

Evaluasi dan Redesain Fondasi Abutment akibat Tiang Bor Tidak Mencapai Kedalaman Rencana: Studi Kasus Jembatan Palu 4

Moh Fadhlhan Rosyidi^{a*}, Fikri Ghifari^b, Kohar Yudoprasetyo^a, Ifarrel Rachmanda Hariyanto^a dan Andreas Bambang Sandi Asmoro^c

^aDepartemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia 60111

^bDepartment of Civil and Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei City, Taiwan,

^cPT Inti Teknik Solusi Cemerlang, Surabaya, Indonesia 60239

* Corresponding author's e-mail: fadhlhanrosyidi@its.ac.id

Received: 28 August 2026; revised: 31 August 2026; accepted: 2 September 2026

Abstract: Failure of a bored pile to reach its planned depth due to construction problems may alter pile capacity and load distribution within the pile group, requiring an integrated geotechnical and structural assessment. This study presents a case study of the evaluation and redesign of the Palu 4 Bridge abutment foundation, where bored pile No. 5 experienced borehole collapse and reached only about one-third of its planned depth. The remedial scheme introduced replacement pile No. 7 and enlarged the pile cap from 12.8 m × 8.1 m to 16.7 m × 8.1 m. Pile-group response was analyzed using Ensoft GROUP to evaluate axial force, lateral displacement, shear, and bending moment, while CSI SAFE was used to assess pile-cap flexure, one-way shear, and punching shear. The maximum lateral displacement was 21.50 mm, below the 25 mm limit, while the axial safety factor of 2.425 exceeded the minimum requirement of 1.67. The governing bored-pile demand-to-capacity ratio was 0.877 for flexure, whereas the pile cap reached 0.985 for flexure and approximately 0.87 for punching shear. This study demonstrates an integrated geotechnical–structural evaluation procedure to verify the adequacy of a remedial foundation configuration when a bored pile fails to reach the planned depth.

Keywords: bored pile; pile cap; bridge foundation; replacement pile; load redistribution; case study.

Abstrak: Ketidakaapaian kedalaman rencana pada tiang bor akibat permasalahan konstruksi dapat mengubah kapasitas dan distribusi beban kelompok tiang sehingga memerlukan evaluasi geoteknik dan struktural secara terintegrasi. Penelitian ini menyajikan studi kasus evaluasi dan redesain fondasi abutment Jembatan Palu 4, ketika tiang bor No. 5 mengalami kelongsoran lubang bor dan hanya mencapai sekitar sepertiga kedalaman rencana. Penanganan dilakukan dengan menggunakan tiang pengganti No. 7 dan memperbesar pile cap dari 12,8 m × 8,1 m menjadi 16,7 m × 8,1 m. Respons kelompok tiang dianalisis menggunakan Ensoft GROUP untuk mengevaluasi gaya aksial, respons lateral, gaya geser, dan momen, sedangkan pile cap dianalisis menggunakan CSI SAFE terhadap lentur, geser satu arah, dan geser pons. Hasil menunjukkan perpindahan lateral maksimum 21,50 mm masih di bawah batas 25 mm dan faktor keamanan aksial sebesar 2,425 melebihi minimum 1,67. Rasio kapasitas maksimum tiang bor terhadap lentur sebesar 0,877, sedangkan rasio pengontrol pile cap sebesar 0,985 pada lentur dan sekitar 0,87 pada geser pons. Studi ini mendemonstrasikan prosedur evaluasi geoteknik–struktural terintegrasi untuk memverifikasi kelayakan konfigurasi remediasi ketika tiang bor tidak mencapai kedalaman rencana.

Kata kunci: tiang bor; pile cap; fondasi jembatan; tiang pengganti; redistribusi beban; studi kasus.

1. Pendahuluan

Fondasi tiang bor banyak digunakan pada struktur jembatan karena mampu meneruskan beban aksial, gaya lateral, dan momen struktural atas ke lapisan tanah yang lebih kompeten pada kedalaman tertentu. Kinerja fondasi tersebut, bagaimanapun, tidak hanya ditentukan oleh hasil perencanaan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh mutu pelaksanaan di lapangan. Ketidakstabilan dinding lubang, gangguan slurry atau casing, material sisa pada dasar lubang, perubahan penampang, *necking*, serta ketidakcapaian kedalaman dapat menyebabkan kondisi as-built berbeda dari asumsi desain. Mardhani dan Jamal [1] menunjukkan bahwa kontrol *working platform*, *slurry*, dan *temporary casing* merupakan bagian penting dalam menjaga keberhasilan *konstruksi bored pile* pada tanah lunak. Pada sisi kapasitas, Yao *et al.* [2] memperlihatkan bahwa *toe debris*, *mud cake*, dan *necking* dapat menurunkan kapasitas serta reliabilitas *cast-in-place bored pile*. Temuan tersebut menegaskan bahwa setiap penyimpangan geometri atau integritas tiang perlu diperlakukan sebagai kondisi

rekayasa yang harus dievaluasi sebelum fondasi dinyatakan dapat diterima.

Ketidakaapaian kedalaman rencana merupakan bentuk ketidaksesuaian yang penting karena panjang tertanam menentukan mobilisasi tahanan selimut, tahanan ujung, serta kekakuan lateral tiang. Mittal dan Samanta [3] melaporkan kasus panjang aktual tiang yang lebih pendek daripada desain dan menunjukkan bahwa kondisi tersebut dapat memerlukan evaluasi ulang kapasitas tekan, tarik, dan lateral sebelum tindakan penguatan ditetapkan. Albuquerque *et al.* [4] juga menunjukkan perbedaan respons antara bored pile utuh dan *defective pile* terhadap pembebanan aksial, sedangkan Neto *et al.* [5] melalui pengujian dan analisis numerik menunjukkan bahwa satu *defective pile* dapat menurunkan kapasitas sistem fondasi secara nyata. Oleh karena itu, pada kasus tiang yang tidak mencapai kedalaman rencana, keputusan untuk menerima, memperbaiki, mengabaikan, atau mengganti tiang perlu didasarkan pada kondisi as-built dan respons sistem, bukan hanya pada perbedaan kedalaman secara geometrik.

Pada fondasi kelompok, berkurangnya kontribusi satu tiang dapat menyebabkan redistribusi reaksi pada tiang lain. Besarnya redistribusi dipengaruhi oleh posisi tiang, jarak antar-tiang, kekakuan relatif, arah pembebanan, dan konfigurasi *pile cap*. Alhashmi *et al.* [6] menunjukkan bahwa *defective pile* pada kelompok tiang dapat mengalihkan sebagian beban aksial menuju tiang di sekitarnya dan mengubah kondisi *serviceability* kelompok. Dalam konteks pembebanan lateral, Wilmer dan Prakoso [7] menunjukkan bahwa perubahan kondisi elemen dalam kelompok tiang dapat menghasilkan redistribusi gaya yang berbeda antar-tiang. Rizkillah *et al.* [8] juga memperlihatkan bahwa perubahan konfigurasi tiang memengaruhi gaya aksial, gaya geser, momen lentur, dan perpindahan secara tidak seragam. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *replacement pile* harus dievaluasi pada tingkat kelompok agar tidak menimbulkan konsentrasi gaya baru pada tiang tertentu.

