

## Analisis Pengaruh Jumlah Tiang Fondasi Terhadap Distribusi Gaya Akibat Pembebanan Lateral Eksentris Menggunakan OpenSees

Reynaldo Nathaniel Wilmer<sup>1\*</sup>, Widjojo Adi Prakoso<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departemen Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Depok, Kampus UI Depok, 16424

\*Corresponding Author: reynaldonathaniel10@gmail.com

### Abstrak

Perancangan fondasi sebuah infrastruktur akan mempertimbangkan beban rencana yang akan terjadi. Dalam infrastruktur jembatan, beban dapat terjadi baik secara sentris maupun eksentris. Kedua jenis pembebanan tersebut akan mempengaruhi proses distribusi gaya pada sistem fondasi. Pada jembatan yang membentang di antara sungai, beban yang ditimbulkan dari ombak, angin, maupun beban tidak disengaja seperti tertabrak kapal dapat terjadi secara eksentrik. Sering kali beban eksentris akan menimbulkan reaksi yang sulit diantisipasi dikarenakan banyak faktor yang tidak dapat diprediksi. Untuk memberikan pemahaman akan reaksi fondasi terhadap beban eksentris, dilakukan pemodelan secara numerik menggunakan Opensees dengan memodelkan pembebanan lateral pada badan tiang sebuah elevated pile cap. Acuan dari penelitian ini merupakan fondasi Jembatan Pedamaran II di Riau, yang membentang di antara Sungai Rokan, yang menggunakan tipe fondasi tiang spun pile dengan bracing diagonal. Dilakukan pemodelan sederhana untuk konfigurasi tiang 2x2 dan 2x3. Tujuan dari penelitian adalah untuk menganalisis pembebanan eksentris pada fondasi tiang dengan bracing dan mengetahui dampak dari penambahan jumlah tiang terhadap proses distribusi gaya. Dilakukan analisis pushover pada badan salah satu tiang. Letak beban yang eksentrik ini akan menimbulkan gaya baik pada sumbu x dan y. Digunakan analisis finite element menggunakan software OpenSees. Hasil menunjukkan bahwa semakin besar eksentrisitas beban maka besar displacement juga semakin besar. Proses distribusi momen menunjukkan keberadaan bracing yang akan menimbulkan momen besar pada sambungan serta membantu mendistribusikan gaya. Pada distribusi gaya geser disimpulkan bahwa tiang pada baris pembebanan akan menerima gaya sangat besar serta penambahan jumlah tiang akan mengurangi besar gaya yang diterima oleh tiang pada baris pembebanan.

**Kata kunci:** beban eksentrik, bracing, elevated pile cap, opensees

### Abstract

The design of infrastructure foundations takes into account the anticipated loads. In bridge infrastructure, loads can occur both centrally and eccentrically. Both types of loading affect the force distribution process on the foundation system. In bridges spanning rivers, loads generated by waves, wind, or unintended events such as ship collisions can occur eccentrically. Often, eccentric loads lead to unforeseen reactions due to numerous unpredictable factors. To understand the foundation's response to eccentric loads, numerical modeling is performed using Opensees, simulating lateral loading on the pile body of an elevated pile cap. The reference for this study is the foundation of Pedamaran II Bridge in Riau, spanning the Rokan River, which employs spun pile foundations with diagonal bracing. Simple modeling is conducted for 2x2 and 2x3 pile configurations. The aim of the research is to analyze eccentric loading on braced pile foundations and assess the impact of increasing the number of piles on force distribution. Pushover analysis is performed on one of the piles. The eccentric load position induces forces in both the x and y axes. Finite element analysis is conducted using OpenSees software. Results indicate that greater eccentricity of the load leads to larger displacements. The moment distribution process demonstrates the presence of bracing, which generates significant moments at connections and aids in force distribution. In shear force distribution, it is concluded that

piles in the loading row receive significant forces, and increasing the number of piles reduces the force received by each pile in the loading row.

**Keywords : bracing, eccentric load, elevated pile cap, opensees**

## PENDAHULUAN

Dalam perancangan pembangunan infrastruktur, proses perencanaan akan mempertimbangkan beban-beban yang dapat terjadi pada infrastruktur. Sebuah infrastruktur akan dirancang untuk dapat menahan beban-beban rencana sampai kurun waktu yang direncanakan. Beban yang terjadi pada sebuah infrastruktur dapat terjadi akibat berbagai hal dan pada berbagai arah. Arah pembebanan dapat terjadi secara sentris maupun eksentris terhadap sistem struktur suatu infrastruktur. Titik pembebanan yang terjadi pada struktur juga akan mempengaruhi distribusi gaya dimana titik pembebanan dapat terjadi sentris maupun eksentris terhadap struktur fondasi.

Selain dari titik pembebanan, jumlah tiang dalam fondasi juga mempengaruhi bagaimana perilaku infrastruktur dalam menahan pembebanan yang terjadi. Untuk jarak antar tiang dibawah  $6D$ , maka penambahan jumlah tiang akan meningkatkan kekakuan daripada grup tiang dan menimbulkan *displacement* yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan tiang tunggal. (Abbas, Chik, & Taha, 2010). Penelitian yang sudah dilakukan namun cenderung meneliti untuk respons fondasi grup terhadap beban sentris, sehingga pada penelitian kali ini akan dianalisis dampak daripada beban eksentris pada sistem fondasi tiang yang menggunakan bracing serta dampak dari penambahan jumlah tiang terhadap distribusi gaya. Parameter pemodelan mengacu pada fondasi Jembatan Pedamaran II di Riau.

