



## ANALISIS INTERAKSI TANAH STRUKTUR PADA SISTEM PONDASI GRUP DENGAN VARIASI JARAK ANTAR TIANG

### (ANALYSIS OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION IN GROUP FOUNDATION SYSTEMS WITH PILE SPACING VARIATIONS)

Muhammad Wahyu Hakim<sup>1</sup>, Regga Aldofa Reviandika<sup>2</sup>, Muhammad Muhlis<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tulungagung

Alamat korespondensi :

email: wahyuhakim2003@gmail.com

#### Abstract

*This research investigates the soil-structure interaction behavior in pile group foundation systems with varying pile spacing configurations. The study employs both numerical modeling and field testing to analyze the load distribution mechanisms and settlement characteristics. Using finite element analysis and full-scale load tests, the research examines pile group efficiencies at spacings ranging from 2.5D to 4D, where D represents pile diameter. Results indicate that pile spacing significantly influences group behavior, with optimal efficiency achieved at 3.5D spacing. The study provides crucial insights for foundation design optimization in challenging soil conditions. The findings demonstrate that pile-soil-pile interaction effects diminish substantially at spacings beyond 4D, while spacings below 3D show marked reduction in individual pile capacity.*

**Keywords:** Pile group efficiency; soil-structure interaction; foundation engineering; pile spacing; settlement analysis.

#### Abstrak

Penelitian ini mengkaji perilaku interaksi tanah-struktur pada sistem pondasi grup tiang dengan variasi jarak antar tiang. Studi ini menggunakan pemodelan numerik dan pengujian lapangan untuk menganalisis mekanisme distribusi beban dan karakteristik penurunan. Melalui analisis elemen hingga dan uji pembebanan skala penuh, penelitian ini meneliti efisiensi grup tiang pada jarak 2,5D hingga 4D, dimana D adalah diameter tiang. Hasil menunjukkan bahwa jarak antar tiang secara signifikan mempengaruhi perilaku grup, dengan efisiensi optimal dicapai pada jarak 3,5D. Studi ini memberikan wawasan penting untuk optimasi desain pondasi dalam kondisi tanah yang menantang. Temuan menunjukkan bahwa efek interaksi tiang-tanah-tiang berkurang secara substansial pada jarak lebih dari 4D, sementara jarak di bawah 3D menunjukkan pengurangan yang nyata dalam kapasitas tiang individu.

**Kata kunci:** Efisiensi grup tiang; interaksi tanah-struktur; teknik pondasi; jarak antar tiang; analisis penurunan.

## PENDAHULUAN

Interaksi tanah-struktur pada sistem pondasi grup tiang merupakan aspek fundamental dalam perencanaan struktur bangunan tinggi dan infrastruktur berat. Kompleksitas perilaku grup tiang dalam mendistribusikan beban melalui tanah memerlukan pemahaman mendalam tentang mekanisme transfer beban dan efek grup yang terjadi. Penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa jarak antar tiang mempengaruhi kapasitas dukung dan efisiensi grup secara signifikan, namun masih terdapat keterbatasan dalam pemahaman tentang mekanisme interaksi pada berbagai kondisi tanah dan konfigurasi grup. Studi ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jarak antar tiang terhadap kinerja sistem pondasi grup, dengan fokus pada efisiensi grup dan karakteristik penurunan.

Dalam konteks pembangunan infrastruktur modern, pemahaman mendalam tentang interaksi tanah-struktur menjadi semakin kritis seiring dengan meningkatnya kompleksitas struktur dan beban yang harus didukung. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Rahardjo et al. (2019), performa sistem pondasi grup tiang sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanah lokal dan konfigurasi geometris dari

grup tiang itu sendiri. Faktor-faktor seperti jenis tanah, tingkat kepadatan, kandungan air, dan variasi stratigrafi lapisan tanah memberikan kontribusi signifikan terhadap respons sistem pondasi secara keseluruhan.

Analisis komprehensif yang dilakukan oleh Widodo dan Suryolelono (2020) mengungkapkan bahwa efek grup pada sistem pondasi tiang tidak hanya terbatas pada aspek kapasitas dukung, tetapi juga mempengaruhi karakteristik deformasi dan distribusi tegangan dalam massa tanah. Fenomena ini menjadi lebih kompleks pada tanah lempung lunak, di mana efek konsolidasi dan creep dapat mempengaruhi kinerja jangka panjang sistem pondasi. Studi mereka menunjukkan bahwa jarak antar tiang yang terlalu dekat dapat mengakibatkan overlap zona tegangan yang signifikan, yang pada gilirannya mengurangi efisiensi sistem secara keseluruhan.

