

ANALISIS SENDI PLASTIS LOKAL PADA PUSHOVER KELOMPOK TIANG PANCANG

Bagas Putraloka¹, Gregorius Sandjaja², dan Amelia Yuwono³

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
bagas.325150033@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
gregoriuss@ft.untar.ac.id

³Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
amelia7745@yahoo.com

Masuk: 15-01-202, revisi: 29-04-2020, diterima untuk diterbitkan: 05-05-2020

ABSTRACT

Foundation is part of an engineering system which forwards the load supported by the foundation and its own weight into underneath the rock and the soil. Based on technical aspects and implementation it can be classified into pile and bore pile. Based on number piles divided into single pile and group piles. Group pile is a group of piles structured relatively close and connected with the pile cap at the top. Because of enhancement of earthquake acceleration on certain area on SNI 1726:2012, Analysis of group pile is needed on area with enhancement of earthquake acceleration. The collection data method is obtained by collecting data from the project by form bore log and laboratory test meanwhile for data analysis method using basic theory used as a reference for learning pushover analysis which refers from ATC-40. By doing pushover analysis on a group pile, Performance of group pile can be known as Performance Point which will be compared to each of the pile configurations. And the result from this research is more the number of piles on the configuration being modeled, the result is the value of performance point getting higher, because of the lateral force will be tested be more higher.

Keywords: foundation; group pile; performance level, spectrum capacity method, pushover analysis

ABSTRAK

Fondasi ialah bagian dari suatu sistem rekayasa yang meneruskan beban yang ditopang oleh fondasi dan beratnya sendiri ke dalam tanah dan batuan yang terletak di bawahnya. Berdasarkan segi teknis pelaksanaan dapat diklasifikasikan menjadi tiang pancang dan tiang bor. Berdasarkan jumlah tiang ada dua macam yaitu tiang tunggal dan tiang kelompok, tiang kelompok adalah sekumpulan tiang yang dipasang secara relatif berdekatan yang dihubungkan bagian atasnya dengan pile cap. Karena adanya peningkatan percepatan gempa di daerah tertentu pada SNI 1726:2012, perlu dilakukan analisis terhadap kelompok tiang di daerah yang terkena peningkatan percepatan gempa. Metode pengumpulan data dilakukan dengan mengumpulkan data-data yang berasal dari proyek berupa hasil *boring log* dan hasil tes laboratorium sedangkan untuk Metode analisis data digunakan teori dasar yang digunakan sebagai acuan pembelajaran dalam melakukan analisis *Pushover* yang mengacu pada ATC-40. Dengan melakukan analisis *pushover* pada suatu kelompok tiang, tingkat kinerja suatu kelompok tiang dapat diketahui berupa *nilai Performance Point* yang akan dibandingkan setiap konfigurasi tiang. Dan hasil yang didapat dalam penelitian ini adalah semakin banyak jumlah tiang dalam konfigurasi yang dimodelkan maka nilai *performance point* pun semakin tinggi, karena gaya lateral yang diuji akan semakin tinggi.

Kata kunci: fondasi; kelompok tiang; tingkat kinerja; metode spektrum kapasitas; analisis *pushover*

1. PENDAHULUAN

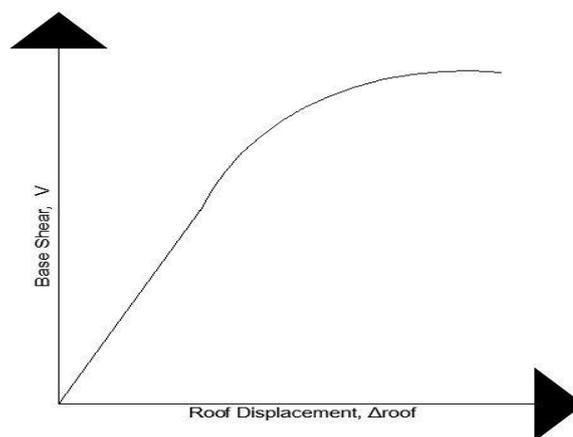
Latar belakang

Dalam suatu pekerjaan konstruksi pasti terdapat struktur fondasi, fondasi menjadi salah satu faktor penting yang membuat suatu bangunan dapat kokoh berdiri. Fondasi memiliki fungsi untuk menahan beban aksial dan lateral yang diteruskan kebagian tanah pendukung bangunan tersebut. tiang kelompok adalah sekumpulan tiang yang dipasang secara relatif berdekatan yang dihubungkan bagian atasnya dengan *pile cap*. Tiang kelompok biasanya digunakan apabila tiang tunggal tidak dapat menahan beban dan gaya yang terlalu besar yang dihasilkan dari bagian struktur bangunan yang tepat berada dibagian atas struktur fondasi. Diberlakukannya SNI 1726:2012 yang menggantikan SNI 1726:2002 sehingga ada daerah tertentu yang mengalami kenaikan percepatan gempa sehingga gaya gempa yang diterima fondasi meningkat. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis terhadap suatu kelompok

