

## Analisis Beban-Perpindahan Pondasi *Raft Pile* Dengan Menggunakan Sap2000

Harpito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sultan Syarif Kasim Riau  
Jl. HR. Soebrantas No. 155 Simpang Baru, Panam, Pekanbaru, 28293  
Email: harpito@uin-suska.ac.id

### ABSTRAK

Simulasi numerik dengan menggunakan SAP2000 terhadap beban-penurunan pondasi *raft pile* yang dibebani secara vertikal disajikan dalam makalah ini. Pemodelan dengan SAP2000 dilakukan dengan elemen 3 dimensi dan mengacu kepada hukum konstitutif elastis non linier untuk bahan. Analisis dilakukan secara non linier dan dalam kondisi *undrained*. Dalam analisis ini model berupa *raft* 6mx6m dengan kombinasi 9 *pile* dengan diameter 25cm dan panjang 5m. Dimana jarak pusat *pile* diatur menjadi 6 kali diameter *pile*. Material *raft* dan *pile* berupa beton bertulang. Pengamatan dilakukan terhadap Beban dan perpindahan vertikal dari model. Penurunan pondasi *raft pile* dibandingkan dengan pondasi *raft* dan *group pile* ini kemudian diselidiki. Dalam sistim pondasi *raft-pile*, daya dukung sebagian besar di sumbangkan oleh *raft*, sementara *pile* diharapkan untuk mereduksi penurunan. Hasil dengan menggunakan beban eksternal yang sama menunjukkan bahwa pondasi *raft pile* memiliki penurunan terkecil dibandingkan dengan yang lain.

**Kata kunci :** Pondasi *raft-pile*, beban-perpindahan, Analisis non linier, SAP2000.

### Pendahuluan

Banyak daerah yang memiliki lapisan tanah lunak dengan kedalaman tanah keras jauh dari permukaan tanah. Misalnya ditemui pada kedalaman sekitar 40 m dari permukaan tanah. Kondisi seperti ini menyebabkan pilihan penggunaan tiang pancang *end bearing* tidak ekonomis karena akan menghabiskan biaya yang sangat besar untuk pengadaan tiangnya. Untuk itu, perlu dipikirkan penggunaan pondasi lain yaitu pondasi tiang rakit (*raft pile*). Pondasi *raft pile* adalah pondasi yang menggabungkan 2 macam bentuk pondasi yaitu pondasi tiang pancang dalam hal ini *friction pile* dan pondasi rakit (*raft*).

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

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*).

Pondasi *raft pile* 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.

Dalam hal mendukung beban, perbedaan antara pondasi *raft-pile* dengan pondasi *group pile* biasa adalah pada mekanisme penyaluran beban. Pada pondasi *group pile*, beban dari kolom disebarakan oleh kepala tiang (*poer/pile cap*)

keseluruh tiang-tiang di bawahnya dan selanjutnya masing-masing tiang (sistem interaksi tiang-tanah) menahan beban kerja yang disalurkan padanya. Sedangkan pada pondasi *raft-pile*, beban (dari kolom, misalnya) disalurkan langsung kedalam tanah melalui kontak antara *raft (pile cap)* dan tiang-tiang secara bersamaan.

Beberapa penelitian tentang sistem pondasi *raft pile* ini telah dilakukan, diantaranya adalah Poulos (1976). Penelitian beliau menggunakan sebuah metode yang disederhanakan untuk mendapatkan kurva *load-displacement* terhadap kegagalan pada pondasi tiang pancang atau sistem pondasi *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). Syafrizal (2004) mencoba melakukan pengujian pondasi *raft pile* di laboratorium, kemudian dilanjutkan oleh Harpito (2006) melakukan pengujian *raft-pile foundation* pada tanah lempung lunak dengan skala besar di lapangan. Namun dimensi dan material sistem pondasi *raft pile* yang digunakan dalam penelitian ini masih terbatas.

