

Kajian Penurunan Tiang Jembatan dengan Interaksi Struktur - Tanah

Received 10th November 2021
 Accepted 15th December 2021
 Published 31st December 2021

Open Access

Muhammad Fatkhurrozi^{*a}, Asfarur Ridlwan^b, Aji Suraji^c

^{a,b} Program Studi Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan

^c Program Studi Teknik Sipil, Universitas Widyagama Malang, Kota Malang

* Koresponden E-mail: muhammad.fatkhurrozi@kl.itera.ac.id

Abstract: Pulau Pasaran Bridge, situated in southern coast of Bandar Lampung city, has experience partial section settlement of 0,1 m to 1,57 m. This work will study the settlement of the bridge piles incorporating soil-structure interaction aspect. End bearing resistance is modelled as nonlinear elastic spring q-w curve. Experiments will cover a range of modified stiffness spring. Simulated settlements and axial member forces will be discussed.

Keywords: soil-structure interaction, bridges, foundation settlement

Abstrak: Jembatan Pulau Pasaran, terletak di pesisir Bandar Lampung, mengalami penurunan pada tiang dengan besaran 0,1 m hingga 1,57 m. Studi ini akan mengkaji penurunan tiang jembatan dengan mengakomodasi aspek interaksi struktur-tanah. Tahanan ujung pondasi dimodelkan dengan kurva q-w. Percobaan dilakukan pada beberapa variasi kurva tahanan ujung. Hasil penurunan tiang dan gaya dalam aksial pada tiang akan diulas.

Kata Kunci: interaksi struktur-tanah, jembatan, penurunan pondasi

Pendahuluan

Pulau Pasaran merupakan bagian dari wilayah Kota Bandar Lampung yang mayoritas warganya beraktifitas di sektor perikanan, baik penangkapan ikan maupun pengolahan ikan. Antara Pulau Sumatera dan Pulau Pasaran dihubungkan oleh jembatan Pulau Pasaran (JPP) (**Gambar 1**). Jembatan ini hanya melayani lalu lintas berupa pejalan kaki dan sepeda motor. Saat ini kondisi JPP secara visual dapat tergolong rusak berat: elemen-elemennya mengalami kerusakan dan tulangnya mengalami korosi. Pada beberapa bagian balok, pelat, dan kolom, terjadi *spalling* yang mengakibatkan tulangan terekspos.

JPP merupakan struktur beton bertulang dengan pondasi beton persegi. JPP tergolong sebagai "struktur non-rekayasa" (*non-engineered structure*) yang merupakan fenomena umum di Indonesia [1]. Pembangunannya tidak melibatkan analisis struktur dan analisis geoteknik yang memadai. Segera setelah dibangun, beberapa bagian jembatan mengalami penurunan (*settlement*) geoteknik. Beberapa pelat mengalami retak (*crack*) yang kemudian diperbaiki dengan tambalan beton. Di lokasi dimana pelat mengalami kegagalan (jebol), pelat hanya ditutup dengan pelat besi (**Gambar 2**).

Pada penelitian ini, akan dilakukan investigasi terhadap penurunan tiang jembatan. Penurunan tiang jembatan akan dianalisis dengan mengakomodasi aspek interaksi struktur-tanah. Kondisi gaya dalam aksial pada tiang jembatan akan diulas untuk beberapa lokasi.

Definisi Masalah

Jembatan Pulau Pasaran adalah jembatan sederhana bertipe *deck on pile*, dengan lebar *deck* 230 cm dengan rel pelindung di sampingnya yang terbuat dari beton. Kolom jembatan terbuat dari beton berukuran 25 x 25 cm ($D = 25$ cm). Balok memanjang dan balok melintang berukuran 22 x 17 cm (tinggi x lebar). Ketebalan pelat lantai adalah 17 cm. Tiang jembatan berperan sebagai struktur pondasi sekaligus struktur atas dengan panjang 5,5 m. Tinggi tiang tertanam (kedalaman pondasi) bervariasi antara 3,0 m hingga 3,5 m. Kedalaman air laut di bawah jembatan pada kondisi surut bervariasi antara 5 cm hingga 45 cm.

