

Analisis Tiga Dimensi Pondasi Tiang-Rakit pada Tanah Lempung, Menteng-Jakarta

*Evelyn Jogiadinata, Paulus Pramono Rahardjo, Aswin Lim
Fakultas Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung
*)angevnat@gmail.com

Received: 11 Januari 2020 Revised: 23 Februari 2021 Accepted: 26 Februari 2021

Abstract

Piled-raft foundation is a combination of pile foundation and raft foundation. Bearing capacity of piled-raft foundation yielded from contribution of both pile capacity and raft capacity. Most of the time, design of pile foundation is assumed that all load is solely carried by pile and the capacity of raft is ignored. In this study, three-dimensional finite element analysis was applied to analyze the load percentage that can be carried by raft. A case study, which is located in Central Jakarta, Indonesia, was modeled to investigate this issue. This project was instrumented with two pressure cells where the data were used to verified the model and the load distribution. The analysis results showed good agreement with the measurement data, where the load carried by the raft is around 33-42%.

Keywords: *Piled-raft foundation, load distribution, 3D finite element method*

Abstrak

Pondasi tiang-rakit merupakan kombinasi antara pondasi tiang dan pondasi rakit. Daya dukung pondasi tiang-rakit diperoleh dari kontribusi pemikulan beban oleh pondasi tiang maupun pondasi rakit. Namun dalam desain pondasi tiang pada umumnya selalu diasumsikan bahwa seluruh beban dipikul oleh pondasi tiang saja dan mengabaikan daya dukung pondasi rakit. Untuk menganalisis persentase beban yang dapat dipikul oleh pondasi rakit dilakukan pemodelan dengan menggunakan elemen hingga tiga dimensi pada studi kasus yang berlokasi di Jakarta Pusat, Indonesia. Pada proyek ini terdapat data instrumentasi berupa dua titik pressure cell yang dapat digunakan untuk memverifikasi model dan distribusi beban yang terjadi. Hasil analisis menunjukkan hasil yang konsisten dengan hasil yang terukur, dimana persen beban yang dipikul pondasi rakit sekitar 33-42%.

Kata kunci: *Pondasi tiang-rakit, distribusi beban, metode elemen hingga 3D*

Pendahuluan

Penggunaan pondasi tiang-rakit sudah sangat sering digunakan pada desain gedung-gedung tinggi. Desain pondasi tiang-rakit pada umumnya selalu diasumsikan bahwa seluruh beban dipikul oleh pondasi tiang saja. Padahal pada kenyataannya pondasi rakit juga ikut memikul beban dan daya dukungnya dapat diperhitungkan saat mendesain pondasi. Dalam SNI 8460:2017 (Standar Nasional Indonesia) tentang persyaratan perancangan geoteknik dikatakan bahwa dalam mendesain pondasi tiang-rakit, beban yang diizinkan untuk dipikul oleh pondasi rakit adalah maksimum 25%, sedangkan sekurangnya 75% dipikul oleh pondasi tiang. Pada kenyataannya, proporsi beban yang

dipikul oleh pondasi rakit dan yang dipikul pondasi tiang memiliki variasi yang cukup besar dan tidak terbatas pada SNI 8460:2017. Menurut Katzenbach *et al.* (2017), beban yang di pikul oleh tiang berkisar antara 30 sampai 90% dari keseluruhan total berat bangunan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi respon dari pondasi tiang-rakit terhadap beban yang bekerja adalah rasio kelangsingan tiang (*pile slenderness ratio*), rasio jarak antar tiang (*pile spacing ratio*), rasio kekakuan tiang-tanah (*pile-soil stiffness ratio*), dimensi pondasi rakit dan rasio kekakuan rakit-tanah (*raft-soil stiffness ratio*) (Clancy & Randolph, 1996). Beberapa studi parametrik telah dilakukan untuk mencari proporsi pembebanan

yang dipikul oleh pondasi rakit. Horikoshi & Randolph (1996) melakukan studi parametrik terhadap konfigurasi tiang dengan menggunakan uji *centrifuge*, kemudian Horikoshi dan Randolph (1998) melakukan studi parametrik kembali terhadap beberapa parameter yang mempengaruhi performa pondasi tiang-rakit untuk mengoptimasi desain pondasi tiang-rakit.

Selain itu, Katzenbach *et al.* (1998) melakukan kajian dengan variasi jumlah tiang dan panjang tiang. Poulos (2001a, 2001b) melakukan studi efek jumlah tiang, tebal pondasi rakit, dan jenis beban (beban merata dan beban terpusat). Reul & Randolph (2004) juga mencoba melakukan optimasi desain dengan melakukan studi parametrik terhadap konfigurasi tiang, panjang tiang dan rasio kekakuan pondasi rakit dan tanah. Nguyen *et al.* (2013, 2014) melakukan studi parametrik terhadap panjang tiang, jumlah tiang, tebal pondasi rakit dan jenis beban. Lee *et al.* (2015) melakukan studi variasi jarak antar tiang terhadap distribusi beban dan penurunan yang terjadi. Alnuaim *et al.* (2017) melakukan variasi lebar pondasi rakit dan diameter tiang.

Berdasarkan hasil studi parametrik yang telah dilakukan oleh para peneliti, distribusi beban pada pondasi tiang-rakit dipengaruhi oleh banyak faktor. Faktor-faktor yang mempengaruhi distribusi beban pada pondasi tiang-rakit yaitu kekakuan tanah, kekakuan pondasi rakit, kekakuan pondasi tiang, ukuran pondasi tiang, ukuran pondasi rakit, jarak antar pondasi tiang, dan penurunan yang terjadi.

Beberapa studi kasus pada tanah lempung Frankfurt juga telah dilakukan oleh Katzenbach *et al.* (2000, 2017) dan Reul & Randolph (2003). Yamashita *et al.* (2015) juga telah melakukan beberapa studi kasus di Jepang. Walaupun sudah banyak studi dilakukan di luar negeri, namun belum ditemukan adanya studi performa pondasi tiang-rakit khususnya pada tanah lempung Jakarta.

Pada penelitian ini akan ditampilkan studi kasus pada proyek yang berlokasi di Jakarta Pusat, Indonesia. Proyek ini memiliki data instrumentasi berupa dua titik *pressure cell* yang dapat digunakan untuk memverifikasi distribusi beban yang terjadi. Data hasil instrumentasi tersebut akan digunakan untuk verifikasi analisis element hingga pada studi ini.

Metode

Beberapa metode untuk melakukan analisis pondasi tiang-rakit sudah dikembangkan oleh banyak peneliti seperti Poulos & Davis (1980), Clancy & Randolph (1993), Randolph (1994), dan

Katzenbach *et al.* (1998). Pedoman desain pondasi tiang-rakit pun sudah diberikan oleh Poulos (2002) dan Katzenbach & Choudhury (2013). Pada penelitian ini pemodelan dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga 3D, dimana digunakan program komputer yaitu program Plaxis 3D. Nguyen *et al.* (2013, 2014) dan Alnuaim *et al.* (2013) telah melakukan verifikasi Plaxis 3D dengan menggunakan tes *centrifuge*.

