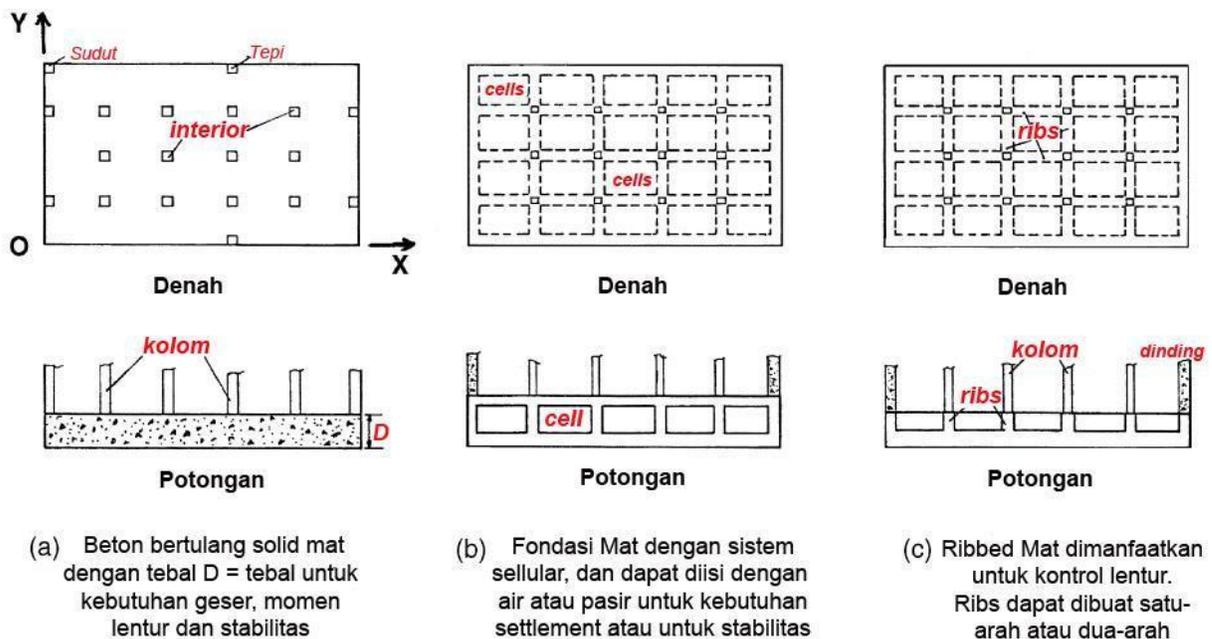


Perencanaan Fondasi Mat Pada Gedung-gedung Tinggi

oleh: Steffie Tumilar. ir.M.Eng.AU(HAKI)

1. Pendahuluan.

Pada masa sekarang telah kita saksikan hadirnya berbagai gedung-gedung pencakar langit dengan besmen-besmen yang dalam yang sudah dan sedang dibangun dengan berbagai macam jenis fondasi, seperti fondasi rakit (raft/compensated foundation), fondasi dalam dengan tiang-tiang pancang dan tiang-tiang bor, serta kombinasi raft dan tiang (pile-raft foundation). Berbagai macam sistem fondasi yang terletak pada tanah yang sangat baik dapat berupa fondasi mat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1a dan Gambar 1b. Untuk tanah pendukung yang kurang baik sampai buruk maka sistem fondasi mat tersebut dikombinasikan dengan tiang-tiang dalam.



Gambar 1. Berbagai konfigurasi dari fondasi mat pada beberapa aplikasi.

2. Metoda Analisis.

Pada waktu yang lalu, analisis pada fondasi mat masih dilakukan seperti pada struktur-struktur pile-cap yang sederhana yaitu dimana analisis

dilakukan dengan simplifikasi penyederhanaan asumsi pada dua hal.

- a. Pile-cap dan fondasi mat dianggap kaku tak terhingga (infinitely rigid).
- b. Fondasi dianalisis dengan pendekatan lentur satu-arah (one-way bending)⁽¹⁾ Dengan asumsi dan pendekatan diatas tersebut maka analisis dapat dilakukan dengan sederhana, yaitu cukup menggunakan teori statika yang sederhana.

Kondisi demikian biasanya tidak mengakibatkan kesalahan-kesalahan yang serius selama beban yang bekerja cukup merata dengan jarak-jarak elemen vertikal berupa kolom berjarak seragam dan teratur. Selanjutnya perlu disadari bahwa dalam keadaan sesungguhnya penggunaan analisis dengan pendekatan lentur satu-arah adalah kurang realistis karena lentur yang terjadi adalah lentur dalam dua-arah. Tetapi dengan berkembangnya metoda teori elemen-hingga memungkinkan untuk melakukan analisis yang lebih akurat dengan memasukkan unsur-unsur kekakuan dari fondasi serta interaksi dengan tanah maupun tiang fondasi yang dijabarkan dalam bentuk pegas-pegas yang berasal dari reaksi tanah dan tiang-tiang fondasi. Selanjutnya dengan hadirnya berbagai sistem struktur yang tinggi dan rumit tersebut dibutuhkan bantuan penggunaan komputer dalam proses perencanaan fondasi tersebut agar dapat diperoleh suatu desain yang efisien dan efektif.

3. Pemodelan Elemen Pelat Fondasi Mat.

Ada beberapa pilihan dalam pemodelan pelat fondasi, yaitu dimodelkan sebagai pelat tipis (thin plate), pelat tebal (thick plate) dan solid. Pemahaman mengenai asumsi pemodelan tersebut dapat dijelaskan secara singkat sebagai berikut.

- a. Asumsi pada thin plate modeling (Kirchoff plate theory) adalah bahwa, “*A straight line, normal to the mid surface, remains straight and normal to the deformed mid surface throughout*” pada thin deformation”, plate deformasi geser transversal diabaikan.
- b. Asumsi pada elemen thick plate (dimensi terkecil dari pelat t tebal pelat lebih kecil dari $\sim 10t$), deformasi geser transversal akan berpengaruh. Reissner and Mindlin⁽²⁾ plate theory adalah bahwa “*A straight line, normal to t straight and but not necessarily normal to the deformed mid surface*” Deformasi geser (shear deformation) diperhitungkan karena memainkan peranan yang penting dalam mat-soil interaction.
- c. Asumsi penggunaan elemen solid tidak dipilih karena dianggap

membutuhkan waktu analisis yang lama disamping cukup rumit dan sulit untuk menginterpretasikan hasilnya, sehingga mudah menimbulkan kesalahan.

- d. Dari berbagai pendekatan tersebut diatas, direkomendasikan menggunakan elemen thick-plate karena dalam analisisnya memperhitungkan pengaruh dari gesernya.

4. Analisis dan Desain.

4.1. Fondasi Mat

Dalam melakukan analisis fondasi mat sebagai pelat pada fondasi yang elastis (plate on elastic foundation) dibutuhkan beberapa parameter desain sebagai berikut:

- a. Structural properties dari beton fondasi mat.

Tebal dari mat beton didasarkan pada perencanaan kapasitas dari momen lentur dan geser pons (two-way shear). Penggunaan FEM dengan elemen lentur pelat tergantung pada kekakuan lentur elemen pelat dan tidak memperhitungkan distorsi akibat geser. Tanpa memperhitungkan adanya distorsi akibat geser tersebut akan mengakibatkan asumsi kekakuan pelat fondasi terlalu tinggi. Dengan asumsi adanya berbagai distorsi dan retakan pada beton, maka sejalan dengan SNI 2847-2013⁽³⁾, maka kekakuan dari beton perlu direduksi jika momen yang timbul melampaui M_{crack} beton tanpa tulangan. Besarnya reduksi dijabarkan dalam EI_{ef} .

Beberapa penulis merekomendasikan nilai $EI_{ef} = 0.5 \sim 0.6 EI_g$

- b. Konstanta pegas dari tanah (soil spring constant/ modulus of subgrade reaction)
Penentuan konstanta pegas tergantung pada beberapa parameter berikut:

- 1). Contour settlement –mengakibatkan timbulnya variasi kontanta pegas
- 2). Time dependent behavior dari tanah –longterm/consolidation settlement.
- 3). Konstanta pegas yang berhubungan dengan pola beban (loading pattern).

- c. Interaksi dari fondasi mat terhadap superstructure

Interaksi yang timbul pada struktur fondasi dan struktur-atas karena adanya perbedaan penurunan (differential settlement)

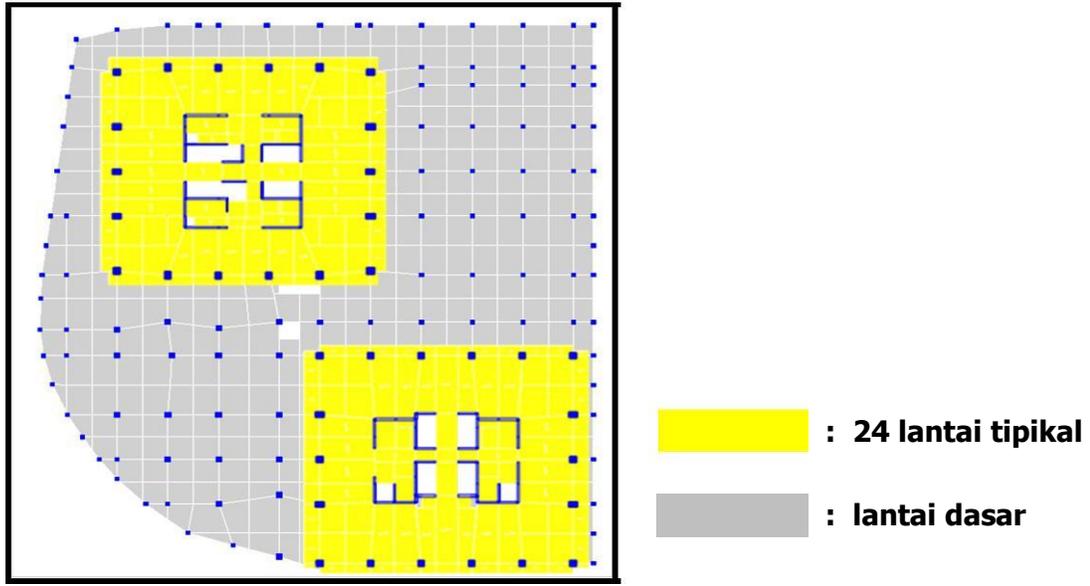
4.2. Fondasi Mat dengan tiang

Desain fondasi mat dengan tiang hampir keseluruhannya identik dengan yang diuraikan diatas. Perbedaannya adalah disini semua tiang-tiang fondasi dimodelkan sebagai kostanta pegas yang didasarkan pada penurunan/settlement jangka pendek (immediate settlement) dan jangka panjang (longterm/consolidation settlement).