tiang dengan berbagai percepatan gempa pada kondisi elastik maupun tidak elastik, salah satunya adalah dengan analisis statik non linier atau analisis *pushover*. Analisis *pushover* adalah prosedur analisis untuk mengetahui keruntuhan suatu bangunan dengan memberikan suatu pola beban statik tertentu dalam arah lateral yang besarnya akan ditingkatkan secara bertahap sampai struktur tersebut mencapai target *displacement* tertentu atau mencapai pola keruntuhan tertentu. Dari hasil analisis *pushover* terhadap suatu kelompok tiang tersebut dihasilkan kurva yang menghubungkan antara *base shear* dan *roof displacement* atau disebut kurva kapasitas. Dari kurva kapasitas tersebut dapat dilihat perilaku suatu kelompok tiang dari kondisi elastis sampai plastis hingga mengalami kegagalan. Dengan adanya kurva kapasitas yang diperoleh, kita dapat melihat tingkat kinerja suatu kelompok tiang berdasarkan metode spektrum kapasitas berdasarkan peraturan *ATC-40* dan *Pushover Analysis of Underground Structures*. Didalam pembahasan kali ini ditemui beberapa batasan masalah, yaitu data tanah diambil di di daerah Banten (Tangerang Selatan), dalam permodelan dibantu dengan program berbasis geoteknik, menggunakan konfigurasi kelompok tiang 4,6,9,12 dan 16 tiang, gaya yang diterima hanya gaya lateral dan jenis tanah dimodifikasi mengikuti SNI 1726 : 2012. Tujuan dari penelitian ini, yaitu ingin mengetahui besarnya gaya lateral maksimum yang dapat diterima kelompok tiang dan besarnya *displacement* pada kondisi elastik, dan mengetahui tingkat kinerja struktur pada tiang melalui analisis *pushover* menurut peraturan *ATC-40* dan *Pushover Analysis of Underground Structures*.

Analisis statik non-linier (*pushover analysis*)

Analisa statik nonlinier merupakan prosedur analisa untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa, dikenal pula sebagai analisa *pushover* atau analisa beban dorong statik. Kecuali untuk suatu struktur yang sederhana, maka analisa ini memerlukan komputer program untuk dapat merealisasikannya pada bangunan nyata. Analisa dilakukan dengan memberikan suatu pola beban lateral statik pada struktur, yang kemudian secara bertahap ditingkatkan dengan faktor pengali sampai satu target perpindahan lateral dari suatu titik acuan tercapai. Biasanya titik tersebut adalah titik pada atap, atau lebih tepat lagi adalah pusat massa atap. Analisa *pushover* menghasilkan kurva *pushover*, kurva yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (V) versus perpindahan titik acuan pada atap (D) . Pada proses *pushover*, struktur didorong sampai mengalami leleh disatu atau lebih lokasi di struktur tersebut. Kurva kapasitas akan memperlihatkan suatu kondisi linier sebelum mencapai kondisi leleh dan selanjutnya berperilaku non-linier. Kurva *pushover* dipengaruhi oleh pola distribusi gaya lateral yang digunakan sebagai beban dorong. Tujuan analisa *pushover* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi serta untuk memperoleh informasi bagian mana saja yang kritis. Berikut gambar 1 dibawah ini adalah contoh kurva yang akan dibentuk melalui metode *pushover analysis* yang dibantu oleh program berbasis geoteknik. (Sumber Dewobroto, W. 2005)



Gambar 1. Kurva *pushover* (Sumber: *ATC-40*, 1996 : 8-12)

Tingkat kinerja struktur metode *ATC-40*

Dalam metode *ATC-40*, tingkat kinerja struktur ditentukan dengan menggunakan metode spektrum kapasitas (*capacity-spectrum*), yaitu dengan memplotkan *demand* respons spektrum dan kurva kapasitas dalam satu format antara spektral percepatan dan spektral perpindahan atau disebut sebagai format *Acceleration-Displacement Response Spectra (ADRS)*.

Kurva kapasitas (*capacity-curve*) diperoleh dari analisis *pushover*, yaitu analisis statik nonlinier dengan memberikan beban lateral statik tertentu pada struktur yang kemudian ditingkatkan secara bertahap hingga struktur

mencapai suatu batas tertentu atau mengalami kegagalan struktur. Respons struktur terhadap beban lateral tersebut dicatat dan dibuat kurva hubungan antara gaya geser dasar, “V” dan perpindahan pada atap, “ Δ_{atap} ”. Kurva tersebut-lah yang disebut sebagai kurva kapasitas.

Kurva kapasitas menggambarkan kekuatan struktur yang besarnya sangat tergantung dari kemampuan deformasi masing-masing elemen struktur. Untuk mengubah kurva kapasitas ke dalam format *ADRS* atau menjadi spektrum kapasitas diperlukan pemahaman tentang hubungan faktor partisipasi modal, modal koefisien massa, dan perpindahan bangunan. Untuk mengubah kurva kapasitas ke dalam format *ADRS* digunakan persamaan.

$$S_a = \frac{V / W}{\alpha_1} \quad (1)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \phi_{roof,1}} \quad (2)$$

dengan V = gaya geser dasar (kN), W = berat tiang (kN), α_1 = modal koefisien massa pada *mode* pertama, Δ_{roof} = perpindahan atap (m), PF = faktor partisipasi modal pada *mode* pertama. *Demand* spektrum diperoleh dengan mengubah respons spektrum yang biasanya dinyatakan dalam spektra percepatan “ S_a ” dan periode “T” menjadi format *ADRS* (S_a, S_d) dengan menggunakan persamaan

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \cdot (g) \quad (3)$$

dengan S_a = spektra percepatan (m), S_d = spektra perpindahan (g), g = percepatan gravitasi (9.81 m/s²), T = periode getar fundamental (detik)

Selanjutnya, grafik spektrum kapasitas dan spektrum *demand* digambarkan dalam satu grafik *ADRS*. Dalam grafik tersebut akan terjadi perpotongan antara spektrum kapasitas dan spektrum *demand*. Titik perpotongan tersebut disebut sebagai titik kinerja atau *performance point*. Redaman yang terjadi saat struktur terkena gerakan gempa pada keadaan inelastik dapat dilihat pada redaman *viscous* yang melekat pada struktur dan redaman histeretik.