Tahap diagnosis menjadi bagian penting sebelum remediasi dilakukan. Data drilling record, kedalaman aktual, volume beton, kondisi dasar lubang, serta hasil pengujian integritas dapat digunakan untuk memperjelas kondisi tiang. Wicaksono [9] menunjukkan penggunaan *Pile Integrity Test* (PIT) untuk mengevaluasi integritas bored pile, sedangkan Citra *et al.* [10] menggunakan perubahan impedansi untuk mengidentifikasi indikasi perubahan kondisi penampang fondasi tiang. Pada studi kasus ini, status pile No. 5 ditetapkan berdasarkan catatan pelaksanaan proyek karena kelongsoran saat pengeboran menyebabkan tiang hanya mencapai sekitar sepertiga kedalaman rencana. Pendekatan tersebut dijadikan dasar untuk analisis konservatif dengan tidak memperhitungkan kontribusi pile No. 5 pada sistem remediasi.

Kinerja fondasi jembatan juga harus ditinjau terhadap respons lateral, terutama pada kondisi gempa dan tanah yang mengalami degradasi kekakuan. Baek dan Kim [11] menunjukkan bahwa karakteristik kurva p-y dan kekakuan tanah berpengaruh langsung terhadap prediksi perpindahan dan momen tiang. Hariswaran dan Premalatha [12] memperlihatkan bahwa *defect* dapat menurunkan kapasitas lateral tiang, sementara Minmahdduna dan Mangidi [13] menunjukkan bahwa pada tanah berpotensi likuifaksi, penurunan kapasitas aksial dapat relatif kecil tetapi defleksi lateral dapat meningkat hingga melewati batas izin. Hal ini penting pada kasus Jembatan Palu 4 karena evaluasi tidak cukup berhenti pada faktor keamanan aksial, tetapi harus mencakup perpindahan lateral dan gaya dalam akibat interaksi tanah-tiang.

Apabila evaluasi menunjukkan perlunya *replacement pile*, perubahan lokasi reaksi dapat mengubah jalur transfer gaya dan struktural *pile cap*. Li *et al.* [14] melaporkan remediasi fondasi jembatan melalui penambahan pile dan perluasan bearing platform sebagai bagian dari penguatan sistem struktur bawah. Miguel-Tortola *et al.* [15] menunjukkan bahwa pembebanan eksentris dapat meningkatkan reaksi maksimum pada salah satu pile, sedangkan Miguel-Tortola *et al.* [16] menunjukkan bahwa punching shear tetap merupakan mode kegagalan penting pada deep pile cap. Mogili dan Hwang [17] menekankan pengaruh geometri, susunan *pile*, dan tulangan terhadap

mekanisme transfer gaya, sedangkan Yusmar dan Isda [18] menunjukkan bahwa hasil desain *pile cap* dengan metode elemen hingga, pendekatan konvensional, dan strut-and-tie dapat berbeda. Dengan demikian, perubahan konfigurasi pile harus diikuti evaluasi ulang *pile cap* terhadap lentur, geser satu arah, punching shear, dan kebutuhan penulangan.

Kajian nasional juga menunjukkan bahwa evaluasi fondasi sebaiknya mengintegrasikan data tanah, beban, kapasitas, dan deformasi. Hidayat dan Irdhiani [19] menunjukkan bahwa pemilihan alternatif fondasi di Palu perlu mempertimbangkan daya dukung, penurunan, dan respons lateral secara bersama. Hamkah *et al.* [20] memperlihatkan pentingnya membandingkan kapasitas bored pile berdasarkan data tanah dengan kapasitas pascainstansi, sedangkan Krisnanto *et al.* [21] menekankan variabilitas kapasitas aksial akibat ketidakpastian parameter tanah. Rangkaian penelitian tersebut mendukung perlunya prosedur evaluasi yang tidak terfragmentasi antara geoteknik, struktur, dan kondisi konstruksi.

Berdasarkan penelitian terdahulu, aspek *defective pile*, integritas, redistribusi kelompok, respons lateral, dan desain pile cap telah banyak dikaji, tetapi dokumentasi prosedur praktis yang mengintegrasikan seluruh tahapan pada kasus bored pile jembatan yang tidak mencapai kedalaman rencana masih relatif terbatas. Kebaruan studi ini terletak pada penerapan kerangka evaluasi geoteknik-struktural secara terintegrasi pada kasus aktual tiang bor jembatan yang tidak mencapai kedalaman rencana, mulai dari penetapan status tiang bermasalah, penggunaan *replacement pile*, evaluasi respons kelompok tiang, hingga verifikasi struktural pile cap. Penelitian ini karena itu diposisikan sebagai *engineering case study* pada fondasi *abutment* Jembatan Palu 4. Pile No. 5 mengalami kelongsoran saat pengeboran dan tidak mencapai kedalaman rencana; remediasi dilakukan dengan tidak memperhitungkan pile tersebut sebagai tiang aktif, memasang *replacement pile* No. 7, dan memperbesar pile cap dari 12,8 m × 8,1 m menjadi 16,7 m × 8,1 m. Tujuan penelitian adalah mendemonstrasikan prosedur evaluasi yang mencakup verifikasi kondisi as-built, analisis ulang respons kelompok, pemeriksaan kapasitas aksial-lateral dan struktural tiang, serta redesain *pile cap* sebagai dasar penerimaan konfigurasi remediasi. Penelitian tidak diarahkan untuk membandingkan peningkatan kinerja sebelum dan sesudah remediasi, tetapi untuk memverifikasi apakah konfigurasi remediasi yang dipilih memenuhi kriteria geoteknik dan struktural yang dipersyaratkan.

2. Metode Penelitian

2.1. Studi Kasus dan Kerangka Evaluasi

Penelitian menggunakan pendekatan studi kasus rekayasa dengan data utama berupa catatan konstruksi, konfigurasi bored pile, data investigasi tanah, reaksi struktur atas, laporan static loading test, geometri fondasi, dan detail penulangan. Prosedur analisis disusun berurutan agar setiap keputusan remediasi dapat ditelusuri, yaitu: identifikasi kondisi aktual tiang; penetapan status pile bermasalah; penentuan konfigurasi *replacement pile*; pembaruan beban fondasi; analisis aksial dan lateral kelompok tiang; pemeriksaan kapasitas struktural bored

