

STUDI ANALISIS PERILAKU RAFT-PILED FOUNDATION BERDASARKAN METODA ELEMEN HINGGA 3D NONLINIER

Harpito¹, Abdul Hakam², dan Rina Yuliet³

ABSTRAK

Simulasi numerik dengan menggunakan metoda elemen hingga 3D non linier SAP2000 pada *raft-piled foundation* yang dibebani secara vertikal disajikan dalam makalah ini. Untuk studi perbandingan, model numerik *raft foundation* dan *group pile foundation* sudah di teliti sebelumnya. Model numerik yang mengadopsi hukum konstitutif elastis non linier untuk bahan. Beban dan perpindahan vertikal dari model yang diamati. Perilaku *raft-piled foundation* dibandingkan dengan *group pile foundation* ini kemudian diselidiki. Hasil dengan menggunakan beban eksternal yang sama menunjukkan bahwa *raft-piled foundation* memiliki penurunan terkecil dibandingkan dengan yang lain. Dalam hal tagangan, *raft* menunjukkan kontribusi transfer beban ke tanah di bawahnya kemudian juga pile. Dalam satu sistim *raft-piled foundation* memiliki sinergity impact. Dalam rangka untuk memperkirakan daya dukung sistem *raft-piled foundation*, disarankan bahwa kontribusi *raft* harus dimasukkan dalam penambahan *pile*. Daya dukung total sistim *raft-piled foundation* merupakan penjumlahan dari kapasitas masing-masing pile ditambah dengan kapasitas dari *raft* di atas pile.

Kata kunci : metoda elemen hingga 3D non linier, *raft-piled foundation*, beban-perpindahan, daya dukung.

1. PENDAHULUAN

Beberapa penelitian tentang sistem *raft pile* ini telah dilakukan, diantaranya adalah Poulos (1976). Penelitian beliau menggunakan sebuah metode yang disederhankan untuk mendapatkan kurva load-displacement terhadap kegagalan pada pondasi tiang pancang atau sistem *raft pile*. Metodenya serupa dengan prinsip yang digunakan untuk tiang pancang diameter besar dan dengan mengasumsikan bahwa untuk pembebanan dibawah kondisi undrained, kondisi elastis dapat mempengaruhi beban dimana tiang pancang akan mengalami kegagalan bila tidak dipasang cap (penutup tiang pancang).

Raft-piled foundation adalah merupakan sistem perpaduan antara sejumlah pondasi tiang(pile) dengan pondasi rakit (raft) yang bekerja secara satu kesatuan dan bersamaan. *Raft-piled foundation* (dapat disebut tiang rakit) biasanya merupakan pondasi melayang (*floating foundation*) yang dapat digunakan untuk mendukung beban-beban bangunan pada deposit tanah ringan, Hakam.A (2008).

Davis and Poulos (1972) mengajukan metode analisis dan disain sistem *raft-piled foundation*. Namun metode yang diajukan lebih didasarkan pada analisis kelompok tiang dan bukan berdasarkan perilaku dari system tersebut. Sehingga, formula yang disampaikan tidak cukup dapat menggambarkan perilaku dari system pondasi tersebut.

¹ Mahasiswa Pascasarjana, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas, harpito82@gmail.com

² Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas, ahakam2008@yahoo.com

³ Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas rina@ft.unand.ac.id

Sejauh ini, formula dalam perhitungan efisiensi kelompok tiang belum memperhitungkan pengaruh dari kepala tiang (*pile cap*) itu sendiri. Perhitungan beban total dengan mempertimbangkan kontribusi dari *pile cap* telah dilakukan dengan menggunakan simulasi numerik oleh Valliappan et al (1999). Kelompok tiang dengan pengaruh dari pile cap dalam mentransfer beban kedalam tanah pendukung selanjutnya didefinisikan sebagai pondasi tiang rakit (*raft-piled foundation*).

Raft-piled foundation biasanya direncanakan untuk mendukung beban pada tanah lunak dengan ujung tiang tidak mencapai lapisan tanah keras. Dengan kondisi tersebut, maka pondasi tiang (*pile foundation*) bersamaan dengan pondasi rakit (*raft foundation*) di atasnya akan bekerja bersamaan untuk mentransfer beban kedalam tanah.

2. DAYA DUKUNG SISTIM RAFT-PILED FOUNDATION

Beban maksimum yang dapat ditahan oleh sistem *raft-piled foundation* lebih besar dibandingkan total penjumlahan beban yang dapat ditahan oleh tiang-tiang dan telapak yang memberikan distribusi terhadap sistem tersebut. Meskipun tiang-tiang memberikan distribusi yang lebih besar pada sistem tiang rakit, akan tetapi perilaku beban-perpindahan untuk sistem tersebut lebih mendekati perilaku beban-perpindahan telapak. (Hakam.A, 2008).