Jembatan Pedamaran II merupakan jembatan tipe *cable stayed* sepanjang 1.200 meter yang membentang di atas Sungai Rokan. Jembatan yang diresmikan tahun 2012 ini memiliki fondasi kelompok tiang *spun pile* yang terbuat dari material beton dan dengan *pile cap* berada di atas permukaan tanah (*elevated pile cap foundation*). Di antara tiang dihubungkan dengan *bracing* diagonal yang terbuat dari material baja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Fondasi jembatan pedamaran II

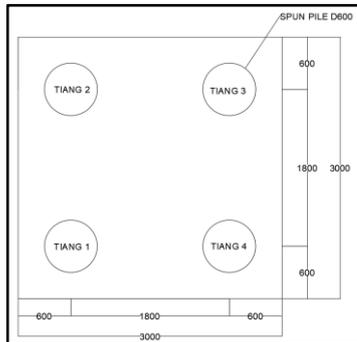
Penggunaan *bracing* dapat menimbulkan kekakuan lateral lebih namun juga cenderung tidak dapat menahan *buckling* yang timbul ketika terjadi gaya tekan. (FEMA, 2011) Elemen struktur yang ada pada fondasi akan mempengaruhi distribusi gaya, baik gaya lateral maupun momen.

Analisis akan dilakukan dengan menggunakan pendekatan *finite element* dengan *software* Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees). Dilakukan pemodelan fondasi jembatan 2x2 dan 2x3 dengan parameter material tiang dan tanah menyesuaikan dengan kondisi *existing* Jembatan Pedamaran II. Akan dilakukan analisis pembebanan *pushover* yang akan dilakukan pada badan dari salah satu tiang, sehingga letak beban akan eksentris terhadap fondasi tiang. Hal ini dilakukan untuk menyimulasikan beban-beban eksentris yang mungkin dapat terjadi pada struktur fondasi seperti beban ombak, angin, maupun beban tidak disengaja seperti tertabrak kapal dapat terjadi secara eksentris

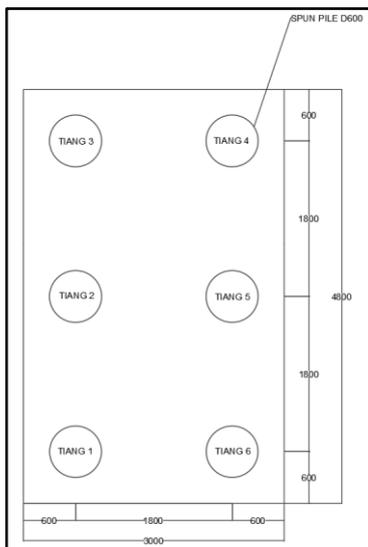
Penelitian ini akan dilakukan untuk mengetahui bagaimana distribusi gaya akibat pembebanan lateral eksentris pada fondasi yang menggunakan *bracing* dan pengaruh penambahan jumlah tiang terhadap distribusi gaya.

## METODE

Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan konfigurasi serta dimensi *pile cap* yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 2. Tampak atas pemodelan pile cap 2x2



Gambar 3. Tampak atas pemodelan pile cap 2x3

Pemodelan *pile cap* dimodelkan dengan memberikan titik massa (*lumped mass*) pada pusat *pile cap*. Titik massa tersebut akan mendistribusikan gaya kepada kepala masing-masing tiang menggunakan model elemen *elasticBeamColumn*. Model elemen ini akan membentuk elemen balok dengan perilaku linear statis (Mazzoni et al, 2023). Elemen ini hanya berfungsi untuk mendistribusikan gaya dan tidak dapat memasuki fase *non linear*. Massa pada pusat *pile cap* didapat melalui perkalian antara massa jenis beton dengan volume dari *pile cap*.

Tiang yang digunakan merupakan *spun pile* dengan panjang 47 meter. Dalam pemodelan numerik tiang, perlu diidentifikasi

panjang plastis penampang tiang dan didapat bahwa panjang plastis elemen adalah 1 m. Sehingga akan ditempatkan nodal setiap 1 m dan didapat 48 nodal dengan 47 elemen pada setiap tiang. Elemen yang digunakan adalah dengan elemen *dispbeamcolumn* agar terjadi distribusi plastisitas sepanjang keseluruhan tiang sehingga pada setiap elemen dapat terjadi leleh. Penampang tiang dimodelkan dengan *fiber cross section* sehingga dapat menghasilkan hasil non-linearitas dari beton tanpa mengurangi modulus *sectional* karena retaknya material.

Peletakan yang diberikan pada pemodelan terbagi menjadi tiga yaitu merupakan peletakan kepala tiang, peletakan dasar tiang, dan peletakan tanah. Pada peletakan di kepala tiang, dimodelkan sebagai peletakan jepit bebas sehingga kepala tiang dapat bergerak baik pada sumbu horizontal maupun vertikal dan dapat menahan momen. Pergerakan rotasi arah sumbu vertikal tidak ditahan karena letak beban eksentris yang memungkinkan menimbulkan gaya puntir pada kepala tiang (Tabatabael, 2010). Pada peletakan dasar tiang dimodelkan dengan peletakan rol sehingga tiang dapat bergerak pada sumbu horizontal. Pada peletakan tanah, dimodelkan sebagai peletakan jepit sehingga tidak terjadi pergerakan.

Digunakan material Concrete 02 (Mazzoni et al, 2010) untuk beton dan Steel 02 (Mazzoni et al, 2012) untuk baja *PC Strand*. Concrete02 merupakan salah satu *uniaxial* material pada OpenSees yang merupakan pembaruan dari model Concrete01. Letak pembaruan pada Concrete02 adalah memasukkan parameter kuat tarik (*tensile strength*), Dikarenakan struktur yang dimodelkan merupakan beton pratekan maka jenis Concrete02 dipilih pada pemodelan. Material Steel02 dipilih sebagai material baja karena memiliki kemampuan *isotropic strain hardening* yang cocok dengan struktur tiang pratekan.

Pemodelan beban terbagi menjadi dua yaitu pembebanan aksial dan lateral. Pembebanan aksial berasal dari beban sendiri *pile cap* dan beban dari tiang. Beban aksial dari *pile cap* digunakan perkalian massa *pile cap* dengan gravitasi. Beban aksial yang berasal dari

beban tiang diperhitungkan menggunakan Persamaan (1).