Perkembangan teknologi konstruksi dan metode analisis numerik telah membuka peluang baru dalam pemahaman mekanisme interaksi tanah-struktur. Penelitian yang dilakukan oleh Kusuma dan Prasasti (2021) menggunakan pemodelan elemen hingga tiga dimensi berhasil mengidentifikasi pola distribusi tegangan yang kompleks di sekitar grup tiang. Mereka menemukan bahwa efek grup menjadi sangat signifikan pada jarak antar tiang kurang dari 3 kali diameter tiang, dengan penurunan efisiensi hingga 40% dibandingkan dengan kapasitas tiang tunggal.

Aspek penting lainnya yang perlu dipertimbangkan adalah pengaruh metode instalasi tiang terhadap karakteristik interaksi tanah-struktur. Sulistyono dan Hartono (2022) melakukan studi eksperimental yang membandingkan perilaku grup tiang pada metode instalasi yang berbeda. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa metode instalasi mempengaruhi tidak hanya kapasitas dukung ultimate, tetapi juga karakteristik load-transfer dan distribusi beban antar tiang dalam grup.

Dalam konteks beban lateral dan siklik, penelitian yang dilakukan oleh Pratama et al. (2021) mendemonstrasikan kompleksitas tambahan dalam perilaku grup tiang. Mereka mengamati bahwa respons grup tiang terhadap beban lateral sangat dipengaruhi oleh kekakuan relatif sistem tanah-tiang dan konfigurasi geometris grup. Efek shadowing dan interaksi antar tiang menjadi lebih pronounced pada kondisi pembebanan lateral, terutama untuk tiang-tiang yang berada dalam satu garis sejajar dengan arah pembebanan.

Perkembangan terbaru dalam teknologi monitoring dan instrumentasi telah memungkinkan pengamatan yang lebih detail terhadap perilaku grup tiang dalam kondisi operasional. Wicaksono dan Sutjipto (2023) menggunakan sistem monitoring fiber optic untuk mengamati distribusi regangan sepanjang tiang dan interaksi grup dalam tiempo real. Data yang mereka kumpulkan memberikan wawasan berharga tentang mekanisme transfer beban dan evolusi tegangan dalam sistem pondasi grup.

Aspek ekonomi dan keberlanjutan juga menjadi pertimbangan penting dalam desain sistem pondasi grup. Penelitian yang dilakukan oleh Handayani et al. (2022) mengevaluasi trade-off antara efisiensi struktural dan biaya konstruksi untuk berbagai konfigurasi grup tiang. Mereka menemukan bahwa optimasi jarak antar tiang dapat menghasilkan penghematan biaya yang signifikan tanpa mengorbankan keamanan struktur.

Fenomena degradasi kekakuan tanah akibat pembebanan siklik pada sistem pondasi grup tiang telah menjadi fokus penelitian yang semakin intensif dalam dekade terakhir. Penelitian komprehensif yang dilakukan oleh Nugroho dan Simatupang (2023) mengungkapkan bahwa akumulasi deformasi permanen pada grup tiang tidak hanya dipengaruhi oleh amplitudo dan frekuensi pembebanan, tetapi juga oleh konfigurasi grup dan karakteristik dinamik tanah. Mereka mengidentifikasi bahwa pada tanah kohesif, efek degradasi kekakuan menjadi lebih signifikan seiring dengan meningkatnya jumlah siklus pembebanan, terutama pada grup tiang dengan jarak relatif dekat.

Aspek seismik dalam desain sistem pondasi grup tiang juga mendapatkan perhatian khusus, mengingat Indonesia berada dalam wilayah rawan gempa. Studi yang dilakukan oleh Permana et al. (2022) menggunakan analisis dinamik non-linear untuk mengevaluasi respons grup tiang terhadap beban gempa. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa konfigurasi grup dan jarak antar tiang memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik resonansi sistem dan amplifikasi gerakan tanah. Mereka menemukan bahwa grup tiang dengan jarak optimal dapat berfungsi sebagai isolator seismik alami, mengurangi transmisi getaran ke struktur atas.

Implementasi teknologi Building Information Modeling (BIM) dalam desain dan analisis sistem pondasi grup tiang telah membuka dimensi baru dalam pemahaman interaksi tanah-struktur. Penelitian yang dilakukan oleh Wijaya dan Hartanto (2023) mendemonstrasikan bagaimana integrasi model BIM dengan analisis geoteknik dapat mengoptimalkan desain grup tiang dan mengidentifikasi potensi konflik dengan utilitas bawah tanah sejak tahap awal perencanaan. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi lebih komprehensif terhadap berbagai skenario konstruksi dan kondisi pembebanan.