Efisiensi dari sistem *raft-piled foundation* dapat melampaui nilai lebih besar dari 100% (terjadi *sinergy impact* dalam bentuk satu sistem), akan tetapi untuk keperluan praktis, kapasitas daya dukung sistem *raft-piled foundation* dapat ditentukan dari penjumlahan dari kapasitas masing-masing pile ditambah dengan kapasitas dari raft diatas pile. Hakam. A.(2008) mengusulkan formula untuk mengesitmasi daya dukung total untuk *raft-piled foundation* yang berada diatas tanah lunak dengan rumusan sebagai berikut;

$$Q_T = Q_R + \Sigma(Q_P + Q_S) \quad (1)$$

Dimana: Q_T adalah kapasitas dukung total *raft-piled foundation*, Q_R adalah kapasitas rakit, Q_P adalah kapasitas ujung tiang, Q_S adalah kapasitas sisi atau gesek tiang.

Bentuk umum dari kapasitas daya dukung batas (*ulimate load capacity*) *raft-foundation* pada tanah lunak dapat di tulis sebagai berikut;

$$Q_u = A_b F_t c_u N_c^* \quad (2)$$

dimana c_u adalah kohesi kondisi undrained pada tanah dibawah dasar pondasi, A_b adalah luas penampang dasar pondasi dan N_c^* faktor kapasitas daya dukung yang nilainya bervariasi tergantung dari nilai sudut geser dalam tanah. Faktor kapasitas daya dukung untuk tanah lempung lunak dalam kondisi pembebanan undrained dengan sudut geser dalam tanah sama dengan nol, nilai N_c^* adalah 5,14 (berdasarkan metoda Meyerhof). F_t adalah faktor yang mendefinisikan bentuk dari keruntuhan geser tanah pendukung di bawah pondasi. Untuk pondasi berbentuk bujursangkar dengan jenis keruntuhan yang umum terjadi pada tanah padat, nilai F_t tersebut adalah 1,3 dan untuk keruntuhan lokal nilainya adalah 0,867. Untuk keruntuhan jeblok (*punch failure*) seperti pada tanah lempung lunak, nilai F_t tersebut berkurang dari harga-harga di atas, nilainya adalah 0,45 (Hakam dkk, 2005). Untuk pondasi rakit persegi panjang dengan panjang berkisar dua kali lebarnya, nilai Q_R harus direduksi dengan faktor 0.77 sebagai pengganti faktor bentuk (*shape faktor*).

Untuk tanah lempung jenuh *undrained* dengan sudut geser dalam tanah sama dengan nol, daya dukung batas dari ujung tiang adalah:

$$Q_p = A_p c_{u(p)} N_c \quad (3)$$

Dengan $c_{u(p)}$ adalah kohesi tanah tak ter drainase pada ujung tiang, A_p adalah luas penampang ujung tiang dan N_c adalah faktor daya dukung ujung. Nilai N_c dapat diambil sebesar 9 untuk metode Meyerhof 5,7 untuk metode Jambu.

Selanjutnya adalah total tahanan geser sepanjang tiang dapat dihitung dengan menjumlahkan unit tahanan tiang, f tiap bagian panjang ΔL sebagai:

$$Q_s = \Sigma(f\Theta\Delta L) \quad (4)$$

Dengan Θ adalah keliling tiang untuk bagian/selang panjang tiang ΔL . Untuk keperluan perencanaan praktis, kapasitas daya dukung batas selanjutnya dibagi dengan faktor keamanan, SF bernilai 1.5 hingga 4.0.

Nilai unit tahanan geser f yang disumbangkan oleh interaksi tanah dengan sisi tiang sepanjang penanaman dapat dihitung dengan menggunakan beberapa formula yang tersedia. Metoda-metoda yang diberikan umumnya mengasumsikan adanya tahanan geser diakibatkan tahanan pasif tanah sepanjang sisi tiang. Untuk metoda yang menggunakan nilai c_u unit tahanan geser sisi tiang persatuan luas sisi tiang dapat ditentukan dengan (metoda λ) sebagai berikut (Vijayvergia dan Focht, 1972);

$$f = \lambda(\sigma'_v + 2c_u) \quad (5)$$

Dimana λ adalah faktor empiris dengan nilai antara 0.5 pada permukaan dan secara berangsur berkurang menjadi 0.4 untuk kedalaman penetrasi 3m, 0.3 untuk 7m, 0.2 untuk 16m, dan 0.12 untuk 40m atau lebih. Unit tahanan geser tiap satuan panjang dari tiang dapat pula diekspresikan dengan menggunakan faktor adhesi (metoda λ) antara tiang dan tanah dengan persamaan sebagai berikut:

