

ANALISIS DAYA DUKUNG PONDASI TIANG-RAKIT PADA DAERAH RAWAN GEMPA MENGGUNAKAN METODE POULUS DAN PROGRAM NUMERIS PLAXIS

Rini Kusumawardani¹, Henry Apriyatno², Rizki Julia Rachmawati³, Ririn Anggraini⁴

^{1), 2), 3), 4)} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang (UNNES)
email: rini.kusumawardani@unnes.ac.id ; email: rizkijulia94@gmail.com ; email: ririn.civil@gmail.com

Abstract: Yogyakarta are situated in the zone with high potential of seismicity. Based on Indonesia map seismicity area, it categorized in a seismic zone 4. The secondary effect of this earthquake phenomena is a soil settlement due to of decreasing of void volume of soil mass. Based on these issues, the foundation system of building is the primary factor which must be considered. This paper revealed the comparison of foundation behavior due to static by using Poulos Method and PLAXS 2D. Pile-raft designed by Poulos method was chosen as a subject of research. Analysis of liquefaction potential, soil settlement, carrying capacity, and the safety factor was analyzed by using CYCLIC 1D, 2D PLAXIS and Methods Poulos. For analysis by the Poulos method reached a soil settlement 4.3 cm and a safety factor 10.76. While by using PLAXIS 2D obtained 0.30 cm and 2,088 for soil settlement and safety factor respectively. Furthermore, a seismic motion of 9.2 scale of Richter magnitude are injected into analysis resistance of foundation.

Keywords : Pile-raft foundation, Poulos Method, soil settlement, safety factor

Abstrak: Kota Yogyakarta merupakan wilayah yang memiliki potensi sesismik yang tinggi berdasarkan peta potensi gempa Indonesia. Dalam peta tersebut dikatakan bahwa Kota Yogyakarta terletak pada zona seismik 4. Bahaya sekunder yang terjadi akibat peristiwa gempa adalah adanya penurunan tanah. Berdasarkan permasalahan ini, pemilihan sistem fondasi pada pada suatu bangunan adalah hal yang terpenting. Pada artikel ini dijelaskan mengenai perbandingan mengenai perilaku fondasi akibat beban statik menggunakan metode Poulos dan Plaxis 2D. Fondasi tiang rakit dianalisa dengan menggunakan metode Poulos dan Plaxis 2D. Analisis mengenai potensi likuifaksi, penurunan tanah, daya dukung fondasi dan faktor keamanan struktur dianalisis menggunakan CYCLIC 1D, Plaxis 2D dan Metode Poulos. Untuk analisis menggunakan metode Poulos pada fondasi rakit-tiang diperoleh nilai penurunan 4,3 cm dan faktor keamanan 10,76. Untuk analisis menggunakan Plaxis 2D diperoleh penurunan sebesar 0,30 dan angka keamanan pondasi tiang-rakit sebesar 2,088. Selain itu juga dilakukan analisis mengenai ketahanan fondasi ketika menerima beban gempa dengan skala magnitude 9.2 Richter.

Kata kunci : Pondasi tiang-rakit, metode Poulos, penurunan tanah, angka keamanan

PENDAHULUAN

Daerah Istimewa Yogyakarta merupakan salah satu daerah rawan gempa bumi di Indonesia. Pada tanggal 27 Mei 2006 terjadi gempa tektonik dangkal di Yogyakarta dengan kisaran kekuatan 6,3 skala richter selama 60 detik pada kedalaman 17,1 km. Pusat gempa bumi terletak di dekat pantai pada koordinat $8,007^{\circ}$ LS – $110,286^{\circ}$ BT atau terletak pada posisi ± 25 km barat daya kota Yogyakarta dan ± 115 km selatan kota Semarang (menurut catatan USGS Amerika Serikat) yang mengakibatkan lebih dari 5.700 orang tewas,

37.000 orang cedera, lebih 156.000 rumah dan struktur lainnya hancur total (Elnashai et al, 2006). Kota Yogyakarta merupakan wilayah yang termasuk dalam zona dengan seismisitas cukup tinggi dan aktif yang dikategorikan dalam zona seismik 4 (Departemen Pekerjaan Umum, 2004).

Berdasarkan alasan tersebut di atas, dalam upaya mitigasi bencana gempa bumi pada suatu struktur, maka yang terpenting dalam pelaksanaan perancangan dan pembangunan struktur adalah sistem pondasi yang digunakan. Struktur pondasi berfungsi

untuk meneruskan beban struktur atas ke lapisan tanah di bawahnya. Setiap pondasi harus mampu mendukung beban sampai batas keamanan yang telah ditentukan, termasuk mendukung beban maksimum yang mungkin terjadi, sehingga perlu adanya desain sistem pondasi yang tepat untuk jenis tanah pada daerah rawan gempa bumi.