## Tinjauan Pustaka

### Interaksi Pondasi *Raf Pile*

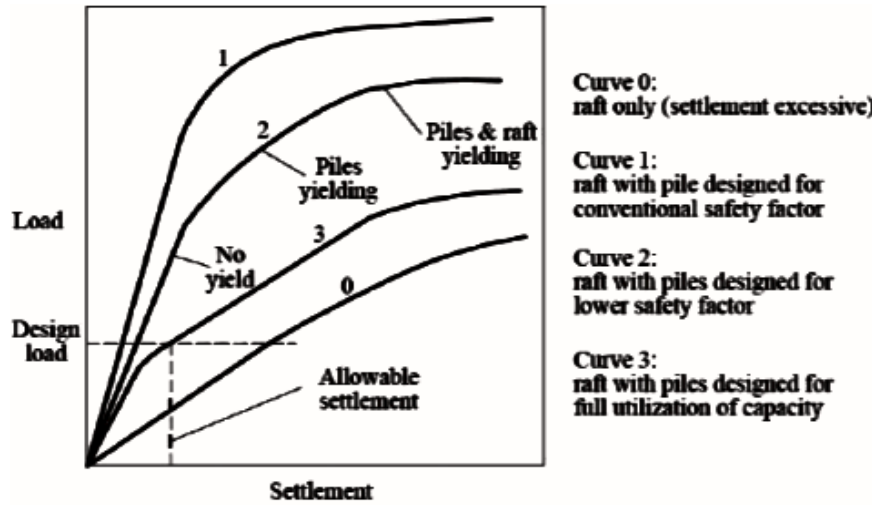
Untuk memperkirakan perilaku *load-settlement*, dapat diterapkan pendekatan seperti yang dijelaskan oleh Poulos dan Davis (1980). Namun, Pengembangan dari metode ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode sederhana yang memperkirakan pembagian beban antara *raft* dan *pile*, seperti diuraikan oleh Randolph (1994).

Dalam menganalisis pondasi *raft pile* distribusi beban yang didukung rakit dan pile harus ditentukan. Interaksi ini sangat kompleks dan menurut Olsson C. och Holm G. (1993), sangat tergantung pada; kekakuan suprastruktur, kekakuan *raft*, kekakuan *pile*, kekakuan tanah, timbunan, galian dan tekanan air.

Interaksi antara *raft* dan *pile* tergantung pada desain pondasi. Empat pendekatan yang berbeda yang didefinisikan oleh Poulos HG (2001), di mana tiga yang terakhir adalah dalam lingkup pondasi *raft pile*.

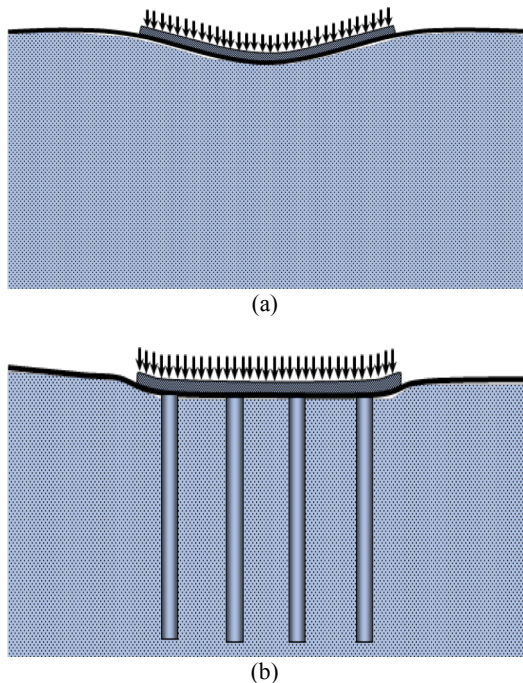
- a) Pendekatan konvensional, di mana *pile* dirancang untuk memikul seluruh beban.
- b) *Creep piling*, di mana *pile* beroperasi pada 70-80% dari kapasitasnya, yaitu pada beban di mana *creep* biasanya mulai terjadi. *pile* selanjutnya digunakan untuk membatasi tekanan kontak di bawah tekanan pra konsolidasi.
- c) Kontrol *diferensial settlement*, dimana daya dukung *raft* cukup tapi pile ditambahkan secara strategis untuk mengurangi *differential settlement*.
- d) Pengurangan *settlement* versi ekstrim *creep piling*, di mana pile beroperasi pada 100% dari kapasitas beban utamanya. Tujuan utama adalah untuk mengurangi *settlement*, dan bukan meningkatkannya kapasitas beban ultimate. Tapi kapasitas beban ultimate tentu saja, juga meningkat meningkat.