Berdasarkan penuturan narasumber, JPP tidak direncanakan dengan kaidah keteknikan yang baku dan pelaksanaannya juga tidak sesuai standar. Dalam hal ini, JPP dapat dikategorikan sebagai struktur non-rekayasa. Pada struktur

tersebut, dapat ditemui beberapa kesalahan umum dalam desain dan pelaksanaan [1]. Beberapa kesalahan dalam perencanaan dan pelaksanaan JPP diantaranya (1) kesalahan perencanaan geoteknik: investigasi tanah tidak dilakukan untuk dapat mewakili seluruh lokasi jembatan dan pondasi jembatan tidak didesain dengan faktor keamanan yang cukup; (2) material tidak standar: komposisi beton terdiri dari agregat dengan gradasi yang tidak ditakar dan pasir dengan kualitas tidak standar; dan (3) pelaksanaan pemancangan tiang jembatan tidak dilakukan dengan alat yang standar dan proteksi elemen struktur tidak diaplikasikan.

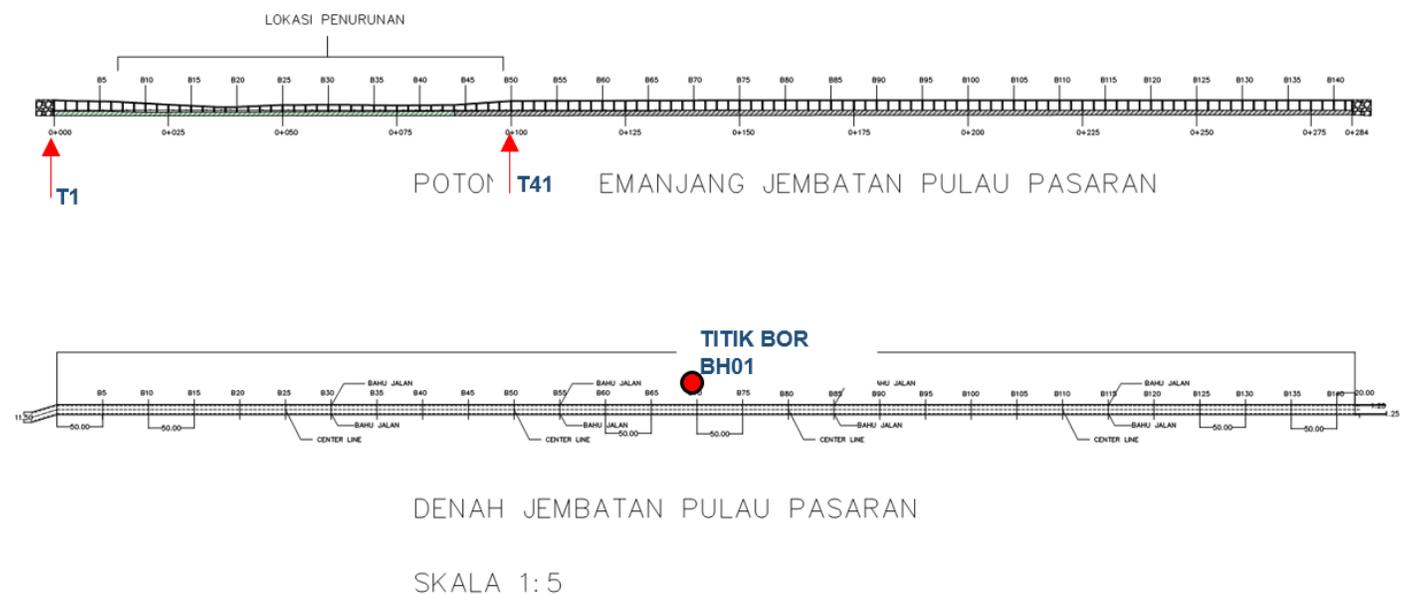
Jembatan Pulau Pasaran terletak di kawasan laut (*marine environment*). Pada lingkungan tersebut, air laut yang mengandung ion klorida menempel pada elemen beton dan perlahan merasuk ke dalam. Ion klorida lalu mendegradasi mutu beton dan tulangan beton. Pada kadar klorida tertentu, lapisan perlindungan tulangan akan rusak dan korosi aktif kemudian terjadi [2]. Mekanisme tersebut lalu mengurangi kemampuan elemen beton dalam menanggung gaya-gaya dalam yang terjadi.