Pemilihan jenis pondasi yang digunakan sangat tergantung pada jenis tanah dan struktur yang akan di topang. Pondasi tiang-rakit adalah pondasi yang mengkombinasikan antara tiang dan rakit. Alasan pemilihan pondasi tiang-rakit adalah penurunan pondasi terjadi secara bersama-sama dan cocok digunakan pada bangunan yang memiliki luasan bangunan yang besar (Noorlaelasari, 2010). Menurut Poulos (2000) kondisi tanah yang sesuai untuk pondasi tiang-rakit meliputi: lapisan tanah yang terdiri dari lempung keras/kaku; lapisan tanah yang terdiri dari pasir padat; dan tanah berlapis dengan tanah pendukung dibawah pondasi tiang tidak ada lapisan tanah lunak.

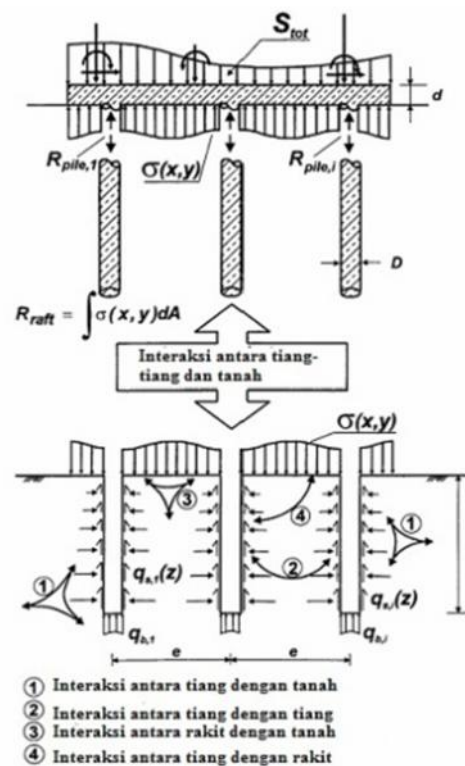
Adanya penambahan tiang pada pondasi rakit akan membantu mengatasi masalah penurunan yang terjadi, dengan memanfaatkan tahanan friksi tiang penurunan yang terjadi dapat diminimalisasi. Kedalaman tiang tidak harus mencapai tanah keras karena salah satu konsep pondasi tiang-rakit adalah "floating pile" sehingga tiang dianggap melayang tidak mencapai tanah keras.

Kombinasi kinerja antara komponen rakit, tiang pancang, dan lapisan tanah membuat jenis pondasi tiang-rakit efektif untuk mengurangi penurunan total yang terjadi pada struktur. Komponen rakit diharapkan dapat

menahan beban dengan tingkat keamanan yang cukup, sedangkan komponen tiang berperan dalam mereduksi penurunan yang terjadi pada tanah.

STUDI PUSTAKA

Katzenbach, et al (2000) mendefinisikan pondasi tiang-rakit sebagai jenis pondasi yang bekerja sebagai struktur komposit dengan memanfaatkan tiga elemen penahan beban, yaitu tiang pancang, pondasi rakit, dan jenis tanah di bawah struktur. Oleh karena itu, sebenarnya terdapat empat jenis interaksi yang terjadi dalam struktur pondasi tiang-rakit (Gambar 1). Keempat interaksi tersebut adalah interaksi antara tiang dengan tanah, interaksi antara tiang dengan tiang di sebelahnya, interaksi antara pondasi rakit dengan tanah, dan interaksi antara tiang dengan pondasi rakit.



Gambar 1. Jenis interaksi pada pondasi tiang-rakit

Untuk membuat estimasi awal mengenai perilaku dari pondasi tiang-rakit, sebuah metode mudah dikembangkan oleh Poulos dan Davis (1980) dan Randolph (1994). Metode ini melibatkan dua langkah utama, yaitu estimasi kapasitas beban ultimat dari pondasi dan estimasi perilaku beban-penurunan lewat hubungan sederhana tri-linear.

Hal pertama yang harus dilakukan setelah seluruh data beban diperoleh adalah mengestimasi kapasitas sistem pondasi tiang-rakit terhadap beban-beban struktur tersebut.

a) Daya dukung ultimat komponen rakit

$$p_{ur} = K_1 N_r \quad (1)$$

dimana:

p_{ur} = daya dukung ultimat komponen rakit (kPa)

N_r = NSPT rata-rata sepanjang kedalaman 1,5 kali lebar komponen rakit (tanpa satuan)

K_1 = faktor korelasi untuk komponen rakit (tanpa satuan)

b) Daya dukung ultimat komponen tiang

1) Tahanan friksi ultimat tiang

$$f_s = 2,8N_s + 10 \quad (2)$$

dimana:

f_s = tahanan friksi ultimat tiang (kPa)

N_s = NSPT rata-rata sepanjang tiang (tanpa satuan)