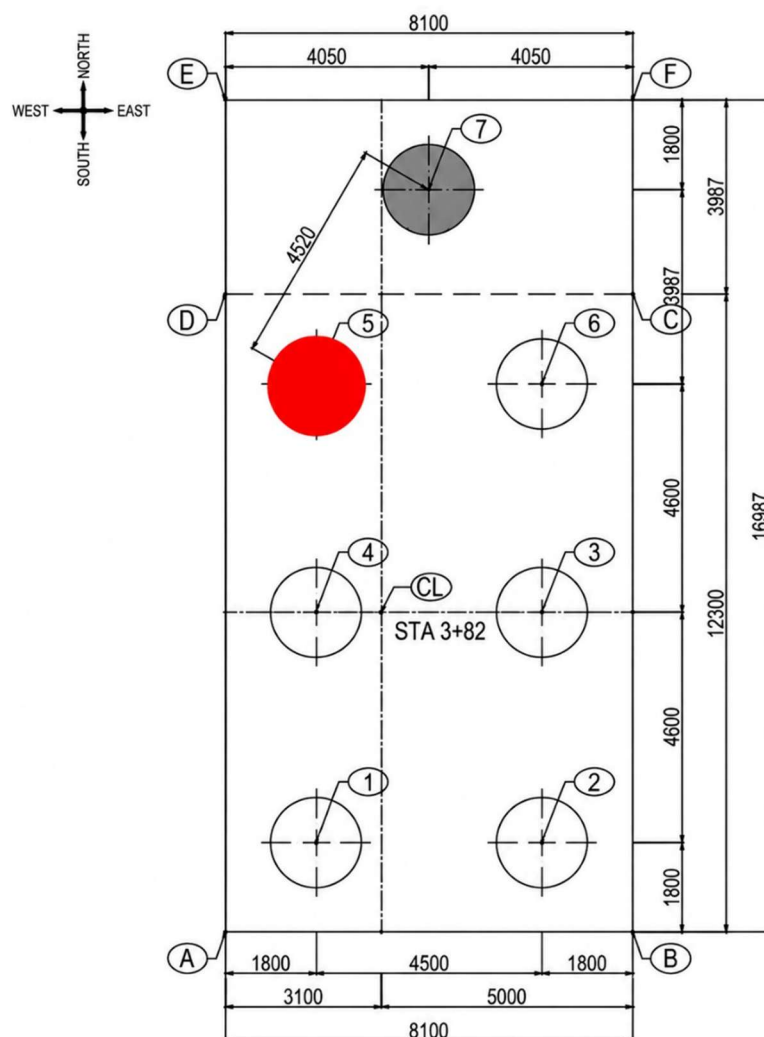
pile; serta redesain dan verifikasi *pile cap*. Urutan ini mengikuti prinsip evaluasi kondisi *as-built* sebelum penguatan sebagaimana ditunjukkan Mittal dan Samanta [3], serta mempertimbangkan pentingnya pemeriksaan integritas yang dibahas Wicaksono [9] dan Citra *et al.* [10].

Berdasarkan catatan pelaksanaan, pile No. 5 mengalami kelongsoran pada tahap pengeboran dan hanya mencapai sekitar sepertiga kedalaman rencana. Karena kapasitas dan kekakuannya tidak dapat diasumsikan sama dengan pile utuh, kontribusi pile No. 5 diabaikan dalam model remediasi. Replacement pile No. 7 kemudian digunakan untuk mengembalikan jumlah pile aktif menjadi enam. Posisi pile pengganti menyebabkan dimensi *pile cap* diperbesar dari $12,8 \text{ m} \times 8,1 \text{ m}$ menjadi $16,7 \text{ m} \times 8,1 \text{ m}$ dapat dilihat pada Gambar 1. Asumsi pengabaian pile No. 5 bersifat konservatif dan dimaksudkan agar keberterimaan konfigurasi akhir tidak bergantung pada kontribusi tiang yang kondisinya tidak memenuhi desain. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip bahwa *defective pile* dapat menunjukkan respons berbeda dari *pile* utuh [2], [4], [5]. Atas dasar tersebut, kondisi dengan pile No. 5 yang hanya mencapai sebagian kedalaman tidak dimodelkan sebagai konfigurasi fondasi yang dapat diterima untuk tujuan

komparasi. Analisis difokuskan langsung pada konfigurasi remediasi dengan pile No. 5 tidak diperhitungkan dan pile No. 7 digunakan sebagai *replacement pile*. Dengan demikian, keluaran penelitian digunakan untuk menilai pemenuhan kriteria desain konfigurasi remediasi dan tidak diinterpretasikan sebagai persentase peningkatan kinerja terhadap kondisi sebelum remediasi.

2.2. Pembebanan dan Pemodelan Kelompok Tiang

Beban fondasi diperoleh dari joint reactions struktur atas yang meliputi gaya aksial, V_x , V_y , M_x , M_y , dan M_z dapat dilihat pada Tabel 1. Kombinasi layan dan gempa mengikuti basis desain proyek dengan acuan SNI 1725:2016. Nilai maksimum dan minimum digunakan untuk mengidentifikasi kondisi pengontrol pada setiap arah. Pemisahan jenis pemeriksaan dilakukan agar *respons serviceability*, kapasitas geoteknik, dan kapasitas struktural tidak tercampur dalam satu kriteria. Pada evaluasi akhir, gaya P , M_x , dan M_y untuk pemeriksaan interaksi penampang diambil dari kombinasi pembebanan yang sama sehingga kondisi biaxial bending direpresentasikan secara simultan.



Gambar 1. Redesain *pile cap* dan penambahan tiang bor

Tabel 1. *Output joint reactions struktur atas*

Load Combination	Arah Gaya	Aksial (kN)	Vx (kN)	Vy (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	Mz (kN.m)
ELS 1 max	Fx	28194.0	13032.0	6617.0	60058.0	42291.1	5096.0
ELS 1 min		27088.0	-147.0	3308.0	-8697.0	21145.5	2548.0
ELS 4 max		23769.0	-13032.0	-6617.0	-100000.0	-42291.1	-5096.0
ELS 5 max	Fy	26645.0	3910.0	22056.0	-440.9	140970.0	16986.0
ELS 5 min		26313.0	-44.1	11028.0	-21067.0	70485.1	8493.0
ELS 5 max (-)		26645.0	-3910.0	-22056.0	440.9	-140970.0	-16986.0
SLS 1 max	Fz	27253.4	-7853	-131.8	1258.608	-55215.8	-224.1
SLS 1 min		27680.7	-7853	0	0	-55942.3	0

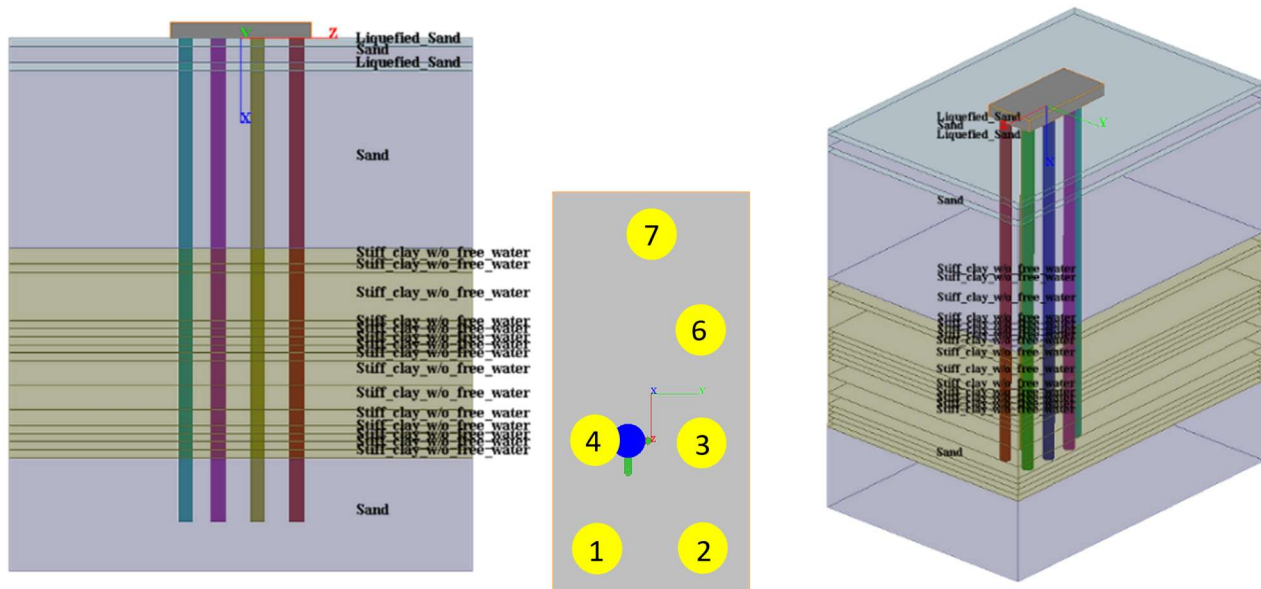
Kelompok tiang dianalisis menggunakan *GROUP Software by Ensoft* dapat dilihat pada **Gambar 2**. Tiang direpresentasikan sebagai elemen beam-column, sedangkan interaksi tanah-tiang dimodelkan melalui kurva p-y untuk respons lateral, t-z untuk transfer tahanan selimut, dan q-z untuk tahanan ujung. Parameter tanah mengikuti hasil investigasi dan interpretasi proyek, termasuk lapisan yang direpresentasikan sebagai *liquefied sand* dapat dilihat pada **Tabel 2**. Pemilihan kurva p-y penting karena perubahan kekakuan tanah dapat memengaruhi distribusi momen dan perpindahan lateral [11]. Output utama yang dievaluasi adalah gaya aksial, gaya geser, momen lentur, dan perpindahan lateral setiap pile sehingga tiang pengontrol dapat diidentifikasi untuk masing-masing parameter