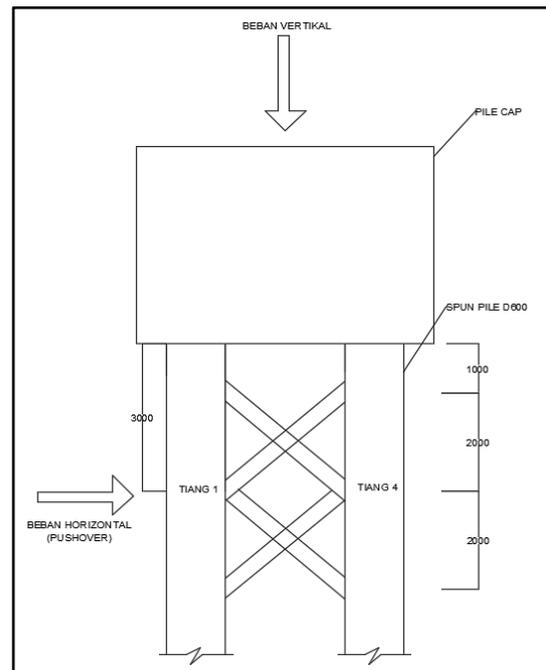
$$P_{aksial} = 0.1 \times f_{c'} \times A_g \quad (1)$$

Paksial: beban aksial pada struktur (kN)

$f_{c'}$ : kuat tekan beton pada hari ke-28 (kPa)

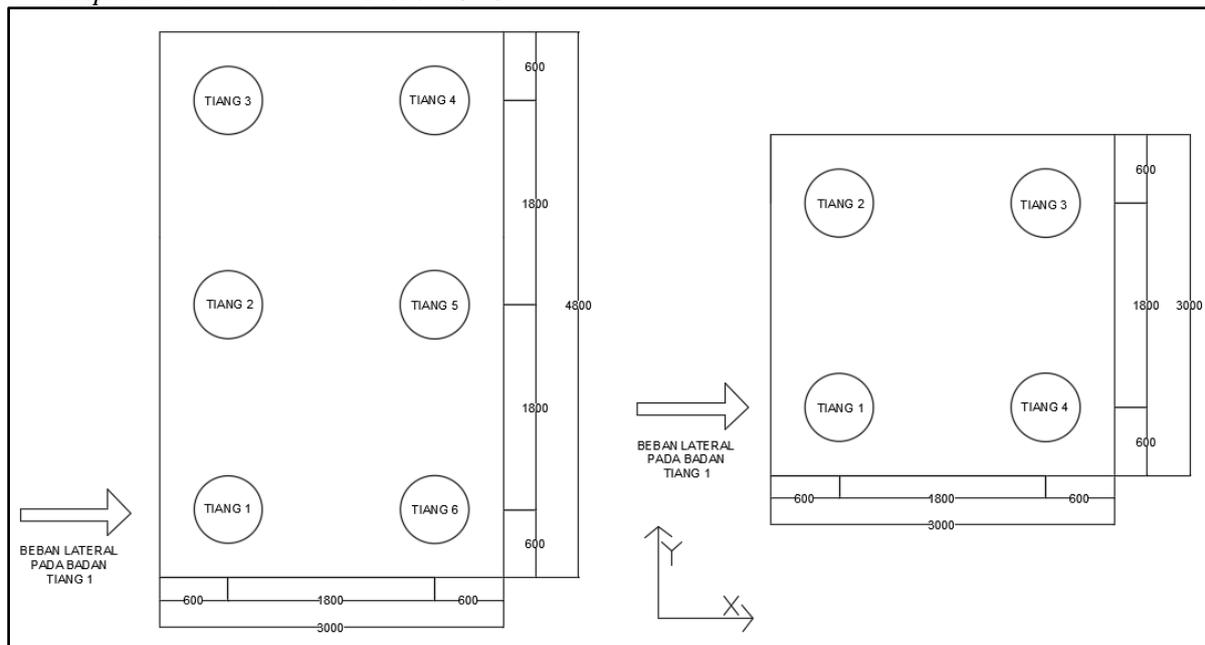
$A_g$ : luas penampang tiang ( $m^2$ ).

Nilai kuat tekan beton adalah  $f_{c'}$  49.8 MPa dengan luas penampang 0.283  $m^2$  sehingga didapat beban aksial untuk satu tiang sebesar 1722 kN. Didefinisikan juga beban akibat beban struktur sendiri dengan memberikan massa pada tiap nodal sebesar luasan *tributary area* tiap nodal. Luasan tersebut akan dikalikan dengan berat jenis material serta gravitasi untuk memberikan pembebanan pada tiap nodal tiang akibat berat dari struktur tiang. Pemodelan beban. Pemodelan beban lateral merupakan pembebanan *pushover* pada badan tiang, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4. Letak beban pada tiang 1 yang berada 3 m di bawah *pile cap*. Letak beban diletakkan pada *level* sambungan tengah *bracing* yang didasari berdasarkan asumsi penulis mengenai kemungkinan terjadinya beban eksentrik seperti tertabrak oleh kapal. Beban *pushover* yang diberikan merupakan beban *displacement* dengan kenaikan *displacement* setiap 0.001 m serta nilai *displacement* maksimum sebesar 0.25 m.



Gambar 4. Letak pembebanan pada model

Pembebanan hanya dilakukan pada salah satu tiang untuk kedua jenis fondasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pembebanan dilakukan pada arah sumbu x.