Pengukuran dilakukan pada JPP dengan cara 'manual', yakni menggunakan tali meteran. Dimensi jembatan yang tidak terlalu dalam membuat metode pengukuran ini cukup dapat diterima. Dari pengukuran, didapat bahwa pondasi tiang JPP

mengalami penurunan dalam skala besar (*large settlement*). Penurunan tiang JPP terjadi pada lokasi STA 0+012 hingga STA 0+090 (tiang 4 [T4] hingga tiang 39 [T39]) (**Gambar 2**). Besar penurunan yang terjadi untuk tiap lokasi adalah bervariasi antara 0,1 m hingga 1,57 m. Data bor dengan metode *Standar Penetration Test* (SPT) menunjukkan tanah pada bagian pondasi (kedalaman 0 – 6 m) terkategori sebagai tanah lanau kepasiran (*sandy silt*) lunak. Komposisi butiran terdiri dari 96% pasir hingga kerikil, 1% lanau, dan 1% lempung.



Gambar 1. Kondisi jembatan Pulau Pasaran



Gambar 2. Potongan memanjang dan denah JPP

Metode

Perhitungan penurunan tiang pada JPP akan dilakukan dengan pemodelan struktur yang mengakomodasi aspek interaksi struktur-tanah. Tahanan tanah dimodelkan sebagai

pegas elastis non-linier. Model ini termasuk salah satu cara memodelkan interaksi struktur dengan tanah selain model kontinum [3]. Model pegas, walau tidak seakurat model kontinum, memiliki keunggulan berupa tingkat komputasi yang ringan. Ketidakakuratan tersebut dapat berkurang mengingat pondasi tiang di JPP adalah relatif tidak dalam. Model struktur mencakup bentang jembatan dari tiang T01 hingga T41. Kedua ujung tiang jembatan (T01 dan T41) diasumsikan telah memiliki daya dukung yang cukup sehingga tidak terjadi penurunan signifikan. Pembatasan model dengan batas luar tiang T01 dan T41 dipilih dengan alasan dapat mempersingkat waktu komputasi. Sedangkan tiang pada T02 hingga T40 didukung oleh model tanah pegas. Beban yang bekerja pada struktur adalah beban layan, yakni beban hidup dan beban mati dengan faktor 1,0 [4]. Beban mati pada struktur berupa berat sendiri, sedangkan beban hidup berupa beban orang dan kendaraan berupa bentor bermuatan yang dibuat sebesar $4,51 \text{ kN/m}^3$.

Model pegas direpresentasikan dalam tiga aspek interaksi struktur dengan tanah, yakni: tahanan lateral, tahanan axial selimut, dan tahanan axial ujung. Ketiga aspek interaksi tersebut direpresentasikan dengan kurva p-y (tahanan lateral), kurva t-z (tahanan axial selimut), dan kurva q-w (tahanan axial ujung) [5]. Kurva tahanan tanah pegas tersebut dibuat berdasarkan uji bor tanah pada titik BH01 (**Gambar 2**) dengan metode API RP 2A-WSD 2014 [6].