Perilaku beban-penurunan berbagai versi diilustrasikan pada **Gambar.1**. Kurva O menunjukkan perilaku rakit sendiri, Kurva 1 mewakili filosofi desain konvensional, dimana perilaku sistem tiang-rakit diatur oleh perilaku kelompok tiang, dan yang mungkin sebagian besar linear pada beban desain. Kurva 2 menunjukkan kasus *creep piling* di mana tiang beroperasi pada faktor keamanan yang rendah, tetapi karena ada sedikit tiang, rakit membawa beban lebih daripada Kurva 1 dan kurva 3 menunjukkan penggunaan pile sebagai peredam penurunan. Dalam kasus terakhir pile mengalami keruntuhan tetapi struktur keseluruhan memiliki margin yang cukup aman dan penurunan juga memenuhi persyaratan. Dari ilustrasi ini dapat di ambil kesimpulan bahwa menggunakan pile untuk mengurangi penurunan seharusnya menjadi desain pondasi yang paling ekonomis. Gambar ini juga menggambarkan peningkatan daya dukung saat menambahkan pile.

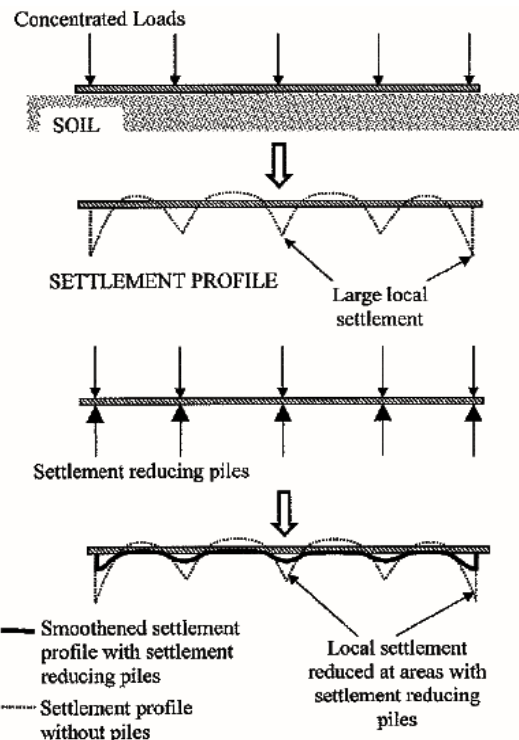


Gambar 1. Pendekatan desain yang berbeda dari *raft pile* (Poulos HG, 2001)

Penggunaan. pile untuk mengurangi penurunan pada beban seragam dan terkonsentrasi diilustrasikan pada **Gambar.2 dan 3.**, masing-masing. gambar ini menunjukkan manfaat dari menambahkan pile secara strategis, terhadap *differential settlement*.



Gambar 2. Konsep reduksi penurunan oleh tiang pancang (Randolph,1994)  
 (a) *Raft* foundation dibebani  
 (b) *Raft* ditambah *pile*



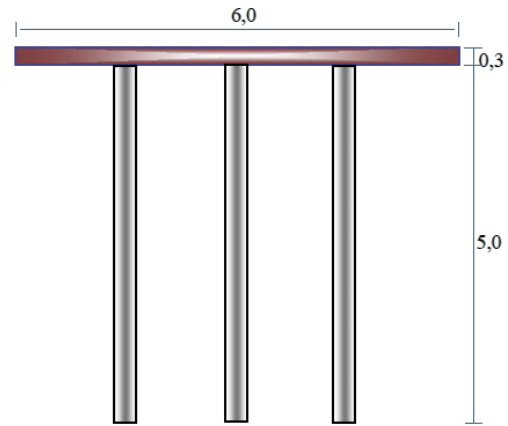
Gambar 3. Penurunan dengan *pile* sebagai pengurangan penurunan  
 Tan Y.C. and Chow C.M (2004)

**Metode 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 pondasi *raft pile* yang mengalami kondisi dalam rentang beban layanan (Baziar 2009).

