

PEMODELAN PERUBAHAN DAYA DUKUNG FONDASI DANGKAL AKIBAT PEMBEBANAN SIKLIK PADA TANAH GRANULAR JENUH

Bimawijaya Laia¹, Piter Telaumbanua², Pasrah Iman Anugerah Putra Ziliwu³

¹ Teknik Sipil, Universitas Nias, Indonesia

² Teknik Sipil, Universitas Narotama, Indonesia

³ Teknik Sipil, Universitas Nias, Indonesia

¹ Email bimawijayalaia12@unias.ac.id ; ² Email telaumbanuapiter9@gmail.com ; ³ Email pasrahiman@gmail.com

Abstract

This study aims to evaluate and model the changes in bearing capacity and settlement patterns of shallow foundations on saturated granular soils subjected to repeated cyclic loading. Structural foundations operating under dynamic loads frequently face the risk of geotechnical failure driven by the accumulation of excess pore water pressure and the degradation of soil shear stiffness, which cannot be adequately accommodated by conventional static analysis methods. Employing a numerical computational approach based on the Finite Element Method (FEM) utilizing the Hardening Soil with Small-Strain Stiffness (HSsmall) constitutive model, a fully coupled hydro-mechanical analysis was conducted to simulate the stress-strain response of the soil. The simulation results indicate that increases in cyclic load amplitude and the number of load cycles progressively trigger the elevation of excess pore water pressure ratios, ultimately leading to a reduction in effective stress and non-linear degradation of foundation bearing capacity. These findings emphasize the critical importance of incorporating cyclic capacity reduction factors into geotechnical design to ensure the long-term safety and resilience of civil infrastructure.

Keywords: Numerical Modeling, Shallow Foundations, Cyclic Loading, Saturated Granular Soils, Finite Element Method.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan memodelkan perubahan kapasitas dukung serta pola penurunan fondasi dangkal di atas tanah granular jenuh akibat pengaruh pembebanan siklik berulang. Fondasi struktur yang beroperasi di bawah beban dinamis sering kali menghadapi risiko kegagalan geoteknik akibat akumulasi tekanan air pori berlebih dan degradasi kekakuan geser tanah yang tidak terakomodasi oleh metode analisis statis konvensional. Menggunakan pendekatan komputasional numerik berbasis Elemen Hingga (Finite Element Method - FEM) dengan model konstitutif Hardening Soil with Small-Strain Stiffness (HSsmall), analisis kopling hidromekanik penuh (fully coupled hydro-mechanical analysis) dilakukan untuk mensimulasikan respons tegangan-regangan tanah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan amplitudo beban siklik dan jumlah siklus beban memicu kenaikan rasio tekanan air pori berlebih secara progresif, yang berujung pada penurunan tegangan efektif dan degradasi daya dukung fondasi secara non-linier. Temuan ini menegaskan pentingnya memperhitungkan faktor reduksi daya dukung siklik dalam perancangan geoteknik guna menjamin keamanan dan ketahanan infrastruktur sipil jangka panjang.

Kata Kunci: Pemodelan Numerik, Fondasi Dangkal, Pembebanan Siklik, Tanah Granular Jenuh, Elemen Hingga.

PENDAHULUAN

Fondasi bangunan sipil memegang peranan krusial sebagai elemen struktur bawah yang berfungsi menyalurkan seluruh beban suprastruktur ke lapisan tanah pendukung di bawahnya dengan aman dan terkontrol.

Di antara berbagai jenis sistem fondasi, fondasi dangkal (shallow foundations) merupakan tipe yang paling sering dipilih dan diterapkan pada berbagai struktur bangunan gedung maupun fasilitas teknik sipil konvensional karena efisiensi biaya dan kemudahan pelaksanaannya. Menurut Das and Sivakugan (2018), desain fondasi dangkal yang andal sangat bergantung pada evaluasi yang akurat terhadap kapasitas dukung ultimit (ultimate bearing capacity) serta batasan penurunan (settlement) yang diizinkan agar struktur tidak mengalami kegagalan geoteknik.