$$f = \alpha c_u \quad (6)$$

Dimana α adalah faktor adhesi empiris. Nilai α berada pada rentang 1 untuk $c_u \leq 50 \text{ kN/m}^2$, kemudian secara berangsur berkurang menjadi 0.5 untuk $c_u = 100 \text{ kN/m}^2$ dan menjadi 0.25 untuk $c_u \geq 250 \text{ kN/m}^2$.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Metode analisis dalam penelitian ini mengacu pada metode elemen hingga tiga dimensi (3D FEM) melalui perangkat lunak SAP2000 (Lisensi Jurusan Teknik Sipil Universitas Andalas). Dalam analisis, raft dan pile berada dalam keadaan elastis. Seperti yang disebutkan oleh Baziar. Asumsi ini relatif berlaku untuk sistem *raft-pile foundation* yang mengalami kondisi dalam rentang beban layanan (Baziar 2009).

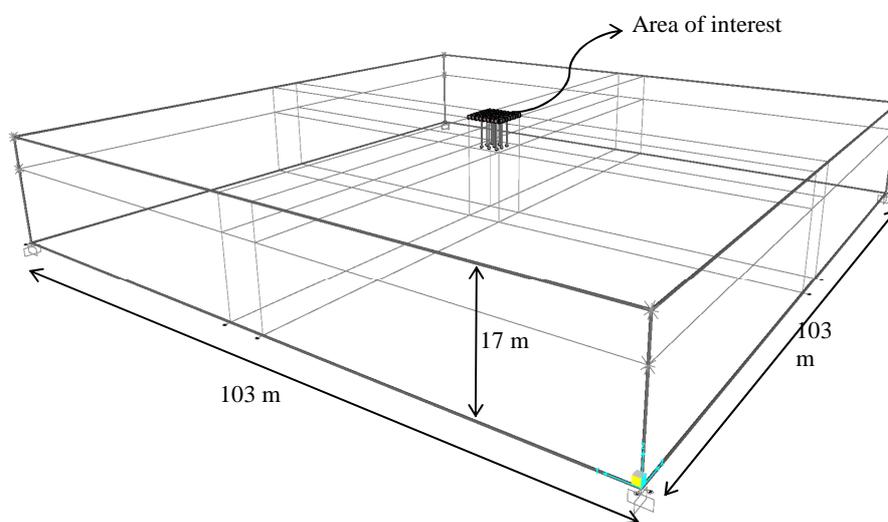
Konstruksi *raft-pile foundation* yang dianalisis dalam penelitian ini memiliki tiga komponen yang saling terkait. Komponen pertama adalah lapisan media tanah berupa tanah lunak homogen dengan lebar 103 meter, panjang 103 meter dengan kedalaman 17 meter. Kemudian komponen struktur pelat beton bertulang (raft) K350 dengan dimensi 6,0 meter x 6,0 meter tebal 30 cm dan tiang pancang beton bertulang (pile) K350 dengan diameter 25 cm dan panjang 5,0 meter dengan jumlah $3 \times 3 = 9$ buah. Lapisan tanah dan konstruksi raft dimodelkan dengan menggunakan elemen solid tiga dimensi sedangkan pile dimodelkan dengan menggunakan elemen frame. Parameter tanah dan beton yang digunakan dalam pemodelan dan analisis disajikan dalam **Table 1**. Pembebanan yang

diberikan pada sistem pondasi dalam analisis ini berupa beban statik aksial (*monotonic*) secara bertahap (*increment load*) sampai pondasi mengalami keruntuhan (*failure condition*).

Selama proses analisis, sisi-sisi model serta dasar model tidak diizinkan untuk berpindah keluar dari domain yang dianalisis. Untuk maksud tersebut, pada sisi-sisi model diberikan syarat batas (*boundaries condition*) berupa perletakan *rolled*, dimana arah bebas tegak lurus terhadap sisi model analisis, sementara sisi dasar model diberi perletakan *fixed*. Model analisis dan boundaries condition diperlihatkan pada *Gambar 1*.