Model material yang digunakan adalah model *hardening soil*, dengan tipe drainase diambil *drained*. Parameter *input* untuk model *hardening soil* sama seperti model Mohr Coulomb yaitu berat isi, angka poisson, sudut geser, kohesi, sudut dilatansi, dan koefisien permeabilitas. Tetapi nilai kekakuan pada model *hardening soil* terdapat tiga parameter kekakuan yaitu modulus saat tegangan 50% (E_{50}^{ref}), modulus oedometer (E_{oed}^{ref}), dan modulus *unloading reloading* (E_{ur}^{ref}). Parameter tambahan lainnya yang juga perlu diinputkan dalam model *hardening soil* adalah nilai faktor yang menunjukkan perubahan nilai kekakuan terhadap tegangan. Faktor ini dilambangkan dengan simbol *m*.

Nilai kohesi efektif pada tanah lempung terkonsolidasi normal lebih kecil dari 10, sedangkan untuk tanah pasir, nilai kohesi mendekati nol (Wesley, 2010). Nilai sudut geser dalam efektif untuk tanah lempung diperoleh dari nilai tipikal yang diusulkan oleh Look (2007), sedangkan untuk tanah pasir diperoleh dari grafik korelasi dengan N_{SPT} (Peck, 1974).

Gouw & Saptyanto (2012) melakukan hitung balik pada nilai kekakuan yang dikorelasikan dengan nilai N_{SPT} menggunakan program Plaxis. Dari hasil penelitian tersebut diperoleh korelasi E_{50}^{ref} untuk tanah lempung (Persamaan 1) dan korelasi E_{50}^{ref} untuk tanah pasir (Persamaan 2).

$$E_{50}^{ref} \text{ (MPa)} = 1,3 N_{SPT} \text{ (tanah lempung)} \quad (1)$$

$$E_{50}^{ref} \text{ (MPa)} = 2 N_{SPT} \text{ (tanah pasir)} \quad (2)$$

dimana modulus oedometer (E_{oed}^{ref}) diambil $0,8 \times E_{50}^{ref}$ dan modulus *unloading reloading* (E_{ur}^{ref}) diambil $3 \times E_{50}^{ref}$.

Pengaruh tegangan terhadap kekakuan berubah sesuai pangkat *m*. Nilai *m* berkisar antara 0,5 sampai 1. Untuk tanah pasir nilai *m* sekitar 0,5, sedangkan untuk tanah lempung lunak nilai *m* = 1.

Deskripsi kasus

Lokasi studi kasus di Jakarta Pusat, Indonesia. Proyek ini merupakan bangunan apartemen yang terdiri dari tiga tower dengan masing-masing tower

setinggi 32 lantai dan empat basement. Tower satu dan tower dua cukup simetris dan tergabung dengan podium yang sama sedangkan lokasi tower tiga terpisah oleh bangunan lain. Instrumentasi hanya dilakukan pada tower satu, sehingga penelitian ini hanya akan difokuskan pada tower satu saja. Jumlah pondasi tiang pada area tower satu adalah 181 tiang pondasi. Pondasi tiang memiliki panjang efektif 30m (dimulai kedalaman 15 m hingga 45 m dari permukaan tanah asli), dengan diameter 1m dan jarak antar tiang 2,5D dan 3D, dimana D adalah diameter tiang. Daya dukung 1 tiang tunggal mencapai 4.500 kN. Tebal pondasi rakit 2,2 m.

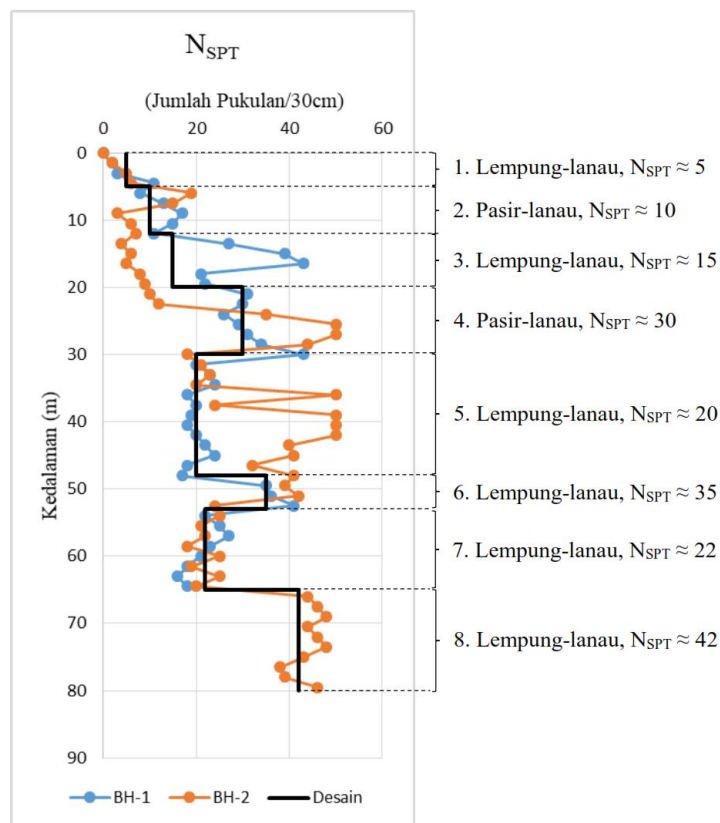
Data tanah yang diperoleh berupa 2 titik bor sedalam 65 m dan 80 m. Dari kedua titik bor tersebut diambil nilai N_{SPT} desain dengan pendekatan yang konservatif dan dapat mewakili kondisi pada kedua titik bor tersebut. Profil N_{SPT} desain dapat dilihat pada Gambar 1. Muka air tanah terdapat pada kedalaman 5 m di bawah permukaan tanah asli. Gambar 2 menunjukkan stratifikasi dan parameter tanah untuk desain. Karena data laboratorium tidak diperoleh, maka parameter tanah untuk desain menggunakan nilai tipikal (nilai umum untuk jenis tanah tersebut) atau korelasi dengan hasil uji lainnya. Parameter kuat geser tanah menggunakan nilai tipikal, sedangkan parameter kompresibilitas tanah menggunakan korelasi dengan nilai N_{SPT} (Persamaan 1 dan 2).