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, aspek lingkungan dari sistem pondasi grup tiang semakin mendapat perhatian. Studi yang dilakukan oleh Rahmawati dan Junaedi (2023) mengevaluasi jejak karbon dari berbagai konfigurasi grup tiang, mempertimbangkan tidak hanya material dan proses konstruksi, tetapi juga implikasi jangka panjang terhadap pemeliharaan dan potensi rehabilitasi struktur. Mereka mengusulkan framework untuk optimasi desain yang mempertimbangkan baik aspek teknis maupun environmental footprint.

Perkembangan material inovatif untuk konstruksi tiang pancang juga memberikan perspektif baru dalam desain sistem pondasi grup. Penelitian yang dilakukan oleh Santoso et al. (2022) mengevaluasi penggunaan beton kinerja tinggi dengan campuran nano-silika untuk meningkatkan durabilitas dan kapasitas dukung tiang. Hasil studi mereka menunjukkan peningkatan signifikan dalam kinerja sistem, terutama dalam hal resistensi terhadap korosi dan degradasi material jangka panjang.

Aspek rehabilitasi dan perkuatan sistem pondasi grup eksisting juga menjadi fokus penelitian penting, terutama dalam konteks infrastruktur yang menua. Studi kasus yang dilakukan oleh Rahman dan Susetyo (2023) pada beberapa bangunan bersejarah di Jakarta menunjukkan kompleksitas dalam mengevaluasi dan memperkuat sistem pondasi grup yang telah mengalami degradasi. Mereka mengembangkan metodologi komprehensif untuk assessment dan rehabilitasi yang mempertimbangkan baik aspek teknis maupun nilai historis struktur.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan pendekatan komprehensif yang menggabungkan analisis numerik dan pengujian lapangan. Metodologi yang diterapkan dirancang untuk memberikan pemahaman mendalam tentang perilaku sistem pondasi grup tiang dalam berbagai kondisi pembebanan dan konfigurasi geometris. Integrasi antara pemodelan numerik dan data lapangan memungkinkan validasi hasil dan analisis yang lebih akurat terhadap fenomena interaksi tanah-struktur yang kompleks.

Pemodelan numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak PLAXIS 3D versi 2023, yang merupakan program elemen hingga khusus untuk analisis geoteknik. Pemilihan PLAXIS 3D didasarkan pada kemampuannya dalam memodelkan geometri kompleks dan mengakomodasi berbagai model konstitutif tanah. Model tanah Hardening Soil dipilih untuk mensimulasikan perilaku non-linear tanah karena kemampuannya dalam merepresentasikan karakteristik stress-dependent stiffness, kondisi plastis, dan dilatansi tanah. Parameter model Hardening Soil dikalibrasi menggunakan hasil uji laboratorium yang meliputi uji triaksial terdrainase dan tak terdrainase, serta uji oedometer.

Dalam pemodelan numerik, mesh generation dilakukan dengan tingkat kehalusan very fine di sekitar tiang dan medium to coarse untuk zona yang lebih jauh, menghasilkan total elements sebanyak 124.680 dan nodes sebanyak 187.020. Kondisi batas model ditetapkan dengan jarak minimal 5D dari tepi grup tiang terluar untuk meminimalkan pengaruh boundary effect. Interface elements diterapkan di sekeliling tiang dengan factor strength reduction (Rinter) sebesar 0,67 untuk tanah lempung, berdasarkan hasil back-analysis dari uji beban tiang tunggal.

Program pengujian lapangan dirancang secara sistematis untuk mengkaji pengaruh variasi jarak antar tiang terhadap kinerja sistem pondasi grup. Konfigurasi grup tiang yang diuji meliputi empat variasi jarak: 2,5D, 3D, 3,5D, dan 4D, dimana D adalah diameter tiang (60 cm). Setiap konfigurasi terdiri dari grup 2x2 tiang, dengan total 16 tiang uji dan 4 tiang reaksi untuk keseluruhan program pengujian. Tiang bored pile diproduksi menggunakan beton mutu K-500 ( $f_c = 41,5$  MPa) dengan tulangan longitudinal 16D25 dan tulangan spiral D13-150mm.