Simulasi dilakukan pada beberapa variasi kekuatan tahanan ujung (*bearing*), yakni kurva q-w. Variasi kekuatan tersebut adalah 0,5b, 1,0b, 1,15b, 1,17b, 1,2b, 1,3b, 1,4b, dan 1,5b (b=nilai q pada kuva q-w asli atau 1,0b). Plot kurva q-w untuk 0,5b, 1,0b, dan 1,5b ditampilkan pada **Gambar 3**. Percobaan ini akan melihat bagaimana hubungan kekuatan tahanan ujung dengan penurunan yang terjadi di Jembatan Pulau Pasaran.

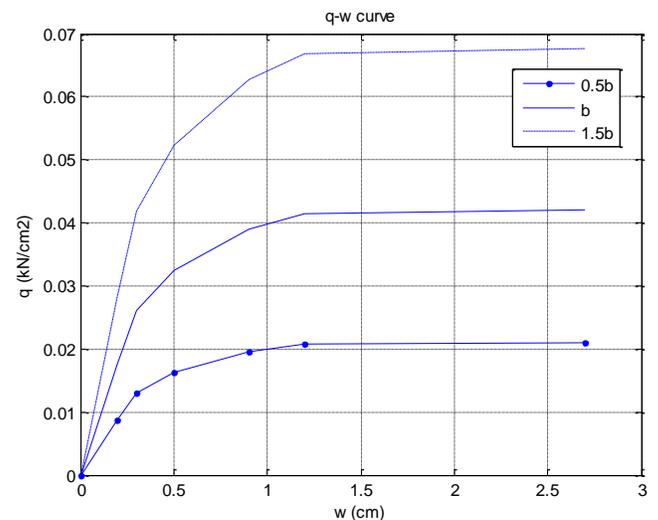
Analisis struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga. Perhitungan struktur pertama dilakukan dengan memodelkan tumpuan semua tiang sebagai tumpuan jepit. Perhitungan yang kedua mencakup interaksi struktur dengan tanah. Titik tumpu pondasi pada ujung model (T01 dan T41) dibuat sebagai tumpuan *pin* (*fixity* 111000) sedangkan pada tiang di tengah (T02 hingga T40), dibuat sebagai *interface* dengan pondasi tiang (*fixity* PILEHD). Tipikal model struktur jembatan ditampilkan pada **Gambar 4**.

Konsep dasar model struktur yang mengakomodasi aspek interaksi struktur-tanah adalah matriks kekakuan struktur yang dimodifikasi. Modifikasi tersebut dengan menambahkan derajat kebebasan (*degree of freedom*) pada

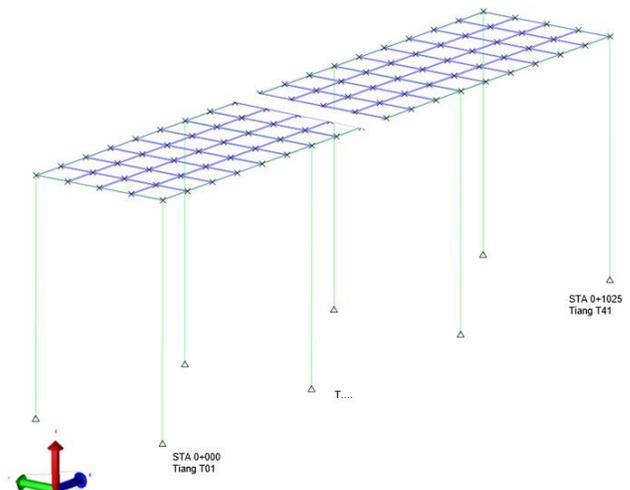
joint di lokasi pertemuan (*interface*) dasar struktur dengan ujung pondasi tiang. Matriks kekakuan tersebut adalah

$$\begin{Bmatrix} F_F \\ F_I \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FI} \\ K_{IF} & K_{II} + K_P \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_F \\ D_I \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ F_0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Dimana F_F adalah gaya luar yang bekerja pada struktur atas, F_I adalah gaya luar yang bekerja pada *interface*, D_F adalah perpindahan (*displacement*) terkait joint struktur atas, dan D_I adalah perpindahan terkait *joint interface*. K_P adalah matriks kekakuan nonlinier yang terbentuk untuk lokasi *interface*, F_0 adalah gaya-dalam kolom yang bekerja pada *interface*. Nilai K_P dan F_0 ditentukan oleh *displacement* D_I