Analisis metode elemen hingga tiga dimensi

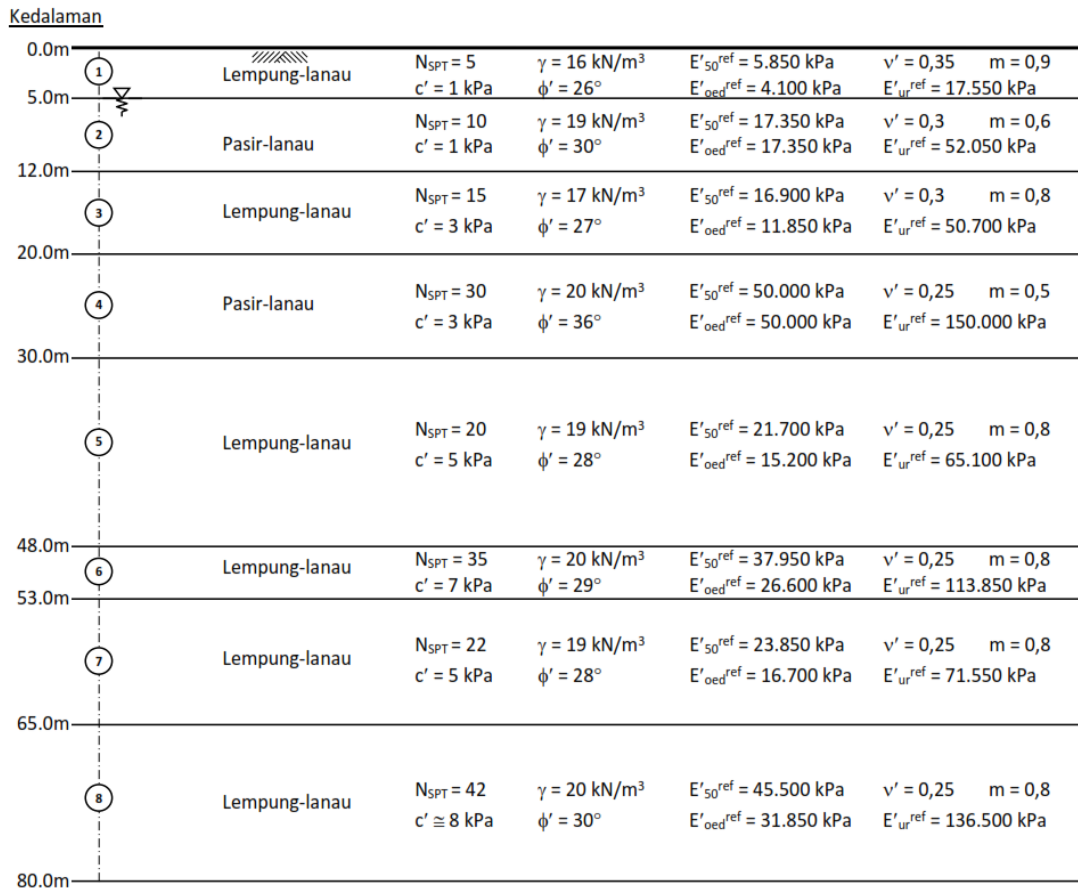
Model numerik

Geometri tower satu dan dua cukup simetris, sehingga model elemen hingga dilakukan pada tower satu saja dengan mengadopsi prinsip *axissymmetric* (Lim *et al.*, 2016). Hal ini dilakukan untuk menghemat waktu pemodelan tanpa mengurangi hasil yang diperoleh dari analisa. Gambar 3 menunjukkan pemodelan tiga dimensi, dimana pemodelan dilakukan pada area $300 \times 271,8 \times 80$ m. Gambar 4 menunjukkan tampak atas dari model tersebut, dimana besar *area* pondasi adalah $71,8 \times 39,8$ m. Total tiang pondasi pada *area* tower satu mencapai 181 tiang, dengan jumlah tiang pada *area* tapak tower adalah 98 tiang pondasi. Denah pondasi tower satu dapat dilihat pada Gambar 6.

Tahapan konstruksi dibagi menjadi tujuh langkah perhitungan elemen hingga yang dapat dilihat pada Tabel 1. Tahapan penggalian tanah dimodelkan untuk memperoleh tegangan tanah yang sesungguhnya. Galian dibagi menjadi tiga tahap, di mana setiap tahap dilakukan penggalian sedalam 5 m. Area galian selalu dibuat kering selama tahap galian. Setelah tahap konstruksi selesai, maka muka air tanah dikembalikan ke kondisi awal. Pada studi ini, jangkar tanah (*ground anchor*) tidak dimodelkan untuk menyederhanakan model.



Gambar 1. Profil nilai N_{SPT} pada proyek yang ditinjau



Gambar 2. Stratifikasi dan parameter tanah untuk analisis

Tabel 1. Tahapan perhitungan

Tahap	Tahapan perhitungan
1	Konstruksi Dwall
2	Gali ke 1, gali 5 m pertama di bawah permukaan tanah
3	Gali ke 2, gali 5 m lagi hingga kedalaman galian 10 m di bawah permukaan tanah
4	Gali ke 3, gali 5 m lagi hingga kedalaman galian 15 m di bawah permukaan tanah
5	Konstruksi pondasi tiang-rakit
6	Aplikasikan beban
7	Kembalikan muka air tanah hingga kondisi awal (5 m di bawah permukaan tanah)

Input parameter tanah dan struktur

Parameter tanah dengan model *hardening soil* dapat dilihat pada Gambar 2. Sedangkan untuk Parameter elemen struktur dapat dilihat pada Tabel 2. Pondasi rakit dimodelkan dengan menggunakan elemen pelat, begitu pula dengan dinding penahan tanah. Sedangkan tiang dimodelkan dengan menggunakan *embedded pile*. Dinding penahan tanah dibuat

sangat kaku ($f_c' = 2.000$ MPa) sehingga dapat menahan defleksi akibat galian walaupun jangkar tanah (*ground anchor*) tidak dimodelkan. Untuk model pembebanan yang dilakukan, dapat dilihat pada Gambar 5.

Pembebanan *area* tower diberikan dalam bentuk beban merata permukaan (*surface load*), sedangkan untuk *area* podium digunakan beban terpusat (*point load*). Total beban terdiri dari beban yang diaplikasikan dan beban pondasi rakit itu sendiri. Beban yang diaplikasikan pada pondasi rakit berupa reaksi kolom yang diperoleh dari konsultan perencana. Total beban dari reaksi kolom adalah 645.906 kN. Beban pondasi itu sendiri berupa berat isi beton dikalikan dengan volume pondasi. Total beban pondasi itu sendiri adalah 134.717 kN. Sehingga total beban secara keseluruhan adalah 780.623 kN. Tabel 3 menunjukkan rangkuman beban pada *area* tower maupun pada *area* podium.