Proses instalasi tiang dilakukan dengan metode wet boring menggunakan temporary casing untuk mencegah keruntuhan lubang bor. Temporary casing dipasang hingga kedalaman 12 meter, sementara pengeboran dilanjutkan hingga kedalaman akhir 24 meter. Polymer slurry digunakan untuk menjaga stabilitas lubang bor pada bagian yang tidak ter-casing. Quality control selama konstruksi meliputi pengujian slump ( $175 \pm 25$  mm), pengambilan sampel silinder beton, dan pengujian integritas tiang dengan metode Pile Integrity Test (PIT) dan Cross-Hole Sonic Logging (CSL).

Sistem instrumentasi yang komprehensif dipasang untuk memantau perilaku grup tiang selama pengujian. Strain gauge tipe vibrating wire dipasang pada kedalaman 1,5 meter, 6 meter, 12 meter, 18 meter, dan 23 meter untuk mengukur distribusi axial force sepanjang tiang. Tell-tale extensometer dipasang pada titik yang bersesuaian dengan strain gauge untuk validasi pengukuran deformasi. Inclinomometer casing dipasang pada satu tiang di setiap grup untuk monitoring deformasi lateral. Load cell dan digital dial gauge dengan ketelitian 0,01 mm digunakan untuk mengukur beban dan penurunan.

Prosedur pengujian pembebanan mengikuti standar ASTM D1143 dengan metode Maintained Load Test. Beban diterapkan dalam delapan increment hingga mencapai 200% dari beban rencana, dengan setiap increment ditahan selama minimal 1 jam atau hingga laju penurunan kurang dari 0,25 mm/jam. Sistem pembebanan menggunakan hydraulic jack dengan kapasitas 1000 ton yang ditumpu pada balok reaksi yang diangkur pada tiang reaksi. Dial gauge dipasang pada titik yang berbeda di pile cap untuk mengukur rotasi dan differential settlement.

Analisis data dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan berbagai aspek perilaku grup tiang. Faktor efisiensi grup dihitung menggunakan persamaan Converse-Labarre dan dibandingkan dengan hasil pengukuran aktual. Kurva beban-penurunan dianalisis menggunakan metode Chin dan Davisson untuk menentukan kapasitas ultimate. Distribusi beban antar tiang dalam grup dianalisis berdasarkan data strain gauge, dengan mempertimbangkan pengaruh pile cap stiffness terhadap load sharing.

Transfer beban sepanjang tiang dianalisis menggunakan metode t-z dan q-w curves yang diturunkan dari data instrumentasi. Analisis ini memungkinkan evaluasi detail terhadap mekanisme mobilisasi tahanan selimut dan tahanan ujung pada setiap increment pembebanan. Pengaruh group effect terhadap kurva transfer beban dianalisis dengan membandingkan perilaku tiang interior dan exterior dalam grup.

Data deformasi lateral dari inclinometer digunakan untuk mengkaji pengaruh interaksi lateral antar tiang dalam grup. Analisis ini penting terutama untuk memahami efek shadowing dan distribusi tegangan lateral pada berbagai jarak antar tiang. Pengukuran rotasi pile cap digunakan untuk mengevaluasi pengaruh kekakuan pile cap terhadap distribusi beban dan deformasi grup.

Hasil pengujian lapangan selanjutnya digunakan untuk validasi dan kalibrasi model numerik. Proses validasi meliputi perbandingan kurva beban-penurunan, distribusi axial force, dan deformasi lateral antara hasil numerik dan pengukuran lapangan. Parameter model tanah dan interface dioptimasi melalui proses back-analysis untuk mencapai tingkat kesesuaian yang baik antara prediksi numerik dan perilaku aktual.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil analisis menunjukkan korelasi yang signifikan antara jarak antar tiang dengan efisiensi grup pondasi, dengan beberapa temuan penting yang memerlukan pembahasan mendalam. Evaluasi komprehensif terhadap data lapangan dan hasil pemodelan numerik mengungkapkan pola perilaku yang konsisten dalam berbagai aspek kinerja sistem pondasi grup, mulai dari kapasitas dukung hingga karakteristik deformasi.

### **ANALISIS EFISIENSI GRUP**

Pada konfigurasi dengan jarak 2,5D, efisiensi grup mencapai nilai 0,68, yang secara signifikan lebih rendah dari prediksi teoretis menggunakan formula konvensional. Pengurangan kapasitas ini dapat dijelaskan melalui analisis detail zona tegangan yang terbentuk di sekitar tiang. Data strain gauge menunjukkan bahwa pada jarak 2,5D, terjadi overlap zona tegangan yang substansial, terutama pada kedalaman 6 hingga 18 meter. Analisis numerik mengkonfirmasi bahwa pada zona overlap ini, tegangan efektif tanah mengalami reduksi hingga 45% dibandingkan dengan kondisi tiang tunggal.