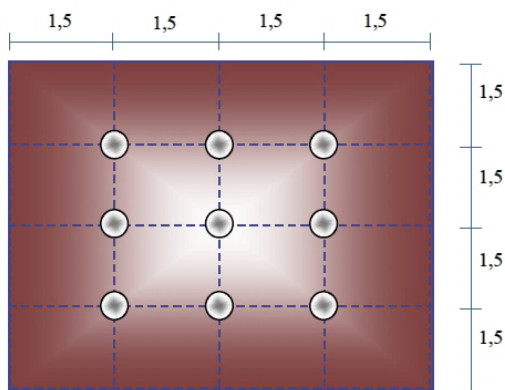
Studi analitis dilakukan dengan idealisasi sebuah model pondasi *raft pile* **Gambar 4**. Konstruksi pondasi *raft pile* yang dianalisis dalam penelitian ini memiliki tiga komponen yang saling terkait. Komponen pertama adalah lapisan media tanah berupa tanah lunak homogen dengan lebar 103 meter, panjang 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 x 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**.



(b) Potongan Tipikal Pondasi

**Gambar 4** Layout Tipikal Pondasi *raft pile*

- (a) Denah Tipikal Pondasi
- (b) Potongan Tipikal Pondasi

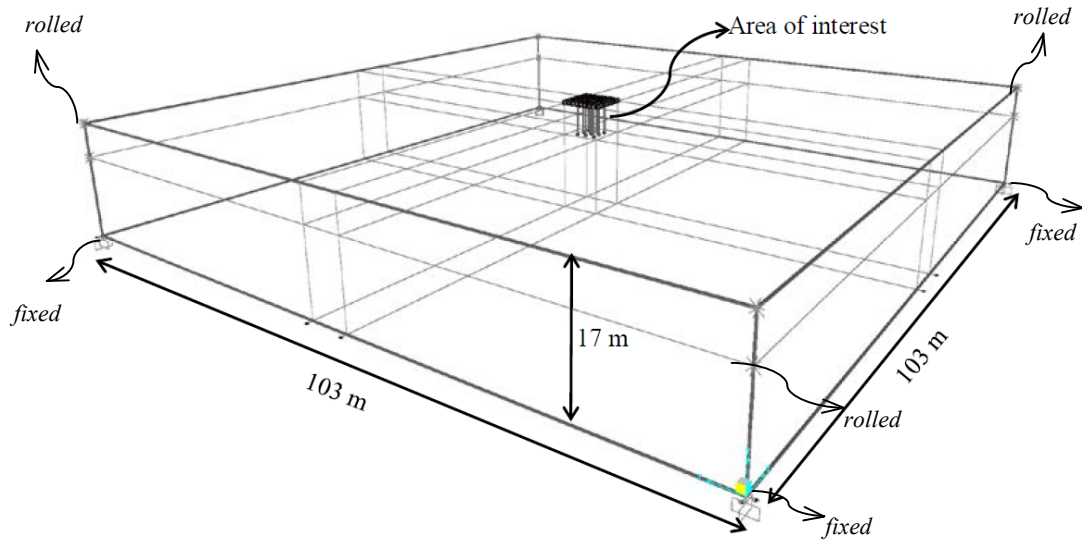


(a) Denah Tipikal Pondasi

**Table 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	$q_u$ (Mpa)	-	-	0,0225	0,0180
3	Cohesi Undrained	$C_u$ (kPa)	-	-	11,25	9,0
4	Young's Modulus	$E$ (kPa)	2,51E+07	2,51E+07	300	240
5	Poisson's Ratio	$\nu$	0,2	0,2	0,35	0,4
6	Unit Weight	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	24,5	24,5	18,0	18,0
7	Friction Angle	$\phi$ (°)	-	-	10,0	8,0

8	Dilatancy Angle	$\psi$ (°)	-	-	0,0	0,0
9	Coefficient Of Thermal	$A$	9,90E-06	9,90E-06	3,50E-05	3,50E-05



**Gambar 5.** Model Analisis dan *Boundaries Conditions*

**Gambar 5** memperlihatkan model analisis dan *boundaries 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*.

Pembebanan yang diberikan pada sistem pondasi dalam analisis ini berupa beban statik aksial (*monotonic*) secara bertahap (*increment load*) sampai mencapai beban rencana (*target load*)