2.3. Evaluasi Kapasitas Geoteknik dan Struktural Tiang

Kapasitas aksial dievaluasi menggunakan nilai kapasitas ijin yang dilaporkan dari static loading test sebesar 34.000 kN. Faktor keamanan dihitung sebagai $FS = Q_{test}/P_{max}$, dengan P_{max} merupakan gaya aksial maksimum hasil *GROUP*. Penggunaan data pengujian lapangan dipilih karena dapat memberikan representasi kapasitas yang lebih

dekat dengan kondisi terpasang dibandingkan dengan estimasi empiris semata. Hamkah *et al.* [20] menunjukkan bahwa kapasitas pascainstalisasi dapat berbeda dari prediksi berbasis data tanah, sedangkan Krisnanto *et al.* [21] menunjukkan bahwa ketidakpastian parameter tanah dapat menyebabkan variasi kapasitas aksial. Nilai 34.000 kN pada penelitian ini digunakan sebagaimana dilaporkan dalam dokumen pengujian proyek dan menjadi basis perbandingan terhadap demand maksimum.

Respons lateral dinilai berdasarkan perpindahan maksimum kepala tiang dan gaya dalam hasil *GROUP*. Pemeriksaan ini dipertahankan meskipun kapasitas aksial memenuhi karena kinerja lateral dapat menjadi lebih kritis pada tanah yang mengalami degradasi kekakuan. Minmahdduna dan Mangidi [13] menunjukkan bahwa kondisi likuifaksi dapat meningkatkan defleksi secara lebih signifikan dibandingkan penurunan kapasitas aksial, sedangkan Hariswaran dan Premalatha [12] menunjukkan bahwa defect dapat menurunkan kapasitas lateral pile. Kriteria deformasi pada studi ini menggunakan batas yang diterapkan dalam pada SNI 8460:2017.

**Gambar 2.** Pemodelan pondasi pilecap pada *GROUP Software Version 2019 by Ensoft*

Tabel 2. Parameter tanah pemodelan software group

Jenis Tanah	Tebal Lapisan (m)	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	k (kN/m ³)	ϵ_{50} (-)
Liquified Sand (Rollins)	3	6	-	-	-	-
Sand (Reese)	15	9.7	-	39.1	59600	-
Stiff Clay		10.6	75.41	-	118300	0.0076
Sand (Reese)		10.4	-	40	74500	-

Keterangan: γ , berat volume efektif tanah; c, Kohesi undrained tanah; ϕ , sudut gesek tanah; k, modulus lateral; ϵ_{50} , regangan pada 50% tegangan maksimum

Kapasitas struktural tiang bor diperiksa berdasarkan SNI 2847:2019 terhadap kombinasi aksial-lentur dan geser. Gaya aksial, M_x , M_y , dan gaya geser hasil GROUP digunakan sebagai demand, sedangkan kapasitas diperoleh dari geometri dan detail penulangan penampang. Rasio demand-to-capacity digunakan sebagai indikator ringkas, dengan nilai di bawah 1,0 menunjukkan bahwa demand masih berada di bawah kapasitas desain. Karena pile menerima momen dua arah, verifikasi final disarankan menggunakan interaksi P- M_x - M_y dari kombinasi yang sama, bukan hanya membandingkan nilai envelope aksial dan momen secara terpisah.

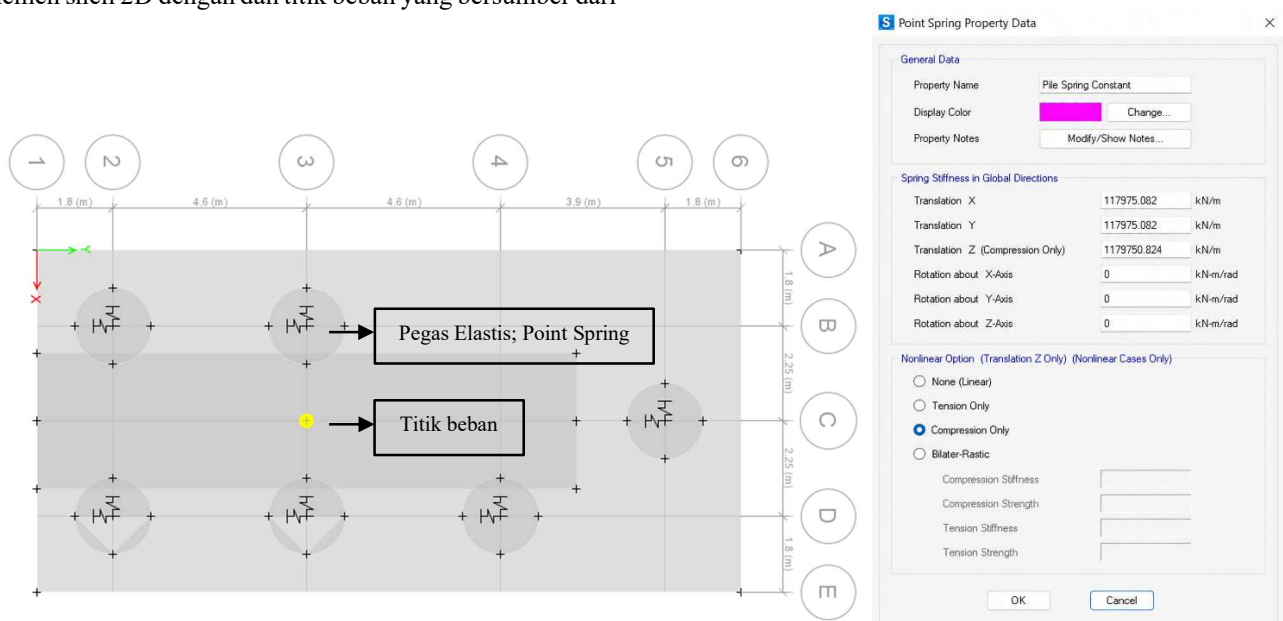
2.4. Pemodelan dan Evaluasi Pile Cap

Pile cap hasil remediasi dimodelkan menggunakan CSI SAFE, software SAFE merupakan perangkat lunak elemen hingga yang secara luas digunakan untuk analisis dan desain pelat dan fondasi, termasuk pondasi telapak dan pilecap. SAFE memungkinkan memodelkan geometri pilecap, posisi tiang sebagai tumpuan pegas (*axial springs*), serta memasukkan kombinasi beban yang berasal dari joint reactions struktur atas. Tiang bor dimodelkan sebagai pegas elastis (*point spring*) dengan kekakuan aksial $k=EA/L$, pegas vertikal digunakan untuk merepresentasikan kekakuan aksial ekuivalen sistem pile-soil pada model pile cap, pilecap dimodelkan sebagai pelat tebal (*thick plate*) elemen shell 2D dengan dan titik beban yang bersumber dari

reaksi struktur atas dimodelkan sebagai dinding *abutment thick shell type Stiff*. Pemodelan pilecap pada software SAFE dapat dilihat pada Gambar 3.

