

FAKTOR PENGARUH DEFLEKSI TIANG TUNGGAL TERHADAP TIANG KELOMPOK PADA ABUTMENT JEMBATAN

M. A. Hurum¹, A. Rifa'i^{*1}, S. Ismanti¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

**Corresponding author: ahmad.rifai@ugm.ac.id*

INTISARI

Provinsi Kalimantan Timur merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang konektivitas antar daerahnya masih banyak terhambat oleh keberadaan sungai-sungai kecil. Kondisi geografis tersebut menuntut pembangunan infrastruktur transportasi yang memadai, salah satunya melalui pembangunan jembatan. Jembatan merupakan struktur yang dirancang untuk menghubungkan dua wilayah yang terpisah oleh sungai dan lembah. Pembangunan konstruksi jembatan dipengaruhi oleh lokasi, posisi titik jembatan, serta karakteristik tanah. Penelitian ini membahas perencanaan jembatan yang melintasi Sungai Tanjung Laut Indah, yang berlokasi di Kota Bontang. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari faktor pengaruh tiang pancang kelompok terhadap defleksi lateral. Analisis dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu secara analitis dengan menggunakan pendekatan Broms (1964) dan secara numeris menggunakan pendekatan *p-y curves* dengan bantuan perangkat lunak RSPile. Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa jenis tanah pada lokasi penelitian didominasi oleh *silty clay* dan terdiri atas empat lapisan utama. Nilai defleksi yang diperoleh dari kedua metode menunjukkan tren yang serupa, namun defleksi yang dihitung menggunakan pendekatan Broms (1964) cenderung lebih besar dibandingkan dengan pendekatan *p-y curves* menggunakan RSPile. Selain itu, faktor pengaruh defleksi tiang tunggal secara analitis terhadap tiang kelompok secara numeris diperoleh sebesar 1,71 untuk satu baris tiang, 0,33 untuk dua baris tiang dan 0,16 untuk tiga baris tiang pancang.

Kata kunci: fondasi tiang pancang; defleksi; RSPile

1 PENDAHULUAN

Provinsi Kalimantan Timur merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang akses antar daerahnya masih banyak dibatasi oleh keberadaan sungai-sungai kecil. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Timur (2014), terdapat sebanyak 157 sungai yang tersebar di wilayah ini. Kondisi geografis tersebut menuntut pembangunan prasarana transportasi yang memadai guna meningkatkan konektivitas antarwilayah, salah satunya melalui pembangunan jembatan. Jembatan merupakan struktur yang dirancang untuk menghubungkan dua area yang terpisah oleh hambatan alami seperti sungai dan lembah. Pembangunan konstruksi jembatan sangat dipengaruhi oleh letak, posisi titik jembatan dan jenis tanah yang berada pada lokasi pembangunan (Sunanda, 2016), dalam pembangunan Jembatan juga harus memperhatikan faktor keamanan, kenyamanan, ketahanan, estetika, mudah dikerjakan dan ekonomis (Saragih et al., 2020). Setiap konstruksi jembatan pasti bertumpu pada fondasi, dikarenakan merupakan salah satu solusi utama dalam konstruksi bangunan yang berfungsi menyalurkan beban seperti, beban hidup dan beban struktur atas itu sendiri yang disalurkan dari atas menuju ke bawah dengan tegangan yang diizinkan, khususnya pada struktur yang berada di atas tanah lunak (Candra et al., 2018).

Gaya-gaya dalam yang terjadi pada fondasi tiang merupakan parameter yang penting karena menentukan seberapa baik fondasi tiang dapat menahan beban yang diterima. Fondasi sendiri menurut Das (1993) dibedakan menjadi dua bagian antara lain fondasi dangkal dengan perbandingan kedalaman fondasi (Z) dengan diameternya (D) lebih kecil sama dengan 10 ($Z/D \leq 10$) sedangkan untuk fondasi dalam kedalaman fondasi (Z) dengan diameternya (D) lebih besar sama dengan 10 ($Z/D \geq 10$). Salah satu jenis pada fondasi dalam adalah fondasi tiang pancang yang secara umum terdiri dari tiang tunggal (*single pile*) dan kelompok tiang (*group piles*). Dimensi fondasi harus mempunyai faktor keamanan agar tidak terjadi kegagalan daya dukung dan terjadi beda penurunan (*different settlement*) (Soewignjo et al., 2023).