Tabel 1. Parameter Material Yang Digunakan Dalam Pemodelan

No	Material Propeties		Concrete Of Raft	Concrete Of Pile	Soft Soil	Interface
			K-350	K-350	qu-22,5	R-0,8
1	Concrete Compressive Strenght	f_c (Mpa)	28.50	28.50	-	-
2	Soil Compressive Strenght	qu (Mpa)	-	-	0.0225	0.0180
3	Cohesi Undrained	C_u (kPa)	-	-	11.25	9.0
4	Young's Modulus	E (kPa)	2.51×10^7	2.51×10^7	300	240
5	Poisson's Ratio	ν	0.2	0.2	0.35	0.4
6	Unit Weight	γ (kN/m ³)	24.5	24.5	18.0	18.0
7	Friction Angle	ϕ (°)	-	-	10.0	8.0
8	Dilatancy Angle	Ψ (°)	-	-	0.0	0.0
9	Coefficient Of Thermal	A	$9,90 \times 10^{-6}$	$9,90 \times 10^{-6}$	3.50×10^{-5}	3.50×10^{-5}



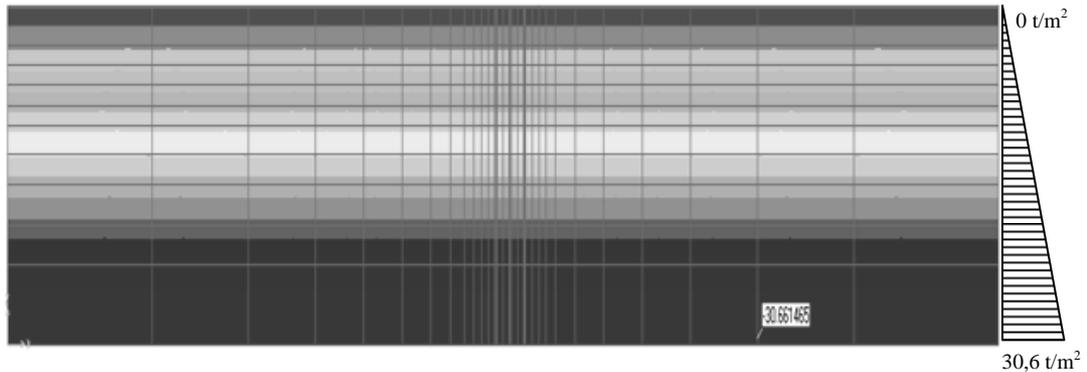
Gambar 1. Model Analisis

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Kondisi Awal (*Initial Conditions*)

Initial Conditions merupakan kondisi yang menggambarkan tegangan efektif dari tanah yang didefinisikan dengan cara menganalisis model yang hanya mengalami pembebanan dari berat sendiri tanah saja. Dari hasil analisis didapatkan kontur tegangan yang terjadi akibat berat sendiri berupa tegangan efektif dari tanah dengan besaran yang hampir mendekati sama dengan tegangan

efektif yang di defenisikan dengan formula empiris yaitu $\sigma' = \gamma h$ seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2**. Tegangan efektif maksimum yang terjadi didasar tanah adalah sebesar 30,661 t/m². Sementara dengan formula empiris didapatkan tegangan efektif $\sigma' = \gamma h = 1,8 \text{ t/m}^3 \times 17 \text{ m} = 30,6 \text{ t/m}^2$. Dari hasil analisis dengan SAP2000 (**Gambar 2**) hasil analisis menunjukkan nilai tegangan efektif yang mendekati dari hasil perhitungan dengan menggunakan formula empiris. Simpangan yang terjadi hanya 0,2% (hasil analisis SAP2000 0,2% lebih besar dari hasil perhitungan formula empiris)



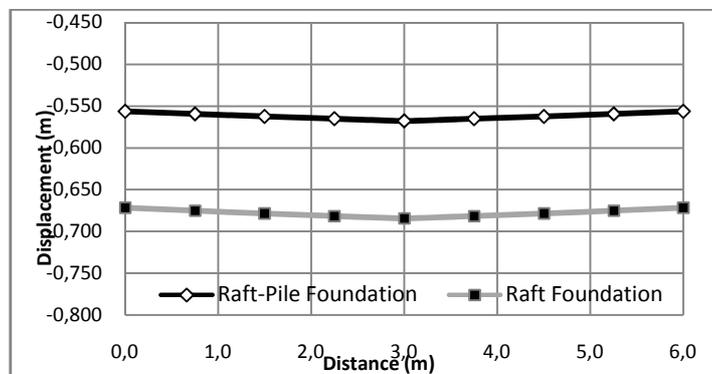
Gambar 2. Kontur Teganga Efektif

4.2. Penurunan Pondasi

Dengan beban vertikal yang sama yang diberikan di atas sistim pondasi, penurunan maksimum pondasi disajikan dalam **Tabel 2**. Penurunan maksimum setiap jenis model memberikan nilai cukup besar dibandingkan pelaksanaan sebenarnya. hal ini terjadi karena beban vertikal yang bekerja di atas pondasi yang cukup besar sedangkan parameter tanah merupakan tanah lunak. Namun, penurunan *raft-piled foundation* memberikan nilai terkecil dibandingkan dengan yang lain. Dalam kata lain untuk penurunan izin sama yang, *raft-pile foundation* dapat menahan beban yang lebih besar dibandingkan model sistim pondasi yang lain.