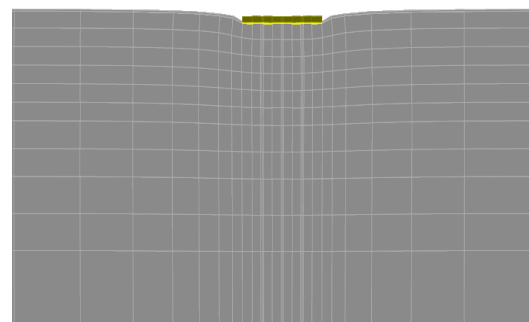
**Hasil Dan Pembahasan**

**Penurunan Sistim Pondasi**

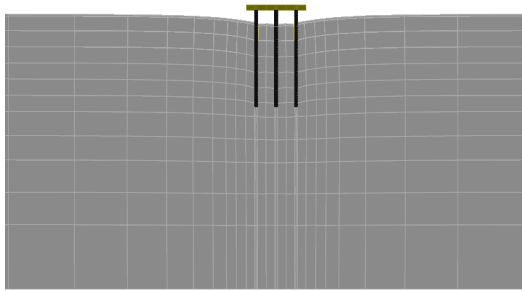
Kontribusi dari *raft*, yang bersentuhan dengan tanah dalam sistim pondasi raft pile harus diperhitungkan dan beban dipikul oleh *raft* dan *pile*. Namun, *pile* diperlukan untuk mengurangi rata-rata dan / atau penurunan diferensial pondasi pada tingkat yang memadai ketimbang memikul sebagian besar dari beban. Oleh karena itu,

konsep desain utama adalah bahwa penurunan pondasi berada dalam kriteria *serviceability settlement*. Hal ini berdampak bagaimana *pile* dirancang secara optimal untuk mengurangi penurunan pondasi.

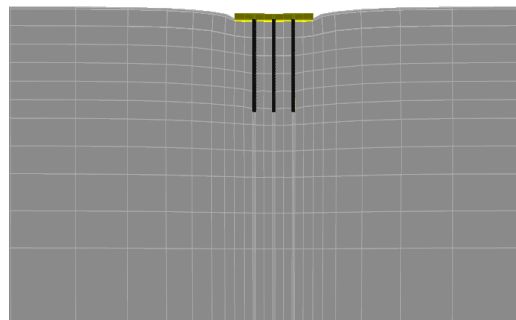
Kontur penurunan pondasi *raft* dan pondasi *raft pile* hasil analisis dengan menggunakan SAP2000 di perlihatkan pada **Gambar 6, 7 dan 8**.



**Gambar 6.** Kontur Penurunan Pondasi *Raft*



**Gambar 7.** Kontur Penurunan Pondasi *Group pile*

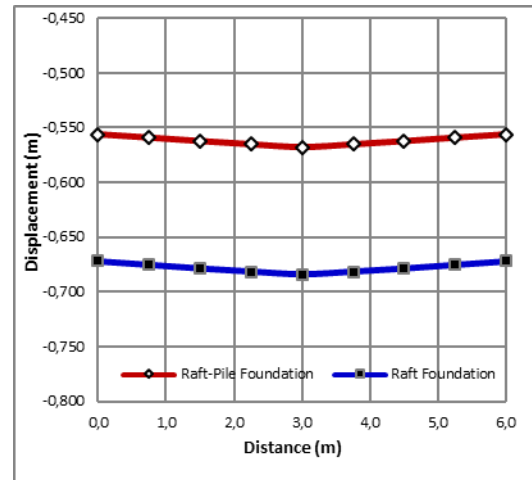


**Gambar 8.** Kontur Penurunan Pondasi *Raft pile*

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 yang cukup besar dibandingkan aplikasi sebenarnya. hal ini terjadi karena beban vertikal yang bekerja di atas pondasi yang cukup besar sedangkan parameter tanah merupakan tanah lunak. Namun, dapat dilihat bahwa penurunan pondasi *raft pile* memberikan nilai terkecil dibandingkan dengan yang lain. Dalam kata lain untuk penurunan izin yang sama, pondasi *raft pile* 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
<i>Raft Foundation</i>	43,16	100%
<i>Group Pile Foundation</i>	56,27	130% (30% lebih besar)
<i>Raft-Piled Foundation</i>	36,46	84% (16% lebih kecil)

