

Redesain dan Evaluasi Piled-Raft Pada Tanah Lempung Menggunakan MIDAS GTS NX

Nazla Nabilla Majid^{1*}, Herwan Dermawan²

^{1,2}Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Dr. Setiabudhi
No. 229, Bandung 40154, Jawa Barat, Indonesia

*nazlanabilla454@gmail.com

Abstract

Proyek ini merupakan pembangunan gedung pendidikan bertingkat tinggi yang pada desain awal menggunakan fondasi tiang pancang. Pada tahap pengujian Pile Driving Analyzer (PDA), hammer mengalami kerusakan berupa pecah; evaluasi selanjutnya mengindikasikan adanya ketidaksesuaian antara interpretasi desain awal dan kondisi aktual lapangan. Kondisi tersebut mendorong dilakukannya redesain fondasi agar tetap memenuhi persyaratan kapasitas dan kemampulayanan. Penelitian ini mengevaluasi sistem piled raft pada tanah lempung berlapis melalui verifikasi analitis dan analisis elemen hingga tiga dimensi. Konfigurasi fondasi terdiri atas raft berukuran 74 m × 28 m dengan tebal 2 m dan 846 spun pile berdiameter 0,50 m serta panjang 12 m yang menerima beban layan 182.581,28 kN. Perhitungan analitis menghasilkan kapasitas izin tiang tunggal 627,81 kN, pembagian beban Poulos-Davis-Randolph sebesar 76,91% pada kelompok tiang dan 23,09% pada raft, serta penurunan 8,12 cm. Analisis MIDAS GTS NX menghasilkan penurunan maksimum 6,684 cm, rasio penurunan diferensial 0,000340, gaya tekan maksimum 541,749 kN pada kepala tiang dan 543,659 kN sepanjang elemen, serta rasio pemanfaatan maksimum 0,866. Kelompok tiang memikul 74,04% beban dan raft 25,96%. Perbedaan load sharing terhadap PDR sebesar 2,87 poin persentase menunjukkan pola distribusi beban yang konsisten. Hasil tersebut memenuhi kriteria evaluasi geoteknik yang digunakan.

Kata kunci: piled raft, tanah lempung, Hardening Soil, MIDAS GTS NX, penurunan, load sharing

1. Pendahuluan

Sistem *piled raft* memanfaatkan kontribusi raft dan kelompok tiang secara bersamaan. Tiang tidak selalu ditujukan untuk memikul seluruh beban, tetapi dapat berfungsi sebagai elemen pengendali penurunan dan peningkat kekakuan sistem [1]. Filosofi ini berbeda dari desain kelompok tiang konvensional karena respons fondasi ditentukan oleh interaksi tanah-raft-tiang dan kompatibilitas deformasi antarkomponen [2].

Pada proyek yang ditinjau, pelaksanaan fondasi tiang pancang mengalami kendala teknis di lapangan sehingga pekerjaan dihentikan sebelum seluruh tiang rencana terpasang. Kendala tersebut terjadi ketika hammer yang digunakan pada saat pengujian Pile Driving Analyzer (PDA) mengalami kerusakan berupa pecah. Selain itu, hasil evaluasi menunjukkan

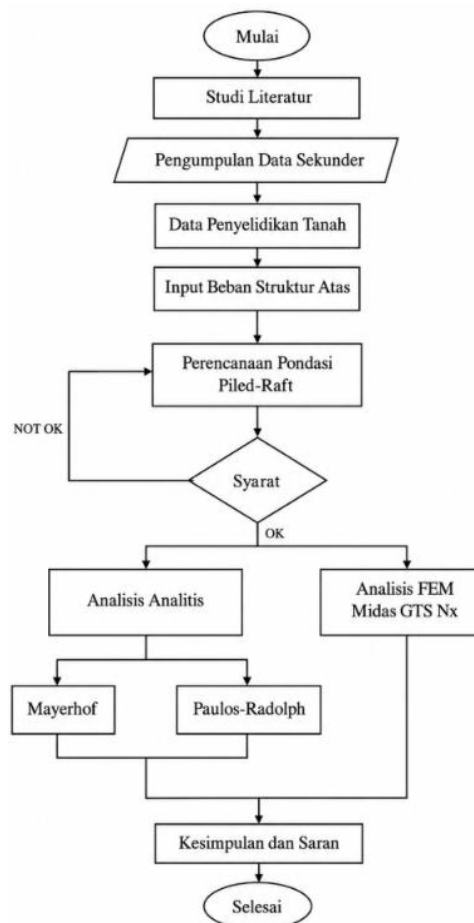
adanya indikasi ketidaksesuaian antara interpretasi data tanah dan asumsi perencanaan awal dengan kondisi aktual di lapangan. Kondisi ini menjadi dasar dilakukannya evaluasi dan redesain fondasi menggunakan sistem piled raft dengan analisis tiga dimensi. Pendekatan ini relevan karena penelitian eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa kontribusi raft terhadap beban sistem tidak dapat diabaikan [3].

Analisis sederhana Poulos–Davis–Randolph dapat digunakan pada tahap awal untuk memperkirakan kekakuan, pembagian beban, dan penurunan. Namun, tanah lempung berlapis memiliki kekakuan yang berubah terhadap kedalaman dan menunjukkan respons nonlinier, sehingga analisis tiga dimensi diperlukan untuk mengevaluasi distribusi tegangan, penurunan, serta gaya pada masing-masing tiang secara lebih rinci [4] [5].