Redaman histeretik (*hysteretic damping*) berhubungan dengan area di dalam *loop* kurva gaya dan perpindahan akibat gaya gempa. Redaman histeretik ini dapat mewakili redaman *viscous* ekuivalen. Dalam *ATC-40* redaman *viscous* ekuivalen dirumuskan dengan persamaan

$$\beta_0 = \frac{63.7 (ay.dpi - dy.api)}{api.dpi} \quad (4)$$

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 5 \quad (5)$$

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eq})}{2.12} \quad (6)$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eq})}{1.65} \quad (7)$$

dengan β_0 = redaman histerestis yang mewakili redaman *viscous* ekuivalen, β_{eq} = redaman *viscous* ekuivalen struktur, 0.05 = redaman yang melekat pada struktur (redaman awal)

Efisiensi tiang pun harus turut diperhitungkan dalam perhitungan tiang kelompok, menurut formula Converse-Labarre efisiensi tiang dapat dihitung dengan rumus, sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \left(\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90.m.n} \right) \emptyset \quad (8)$$

dengan n = jumlah tiang pada deretan baris, m = jumlah tiang pada deretan kolom, \emptyset = arc tan (D/s), s = jarak antar tiang, D = diameter atau sisi tiang

Tabel 1. Nilai minimum yang diizinkan untuk SR_A dan SR_V

<i>Structural Behavior Type</i>	SR_A	SR_V
Type A ²	0.33	0.5
Type B	0.44	0.56
Type C	0.56	0.67

Tabel 2. Batasan simpangan pada tingkat kinerja struktur (Sumber: ATC-40, 1996 : 11-4)

Batas Simpangan Antar Tingkat	Tingkat Kinerja Struktur			
	<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Structural Stability</i>
Simpangan Total Maksimum	0,01	0,01 – 0,02	0,02	0,33 V_i/P_i
Simpangan Inelastis Maksimum	0,005	0,005 – 0,015	Tidak ada Batasan	Tidak ada Batasan

Tabel 3 *Storey drift limits at different performance levels and damage states*

(Sumber: *Pushover Analysis of Underground Structures*, 2014 : 426)

<i>Performance Level</i>	<i>Damage State</i>	<i>Storey Drift</i>
<i>Fully operational, immediate occupancy</i>	<i>No Damage</i>	<0.2%
<i>Operational, damage control, moderate</i>	<i>Repairable</i>	<0.5%
<i>Life safe-damage state</i>	<i>Irreparable</i>	<1.5%
<i>Near collapse, limited safety, hazard reduced</i>	<i>Severe</i>	<2.5%
<i>Collapse</i>		>2.5%

2. METODE PENELITIAN

Metode Pengumpulan Data

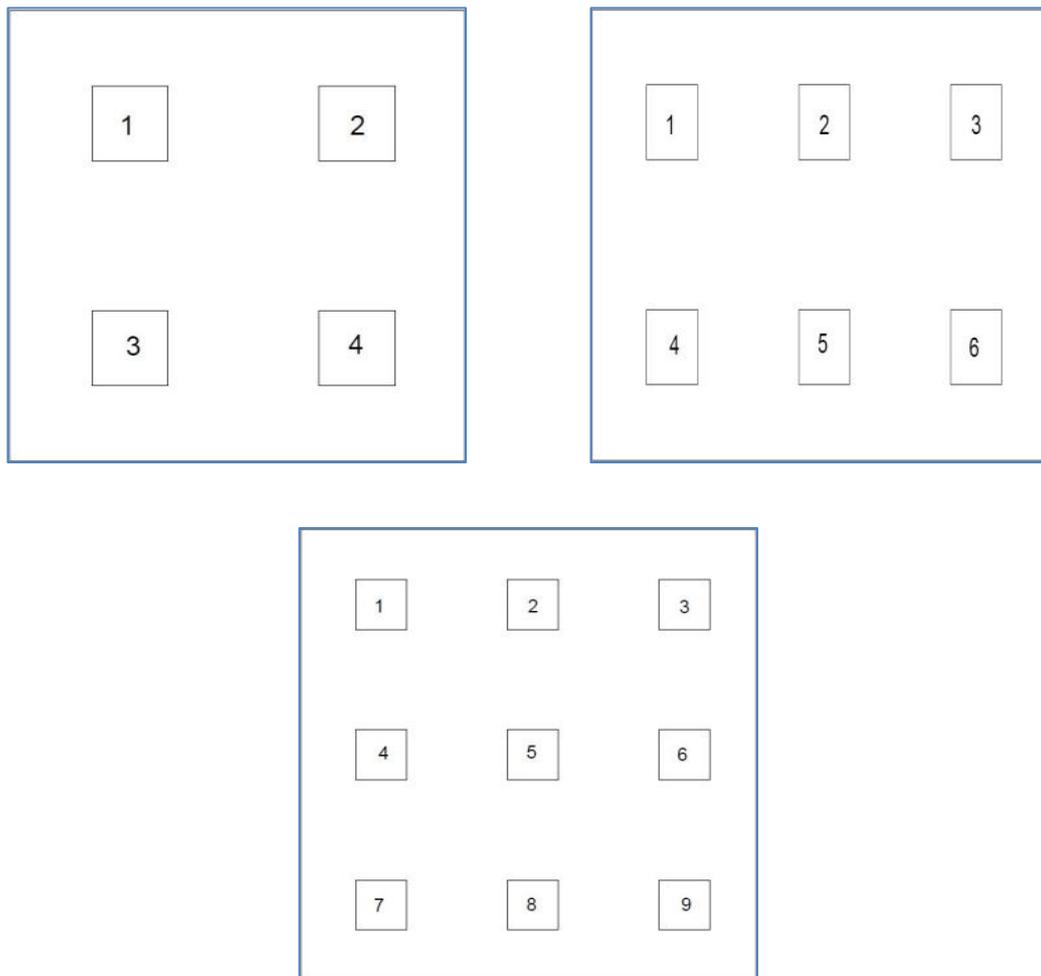
Metode yang digunakan dalam pengumpulan data-data yang akan dipakai adalah dengan pengumpulan data dari proyek. Pada studi ini, data tanah akan dianalisis mengikuti SNI 1726:2012 yang berlokasi di daerah Serpong, Tangerang Selatan. Data tanah yang dikumpulkan berupa *boring log* dan hasil tes laboratorium. Data tanah tersebut merupakan laporan penyelidikan tanah pada daerah tersebut.