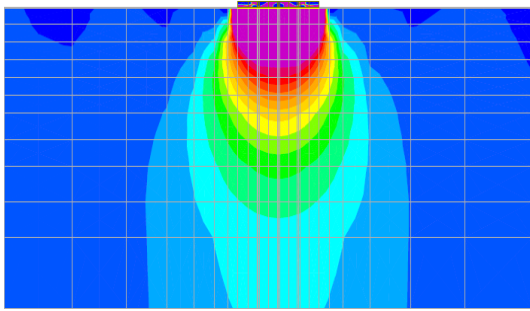


**Gambar 9.** Perbandingan Penurunan Pondasi *Raft & Pondasi Raft pile*

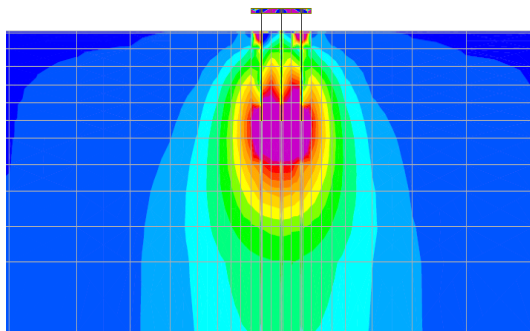
Kontur penurunan hasil analisis SAP2000 tidak menampilkan perbedaan yang signifikan, hal ini mungkin dikarenakan oleh skala yang besar. Untuk menampakkan perbedaan yang tegas antara penurunan pondasi *raft* dan pondasi *raft pile*, maka penurunan pada titik-titik sepanjang *raft* diplotkan pada suatu kurva seperti pada **Gambar 9**. Pada **Gambar 9** dapat dilihat perbedaan yang cukup signifikan dari penurunan pondasi *raft* terhadap pondasi *raft pile*, dan terlihat bahwa *pile* dapat bekerja berfungsi untuk mereduksi penurunan.

### Tegangan Normal dan Tegangan Geser Sistim Pondasi

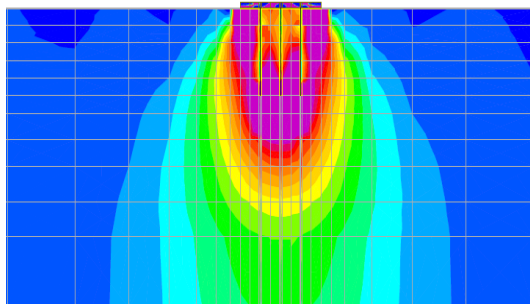
Tegangan normal dalam tanah pada *raft foundation* berkonsentrasi tepat di bawah dasar *raft*. Kemudian semakin jauh dari dasar *raft*, tegangan berkurang secara bertahap seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 10**. Pada **Gambar 11 dan 14**, dapat diamati bahwa untuk *group pile foundation*, tegangan normal berkonsentrasi hanya sekitar ujung *pile*, dan juga berkurang secara bertahap menjauh dari *pile*. Sementara, di sepanjang *pile*, tegangan normal tidak signifikan, hal itu dapat dipahami karena di daerah ini, didominasi oleh tegangan geser.



**Gambar 10.** Tegangan Vertikal Raft Foundation



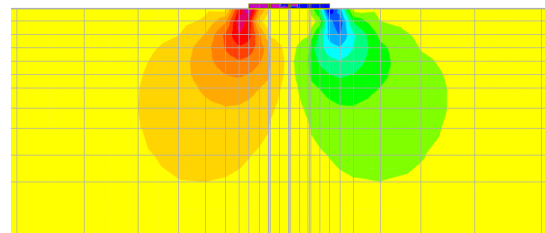
**Gambar 11.** Tegangan Vertikal Group Pile Foundation



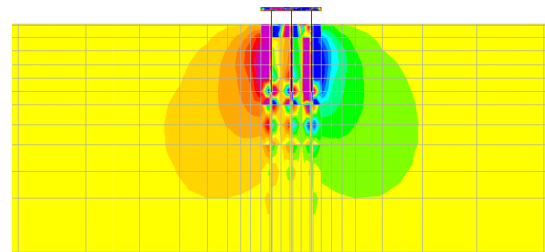
**Gambar 12.** Tegangan Vertikal Raft-Piled Foundation

Untuk sistem *raft-piled foundation*, kompresi dalam tanah berkonsentrasi di dua wilayah, tepat di dasar *raft* 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*, seperti terlihat pada **Gambar 12**. 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*.