Data penyelidikan tanah pada penelitian ini terbatas pada hasil uji N-SPT tanpa dilengkapi data uji pembebanan lapangan, sehingga verifikasi kapasitas aktual tiang secara empiris di lapangan tidak dapat dilakukan. Keterbatasan ini menjadi salah satu pertimbangan digunakannya pendekatan kombinasi analisis Poulos–Davis–Randolph dan pemodelan numerik tiga dimensi menggunakan MIDAS GTS NX, guna memperoleh estimasi kapasitas dan perilaku fondasi yang lebih komprehensif melalui korelasi parameter tanah dan simulasi interaksi tanah-struktur, sebagai kompensasi atas ketiadaan data uji beban langsung.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan numerik yang didukung verifikasi analitis. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data, penentuan parameter Hardening Soil, perhitungan kapasitas tiang dan raft, estimasi penurunan serta load sharing dengan metode Poulos–Davis–Randolph, pemodelan tiga dimensi menggunakan MIDAS GTS NX, dan evaluasi hasil berdasarkan SNI 8460:2017.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

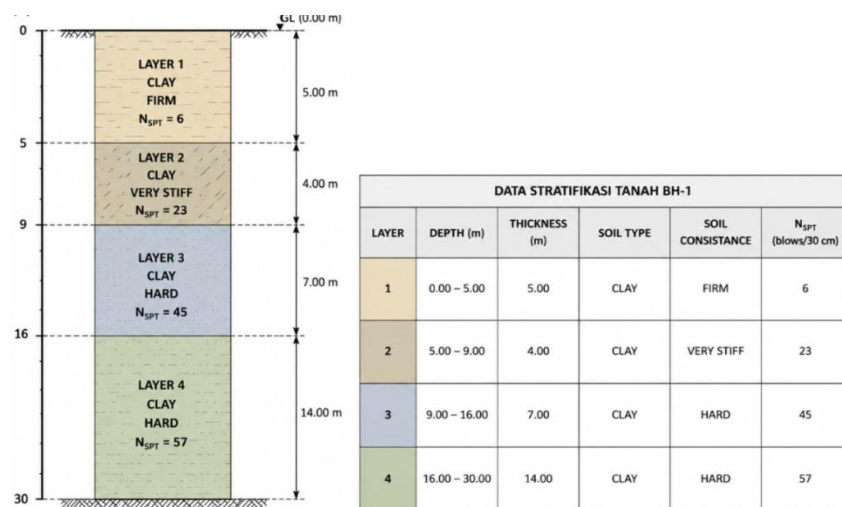
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Tanah dan Parameter Model Konstitutif

Profil tanah terdiri atas dominasi lapisan lempung dengan ketebalan 30 m. Model Hardening Soil digunakan karena mampu merepresentasikan kekakuan yang bergantung pada tingkat tegangan melalui E_{50ref} , E_{oedref} , E_{urref} , dan eksponen m , sehingga lebih sesuai daripada model elastik-plastik dengan satu modulus konstan untuk kajian deformasi dan redistribusi beban [6], [7].

Tabel 1. Parameter model Hardening Soil

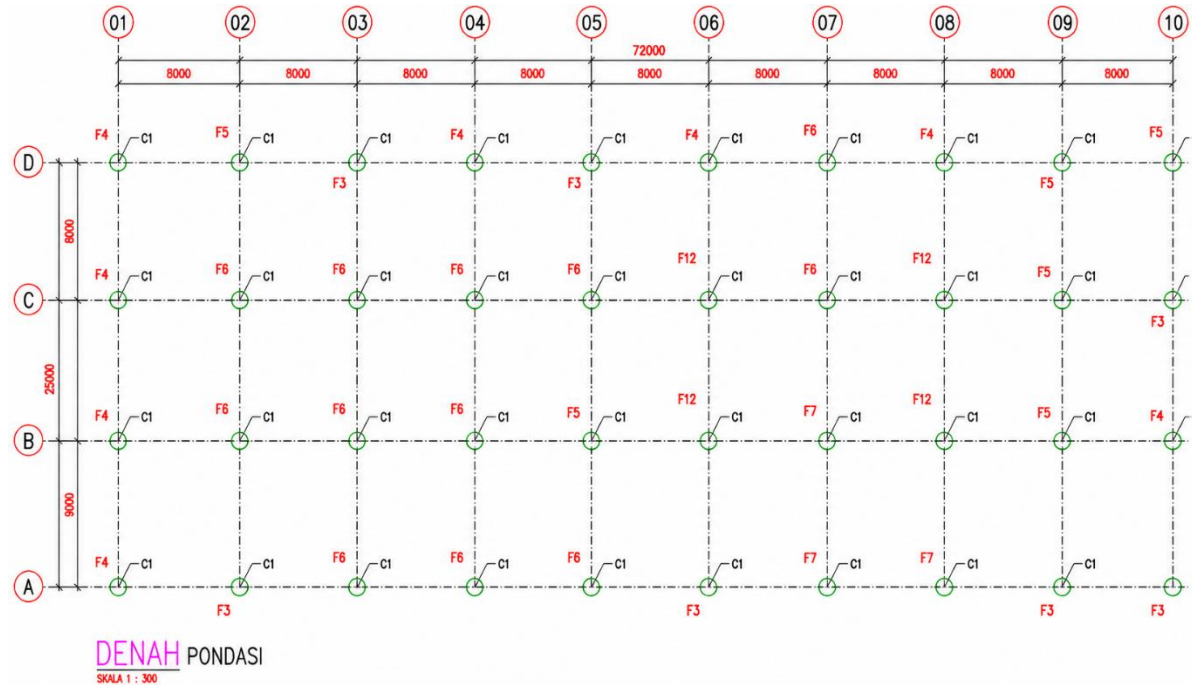
Parameter	Simbol	Satuan	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4
Tebal lapisan	H	m	5	4	7	14
Berat isi jenuh	γ_{sat}	kN/m ³	17,485	20,040	19,525	21,505
Rasio Poisson	ν	–	0,215	0,346	0,400	0,400
Overconsolidation ratio	OCR	–	3,721	4,652	4,727	2,960
Kohesi efektif	c'	kPa	6,22	23,00	45,00	57,00
Sudut geser efektif	ϕ'	°	20,000	24,333	26,250	29,250
Koefisien tekanan tanah NC	K_0NC	–	0,658	0,588	0,558	0,511
Rasio rongga awal	e_0	–	1,480	1,060	0,600	0,600
Kekakuan sekant	E_{50ref}	kPa	1.584	5.940	12.375	18.315
Kekakuan oedometer	E_{oedref}	kPa	1.584	5.940	12.375	18.315
Kekakuan unloading-reloading	E_{urref}	kPa	4.752	17.820	37.125	54.945
Eksponen ketergantungan tegangan	m	–	0,90	0,70	0,50	0,50
Failure ratio	R_f	–	0,90	0,90	0,90	0,90
Tekanan referensi	p_{ref}	kPa	100	100	100	100