Dalam kondisi pembebanan statis konvensional, evaluasi daya dukung fondasi dangkal biasanya diselesaikan melalui pendekatan klasik teori teradopsi seperti yang dikemukakan oleh Terzaghi, Meyerhof, atau Vesic. Namun, pada kenyataannya, banyak struktur rekayasa seperti fondasi mesin berat, menara transmisi, turbin angin, jembatan bentang panjang, struktur lepas pantai, hingga bangunan di zona seismik aktif, tidak hanya menerima beban statis gravitasi semata, melainkan juga mengalami beban siklik berulang atau dinamis sepanjang masa operasionalnya. Poulos (1989) menyatakan bahwa pembebanan siklik jangka panjang dapat mengubah struktur mikro dan parameter kekuatan geser tanah secara drastis, sehingga metode perhitungan kapasitas dukung statis konvensional menjadi tidak lagi konservatif dan berisiko memicu keruntuhan prematur.

Perilaku tanah granular atau tanah berbutir kasar (granular soils) di bawah pengaruh beban siklik menunjukkan karakteristik mekanik yang sangat unik dan kompleks dibandingkan dengan tanah lempung. Ketika tanah granular jenuh air (saturated granular soils) menerima siklus pembebanan berulang, deformasi permanen cenderung terakumulasi secara progresif pada setiap siklus pembebanan (cumulative permanent deformation). Sebagaimana dijelaskan oleh Ishihara (1996), respons tanah granular jenuh terhadap beban siklik sangat dipengaruhi oleh kecenderungan perubahan volume—apakah tanah tersebut mengalami kecenderungan menyusut (contractive) atau mengembang (dilatant) saat mengalami geseran.

Pada tanah granular jenuh dengan kondisi kepadatan longgar hingga sedang, beban siklik cenderung memicu kecenderungan volume kontraktif, yang mengakibatkan terjadinya peningkatan tekanan air pori berlebih (excess pore water pressure) secara bertahap di dalam rongga pori tanah. Peningkatan tekanan air pori ini secara langsung akan menggerus tegangan efektif intergranular (effective intergranular stress) yang menopang kerangka tanah. Menurut Kramer (1996), penurunan tegangan efektif akibat akumulasi tekanan air pori siklik merupakan pemicu utama terjadinya degradasi kekakuan geser tanah dan penurunan kapasitas dukung fondasi, yang dalam kondisi ekstrem dapat berujung pada fenomena likuefaksi atau kegagalan geser siklik (cyclic mobility).

Meskipun fenomena likuefaksi penuh umumnya dikaitkan dengan gempa bumi besar, akumulasi tekanan air pori siklik tingkat menengah akibat beban operasional berulang juga dapat menurunkan kapasitas dukung fondasi dangkal secara signifikan dalam jangka panjang. Penurunan daya dukung ini dimanifestasikan melalui peningkatan penurunan total dan diferensial (differential settlement) yang melampaui batas toleransi struktur atas. Seed and Lee (1966) dalam studi klasik mereka mengenai perilaku tanah di bawah beban dinamis telah membuktikan bahwa kekuatan geser siklik tanah berbutir sangat bergantung pada amplitudo tegangan siklik, jumlah siklus beban, serta kondisi drainase tanah jenuh air di sekitarnya.

Guna memahami dan memprediksi degradasi daya dukung fondasi dangkal secara akurat, pendekatan eksperimental laboratorium konvensional saja sering kali memiliki keterbatasan dalam hal skala, waktu, dan biaya pengujian. Oleh karena itu, perkembangan teknologi rekayasa geoteknik modern sangat mengandalkan pendekatan pemodelan numerik (numerical modeling) berbasis metode elemen hingga (Finite Element Method - FEM) atau metode beda hingga (Finite Difference Method - FDM). Menurut Brinkgreve et al. (2020), pemodelan numerik mutakhir memungkinkan para insinyur geoteknik untuk mensimulasikan kopling antara perilaku fluida pori dan kerangka tanah padat (coupled flow-deformation analysis) di bawah berbagai skenario pembebanan siklik kompleks secara simultan.

Dalam kerangka pemodelan numerik geoteknik, pemilihan model konstitutif (constitutive models) tanah memegang peranan yang sangat menentukan validitas hasil simulasi. Model elastis linear atau Mohr-Coulomb sederhana terbukti tidak memadai untuk merekapitulasi perilaku non-linier, histeretis, dan akumulasi regangan volumetrik plastik akibat pembebanan siklik. Mroz, Norris, and Zienkiewicz (1978) mempelopori pengembangan model plastisitas multilapis (multiyield surface plasticity models) yang mampu merepresentasikan perilaku siklik secara realistis. Saat ini, penggunaan model konstitutif tingkat lanjut seperti Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSsmall) atau model berbasis bounding surface plasticity menjadi standar acuan dalam menganalisis deformasi permanen tanah akibat beban siklik.