2) Tahanan ujung ultimat tiang

$$f_b = K_2 N_b \quad (3)$$

dimana:

f_b = tahanan ujung ultimat tiang (kPa)

N_b = NSPT didekat ujung tiang (tanpa satuan)

K_2 = faktor korelasi untuk komponen tiang (tanpa satuan)

Analisis yang harus dilakukan adalah analisis non-linear yang digunakan untuk mengestimasi hubungan antara beban dengan penurunan primer adalah sebagai berikut.

a) Perhitungan kekakuan komponen rakit (K_r)

$$K_r = \frac{G}{(1-\nu)} \beta_z \sqrt{4c} \quad (4)$$

dimana:

K_r = kekakuan komponen rakit (MN/m)

G_s = modulus geser tanah rata-rata hingga kedalaman ujung tiang (MPa)

z = koefisien berdasarkan dimensi rakit

b) Perhitungan kekakuan komponen tiang (K_p)

$$K_p = G_L T_0 \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \rho \frac{2\pi t_i}{\mu} \frac{(\mu)}{r_G} \frac{L}{r_G}}{1 + \frac{1}{\pi} \frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} \frac{t_i}{\mu} \frac{(\mu)}{r_G} \frac{L}{r_G}} \quad (5)$$

$$= \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right) \quad (6)$$

Persamaan 6 diatas mengandung beberapa koreksi, yaitu:

1) Koreksi untuk diameter tiang yang tidak seragam (*under-reamed pile*)

$$= \frac{r_b}{r_u} \quad (7)$$

2) Koreksi untuk tiang end-bearing (tiang fraksi)

$$= \frac{G_L}{G_b} \quad (8)$$

3) Koreksi untuk heterogenitas modulus tanah

$$\rho = \frac{G}{G} \quad (9)$$

4) Koreksi untuk rasio kekakuan tiang terhadap tanah

$$= \frac{E}{G} \quad (10)$$

5) Koreksi untuk kompresibilitas tiang

$$\mu l = \frac{L}{r} \sqrt{\frac{2}{5\lambda}} \quad (11)$$

6) Kekakuan grup tiang

$$K_{p\text{-sys}} = K_p \sqrt{n_p} \quad (12)$$

dimana:

K_p = kekakuan satu tiang tunggal (MN/m)

$K_{p\text{-sys}}$ = kekakuan grup tiang (MN/m)
= besar beban yang diaplikasikan pada rakit

L = panjang tiang (m)

R_o = radius tiang

G_L = modulus geser tanah pada kelamaan ujung tiang (sama dengan G_b) (MPa)

G_{avg} = modulus geser tanah rata-rata sepanjang tiang (MPa)

E_p = modulus Young tiang (MPa)

ν = angka poisson tanah

n_p = jumlah tiang

Adapun kekakuan dari sistem pondasi tiang-rakit dapat digambarkan secara matematis sebagai berikut:

$$K_p = \frac{1-0,6\left(\frac{K_r}{K_p}\right)}{1-0,6\left(\frac{K_r}{K_p}\right)} K_p \quad (15)$$

dimana:

$K_{p\text{-sistem}}$ = kekakuan sistem pondasi tiang-rakit (MN/m)

K_p = kekakuan grup tiang (MN/m)

K_r = kekakuan komponen rakit (MN/m)

Adapun proporsi beban yang ditahan oleh komponen tiang dalam sistem pondasi tiang-rakit dapat digambarkan secara matematis sebagai berikut:

$$\beta_p = \frac{1}{1+\alpha} \quad (16)$$

dengan,

$$\alpha = \frac{0,2}{1-0,8\left(\frac{K_r}{K_p}\right)} \left(\frac{K_r}{K_p}\right) \quad (17)$$

Persamaan di atas dapat digunakan untuk membuat kurva tri-linear yang menyatakan hubungan beban-penurunan. kapasitas tiang termobilisasi secara simultan satu sama lain, besarnya P_1 (Gambar 2.6) dapat dihitung berdasarkan

$$P_1 = \frac{P_u}{\beta_p} \quad (18)$$

dimana:

P_u = kapasitas beban ultimat grup tiang (MN)

β_p = proporsi beban yang ditahan oleh komponen tiang

Pembentukan kurva beban-penurunan tri-linear Poulos

1) Untuk $P < P_1$

$$S = \frac{P}{K} \quad (13)$$

dimana:

P = beban vertikal yang bekerja (MN)

$K_{p\text{-sistem}}$ = kekakuan aksial dari sistem pondasi tiang-rakit (MN/m)

S = penurunan yang terjadi (m)

2) Untuk $P > P_1$

$$S = \frac{P_1}{K} + \frac{P-P_1}{K} \quad (14)$$

dimana:

P = beban vertikal yang bekerja (MN)

S = penurunan yang terjadi (m)

$K_{p\text{-sistem}}$ = kekakuan aksial dari sistem pondasi tiang-rakit (MN/m)

K_r = kekakuan aksial dari sistem komponen rakit (MN/m)

METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian adalah di Kampus Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Desa Tlogorejo, Kecamatan Gamping, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Terletak pada koordinat x : 0425010 dan y : 9136836.

Bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- 1) Data N-SPT dari Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Desa Tlogorejo, Kecamatan Gamping, Kabupaten Sleman, Yogyakarta.
- 2) Data gempa diambil pada gempa Kep. Mentawai pada 13 September dengan 7,0 SR dalam format SMC.
- 3) Software ETABS Versi 9.6.0

ETABS (*Extended Three dimension Analysis of Building Systems*) adalah salah satu program komputer yang digunakan khusus untuk perencanaan gedung dengan konstruksi beton, baja, dan komposit. ETABS cenderung untuk mendesain gedung bertingkat banyak dengan jumlah *joint* yang lebih banyak daripada *software* SAP 2000 (Riza, 2015).

- 4) Software CYCLIC 1D

CYCLIC 1D adalah program *finite element* nonlinier yang digunakan untuk simulasi respon gaya lateral dinamis satu dimensi (1D). Hasil yang diperoleh menggunakan program ini adalah informasi mengenai kedalaman tanah yang berpotensi likuifaksi (Kusumawardani, 2015).

- 5) PLAXIS 2D Versi 9.0

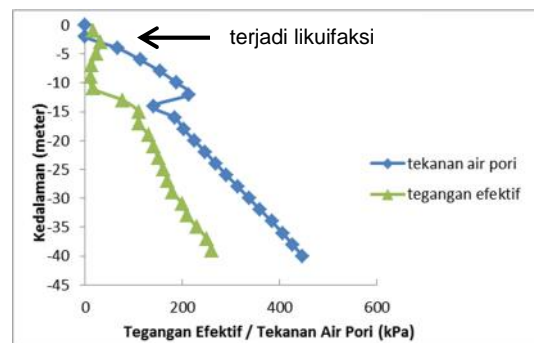
PLAXIS 2D merupakan suatu paket program yang meliputi deformasi elastoplastis statis, pemodelan tanah tingkat lanjut, analisis stabilitas, konsolidasi,

analisis keamanan, jaring elemen hingga yang diperbaharui dan aliran statis air tanah (Brinkgreve, 2015).

PEMODELAN DAN ANALISIS

a) Pemodelan dengan CYCLIC 1D

Seperti yang kita ketahui bahwa untuk mengetahui peristiwa likuifaksi terjadi pada kedalaman berapa meter perlu dilakukan analisis menggunakan *software* CYCLIC 1D. Secara geoteknik, tanah di Yogyakarta merupakan lapisan tanah pasir yang sangat tebal sampai kedalaman 40 meter dari permukaan tanah. Gradasi tanah pasir relatif seragam dengan nilai N-SPT yang cukup rendah pada daerah dekat permukaan dan cukup tinggi pada kedalaman-kedalaman tertentu. Muka air tanah terletak pada kedalaman 2 meter dari permukaan tanah yang sangat memungkinkan terjadinya peristiwa likuifaksi pada saat terjadi gempa. Output dari CYCLIC 1D adalah grafik tegangan efektif dan tekanan air pori.



Gambar 2. Hubungan tekanan air pori dan tegangan efektif pada CYCLIC 1D

Likuifaksi dapat terjadi karena meningkatnya tekanan air pori sehingga menyebabkan tegangan efektif tanah berkurang atau bernilai nol. Likuifaksi pada daerah UMY berdasarkan data N-SPT terjadi pada kedalaman 3 meter karena berdasarkan

hasil CYCLIC 1D tekanan air pori dan tegangan efektif bernilai nol pada kedalaman 3 meter. Potensi munculnya likuifaksi pada suatu elemen tanah berbanding lurus dengan kondisi kejenuhan tanah tersebut. Pada umumnya fenomena likuifaksi akan muncul ketika tanah berada pada kondisi *fully saturated*.

b) Analisis dengan Metode Poulos

Metode ini melibatkan estimasi kapasitas beban ultimat dari pondasi dan estimasi perilaku beban-penurunan lewat hubungan sederhana tri-linear. Perhitungan manual pondasi tiang-rakit menggunakan metode Poulos sebagai berikut.