Penelitian ini membahas tentang perencanaan rekonstruksi jembatan yang memotong Sungai Tanjung Laut Indah tepatnya berada di kota Bontang provinsi Kalimantan Timur. Pada perencanaannya digunakan fondasi dalam dengan jenis fondasi tiang pancang kelompok pada *abutment* jembatan. Perencanaan fondasi tiang kelompok, harus memperhitungkan beban tanah lateral dan aksial yang bekerja pada fondasi tiang kelompok. Kemampuan fondasi tiang kelompok menurut Darjanto (2011) ketika menahan gaya dari struktur atas belum tentu sama dengan kemampuan keseluruhan tiang tunggal dikalikan dengan jumlah tiang yang ada. Hardiyatmo (2023) menjelaskan

gaya lateral pada fondasi tiang dipengaruhi oleh kekakuan tiang, jenis tanah, penanaman ujung tiang pada *pilecap*, sifat gaya-gaya dan besar defleksi. Saran yang diberikan oleh McNulty (1956) dalam Hardiyatmo (2023) defleksi yang diizinkan terjadi pada konstruksi jembatan memiliki nilai sebesar 10 mm.

Penelitian ini bertujuan untuk mencari faktor pengaruh tiang pancang kelompok terhadap defleksi lateral. Analisis dilakukan dengan menggunakan 2 metode, yang pertama analisis dilakukan secara analitis dengan pendekatan menggunakan metode Broms (1964) dan analisis kedua dilakukan secara numeris dengan pendekatan *p-y curves* menggunakan bantuan perangkat lunak RSPile. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan hasil yang akan membantu saat ingin mengetahui besar defleksi yang terjadi pada tiang pancang kelompok, jika pada saat pengerjaan hanya bisa melakukan analisis secara analitis dengan metode Broms (1964) dan tidak memungkinkan untuk melakukan analitis secara numeris.

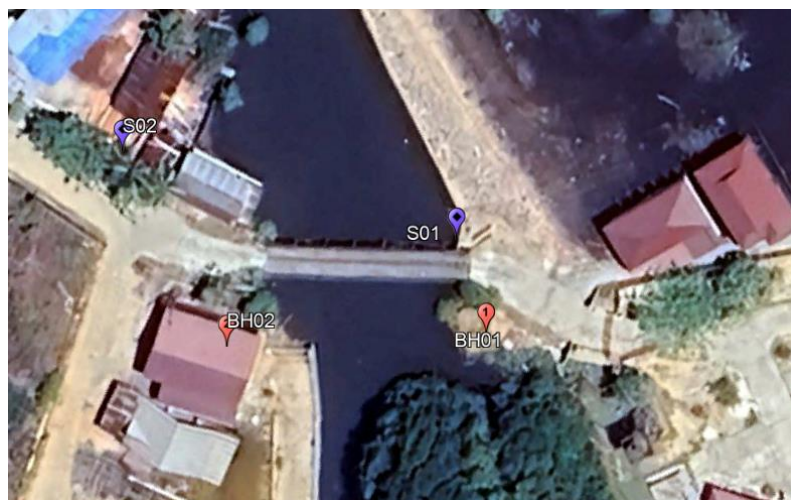
2 DATA DAN METODE

2.1 Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan di Provinsi Kalimantan Timur, tepatnya pada proyek pembangunan jembatan di Kota Bontang, yang berfokus pada fondasi *abutment* jembatan tersebut. Jembatan ini direncanakan akan dibangun melewati Sungai Tanjung Laut Indah. Untuk mendukung analisis perencanaan fondasi, dilakukan pengambilan data tanah dengan metode pengeboran dan pengujian *sondir*. Lokasi proyek secara umum dapat dilihat pada Gambar 1, sedangkan detail titik pengeboran dan pengujian *sondir* dapat dilihat pada Gambar 2 sebagai berikut.



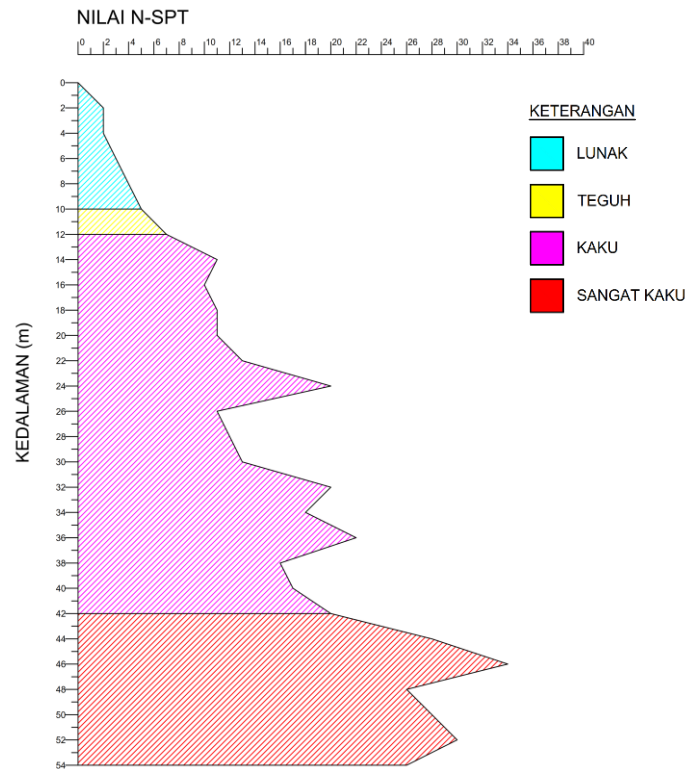
Gambar 1. Lokasi penelitian kota Bontang Provinsi Kalimantan Timur