Tabel 2. Penurunan Maksimum Pondasi Dengan Beban Yang Sama

Jenis Pondasi	Penurunan (cm)	Rasio terhadap raft
Raft Foundation	43.16	100%
Group Pile Foundation	56.27	130% (30% lebih besar)
Raft-Piled Foundation	36.46	84% (16% lebih kecil)

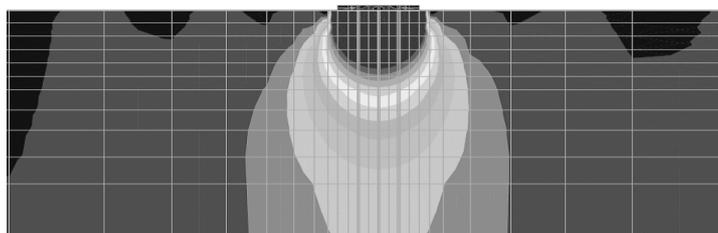


Gambar 3. Perbandingan Penurunan *Raft-Foundation* dan *Raft-Piled Foundation*

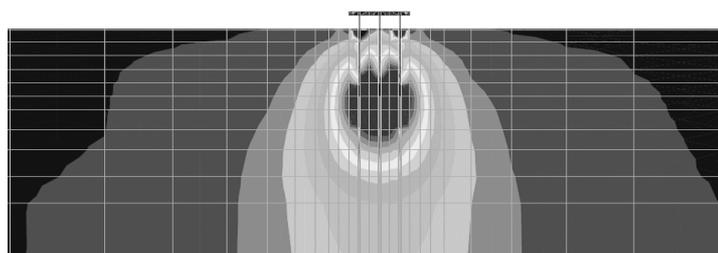
Kontur penurunan hasil analisis SAP2000 tidak menampakkan perbedaan yang signifikan, mungkin karena skala yang besar. Untuk menampakkan perbedaan yang tegas antara penurunan *raft-foundation* dan *raft-piled foundation*, maka penurunan pada titik-titik sepanjang *raft* diplotkan pada suatu kurva seperti pada **Gambar 3**. Pada **Gambar 3** dapat dilihat perbedaan yang cukup signifikan dari penurunan *raft-foundation* terhadap *raft-pile foundation*, dan terlihat bahwa pile dapat berfungsi untuk mereduksi penurunan.

4.3. Tegangan Normal dan Tegangan Geser

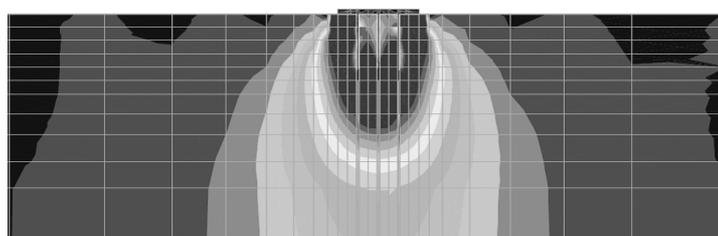
Tegangan normal dalam tanah pada *raft foundation* berkonsentrasi tepat di bawah dasar *raft*. Kemudian semakin jauh dari dasar *raft*, tegangan berkurang secara bertahap (**Gambar 4**). Untuk *group pile foundation*, tegangan normal berkonsentrasi hanya sekitar ujung pile, dan juga berkurang secara bertahap menjauh dari tiang. Sementara, di sepanjang tiang, tegangan normal tidak signifikan, hal itu dapat dipahami karena di daerah ini, tegangan geser yang dominan (**Gambar 5 dan 8**). Untuk sistem *raft-piled foundation*, kompresi dalam tanah berkonsentrasi di dua wilayah, tepat di dasar rakit dan di daerah sekitar ujung pile. Sementara itu di sepanjang pile antara daerah tersebut, tegangan normal berkurang sebagaimana halnya yang ditunjukkan dalam *group pile foundation*. Hal ini menunjukkan bahwa perilaku tegangan normal tanah adalah kombinasi antara raft dan pile (**Gambar 6**). Dalam kata lain, beban vertikal di bagian atas sistem *raft-piled foundation* ditransfer sebagai tegangan normal di bawah tanah di bawah dasar raft serta di bawah ujung pile.