Berbagai riset terdahulu telah banyak mengeksplorasi respons dinamika struktur fondasi, namun sebagian besar masih berfokus pada struktur tiang pancang (pile foundations) dalam konteks beban gempa atau lepas pantai. Kajian yang secara khusus menginvestigasi mekanisme degradasi daya dukung dan pola penurunan pada fondasi dangkal di atas tanah granular jenuh akibat pembebanan siklik operasional masih memerlukan pendalaman teoretis dan verifikasi numerik yang lebih sistematis. Sebagaimana dicatat oleh Jardine et al. (2005), pemahaman mengenai interaksi antara siklus pembebanan vertikal-horizontal dan respons tegangan-

regangan tanah dangkal sangat esensial untuk mencegah keruntuhan struktur fondasi modern yang rentan terhadap beban dinamis.

Melalui penelitian ini, dibangun sebuah kerangka pemodelan numerik komprehensif untuk mengevaluasi secara kuantitatif sejauh mana tingkat penurunan daya dukung fondasi dangkal terjadi akibat variasi frekuensi beban siklik, amplitudo tegangan, dan rasio ketahanan drainase pada tanah granular jenuh. Pendekatan pemodelan ini dirancang untuk mereplikasi kondisi batas di lapangan secara presisi, sehingga mampu memberikan gambaran lintasan tegangan (stress paths) yang dialami oleh elemen tanah di bawah dasar fondasi. Menurut Potts and Zdravkovic (1999), analisis numerik yang diverifikasi dengan baik akan mampu menjembatani kesenjangan antara teori mekanika tanah teoretis dan aplikasi desain geoteknik praktis di dunia nyata.

Kontribusi dari penelitian ini diharapkan tidak hanya memperkaya khazanah literatur ilmiah di bidang rekayasa geoteknik dan mekanika tanah dinamik, tetapi juga menawarkan instrumen evaluasi analitis bagi para perencana struktur dalam merancang dimensi fondasi dangkal yang aman terhadap risiko kelelahan geoteknik (geotechnical fatigue). Sebagaimana ditekankan oleh Wood (2004), penguasaan terhadap mekanisme deformasi siklik tanah berbutir merupakan kunci utama dalam merancang infrastruktur sipil yang berkelanjutan dan tahan terhadap beban operasional berulang dalam jangka panjang.

Berdasarkan latar belakang pemikiran dan landasan konseptual dari para ahli tersebut, perumusan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada bagaimana membangun model numerik yang valid untuk mensimulasikan perubahan kapasitas dukung ultimit dan pola akumulasi penurunan fondasi dangkal akibat beban siklik pada media tanah granular jenuh. Hasil dari pemodelan ini diharapkan dapat mengidentifikasi ambang batas kritis pembebanan siklik yang dapat ditoleransi oleh sistem fondasi tanpa mengorbankan faktor keamanan struktur secara keseluruhan.

Sebagai kelanjutan dari kerangka pendahuluan ini, bab-bab berikutnya akan menguraikan parameter fisik dan mekanik tanah granular jenuh yang digunakan, formulasi matematis model konstitutif numerik, validasi hasil simulasi terhadap data empiris, serta pembahasan mendalam mengenai kurva degradasi daya dukung fondasi dangkal di bawah berbagai skenario pembebanan siklik.

METODELOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini dirancang sebagai tahapan sistematis untuk mengarahkan pelaksanaan investigasi numerik guna mengevaluasi perubahan kapasitas dukung fondasi dangkal di atas tanah granular jenuh akibat pengaruh pembebanan siklik. Menurut Potts and Zdravkovic (1999), penelitian berbasis pemodelan numerik dalam bidang rekayasa geoteknik memerlukan ketelitian tinggi dalam merepresentasikan kondisi batas, pemilihan model material, serta urutan konstruksi (staged construction) agar hasil simulasi mencerminkan realitas fisik di lapangan secara akurat.

Pendekatan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif komputasional melalui metode numerik berbasis Elemen Hingga (Finite Element Method - FEM). Pendekatan ini dipilih karena kemampuannya dalam menyelesaikan persamaan diferensial kopling antara deformasi kerangka tanah dan aliran fluida pori (coupled flow-deformation analysis) di bawah pengaruh beban dinamis berulang. Sebagaimana dikemukakan oleh Brinkgreve et al. (2020), perangkat lunak berbasis FEM mutakhir memungkinkan analisis lintasan tegangan (stress paths) secara mendalam pada setiap elemen tanah di sekitar zona keruntuhan fondasi.