Instrumentasi lapangan

Untuk memperoleh informasi porsi beban yang dipikul oleh pondasi rakit dan pondasi tiang secara aktual, maka perlu dipasang instrumentasi pada pondasi tiang-rakit. Katzenbach & Moormann

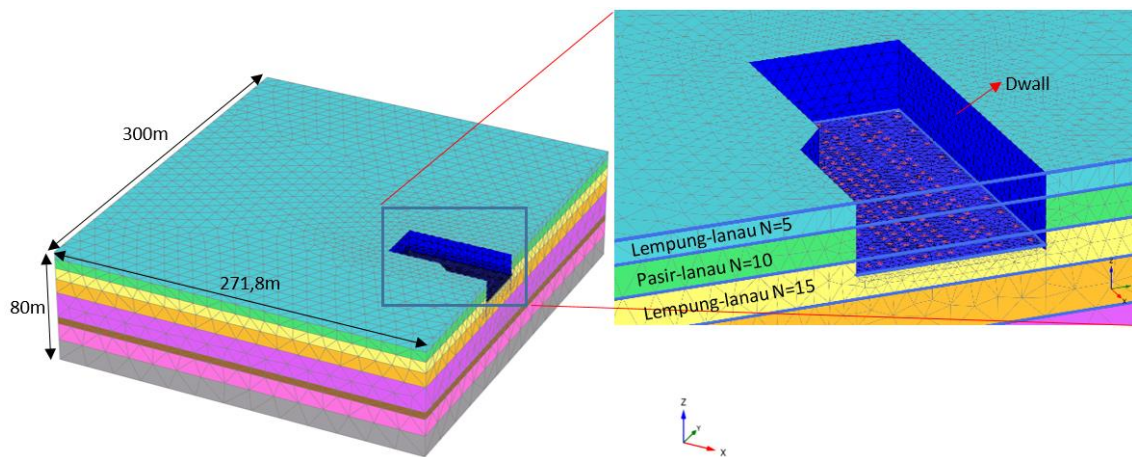
(2003) telah memberikan rekomendasi untuk penggunaan instrumentasi pondasi tiang-rakit.

Pada studi kasus ini dipasang instrumentasi berupa dua titik *pressure cell* yang dipasang pada lokasi as 1.B - 1.3 dan as 1.C - 1.3 Tower satu. Gambar 6 menunjukkan lokasi titik instrumentasi *pressure cell* pada Tower satu. Hasil kedua titik instrumentasi *pressure cell* yang dilakukan oleh PT. Geotechnical Engineering Consultant (2018) menunjukkan hasil yang cukup baik dengan hasil pembacaan yang konsisten satu sama lain. Tegangan yang diperoleh dari *pressure cell* adalah sebesar 120-150 kPa atau 12-15 ton/m². Hasil tersebut setara dengan 33-42% dari total beban, di mana total beban awal diestimasi

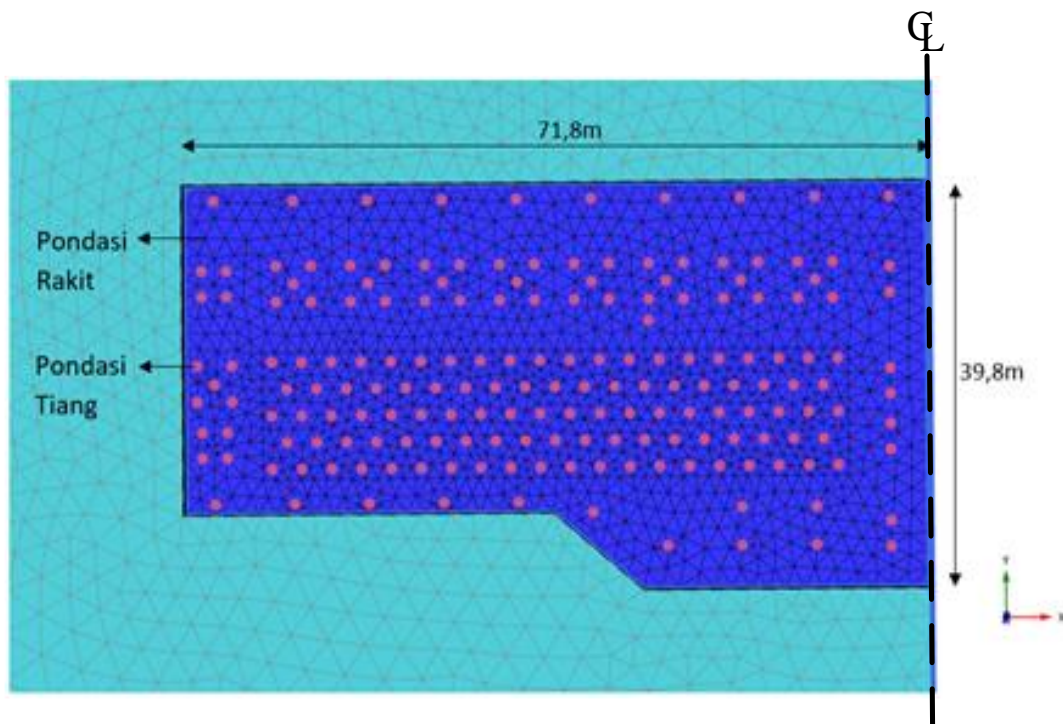
sebesar 36 ton/m² (1 ton/m² per lantai). Hasil pembacaan instrumentasi *pressure cell* dapat dilihat pada Gambar 7.

Hasil dan Pembahasan

Penurunan maksimum yang terjadi adalah sekitar 43mm. Hasil ini masih sesuai dengan persyaratan yang disebutkan dalam SNI 8460:2017, dimana penurunan maksimum yang diizinkan terjadi adalah 15 cm + b/600. Kontur penurunan tanah pada arah sumbu z dapat dilihat pada Gambar 8, sedangkan kontur penurunan arah sumbu z pada pelat pondasi rakit dapat dilihat pada Gambar 9. Gambar 10 menunjukkan gaya normal pada seluruh tiang.



Gambar 3. Model Plaxis 3D untuk analisis



Gambar 4. Tampak atas model 3D

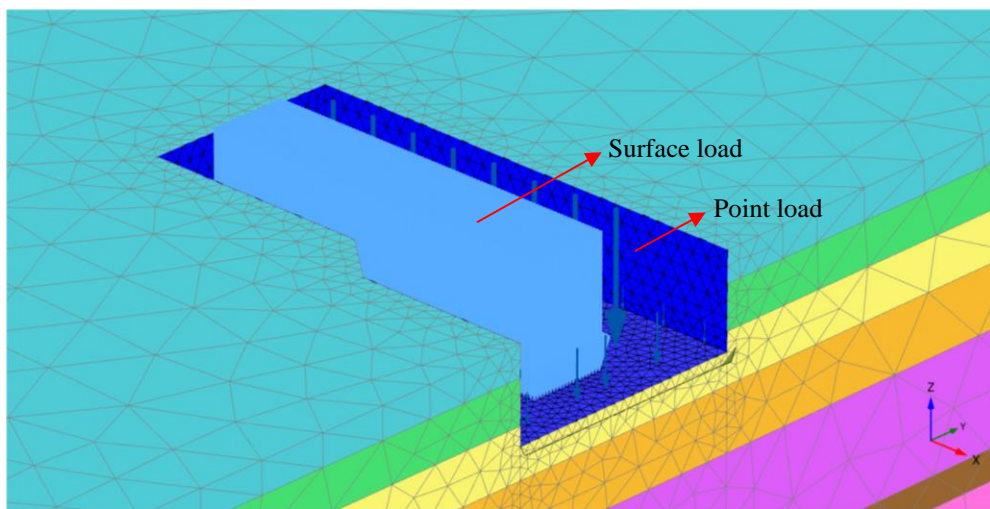
Tabel 2. Parameter struktur

	Struktural elemen dalam model	γ	f_c'	E'	ν'
		(kN/m^3)	(MPa)	(kPa)	
Pondasi rakit T = 2,2 m	Pelat	25	25	23.500.000	0,15
Pondasi tiang D = 1 m	<i>Embedded pile</i>	25	25	23.500.000	0,15
Dwall t = 1,5 m	Pelat	25	2.000	210.190.000	0,15