Gambar 2. Titik *boring* dan *sondir* pada lokasi penelitian

2.2 Data Tanah

Data yang digunakan pada penelitian kali ini merupakan data sekunder yang didapat dari konsultan perencana. Data sekunder yang didapat berupa data penyelidikan tanah, gambar rencana dan perhitungan struktur jembatan. Data yang digunakan dalam analisis menggunakan data BH-01 dengan kedalaman 54 m, diketahui dari hasil penyelidikan tanah terdapat 4 lapisan tanah dan jenis tanah didominasi *silty clay*. Stratigrafi tanah yang disusun sesuai dengan data dari nilai N-SPT dan parameter tanah yang digunakan dalam analisis dapat dilihat pada Gambar 3 dan Tabel 1 sebagai berikut.



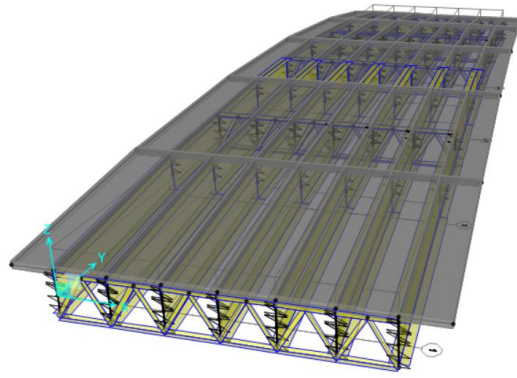
Gambar 3. Stratigrafi tanah BH-01

Tabel 1. Parameter lapisan tanah

Kedalaman (m)	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	s_u (kN/m ²)	ε_{50}
lapisan 1 (0-10 m)	13,27	19,22	17,5	0,02
lapisan 2 (10-12 m)	12	16	40	0,02
lapisan 3 (12-42 m)	17,56	18,53	66	0,01
lapisan 4 (42-54 m)	16,1	17,88	140	0,005

2.3 Pembebanan

Pembebanan pada jembatan menggunakan pendekatan ASD (*allowable stress design*). Perencana melakukan perhitungan dan modeling struktur jembatan menggunakan *software* SAP2000 (lihat Gambar 4), data pembebanan yang diperoleh dari hasil analisis jembatan oleh perencana dapat dilihat pada Tabel 2 dari hasil tersebut diambil kombinasi yang memiliki nilai paling besar yaitu kombinasi kuat 1, beban ini diambil karena dianggap akan membuat fondasi mendekati keadaan kritis.



Gambar 4. Modeling struktur atas dengan SAP2000

Tabel 2. Gaya yang bekerja pada jembatan dari hasil analisis SAP2000

Kombinasi	Lateral total (kN)	Aksial total (kN)	Aksial total + berat <i>abutment</i> (kN)
Kuat 1	518,10	233,56	1117,06
Kuat 3	691,44	122,54	1006,04
Ekstrem 1	489,41	2060,23	2943,73

2.4 Metode

Penelitian ini didasarkan pada data proyek perencanaan jembatan di kota Bontang. Jembatan yang direncanakan merupakan jembatan struktur komposit, yang dibangun untuk menggantikan jembatan lama yang sebelumnya berupa jembatan struktur kayu. Jembatan baru ini direncanakan memiliki bentang sepanjang 28 m, dengan sistem fondasi tiang pancang kelompok pada kedua *abutment*. Konfigurasi tiang pancang menggunakan konfigurasi segi empat dengan kedalaman tiang mencapai 52 m dari permukaan tanah. Fondasi tiang direncanakan menggunakan tiang berdiameter 500 mm dan terdiri dari atas 2 baris yang berjumlah 10 tiang pancang pada setiap *abutment*.