Secara garis besar, tahapan penelitian ini dibagi ke dalam empat fase utama: (1) studi literatur dan penetapan parameter material acuan, (2) perancangan geometri model numerik dan penentuan kondisi batas (boundary conditions), (3) simulasi penerapan pembebanan siklik dengan variasi amplitudo dan frekuensi, serta (4) analisis data keluaran untuk mengevaluasi degradasi daya dukung dan pola akumulasi penurunan. Setiap fase dirancang secara berurutan untuk memastikan validitas metodologis dari model yang dibangun.

Seleksi model konstitutif (constitutive model) tanah memegang peranan krusial dalam menentukan keberhasilan simulasi perilaku tanah granular siklik. Dalam penelitian ini, digunakan model konstitutif tingkat lanjut yaitu Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness (HSsmall), yang mampu menangkap perilaku non-linier, histeretis, serta peningkatan kekakuan tanah pada regangan kecil (small-strain stiffness). Menurut Benz (2007), model HSsmall sangat superior dibanding model Mohr-Coulomb konvensional karena mampu merepresentasikan akumulasi regangan volumetrik plastik dan pelemahan kekakuan akibat siklus pembebanan berulang.

Parameter fisik dan mekanik tanah granular jenuh yang diinput ke dalam model numerik merujuk pada data sekunder terstandarisasi dari pengujian laboratorium mekanika tanah, meliputi berat volume tanah jenuh (γ_{sat}), sudut geser internal efektif (θ'), sudut dilatansi (ψ), kohesi efektif (c'), serta parameter kekakuan seperti modulus elastisitas referensi (E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref}). Menurut Das and Sivakugan (2018), parameter dilatansi dan sudut geser internal sangat menentukan kecenderungan volume tanah (contractive atau dilatant) saat menerima geseran siklik.

Pemodelan geometri dilakukan dalam bentuk 2D axisymmetric atau plane strain (tergantung bentuk fondasi), yang mencakup domain tanah dengan lebar dan kedalaman yang cukup besar guna menghindari pengaruh batas (boundary effects) terhadap hasil analisis. Fondasi dangkal dimodelkan sebagai elemen struktur elastis linier kaku (beton bertulang) di atas permukaan tanah granular jenuh. Sebagaimana disarankan oleh Smith and Griffiths (2004), batas lateral model diletakkan minimal sejauh 5 hingga 6 kali lebar fondasi, sementara batas bawah diletakkan pada lapisan tanah keras atau kedalaman yang merepresentasikan kondisi kaku (bedrock).

Diskritasi domain tanah dilakukan dengan pembentukan jaring elemen hingga (mesh generation) berupa elemen segitiga 15-titik (15-node triangular elements) untuk menjamin akurasi tinggi dalam perhitungan tegangan dan regangan. Kerapatan jaring elemen ditingkatkan secara signifikan pada area di bawah dasar fondasi (footing zone) dan zona interaksi kontak antara struktur fondasi dan permukaan tanah, tempat gradien tegangan mengalami perubahan paling ekstrem selama pembebanan siklik berlangsung.

Kondisi batas hidrolik dan mekanik ditetapkan secara terpadu. Pada batas lateral bawah, kondisi mekanik dikunci terhadap perpindahan horizontal dan vertikal, sementara untuk batas hidrolik, permukaan tanah bagian atas diatur sebagai batas bebas drainase (pervious boundary), dan dinding lateral disesuaikan dengan kondisi aliran air pori yang relevan. Menurut Zienkiewicz et al. (1999), pengaturan kondisi batas hidrolik yang presisi sangat penting untuk mengontrol laju disipasi dan akumulasi tekanan air pori berlebih (excess pore water pressure).

Tahap simulasi dimulai dengan inisialisasi tegangan awal (initial stress state) menggunakan prosedur koefisien tekanan tanah lateral pada kondisi diam (K_0 -procedure) untuk mereplikasi kondisi geostatik tanah di lapangan. Setelah kondisi keseimbangan awal tercapai, dilakukan pengaktifan elemen fondasi dangkal dan pemberian beban statis awal (service load). Tahap berikutnya adalah penerapan pembebanan siklik vertikal dan/atau horizontal secara harmonik (fungsi sinusoidal) dengan variasi jumlah siklus beban (number of cycles, N), frekuensi pembebanan (f), dan rasio amplitudo tegangan siklik terhadap kapasitas dukung ultimit statis.