Tabel 1. Analisis Metode Poulos

Tahapan	Notasi	Hasil	Satuan	
Daya Dukung Ultimit Rakit	Lr	25	m	
	Br	25	m	
	K1	90		
Daya dukung ultimat tiang	pur	1743,75	MN	
	Ps	3,05		
	Tahanan Friksi Ultimit Tiang	Nb	28	
		K2	325	
	Tahanan ujung tiang	fb	9100	KPa
		Pb	3,276	MN
	Daya dukung ultimat tiang dan FK	Pu	2730,29	MN
		FK	10,76	
	Kekakuan pondasi	c	12,5	
		d	12,5	
Kekakuan rakit	Kr	1517,57	MN	
		3,33		
	μL	1000		
Kekakuan satu tiang	Kp	1703,15	MN	
	Kp-sys	21272,4	MN	
Kekakuan grup tiang		2		
	Kpr	23036,7	MN	
		2		
	a	0,015		
	p	0,985		
Kekakuan sistem pondasi tiang-rakit	P1	1001,47	MN	
	S	4,34	cm	

c) Pemodelan menggunakan PLAXIS 2D

Data hasil desain yang digunakan pada analisis pondasi tiang-rakit menggunakan PLAXIS versi 9.0 adalah sebagai berikut.

- 1) Ukuran tiang = $0,6 \times 0,6 \text{ m}^2$
- 2) Total jumlah tiang = 156 buah tiang
- 3) Jumlah tiang yang dimodelkan = 13 buah tiang
- 4) Panjang tiang = 15 meter
- 5) Jarak antar tiang = 1,8 meter

Pada permodelan pondasi tiang-rakit ini menggunakan model *plane strain*. Permodelan ini digunakan untuk geometri dengan potongan melintang yang relatif seragam. Asumsi pembebanan yang digunakan adalah beban terpusat (*point load*) yang berada relatif pada satu barisan yang sama sepanjang sumbu z. Beban terpusat diasumsikan sebagai beban kolom yang menerus ke pondasi yang diperoleh dari *software* ETABS.

Tabel 2. Data Parameter Tanah dalam PLAXIS 2D

Simbol	LAPISAN					UNIT
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
Model	Pasir Sedang	Pasir Sedang	Lempung Kaku	Pasir Padat	Pasir Padat	
Jenis	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	
	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	
sat	21	20	18	22	22	kN/m ³
unsat	17	18	15	17	17	kN/m ³
E'	38500	38500	35000	45000	45000	kN/m ²
v'	0,25	0,25	0,2	0,3	0,3	
c'ref	5	5	30	23	23	kN/m ²
'	37,5	37,5	26	41	41	derajat

Tabel 3. Data Parameter Tiang dan Rakit dalam PLAXIS 2D

Nama	Tiang	Rakit	unit
EA ₁	1,99E+07	2,350E+07	kN/m
EI	5,98E+05	1,958E+06	kNm ² /m
D	0,6	1	m
W	14,40	24	kN/m ²
v	0,2	0,2	

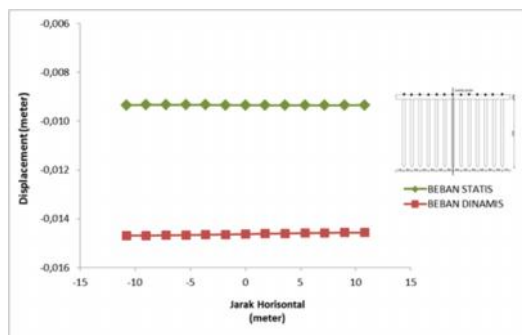
Tabel 4. Input Beban Terpusat Pada PLAXIS 2D

Titik	Beban (kN/m)
1	1906,66
2	1994,20
3	1988,37
4	1946,16
5	1857,47
6	1659,97

Hasil analisis penurunan dengan menggunakan PLAXIS 2D Versi 9.0 adalah sebagai berikut.

1) Rakit

a. *Displacement* rakit arah x

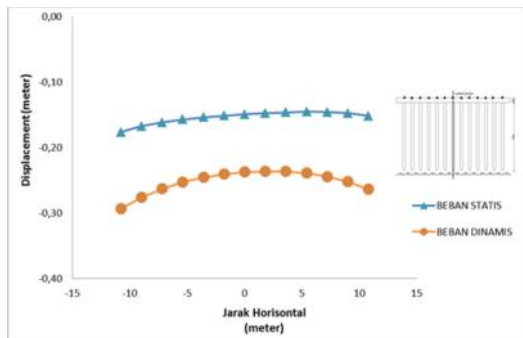


Gambar 3. Grafik *displacement* rakit arah x

Displacement arah x adalah perpindahan suatu titik pada rakit akibat pengaruh beban yang bekerja. Ketika struktur rakit diberi beban struktur tanpa gempa, nilai *displacement* arah x adalah 0,00934 meter pada jarak interval 1,8 meter dari *center line* ke arah x positif maupun negatif. Pada saat terjadi gempa, *displacement* arah x nilainya naik menjadi 0,01463 meter. Kenaikan nilai *displacement* sebesar 63,84% diakibatkan karena komponen rakit menerima beban dinamik (gempa) yang sangat kuat.

b. *Displacement* rakit arah y

Pada Gambar 4, hubungan *displacement* dengan jarak horisontal ketika tidak terjadi gempa terlihat bahwa *displacement* terbesar pada rakit akibat beban struktur terdapat pada jarak horisontal -10,8 meter dari *center line* (CL) atau dapat dikatakan berjarak 10,8 meter di sebelah kiri CL sebesar 0,176 meter. Hal ini dikarenakan beban struktur yang diterima oleh rakit lebih besar dibanding *displacement* dengan jarak horisontal 10,8 meter sebesar 0,152 meter. Sedangkan ketika terjadi gempa menunjukkan adanya perbedaan *displacement* yang sangat signifikan pada jarak horisontal -10,8 meter dari *center line* sebesar 0,29 meter. Perbedaan nilai *displacement* akibat pengaruh beban gempa hampir mencapai 100%.