Gambar 5. Letak Beban Eksentrik

Tabel 1. memberikan dimensi daripada tiang dan *pile cap* yang dipakai dalam penelitian

Tabel 1. Parameter dimensi pemodelan

Jenis	Parameter	Satuan	
Tiang	Diameter	600	mm
	Jenis	Spun Pile PC	
	Diameter Dalam	400	mm
	Panjang	47	m
	Ketinggian di Atas Tanah	11	m
	Kedalaman di Bawah Tanah	36	m
	Pile Cap	Tebal	2
Lebar		3	m
Panjang		3	m
Spacing antar Tiang		1.8	m
Spacing dengan Ujung		0.6	m
Beban		Ketinggian di atas permukaan tanah	8

Pemodelan *bracing* yang digunakan menggunakan *bracing* baja profil. Baja profil yang digunakan merupakan baja yang ada di pasaran. Digunakan jenis baja WF ukuran 150x150. Pemodelan *bracing* dengan *elastic element* berarti elemen *bracing* hanya berfungsi sebagai elemen untuk mendistribusi serta tidak dapat terjadi kegagalan (fase plastis) pada elemen *bracing*.

Digunakan pemodelan dengan *elasticBeamColumn* pada *bracing* karena asumsi yang dipakai adalah *bracing* hanya berfungsi untuk mendistribusikan gaya tanpa dapat mengalami kegagalan, sehingga perilaku elastik digunakan dalam *bracing*. Ilustrasi bentuk daripada *bracing* pada fondasi ditunjukkan pada Gambar 4.

Tanah yang digunakan merupakan tanah pasir dengan rumus perhitungan kapasitas *ultimate* diambil perhitungan API (1993). Pada proses pemodelan tanah, perlu diidentifikasi besar kapasitas *ultimate* ( $P_{ult}$ ) serta besar *displacement* ketika mencapai 50% kapasitas *ultimate* ( $y_{50}$ ). Rumus kapasitas *ultimate* tanah pasir ditunjukkan pada Persamaan (2) sampai Persamaan (4)

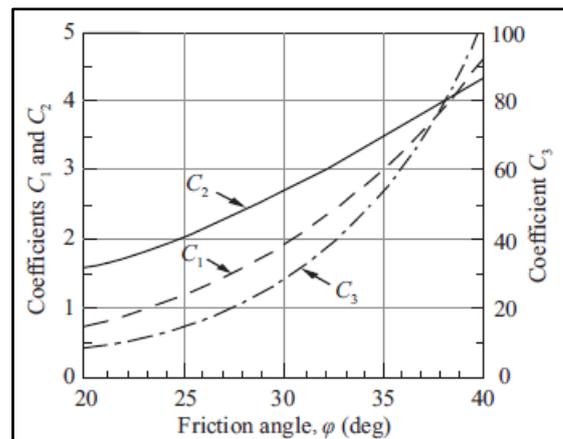
$$P_u = \min[P_{us}, P_{ud}] \tag{2}$$

$$P_{us} = (C_1H + C_2d)\gamma H \tag{3}$$

$$P_{ud} = C_3D\gamma H \tag{4}$$

$P_u$ : Tahanan *ultimate tanah* (kN/m<sup>2</sup>)

$P_{us}$ : Kekuatan *ultimate* kedalaman dangkal  
 $P_{ud}$ : Kekuatan *ultimate* kedalaman dalam  
 $C_1, C_2, C_3$ : Koefisien berdasarkan sudut geser tanah dari API (2005)  
 $\gamma$  = Berat jenis tanah (kN/m<sup>3</sup>)  
 $H$  = Kedalaman tanah tiap element tanah (m)  
 $d$  = diameter tiang (m)



Gambar 6. Koefisien  $C_1, C_2$ , dan  $C_3$   
Source: API, 2005

Gambar 7 merupakan grafik yang menunjukkan nilai  $C_1, C_2$ , dan  $C_3$  untuk berbagai nilai sudut geser tanah pasir. Untuk nilai  $y_{50}$ , digunakan Persamaan (5)

$$y_{50} = \frac{A p_u}{2K h H} \ln \left( \frac{1 + \frac{0.5}{A}}{1 - \frac{0.5}{A}} \right) \tag{5}$$

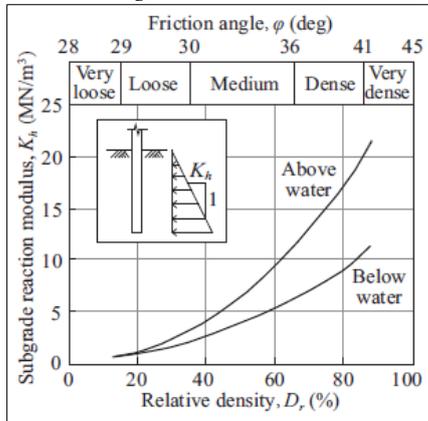
y<sub>50</sub>: *Displacement* saat mencapai setengah tahanan *ultimate* tanah

A: Faktor beban (0.9 untuk beban siklis dan 3-0.8( $\frac{H}{D}$ ) untuk beban statis)

H: Kedalaman tanah tiap elemen tanah (m)

P<sub>u</sub>: Tahanan *ultimate* tanah (kN/m)

K<sub>h</sub>: Modulus *subgrade reaction* (kN/m<sup>3</sup>)