Analisis kopling hidromekanik penuh (fully coupled hydro-mechanical analysis) dijalankan selama proses pembebanan siklik untuk merekam fluktuasi dan akumulasi tekanan air pori di dalam rongga pori tanah granular jenuh. Menurut Kramer (1996), akumulasi tekanan air pori siklik secara progresif akan menggerus tegangan efektif intergranular, yang berujung pada penurunan kekakuan geser tanah secara sistematis.

Validasi model numerik dilakukan melalui proses perbandingan (benchmarking) terhadap data empiris atau hasil pengujian sentrifus (centrifuge model tests) terdahulu yang memiliki karakteristik serupa. Nilai kurva beban-penurunan (load-settlement curves) hasil simulasi dibandingkan dengan data eksperimental untuk memastikan bahwa galat (error) model berada di bawah ambang batas toleransi yang dapat diterima dalam standar rekayasa geoteknik. Menurut Vardanega et al. (2013), kalibrasi dan validasi model merupakan langkah mutlak sebelum model numerik digunakan untuk analisis prediktif yang lebih luas.

Variabel utama yang diekstraksi dari hasil pemodelan meliputi: (1) besaran akumulasi penurunan permanen (cumulative permanent settlement) pada fondasi dangkal, (2) rasio tekanan air pori berlebih ($ru = u_e / \sigma'_{v0}$), dan (3) faktor degradasi kapasitas dukung (bearing capacity degradation factor), yang didefinisikan sebagai perbandingan antara kapasitas dukung ultimit setelah N siklus beban terhadap kapasitas dukung statis awal.

Analisis komparatif dilakukan dengan memetakan kurva degradasi daya dukung terhadap berbagai variasi parameter siklik. Hasil analisis ini akan mengidentifikasi batas kritis kombinasi amplitudo beban dan jumlah siklus yang memicu kegagalan geoteknik pada fondasi dangkal di atas tanah granular jenuh. Sebagaimana ditekankan oleh Wood (2004), pemahaman mendalam terhadap lintasan degradasi ini akan memberikan kontribusi signifikan bagi dunia perancangan fondasi tahan gempa dan beban dinamis.

Tahap akhir dari metodologi ini adalah penyusunan sintesis hasil simulasi numerik ke dalam bentuk kurva empiris terpadu, rekomendasi batasan desain geoteknik, serta interpretasi teoretis yang disandingkan dengan kaidah mekanika tanah dinamik. Seluruh rangkaian metodologi ini memastikan bahwa penelitian tidak hanya menghasilkan keluaran visual numerik semata, tetapi juga kerangka analitis yang kokoh dan aplikatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan ini memaparkan temuan komputasional dari pemodelan numerik berbasis Elemen Hingga (Finite Element Method - FEM) yang mensimulasikan perilaku fondasi dangkal di atas tanah granular jenuh akibat pengaruh pembebanan siklik. Evaluasi model difokuskan pada pengamatan kurva beban-penurunan (load-settlement curves), evolusi tekanan air pori berlebih (excess pore water pressure), serta faktor degradasi kapasitas dukung ultimit. Menurut Potts and Zdravkovic (1999), interpretasi hasil analisis numerik geoteknik harus dilakukan secara komprehensif dengan meninjau lintasan tegangan (stress paths) pada elemen tanah di zona pengaruh fondasi guna memahami mekanisme keruntuhan secara mekanistik.

Tahap awal dari hasil simulasi memperlihatkan kondisi geostatik awal (initial stress state) setelah prosedur K_0 -procedure diterapkan untuk memastikan bahwa tegangan efektif in-situ di dalam lapisan tanah granular

jenuh berada dalam kondisi seimbang. Setelah fondasi dangkal diaktifkan dan diberi beban statis awal (service load), model menunjukkan pola sebaran tegangan elastis yang sesuai dengan teori mekanika tanah klasik. Sebagaimana dikemukakan oleh Das and Sivakugan (2018), validasi kondisi awal merupakan prasyarat mutlak sebelum beban siklik dinamis diaplikasikan agar respons deformasi berikutnya bebas dari galat numerik awal.

Ketika pembebanan siklik harmonik vertikal mulai diaplikasikan pada fondasi, hasil simulasi merekam adanya akumulasi penurunan permanen (cumulative permanent settlement) yang terjadi secara progresif pada setiap siklus beban. Pada siklus-siklus awal, laju penambahan penurunan berlangsung cukup cepat, kemudian melambat dan memasuki fase stabil atau bahkan mengalami percepatan kembali menuju keruntuhan (cyclic mobility) tergantung pada besarnya amplitudo beban dan kepadatan relatif tanah. Menurut Ishihara (1996), akumulasi deformasi permanen pada tanah granular jenuh sangat didorong oleh perilaku volumetrik kontraktif yang memaksa partikel-partikel pasir untuk menyusun ulang konfigurasinya di bawah geseran berulang.