Prosedur desain serta tahapannya diuraikan dan dijelaskan pada contoh soal dari suatu proyek.

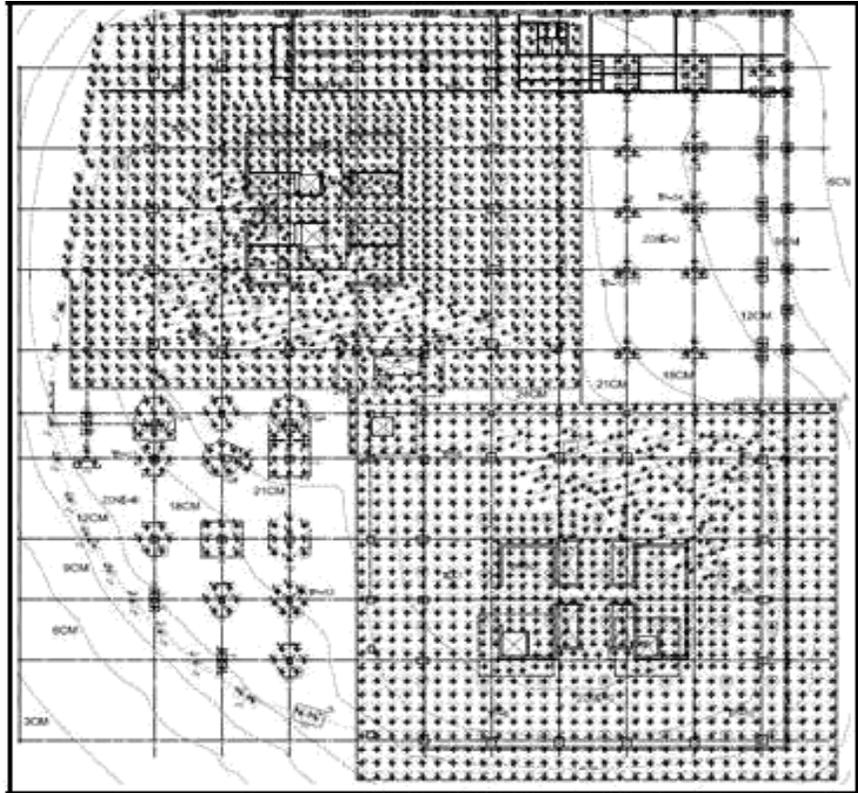
5. Contoh Perencanaan Fondasi Mat dan Tiang (Pile –Raft Foundation)

Diketahui: Bangunan 25 lantai - 2 tower dengan denah sebagai berikut :

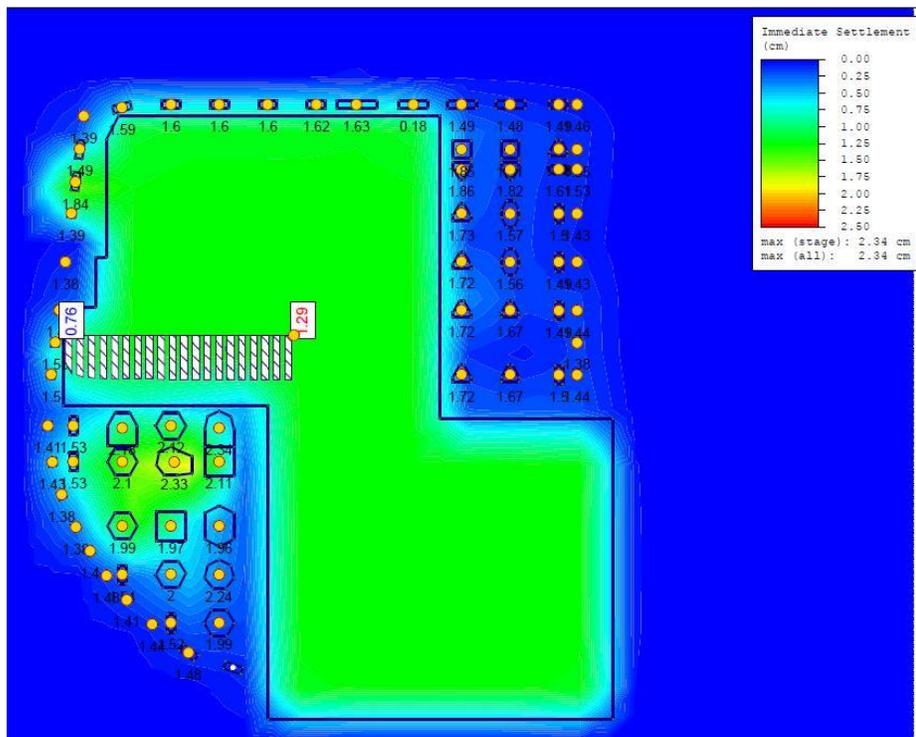


Denah bangunan

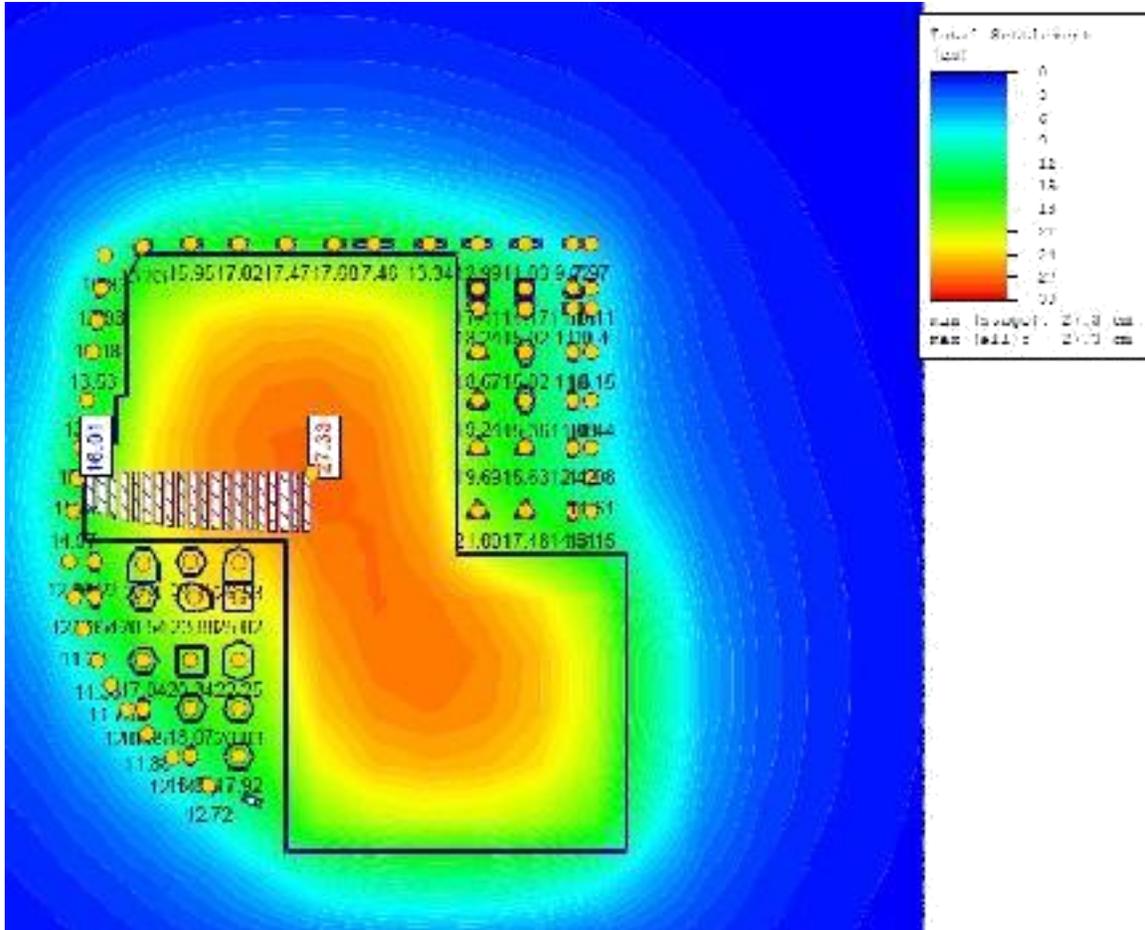
Jenis tiang fondasi yang digunakan adalah spun-pile D600 panjang 17 m.
Area tower digunakan fondasi mat/raft dengan tebal 2.50 m.



Denah fondasi bangunan



Gambar. Contour short-term (immediate) settlement tanah



Contour total settlement tanah (long term + immediate settlement)

5.1. Metode analisa dan desain pile cap dan raft

Fondasi direncanakan dengan menyertakan fleksibilitas/kekakuan fondasi dan kekakuan tanah pendukung. Analisa dilakukan dengan bantuan program “safe”, dimana kekakuan fondasi dihitung sesuai *properties* permodelan dan kekakuan tanah pendukung dimodelkan sesuai *spring constant* dari analisa *settlement* baik untuk *immediate* dan *total settlement*.