Metode Analisis Data

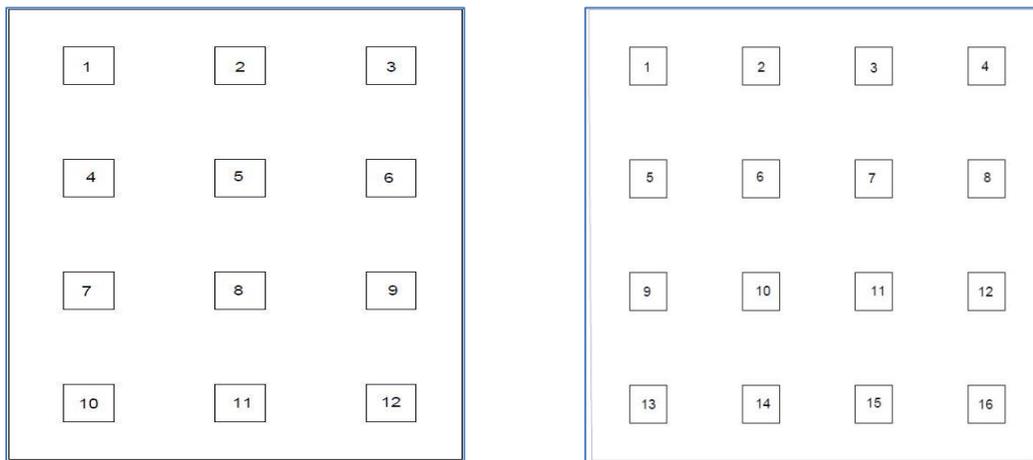
Sebelum dilakukannya analisis data, dilakukan pembelajaran atau studi tentang teori-teori dasar yang berhubungan dengan topik pembahasan dalam penelitian yang akan dilakukan. Teori dasar yang digunakan sebagai acuan pembelajaran dapat dicari berdasarkan berbagai macam sumber, seperti jurnal, karya ilmiah, buku referensi yang akan berguna untuk mendapatkan rumus-rumus atau persamaan. Dalam melakukan analisis *pushover* mengacu pada *ATC-40*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan analisis *pushover*, maka kita bisa mendapatkan beban maksimum untuk tiap kelompok tiang dan mendapatkan kurva kapasitas, kemudian diubah menjadi kurva spektrum kapasitas. Dari kurva tersebut kita bisa mendapat *performance point* dan *pile drift ratio* yang akan digunakan untuk menentukan tingkat kinerja kelompok tiang., berikut dibawah ini adalah konfigurasi tiang kelompok yang dipakai dalam penelitian ini.