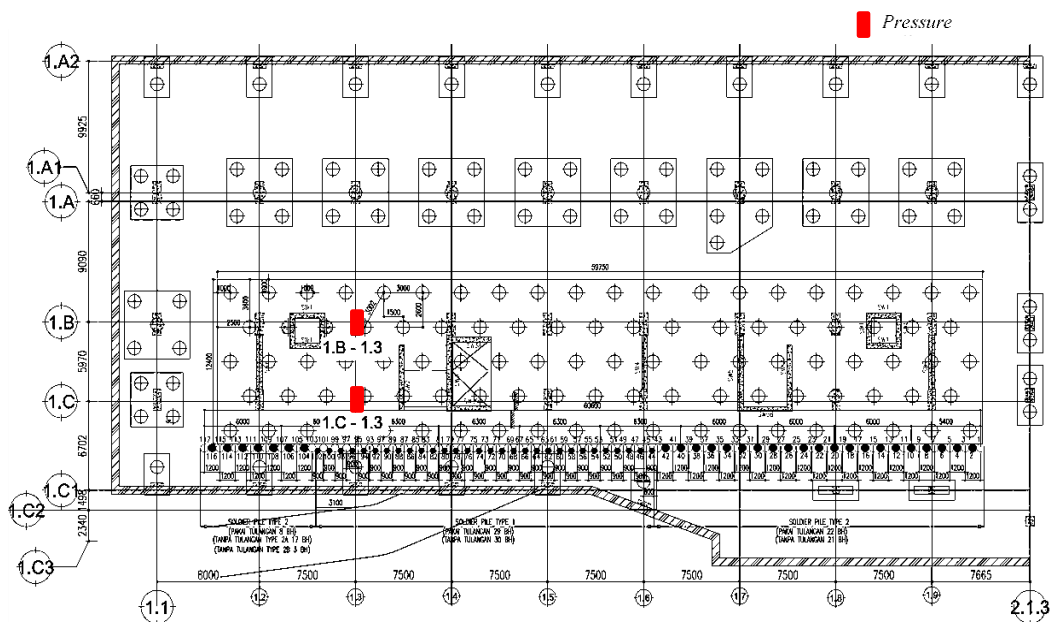
Catatan: T = tebal pondasi rakit, D = diameter pondasi tiang, t = tebal Dwall, γ = berat isi, f_c' = kuat tekan, E' = modulus elastisitas, ν' = *poisson ratio*

Tabel 3. Total beban

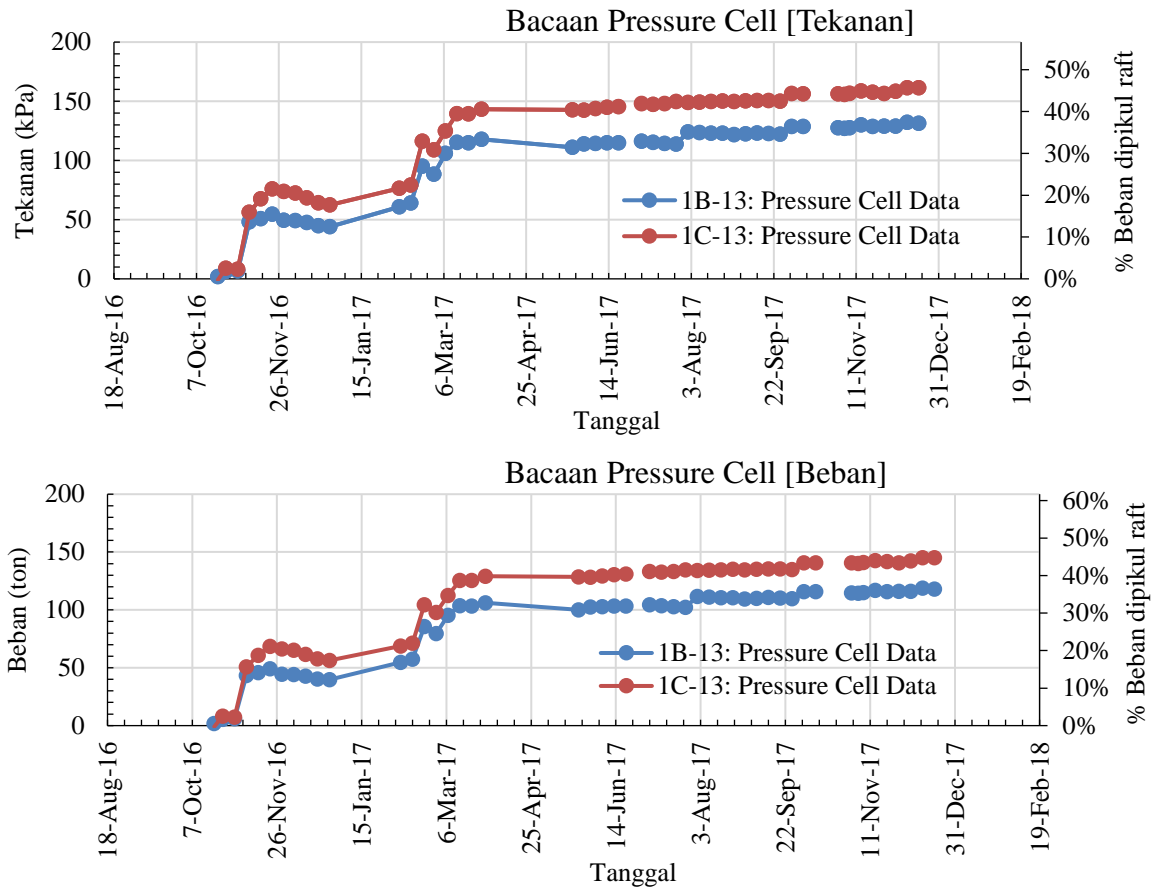
Lokasi	Jumlah tiang	Total beban yang diaplikasikan (kN)	Berat pondasi rakit (kN)	Total beban (kN)
Tower	98	349.266	40.238	389.504
Podium	83	296.640	94.479	391.119
Keseluruhan	181	645.906	134.717	780.623