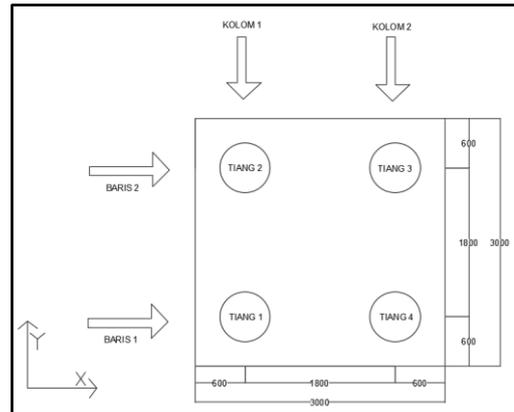


Gambar 7. Modulus Subgrade Reaction.  
Source: ATC, 1996

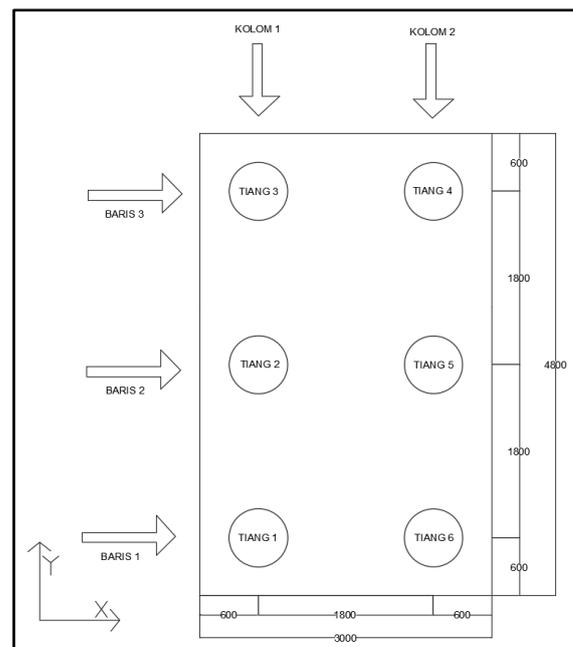
Gambar 8 menunjukkan nilai modulus *subgrade reaction* untuk berbagai nilai *relative density*. Parameter tanah yang sudah ditentukan menjadi parameter yang dimasukkan dalam model material Pysimple1 sebagai model material tanah yang digunakan dalam penelitian. Model ini mengambil relasi tahanan terhadap *displacement* (p-y) berdasarkan Matlock (1970) untuk tanah lempung lunak dan berdasarkan API (1995) untuk tanah pasir.

**HASIL PENELITIAN**

Distribusi gaya dan pergerakan daripada tiang sangat dipengaruhi oleh posisi tiang, sehingga menentukan baris dan kolom pada fondasi menjadi penting. Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan konfigurasi baris dan kolom pada fondasi. Penamaan baris dan tiang akan digunakan dalam analisis-*analisis* berikutnya.

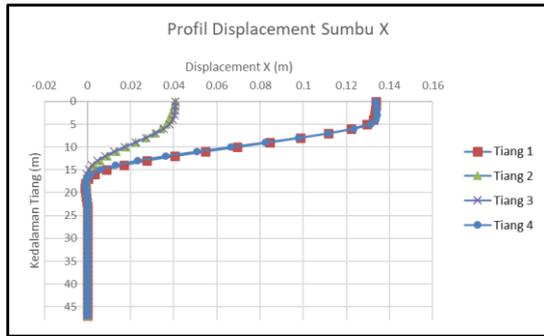


Gambar 8. Konfigurasi baris dan kolom fondasi 2x2

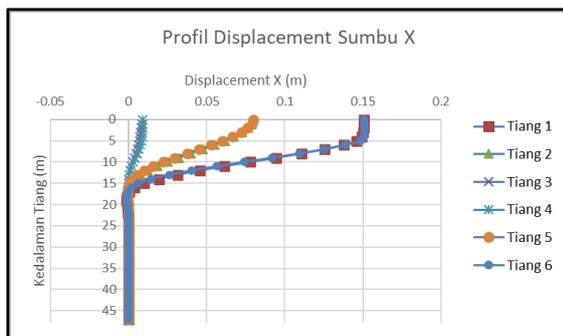


Gambar 9. Konfigurasi baris dan kolom fondasi 2x3

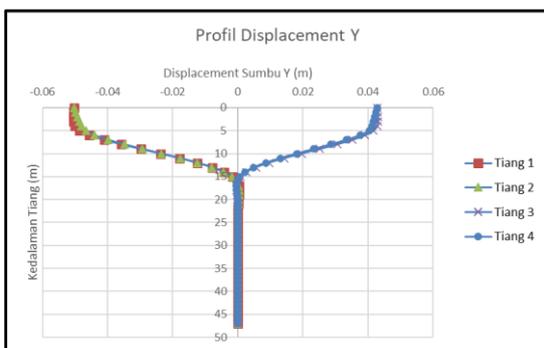
Dilakukan analisis terhadap profil *displacement* pada tiang yang terjadi akibat pembebanan lateral. Gambar 11 sampai Gambar 14 menunjukkan profil *displacement* pada sumbu horizontal yaitu sumbu x dan y pada kondisi akhir pembebanan.



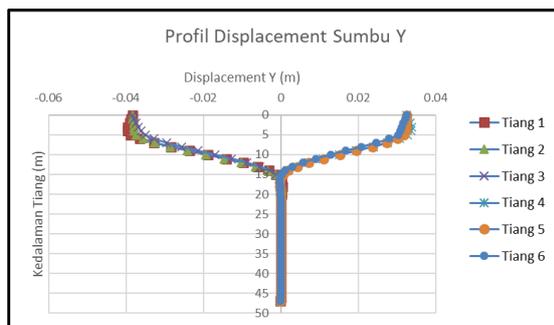
Gambar 10. Profil displacement sumbu X fondasi 2x2



Gambar 11. Profil displacement sumbu X fondasi 2x3



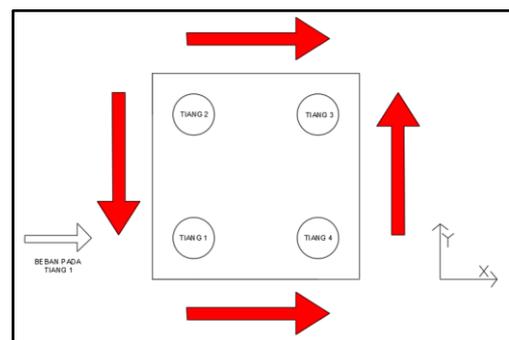
Gambar 12. Profil displacement sumbu Y fondasi 2x2