Gambar 2. Stratifikasi Tanah

3.2 Konfigurasi Redesain Piled Raft dan Beban Struktur

Konfigurasi awal terdiri atas raft berukuran 74 m × 28 m dengan tebal 2 m dan 846 spun pile berdiameter 0,50 m, spasi 3,1D, dan panjang tertanam 12 m. Denah struktur memiliki 10 grid pada arah memanjang dan empat grid pada arah melintang.



Gambar 3. Denah grid dan posisi kolom struktur

Tabel 2. Geometri sistem piled raft

Komponen	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Raft	Panjang raft	Lr	74,00	m
	Lebar raft	Br	28,00	m
	Tebal raft	tr	2,00	m
	Luas raft	Ar	2.072,00	m ²
Pile	Tipe tiang	–	Spun pile	–
	Jumlah tiang	np	846	buah
	Diameter tiang	D	0,50	m
	Panjang tertanam	Lp	12,00	m
	Luas ujung tiang	Ap	0,196	m ²
	Keliling tiang	P	1,571	m

Tabel 3. Ringkasan Beban Struktur pada Kondisi Layan

Grid	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D	4448,9	4970,9	4308,9	4267,5	4313,8	4247,2	4188,2	4165	4664,7	4448,9
C	3304,2	6720,7	4682,9	4898,6	6890,6	6610,6	4649,5	6974,1	5672,2	3304,2
B	3633,4	5075,1	4963,7	5007,4	4898,9	6774,1	4116,6	8224,4	4640,2	3633,4
A	2869,3	3872,8	3798,9	3856,1	3856,1	3803,9	3176	3279,9	3478,6	2869,3

Beban struktur diterapkan pada model sebagai beban titik (*nodal load*) pada setiap titik pertemuan grid kolom, sesuai dengan posisi kolom struktur yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan nilai beban masing-masing kolom yang tercantum pada Tabel 3. Total beban layan yang digunakan pada rekap MIDAS adalah 182.581,280 kN,

3.3 Kapasitas Aksial Tiang Tunggal

Kapasitas aksial tiang tunggal ditentukan dari tahanan ujung dan tahanan selimut. Berdasarkan lembar perhitungan, $Q_p = 397,61$ kN dan $Q_s = 1.171,91$ kN, sehingga $Q_u = 1.569,52$ kN dan $Q_{all} = 627,81$ kN untuk faktor keamanan 2,5. Kontribusi tahanan selimut adalah 74,67% dari Q_u . Nilai ini menunjukkan perilaku yang didominasi gesekan pada model perhitungan, tetapi bukan bukti umum bahwa semua tiang pada lempung selalu didominasi tahanan selimut; kesimpulan harus dikaitkan dengan profil cu, tegangan efektif, panjang tiang, dan metode instalasi [8], [9].

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (1)$$

$$Q_p = A_p q_p = A_p (c_u N_c^*) \approx A_p (9c_u) \quad (2)$$

$$Q_s = \sum (A_s f_s), \quad f_s = \lambda (\sigma'_v + 2c_u) \quad (3)$$

Pada Persamaan (1)–(3), Q_u adalah kapasitas aksial ultimit, Q_p adalah tahanan ujung, Q_s adalah tahanan selimut, A_p adalah luas ujung, N_c^* adalah faktor daya dukung ujung, c_u adalah kuat geser tak terdrainase, f_s adalah tahanan selimut satuan, dan A_s adalah luas selimut pada setiap lapisan. Metode Vijayvergiya–Focht menggunakan parameter λ yang bergantung pada panjang penetrasi dan karakteristik tanah. Profil cu, nilai λ per lapisan, tegangan efektif rata-rata, dan c_u pada ujung tiang belum ditampilkan; karena itu rekap pada Tabel 4 masih memerlukan audit lapis-per-lapis.