Gambar 4. Tegangan Vertikal *Raft Foundation*

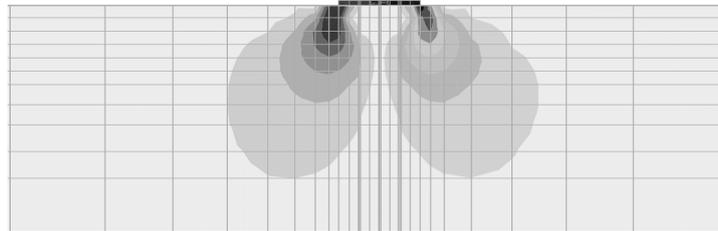


Gambar 5. Tegangan Vertikal *Group Pile Foundation*

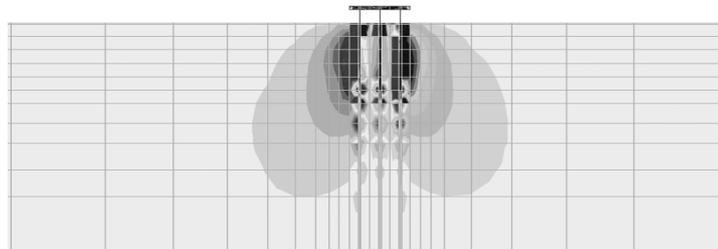


Gambar 6. Tegangan Vertikal *Raft-Piled Foundation*

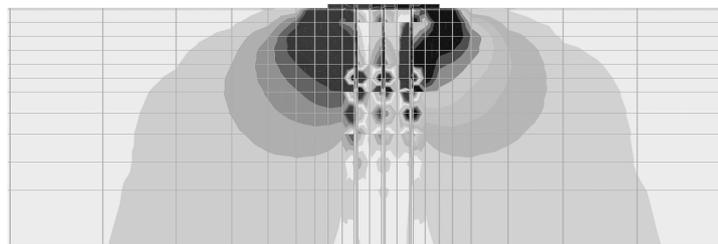
Gambar 7 hingga **Gambar 9** menunjukkan tegangan geser untuk *raft foundation*, *group pile foundation* dan *raft-piled foundation* di bawah masing-masing pondasi. *Raft-piled foundation* memberikan tegangan geser yang lebih besar dibandingkan dengan *raft foundation* dan *group pile foundation*. Ini berarti bahwa tanah menghasilkan area tegangan geser yang lebih besar dan hal ini menunjukkan bahwa *raft-piled foundation* memberikan nilai kapasitas beban yang lebih besar pula.



Gambar 7 Tegangan Geser Dibawah *Raft Foundation*



Gambar 8 Tegangan Geser Di Bawah *Group Pile Foundation*



Gambar 9 Tegangan Geser Di Bawah *Raft- Pile Foundation*

4.4. Penentuan Beban Ultimit

Perhitungan beban setiap sistem pondasi diperlihatkan pada **Tabel 3**. Dari kurva *load-displacement* yang didapatkan diambil garis singgung dari titik awal kurva dan garis singgung dari titik akhir lengkung pertama kurva atau titik sebelum terjadinya perubahan lengkung dari kurva. Perpotongan antara dua garis singgung tersebut didefinisikan sebagai beban ultimit (P_u) pada sumbu-y dan penurunan izin (S_i) pada sumbu-x. Kurva *load-displacement* masing-masing sistem pondasi diperlihatkan pada **Gambar 10** sampai dengan **Gambar 12**.

Garis singgung kurva *load vs displacement* ditentukan dengan cara mendefinisikan persamaan garis singgung dari masing-masing kurva yaitu persamaan garis singgung melalui titik awal kurva dan persamaan garis singgung melalui titik akhir lengkung pertama kurva. Dengan mendefinisikan persamaan garis singgung tersebut maka akan dengan mudah dan akurat dapat menggambarkan garis singgung dari masing-masing kurva. Disamping itu adanya persamaan garis singgung ini juga akan memudahkan untuk menentukan beban ultimit dari kurva *load vs displacement* masing-masing sistem pondasi. Dimana beban ultimit dapat ditentukan dengan mencari titik perpotongan

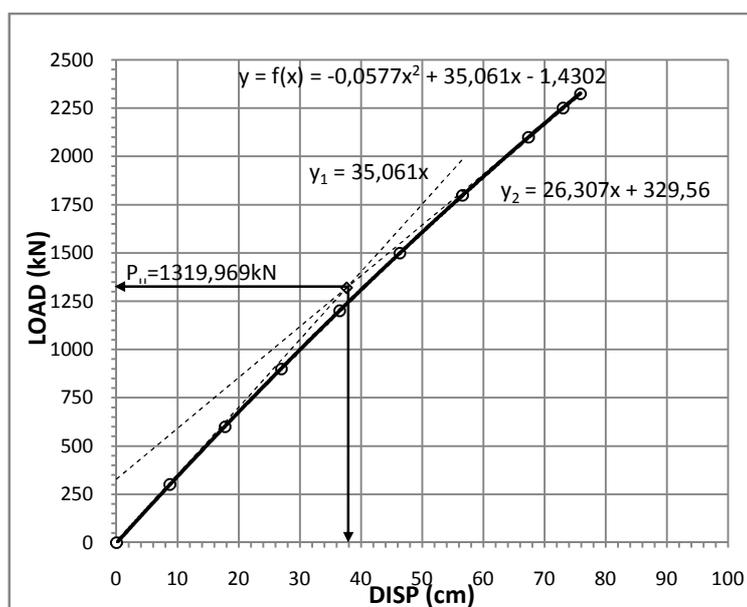
dari dua garis singgung kurva yaitu perpotongan antara garis singgung awal dengan garis singgung akhir. Koordinat dan titik potong garis singgung hasil perhitungan di sajikan pada Tabel 4.