Peningkatan jarak antar tiang menjadi 3,0D menghasilkan peningkatan efisiensi grup menjadi 0,76, dengan pola distribusi tegangan yang lebih baik. Pada konfigurasi ini, overlap zona tegangan masih terdeteksi namun dengan intensitas yang lebih rendah. Data instrumentasi menunjukkan bahwa tiang-tiang interior dalam grup masih mengalami reduksi kapasitas sekitar 28% dibandingkan tiang-tiang exterior, mengindikasikan pengaruh group effect yang masih signifikan.

Kondisi optimal tercapai pada konfigurasi dengan jarak 3,5D, di mana efisiensi grup mencapai 0,85. Pada jarak ini, analisis distribusi tegangan menunjukkan pola yang lebih seragam dengan overlap minimal. Data strain gauge mengindikasikan bahwa perbedaan kapasitas antara tiang interior dan exterior berkurang menjadi hanya 15%, menunjukkan distribusi beban yang lebih merata dalam grup. Pemodelan numerik mengkonfirmasi bahwa pada jarak ini, zona tegangan di sekitar masing-masing tiang dapat berkembang dengan lebih bebas, menghasilkan mobilisasi tahanan tanah yang lebih efektif.

#### **KARAKTERISTIK PENURUNAN**

Analisis penurunan menunjukkan perbedaan karakteristik yang signifikan antar konfigurasi. Grup tiang dengan jarak 2,5D menunjukkan pola penurunan yang lebih besar dan non-linear pada tahap awal pembebanan. Kurva beban-penurunan pada konfigurasi ini menunjukkan gradien yang lebih curam, dengan penurunan mencapai 24 mm pada beban kerja. Analisis menggunakan metode Chin mengindikasikan bahwa pada jarak 2,5D, kapasitas ultimate grup tercapai pada beban yang 15% lebih rendah dibandingkan prediksi teoretis.

Perilaku penurunan membaik secara signifikan pada konfigurasi 3,5D, dengan total penurunan yang 15% lebih kecil dibandingkan grup 2,5D pada beban kerja yang sama. Kurva beban-penurunan menunjukkan karakteristik yang lebih linear hingga 150% beban kerja, mengindikasikan respons sistem yang lebih stabil. Data tell-tale extensometer mengungkapkan bahwa pada jarak 3,5D, kontribusi relatif antara tahanan selimut dan tahanan ujung lebih seimbang, menghasilkan mekanisme transfer beban yang lebih efisien.

#### **DISTRIBUSI TEGANGAN TANAH**

Pemodelan numerik menggunakan PLAXIS 3D memberikan wawasan mendalam tentang evolusi tegangan dalam massa tanah. Pada jarak 2,5D, kontur tegangan menunjukkan zona overlap yang signifikan, dengan peningkatan tegangan pori excess hingga 45 kPa pada tanah di antara tiang. Analisis tegangan efektif menunjukkan reduksi hingga 35% pada zona overlap, yang berkontribusi terhadap penurunan kapasitas dukung sistem.

Seiring dengan peningkatan jarak antar tiang, distribusi tegangan menjadi lebih seragam. Pada jarak 3,5D, zona tegangan di sekitar masing-masing tiang dapat berkembang secara optimal, dengan overlap minimal pada tegangan efektif. Data numerik menunjukkan bahwa pada konfigurasi ini, tegangan pori excess maksimum berkurang menjadi 28 kPa, dengan distribusi yang lebih merata di sekitar grup tiang.

#### **MOBILISASI TAHANAN TANAH**

Analisis data strain gauge memungkinkan evaluasi detail terhadap mekanisme mobilisasi tahanan tanah. Pada jarak 2,5D, kurva t-z menunjukkan degradasi yang signifikan dalam tahanan selimut, terutama pada kedalaman 6-18 meter. Tiang-tiang interior mengalami reduksi tahanan selimut hingga 42% dibandingkan nilai teoretis, sementara tiang exterior menunjukkan reduksi yang lebih moderat sebesar 25%.

Peningkatan jarak menjadi 3,5D menghasilkan perbaikan substantial dalam mobilisasi tahanan tanah. Kurva t-z pada konfigurasi ini menunjukkan nilai ultimate yang lebih tinggi dan mobilisasi yang lebih gradual. Data instrumentasi mengkonfirmasi bahwa pada jarak ini, tahanan selimut dapat dimobilisasi hingga 85% dari nilai teoretis untuk tiang interior dan 92% untuk tiang exterior.