Tahapan penelitian dilakukan dengan melakukan analisis secara analitis dan analisis numeris menggunakan tiang pancang tunggal untuk melihat perbedaan di antara kedua metode tersebut, parameter tanah menggunakan 4 lapisan tanah sesuai hasil stratigrafi tanah dan panjang tiang 52 m, dengan memvariasikan diameter tiang menggunakan diameter 450 mm, 500 mm dan 600 mm. Setelah mendapatkan hasil antara perbandingan kedua metode tersebut analisis dilanjutkan melakukan permodelan tiang pancang kelompok pada RSPile menggunakan spesifikasi tiang pancang berdiameter 500 mm, kedalaman tiang 52 m dan jarak antar tiang 2,5D. Pada permodelan tiang pancang kelompok dilakukan variasi dengan menggunakan 1 baris tiang, 2 baris tiang dan 3 baris tiang dengan jumlah tiang per barisnya berjumlah 5 tiang. Hasil akhirnya dibandingkan hasil permodelan tiang kelompok menggunakan RSPile dengan hasil analisis tiang tunggal menggunakan metode Broms (1964) untuk mendapatkan faktor pengaruhnya.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Metode Analitis Terhadap Metode Numeris

Analisis dilakukan dengan melakukan perbandingan hasil antara analisis analitis menggunakan pendekatan metode Broms (1964) terhadap analisis numeris menggunakan pendekatan metode *p-y curves* (RSPile).

3.1.1 Analisis Secara Analitis

Perhitungan dianalisis dengan menggunakan metode Broms (1964), beban yang digunakan menggunakan kombinasi kuat 1 senilai 518,10 kN untuk gaya lateral total beban per satu tiang dihitung sebagai berikut.

$$Q_H = \frac{518,1 \text{ kN}}{10} = 51,81 \text{ kN}$$

Defleksi tiang pancang dihitung dengan persamaan tiang ujung jepit dianggap bebas. tahap awal menghitung nilai k_h , contoh perhitungan menggunakan tiang pancang dengan diameter 500 mm

$$E_{50} = 3625 \text{ kN}$$

$$k_h = \frac{1,67 \times 3625 \text{ kN}}{0,5} = 12107,5 \text{ kN/m}^3$$

Tahap selanjutnya menghitung nilai β yang nanti akan digunakan untuk mengetahui apakah tiang termasuk tiang pendek atau termasuk tiang panjang, dengan syarat $\beta L > 2,5$ (tiang panjang) dan $\beta L < 1,5$ (tiang pendek).

$$\beta = \left(\frac{12107,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times 0,5\text{m}}{4 \times 33892182 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 0,00098 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} \right)^{1/4} = 0,462$$

Cek tiang apakah termasuk tiang panjang atau tiang pendek.

24,046 > 2,5 (termasuk tiang panjang)

Hasil dari perhitungan didapat bahwa tiang termasuk tiang panjang maka digunakan persamaan sebagai berikut.

$$y_0 = \frac{2 \times 51,81 \text{ kN} \times 0,462(0,5\text{m} \times 0,454 + 1)}{12107,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times 0,5\text{m}} = 0,00975\text{m} \sim 9,75\text{mm}$$

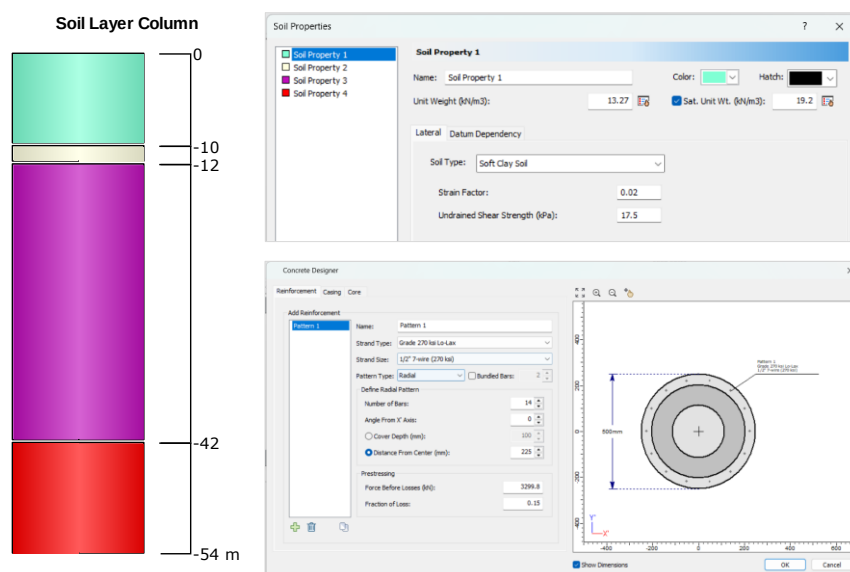
Hasil analisis dengan menggunakan diameter 450 mm, 500 mm, dan 600 mm dapat dilihat pada Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3. Rekapitulasi hasil analisis defleksi secara analitis