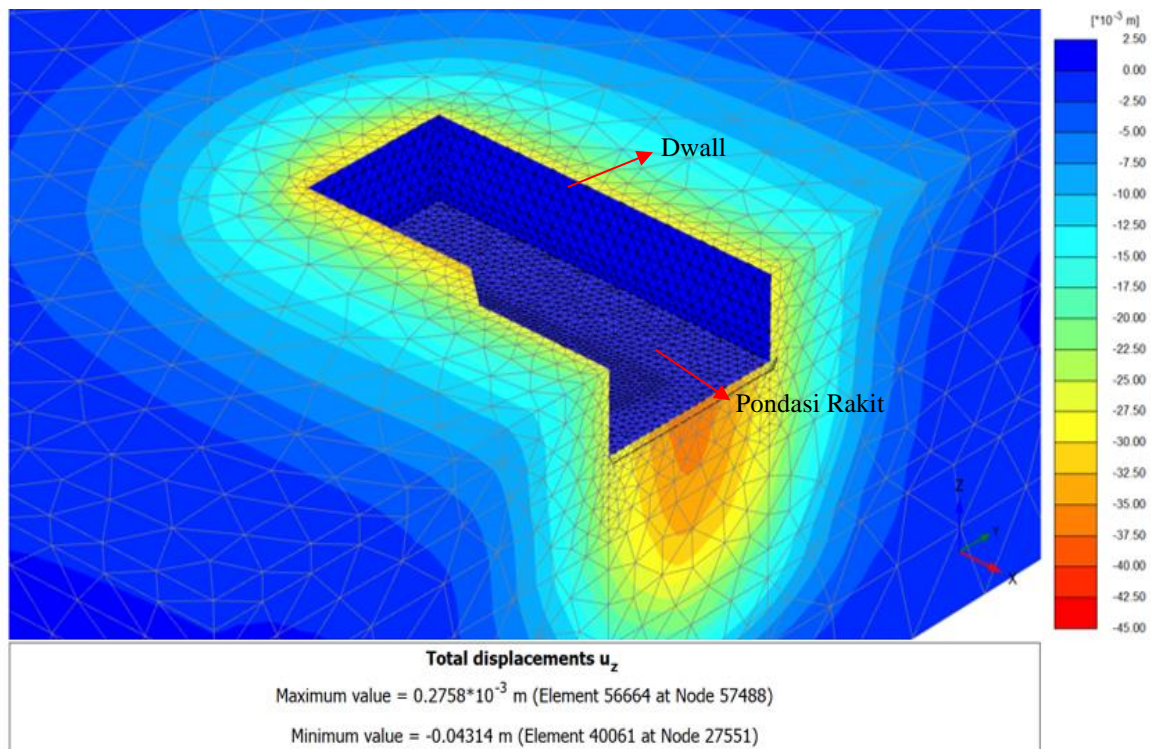
Gambar 5. Model pembeban yang dilakukan



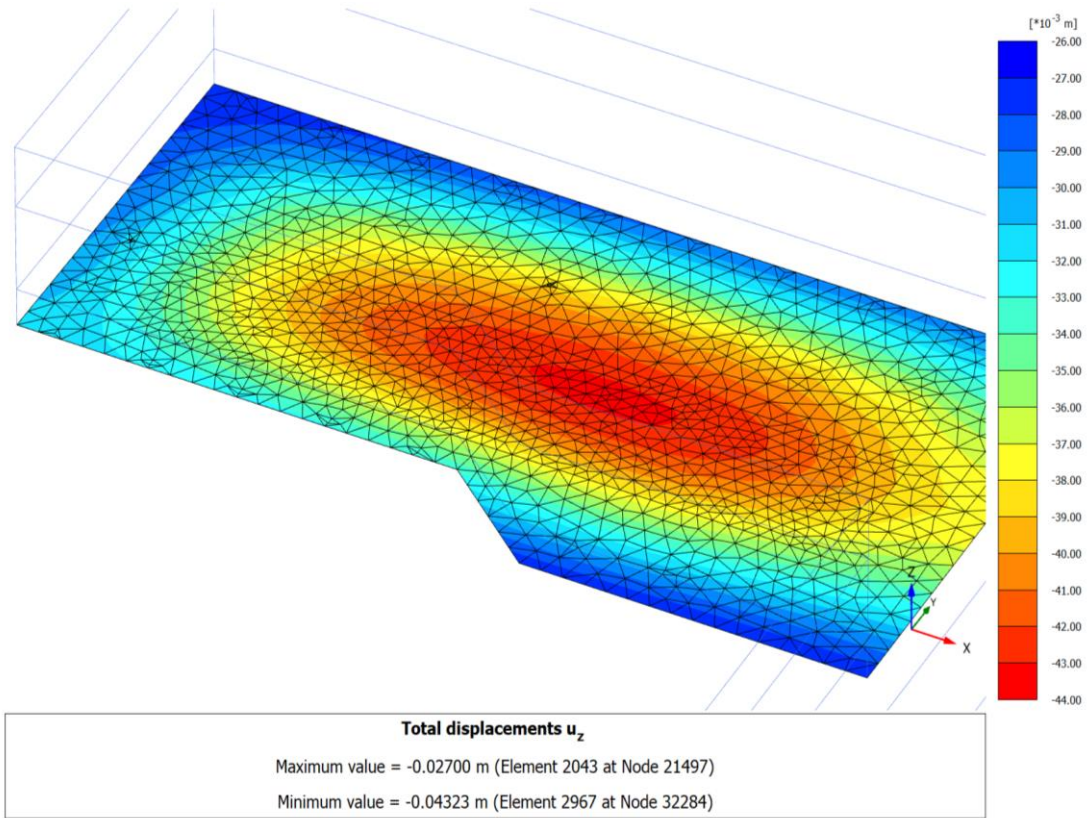
Gambar 6. Lokasi *pressure cell* pada tower 1