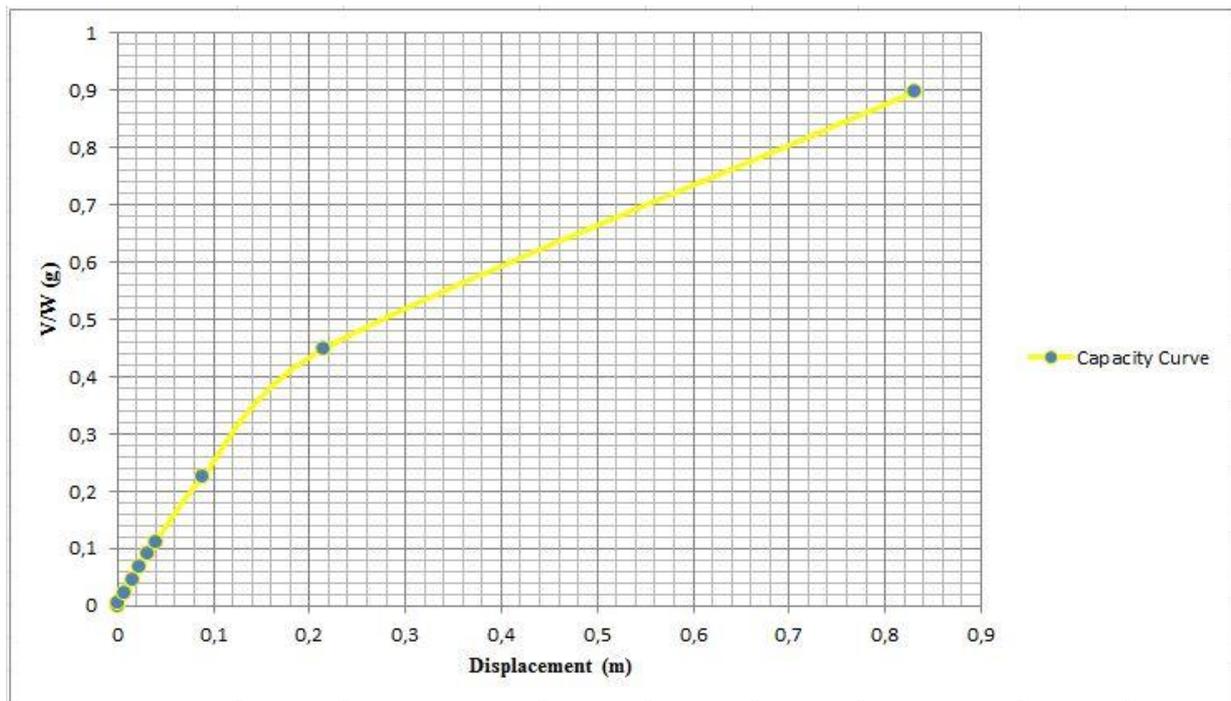


Gambar 2. Macam konfigurasi tiang kelompok 4, 6, dan 9



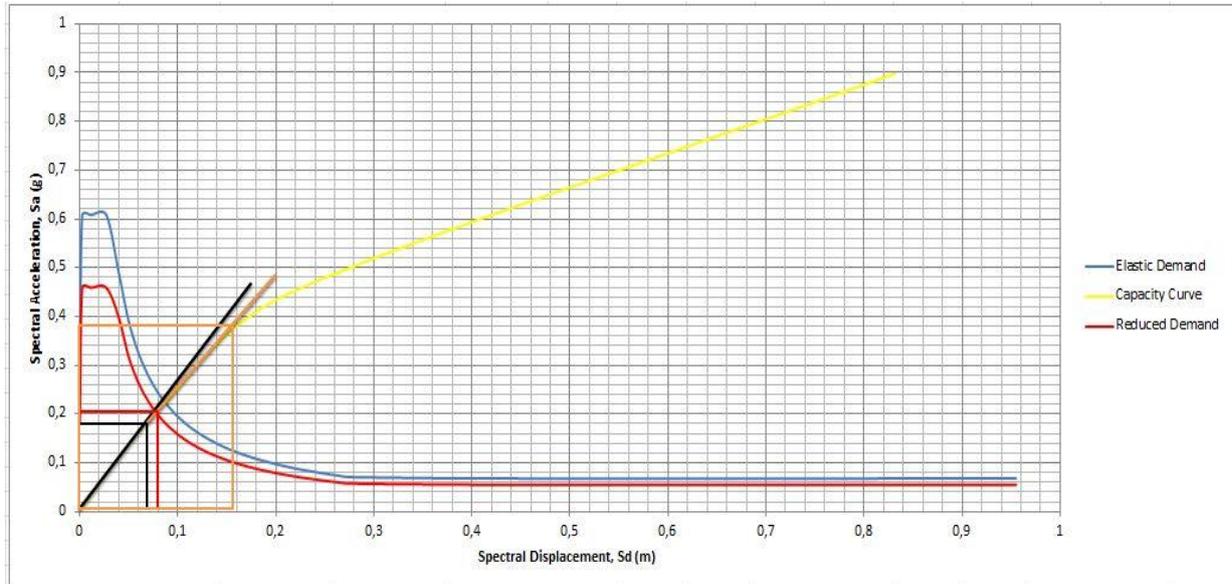
Gambar 3. Macam konfigurasi tiang kelompok 12 dan 16

Setelah menentukan tiang kelompok maka struktur tiang ini akan diuji menggunakan program berbasis geoteknik dengan memasukkan beban secara lateral menggunakan metode analisis *pushover* sampai mengalami displacement tertentu yang diinginkan. Gambar 4 merupakan kurva hasil dari analisis menggunakan program berbasis geoteknik yang disebut dengan kurva kapasitas (*capacity curve*).



Gambar 4. Kurva (*capacity curve*) dari hasil program berbasis geoteknik

Setelah itu kurva kapasitas akan diubah menjadi format *Acceleration-Displacement Response Spectra (ADRS)* maka akan didapatkan nilai *performance point* setiap konfigurasi tiang kelompok yang nantinya akan diacukan terhadap Tabel 2 Batasan Simpangan pada Tingkat Kinerja Struktur dan Tabel 3 *Storey Drift Limits at Different Performance Levels and Damage States*.



Gambar 5. Kurva Acceleration-Displacement Response Spectra (ADRS)

Setelah semua tiang diuji menggunakan program berbasis geoteknik dan mendapat nilai kinerja struktur (*performance point*) menggunakan metode analisis *pushover* yang mengacu pada ATC – 40, Tabel 4 dan 5 merupakan hasil rangkuman dari penelitian ini.