Tabel 4. Rekapitulasi kapasitas aksial tiang tunggal

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Tahanan ujung	Q_p	397,61	kN
Tahanan selimut	Q_s	1.171,91	kN
Kapasitas ultimit	Q_u	1.569,52	kN
Faktor keamanan	FS	2,50	–
Kapasitas izin	Q_{all}	627,81	kN

3.4 Kapasitas Raft dengan Metode Meyerhof

Metode Meyerhof digunakan untuk memeriksa kapasitas tanah yang termobilisasi langsung di bawah raft [11]. Untuk pemeriksaan jangka pendek pada lempung, parameter yang dipakai harus berupa kuat geser tak terdrainase c_u dengan $\phi_u = 0^\circ$ dan $c' = 6,22$ kPa. Daya dukung ultimit raft dihitung menggunakan persamaan Meyerhof berikut:

$$q_{ult} = c'N_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + q'N_qF_{qs}F_{qd}F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma'BN_\gamma F_{\gamma s}F_{\gamma d}F_{\gamma i} \quad (4)$$

$$q_{ult} = (6,22)(5,14)(1,20)(1,014)(1) + (15,349)(1)(1)(1)(1) + 21(\gamma')(28)(0)(1)(1)(1)$$

$$q_{ult} = 54,262 \text{ kN/m}^2$$

Pada Persamaan (4), c' adalah kohesi efektif; q adalah tekanan overburden pada dasar raft; γ adalah berat isi tanah; B dan L adalah dimensi raft; N_c , N_q , dan N_γ adalah faktor daya dukung; sedangkan faktor bentuk, kedalaman, dan kemiringan harus konsisten dengan formulasi Meyerhof yang dipilih. Lembar perhitungan menggunakan $D_f = 2 \text{ m}$, $B = 28 \text{ m}$, $L = 74 \text{ m}$, $q = 15,349 \text{ kPa}$, $N_c = 5,14$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$, $F_{cs} = 1,20$, $F_{cd} = 1,014$, dan $MAT = 0 \text{ m}$. Daya dukung izin dan kapasitas izin raft ditentukan sebagai berikut:

$$q_{all} = \frac{q_{ult}}{FS} = \frac{54,262}{3} = 18,088 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

$$P_{all} = q_{all}A_r = 18,088(2\,072) = 37.477,22 \text{ kN} \quad (2)$$

$$R_r = \frac{P_{all}}{P_{total}} \times 100\% = \frac{37\,477,22}{182\,581,28} \times 100\% = 20,53\% \quad (3)$$

Rasio 20,53% adalah perbandingan kapasitas izin raft hasil lembar perhitungan terhadap beban total, yaitu $37.477,22/182.581,28$. Angka tersebut bukan pembagian beban aktual pada sistem piled raft. Karena basis c' dan konvensi gross/net belum terverifikasi, rasio ini hanya dipakai sebagai indikator kapasitas awal, bukan sebagai bukti bahwa raft memikul 20,53% beban. Pembagian beban selanjutnya diperkirakan melalui kompatibilitas deformasi dengan pendekatan PDR.

3.5 Respons Analitis Poulos–Davis–Randolph

Pendekatan Poulos–Davis–Randolph (PDR) digunakan sebagai analisis awal untuk memperkirakan kekakuan gabungan, pembagian beban, dan penurunan sistem. Istilah PDR tidak menunjukkan tiga metode yang dihitung secara terpisah. Perhitungan ini menggabungkan konsep elastisitas tiang dan raft dari Poulos–Davis, formulasi kekakuan serta interaksi kelompok tiang dari Randolph, dan idealisasi hubungan beban–penurunan yang digunakan dalam desain awal piled raft [1], [2]. Modulus geser tanah ditentukan dari modulus elastisitas dan rasio Poisson:

$$G_s = \frac{E_s}{2(1 + \nu_s)} \quad (8)$$

Nilai modulus geser representatif digunakan untuk menghitung kekakuan raft dan tiang. Kekakuan raft dihitung berdasarkan ukuran bidang raft dan faktor bentuk β_z :

$$K_r = \frac{G_s}{1 - \nu_s} \beta_z \sqrt{4cd} \quad (9)$$

Untuk raft $74 \text{ m} \times 28 \text{ m}$ digunakan $c = 37 \text{ m}$, $d = 14 \text{ m}$, dan $\beta_z = 2,40$. Hasilnya adalah $K_r = 1.463,12 \text{ MN/m}$. Kekakuan aksial tiang tunggal kemudian dihitung menggunakan formulasi Randolph yang mempertimbangkan rasio kekakuan tiang–tanah, panjang tiang, radius tiang, dan perubahan modulus tanah terhadap kedalaman:

$$K_p = G_L r_0 \frac{\frac{4\eta}{(1 - \nu_s)\xi} + \rho \frac{2\pi \tanh(\mu L)}{\mu L} \frac{L}{r_0}}{1 + \frac{1}{\pi \lambda (1 - \nu_s)\xi} \frac{4\eta}{\mu L} \frac{L}{r_0}} \quad (10)$$

Dengan diameter 0,50 m dan panjang 12 m, kekakuan tiang tunggal diperoleh $K_p = 73,75$ MN/m. Kekakuan kelompok tiang ditentukan dari jumlah tiang sebagai berikut:

$$K_{pg} = K_p \sqrt{n_p} \quad (11)$$

Untuk $n_p = 846$, diperoleh $K_{pg} = 2.145,36$ MN/m. Kekakuan gabungan raft-kelompok tiang dihitung dari rasio K_r/K_{pg} :

$$K_{pr} = \frac{1 - 0,60 \left(\frac{K_r}{K_{pg}} \right)}{1 - 0,64 \left(\frac{K_r}{K_{pg}} \right)} K_{pg} \quad (12)$$

Hasil perhitungan memberikan $K_{pr} = 2.249,21$ MN/m. Selanjutnya, faktor interaksi α dan proporsi beban ditentukan dengan:

$$\alpha = \frac{0,20 \left(\frac{K_r}{K_{pg}} \right)}{1 - 0,80 \left(\frac{K_r}{K_{pg}} \right)} \quad (13)$$