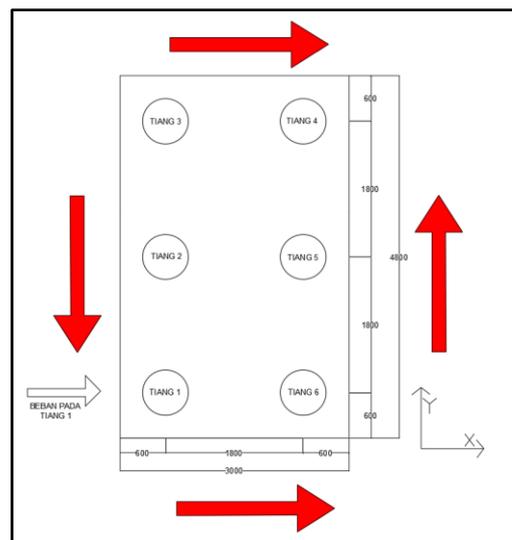
Gambar 13. Profil displacement sumbu Y fondasi 2x3

Dari Gambar 11. dan Gambar 12. menunjukkan hasil yang serupa dimana baik pada

kedua kondisi menunjukkan pergerakan ke arah sumbu x positif untuk baris 1 dan baris 2. Terdapat perbedaan pada nilai *displacement* maksimum dimana pada fondasi 2x3 terjadi *displacement* lebih besar dibanding fondasi 2x2. Pada *displacement* arah sumbu Y juga menunjukkan hal yang sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13 dan Gambar 14. Untuk kedua kondisi juga menunjukkan hasil yang serupa pada sumbu y dimana pada kolom 1 menunjukkan pergerakan ke arah sumbu y negatif dan pada kolom 2 menunjukkan pergerakan ke arah sumbu y positif. Apabila pergerakan kepala tiang diilustrasikan maka ditunjukkan pergerakan seperti pada Gambar 15 dan Gambar 16.



Gambar 14. Ilustrasi pergerakan pile cap fondasi 2x2

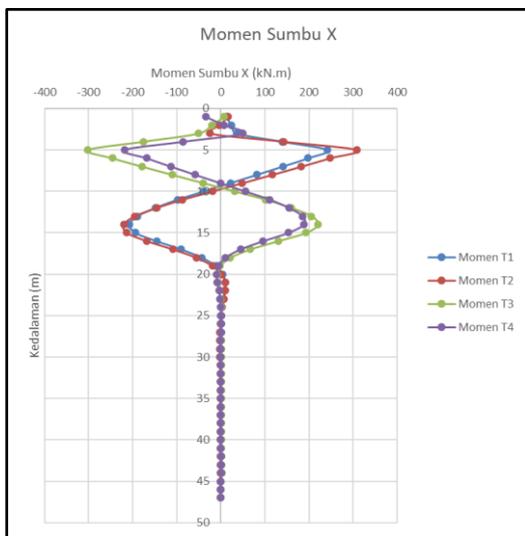


Gambar 15. Ilustrasi pergerakan pile cap fondasi 2x3

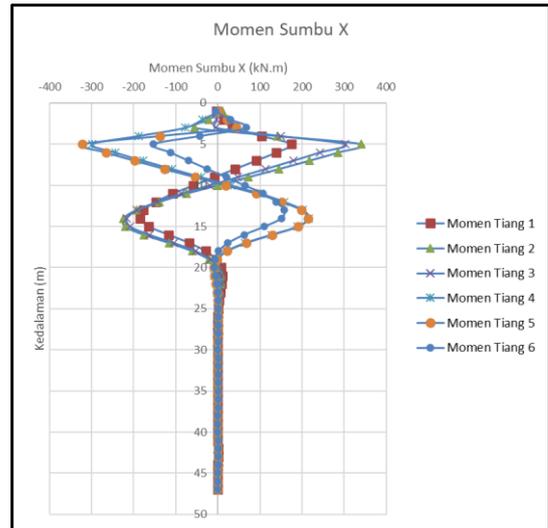
Pergerakan pada Gambar 15 dan Gambar 16 menunjukkan bahwa beban yang eksentris akan menimbulkan pergerakan pada dua sumbu yaitu sumbu x dan sumbu y. Keberadaan tanah akan menahan pergeseran lateral pada tiang

sehingga akan timbul perputaran pada *pile cap*. Perputaran pada *pile cap* akan menimbulkan gaya torsi pada tiang. Gaya torsi akan menimbulkan momen pada dua sumbu (*biaxial bending*) yang akan mempengaruhi kapasitas struktur dalam menahan gaya yang terjadi.

Analisis distribusi bending momen pada tiang juga dilakukan untuk kedua kondisi. Akibat beban yang eksentris, bending momen terjadi pada dua sumbu yaitu sumbu x dan sumbu y. Analisis distribusi momen yang ditunjukkan merupakan bending momen pada pembebanan *pushover* maksimum, atau pada kondisi gaya geser *ultimate*. Gambar 17 dan Gambar 18 menunjukkan momen sumbu x pada gaya *pushover* maksimum, yang berarti merupakan beban lateral maksimum yang dapat diterima sistem fondasi, yaitu sebesar 291.485 kN untuk fondasi 2x2 dan 309.706 kN untuk fondasi 2x3.