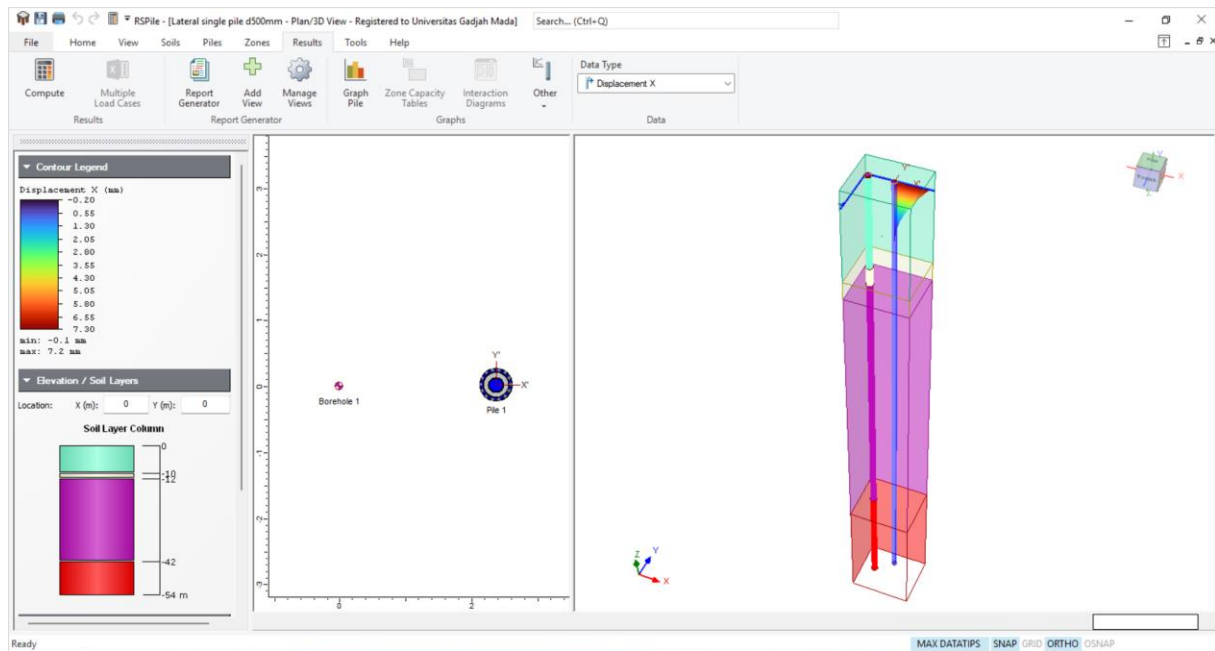
Diameter (mm)	450	500	600
Defleksi (mm)	11,05	9,75	7,86

3.1.2 Analisis Secara Numeris

Analisis secara numeris dilakukan dengan perangkat lunak RSPile dengan tanah dimodelkan 4 lapisan sesuai dengan parameter tanah pada Tabel 1 dan beban yang digunakan sebesar 51,81 kN. Permodelan fondasi tiang pancang pada RSPile dan rekapitulasi hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 5, Gambar 6 dan Tabel 4 sebagai berikut.