Tabel 4. Hasil analisis *Semi Fixed Head*

Jumlah Tiang	Tipe Tiang	Beban (kN)	Fixed and Length (m)	Performance Point	Pile Drift Ratio	Kategori	Kesimpulan
4	Elastik	10000	7,5	0,115	0,01466	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
						<1.5%	<i>Irreparable, Life safe-damage state</i>
6	Elastik	10000	7,5	0,15	0,02	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
Tiang arah X						<2.5%	<i>Severe, Near collapse, limited safety, hazard reduced</i>
6	Elastik	10000	7,5	0,14	0,01866	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
Tiang arah Y						<2.5%	<i>Severe, Near collapse, limited safety, hazard reduced</i>
9	Elastik	12000	7,5	0,17	0,1875	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
Tiang						<2.5%	<i>Severe, Near collapse, limited safety, hazard reduced</i>

Tabel 4. Hasil analisis *Semi Fixed Head* (lanjutan)

Jumlah Tiang	Tipe Tiang	Beban (kN)	<i>Fixed and Length</i> (m)	<i>Performance Point</i>	<i>Pile Drift Ratio</i>	Kategori	Kesimpulan
12 Tiang arah X	Elastik	14000	7,5	0,18	0,0195	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
						<2.5%	<i>Severe, Near collapse, limited safety, hazard reduced</i>
12 Tiang arah Y	Elastik	15000	7,5	0,185	0,0185	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
						<2.5%	<i>Severe, Near collapse, limited safety, hazard reduced</i>
16 Tiang	Elastik	16000	7,5	0,195	0,02	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
						<2.5%	<i>Severe, Near collapse, limited safety, hazard reduced</i>

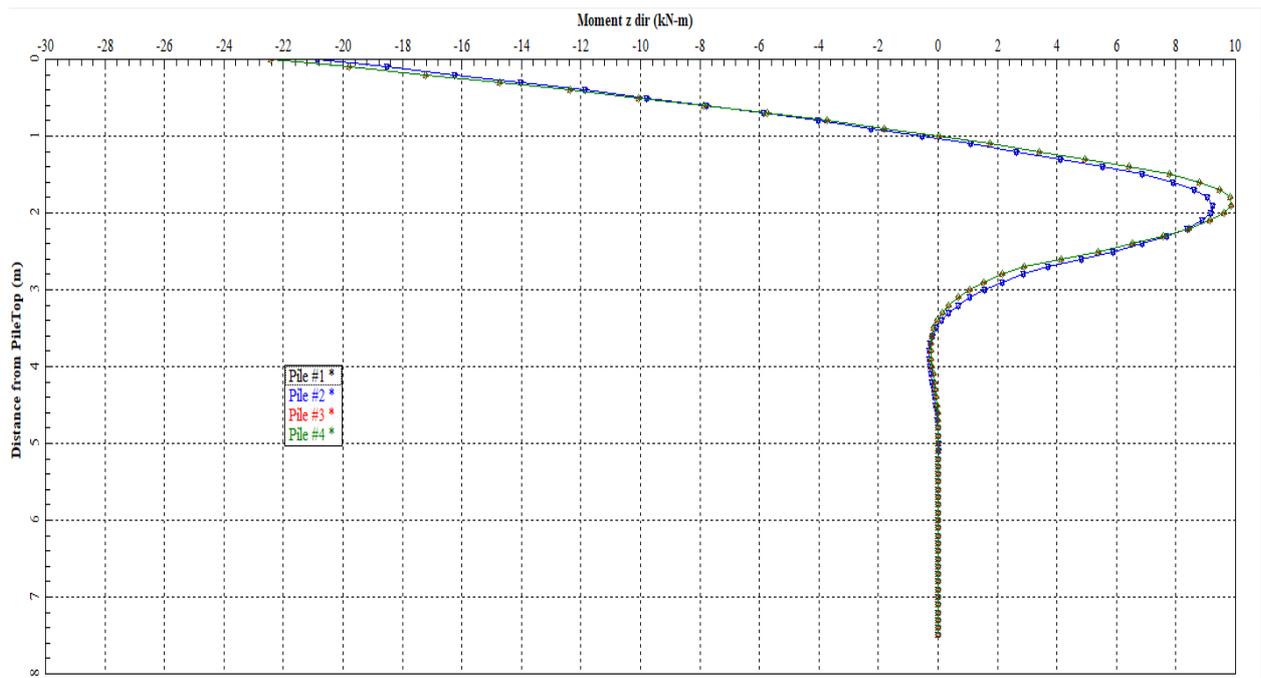
Tabel 5. Hasil analisis *Fixed Head*

Jumlah Tiang	Tipe Tiang	Beban (kN)	<i>Fixed and Length</i> (m)	<i>Performance Point</i>	<i>Pile Drift Ratio</i>	Kategori	Kesimpulan
4 Tiang	Elastik	20000	7,5	0,08	0,01133	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
						<1.5%	<i>Irreparable, Life safe-damage state</i>
6 Tiang arah X	Elastik	30000	7,5	0,125	0,01667	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
						<1.5%	<i>Irreparable, Life safe-damage state</i>
6 Tiang arah Y	Elastik	30000	7,5	0,1	0,01333	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
						<1.5%	<i>Irreparable, Life safe-damage state</i>
9 Tiang	Elastik	32000	7,5	0,125	0,016	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
						<2.5%	<i>Severe, Near collapse, limited safety, hazard reduced</i>