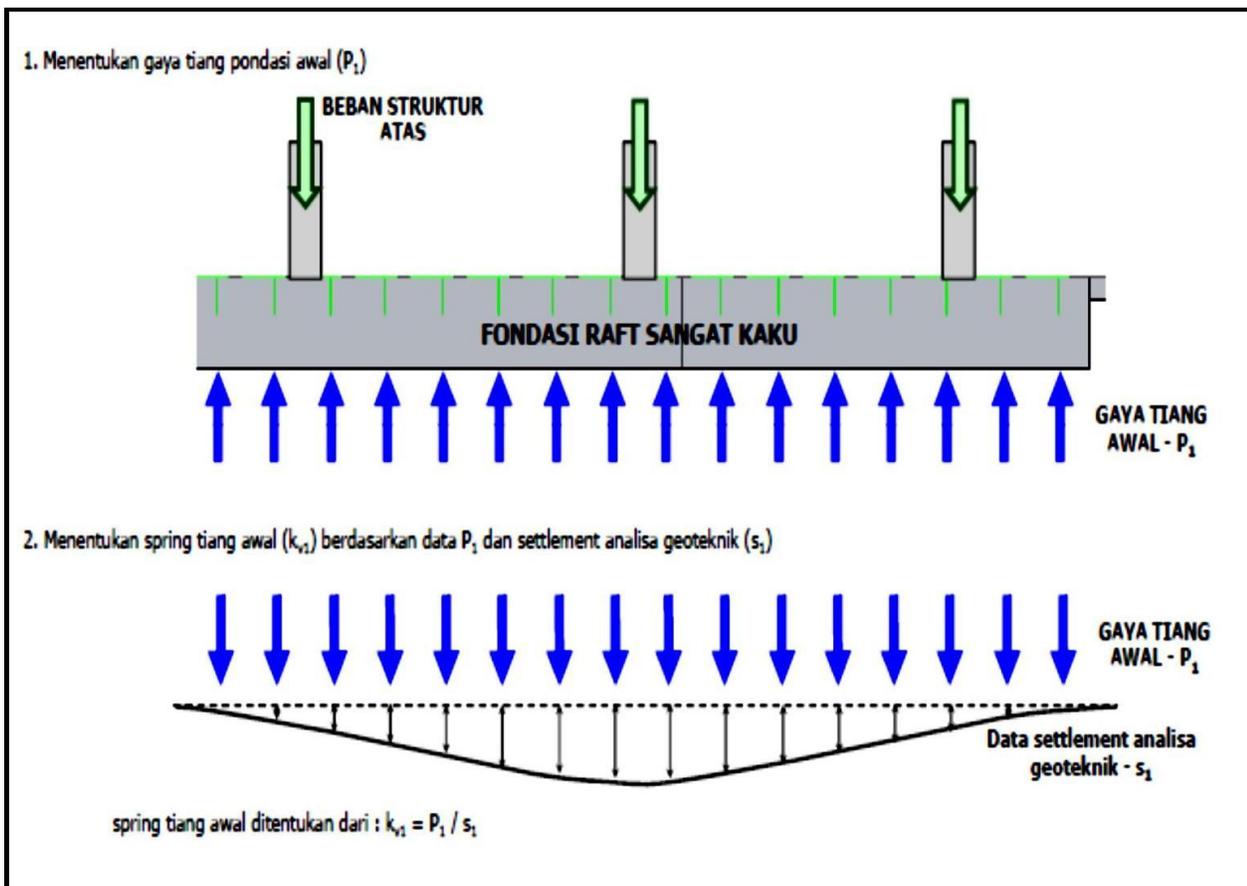
Settlement hasil analisa geoteknik adalah *settlement* berdasarkan penurunan tanah tanpa memperhitungkan adanya kekakuan fondasi, sehingga untuk mendapatkan *spring constant* yang sesuai dimana kekakuan fondasi ikut diperhitungkan maka perlu dilakukan iterasi.

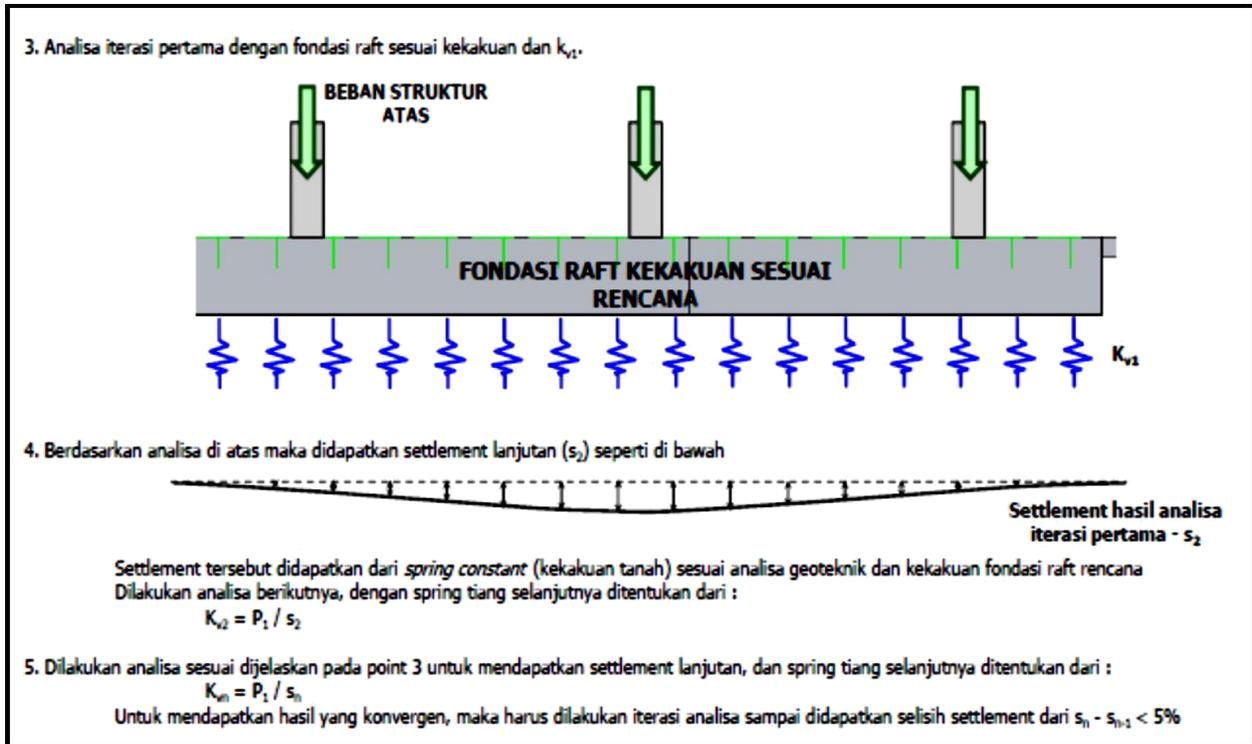
Langkah iterasi untuk mendapatkan *spring constant* yang sesuai adalah sebagai

berikut :

- a. Gunakan permodelan fondasi sangat kaku (tanpa memperhitungkan fleksibilitas fondasi) untuk mendapatkan distribusi beban dari struktur atas pada masing-masing tiang fondasi.
- b. Berdasarkan beban pada masing-masing tiang fondasi (P_1) dan berdasarkan data penurunan analisa geoteknik (s_1), maka dapat diperhitungkan spring constant awal (k_{v1}).
- c. Iterasi pertama analisa safe dilakukan dengan spring constant awal (k_{v1}) dan kekakuan fondasi sesuai rencana. Hasil analisa adalah berupa settlement kedua (s_2) dimana kekakuan fondasi diperhitungkan sesuai kondisi rencana. Berdasarkan settlement kedua maka dapat dihitung spring constant selanjutnya $k_{v2} = P_1 / s_2$.
- d. Iterasi kedua analisa safe dilakukan dengan spring constant kedua (k_{v2}) dan kekakuan fondasi sesuai rencana. Hasil analisa adalah berupa settlement ketiga (s_3). Demikian seterusnya dilakukan iterasi berdasarkan spring constant : $k_{v-n} = P_1 / s_n$
- e. Iterasi dilakukan sampai didapatkan perubahan settlement $s(n) - s(n-1)$ bernilai kurang dari 5% dan dianggap sudah cukup konvergen.

Ilustrasi iterasi spring constant dapat dilihat pada Gambar 2.





Gambar 2. Ilustrasi iterasi spring constant

Sesuai persyaratan⁽⁴⁾ SNI 1726-2012 pasal 7.13.3, bahwa pada analisa fondasi harus memperhitungkan peningkatan dan penurunan 50% kekakuan tanah pendukung, sehingga baik untuk analisa penurunan jangka pendek (*immediate settlement*) dan analisa penurunan jangka panjang (*total settlement*), pada analisa fondasi harus dilakukan analisa tambahan berdasarkan peningkatan 50% *spring constant* dan penurunan 50% *spring constant* rencana.

Dengan demikian, maka terdapat 6 analisis fondasi yang harus dilakukan, yaitu :

- Analisa penurunan jangka pendek dengan penurunan 50% *spring constant* rencana.
- Analisa penurunan jangka pendek dengan *spring constant* sesuai rencana.
- Analisa penurunan jangka pendek dengan peningkatan 50% *spring constant* rencana.
- Analisa penurunan jangka panjang (*total settlement*) dengan penurunan 50% *spring constant* rencana.
- Analisa penurunan jangka panjang (*total settlement*) dengan *spring constant* sesuai rencana.

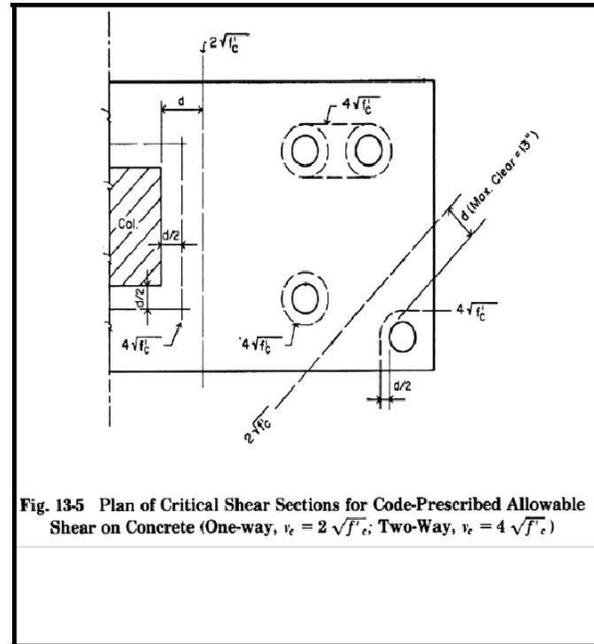
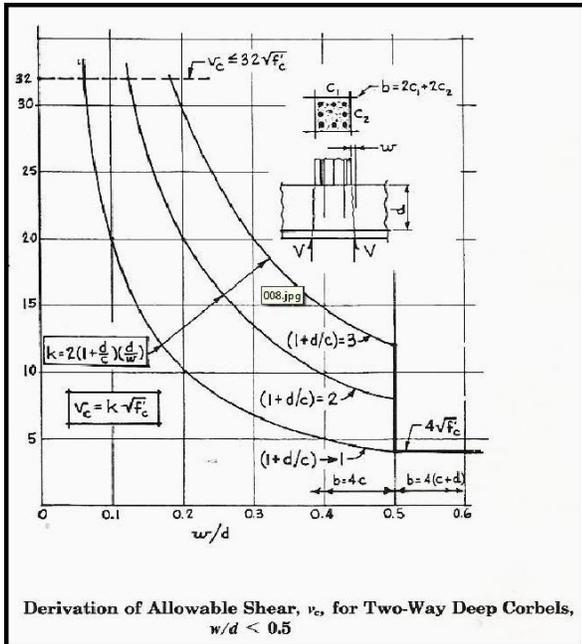
- f. Analisa penurunan jangka panjang (*total settlement*) dengan peningkatan 50% *spring constant* rencana.