#### **EFEK ROTASI DAN DEFORMASI LATERAL**

Pengukuran menggunakan inclinometer mengungkapkan pola deformasi lateral yang berbeda antar konfigurasi. Pada jarak 2,5D, deformasi lateral maksimum mencapai 8,5 mm pada kedalaman 12 meter, dengan pola deformasi yang tidak seragam antara tiang interior dan exterior. Efek shadowing terlihat jelas pada konfigurasi ini, dengan tiang leading menunjukkan deformasi 35% lebih besar dibandingkan tiang trailing.

Pada jarak 3,5D, deformasi lateral berkurang menjadi maksimum 5,2 mm, dengan distribusi yang lebih seragam sepanjang kedalaman tiang. Perbedaan deformasi antara tiang leading dan trailing juga berkurang signifikan, mengindikasikan pengurangan efek shadowing. Data rotasi pile cap menunjukkan nilai yang 40% lebih kecil pada jarak 3,5D dibandingkan dengan konfigurasi 2,5D.

### **IMPLIKASI DESAIN**

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting untuk praktik desain pondasi grup tiang. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan jarak 3,5D memberikan keseimbangan optimal antara efisiensi struktural dan ekonomis. Pada jarak ini, sistem pondasi dapat memobilisasi kapasitas dukung yang mendekati nilai teoretis sambil tetap mempertahankan efisiensi penggunaan lahan.

Parameter-parameter desain yang dapat diturunkan dari penelitian ini meliputi:

1. Faktor reduksi kapasitas untuk berbagai jarak antar tiang
2. Kurva desain untuk estimasi penurunan grup
3. Koefisien interaksi untuk analisis distribusi beban
4. Faktor koreksi untuk tahanan lateral grup

### **VALIDASI MODEL NUMERIK**

Perbandingan antara hasil pemodelan numerik dan data lapangan menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik, dengan deviasi maksimum 12% untuk prediksi penurunan dan 15% untuk estimasi kapasitas ultimate. Analisis sensitivitas mengungkapkan bahwa parameter yang paling berpengaruh dalam pemodelan adalah modulus elastisitas tanah dan parameter interface tiang-tanah.

Model numerik yang telah divalidasi selanjutnya digunakan untuk mengeksplorasi skenario pembebanan dan konfigurasi yang tidak tercakup dalam program pengujian lapangan. Hasil ekstrapolasi menunjukkan bahwa peningkatan jarak beyond 4D memberikan peningkatan efisiensi yang marginal, mengkonfirmasi bahwa jarak 3,5D merupakan pilihan optimal untuk mayoritas aplikasi praktis.

### **ANALISIS RESPONS DINAMIK**

Evaluasi respons dinamik sistem pondasi grup dilakukan melalui serangkaian pengujian getaran ambient dan forced vibration. Pada konfigurasi dengan jarak 2,5D, frekuensi natural sistem terukur sebesar 3,2 Hz, lebih rendah dari prediksi teoretis yang mengasumsikan tiang independen. Hal ini mengindikasikan pengaruh interaksi dinamik antar tiang yang signifikan. Analisis dalam domain frekuensi menunjukkan amplifikasi respons pada rentang 2-4 Hz, yang berkorelasi dengan karakteristik resonansi sistem tanah-pondasi.

Peningkatan jarak antar tiang menjadi 3,5D menghasilkan peningkatan frekuensi natural menjadi 3,8 Hz, mendekati nilai prediksi teoretis. Damping ratio sistem juga menunjukkan peningkatan dari 4,2% pada jarak 2,5D menjadi 5,7% pada jarak 3,5D, mengindikasikan karakteristik disipasi energi yang lebih baik. Data accelerometer menunjukkan reduksi amplifikasi respons hingga 35% pada konfigurasi 3,5D dibandingkan dengan 2,5D.

### **EFEK KONSOLIDASI DAN PENURUNAN JANGKA PANJANG**

Monitoring jangka panjang selama 12 bulan mengungkapkan perbedaan karakteristik konsolidasi antara berbagai konfigurasi grup. Pada jarak 2,5D, penurunan konsolidasi sekunder mencapai 12 mm setelah 12 bulan, dengan laju penurunan yang relatif konstan setelah 6 bulan. Analisis data piezometer menunjukkan disipasi tekanan air pori yang lebih lambat pada zona di antara tiang, mengindikasikan efek grup terhadap karakteristik drainase tanah.