Analisis menghasilkan momen pada muka atas dan bawah arah x-y serta gaya geser yang digunakan untuk desain tulangan dan pemeriksaan geser. Pendekatan FEM digunakan untuk memperoleh respons global, tetapi interpretasi mekanisme tetap mempertimbangkan bahwa *pile cap* merupakan D-region dengan transfer gaya terkonsentrasi dari abutment ke *pile*.

Pemeriksaan pile cap meliputi lentur dua arah, geser satu arah, punching shear, dan kebutuhan penulangan berdasarkan SNI 2847:2019. Miguel-Tortola *et al.* [15] menunjukkan bahwa eksentrisitas beban dapat meningkatkan reaksi maksimum *pile*, sedangkan Miguel-Tortola *et al.* [16] menunjukkan bahwa *punching shear* tetap perlu diperiksa pada *deep pile cap*. Mogili dan Hwang [17] menekankan pengaruh geometri dan *pile arrangement* terhadap jalur gaya, sementara Yusmar dan Isda [18] menunjukkan perbedaan kebutuhan tulangan antara pendekatan FEM, konvensional, dan *strut-and-tie*. Berdasarkan hal tersebut, konfigurasi remediasi dinyatakan memenuhi apabila kapasitas aksial dan lateral pile, kapasitas struktural pile, serta seluruh kontrol pile cap berada dalam kriteria penerimaan.

**Gambar 3.** Pemodelan *pile cap* pada Software CSI SAFE

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Distribusi Gaya pada Konfigurasi Remediasi

Konfigurasi remediasi terdiri atas enam pile aktif, yaitu pile No. 1, 2, 3, 4, 6, dan 7. Hasil GROUP dapat dilihat pada Tabel 3 menunjukkan distribusi gaya aksial yang tidak seragam. Pile No. 7 sebagai replacement pile menerima gaya aksial terbesar sebesar 14.023 kN, sedangkan pile No. 3 menerima gaya aksial terkecil sebesar 6.186,9 kN. Perbedaan lebih dari dua kali antara kedua nilai tersebut menunjukkan bahwa posisi *pile* terhadap resultan beban dan momen abutment memengaruhi pembagian reaksi. Distribusi yang tidak seragam menunjukkan bahwa posisi *replacement pile* terhadap resultan gaya dan momen struktur atas memengaruhi jalur transfer beban pada konfigurasi remediasi.

Pola tersebut konsisten dengan Alhashmi *et al.* [6], yang menunjukkan bahwa kehilangan kontribusi *defective pile* mengalihkan beban ke *pile* di sekitarnya dan bahwa besarnya redistribusi dipengaruhi oleh posisi serta spacing. Wilmer dan Prakoso [7] juga menunjukkan bahwa kerusakan atau perubahan kondisi elemen dapat menghasilkan redistribusi gaya yang berbeda antar-tiang, sedangkan Rizkillah *et al.* [8] memperlihatkan bahwa perubahan konfigurasi pile dapat meningkatkan satu komponen gaya tetapi menurunkan komponen lainnya. Pada studi ini, *pile* No. 7 menjadi pengontrol aksial, sementara *pile* No. 1 menjadi pengontrol momen dan geser. Perbedaan *pile* pengontrol tersebut merupakan alasan utama evaluasi harus dilakukan terhadap beberapa parameter secara bersamaan.

Tabel 3. Hasil gaya dalam dan perpindahan lateral maksimum *GROUP software*

No Tiang	Aksial (kN)	Vx (kN)	Vy (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	Dx (mm)	Dy (mm)	Batas (mm)	Status
1	12965	1588.7	2206.2	8045	6344.8	12.20	21.50	25	Memenuhi
2	11860	1610.5	2157.6	6555	5735.3	12.20	20.93	25	Memenuhi
3	6186.9	1384.7	2157	6396	5746.5	11.62	20.93	25	Memenuhi
4	12264	1365.1	2205.9	7101	6355.9	11.62	21.50	25	Memenuhi
6	8738.4	1158.6	2152.4	5810.9	5753.9	11.03	20.93	25	Memenuhi
7	14023	949.4	2172.3	7885.2	6064.1	10.54	21.22	25	Memenuhi

Keterangan: V, Gaya Geser; M, Gaya Momen; D, Perpindahan lateral

3.2. Kapasitas Aksial dan Respons Lateral

Nilai kapasitas yang dilaporkan dari *static loading test* adalah kapasitas aksial ijin sebesar 34.000 kN. Dengan gaya aksial maksimum 14.023 kN, faktor keamanan yang diperoleh adalah 2,425. Nilai tersebut lebih besar dari nilai minimum 1,67 yang digunakan pada evaluasi kondisi gempa dalam studi ini, sehingga kapasitas aksial konfigurasi remediasi masih memenuhi kriteria. Namun, hasil ini tidak diinterpretasikan sebagai satu-satunya dasar penerimaan karena nilai kapasitas pengujian tetap perlu dibaca bersama kualitas data tanah, kondisi *as-built*, dan distribusi beban kelompok. Krisnanto *et al.* [21] menegaskan bahwa kapasitas aksial memiliki variabilitas akibat ketidakpastian parameter tanah, sedangkan Hamkah *et al.* [20] menunjukkan pentingnya membandingkan estimasi kapasitas dengan respons pascainstalasi.

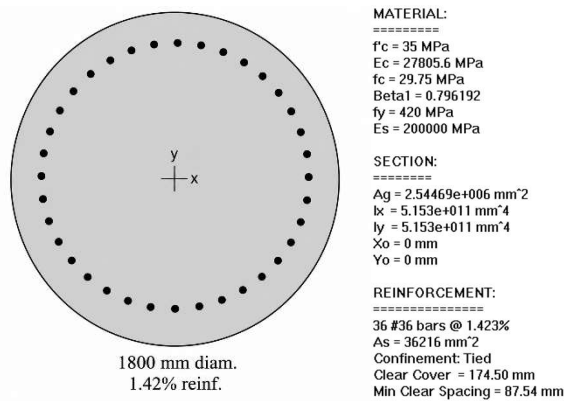
Perpindahan lateral maksimum arah y mencapai 21,50 mm pada *pile* No. 1 dan No. 4, sedangkan arah x mencapai 12,20 mm. Nilai 21,50 mm masih di bawah batas 25 mm sesuai SNI 8460:2017, tetapi telah mencapai sekitar 86% dari batas tersebut. Artinya, margin kinerja lateral lebih kecil dibandingkan margin kapasitas aksial. Temuan ini sejalan dengan Minmahdduna dan Mangidi [13], yang menunjukkan bahwa pada kondisi likuifaksi, penurunan kapasitas aksial dapat relatif kecil sementara defleksi lateral meningkat hingga melewati batas izin. Hariswaran dan

Premalatha [12] juga menunjukkan bahwa *defect* dapat menurunkan kinerja *lateral pile*. Dengan demikian, hasil studi ini menguatkan bahwa pemeriksaan aksial dan lateral harus dilakukan secara paralel ketika mengevaluasi tiang bor yang tidak mencapai kedalaman rencana.