Gambar 4. Grafik displacement rakit arah y

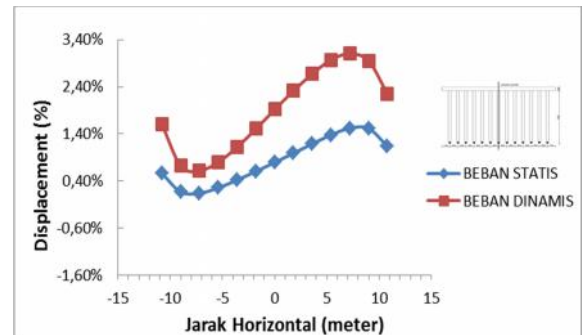
2) Tiang

a. Displacement arah x

Displacement arah x pada tiang dibagi menjadi dua yaitu persentase total displacement tiang dan persentase rata-rata displacement tiang. Tiang dibagi menjadi tiga titik peninjauan yaitu di atas, tengah, dan bawah. Peninjauan dilakukan setiap interval 1,8 meter dari center line (CL) ke arah x positif maupun negatif. Ketika tiang pada jarak -10,8 dari center line mengalami displacement sebesar 0,56%, lalu pada jarak -9,0 meter mengalami penurunan menjadi 0,16% dan kembali mengalami perubahan kenaikan displacement 1,51% pada jarak 9,0 meter dari center line dan mengalami penurunan pada jarak 10,8 meter yaitu sebesar 1,13%. Persentase total displacement arah x tanpa beban gempa, paling besar terjadi pada jarak 9,0 meter (perpindahan cenderung ke arah kanan). Persentase kenaikan total displacement tiang pada saat tidak terjadi gempa adalah 9,38%

Saat terjadi gempa, tiang pada jarak -10,8 meter dari center line mengalami displacement sebesar 1,60% lalu pada jarak -9,0 meter mengalami penurunan menjadi 0,72% dan kembali mengalami perubahan kenaikan displacement 3,10% pada jarak 7,2 meter dari

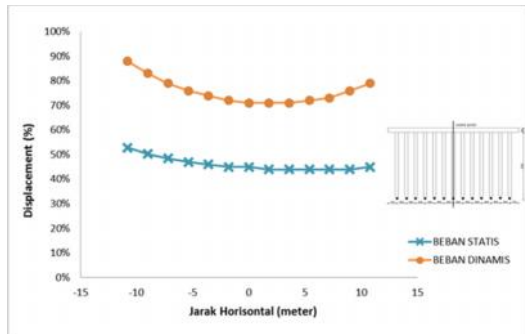
center line dan mengalami penurunan pada jarak 10,8 meter yaitu sebesar 2,24%. Persentase total displacement arah x tanpa beban gempa, paling besar terjadi pada jarak 7,2 meter (perpindahan cenderung ke arah kanan). Persentase kenaikan total displacement tiang terjadi gempa adalah 19,95%.



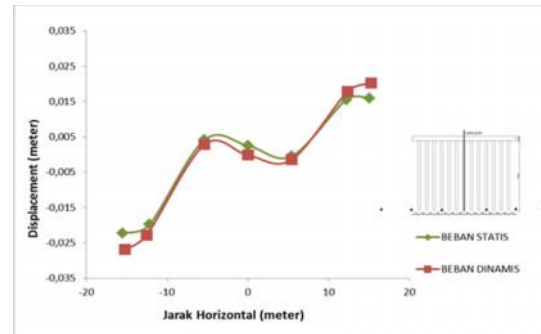
Gambar 5. Grafik displacement total tiang arah x

b. Displacement arah y

Pada Gambar 6 hubungan persentase total displacement tiang dengan jarak horisontal terlihat adanya perbedaan antara tidak terjadi gempa dan terjadi gempa hanya 35%. Persentase total displacement tiang maksimal pada saat tidak terjadi gempa di jarak horisontal -10,8 sebesar 53% sedangkan gempa sebesar 88%. Hal ini dikarenakan semakin berat beban yang diterima tiang akan mengakibatkan displacement yang tinggi, ditambah dengan pengaruh gempa pada tiang tersebut.