Dari 6 analisa "safe" tersebut digunakan *envelope* yang menentukan. Berdasarkan hasil analisa safe, selanjutnya dapat dilakukan perhitungan beton dengan penjelasan umum sebagai berikut :

- a. Perhitungan geser beton.

Perhitungan geser beton⁽³⁾ dilakukan baik untuk geser 1 arah dan geser 2 arah. Geser 1 arah diperhitungkan pada jarak D dari muka kolom, dengan kuat geser

beton = $1/6 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot A_{cv}$ (A_{cv} =luas bidang geser beton). Geser 2 arah diperhitungkan pada jarak D/2 dari muka kolom, dengan kuat geser beton = $1/3 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot A_{cv}$.

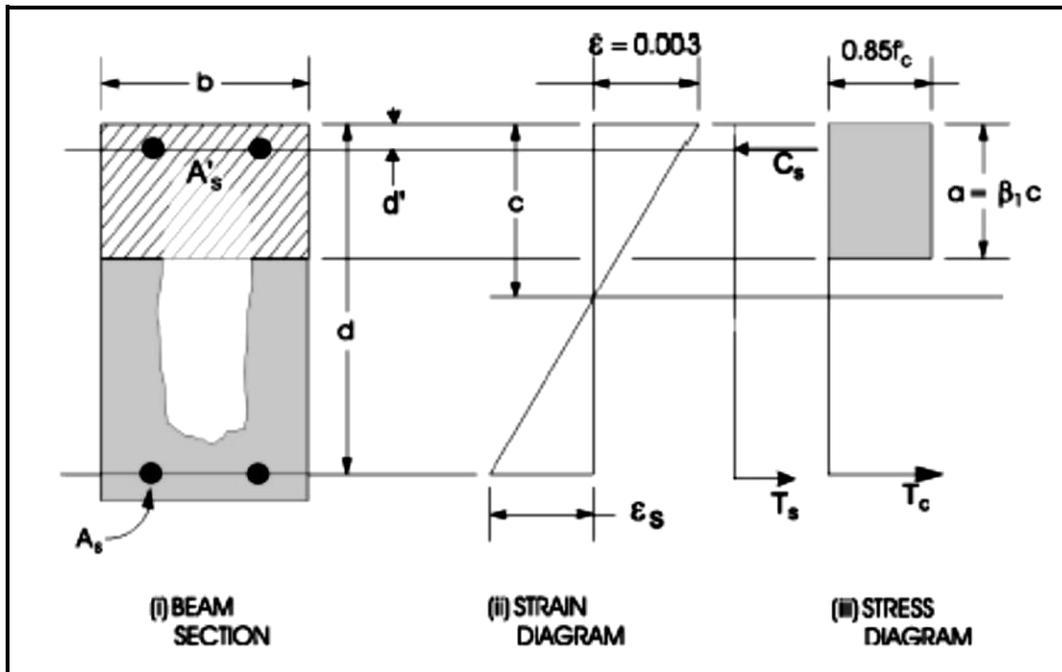


Skema perhitungan geser beton pada pile cap

Perhitungan geser dilakukan pada semua kemungkinan kondisi kritis geser. Gaya geser ultimit hasil analisa diperiksa dan harus kurang dari ϕV_c , dengan V_c adalah kuat geser beton dan reduksi geser kuat bahan (ϕ) = 0.75, dan apabila terlampaui maka harus diberikan penulangan geser. Perhitungan geser⁽³⁾ dilakukan sesuai persyaratan SNI 2847-2013 pasal 11 (geser dan torsi).

b. Perhitungan penulangan lentur pile cap.

Penulangan lentur pile cap diperhitungkan sesuai tata cara perhitungan penulangan lentur balok tunggal SNI 2847-2013⁽³⁾ pasal 10.2.



Skema perhitungan penulangan lentur

Perhitungan penulangan lentur dilakukan dengan bantuan program safe. Penulangan lentur pelat lantai juga memperhatikan persyaratan penulangan minimum, tulangan susut $A_{s \text{ min}} = 0.0018 A_c$ (SNI 2847-2013⁽³⁾ pasal 7.12).

Kombinasi beban yang digunakan dalam perhitungan beton adalah kombinasi beban ultimit sesuai SNI 2847-2013⁽³⁾ pasal 9.2 (kekuatan perlu), yaitu sebagai berikut :

- a. 1.4 D
- b. 1.2 D + 1.6 L
- c. 1.2 D + 1.0 L + 0.5 L_r + 1.0 E
- d. 0.9 D + 1.0 E

Dimana : D = Dead load

L = Live load (yang tidak diijinkan untuk direduksi sesuai persyaratan pembebanan)

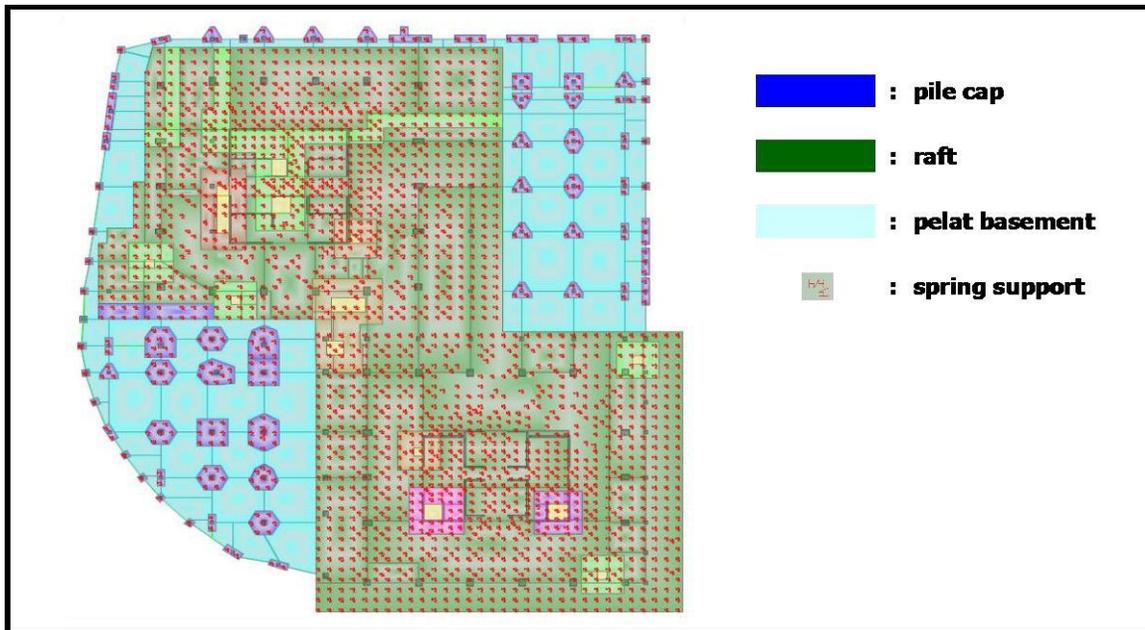
L_r = Live load reduksi (yang diijinkan untuk direduksi sesuai persyaratan pembebanan)

E = Beban gempa rencana struktur bawah dengan kombinasi orthogonal.

Pada analisa untuk desain beton digunakan faktor modifikasi kekakuan lentur fondasi raft $I_{ef} = 0.5 I_g$. Faktor modifikasi ini diberikan pada permodelan safe berupa modifikasi kekakuan pelat fondasi raft m_{11} , m_{22} , dan $m_{12} = 0.5$.

5.2. Permodelan fondasi

Analisa fondasi menggunakan bantuan program safe dengan permodelan sebagai berikut

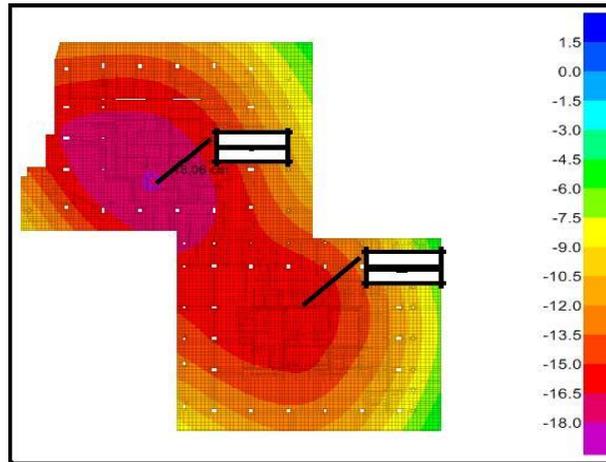


Denah permodelan struktur dengan program safe

Permodelan pelat raft (safe) menggunakan opsi "thick plate", yaitu dimana deformasi geser diperhitungkan. Penjelasan opsi "thick" dan "thin" plate dapat juga dilihat pada website wiki.csi: 'kb-Thin vs Thick - shells.pdf'

5.3. Contour settlement hasil iterasi

Berdasarkan hasil analisa iterasi, didapatkan contour total settlement pada fondasi raft yang telah memperhitungkan kekakuan fondasi raft seperti di bawah :