Gambar 5. Input parameter dalam RSPile D500

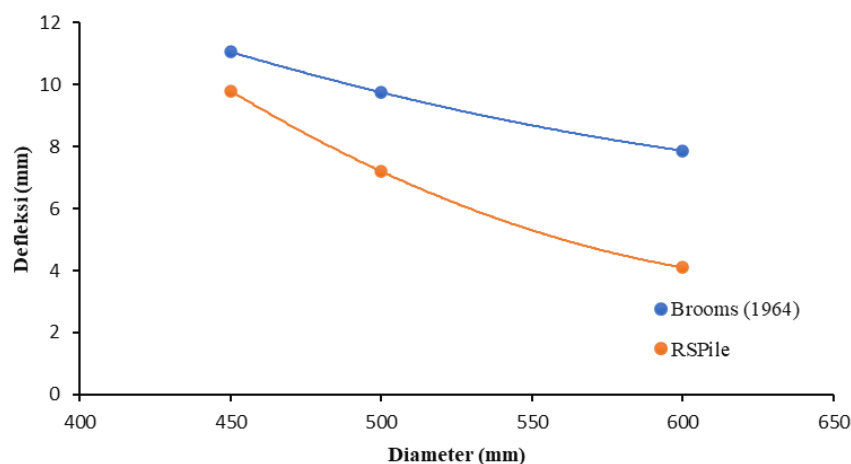


Gambar 6. Modeling RSPile fondasi tiang pancang tunggal D500

Tabel 4. Rekapitulasi hasil analisis defleksi secara numeris

Diameter (mm)	450	500	600
Defleksi (mm)	9,8	7,2	4,1

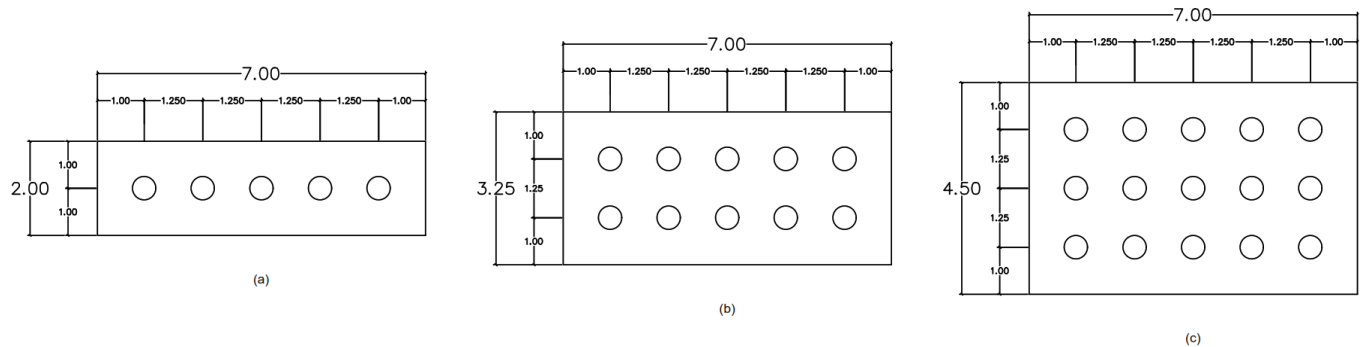
Hasil dari kedua metode yang dibandingkan antara metode Broms (1964) terhadap metode *p-y curves* (RSPile) dapat dilihat pada grafik Gambar 7. Dari grafik menunjukkan nilai tren yang sama antara kedua metode yaitu, penurunan defleksi pada tiang berbanding lurus terhadap diameter tiang yang digunakan, semakin besar diameter tiang yang digunakan maka semakin kecil defleksi yang terjadi pada tiang. Namun kedua metode memiliki perbedaan nilai defleksi pada modeling RSPile terhadap hasil dari analisis menggunakan Broms (1964). Perbedaan ini terjadi karena metode Broms (1964) melakukan penyederhanaan dengan menganggap bahwa sepanjang kedalaman tiang tanah memiliki tekanan tanah yang maksimal dan konstan atau meningkat secara linear setiap kedalaman sehingga memiliki nilai yang lebih konservatif (Kristianto et al., 2017). Sementara itu, metode *p-y curves* dalam RSPile memodelkan interaksi antara tanah dan tiang dengan menggunakan *spring non-linear*, di mana kekakuan tiang dapat berubah terhadap kedalaman tiang (Mostafa, 2022). Pendekatan ini menyebabkan nilai defleksi yang dihasilkan oleh permodelan RSPile memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan metode Broms (1964).