Respons lateral yang relatif dekat dengan batas izin juga berkaitan dengan karakteristik interaksi tanah-tiang. Baek dan Kim [11] menunjukkan bahwa bentuk dan kekakuan kurva p-y sangat memengaruhi prediksi perpindahan serta momen pada pile. Oleh karena itu, pada penerapan prosedur ini di proyek lain, sensitivitas terhadap parameter tanah dan pemilihan model p-y perlu dipertimbangkan apabila displacement atau momen telah mendekati batas penerimaan.

3.3. Kapasitas Struktural Tiang Bor

Gaya dalam maksimum hasil GROUP menunjukkan momen sebesar 8.045 kN·m dan gaya geser sebesar 2.206,2 kN pada pile No. 1 (*Gambar 4*). Kapasitas penampang yang digunakan dalam desain dapat dilihat pada Tabel 4 adalah 46.716 kN untuk aksial, 9.168,25 kN·m untuk lentur, dan 3.702 kN untuk geser. Perbandingan demand terhadap capacity menghasilkan rasio 0,30 untuk aksial, 0,877 untuk lentur, dan 0,596 untuk geser. Seluruh nilai berada di bawah 1,0, tetapi rasio lentur 0,877 menunjukkan bahwa momen akibat respons lateral merupakan parameter struktural yang paling kritis pada *bored pile*.



Gambar 4. Model dimensi dan penulangan tiang bor

Tabel 4. Rekapitulasi hasil kontrol penulangan

Pemeriksaan	Demand	Capacity	D/C	Kriteria	Status
Aksial (kN)	14.023	46.716	0,300	$\leq 1,0$	Memenuhi
Lentur (kN.m)	8.045	9.168,25	0,877	$\leq 1,0$	Memenuhi
Geser (kN)	2.206,2	3.702	0,596	$\leq 1,0$	Memenuhi

Hasil tersebut memperlihatkan perbedaan antara keamanan geoteknik dan pemanfaatan kapasitas struktural. Meskipun faktor keamanan aksial sebesar 2,425 menunjukkan kapasitas vertikal yang relatif memadai, pemanfaatan kapasitas lentur telah mencapai sekitar 87,7%. Albuquerque *et al.* [4] dan Freitas Neto *et al.* [5] menunjukkan bahwa *defect* dapat mengubah kekakuan dan mekanisme transfer beban *pile*, sedangkan Yao *et al.* [2] menunjukkan bahwa variasi jenis defect memengaruhi kapasitas serta reliabilitas *cast-in-place bored pile*. Walaupun kasus Jembatan Palu 4 bukan *necking* atau *mud cake*, prinsip yang relevan adalah bahwa perubahan kondisi *as-built* dapat mengubah respons struktural dan karena itu perlu diikuti evaluasi gaya dalam.

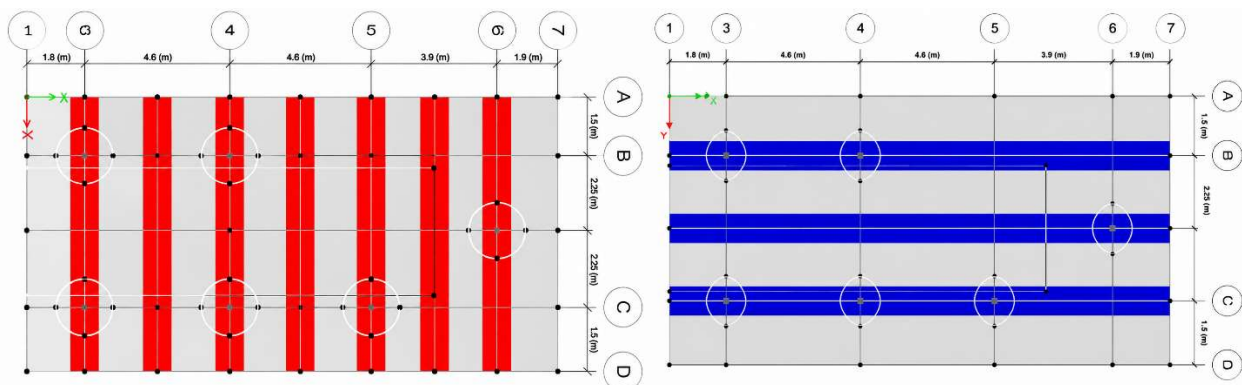
3.4. Respons dan Kapasitas Pile Cap

Perubahan posisi *replacement pile* menyebabkan *pile cap* diperbesar menjadi $16,7 \text{ m} \times 8,1 \text{ m}$. Hasil SAFE dapat dilihat pada Tabel 5 memberikan momen maksimum muka atas sebesar $2.764,76 \text{ kN}\cdot\text{m}$ pada arah x dan $2.081,12 \text{ kN}\cdot\text{m}$ pada arah y. Pada muka bawah, momen maksimum masing-masing sebesar $1.991,80 \text{ kN}\cdot\text{m}$ pada arah x dan $4.772,95 \text{ kN}\cdot\text{m}$ pada arah y. Gaya geser pengontrol sebesar $6.842,8 \text{ kN}$ dan reaksi *pile* maksimum sebesar 14.023 kN digunakan untuk kontrol geser satu arah dan punching shear. Distribusi momen yang berbeda antara muka dan arah menunjukkan bahwa perubahan geometri *pile cap* dan posisi tumpuan menghasilkan pola transfer gaya yang tidak seragam dapat dilihat pada Gambar 5.

Tabel 5. Hasil gaya dalam maksimum SAFE Software

Lokasi	M_x (kN.m)	M_y (kN.m)	V_u (kN)	P_u (kN)
Muka Atas (Tarik)	2764.76	2081.12	6842.8	14023
Muka Bawah (Tekan)	1991.80	4772.95		

Keterangan: M, Gaya Momen; V_u , Gaya Geser; P_u , Gaya Aksial Terbesar Satu Tiang



Gambar 5. Strip Desain arah x dan y output gaya dalam SAFE Software

Hasil tersebut relevan dengan Miguel-Tortola *et al.* [15], yang menunjukkan bahwa *eccentric loading* dapat meningkatkan reaksi maksimum pile dan memengaruhi kapasitas *pile cap*. Pada kasus ini, pile No. 7 yang berada pada posisi remediasi menerima reaksi aksial terbesar, sehingga penambahan pile pada lokasi baru harus dibaca sebagai perubahan sistem, bukan modifikasi lokal. Li *et al.* [14] juga menunjukkan bahwa strategi remediasi fondasi jembatan dapat melibatkan penambahan pile disertai perluasan *bearing platform* untuk mengakomodasi perubahan sistem transfer gaya.