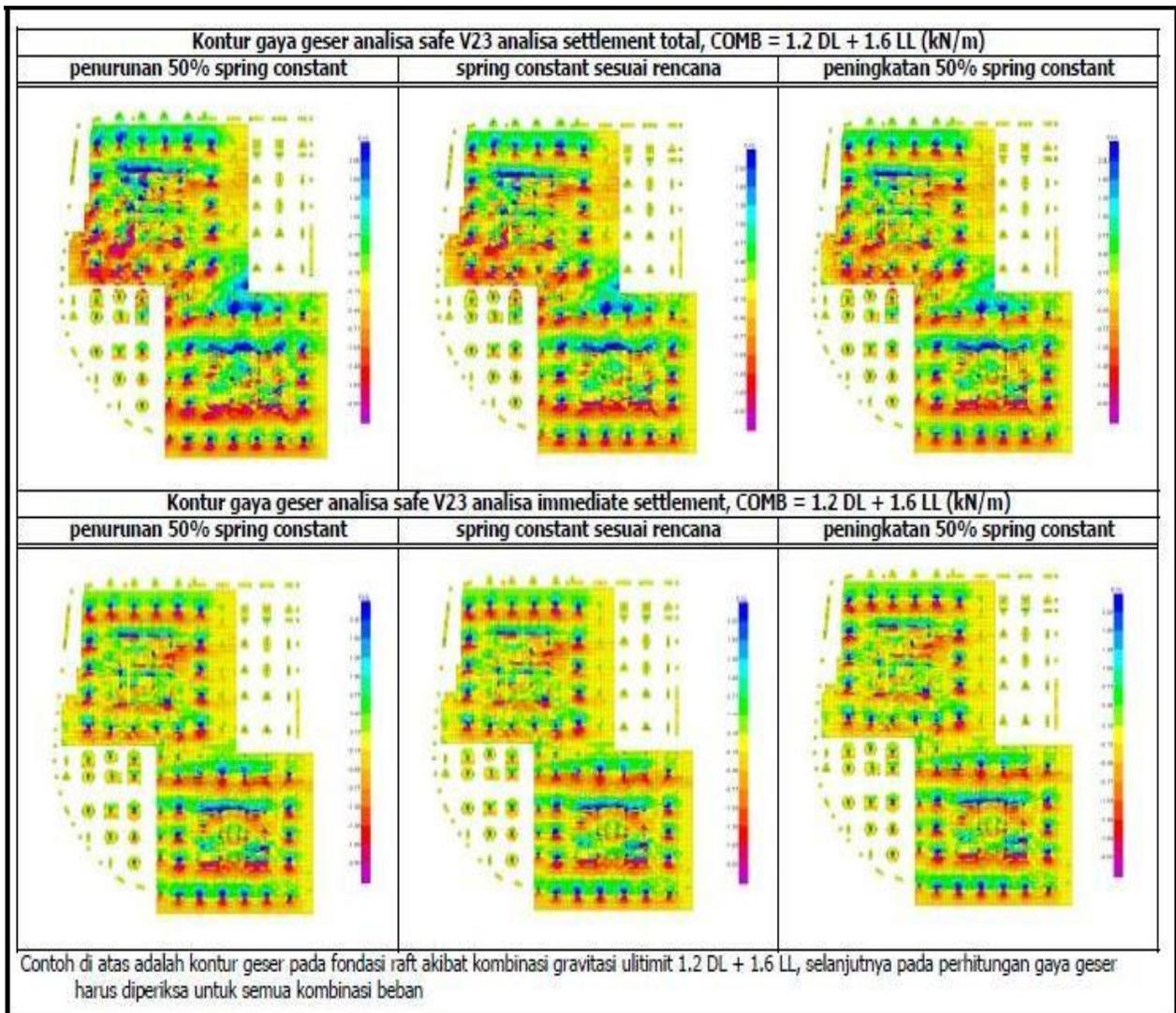
Contour settlement total pada fondasi raft dengan kekakuan fondasi

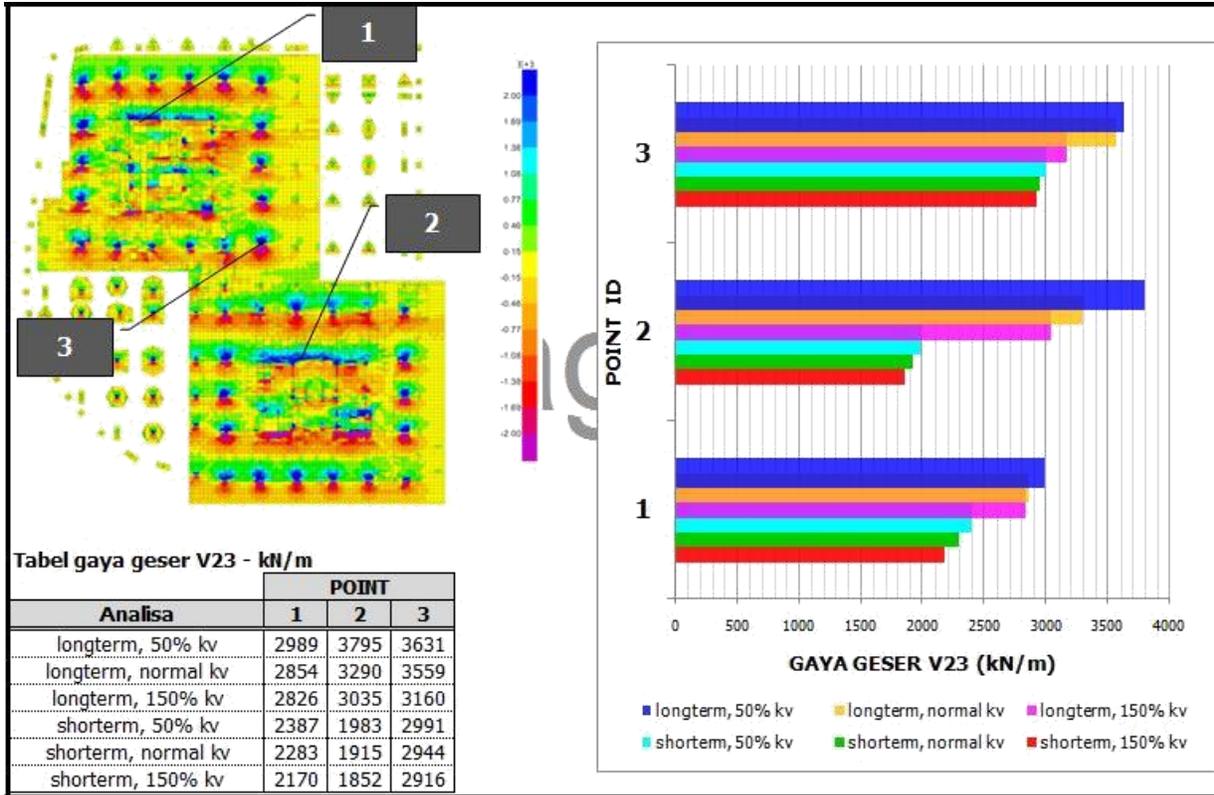
5.4 Gaya dalam pada fondasi mat/raft

Gaya dalam pada fondasi raft pada analisa penurunan jangka pendek dan pada penurunan jangka panjang dengan variasi penurunan dan peningkatan 50% kekakuan tanah pendukung (spring tiang rencana) dijelaskan di bawah.

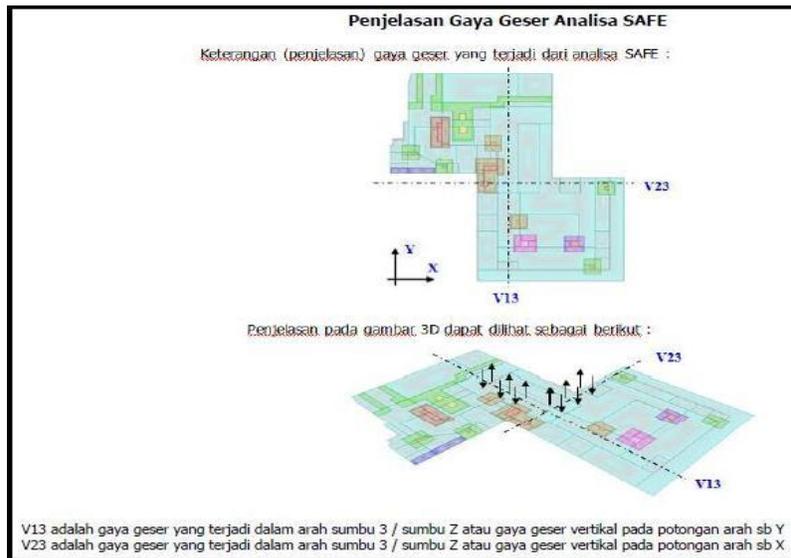
5.5. Gaya geser fondasi raft

Contour gaya geser pada fondasi raft berdasarkan hasil analisa safe dapat dilihat pada Gambar 3. Contour pada Gambar 3 merupakan contour gaya geser fondasi raft akibat kombinasi gravitasi 1.2DL +1.6LL. Berdasarkan contour tersebut nampak bahwa pada kasus ini gaya dalam geser yang menentukan adalah pada analisa penurunan jangka panjang dengan penurunan spring constant 50%. Namun tidak menutup kemungkinan pada kasus lain / pada area lain, analisa penurunan jangka pendek lebih menentukan, dan harus digunakan envelope dari semua analisa yang direncanakan. Penjelasan gaya geser dari analisa safe dapat dilihat pada Gambar 4.