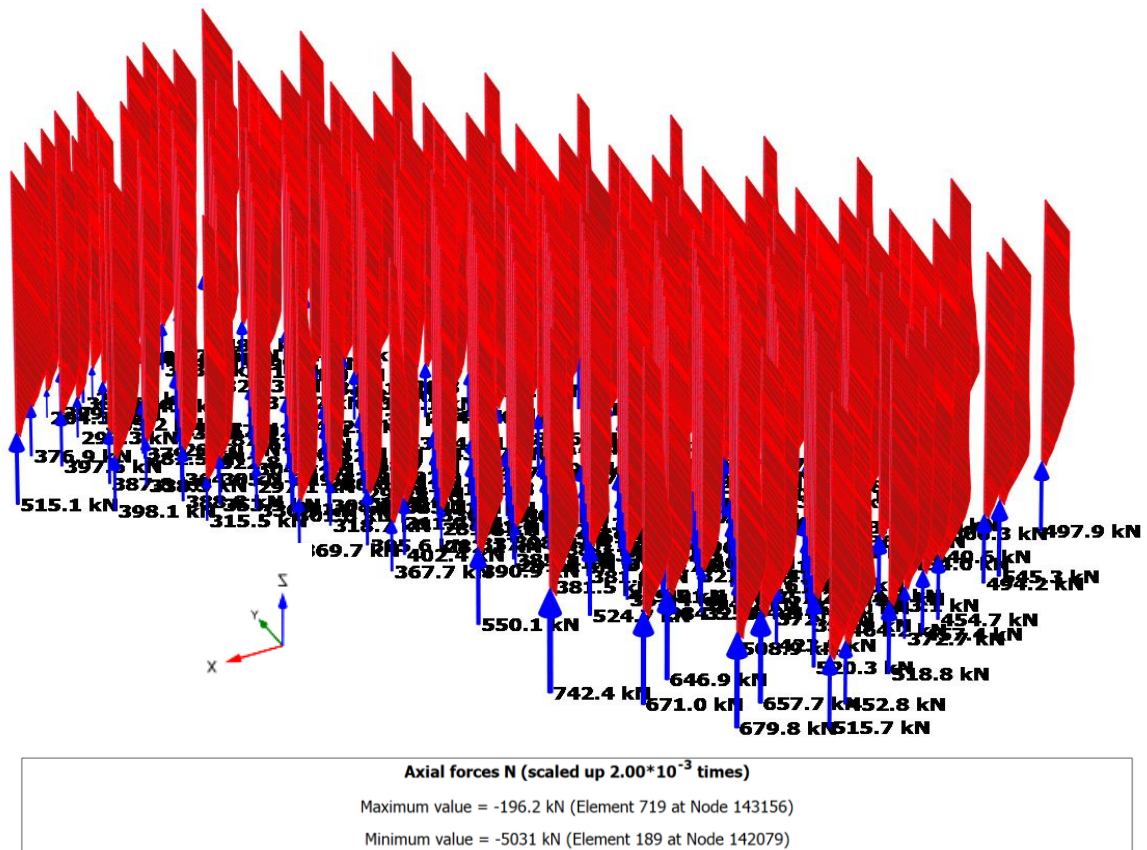
Gambar 7. Hasil instrumentasi *pressure cell*



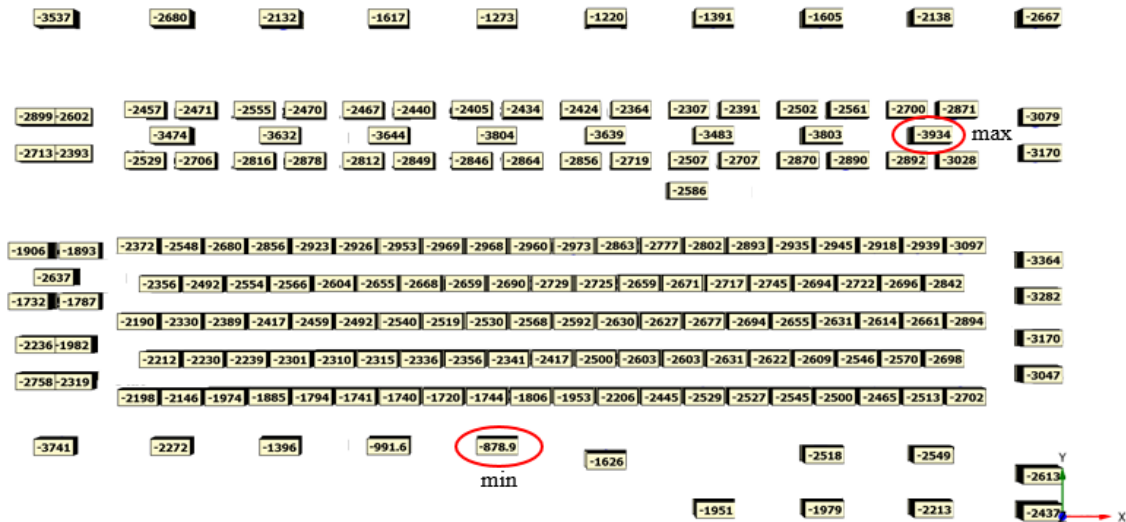
Gambar 8. Kontur penurunan tanah disekitar bangunan



Gambar 9. Kontur penurunan pada pondasi rakit



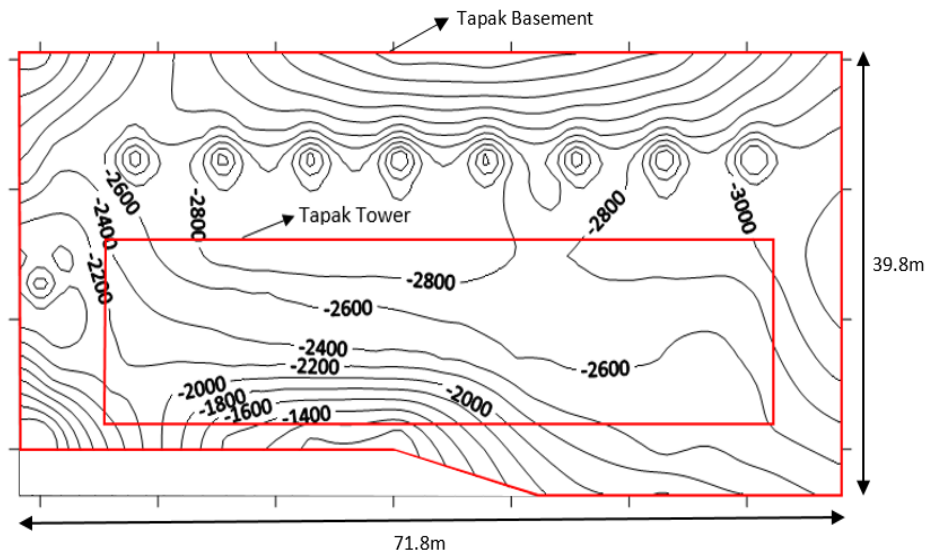
Gambar 10. Gaya normal pada pondasi tiang



Gambar 11. Output gaya normal di kepala tiang

Tabel 4. Distribusi beban pada pondasi tiang-rakit

Lokasi	Total beban (kN)	Beban yang dipikul tiang (kN)	% Beban yang dipikul tiang	% Beban yang dipikul rakit
Tower	389.504	248.421	63,8	36,2
Podium	391.119	212.983	54,5	45,5
Keseluruhan	780.623	461.404	59,1	40,9



Gambar 12. Kontur gaya normal di kepala tiang

Gambar 11 menunjukkan gaya normal pada kepala tiang. Dengan menjumlahkan seluruh gaya normal pada kepala tiang maka diperoleh total beban yang dipikul tiang sebesar 461.404 kN. Total gaya normal pada kepala tiang di lokasi tower adalah 248.421kN. Maka selisihnya merupakan total beban yang dipikul tiang di lokasi podium sebesar 212.983 kN. Kontur gaya normal yang bekerja di kepala tiang pada seluruh area dapat dilihat pada Gambar 12. Kontur tersebut menggambarkan

distribusi beban yang dipikul tiang. Dapat dilihat bahwa beban terdistribusi cukup merata terutama pada lokasi area tower. Pada area tower beban yang dipikul tiang sekitar 2.000 kN, sedangkan beban yang dipikul per tiang secara keseluruhan berkisar dari 879 kN hingga 3.934 kN. Dari total beban pada Tabel 3 dan dari gaya normal yang dipikul tiang, maka persen beban yang dipikul tiang dan persen beban yang dipikul oleh pondasi rakit dapat dilihat pada Gambar 7

Persen beban yang dipikul pondasi rakit pada *area tower* diperoleh sebesar 36,2%, dimana hasil ini masih berada dalam rentang hasil pembacaan *pressure cell* yang berada pada *area* pondasi rakit tower, yaitu sekitar 33% hingga 42%. Angka ini masih berada dalam rentang hasil studi yang Katzenbach *et al.* (2017) lakukan.

