Sap2000. *UIN Sultan Syarif Kasim Riau*, 1(2), 103–110.
- Imanzadeh, S., Denis, A., & Marache, A. (2015). Settlement Uncertainty Analysis for Continuous Spread Footing on Elastic Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(1), 105–122. <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9828-6>
- Kacprzak, G., Frydrych, M., & Nowak, P. (2023). Influence of Load–Settlement Relationship of Intermediate Foundation Pile Group on Numerical Analysis of a Skyscraper under Construction. *Sustainability (Switzerland)*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/su15053902>
- Kazemian, S., Huat, B. B. K., Prasad, A., & Barghchi, M. (2011). A state of art review of peat: Geotechnical engineering perspective. *International Journal of Physical Sciences*, 6(8), 1974–1981.
- Khaiiatoli, S., Farei, A. R., Zaman, A., & Ahmadiadli, M. (2024). Estimation of the subgrade reaction modulus using field and numerical analysis methods. *Journal of Civil Engineering and Structures*, 8(1 SE-Articles), 1–7. <http://www.journalces.com/index.php/JCES/article/view/46>
- Kristyanto, H., Purwoko, F., & Wijayanti, L. (2022). Perbandingan Daya Dukung Dan Penurunan Tanah Pada Pondasi Dangkal Berdasarkan Data Spt Dan Cpt. *CivETech*, 4(2), 17–30.

- Lestari, R. T., Herzanita Y, A., & Husnul Karim, M. (2023). Analisis Kapasitas Daya Dukung Pondasi Dangkal Terhadap Kedalaman (Studi Kasus: Kalimantan). *Construction and Material Journal*, 5(3), 175–182. <https://doi.org/10.32722/cmj.v5i3.5697>
- Liu, X., Song, B., Sun, Z., & Jiao, W. (2025). Critical Filling Height of Embankment over Soft Soil: A Three-Dimensional Upper-Bound Limit Analysis. *Buildings*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/buildings15030395>
- Melese, D., Genemo, D., Boru, Y., Desisa, A., Mezmur, T., & Tamru, M. (2023). Interference Effect of Closely Spaced Foundation Footing on Settlement Variation. *Advances in Civil Engineering*, 2023, 1–11.
- Naeni, S. A., & Moayed, R. Z. (2014). Subgrade Reaction Modulus (K_s) of Clayey Soils Based on Field Tests. *Journal of Engineering Geology*, 8(1), 2021–2046.
- Naibaho, A. G., & Waruwu, A. (2021). *Kajian Kapasitas Kelompok Tiang pada Tanah Lunak Menggunakan Skala Kecil Laboratorium*. 27(2), 179–186.
- SNI 8460-2017. (2017). Persyaratan Perancangan Geoteknik. *Standar Nasional Indonesia*, 8460, 1–323.
- Tolun, M. (2024). Efficiency of Dimensional Analysis in Predicting Compression Load–Settlement Relationship of Soft Clay Under a Rigid Foundation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(23).
- Vinay, K., Avijit, B., Portelinha, F., Manish, K., & Guru, D. (2024). Influence of Variation of Soil Properties in Bearing Capacity and Settlement Analysis of a Strip Footing Using Random Finite Element Method. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 57(2), 383–403. <https://doi.org/10.22059/CEIJ.2023.360871.1930>
- Wei, F., Jiao, W., Wan-Dongxing, Z., & Li-Jun, S. (2020). Lower-Bound Solution of Foundation-Bearing Capacity under Circular Uniformly Distributed Load. *Advances in Civil Engineering*, 2020.