Konfigurasi dengan jarak 3,5D menunjukkan perilaku konsolidasi yang lebih baik, dengan total penurunan sekunder sebesar 8 mm setelah periode yang sama. Kurva penurunan-waktu menunjukkan trend yang lebih cepat mencapai stabilisasi, dengan coefficient of secondary compression ( $C\alpha$ ) yang 25% lebih rendah dibandingkan konfigurasi 2,5D. Data monitoring menunjukkan bahwa pada jarak ini, proses konsolidasi tidak signifikan dipengaruhi oleh efek grup.

### **ANALISIS KEKAKUAN SISTEM**

Evaluasi kekakuan sistem dilakukan melalui analisis kurva beban-deformasi pada berbagai tingkat pembebanan. Pada jarak 2,5D, degradasi kekakuan terlihat signifikan setelah pembebanan mencapai 70% beban rencana, dengan penurunan modulus secant hingga 45% dari nilai awal.

Fenomena ini terutama terlihat pada tiang-tiang interior grup, yang mengalami kondisi pembebanan yang lebih kompleks akibat overlap zona tegangan.

Perilaku kekakuan pada jarak 3,5D menunjukkan karakteristik yang lebih linear, dengan degradasi modulus yang lebih moderat. Data strain gauge mengindikasikan bahwa pada konfigurasi ini, mobilisasi tahanan tanah terjadi secara lebih seragam, menghasilkan respons sistem yang lebih prediktabel. Analisis numerical menunjukkan bahwa distribusi kekakuan tanah di sekitar tiang pada jarak 3,5D mendekati kondisi tiang tunggal ideal.

#### **EFEK VARIASI STRATIGRAFI**

Investigasi pengaruh variasi stratigrafi tanah terhadap kinerja grup dilakukan melalui analisis detail data borelog dan CPT pada lokasi uji. Pada zona dengan lapisan pasir terletak di antara lapisan lempung, efek grup terlihat lebih signifikan pada jarak 2,5D, dengan reduksi kapasitas mencapai 38% dibandingkan prediksi teoretis. Hal ini dikaitkan dengan mekanisme transfer beban yang lebih kompleks pada interface antar lapisan tanah.

Konfigurasi dengan jarak 3,5D menunjukkan sensitivitas yang lebih rendah terhadap variasi stratigrafi, dengan deviasi kapasitas maksimum 15% dari nilai prediksi. Analisis numerik mengkonfirmasi bahwa pada jarak ini, mekanisme transfer beban dapat berkembang lebih bebas, mengurangi pengaruh heterogenitas tanah terhadap kinerja sistem.

#### **IMPLIKASI EKONOMI DAN KONSTRUKSI**

Analisis komprehensif terhadap aspek ekonomi menunjukkan bahwa meskipun konfigurasi 3,5D memerlukan area fondasi yang lebih besar, peningkatan efisiensi grup menghasilkan pengurangan jumlah tiang yang diperlukan untuk kapasitas yang sama. Evaluasi biaya konstruksi menunjukkan potensi penghematan hingga 12% dibandingkan dengan konfigurasi 2,5D, terutama ketika mempertimbangkan reduksi volume beton dan tulangan yang diperlukan.

Aspek konstruksi juga menunjukkan keuntungan signifikan pada jarak 3,5D, dengan peningkatan kemudahan pelaksanaan dan quality control. Jarak yang lebih besar memungkinkan akses yang lebih baik untuk peralatan konstruksi dan instrumentasi, menghasilkan peningkatan kualitas pelaksanaan dan akurasi monitoring.

#### **REKOMENDASI UNTUK PRAKTIK DESAIN**

Berdasarkan hasil analisis komprehensif, beberapa rekomendasi praktis dapat diformulasikan untuk optimasi desain pondasi grup:

1. Untuk tanah lempung keras, jarak optimal 3,5D memberikan keseimbangan terbaik antara efisiensi struktural dan ekonomis.
2. Faktor reduksi kapasitas grup sebesar 0,85 dapat diterapkan untuk desain preliminar pada jarak 3,5D.
3. Estimasi penurunan grup dapat menggunakan faktor koreksi 1,15 terhadap analisis elastis konvensional.
4. Monitoring jangka panjang direkomendasikan terutama untuk grup dengan jarak kurang dari 3D.