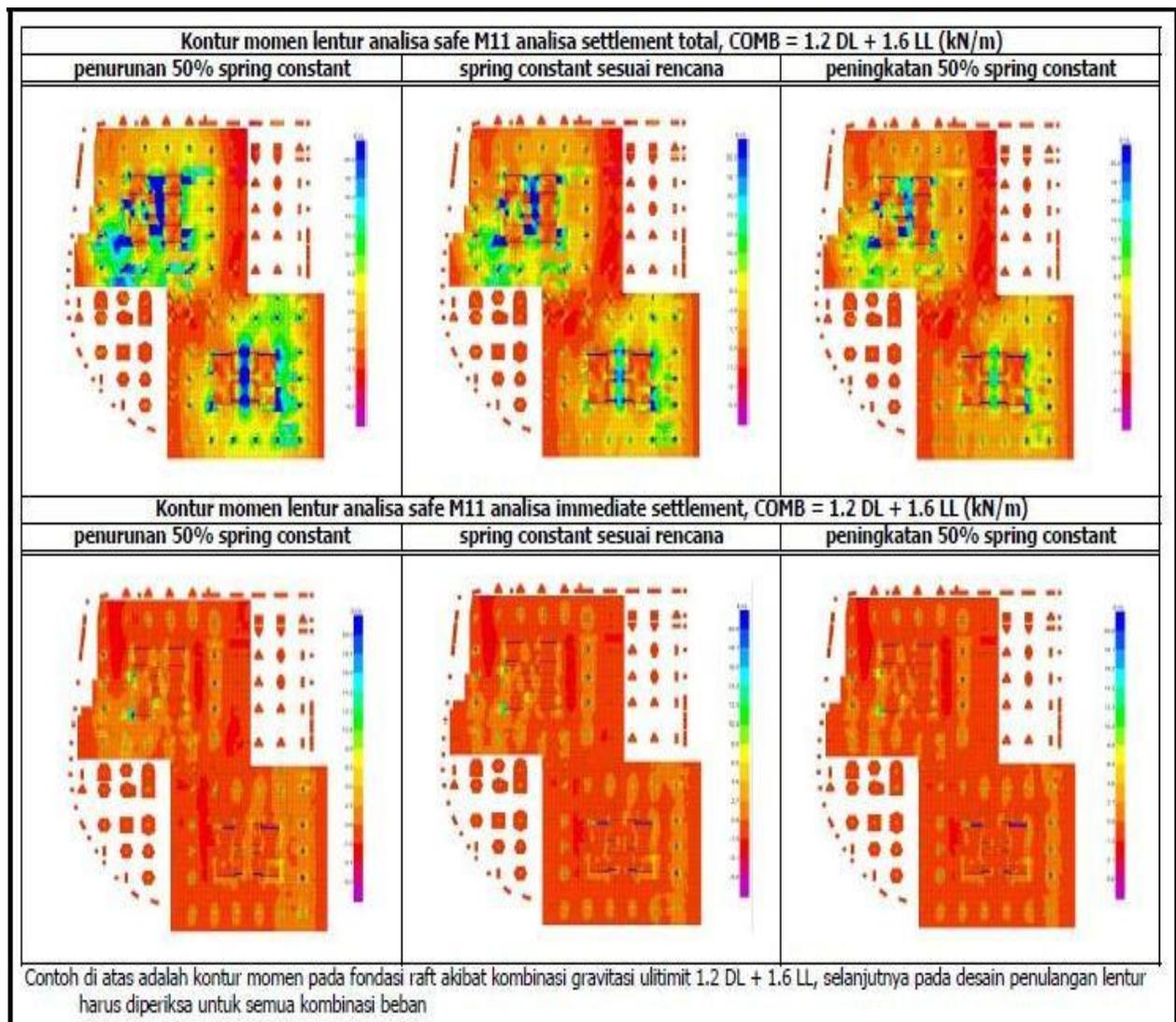
Gambar 3. Contour gaya geser. Pada proses desain geser fondasi raft selanjutnya juga harus diperiksa envelope kombinasi beban termasuk beban gempa.

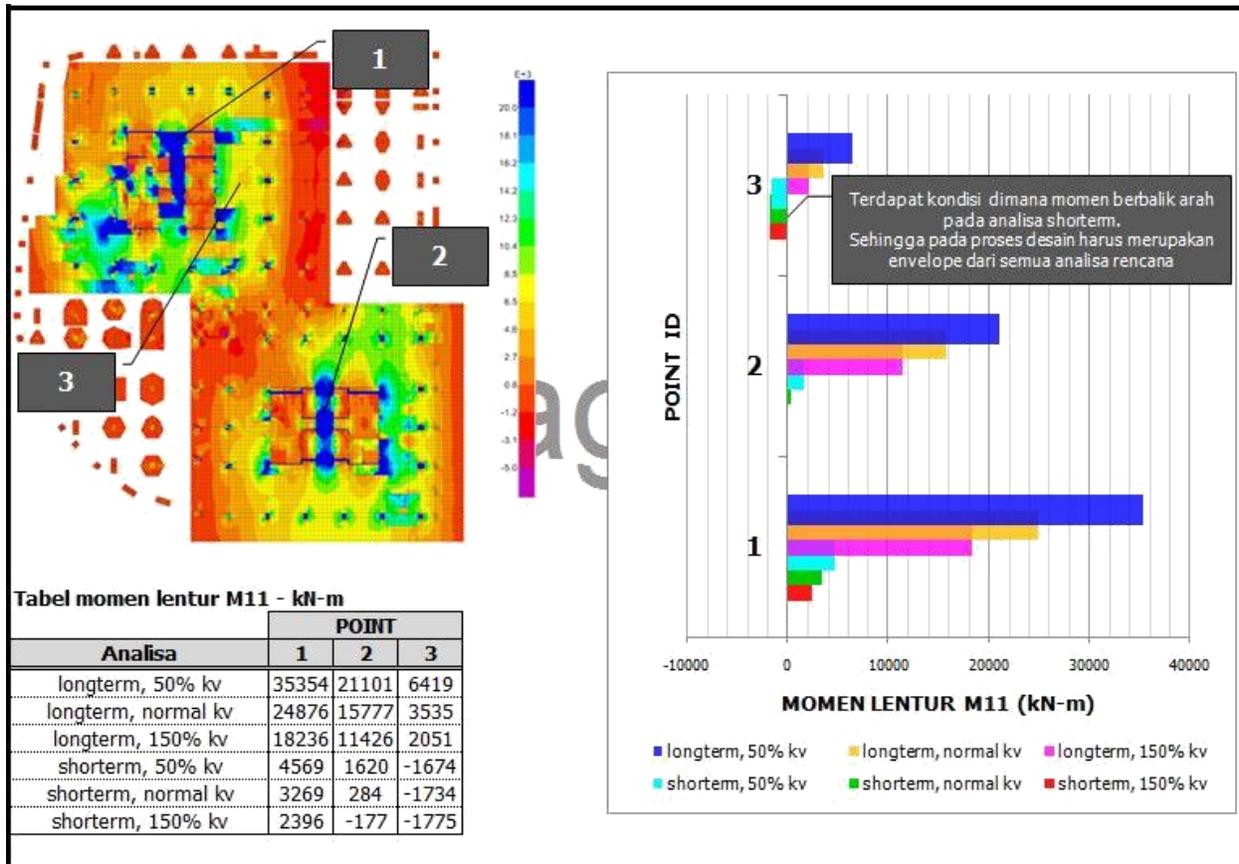


Gambar 4. Penjelasan gaya geser berdasarkan analisa dar

5.6. Momen lentur fondasi mat/raft

Contour momen lentur pada fondasi raft berdasarkan hasil analisa safe dapat dilihat pada Gambar 5. M11 adalah contour momen lentur dengan kurvatur arah sumbu X, dan M22 adalah contour momen lentur dengan kurvatur arah sumbu Y. Contour momen lentur pada Gambar 5 merupakan contour momen lentur fondasi raft akibat kombinasi gravitasi 1.2DL + 1.6LL. Berdasarkan contour momen lentur tersebut nampak bahwa pada kasus ini pada umumnya momen lentur yang menentukan adalah pada analisa penurunan jangka panjang dengan penurunan spring constant 50%. Namun terdapat kemungkinan pada area lain, analisa penurunan jangka pendek juga menentukan, dan harus digunakan envelope dari semua analisa yang direncanakan.





Gambar 5. Gambar contour momen lentur

5.7. Desain geser beton fondasi raft

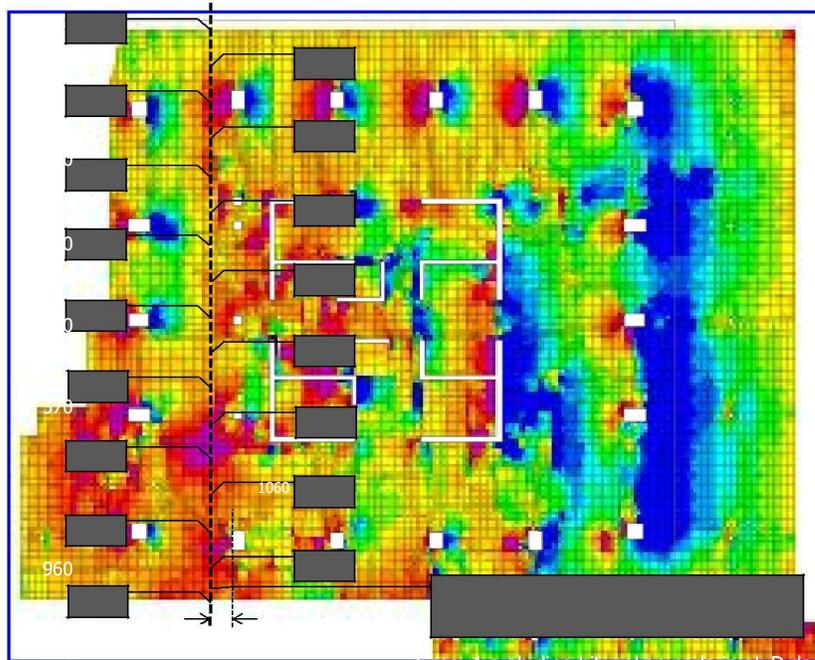
Gaya geser pada fondasi raft diperhitungkan dan tidak boleh melebihi kuat geser beton nominal beton dan apabila terlampaui maka diperlukan penambahan tulangan geser. Penjelasan perhitungan dijelaskan di bawah.

a. Desain geser 1 arah

Perhitungan geser 1 arah dilakukan pada potongan kritis fondasi raft, potongan kritis dihitung pada jarak D dari muka tumpuan dengan kuat geser beton diperhitungkan sebesar $V_c = \phi 1/6 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot A_{cv}$. Penjelasan lengkap perhitungan geser 1 arah dapat dilihat pada Gambar 6.