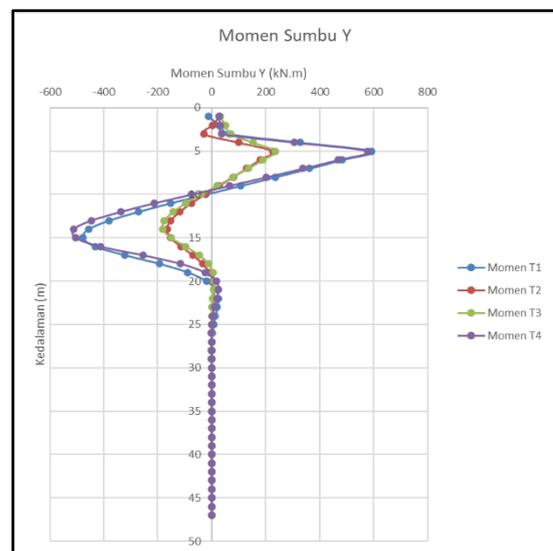


Gambar 16. Distribusi momen sumbu X fondasi 2x2

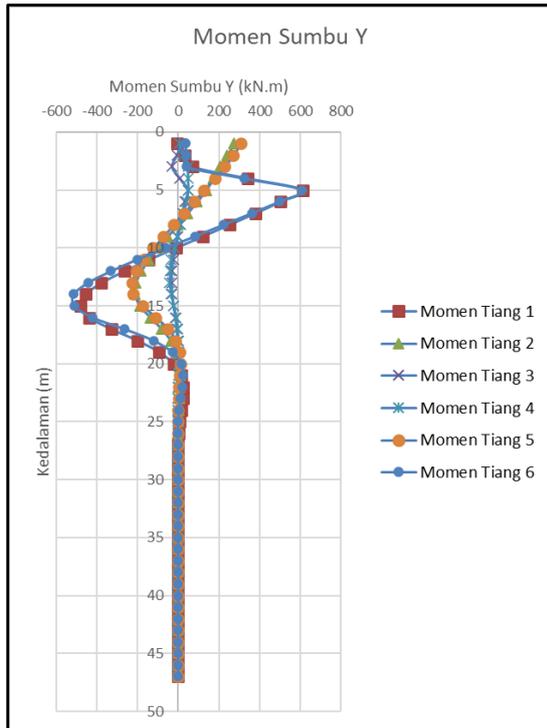


Gambar 17. Distribusi momen sumbu X fondasi 2x3

Distribusi momen pada sumbu x menunjukkan bahwa untuk kedua fondasi menunjukkan pola distribusi momen yang sama dimana terjadi momen paling besar pada jarak 5 meter dari kepala tiang yang merupakan lokasi sambungan paling bawah. Untuk semua tiang juga dilihat tetap mengalami distribusi momen yang merata dengan nilai momen paling besar bukan terjadi pada tiang yang diberi beban yaitu adalah tiang 1 namun terjadi pada tiang 2 untuk kedua kondisi. Distribusi momen yang terjadi menunjukkan bahwa keberadaan elemen *bracing* elastik akan mendistribusikan beban yang sangat besar sehingga muncul momen yang besar pada sambungan *bracing*.



Gambar 18. Distribusi momen sumbu Y

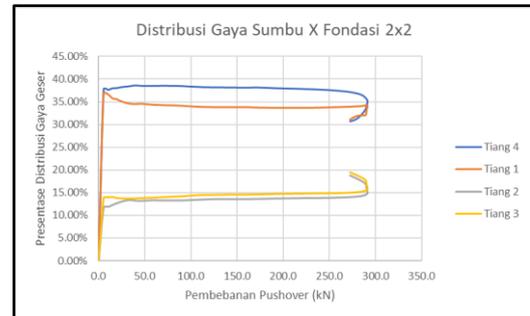


Gambar 19. Distribusi momen sumbu Y fondasi 2x3

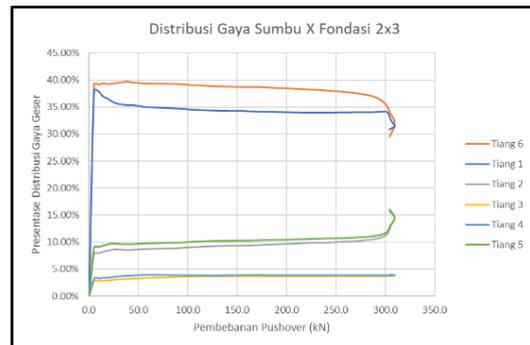
Gambar 19 dan Gambar 20 menunjukkan distribusi momen sumbu y pada tiang ketika terkena beban *pushover* maksimum. Pada kedua fondasi muncul perbedaan pola dimana pada fondasi 2x3, untuk tiang pada baris 2 memiliki momen terbesar pada kepala tiang. Hal ini terjadi dikarenakan tidak ada *bracing* yang menghubungkan tiang diantara baris 2, seperti yang sudah disebutkan sebelumnya bahwa pemodelan *bracing* hanya ada pada sisi-sisi perimeter atau sisi terluar dari setiap kondisi. Hal ini menunjukkan peran *bracing* yang akan mengubah lokasi momen terbesar dari titik kepala tiang menjadi lokasi sambungan *bracing*. Hal tersebut terjadi karena kekakuan sistem fondasi akan berubah, pada kondisi tidak ada *bracing* maka kekakuan akan berada pada *pile cap* namun akan turun ke level sambungan *bracing*. Sehingga juga akan menimbulkan lengan momen yang lebih kecil terhadap gaya lateral, namun hal ini perlu dianalisis lebih lanjut dengan melihat reaksi gaya dalam geser fondasi.

Analisis selanjutnya merupakan analisis gaya geser pada tiap tiang. Akibat beban yang eksentris terhadap pusat fondasi, maka gaya geser akan timbul pada kedua sumbu horizontal yaitu sumbu x dan y. Namun dikarenakan beban berada pada sumbu x, maka gaya geser yang timbul pada sumbu y untuk semua tiang akan sama dengan

nol. Gaya geser yang dianalisis merupakan gaya geser yang muncul pada jarak 6 m dari kepala tiang. Letak titik analisis tidak menjadi pembeda dikarenakan fokus dari analisis adalah melihat pola distribusi gaya yang akan sama sepanjang bagian tiang di atas tanah.