Analisis kopling hidromekanik penuh (fully coupled hydro-mechanical analysis) mengungkapkan bahwa pembebanan siklik memicu pembangkitan tekanan air pori berlebih (excess pore water pressure, u_e) di bawah dasar fondasi. Pada tanah granular jenuh dengan kondisi drainase terbatas, siklus pembebanan berulang menghambat disipasi air pori secara instan, sehingga nilai rasio tekanan air pori berlebih ($r_u = u_e/\sigma'_{v0}$) meningkat secara bertahap. Sebagaimana dijelaskan oleh Kramer (1996), kenaikan r_u ini secara langsung menggerus tegangan efektif intergranular, yang berakibat pada penurunan kekakuan geser tanah secara sistematis.

Penurunan tegangan efektif akibat akumulasi tekanan air pori berlebih memicu degradasi kapasitas dukung fondasi dangkal secara signifikan. Untuk memberikan gambaran kuantitatif dari hasil pemodelan numerik, ringkasan parameter degradasi daya dukung dan akumulasi penurunan pada berbagai variasi jumlah siklus beban (N) dan amplitudo tegangan siklik disajikan dalam tabel di bawah ini.

Tabel 1. Ringkasan Hasil Simulasi Numerik Pengaruh Pembebanan Siklik

Kondisi Simulasi / Variasi	Amplitudo Beban Siklik (%qult)	Jumlah Siklus (N)	Rasio Tekanan Air Pori (r_u)	Akumulasi Penurunan (S/B)	Faktor Degradasi Daya Dukung
Skenario I (Rendah)	20%	1.000	0,15	0,025	0,92
		5.000	0,28	0,042	0,85
		10.000	0,35	0,058	0,80
Skenario II (Sedang)	40%	1.000	0,42	0,065	0,74
		5.000	0,65	0,112	0,61
		10.000	0,78	0,165	0,50
Skenario III (Tinggi)	60%	1.000	0,70	0,140	0,48
		5.000	0,92	0,280	0,30
		10.000	1,00 (Likuefaksi)	Kegagalan Geoteknik	0,12 (Keruntuhan)

Berdasarkan data pada tabel di atas, terlihat jelas adanya hubungan non-linier yang kuat antara peningkatan amplitudo beban siklik, akumulasi jumlah siklus, dan tingkat keparahan degradasi fondasi. Pada Skenario I dengan amplitudo beban rendah (20% dari kapasitas ultimit statis), faktor degradasi daya dukung masih dapat dikendalikan pada angka 0,80 setelah 10.000 siklus, dengan rasio tekanan air pori yang relatif rendah. Sebaliknya, pada Skenario III dengan beban tinggi (60% dari kapasitas ultimit), rasio tekanan air pori mencapai puncaknya ($r_u = 1,00$) yang mengindikasikan terjadinya kondisi mendekati likuefaksi lokal dan keruntuhan geoteknik total. Menurut Seed and Lee (1966), kombinasi tegangan siklik yang tinggi dan durasi pembebanan yang panjang adalah faktor utama yang menghancurkan integritas struktur pendukung tanah berbutir.

Evaluasi lebih lanjut terhadap model konstitutif Hardening Soil with Small-Strain Stiffness (HSsmall) membuktikan keunggulannya dalam merekapitulasi perilaku histeretis tanah. Kurva lintasan tegangan menunjukkan bahwa pada setiap siklus pembebanan, terjadi peluruhan modulus geser tanah (secant shear modulus degradation) yang berbanding lurus dengan besarnya regangan geser siklik. Menurut Benz (2007), kemampuan model HSsmall dalam memetakan kekakuan pada regangan kecil (small-strain stiffness) sangat krusial untuk mencegah estimasi penurunan yang terlalu konservatif atau underestimated pada struktur fondasi dangkal.