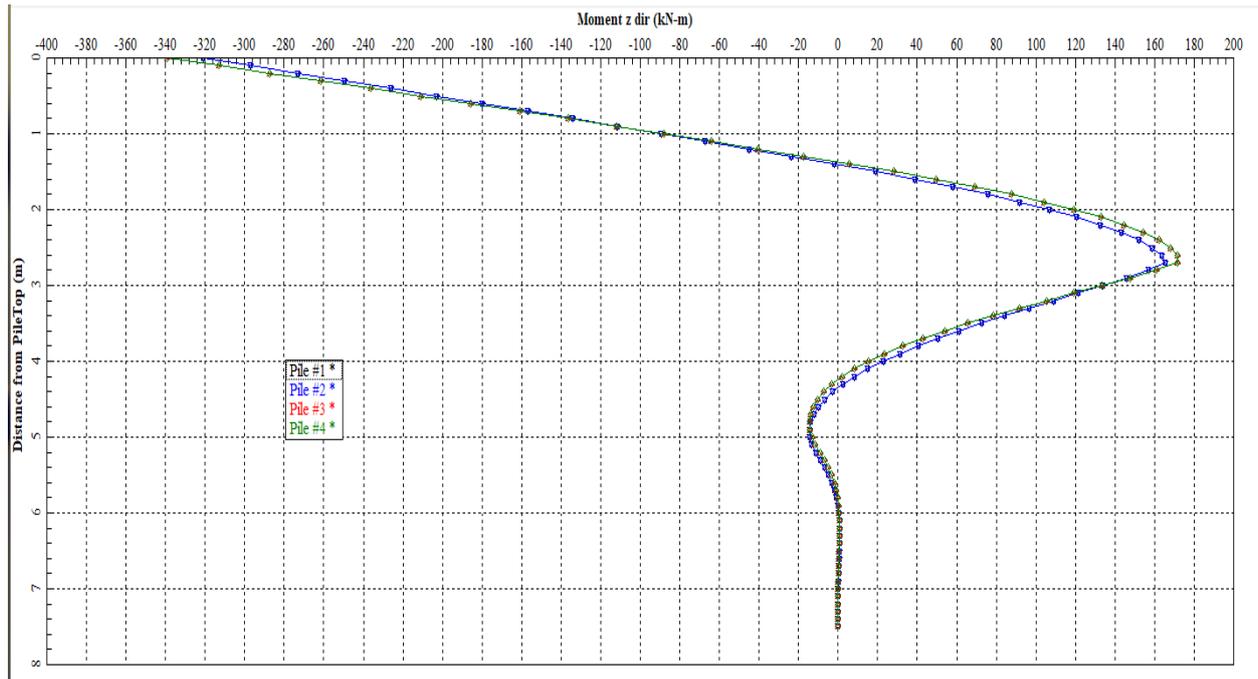
Tabel 5. Hasil analisis *Fixed Head* (lanjutan)

Jumlah Tiang	Tipe Tiang	Beban (kN)	<i>Fixed and Length</i> (m)	<i>Performance Point</i>	<i>Pile Drift Ratio</i>	Kategori	Kesimpulan
12 Tiang arah X	Elastik	36000	7,5	0,14	0,0186	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
						<2.5%	<i>Severe, Near collapse, limited safety, hazard reduced</i>
12 Tiang arah Y	Elastik	36000	7,5	0,125	0,0667	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
						<2.5%	<i>Severe, Near collapse, limited safety, hazard reduced</i>
16 Tiang	Elastik	40000	7,5	0,15	0,02	0.01 - 0.02	<i>Damage Control</i>
						<2.5%	<i>Severe, Near collapse, limited safety, hazard reduced</i>