Gambar 6. Grafik persentase total *displacement* tiang arah y



Gambar 7. Grafik persentase total *displacement* tanah arah x.

3) Tanah

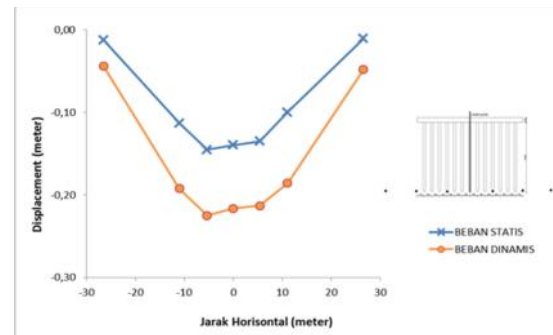
a. *Displacement* arah x

Displacement tanah arah x, ketika tanah pada jarak -5,4 dari *center line* mengalami *displacement* sebesar 0,0041% lalu pada titik center line 0 meter mengalami penurunan menjadi 0,0025% dan kembali mengalami penurunan *displacement* -0,00044% pada jarak 5,4 meter dari center line dan mengalami kenaikan pada jarak 12 meter yaitu sebesar 0,015% dan pada jarak 15,0 meter mencapai nilai 0,016%.

Ketika terjadi gempa *displacement* tanah arah x, ketika tanah pada jarak -5,4 dari *center line* mengalami *displacement* sebesar 0,0028% lalu pada titik *center line* mengalami penurunan menjadi -0,00016% dan kembali mengalami kenaikan *displacement* -0,0014% pada jarak 5,4 meter dari *center line* dan mengalami kenaikan pada jarak 12,3 meter yaitu sebesar 0,017% dan pada jarak 15,2 meter mencapai nilai 0,02%. Grafik *displacement* tanah arah x dapat dilihat pada Gambar 7.

b. *Displacement* arah y

Berdasarkan Gambar 8 menjelaskan *displacement* tanah ketika tidak terjadi gempa, pada jarak horizontal -26,54 meter dari CL diperoleh *displacement* tanah arah y sebesar 0,0125 meter. Tanah mengalami penurunan maksimal pada jarak horizontal -5,4 meter dari CL yaitu sebesar 0,145 meter. Sedangkan pada saat gempa, pada jarak horizontal -26,44 meter dari CL diperoleh *displacement* tanah sebesar 0,0439 meter.



Gambar 8. Grafik *displacement* tanah arah y

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode Poulos yang telah dibuat, sistem fondasi tiang-rakit berperan sangat signifikan. Hal ini disebabkan besarnya kapasitas tiang dalam menahan beban vertikal dibandingkan sistem rakit. Keberadaan tiang jelas meningkatkan kapasitas total dari sistem pondasi. Semakin besar ukuran, panjang, dan

jumlah tiang maka proporsi beban yang ditahan oleh sistem tiang akan semakin besar.

Dimensi dan jumlah tiang berpengaruh pada kinerja pondasi. Dimensi dan jumlah tiang sangat terkait pada kekakuan sistem tiang tersebut. Proporsi kemampuan pondasi dalam menahan beban di atasnya digambarkan melalui kekakuan komponen pondasi tersebut. Semakin besar dan banyak tiang, maka proporsi beban yang ditanggung tiang juga akan semakin besar.

Penggunaan tiang dalam jumlah banyak memang akan mempengaruhi kinerja pondasi, tetapi dari segi biaya tidak ekonomis. Pada pondasi tiang-rakit, daya dukung rakit harus diperhitungkan. Penggunaan pondasi tiang-rakit cocok digunakan pada tanah yang relatif kaku karena diharapkan rakit mampu menahan beban sehingga jumlah tiang dapat direduksi. Ketika jumlah tiang dianggap cukup mampu menyediakan kekuatan pada batas yang diijinkan, maka perubahan dimensi tiang bisa dilakukan untuk memperbesar kemampuan friksi tiang dalam menanggulangi penurunan yang terjadi.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari desain pondasi tiang-rakit ini adalah sebagai berikut.

- 1) Penurunan rakit pada system pondasi tiang-rakit dengan pembebanan statis menggunakan metode Poulos sebesar 4,34 cm dan hasil analisis program numeris tanpa beban gempa didapatkan *displacement* arah x sebesar 0,9346 cm dan *displacement* arah y sebesar 17,6 cm. Apabila beban gempa dimasukkan sebagai salah satu parameter, maka *displacement*

arah x sebesar 1,463 cm dan *displacement* arah y sebesar 29 cm

- 2) Untuk penurunan tanah tanpa adanya beban gempa akibat bekerjanya sistem pondasi tiang-rakit dengan pembebanan statis diperoleh nilai *displacement* arah x sebesar 1,5 cm dan *displacement* arah y sebesar 14,5 cm. Apabila beban gempa dimasukkan sebagai salah satu parameter, maka *displacement* arah x sebesar 2 cm dan *displacement* arah y sebesar 23 cm