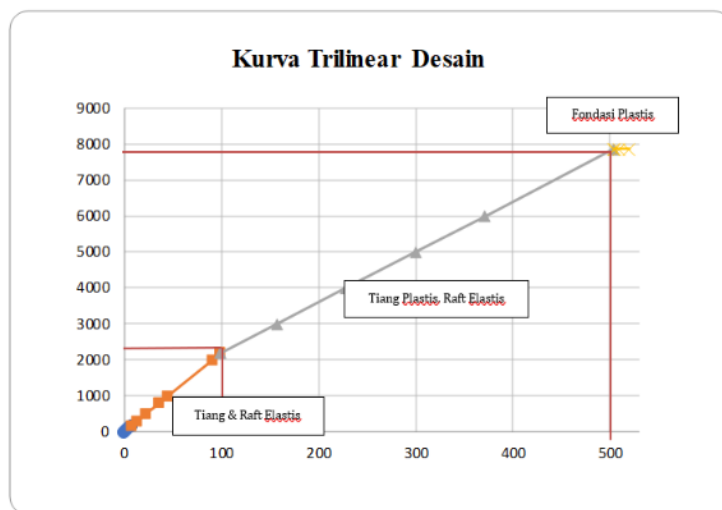
$$\beta_p = \frac{1}{1 + \alpha}, \quad \beta_r = 1 - \beta_p \quad (14)$$

Dengan $K_r/K_{pg} = 0,682$ diperoleh $\alpha = 0,30$, sehingga $\beta_p = 0,7691$ dan $\beta_r = 0,2309$. Artinya, pada tahap analitis awal kelompok tiang diperkirakan memikul 76,91% beban, sedangkan raft memikul 23,09%.

$$P_p = \beta_p P = 140\,423,26 \text{ kN}, \quad P_r = \beta_r P = 42\,158,02 \text{ kN} \quad (15)$$

s (cm)	P (MN)
0.00	0
2.22	50
4.45	100
8.12	182.58
13.34	300
22.23	500
35.57	800
44.46	1000
88.92	2000
98.49	2215.19
152.13	3000
220.47	4000
288.82	5000
357.17	6000
484.11	7857.37
484.11	7857.37
484.11	7857.37
484.11	7857.37

S izin	15+B/600	19.67 cm
S ambil		15.00 cm



Gambar 4. Kurva trilinear PDR

Penurunan elastis awal dihitung dari beban layan dan kekakuan gabungan :

$$s = \frac{P}{K_{pr}} = \frac{182,581 \text{ MN}}{2\,249,21 \text{ MN/m}} = 0,0812 \text{ m} = 8,12 \text{ cm} \quad (16)$$

Nilai 8,12 cm lebih kecil daripada batas 15 cm yang digunakan dalam evaluasi. Untuk melihat posisi beban kerja pada hubungan beban–penurunan, Poulos mengidealisasikan respons piled raft dalam kurva trilinear. Batas akhir cabang elastis pertama ditentukan dengan:

$$P_{up} = A_p f_b = 0.884 \text{ MN}, \quad P_r = \sum f_s A_p = 1.130,35 \text{ MN} \quad (4)$$

$$P_1 = \frac{P_{up}}{\beta_p} = \frac{n_p(P_s + P_b)}{\beta_p} = 2.215,28 \text{ MN} \quad (18)$$

Karena beban kerja 182,581 MN tetap jauh lebih kecil daripada P_1 , yaitu $P < P_1$ maka klasifikasi respons pada cabang elastis pertama tidak berubah. Meskipun P_{up} diperoleh dari penjumlahan kapasitas ultimit seluruh tiang $P_{up} = n_p Q_u$, nilai tersebut masih merupakan kapasitas teoritis kelompok tiang. Oleh karena itu, pengaruh efisiensi kelompok, potensi kegagalan blok, jarak antar tiang, serta efek instalasi perlu dievaluasi sebelum nilai tersebut digunakan sebagai acuan dalam analisis piled raft [2], [8], [12].

Tabel 5. Ringkasan hasil verifikasi analitis

Parameter	Simbol	Hasil
Kapasitas ultimit raft	q_{ult}	54,262 kN/m ²
Daya dukung izin raft	q_{all}	18,088 kN/m ²
Kapasitas izin raft	P_{all}	37.477,22 kN
Kekakuan raft	K_r	1.463,12 MN/m
Kekakuan tiang tunggal	K_p	73,75 MN/m
Kekakuan kelompok tiang	K_{pg}	2.145,36 MN/m
Kekakuan piled raft	K_{pr}	2.249,21 MN/m
Proporsi beban kelompok tiang	β_p	76,91%
Proporsi beban raft	β_r	23,09%
Penurunan analitis	s	8,12 cm
Batas awal cabang plastis	P_1	1.726,45 MN

Hasil PDR memperkirakan kelompok tiang sebagai pemikul beban utama sebesar 76,91% dan raft sebesar 23,09%, dengan penurunan elastis 8,12 cm. Pendekatan ini berguna sebagai pemeriksaan awal, tetapi menggunakan kekakuan representatif dan penyederhanaan interaksi. Distribusi parameter lainnya hanya dapat ditangkap secara lebih rinci melalui model tiga dimensi dan validasi lapangan [1].