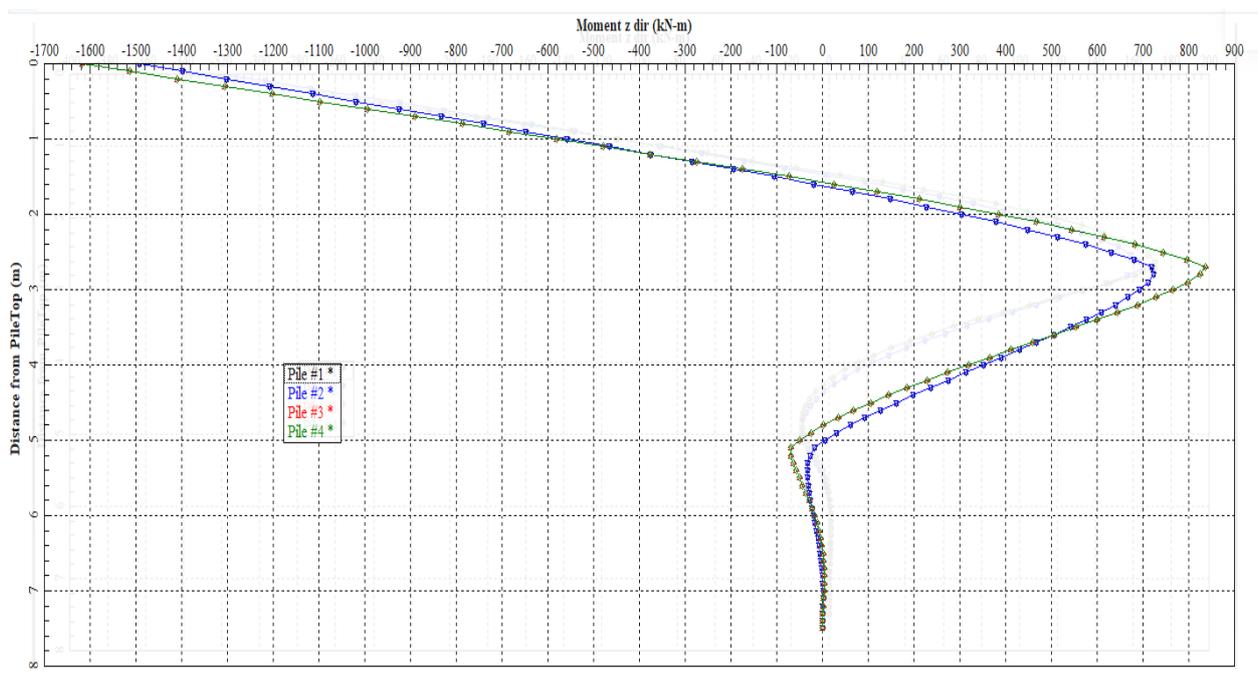
Berikut hasil cross check menggunakan program EFF GROUP (lateral), menggunakan contoh konfigurasi 4 tiang kondisi (*Semi Fixed Head*)



Gambar 6. Bending moment saat load 100 kN



Gambar 7. Bending moment saat load 1000 kN



Gambar 8. Bending moment saat load 2000 kN

Dan hasil dari cross check menggunakan program EFF GROUP (lateral), menggunakan contoh konfigurasi 4 tiang kondisi (*Semi Fixed Head*) tidak terlalu berbeda dimana *bending moment* saat pengujian 2000 kN menggunakan program EFF GROUP (lateral) sudah mencapai nilai *bending moment* maksimum sedangkan saat menggunakan program PLAXIS 3D dibutuhkan beban lateral sebesar 2250 kN untuk mencapai nilai *bending moment* maksimum.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil studi, semakin banyak jumlah tiang dalam suatu kelompok tiang maka semakin besar beban lateral maksimum yang dapat diterima tiap tiang pada suatu kelompok tiang untuk kondisi elastik.
2. Berdasarkan hasil dari program geoteknik yang dianalisis semakin banyak jumlah tiang maka semakin tinggi juga nilai *pile drift ratio* yang didapatkan dikarenakan semakin banyak tiang maka semakin besar beban lateral yang dapat diterima yang menyebabkan terjadinya pola kegagalan pada tanah (*failure point*).
3. Berdasarkan hasil program geoteknik yang dianalisis berdasarkan nilai Bending Moment dapat disimpulkan semakin dekat point load dalam bentuk beban lateral dengan sebuah *pile* maka semakin besar pula kemungkinan pile tersebut mengalami patahan dengan beban load yang masih kecil.
4. Berdasarkan hasil rangkuman didapat kesimpulan:

Untuk kondisi *Semi Fixed Head*:

Tabel 6. Rangkuman hasil dari *bending moment* kondisi *semi fixed head*

Jumlah Tiang	Rata-rata Kedalaman (m)	Rata-rata Load Maksimum (kN)	Rata-rata Bending Moment Maksimum (kNm)
4 Tiang	4,675	2250	457,5
6 Tiang arah X	6,066	3583,333	463,333
6 Tiang arah Y	5,3	4250	463,33
9 Tiang	5,5888	4955,556	476,667
12 Tiang arah X	6,05	6291,667	463,333
12 Tiang arah Y	4,967	6500	470
16 Tiang	4,687	8403	476,25

Untuk kondisi *Fixed Head*:

Tabel 7. Rangkuman hasil dari *bending moment* kondisi *fixed head*

Jumlah Tiang	Rata-rata Kedalaman (m)	Rata-rata Load Maksimum (kN)	Rata-rata Bending Moment Maksimum (kNm)
4 Tiang	6,25	7500	470
6 Tiang arah X	5	5700	445
6 Tiang arah Y	4,75	2667,667	853,333
9 Tiang	4,4222	6611,11	504,444
12 Tiang arah X	4,7916	6291,667	477,9167
12 Tiang arah Y	5,7166	10166,67	450
16 Tiang	4,593	10062,5	462,5

Berdasarkan analisis yang dilakukan, didapatkan beberapa saran sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan lebih banyak analisis dengan variasi dimensi dan jenis bahan tiang dalam suatu kelompok tiang agar dapat membandingkan lebih banyak data.
2. Perlu dilakukan analisis menggunakan berbagai metode agar dapat membandingkan hasil dari berbagai metode, serta mengetahui metode mana saja yang memberikan hasil terbaik dan yang paling mendekati.

DAFTAR PUSTAKA

- ATC-40. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1*. Applied Technology Council, 1996.
- Badan Standardisasi Nasional. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 1726:2012)*. Badan Standardisasi Nasional, 2012.
- Dewobroto, W. *Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover*. Universitas Pelita Harapan, 2005.
- Liu, JingBo., et al. "Pushover Analysis of Underground Structures: Method and Application". *Science China Technological Sciences*, vol. 57, no. 2, 2014, pp. 423-437.