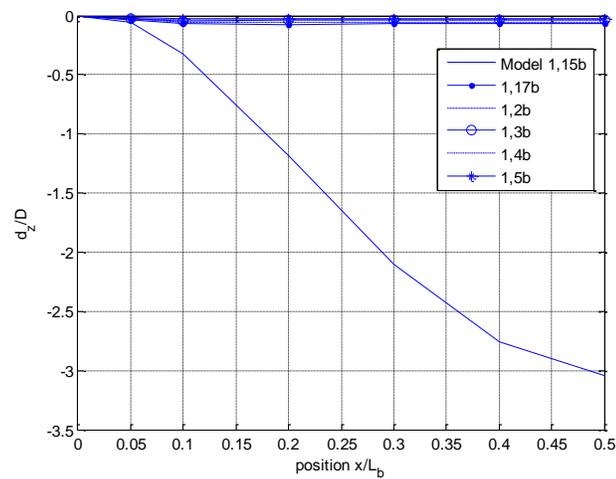
Gambar 3. Kurva q-w untuk tiga model: 0,5b, b, dan 1,5b



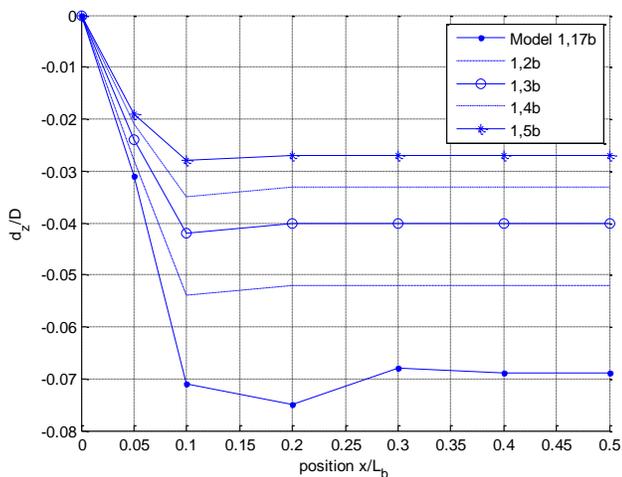
Gambar 4. Tampilan tipikal model Jembatan

Hasil dan Analisis

Hasil pemodelan menampilkan penurunan pada beberapa *joint* di deck model jembatan pada posisi x/L_b (posisi *joint* dalam sumbu x dibagi panjang model) = 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, dan 0,5. Penurunan jembatan (d_z) akan ditampilkan dalam bentuk normal terhadap ukuran kolom, yakni d_z/D , dimana $D = 25$ cm. Hasil penurunan tersebut ditampilkan pada **Gambar 5**. Perhitungan penurunan pada model dengan kekuatan tahanan ujung 0,5b dan 1,0b tidak dapat diselesaikan oleh perangkat lunak karena perpindahan (*displacement*) struktur yang terjadi terlalu besar. Hasil perhitungan gaya aksial pada tiang (F_i) ditampilkan dalam bentuk dinormalkan terhadap gaya pada kondisi tumpuan jepit (F_f), yang ditampilkan pada **Gambar 6**.