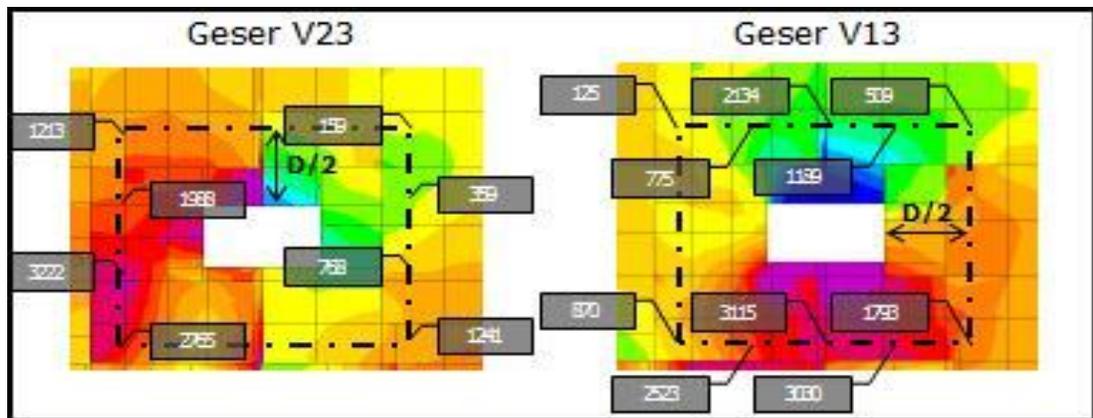
b. Desain geser 2 arah

Perhitungan geser 2 arah dilakukan pada potongan kritis fondasi raft, potongan kritis dihitung pada jarak $D/2$ dari muka tumpuan dengan kuat geser beton diperhitungkan sebesar $V_c = \phi 1/3 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot A_{cv}$. Penjelasan lengkap perhitungan geser 2 arah dapat dilihat pada Gambar 6.



Kuat geser beton = $V_c = \phi 1/6 c' A_v f =$ ^{cv} 1775 kN/m
 Gaya geser 1 arah pada potongan = 672 kN/m < V_c (OK)

Contoh perhitungan geser 1 arah pada fondasi raft



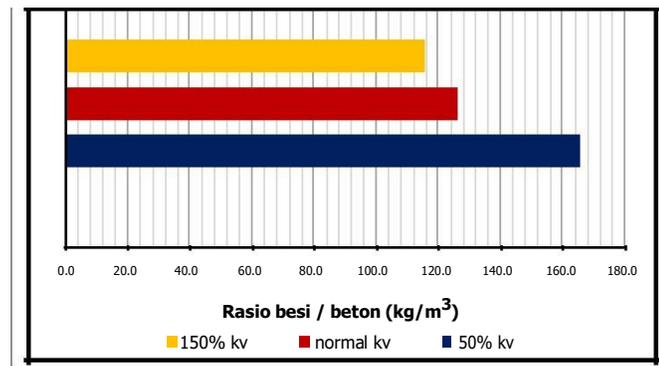
Geser pons diperhitungkan pada jarak $D/2$ dari muka kolom
 Geser pons pada potongan sb-Y menggunakan data contour V23, geser pons pada potongan sb-X menggunakan data contour V13.
 Kuat geser pons beton = $V_c = \phi 1/3 \sqrt{f_c'} A_{cv} = 3550$ kN/m
 Gaya geser pons = 1528 kN/m < V_c (OK)
 Contoh perhitungan geser 2 arah pada fondasi raft
 Gambar 6. Penjelasan perhitungan geser

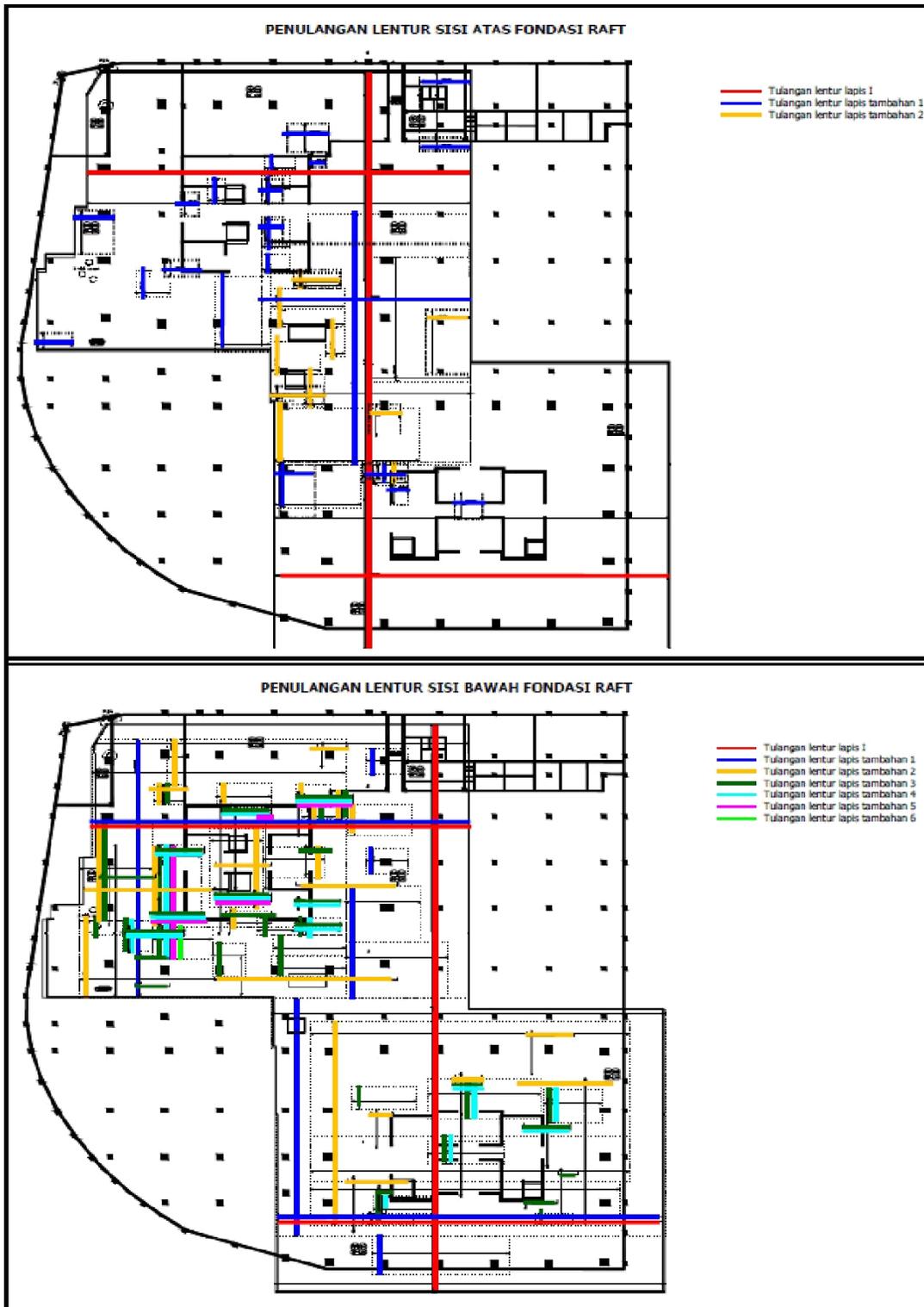
5.8. Desain penulangan lentur fondasi raft

Berdasarkan hasil analisa momen lentur pada fondasi raft, maka dapat diperhitungkan luas penulangan lentur perlu. Luas penulangan lentur perlu dapat dihitung otomatis pada program safe, dengan hasil desain berupa contour luas tulangan lentur perlu atau desain strip luas tulangan lentur perlu. Berdasarkan hasil desain luas tulangan lentur perlu tersebut dapat direncanakan tulangan lentur fondasi raft. Contour luas tulangan perlu desain safe dan penulangan fondasi raft rencana dapat dilihat pada Gambar 7.

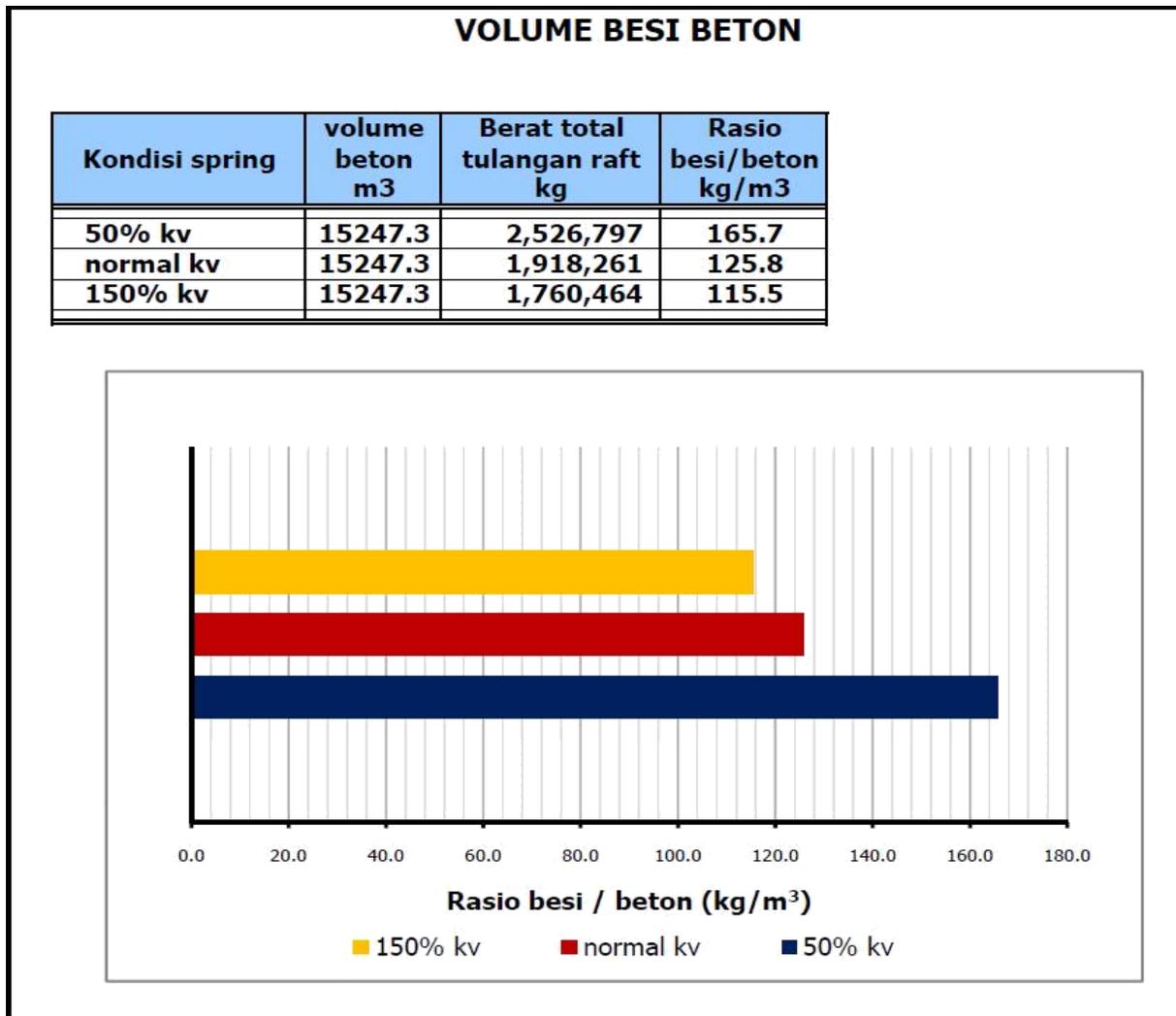


Dari analisis tersebut diatas dapat dilihat bahwa yang menentukan adalah pada kondisi penurunan 50% spring tiang dengan rasio besi beton 166 kg/m^3 . seperti ditunjukkan dibawah ini dan pada Gambar 8.