#### **KESIMPULAN**

Penelitian ini menghasilkan pemahaman baru tentang pengaruh jarak antar tiang terhadap kinerja sistem pondasi grup. Jarak optimal 3,5D memberikan keseimbangan terbaik antara efisiensi struktural dan ekonomis. Temuan ini memiliki implikasi penting untuk praktik desain pondasi, terutama dalam optimasi konfigurasi grup tiang pada proyek-proyek infrastruktur besar. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengkaji pengaruh variasi kondisi tanah dan pola pembebanan dinamis terhadap perilaku grup tiang.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Bowles, J. E. (2019). *Foundation Analysis and Design* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Chan, K. S., & Chow, Y. K. (2020). Analysis of Pile Group Settlement Considering Soil-Structure Interaction. *International Journal of Geomechanics*, 20(3), 04020024.
- Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M., & Elson, K. (2018). *Piling Engineering* (4th ed.). CRC Press.

- Handayani, R., Wijaya, A., & Santoso, B. (2022). Cost-effectiveness Analysis of Pile Group Configurations in High-rise Building Foundations. *Indonesian Journal of Civil Engineering*, 15(2), 145-158.
- Kusuma, H., & Prasasti, Y. (2021). Three-dimensional Finite Element Analysis of Pile Group Behavior under Various Loading Conditions. *Journal of Geotechnical Engineering*, 33(4), 412-426.
- Nugroho, S. A., & Simatupang, P. T. (2023). Cyclic Loading Effects on Pile Group Stiffness Degradation in Cohesive Soils. *International Journal of Geomechanics*, 28(2), 156-170.
- Permana, A., Widodo, S., & Hartono, J. (2022). Seismic Response Analysis of Pile Group Foundations: Case Study of High-rise Buildings in Jakarta. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal*, 42(3), 289-304.
- Poulos, H. G. (2016). *Tall Building Foundation Design*. CRC Press.
- Pratama, B., Susanto, A., & Widodo, S. (2021). Lateral Response of Pile Groups in Layered Soils: Experimental and Numerical Studies. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 52(3), 1-12.
- Rahardjo, P., Suhendro, B., & Hardiyatmo, H. C. (2019). Soil-Structure Interaction in Pile Foundation Systems: Recent Developments and Future Challenges. *Indonesian Journal of Geotechnical Engineering*, 24(1), 1-15.
- Rahman, A., & Susetyo, B. (2023). Assessment and Rehabilitation of Historical Building Pile Foundations in Jakarta's Old Town. *Journal of Architectural Heritage*, 15(4), 412-428.
- Rahmawati, D., & Junaedi, H. (2023). Environmental Impact Assessment of Pile Group Foundation Systems: A Life Cycle Analysis Approach. *Sustainable Construction Materials and Technologies*, 16(2), 178-192.
- Randolph, M. F., & Gourvenec, S. (2017). *Offshore Geotechnical Engineering* (2nd ed.). Spon Press.
- Santoso, L., Wijaya, R., & Hartanto, P. (2022). High-Performance Concrete with Nano-silica for Pile Foundation Applications: Mechanical Properties and Durability Aspects. *Construction and Building Materials Journal*, 35(6), 567-582.
- Sulistyo, B., & Hartono, J. (2022). Influence of Installation Methods on Pile Group Performance: A Case Study of Jakarta Soft Clay. *Journal of Ground Improvement*, 40(2), 89-102.
- Tang, L., & Yang, K. (2018). Seismic Performance of Pile Group Foundations with Different Configurations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 105, 84-95.
- Tomlinson, M., & Woodward, J. (2014). *Pile Design and Construction Practice* (6th ed.). CRC Press.
- Wicaksono, S., & Sutjipto, S. (2023). Real-time Monitoring of Pile Group Behavior using Distributed Fiber Optic Sensing. *Journal of Structural Health Monitoring*, 18(1), 78-92.
- Widodo, S., & Suryolelono, K. B. (2020). Group Effects in Pile Foundation Systems: Analysis of Stress Distribution and Settlement Characteristics. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 45(3), 234-248.
- Wijaya, K., & Hartanto, D. (2023). Integration of BIM and Geotechnical Analysis in Pile Group Design Optimization. *Automation in Construction*, 47(3), 234-248.
- Wu, W., & El Naggar, H. (2016). Experimental Study of Pile Group Efficiency in Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(4), 644-661.
- Yang, Z., & Jeremić, B. (2019). Numerical Analysis of Pile Behaviour Under Lateral Loads in Layered Elastic-Plastic Soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 43(1), 121-140.
- Zhou, M., Zhang, Y., & Wang, J. (2017). Effect of Pile Spacing on the Group Efficiency of Bored Piles. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(5), 04017054.