3.5. Kontrol Lentur, Geser, dan Punching Shear Pile Cap

Seluruh pemeriksaan *pile cap* dengan rekapitulasi penulangan dan tebal *pile cap* pada Tabel 6, menghasilkan rasio *demand-to-capacity* di bawah 1,0 dapat dilihat pada Tabel 7. Kondisi paling kritis adalah lentur muka atas arah x dengan $D/C = 0,985$. Rasio lainnya meliputi lentur muka bawah arah y sekitar 0,87, *punching shear* sekitar 0,87, dan geser satu arah sekitar 0,84. Secara formal seluruh pemeriksaan memenuhi kriteria, tetapi $D/C = 0,985$ menunjukkan sisa kapasitas lentur hanya sekitar 1,5%. Karena itu, hasil tersebut lebih tepat dinyatakan memenuhi dengan *reserve* yang terbatas daripada disebut memiliki kapasitas berlebih yang besar.

Tabel 6. Rekapitulasi penulangan dan tebal *pile cap*

Lokasi Penulangan	Konfigurasi Penulangan Arah x	Konfigurasi Penulangan Arah y	Tebal Pile Cap (mm)
Muka Atas (Tarik)	D29 - 125 mm	D29 - 125 mm	2000
Muka Bawah (Tekan)	2D16 - 250 mm	2D29 - 250 mm	

Tabel 7. Rekapitulasi pemeriksaan kapasitas *pile cap*

Pemeriksaan	Demand	Capacity	D/C	Kriteria	Status
Lentur muka atas – X (kN.m)	2.764,76	2.806,16	0,985	$\leq 1,0$	Memenuhi
Lentur muka atas – Y (kN.m)	2.081,12	2.806,16	0,742	$\leq 1,0$	Memenuhi
Lentur muka bawah – X (kN.m)	1.991,80	2.410,10	0,826	$\leq 1,0$	Memenuhi
Lentur muka bawah – Y (kN.m)	4.772,95	5.457,13	0,875	$\leq 1,0$	Memenuhi
Geser satu arah (kN)	6.842,8	8.178,8	0,837	$\leq 1,0$	Memenuhi
<i>Punching shear</i> (kN)	14.023	16.036,9	0,874	$\leq 1,0$	Memenuhi

3.6. Implikasi Praktis dan Kerangka Penanganan

Hasil studi memperlihatkan bahwa penanganan tiang bor yang tidak mencapai kedalaman rencana tidak cukup dilakukan dengan mengganti pile dan memeriksa kapasitas vertikalnya. Pada Jembatan Palu 4, faktor keamanan aksial sebesar 2,425 masih relatif memadai, tetapi perpindahan lateral telah mencapai sekitar 86% batas yang digunakan, D/C lentur tiang bor mencapai 0,877, dan D/C lentur pile cap mencapai 0,985. Dengan demikian, kondisi pengontrol justru muncul pada respons lateral dan struktural. Temuan tersebut konsisten dengan Minmahdduna dan Mangidi [13], yang menunjukkan bahwa deformasi lateral dapat menjadi lebih kritis daripada penurunan kapasitas aksial, serta dengan Rizkillah *et al.* [8], yang menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi pile dapat memengaruhi komponen respons secara berbeda.

Nilai *punching shear* sekitar 0,87 juga menunjukkan bahwa reaksi pile maksimum memberikan tuntutan lokal yang cukup tinggi pada *pile cap*. Miguel-Tortola *et al.* [16] menunjukkan bahwa *punching shear* tetap menjadi mekanisme kegagalan penting pada *deep pile cap*, sedangkan Mogili dan Hwang [17] menunjukkan bahwa geometri, tulangan, dan susunan pile memengaruhi pembentukan strut dan jalur transfer gaya. Pada konteks nasional, Yusmar dan Isda [18] menunjukkan bahwa hasil desain tulangan *pile cap* dari FEM dapat berbeda dari metode konvensional dan *strut-and-tie*. Oleh karena itu, hasil SAFE perlu dibaca bersama pemeriksaan kapasitas secara eksplisit dan, untuk desain final yang kritis, dapat dilengkapi verifikasi jalur gaya dengan pendekatan *strut-and-tie*.

Rasio lentur yang mendekati 1,0 juga mengindikasikan sensitivitas terhadap perubahan input. Kenaikan reaksi pile, perubahan kekakuan spring, variasi mutu material, perubahan *effective depth*, atau pergeseran posisi pile dapat meningkatkan demand lokal. Oleh karena itu, apabila konfigurasi remediasi diterapkan pada proyek dengan ketidakpastian tanah yang lebih tinggi, analisis sensitivitas sederhana terhadap parameter utama dapat meningkatkan keandalan keputusan desain.

Berdasarkan hasil tersebut, prosedur praktis yang dapat ditarik dari studi kasus ini adalah: verifikasi kondisi as-built dan penyebab ketidakcapaian kedalaman; penetapan apakah tiang bor bermasalah masih dapat diperhitungkan; pembaruan *demand* fondasi; penentuan *replacement pile* dengan mempertimbangkan geometri dan konstruktibilitas; analisis ulang kelompok terhadap gaya aksial, lateral, momen, dan perpindahan; pemeriksaan kapasitas struktural tiang bor; kemudian redesain pile cap terhadap lentur, geser satu arah, *punching shear*, dan penulangan. Urutan ini juga konsisten dengan pendekatan *case-based strengthening* yang dilaporkan Mittal dan Samanta [3] serta remediasi sistem fondasi jembatan melalui tambahan pile dan perluasan *bearing platform* oleh Li *et al.* [14].

Konfigurasi akhir pada Jembatan Palu 4 memenuhi parameter yang dievaluasi dalam penelitian ini, tetapi hasil tersebut tidak dimaksudkan sebagai solusi universal untuk

setiap kejadian tiang bor yang tidak mencapai kedalaman rencana. Keputusan remediasi tetap harus mempertimbangkan penyebab kegagalan konstruksi, integritas as-built, karakteristik tanah, tingkat pembebanan, posisi pile, kemampuan pile cap, dan data pengujian yang tersedia. Kontribusi utama studi ini adalah menunjukkan bahwa penerimaan remediasi sebaiknya didasarkan pada evaluasi geoteknik-struktural yang terintegrasi dan dapat ditelusuri, bukan pada satu angka faktor keamanan atau satu hasil *software*.

4. Kesimpulan

Studi kasus pada fondasi *abutment* Jembatan Palu 4 menunjukkan bahwa tiang bor yang tidak mencapai kedalaman rencana perlu dievaluasi sebagai bagian dari sistem fondasi secara keseluruhan. Pada kasus ini, *pile* No. 5 yang hanya mencapai sekitar sepertiga kedalaman rencana akibat kelongsoran lubang bor secara konservatif tidak diperhitungkan sebagai elemen aktif. Konfigurasi remediasi menggunakan replacement *pile* No. 7 dan pembesaran pile cap dari 12,8 m × 8,1 m menjadi 16,7 m × 8,1 m kemudian diverifikasi terhadap respons geoteknik dan kapasitas struktural.

Hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi remediasi memenuhi seluruh kriteria yang dievaluasi. Gaya aksial maksimum sebesar 14.023 kN menghasilkan faktor keamanan 2,425, lebih besar dari nilai minimum 1,67. Perpindahan lateral maksimum sebesar 21,50 mm masih berada di bawah batas 25 mm, tetapi telah mencapai sekitar 86% dari nilai batas tersebut. Pemeriksaan struktural bored pile menghasilkan D/C sebesar 0,30 untuk aksial, 0,877 untuk lentur, dan 0,596 untuk geser, sehingga lentur menjadi parameter pengontrol pada tiang. Pada pile cap, kondisi paling kritis terjadi pada lentur muka atas arah x dengan D/C sebesar 0,985, diikuti punching shear sekitar 0,874 dan geser satu arah sekitar 0,837. Hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun kapasitas aksial memiliki margin yang relatif memadai, respons lateral dan kapasitas pile cap merupakan parameter yang lebih kritis dalam penerimaan konfigurasi remediasi.