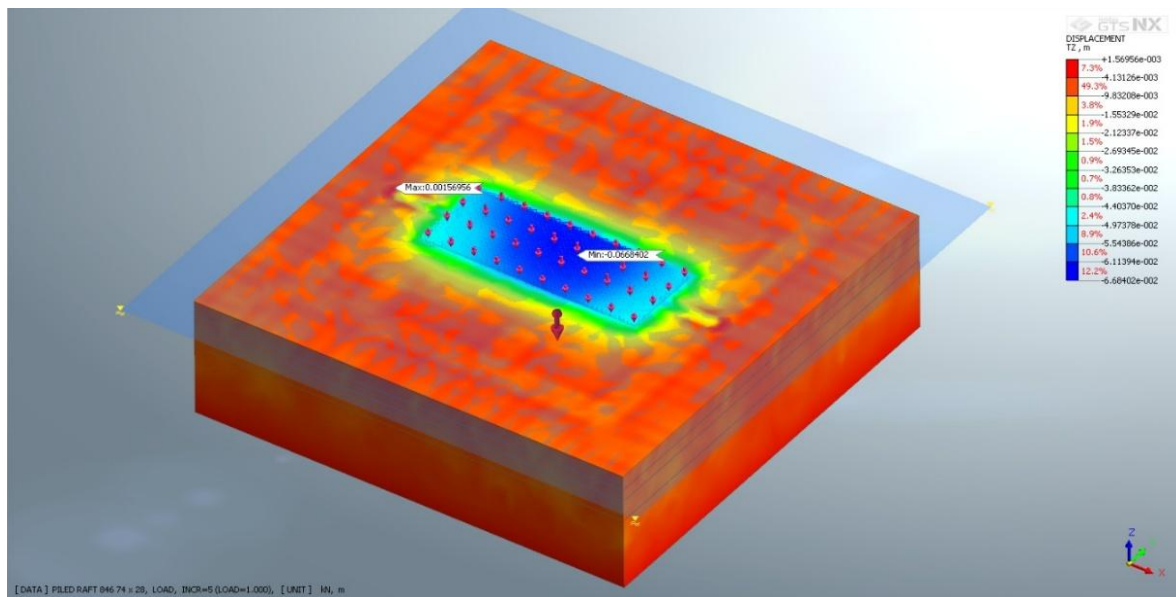
3.6 Pemodelan dan Analisis Tiga Dimensi Menggunakan MIDAS GTS NX

Pemodelan tiga dimensi dilakukan menggunakan perangkat lunak MIDAS GTS NX. Tanah dimodelkan sebagai elemen *solid* 3D dengan model konstitutif *Hardening Soil*, raft dimodelkan sebagai elemen *shell* 2D struktur beton, sedangkan tiang dimodelkan sebagai elemen *beam* 1D dengan interaksi *interface* pada selimut dan ujung tiang. Tahapan konstruksi yang digunakan berupa *stress construction stage*, dan beban diterapkan per titik kolom sesuai dengan konfigurasi grid struktur pada Tabel 3.

Tabel 6. Parameter utama input model tiga dimensi

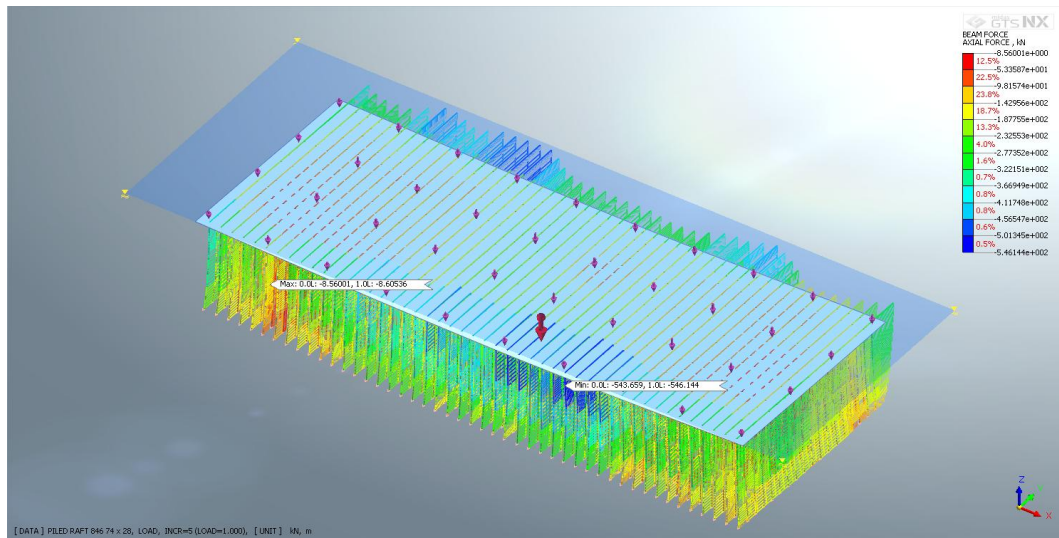
Parameter	Nilai	Satuan
Tahanan selimut total, Q_s	1171,91	kN
Tahanan geser ultimit interface	97,66	kN/m ²
Pile Interface Thickness	1	m
Modulus geser rata-rata, G_i	3,09	MPa
Shear Stiffness Modulus, K_t	5154.387	kN/m ²
Modulus oedometer rata-rata, E_{oed}	34,02	MPa
Normal Stiffness Modulus, K_n	56698.259	kN/m ³
Tahanan ujung, Q_p	397,61	kN
Kekakuan pegas ujung, K_{tip}	7.952,156	kN/m

Output Midas GTS Nx utama berupa perpindahan vertikal dan gaya aksial tiang. Nilai negatif pada output axial force menunjukkan gaya tekan. Variasi gaya antartiang terjadi akibat perbedaan beban kolom, posisi tiang, kekakuan raft, dan respons nonlinier tanah berlapis.