Kesimpulan

Instrumentasi *monitoring* berupa *pressure cell* digunakan dalam mengumpulkan data besaran beban yang sesungguhnya dipikul oleh pondasi rakit. Berdasarkan hasil instrumentasi tersebut, beban yang dipikul oleh pondasi rakit adalah sebesar 33-42%. Nilai ini menunjukkan bahwa sebenarnya persentasi beban yang dapat dipikul oleh pondasi rakit dapat melebihi batasan yang diizinkan oleh SNI 8460:2017. Pada studi ini, hasil analisis Plaxis 3D menunjukkan bahwa persentasi beban yang dipikul oleh pondasi rakit adalah 36,2%. Nilai ini menunjukkan bahwa pemodelan dengan menggunakan Plaxis 3D konsisten dengan data hasil instrumentasi *pressure cell*.

Model tanah yang digunakan dalam analisis ini adalah model *hardening soil*, dengan nilai E_{50}^{ref} berdasarkan korelasi empirik terhadap nilai N_{SPT} seperti yang diusulkan oleh Gouw & Saptiyanto (2012). Korelasi ini dipilih karena nilai yang diberikan cukup sesuai dengan kondisi tanah di Jakarta. Pemodelan sebaiknya dilakukan secara keseluruhan, termasuk memodelkan galian dan pengembalian muka air tanah.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan kepada penulis, terutama kepada PT. Geotechnical Engineering Consultant yang telah bersedia memberikan data untuk penelitian ini.

Daftar Pustaka

Alnuaim, A.M., Naggar, H.EI., & Naggar, M.H.EI. (2013). *3D Modeling of Piled Raft Foundation Subjected To Vertical Loading*. Quebec: 3rd Speciality Conference on Material Engineering & Applied Mechanics: MEC-007.

Alnuaim, A.M., Naggar, H.EI., & Naggar, M.H.EI. (2017). *Evaluation of piled raft performance using a verified 3D nonlinear numerical model*. Switzerland: Springer (Geotech Geo Eng).

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Standar Nasional Indonesia SNI 8460:2017 tentang*

persyaratan perancangan geoteknik. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Clancy, P., & Randolph, M.F. (1993). An Approximate analysis procedure for pile raft foundation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 17, 849-869.

Clancy, P., & Randolph, M.F. (1996). Simple design tools for piled raft foundations. *Geotechnique*, 46(2), 313-328.

Geotechnical Engineering Consultant. (2018). *Laporan interpretasi hasil monitoring instrumentasi strain gauge*. Bandung: GEC.

Gouw, T.L. & Saptiyanto, K. (2012). *Hitung balik nilai kekakuan tanah dari hasil pile loading test dengan menggunakan program Plaxis*. Jakarta: HATTI.

Horikoshi, K. & Randolph, M.F. (1996). Centrifuge modelling of piled raft foundation on clay. *Geotechnique*, 46(4), 741-752.

Horikoshi, K. & Randolph, M.F. (1998). A contribution to optimum design of piled raft. *Geotechnique*, 48(3), 301-317.

Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, C., & Reul, O. (1998). Piled raft foundation - interaction between piles and raft. *Darmstadt Geotechnics*, 4(2), 279-296

Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, C. (2000): Piled Raft Foundation Projects in Germany. *Design Applications of Raft Foundations*. MPG Books, Bodmin, Cornwall, Great Britain, 323-392.

Katzenbach, R. & Choudhury, D. (2013). Combined pile-raft foundation guideline. *ISSMGE*, Germany.

Katzenbach, R., Leppla, S., & Choudhury, D. (2017). *Fondation systems for high-rise structure*. Boca Raton: CRC Press.

Katzenbach, R., & Moormann, C. (2003). Instrumentation and of combined piled rafts (CPRF): state of the art report. *Field Measurements in Geomechanics: Proceedings of the 6th International Symposium, Oslo, Norway*, 161-177.

Lee, J., Park, D., Park, D., & Park, K. (2015). Estimation of load-sharing ratios for piled raft in sands that includes interaction effects. *Computers and Geotechnics*, 63, 306-314.

- Lim, A., Hsieh, P.G., Ou, & C.Y. (2016). Evaluation of buttress wall shapes to limit movements induced by deep excavation. *Computers and Geotechnics*, 78, 155-170.
- Look, Burt. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: Taylor & Francis.
- Nguyen, D.D.C., Jo, S.B., & Kim, D.S. (2013). Design method of piled raft foundation under vertical load considering interaction effects. *Computers and Geotechnics*, 47, 16-27.
- Nguyen, D.D.C., Kim, D.S., & Jo, S.B. (2014). Parametric study for optimal design of large piled raft foundation on sand. *Computers and Geotechnics*, 55, 14-26.
- Peck, R.B., Hanson, W.E. & Thornburn, T.H. (1974). *Foundation Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Poulos, H.G. & Davis, E.H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. New York: Wiley.
- Poulos, H.G. (2001a). Piled-raft foundation: design and application. *Geotechnique*, 51(2), 95-113.
- Poulos, H.G. (2001b). Method of Analysis of pile raft foundation. *International Society of Soil and Geotechnical Engineering*, Jakarta.
- Poulos, H.G. (2002). Simplified design procedure for pile raft foundation. *Deep Foundation*, 441-458.
- Randolph, M.F. (1994). Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts. *S.O.A. Report, 13 ICSMFE*, New Delhi, 5, 61-82.
- Reul, O. & Randolph. (2003). Piled raft in overconsolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analysis. *Geotechnique*, 53(3), 301-315.
- Reul, O. & Randolph. (2004). Design strategies for piled raft subjected to nonuniform vertical loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 1-13.
- Wesley, Laurence D. (2010). *Geotechnical Engineering in Residual Soils*. New Jersey: John Wiley & sons.
- Yamashita, K., Tanikawa, T., & Hamada, J. (2015). Applicability of simple method to pile raft analysis in comparison with field measurements. *Geotechnical Engineering Journal of the SEADS & AGSSEA*, 4(2), 43-53.