DAFTAR PUSTAKA

- Brinkgreve, R.B.J., et al. (ed.). 2015. PLAXIS 2D Reference Manual 2015. Netherlands.
- De Sanctis, L., Mandolini, A., Russo, G. and Viggiani, C. (2001). *Some remarks on the optimum design of piled rafts. personal communication of paper submitted for publication.*
- Elnashai, A.S., Kim, S.J., Gun, Y.J., and Sidarta, D., "The Yogyakarta Earthquake of May 27, 2006", MAE Center Report No. 07-02, 570, 2007.
- Horikoshi, K., & Randolph, M. F. (1996). *Research report No. G:1179: A contribution to optimum design of piled rafts.* Nedlands: Department of Civil and Resource Engineering, University of Western Australia.
- Katzenbach, R., Arslan, U., & Moormann, C. (2000). Piled raft foundation projects in Germany. In J. A. Hamsley (Ed.). *Design applications of raft foundations* (pp. 323-391). London: Thomas Telford Publishing.
- Kusumawardani, R., Lashari, Nugroho, U. & Tri Cahyo H. (2015). Analisis Kenaikan Tekanan Air Pori Pada Pasir Yogyakarta Menggunakan Metode Cyclic Shear-Strain Controlled, Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan, Nomor 1 Volume 17, Januari 2015
- Kusumawardani, R., Suryolelono, K.B., Suhendro, B. & Rifai, A.. (2016). The

- Dynamic Response of Unsaturated Clean Sand at A Very Low Frequency, International Journal of Technology, Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan, Volume 1, Januari 2016
- Muntohar, Agus Setyo. 2010. Mikro-Zonasi Potensi Likuifaksi dan Penurunan Tanah Akibat Gempa Bumi.
- Natasya, B. 2011. *Studi Pemakaian Pondasi Tiang-Rakit pada Sebuah Proyek Apartemen di Jakarta dengan Menggunakan Metode Konvensional Poulus dan Plaxis Dua Dimensi*. Tugas Akhir di Jurusan Teknik Sipil Universitas Indonesia, Jakarta.
- Sulistiyani, D.R., Distya Dea Rena Kalista. 2016. *Desain Gedung 20 Lantai + 1 Basement di Jalan Diponegoro Semarang*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- Poulos, H. G. (2000). *Practical design procedures for piled raft foundations*. Ed. J. A. Hamsley. London: Thomas Telford Publishing.
- Poulos, H. G. (2000). *Pile-raft interaction – Alternative methods of analysis. Developments in theory*. Geomechanics, Ed. D. W. Smith, & J. P. Carter, Balkema, Rotterdam, 445-468
- Poulus, H.G. (2001). *Pile Raft Foundations: Design and Applications*. Geotechnique 51, No 2, pp 95-113.
- Poulos, H. G. (2001). *Methods of analysis of piled raft foundations*. A report prepared on behalf of technical committee, TC18 on piled foundations, International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Prakoso, W. A. and Kulhawy, F. H. (2000). *Contribution to piled raft foundation design*. Jnl. Geot. and Geoenv. Eng., ASCE, 127(1): 17-24.
- Randolph, M. F., & Wroth, C.P. (1978). *Analysis of deformation of vertically loaded piles*. *Journal Geotechnical Engineering Div, ASCE* 104(12): 1465-1488.
- Randolph, M. F. (1994). *Design methods for piled groups and piled rafts. State-of-the-art report*. Paper presented at the 13th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, 61-82.
- Richart, Jr., F.R., Hall, Jr., J.R., & Woods, R.D. (1970). *Vibrations of soils and foundations*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M., 1971, Simplified Procedure for Evaluation Soil Liquefaction Potential, *Journal of soil mechanics and foundation, Division, ASCE*, vol.97. No.9, 1249 – 1273.
- Soebowo, Eko., Adrin Tohari, dan Dwi Sarah. 2007. *Studi Potensi Likuifaksi di Daerah Patahan Opak Patalan-Bantul Yogyakarta*.
- Tan, Y.C., & Chow, C.M. (2004). *Design of piled raft foundation on soft ground*. Thaher, M., & Jessberger, H. L. (1991). *The behaviour of pile-raft foundations, investigated in centrifuge model tests*. Centrifuge 91, Boulder, Colorado, pp. 101-106.
- Thaher, M., & Jessberger, H. L. (1991). *Investigation of the behaviour of pile-raft foundations by centrifuge modelling*. Proc. 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 597-603.
- Viggiani, C. (2001). *Analysis and design of piled foundations*. 1st Arrigo Croce Lecture, Rivista Italiana de Geot., 1/2001: 47-75.
- <http://www.strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD>. accessed November 10, 2015.
- <http://www.vsi.esdm.go.id>. accessed November 2, 2015.