Gambar 5. Penurunan Vertikal dari Model MIDAS GTS NX

Kontur perpindahan menunjukkan nilai minimum $TZ = -0,0668402$ m, yang berarti penurunan maksimum fondasi adalah 6,684 cm. Nilai ini masih lebih kecil dari batas izin 15 cm menurut SNI 8460:2017, sehingga memenuhi syarat. Rasio penurunan diferensial dihitung dari selisih penurunan maksimum dan minimum, dibagi jarak antartitik, dan diperoleh nilai 0,000340. Nilai ini juga masih lebih kecil dari batas 1/300, maka dapat dikatakan bahwa *design* yang dibuat telah memenuhi syarat.



Gambar 6. Distribusi Gaya Aksial Tiang dari Model *MIDAS GTS NX*

Pada kepala tiang, gaya tekan maksimum yang terjadi adalah 541,749 kN, sedangkan di sepanjang elemen tiang nilainya sedikit lebih besar, yaitu 543,659 kN. Kedua nilai tersebut masih berada di bawah kapasitas izin tiang sebesar 627,810 kN, dengan rasio pemanfaatan maksimum sebesar 0,866 artinya kapasitas tiang belum terpakai sepenuhnya dan masih memiliki cadangan keamanan.

Total gaya tekan pada kepala seluruh 846 tiang adalah 135.181,891 kN. Dari total beban struktur, ini berarti kelompok tiang memikul 74,04% beban, sedangkan raft memikul sisanya sebesar 25,96%. Angka ini sedikit lebih tinggi 2,87 poin persentase dibandingkan hasil metode PDR untuk kontribusi raft. Perbedaan ini masih tergolong wajar, karena nilai 25,96% tetap berada dalam rentang 14%–46% yang dilaporkan Susila dan Anggraini pada analisis tiga dimensi piled raft di tanah lempung [13].

3.7 Evaluasi Kinerja Berdasarkan SNI 8460:2017

Metode Meyerhof dan PDR digunakan sebagai estimasi awal distribusi beban, sedangkan hasil akhir ditentukan melalui analisis tiga dimensi MIDAS GTS NX. Kontribusi raft berdasarkan Meyerhof dan PDR masing-masing sebesar 20,53% dan 23,09%, sedangkan MIDAS menghasilkan kontribusi raft sebesar 25,96% dan kelompok tiang sebesar 74,04%. Selisih hasil PDR dan MIDAS sebesar 2,87 poin persentase menunjukkan bahwa ketiga metode menghasilkan pola distribusi beban yang relatif konsisten, dengan kecenderungan kontribusi raft yang meningkat seiring bertambahnya kemampuan metode dalam mempertimbangkan interaksi tanah–raft–tiang secara lebih rinci. Mulai dari Meyerhof yang meninjau raft secara independen, PDR yang mempertimbangkan kekakuan relatif raft–tiang, hingga MIDAS yang merepresentasikan distribusi beban kolom, susunan tiang, dan stratifikasi tanah secara menyeluruh.

Nilai kontribusi raft hasil MIDAS sebesar 25,96% sedikit melampaui batas maksimum 25% yang disyaratkan SNI 8460:2017 untuk asumsi *load sharing* awal, dengan selisih hanya 0,96 poin persentase dari batas tersebut. Metode sederhana seperti Meyerhof dan PDR digunakan untuk estimasi tahap awal, sedangkan analisis FEM dianggap lebih representatif dalam menganalisis kekakuan secara menyeluruh sehingga dapat digunakan untuk verifikasi tahap akhir [10]. Studi yang sama juga menunjukkan bahwa mengabaikan kontribusi daya dukung raft dalam desain piled raft dapat menyebabkan kapasitas dukung izin sistem diremehkan hingga lebih dari 200% pada kondisi spasi tiang tertentu. Dengan demikian, batas 25% pada SNI 8460:2017 lebih tepat dipahami sebagai pedoman keamanan minimum pada tahap *preliminary design*, bukan batas mutlak pada tahap verifikasi akhir, sehingga deviasi kecil ini dinilai dapat diterima dan tidak mengindikasikan kesalahan pemodelan [14], [15]

Hasil MIDAS menunjukkan bahwa distribusi beban mendekati kombinasi 75% pada kelompok tiang dan 25% pada raft yang dipertimbangkan dalam evaluasi fondasi piled raft berdasarkan SNI 8460:2017. Penurunan maksimum, penurunan diferensial, gaya tekan tiang, dan rasio pemanfaatan juga masih berada dalam kriteria yang digunakan, sebagaimana dirangkum pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan hasil Meyerhof, PDR, dan MIDAS GTS NX

Parameter	Meyerhof	PDR	MIDAS	Kriteria	Evaluasi
Load sharing tiang	79.47%	76,91%	74,04%	$\geq 75\%$	OK
Load sharing raft	20,53%	23,09%	25,96%	$\leq 25\%$	OK
Penurunan maksimum	–	8,12 cm	6,684 cm	≤ 15 cm	OK
Rasio penurunan diferensial	–	–	0,000340	$\leq 1/300$	OK
Gaya tekan maksimum kepala tiang	–	–	541,749 kN	$\leq 627,810$ kN	OK
Gaya tekan maksimum elemen	–	–	543,659 kN	$\leq 627,810$ kN	OK
Rasio pemanfaatan maksimum	–	–	0,866	$\leq 1,00$	OK

* Deviasi kecil (0,96 poin persentase) dinilai dapat diterima, lihat pembahasan 3.7.