Tabel 3. Perhitungan Beban Yang Bekerja Pada Sistim Pondasi

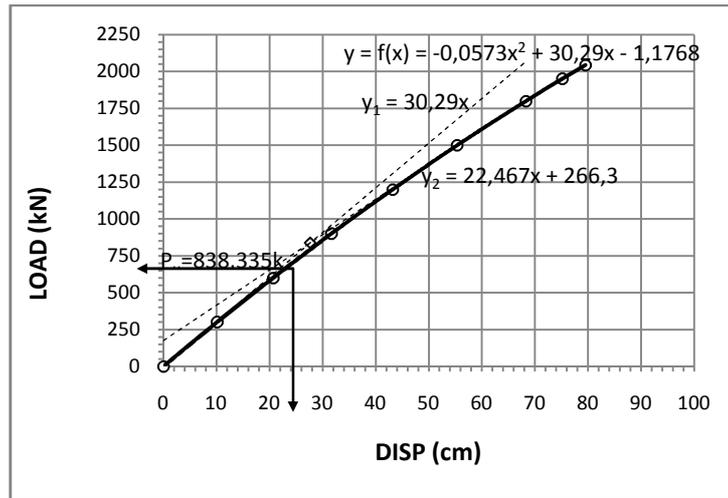
Step	Total Load (kN)	Raft Foundation			Group-Piled Foundation			Raft-Piled Foundation		
		max. sum of step	Load of step (kN)	Disp. (cm)	max. sum of step	Load of step (kN)	Disp. (cm)	max. sum of step	Load of step (kN)	Disp. (cm)
0	3000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1		0.1	300	10.17	0.1	300	13.19	0.1	300	8.74
2		0.2	600	20.69	0.2	600	26.87	0.2	600	17.70
3		0.3	900	31.68	0.3	900	41.14	0.3	900	26.94
4		0.4	1200	43.16	0.4	1200	56.28	0.4	1200	36.46
5		0.5	1500	55.30	0.45	1350	64.33	0.5	1500	46.32
6		0.6	1800	68.27	0.5	1500	73.00	0.6	1800	56.61
7		0.65	1950	75.12	0.501	1503.5	73.12	0.7	2100	67.39
8		0.681	2044.2	79.49	0.507	1522.2	74.27	0.75	2250	73.00
9		0.681	2044.2	79.49	0.508	1523.7	74.35	0.775	2325.1	75.86

Tabel 4. Koordinat Dan Titik Potong Garis Singgung Masing-Masing Kurva

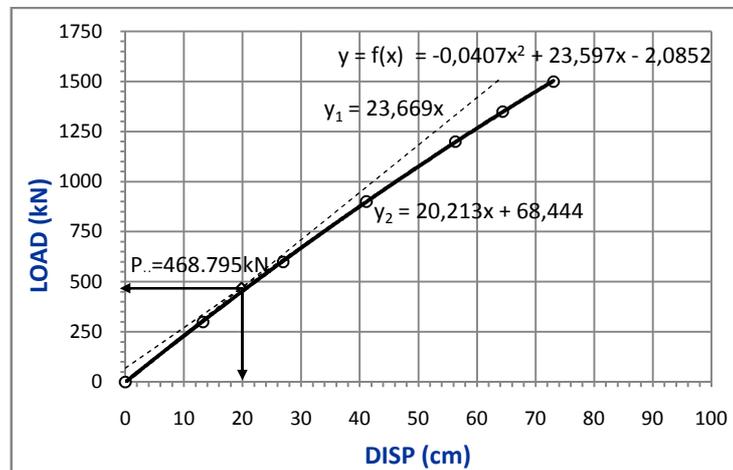
Posisi	Raft		Group Pile		Raft-Piled	
	x	y	x	y	x	y
Awal Kurva	0	0	0	0	0	0
	68.265	2067.75	64.328	1522.58	56.607	1984.7
Akhir Kurva	0	175.402	0	68.444	0	329.556
	55.301	1500	41.139	900	75.855	2325.1
Titik Potong	27.6769	838.335	19.8063	468.795	37.6478	1319.97