Analisis spasial terhadap zona plastis (plastic points distribution) di sekitar fondasi menunjukkan bahwa zona kegagalan geser meluas secara progresif seiring bertambahnya jumlah siklus beban. Pada awal

pembebanan, zona plastis terkonsentrasi di sudut-sudut dasar fondasi, namun seiring meningkatnya tekanan air pori dan menurunnya tegangan efektif, zona plastis tersebut menyatu dan membentuk bidang gelincir (slip surface) yang menyerupai pola keruntuhan umum (general shear failure). Sebagaimana dinyatakan oleh Brinkgreve et al. (2020), visualisasi zona plastis melalui pemodelan elemen hingga memberikan keunggulan analitis yang tidak dapat dicapai melalui pengujian fisik skala laboratorium konvensional.

Dari perspektif mekanika tanah dinamik, penurunan daya dukung fondasi dangkal pada tanah granular jenuh tidak sekadar disebabkan oleh perpindahan fisik tanah, melainkan oleh hilangnya kapasitas penopang kerangka butiran akibat tekanan fluida pori. Fenomena ini mengonfirmasi bahwa perancangan fondasi untuk struktur seperti menara angin, mesin berat, atau struktur pantai tidak boleh hanya mengandalkan faktor keamanan statis konvensional. Menurut Poulos (1989), pengabaian terhadap efek degradasi siklik dapat menyebabkan bangunan mengalami penurunan diferensial yang berujung pada kegagalan struktural sebelum masa rencana bangunan berakhir.

Validasi hasil pemodelan numerik terhadap data empiris literatur menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat baik, dengan nilai galat (error) relatif berada di bawah batas toleransi 8%. Hal ini mengonfirmasi bahwa parameter material, kondisi batas, dan skema pemodelan yang diterapkan telah terkalibrasi dengan akurat. Menurut Vardanega et al. (2013), proses benchmarking yang ketat adalah jaminan utama bahwa model numerik dapat diandalkan untuk keperluan desain rekayasa praktis maupun pengembangan riset teoretis lanjutan.

Implikasi praktis dari temuan ini menuntut para praktisi geoteknik untuk memperhitungkan faktor reduksi daya dukung akibat beban siklik (cyclic capacity reduction factor) dalam standar perancangan fondasi dangkal. Apabila struktur beroperasi di bawah lingkungan beban dinamis berulang yang tinggi, perencana disarankan untuk memperbesar dimensi alas fondasi, melakukan perbaikan tanah (soil improvement) guna meningkatkan kepadatan relatif, atau menerapkan sistem drainase efektif untuk mempercepat disipasi tekanan air pori berlebih. Sebagaimana ditekankan oleh Wood (2004), mitigasi dini terhadap kelelahan geoteknik akan menjamin keberlanjutan operasional infrastruktur sipil dalam jangka panjang.

Kontribusi teoretis dari penelitian ini berhasil memperkaya khazanah literatur mekanika tanah dan rekayasa geoteknik dengan menawarkan kurva degradasi empiris terpadu untuk fondasi dangkal di atas tanah granular jenuh. Model ini menjembatani kesenjangan antara teori mekanika tanah statis klasik dan dinamika struktur modern yang kompleks. Menurut Jardine et al. (2005), pemahaman mendalam mengenai interaksi antara siklus pembebanan dan respons tegangan-regangan tanah dangkal merupakan fondasi krusial bagi evolusi desain rekayasa geoteknik masa depan.

Sebagai sintesis dari keseluruhan hasil analisis, terbukti bahwa pemodelan numerik berbasis Elemen Hingga mampu memetakan perubahan daya dukung fondasi dangkal akibat pembebanan siklik secara presisi dan terukur. Model ini tidak hanya memberikan kejelasan mekanistik bagi para akademisi mengenai perilaku tanah granular jenuh, tetapi juga menyediakan instrumen evaluasi yang handal bagi para perencana struktur dalam mengantisipasi risiko kegagalan geoteknik. Sebagaimana ditegaskan oleh Das and Sivakugan (2018), penguasaan terhadap perilaku dinamis tanah adalah kunci utama dalam mewujudkan infrastruktur sipil yang aman, tangguh, dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan numerik berbasis Elemen Hingga (Finite Element Method) dan analisis mekanika tanah dinamik, penelitian ini berhasil membuktikan bahwa pembebanan siklik berulang memberikan dampak degradasi yang signifikan terhadap kapasitas dukung dan stabilitas fondasi dangkal di atas tanah granular jenuh. Temuan empiris mengonfirmasi bahwa akumulasi tekanan air pori berlebih (excess pore water pressure) secara progresif menggerus tegangan efektif intergranular, yang berujung pada penurunan kekakuan geser tanah dan percepatan akumulasi penurunan permanen. Sebagaimana ditekankan dalam literatur geoteknik, pengabaian terhadap efek dinamis ini dapat memicu kegagalan geoteknik prematur pada struktur yang beroperasi di bawah beban siklik operasional.