(a)

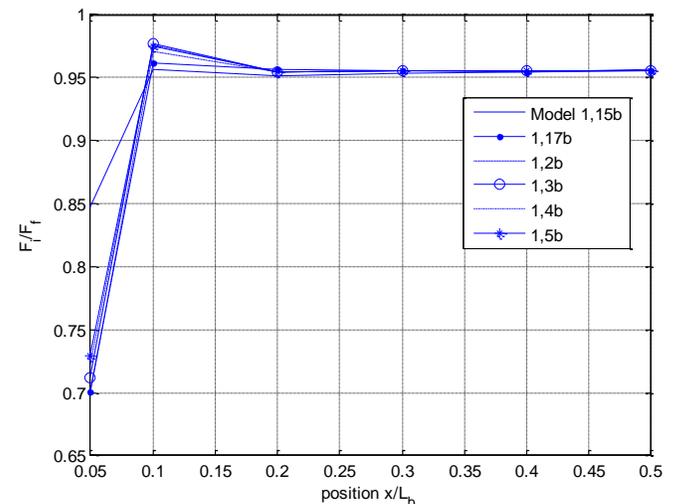


(b)

Gambar 5. Penurunan pada titik terpilih, (a) semua model, (b) tanpa model 1,15b.

Berdasarkan **Gambar 5a**, penurunan terbesar terjadi pada model dengan kekakuan tahanan ujung 1,15b dan penurunan terkecil pada model 1,6b. Penurunan terbesar pada model 1,15b terjadi pada tengah bentang ($x/L_b = 0,5$) dengan besaran 3,1D atau sebesar 76,1 cm.

Pada **Gambar 5b**, dapat terlihat bahwa terjadi penurunan tajam antara tiang pada posisi $x=0$ hingga $x/L_b=0,1$. Penurunan pada $x/L_b=0,1$ di model 1,17b adalah -0,071D atau 1,77 cm. Penurunan dengan kondisi yang hampir sama terjadi di posisi $x = 0,2L_b$ hingga $0,5L_b$. Penurunan terbesar terjadi pada $x/L_b=0,2$ pada model 1,17b. Perbandingan penurunan antara satu model dengan model yang lebih 'kaku' satu tingkat di atasnya pada $x/L_b > 0,2$ adalah 0,76 hingga 0,81. Dari sini dapat dilihat terdapat keseragaman perilaku penurunan pada $x/L_b > 0,2$.



Gambar 6. Gaya aksial pada kolom

Dari **Gambar 6**, terlihat bahwa gaya aksial tiang pada kondisi tumpuan pegas tanah (F_i) akan semakin jauh dari nilai gaya aksial tumpuan jepit (F_f) pada lokasi ujung. Pada tiang di $x = 0,05L_b$, pada model 1,15b, didapat nilai $F_i/F_f = 0,85$. Nilai ini berbeda jika dibandingkan model lainnya pada lokasi tersebut yang berada pada angka 0,71 hingga 0,73. Rentang nilai F_i/F_f pada $x/L_b=0,05$ berada pada 0,7 hingga 0,85, lalu rentang ini menyempit untuk tiang pada posisi yang lebih ke tengah. Pada posisi $x/L_b=0,5$, nilai F_i/F_f untuk semua model adalah 0,96. Tiang yang posisinya lebih ke tengah cenderung menerima gaya aksial yang lebih besar dibanding tiang yang berada di pinggir. Kondisi tersebut menghasilkan semacam 'konvergensi' antara nilai F_i dengan F_f .

Penurunan yang terjadi pada JPP pada T04 hingga T39 adalah berada pada orde puluhan cm hingga seratusan cm. Penurunan ini termasuk penurunan yang tidak biasa terjadi pada struktur, karena orde penurunan pada umumnya berada pada satuan milimeter hingga satuan centimeter. Percobaan Suyadi dkk. [7] menggunakan tiang pondasi persegi di bawah suatu beban menghasilkan penurunan pada rentang 0,3 cm hingga 0,5 cm. Sedangkan percobaan pembebanan di lapangan oleh Zhang L. [8] didapatkan penurunan dalam orde 10 mm hingga 100 mm.