Gambar 10. Kurva Load-Displacement Raft-Piled Foundation



Gambar 11. Kurva Load-Displacement Raft Foundation



Gambar 12. Kurva Load-Displacement Group-Pile Foundation

Tabel 5. Resume Beban Ultimit (P_u) Sistem Pondasi

Jenis Pondasi	P_{UE} (empiris) (kN)	P_{UA} (analisis) (kN)	$P_{UA}-P_{UE}$ (kN)	Rasio Terhadap P_{UE} (%)
<i>Raft-Foundation</i>	936.77	838.335	-98.43	10.5% (lebih Kecil)
<i>Group Pile Foundation</i>	442.34	468.795	26.46	6.0% (lebih Besar)
<i>Raft-Piled Foundation</i>	1379.10	1319.969	-59.13	4.3% (lebih Kecil)
<i>Raft + Group Pile Foundation</i>	1379.10	1307.1129	-71.97	5.2% (lebih Kecil)

Pada **Tabel 5**, dapat di lihat bahwa nilai beban ultimit (P_u) sistem *raft-piled foundation* lebih besar dibandingkan dengan sistem kelompok tiang. Jika dibandingkan dengan penjumlahan antara *group pile* ditambah dengan *raft* nilai beban ultimit dari sistem *raft-piled foundation* juga lebih besar. Dari hasil analisis tersebut terlihat adanya efek penguatan didalam sistem *raft-piled foundation*. Dalam satu sistem, *raft* dan pile akan bersinergi secara bersamaan sehingga memberikan daya dukung yang melebihi jumlah dari masing-masingnya.

Dalam aplikasinya untuk memprediksi daya dukung dari sistem *raft-piled foundation* disarankan agar pengaruh bersinerginya (*sinergy impact*) dari *raft* dan *pile* dalam satu sistem *raft-piled foundation* tidak perlu diperhitungkan. Dengan kata lain untuk memprediksi daya dukung total dari sistem *raft-piled foundation* dapat dilakukan dengan penjumlahan dari kapasitas masing-masing *pile* ditambah dengan kapasitas dari *raft* di atas *pile*.

5. KESIMPULAN

1. Dalam sistem *raft-piled foundation*, *raft* memberikan daya dukung yang lebih besar dibandingkan dengan *pile*. Hal tersebut dapat dipahami karena pada dasarnya *pile* memang bukan diharapkan hanya untuk menyumbangkan daya dukung yang besar, tetapi juga diharapkan untuk mereduksi penurunan yang besar terutama *differensial settlement*.
2. Dalam satu sistem, *raft* dan *pile* akan bersinergi secara bersamaan sehingga memberikan daya dukung yang melebihi jumlah dari masing-masingnya.
3. Untuk memprediksi daya dukung total dari sistem *raft-piled foundation* dapat dilakukan dengan penjumlahan dari kapasitas masing-masing *pile* ditambah dengan kapasitas dari *raft* di atas *pile*. Formula empiris seperti yang dipaparkan sebelumnya dapat diterima untuk memprediksi daya dukung total sistem *raft-piled foundation*.

$$Q_T = Q_R + \Sigma(Q_P + Q_S)$$

$$Q_{izin} = \frac{Q_T}{SF} \quad (SF = 3)$$

4. Dengan beban vertikal yang sama yang diberikan di atas sistem pondasi penurunan *raft-piled foundation* memberikan nilai terkecil dibandingkan dengan yang lain, dengan kata lain untuk penurunan izin sama yang, *raft-pile foundation* dapat menahan beban yang lebih besar dibandingkan model sistem pondasi yang lain

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Alnuiam A, dkk, *Performance of Piled-Raft System Under Axial Load*, University of Western Ontario, London, ON, Canada and affiliated with King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia, 2013.
- André Ryltenius, Master's Disertation: *FEM Modelling of Pile Raft Foundations in two and three Dimensions*, Geotechnical Engineering, Lund University, 2011.
- Anup Sinha, A Thesis: *3-D Modeling of Pile Raft Foundation*, Civil and Environmental Engineering, Cordodia University, Montereal, Cuebec, Canada, 2013.
- B.H. Fellenius, *Guide Line for the Interpretation And Analysis of the Static Loading Test*, Ottawa, 1990
- Bowles, Joseph E, *Analisis dan Desain Pondasi, Jilid 1*, Erlangga, Jakarta, 1992.
- Christady H, Hary, *Teknik Fondasi 2, Edisi Kedua*, Beta Offset, Yogyakarta, 2003.
- Das, Braja M, *Principle of Foundation Engineering*, PWS Publishing, California, 1999.
- Dhruba Lal Pradhan, *Development of P-Y Curves for Monopiles in Clay using Finite Element Model Plaxis 3D Foundation*, Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2012