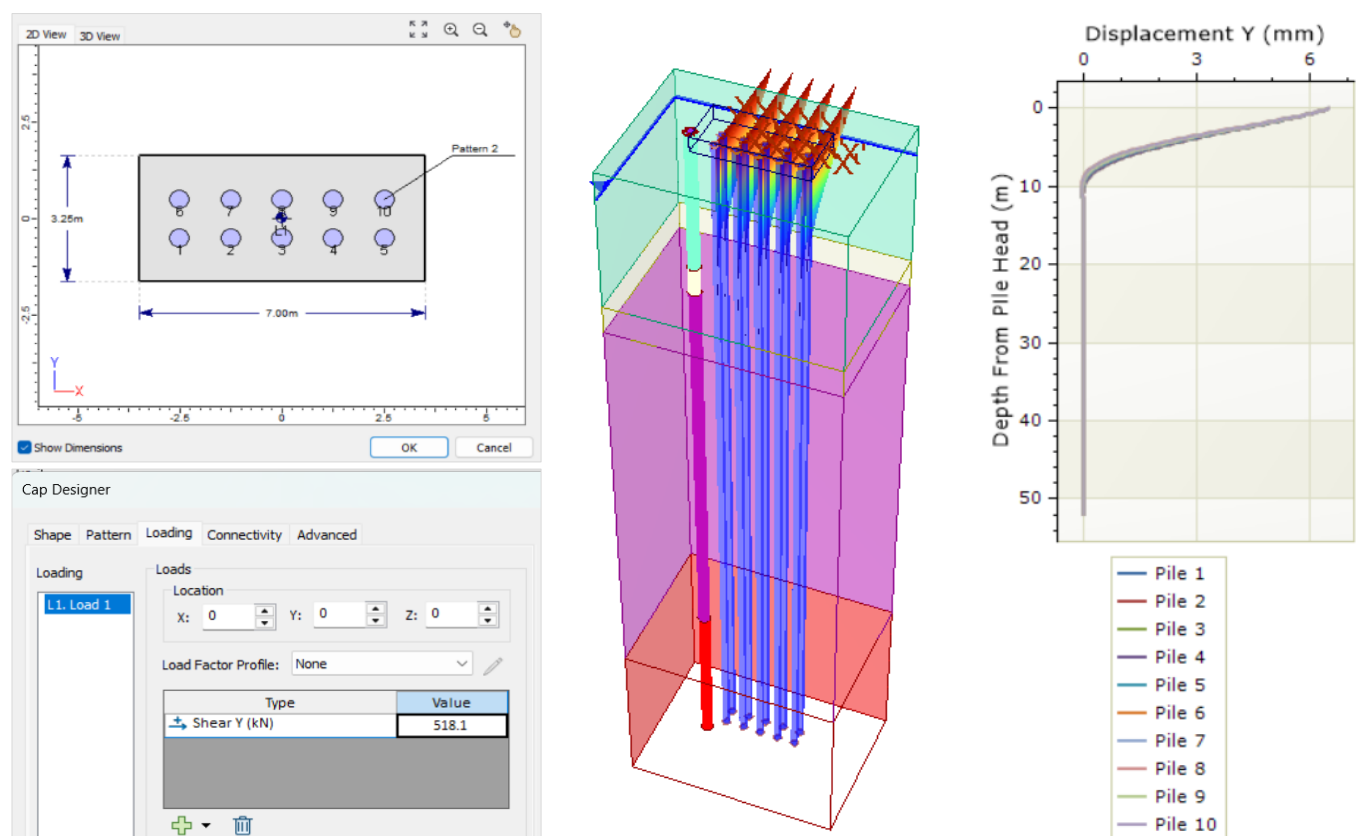
Gambar 7. Grafik perbandingan hasil analisis secara analitis dan numeris

3.2 Faktor Pengaruh Tiang Kelompok Terhadap Defleksi Lateral

Untuk mencari faktor pengali yang dapat digunakan pada analisis analitis tiang tunggal dengan menggunakan Broms (1964) untuk mengetahui defleksi lateral tiang kelompok dilakukan permodelan dengan 3 variasi. Variasi tersebut dibatasi dengan tiang menggunakan diameter 500 mm, jarak antar tiang 2,5D, jarak tiang ke tepi *pilecap* 1m, konfigurasi tiang menggunakan konfigurasi segi empat, panjang tiang 52 m (tiang panjang) dan tiang divariasikan menggunakan 1 – 3 baris dengan per baris tiang memiliki jumlah 5 tiang. Variasi permodelan dan hasil permodelan menggunakan RSPile dapat dilihat pada Gambar 8, Gambar 9 dan Tabel 5 sebagai berikut.



Gambar 8. Variasi permodelan tiang kelompok dengan diameter 500 mm: a) konfigurasi 1 baris, b) konfigurasi 2 baris, dan c) konfigurasi 3 baris



Gambar 9. Permodelan tiang kelompok dalam RSPile D500 – 2 baris

Tabel 5. Rekapitulasi hasil analisis secara numeris tiang kelompok

Variasi konfigurasi	1 Baris	2 Baris	3 Baris
Defleksi (mm)	33,3	6,5	3,1

Hasil permodelan tiang kelompok menggunakan perangkat lunak RSPile dibandingkan dengan hasil perhitungan analisis secara analitis menggunakan metode Broms (1964) untuk mengetahui berapa nilai faktor pengaruh terhadap kedua metode tersebut, perhitungan dengan metode Broms (1964) dilakukan dengan menggunakan beban terhadap 5 jumlah tiang sebesar 103,62 kN dan didapat defleksi yang terjadi pada tiang tunggal sebesar 19,49 mm. Faktor pengali yang didapat dari perbandingan kedua metode tersebut dapat dilihat pada Tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 6. Faktor pengaruh tiang kelompok

Diameter (mm)	Defleksi (mm)			
	Broms (1964)	RSPile tiang kelompok		
	Tiang tunggal	1 baris	2 Baris	3 Baris
500	19,49	33,33	6,5	3,1
	Faktor pengali	1,71	0,33	0,16

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis diperoleh kesimpulan pada penelitian sebagai berikut.