Penurunan terbesar yang sebenarnya terjadi di JPP adalah 1,57 m atau 6 kali ukuran tiang ($D = 25$ cm). Hal ini tidak dapat didekati dengan simulasi yang telah dilakukan. Ketidakakuratan ini diperkirakan akibat model tanah pegas yang tidak dapat bekerja pada penurunan dalam skala besar. Model tanah pegas umumnya digunakan pada pondasi yang terencana dengan baik sehingga bekerja pada penurunan dengan orde sekitar 0,01D.

Penurunan yang tidak biasa pada JPP diperkirakan berhubungan dengan kegagalan daya dukung tanah menahan beban yang terjadi. Kegagalan daya dukung tanah ini sangat mungkin terjadi mengingat geoteknik JPP yang tidak direncanakan dengan baik. Pondasi tiang JPP dapat diibaratkan sebagai pondasi yang 'belum selesai' dipancang sehingga berakibat penurunan dalam skala besar ketika pengoperasiannya. Diperlukan suatu pendekatan lain untuk memodelkan pondasi pada kondisi demikian. Pendekatan tersebut dapat berupa penggunaan model kontinum sebagai representasi tanah dan juga pengaplikasian beban siklik.

Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah

1. Analisis struktur dengan interaksi struktur-tanah berhasil dilakukan untuk model dengan kekakuan tanah 1,15b, 1,17b, 1,2b, 1,3b, 1,4b, dan 1,5b.
2. Penurunan terbesar terjadi pada model 1,15b terjadi pada tengah bentang jembatan dengan besaran 76,1 cm. Penurunan hasil simulasi masih belum sesuai dengan penurunan yang terjadi di lapangan.
3. Gaya aksial tiang pada kondisi tumpuan pegas tanah (F_i) semakin mendekati nilai gaya aksial pada tumpuan jepit (F_j) pada tiang yang berada di tengah jembatan.
4. Diperlukan suatu pendekatan lain untuk memodelkan pondasi yang mengalami penurunan skala besar.

Konflik Kepentingan

Tidak ada konflik kepentingan yang dinyatakan dalam penelitian ini

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih diberikan pada Dinas Pekerjaan Umum Kota Bandar Lampung, terkhusus pada Bidang Bina Marga, Seksi Perencanaan, yang telah mendukung data Jembatan Pulau Pasaran.

Referensi

- [1] D. Kusumastuti, K. S. Pribadi, and Rildova, "Reducing Earthquake Vulnerability of Non-Engineered Buildings: Case Study of Retrofitting of School Building in Indonesia," *14th World Conf. Earthq. Eng. Oct. 12-17, 2008, Beijing, China*, 2008.
- [2] A. A. Torres-Acosta and M. Martnez-Madrid, "Residual Life of Corroding Reinforced Concrete Structures in Marine Environment," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 344–353, 2003.
- [3] H. Seo, D. Basu, M. Prezzi, and R. Salgado, "Load-Settlement Response of Rectangular and Circular Piles in Multilayered Soil," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 135, no. 3, pp. 420–430, 2009.
- [4] POLB, "Port of Long Beach Wharf Design Criteria Version 4.0," pp. 1–92, 2015.
- [5] ASCE, "Seismic Design of Piers and Wharves," *Seism. Des. Piers Wharves*, no. July, 2014.
- [6] T. Edition, "Planning , Designing , and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design," no. November, 2014.
- [7] W. Suyadi and H. Saraswati, "Pengaruh Pembebanan Eksentris pada Pondasi Persegi Panjang Terhadap Daya Dukung dan Penurunan Tanah Pasir dengan Perkuatan Geotekstil," *Rekayasa Sipil*, vol. 3, no. 2, pp. 101–115, 2012.
- [8] L. Zhang and Y. Xu, "Settlement of building foundations based on field pile load tests Tassement de fondation de bâtiment base sur des essai de pile charger," pp. 2871–2874, 2006.