4. Kesimpulan

Konfigurasi 846 tiang yang dianalisis dalam penelitian ini terbukti mampu memikul beban struktur secara memadai pada kondisi pembebanan statis jangka pendek. Seluruh parameter kinerja fondasi, mulai dari penurunan, rasio pemanfaatan kapasitas tiang, hingga distribusi beban antara raft dan kelompok tiang, berada dalam batas aman sesuai kriteria SNI 8460:2017. Meskipun demikian, hasil ini perlu dimaknai dengan tetap memperhatikan lingkup analisis yang digunakan. Tahapan konstruksi dalam pemodelan ini disimulasikan menggunakan tipe Stress, yang merepresentasikan kondisi pembebanan segera tanpa memperhitungkan proses disipasi tekanan air pori dan penurunan konsolidasi yang berkembang seiring waktu pada lapisan tanah lempung. Dengan demikian, evaluasi terhadap kelayakan metode pelaksanaan bertahap belum dapat disimpulkan secara menyeluruh dari penelitian ini, dan memerlukan analisis lanjutan dengan tipe *construction stage* Consolidation untuk menangkap perilaku tanah yang bergantung pada waktu secara lebih representatif.

Beberapa langkah lanjutan disarankan untuk melkaukan kajian verifikasi kapasitas tiang di lapangan juga, baik melalui uji *Cone Penetration Test* atau *Pile Driving Analyzer* mengingat data penyelidikan tanah pada penelitian masih terbatas pada hasil uji N-SPT. Lalu analisis konsolidasi juga disarankan untuk mengevaluasi perilaku penurunan jangka panjang serta menilai kelayakan penerapan metode pelaksanaan bertahap secara lebih komprehensif. Pemantauan penurunan pascakonstruksi juga perlu dilaksanakan guna memverifikasi kesesuaian antara prediksi model numerik dan perilaku aktual fondasi di lapangan. Ketiga langkah tersebut secara kolektif akan memperkuat keandalan hasil desain serta memberikan dasar yang lebih kokoh bagi keputusan pelaksanaan konstruksi di lapangan.

Daftar Pustaka

- [1] H. G. Poulos, "Piled raft foundations: design and applications," *Géotechnique*, vol. 51, no. 2, pp. 95–113, 2001, doi: 10.1680/geot.2001.51.2.95.
- [2] M. F. Randolph, "Design methods for pile groups and piled rafts," in *Proc. 13th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, India, vol. 5, 1994, pp. 61–82.
- [3] B. Ateş and E. Şadoğlu, "Experimental and numerical investigation of load sharing ratio for piled raft foundation in granular soils," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 1662–1673, 2022, doi: 10.1007/s12205-022-1022-4.
- [4] A. Abdolrezayi and N. Khayat, "Comparative three-dimensional finite element analysis of piled raft foundations," *Computational Engineering and Physical Modeling*, vol. 4, no. 1, pp. 19–36, 2021, doi: 10.22115/CEPM.2020.234834.1111.
- [5] A. Ferchat, S. Benmebarek, and M. N. Houhou, "3D numerical analysis of piled raft interaction in drained soft clay conditions," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 14, Art. no. 394, 2021, doi: 10.1007/s12517-021-06783-3.
- [6] T. Schanz, P. A. Vermeer, and P. G. Bonnier, "The hardening soil model: formulation and verification," in *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, R. B. J. Brinkgreve, Ed. Rotterdam, The Netherlands: A. A. Balkema, 1999, pp. 281–296.
- [7] MIDAS IT, "Modified Mohr-Coulomb," *GTS NX User Manual*. [Online]. Available: https://manual.midasuser.com/en_common/gts%20nx/150/GTS_NX/Mesh/Property%2CCoordinate%2CFunction/Material/General_Material%28Behavioral_properties%29/Modified_Mohr-Coulomb.htm. [Accessed: Jul. 14, 2026].
- [8] Badan Standardisasi Nasional, *Persyaratan perancangan geoteknik*, SNI 8460:2017, Jakarta, Indonesia, 2017.
- [9] V. N. Vijayvergiya and J. A. Focht, Jr., "A new way to predict capacity of piles in clay," in *Proc. 4th Annual Offshore Technology Conf.*, Houston, TX, USA, 1972, pp. 865–874, Paper OTC 1718, doi: 10.4043/1718-MS.
- [10] L. T. Hoang, X. Xiong, and T. Matsumoto, "Effect of pile arrangement on long-term settlement and load distribution in piled raft foundation models supported by jacked-in piles in saturated clay," *Soils and Foundations*, vol. 64, no. 2, Art. no. 101426, 2024, doi: 10.1016/j.sandf.2024.101426.
- [11] G. G. Meyerhof, "Some recent research on the bearing capacity of foundations," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 16–26, 1963, doi: 10.1139/t63-003.
- [12] L. de Sanctis and A. Mandolini, "Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132, no. 12, pp. 1600–1610, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:12(1600).
- [13] E. Susila and N. Anggraini, "Soil-structure interaction of a piled raft foundation in clay – a 3D numerical study," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 48, no. 4, pp. 388–407, 2016, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2016.48.4.2.
- [14] D. K. Malviya, A. Ansari, and M. Samanta, "Settlement and load sharing behavior of piled raft foundation: a review," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 8, Art. no. 305, 2023, doi: 10.1007/s41062-023-01272-w.
- [15] D. Ahmed, S. N. L. bt Taib, T. Ayadat, and A. Hasan, "Numerical analysis of the carrying capacity of a piled raft foundation in soft clayey soils," *Civil Engineering Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 622–636, 2022, doi: 10.28991/CEJ-2022-08-04-01.