1. Hasil analisis stratigrafi tanah menunjukkan bahwa lokasi penelitian didominasi oleh tanah *silty clay*. Pada titik bor BH-01, pengeboran dilakukan hingga kedalaman 54 m, dengan lapisan tanah terdiri dari tanah lempung lunak pada kedalaman 0 – 10 m, tanah lempung teguh pada kedalaman 10 – 12 m, tanah lempung kaku pada kedalaman 12 – 42 m, dan tanah lempung sangat kaku pada kedalaman 42 – 54 m. Secara keseluruhan, jika disederhanakan lokasi penelitian ini memiliki empat jenis lapisan tanah utama.
2. Hasil analisis secara analitis yang menggunakan pendekatan dengan metode Broms (1964) dan analisis secara numeris yang menggunakan pendekatan metode *p-y curves* dengan bantuan RSPile memiliki tren yang sama terhadap defleksi, semakin besar diameter yang digunakan maka semakin kecil defleksi yang terjadi. Namun kedua metode memiliki perbedaan nilai defleksi yang mana metode Broms (1964) memiliki nilai defleksi lebih besar daripada modeling menggunakan RSPile, perbedaan ini terjadi karena metode Broms (1964) melakukan penyederhanaan dengan menganggap bahwa sepanjang kedalaman tiang tanah memiliki tekanan tanah yang maksimal dan konstan atau meningkat secara linear setiap kedalaman sehingga memiliki nilai yang lebih konservatif, sedangkan metode *p-y curves* dalam RSPile memodelkan interaksi antara tanah dan tiang dengan menggunakan *spring non-linear* dan kekakuan tiang dapat berubah terhadap kedalaman tiang.
3. Faktor pengaruh defleksi tiang tunggal terhadap tiang kelompok yang dapat digunakan untuk membantu memudahkan jika hanya bisa melakukan analisis secara analitis dengan metode Broms (1964), jika jenis tanah didominasi *silty clay* atau tanah kelempungan dan dengan batasan-batasan yang diberikan untuk tiang pancang *spun pile* berdiameter 500 mm bisa menggunakan faktor bernilai 1,71 untuk 1 baris tiang, 0,33 untuk 2 baris tiang dan 0,16 untuk 3 baris tiang pancang dalam mengetahui defleksi yang terjadi pada tiang kelompok.

REFERENSI

- Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Timur. (2024). Kalimantan Timur dalam Angka 2024. Situs Resmi BPS Kalimantan Timur. <https://kaltim.bps.go.id/id>
- Broms, B.B., (1964). *Lateral Resistance of Piles on Cohesive Soils*. *Journal of the Soil Mechanics Divisions*.
- Candra, A.I., Yusuf, A., and Rizky, A., (2018). Studi Analisis Daya Dukung Fondasi Tiang Pada Pembangunan Gedung LP3M Universitas Kediri. *Jurnal CIVILLA* 3.
- Darjanto, H., (2011). *Floating Raft-Pile Foundations Analysis Using Numerical Simulations*. *Jurnal Rekayasa Sipil* 7.
- Das, B.M., (1993). *Mekanika Tanah 2 (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)* Diterjemahkan oleh Endah Noor dan Indrasurya B Mochtar. Erlangga, Jakarta.
- Hardiyatmo, H.C., (2023). *Analisis dan Perancangan Fondasi II*, 5 ed. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.

- Kristianto, A., Surjandari, N.S., and Djarwanti, N., (2017). Analisis Defleksi Lateral tiang Tunggal *Free-End Pile* Pada Tanah Kohesif. e-Jurnal Matriks Teknik Sipil.
- Mostafa, H.H., (2022). *Lateral response evaluation of single piles based on pressuremeter test results (using Foxta) versus standard penetration test results (using Lpile)*. *Innovative Infrastructure Solutions* 7(1).
- Saragih, D.H., Dyah, and Kusumastuti, P., (2020). Pengaruh Variasi Jarak Tiang Bor Pada Tanah Lempung Terhadap Daya Dukung Dengan Metode Analisis. *Jurnal Forum Mekanika* 10.
- Soewignjo, A.N., Satibi, S., Wijaya, S.P., and Agustamar, Y., (2023). Estimasi Daya Dukung Block Foundation dan Kelompok Tiang: Studi Model Laboratorium pada Tanah Pasir. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* 21.
- Sunanda, A., (2016). Kajian Stabilitas Fondasi Kelompok Tiang Pancang Rencana Jembatan Muallaf Kecamatan Tenggarong. *Jurnal Teknik Sipil*.