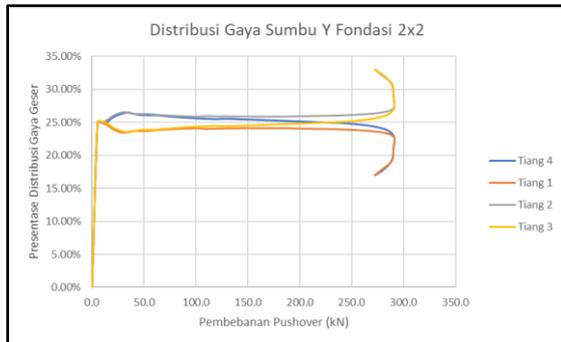
Gambar 20. Distribusi gaya geser sumbu X fondasi 2x2



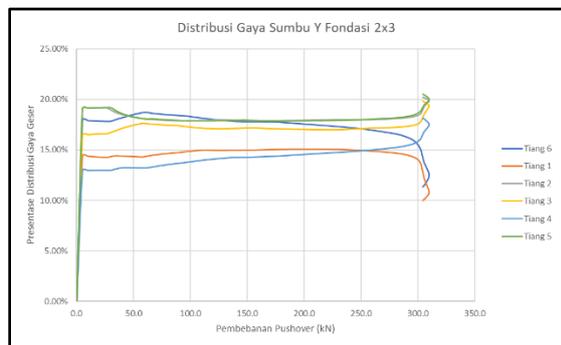
Gambar 21. Distribusi gaya geser sumbu X fondasi 2x3

Gambar 21 dan Gambar 22 menunjukkan distribusi gaya geser pada sumbu x, ditunjukkan bahwa tiang yang berada pada baris 1 untuk kedua fondasi menerima distribusi gaya yang paling besar. Terdapat perbedaan sedikit diantara kedua grafik yaitu pada fondasi 2x2 dapat dilihat bahwa distribusi gaya yang diterima tiang pada baris 1 berada hampir mencapai 40% untuk tiap tiang tiangnya sedangkan pada fondasi 2x3 dapat dilihat bahwa tiang-tiang pada baris 1 menerima distribusi gaya sekitar 35% pada tiap tiangnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pembebanan eksentris akan membuat tiang yang berada pada baris pembebanan akan memikul gaya sangat besar dibandingkan tiang-tiang lainnya dan penambahan jumlah tiang tentu akan membuat distribusi gaya yang diterima tiang pada baris pembebanan lebih kecil. Dapat dilihat juga pada kedua gambar menunjukkan pola yang sama yaitu pada bagian akhir pembebanan *pushover* maka beban yang dipikul oleh tiang yang diberi

beban yaitu tiang 1 akan menurun, fase dimana gaya geser yang diterima menurun merupakan fase dimana pembebanan *pushover* pada tiang tersebut sudah memasuki fase plastis sehingga kapasitas tiang untuk menerima gaya sudah menurun.



Gambar 22. Distribusi gaya geser sumbu Y fondasi 2x2



Gambar 23. Distribusi gaya geser sumbu Y fondasi 2x3

Gambar 23 dan Gambar 24 menunjukkan distribusi gaya geser sumbu y. Dapat dilihat bahwa distribusi sumbu y menunjukkan hasil yang mirip pada kedua kondisi. Pada tahapan awal pembebanan, terjadi distribusi yang merata antara semua tiang, namun sampai mencapai titik pembebanan tertentu, tiang pada baris 1 mengalami penurunan distribusi gaya yang diiringi dengan peningkatan distribusi gaya pada baris lainnya Hal tersebut serupa dengan yang terjadi pada distribusi gaya geser sumbu x.

## KESIMPULAN

Keberadaan *bracing* pada fondasi akan mendistribusikan gaya secara merata diantara tiang yang berada pada baris yang sama. Ketika mengalami pembebanan, momen yang timbul pada sambungan paling bawah *bracing* akan menjadi titik momen terbesar. Dari grafik juga terlihat bahwa keberadaan *bracing* akan

menggeser momen terbesar dari lokasi kepala tiang menjadi sambungan *bracing*. Dari grafik *displacement* dapat dilihat bahwa keberadaan beban eksentris akan menimbulkan puntir pada tiang yang dapat menimbulkan momen tambahan yang mempengaruhi kapasitas struktur terhadap pembebanan lateral. Menjadi pertimbangan penting bahwa analisis dilakukan dengan kondisi elemen *bracing* elastik yang berarti elemen *bracing* tidak dapat mengalami kegagalan atau pada implementasi kondisi asli adalah *bracing* tidak dapat patah selama proses pembebanan.

## DAFTAR PUSTAKA

- ATC-40. (1996). Seismic Evaluation and Retrofit Concrete Buildings. *California: Applied Technology Commission*.
- Basha, A. M., & Eldisouky, E. A. (2023). Effect of eccentric loads on the behavior of circular footing with/without skirts resting on sand soil. *Springer Link*.
- FEMA. (2011). *Coastal Construction Manual (Vol. II)*. FEMA Residential Coastal Construction .
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik. *Standar Nasional Indonesia*, 176.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2010, September 16). *Concrete02 Material - Linear Tension Softening*. Retrieved from Open System for Earthquake Engineering Simulation User Command-Language Manual: <https://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/165.htm>
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2012, September 2020). *Steel02 Material - Giuffr Menegotto Pinto Model with Isotropic Strain Hardening*. Retrieved from <https://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/181.htm>
- Pusat Litbang Jalan dan Jembatan. (2015). Pedoman Persyaratan Umum Perencanaan Jembatan. *Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat*, 10.
- Scott, M. H. (2021, September 19). *Like Spinning Node*. Retrieved from Portwood Digital: <https://portwooddigital.com/2021/09/19/>

like-spinning-  
nodes/?fbclid=IwAR0rc4g9n6Z2dTN42  
LRUubJHp9zk4XC4kQdoB6S7HWyhV  
ltPXHSAzUHwClg

Tabatabael, R. (2010). Torsional Vibration of  
Eccentric Building Systems.  
*IntechOpen*. doi:DOI: 10.5772/21997