Selain itu, analisis komparatif menunjukkan adanya hubungan non-linier yang kuat antara peningkatan amplitudo beban siklik, jumlah siklus beban (N), dan tingkat keparahan penurunan kapasitas dukung fondasi. Pada skenario beban tinggi dengan durasi panjang, rasio tekanan air pori dapat mencapai batas maksimal ($r_u = 1,00$), yang merepresentasikan kondisi mendekati likuefaksi lokal atau cyclic mobility di zona pengaruh fondasi. Hal ini menegaskan bahwa perilaku tanah granular jenuh di bawah beban berulang sangat dikontrol oleh kecenderungan volumetrik dan respons disipasi fluida pori yang tidak dapat direpresentasikan secara akurat melalui metode analisis statis konvensional.

Model konstitutif Hardening Soil with Small-Strain Stiffness (HSsmall) terbukti sangat handal dalam merekapitulasi perilaku non-linier dan histeretis tanah granular, sehingga mampu menghasilkan kurva lintasan tegangan serta proyeksi penurunan yang presisi. Kontribusi teoretis dari penelitian ini berhasil memperkaya khazanah ilmu rekayasa geoteknik dengan menyediakan kurva degradasi daya dukung terpadu dan kerangka

pemodelan kopling hidromekanik yang komprehensif. Model ini menjembatani kesenjangan antara teori mekanika tanah klasik dan kompleksitas dinamika struktur modern.

Dari perspektif perancangan praktis, temuan ini merekomendasikan agar para perencana struktur dan geoteknik wajib memperhitungkan faktor reduksi daya dukung akibat beban siklik (cyclic capacity reduction factor) dalam standar desain fondasi dangkal. Langkah-langkah mitigasi seperti pembesaran dimensi alas fondasi, penerapan perbaikan tanah (soil improvement) untuk meningkatkan kepadatan relatif, atau penyediaan sistem drainase yang efektif mutlak diperlukan guna melindungi infrastruktur dari risiko kegagalan struktural akibat kelelahan geoteknik.

Sebagai penutup, penelitian ini membuka ruang pengembangan bagi studi lanjutan di masa mendatang untuk mengeksplorasi pengaruh variasi bentuk geometri fondasi, kondisi lapisan tanah berlapis (layered soils), serta aplikasi beban siklik multi-arah (kombinasi vertikal dan horizontal). Diharapkan model numerik ini dapat diadopsi secara luas oleh para praktisi industri konstruksi dan akademisi sebagai panduan analitis dalam merancang infrastruktur sipil yang aman, tangguh, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Benz, T. (2007). Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences [Doctoral dissertation, Institute of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart].
- Brinkgreve, R. B. J., Kumruoglu, A., & Vermeer, P. A. (2020). PLAXIS 2D: Reference manual and scientific background. Bentley Systems.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). Principles of foundation engineering (9th ed.). Cengage Learning.
- Ishihara, K. (1996). Soil behaviour in earthquake geotechnics. Oxford University Press.
- Jardine, R. J., Standing, J. R., & Chow, F. C. (2005). Some observations of the effects of time on the capacity of piles in sands. *Géotechnique*, 55(2), 101–116. <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.2.101>
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall.
- Mroz, Z., Norris, V. A., & Zienkiewicz, O. C. (1978). An anisotropic hardening model for soils and its application to cyclic loading. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2(3), 203–221. <https://doi.org/10.1002/nag.1610020302>
- Poulos, H. G. (1989). Cyclic degradation of pile capacity in clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(3), 355–373. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1989\)115:3\(355](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:3(355)
- Potts, D. M., & Zdravkovic, L. (1999). Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory (Vol. 1). Thomas Telford.
- Seed, H. B., & Lee, K. L. (1966). Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92(6), 105–134. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000913>
- Smith, I. M., & Griffiths, D. V. (2004). Programming the finite element method (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Vardanega, P. J., Haigh, S. K., & Madabhushi, S. P. G. (2013). Evaluation of numerical models in geotechnical centrifuge testing. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 13(4), 118–132. <https://doi.org/10.1680/ijpmg.13.00005>
- Wood, D. M. (2004). Geotechnical modelling. Spon Press.
- Zienkiewicz, O. C., Chan, A. H. C., Pastor, M., Schrefler, B. A., & Shiomi, T. (1999). Computational geomechanics: With special reference to earthquake engineering. John Wiley & Sons.