Dengan demikian, kelayakan penanganan tiang bor yang tidak mencapai kedalaman rencana tidak seharusnya ditentukan hanya berdasarkan kapasitas aksial, tetapi perlu mempertimbangkan respons kelompok tiang, deformasi lateral, gaya dalam tiang, serta kapasitas *pile cap*. Hasil penelitian ini tidak dimaksudkan untuk menunjukkan peningkatan kinerja secara kuantitatif terhadap kondisi sebelum remediasi, melainkan untuk memverifikasi bahwa konfigurasi remediasi yang dipilih memenuhi kriteria desain yang digunakan pada studi kasus ini. Penerapan solusi serupa pada proyek lain tetap perlu mempertimbangkan penyebab ketidakcapaian kedalaman, kondisi as-built, karakteristik tanah, pembebanan, konfigurasi kelompok tiang, dan hasil verifikasi lapangan.

Daftar Pustaka

- [1] A. Mardhani and S. Jamal, "Inovasi Metode Kerja Pada Konstruksi Tiang Bor Beton di Tanah Lunak pada Penggantian Jembatan Sei Alalak," *Jurnal HPJI* (Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia), vol. 7, no. 2, pp. 107–124, 2021.
- [2] H. Yao, L. Ma, Z. Duan, and W. Guo, "Reliability analysis of the cast-in-place bored pile with different defects," *Frontiers in Built Environment*, vol. 10, 2024. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1337986>
- [3] V. Mittal and M. Samanta, "Causes of Failure and Strengthening Measures of a Pile Foundation Supporting Transmission Line Tower," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 35, no. 4, 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001592](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001592)
- [4] P.J.R. Albuquerque, J.R. Garcia, O.F. Freitas Neto, R. P. Cunha, and O.F. Santos Junior, "Behavioral Evaluation of Small-Diameter Defective and Intact Bored Piles Subjected to Axial Compression," *Soils and Rocks*, vol. 40, no. 2, pp. 109–121, 2017. <https://doi.org/10.28927/SR.402109>
- [5] O.F. Freitas Neto, R.P. Cunha, P.J.R. Albuquerque, J.R. Garcia, and O. F. Santos Junior, "Experimental and numerical analyses of a deep foundation containing a single defective pile," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 17, no. 3, 2020. <https://doi.org/10.1590/1679-78255827>
- [6] A.E. Alhashmi, M.H. El Naggar, and F. Oudah, "Performance of axially loaded defective pile groups in sand: capacity and serviceability evaluation," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 8, no. 4, 2023. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01086-w>
- [7] R.N. Wilmer and W.A. Prakoso, "Dynamic Analysis of Force Redistribution in Small Pile Groups Foundation Subjected to Accidental Lateral Loads," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 31, no. 2, pp. 131–140, 2024. <https://doi.org/10.5614/jts.2024.31.2.2>
- [8] S.N. Rizkillah, E.I. Imananto, and E.A. Yudianto, "Pemodelan Struktural Dermaga dengan Variasi Tiang Pancang Menggunakan SAP2000," *REKONSTRUKSI TADULAKO: Civil Engineering Journal on Research and Development*, vol. 7, no. 1, pp. 43–50, 2026. <https://doi.org/10.22487/renstra.v7i1.822>
- [9] S. Wicaksono, "Pengaruh Umur Beton pada Pengujian Integritas Fondasi Tiang Bor," *Jurnal Jalan Jembatan*, vol. 39, no. 1, pp. 15–20, 2022.
- [10] Z. Citra, Y. Malinda, P.D. Wibowo, R. F. Ashadi, A. Wibisono, and R. Apdeni, "Inspection of Foundation Structures with Pile Integrity Test (PIT) of Steel Tower Building," *Rekayasa Sipil*, vol. 18, no. 2, pp. 136–141, 2024. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2024.018.02.10>
- [11] S.H. Baek and J. Kim, "Investigation of P-Y Behaviors of a Cyclic Laterally Loaded Pile in Saturated Silty Sand," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, 2022.
- [12] S. Hariswaran and K. Premalatha, "Experimental Investigation on the Behavior of a Defective Pile Subject to a Lateral Load," *Soil Mechanics and*

- Foundation Engineering*, vol. 58, no. 4, pp. 339–346, 2021.
- [13] A. Minmahddun and U. Mangidi, “Evaluasi Dimensi Tiang Pancang Dermaga di Daerah Pesisir Kabupaten Kolaka dengan Mempertimbangkan Pengaruh Likuifaksi,” *REKONSTRUKSI TADULAKO: Civil Engineering Journal on Research and Development*, vol. 5, no. 2, pp. 71–78, 2024. <https://doi.org/10.22487/renstra.v5i2.686>
- [14] S. Li, G. Yao, G. Zhang, W. Wang, A. Song, W. Liu, T. Qin, G. Zhou, and L. Zhang, “Study on the Damage Mechanism of Bank Slope-Bridge Pile Foundation Interaction under Reservoir Water Level Cycle,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 12, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13127014>
- [15] L. Miguel-Tortola, P.F. Miguel, and L. Pallarés, “Strength of pile caps under eccentric loads: Experimental study and review of code provisions,” *Engineering Structures*, vol. 182, pp. 251–267, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.064>
- [16] L. Miguel-Tortola, L. Pallarés, and P.F. Miguel, “Punching shear failure in three-pile caps: Influence of the shear span-depth ratio and secondary reinforcement,” *Engineering Structures*, vol. 155, pp. 127–143, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.077>
- [17] S. Mogili and S.-J. Hwang, “Softened Strut-and-Tie Model for Shear and Flexural Strengths of Reinforced Concrete Pile Caps,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 147, no. 11, 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003141](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003141)
- [18] F. Yusmar and R.R. Isda, “Evaluation of Pile Cap Reinforcement Design Using Conventional and Finite Element with Strut and Tie Method Based on SNI 2847-2019,” *Rekayasa Sipil*, vol. 18, no. 1, pp. 18–23, 2024. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2024.018.01.4>
- [19] R. Hidayat and I. Irdhiani, “Alternatif Fondasi Tiang Pancang pada Gedung Pengendalian Penduduk dan Keluarga Berencana (P2KB) Palu,” *REKONSTRUKSI TADULAKO: Civil Engineering Journal on Research and Development*, vol. 2, no. 1, pp. 69–78, 2021. <https://doi.org/10.22487/renstra.v2i1.239>
- [20] H. Hamkah, E. Paais, G. Lewakabessy, D.D.M. Huwae, S. Latar, and S. Kakaly, “Daya Dukung Fondasi Tiang Bor pada Abutmen Jembatan Wai Rahwaen di Pulau Buru Provinsi Maluku,” *Jurnal HPJI (Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia)*, vol. 12, no. 1, pp. 67–80, 2026. <https://doi.org/10.26593/jhpji.v12i1.10034.67-80>
- [21] S. Krisnanto, M.P. Kabila, M.D. Amiruddin, S. Wijayadi, F. Adryan, and I. Ikrimah, “Analysis of the Variability of Axial Bearing Capacity of Piles in Cohesionless Soil in the Development of Meyerhof Formula,” *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 31, no. 1, pp. 77–84, 2024. <https://doi.org/10.5614/jts.2024.31.1.9>