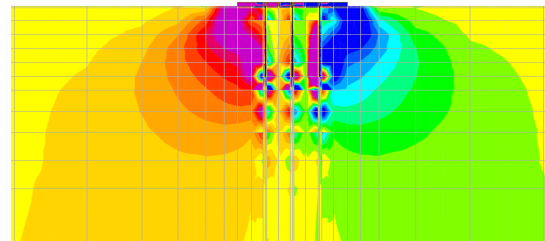
Dalam hal tegangan geser untuk *raft foundation*, *group pile foundation* dan *raft-piled foundation* di bawah masing-masing pondasi diperlihatkan dalam **Gambar 13 s/d 15**. *Raft-piled foundation* memberikan tegangan geser yang lebih besar dibandingkan dengan *raft foundation* dan *group pile foundation*. 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 13** Tegangan Geser Dibawah Raft Foundation



**Gambar 14** Tegangan Geser Di Bawah Group Pile Foundation



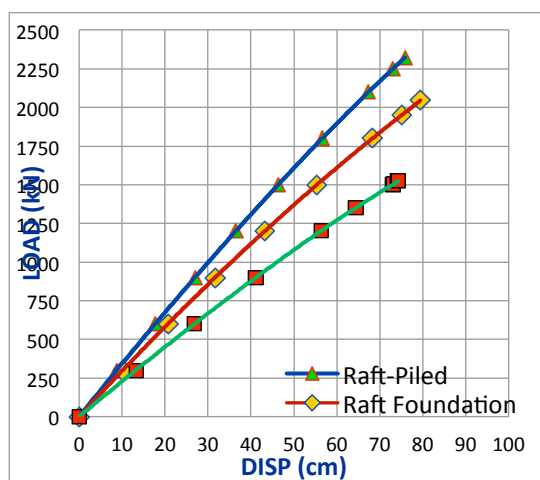
**Gambar 15** Tegangan Geser Di Bawah Raft-Piled Foundation

Pada tanah lunak, untuk mendapatkan dayadukung yang baik sangat sulit dan bahkan tidak mungkin. Jadi, wajarlah kiranya untuk mempertimbangkan setiap elemen dari sistem yang memberikan kontribusi untuk mendukung beban eksternal. Kemudian, kapasitas beban dari *raft-piled foundation* harus mencakup bagian dari *pile* serta *raft*. Menggunakan kombinasi formula klasik, sebagai acuan untuk memperkirakan

kapasitas beban seperti yang dijelaskan di bagian sangat layak untuk diadopsi. Selain itu, jika rumus kapasitas beban konvensional digunakan, efisiensi sistem *raft-piled foundation* harus didefinisikan sebagai rasio dari sistem dibandingkan dengan jumlah *single pile* dan *raft* sendiri.

### Load-Displacement

Nilai beban ultimit sistem *raft-piled foundation* lebih besar dibandingkan dengan sistem kelompok tiang. Hal ini terlihat dari kurva *Load-Displacement* pada **Gambar 16**. Dari hasil analisis, dapat dilihat 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 dan dapat digunakan sebagai penambahan faktor keamanan.



**Gambar 16** Kurva Load-Displacement Sistem Pondasi

### Kesimpulan

Dengan beban vertikal yang sama yang diberikan di atas sistem pondasi penurunan pondasi *raft pile* memberikan nilai terkecil dibandingkan dengan

yang lain, dengan kata lain untuk penurunan izin yang sama, pondasi *raft pile* dapat menahan beban yang lebih besar dibandingkan model sistem pondasi yang lain.

Pada sistem pondasi *raft pile*, *pile* berfungsi untuk mereduksi penurunan yang besar dan mereduksi *differential settlement*, sedangkan beban sebahagian besar dipikul oleh *raft*.

### Daftar Pustaka

- 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.
- Andrē 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, Montreal, 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.
- Dilip Kumar Maharaj, *Three Dimensional Nonlinear Finite Element Analysis to Study The Effect of Raft and Pile Stiffness on The Load-Settlement Behaviour of Piled Raft Foundations*, Birla Institute of Technology and Science, Pilani, Rajastan, India, 2004.
- Jaejeon Cho, dkk, *The Settlement Behaviour of Pile Raft In Clay Soils*, Department of Civil Engineering, Yonsei University Seoul, Republic of Korea, 2012
- Poulos, H. G, dan Davis, E. H, *Pile Foundation Analysis and Design*, The University of Sydney, John Wiley & Sons, 1980.