Gambar 7. Gambar penulangan pada mat/raft



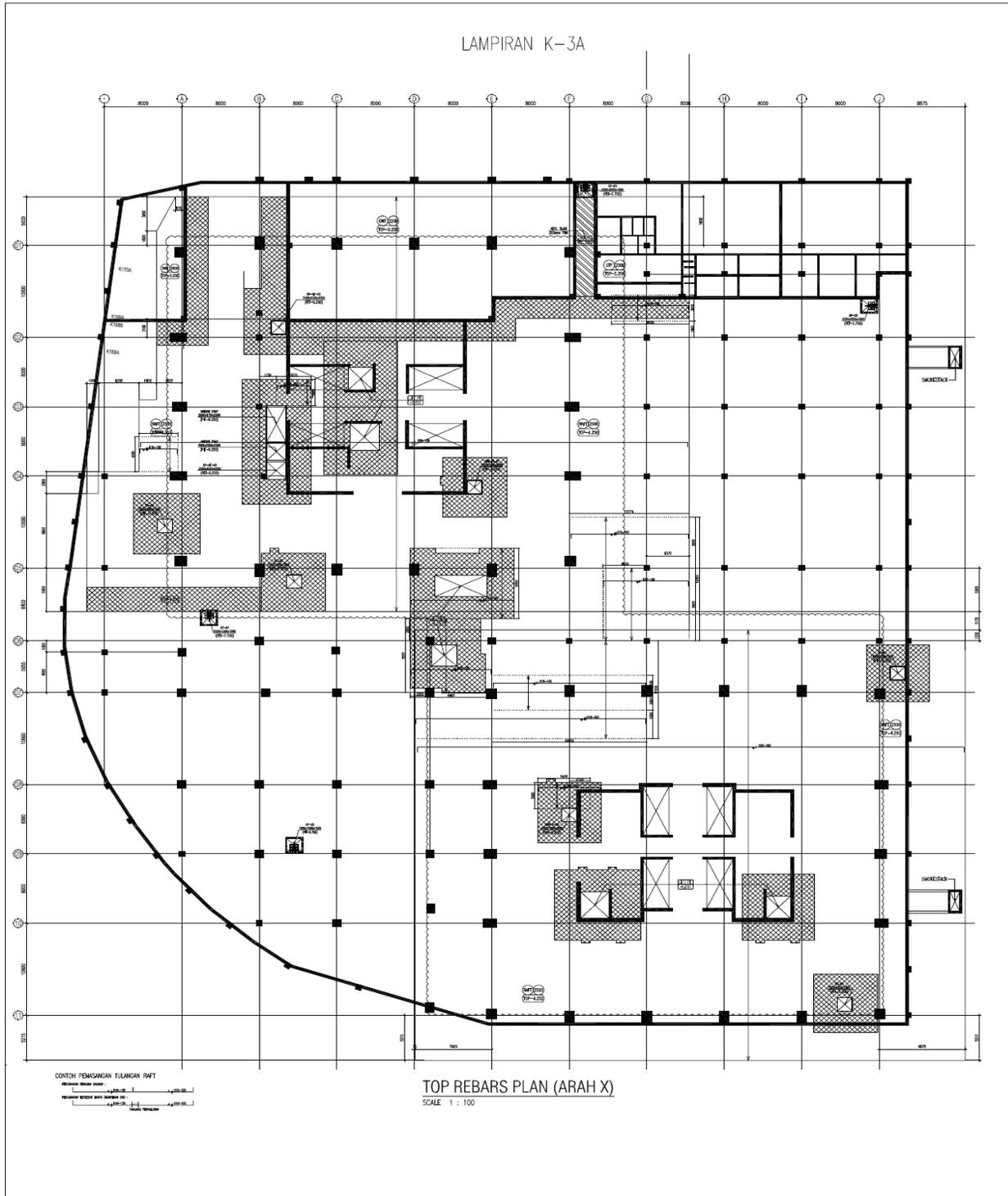
Gambar 8. Perbandingan kebutuhan tulangan untuk konstanta pegas/spring constant yang variatif.

6. Kesimpulan

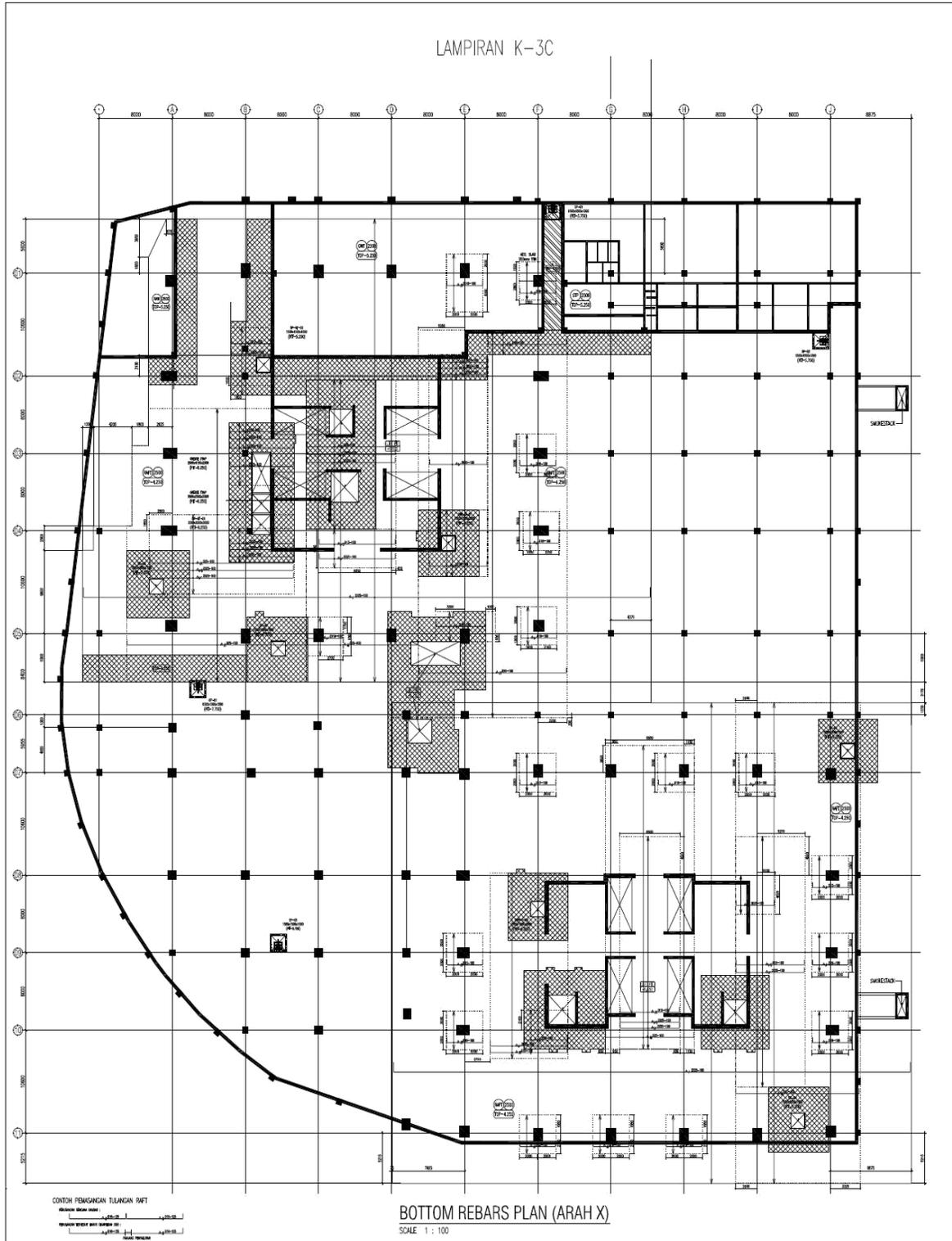
- a. Untuk mendapatkan hasil perencanaan mat yang efisien dan efektif dianjurkan untuk tidak menggunakan metoda konvensional.
- b. Dalam pemodelan elemen untuk mat/raft direkomendasikan menggunakan metoda FEM dengan menggunakan elemen thick plate/thick shell
- c. Untuk mendapatkan hasil yang akurat dibutuhkan parameter konstanta pegas yang sudah melalui proses iterasi
- d. Sesuai ketentuan SNI 1726-2012, dalam analisis perlu ditinjau konstanta

pegas/spring constants yang lebih besar dan lebih kecil 50% dari spring constant rencana.

- e. Gambar perencanaan penulangannya dapat dilihat pada Gambar 9 sampai dengan Gambar 12



Gambar 9. Gambar tulangan atas arah-X



Gambar 11. Gambar tulangan bawah arah-X

Daftar Pustaka.

1. ACI, Suggested “ Analysis and Design Procedures for Combined Footings and Mats”. ACI 336.2R-88, 1988. American Concrete Institute
2. Bathe, K.J., “Finite Element Procedures” First Edition, Prentice Hall, 1995.
3. SNI 2847-2013, Persyaratan “ beton struktural untuk bangunan gedung”.
4. SNI 1726-2012, “Tata cara Perencanaan Ketahanan Bangunan Gedung dan Non Gedung”