

Defleksi Lateral Tiang Tunggal Akibat Beban Lateral Pada Tanah Pasir

Ahmad Fahrul Lafit^{a,*}, Togani Cahyadi Upomo^b, Yeri Sutopo^c, Agung Sutarto^d

^{a,b,c,d} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

Keywords:
lateral deflection
curve p-y
plaxis
allpile
Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

Kata kunci:
defleksi lateral
kurva p-y
plaxis
allpile
Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

ABSTRACT

One type of deep foundation is a pile foundation that is designed and has the ability to withstand axial, lateral, and uplift loads. This analysis aims to determine and compare deflections that occur on poles that are in granular soil by using the manual calculation of the p-y curve method with finite difference approaches and calculations with Allpile and Plaxis software. The analysis was conducted three times, namely on a 60 cm diameter pole at a depth of 10 meters embedded pile with lateral loads of 25 kN, 50 kN, and 75 kN. The data used to calculate the lateral deflection of the pole is secondary data. Lateral deflection analysis using Plaxis software with a load of 25 kN, 50 kN, and 75 kN obtained lateral deflection of the uppermost pole respectively 0.159 cm, 0.324 cm, and 0.545 cm. Lateral deflection analysis using Allpile software with a load of 25 kN, 50 kN, and 75 kN obtained lateral deflection of the uppermost pile by 0.08 cm, 0.16 cm and 0.29 cm. While the results of the lateral deflection analysis of the manual calculation of the p-y curve method with a finite different up to 25 kN, 50 kN, and 75 kN loads obtained lateral deflection of the uppermost pile respectively by 0.60 cm, 0.12 cm and 0.179 cm. So the approximating calculations are manual calculation of the p-y curve method with calculations with Allpile software. Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) value calculation of the p-y curve method with plaxis software at lateral load 25 kN, 50 kN, 75 kN obtained consecutive NSE values of -5,946, -6,439, dan -30,118 all of which have unsatisfactory performance rating. Different with curve p-y method compared with Allpile that has consecutive NSE values of 0,876, 0,876, 0,876, dan 0,605 all of which have very good performance rating.

ABSTRAK

Salah satu jenis fondasi dalam adalah fondasi tiang yang didesain dan memiliki kemampuan untuk menahan beban aksial, lateral, dan uplift. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui dan membandingkan defleksi yang terjadi pada tiang yang berada pada tanah granuler dengan menggunakan perhitungan manual metode kurva p-y dengan pendekatan beda hingga dan perhitungan dengan software Allpile dan Plaxis. Analisis dilakukan tiga kali percobaan yaitu pada tiang berdiameter 60 cm pada kedalaman tiang tertanam 10 meter dengan beban lateral sebesar 25 kN, 50 kN, dan 75 kN. Data yang dipakai untuk menghitung defleksi lateral tiang adalah data sekunder. Analisis defleksi lateral menggunakan software Plaxis dengan beban 25 kN, 50 kN, dan 75 kN didapatkan defleksi lateral tiang paling atas berturut-turut sebesar 0,159 cm, 0,324 cm, dan 0,545 cm. Analisis defleksi lateral menggunakan software Allpile dengan beban 25 kN, 50 kN, dan 75 kN didapatkan defleksi lateral tiang paling atas berturut-turut sebesar 0,08 cm, 0,16 cm, dan 0,29 cm. Sedangkan hasil analisis defleksi lateral perhitungan manual metode kurva p-y dengan pendekatan beda hingga dengan beban 25 kN, 50 kN, dan 75 kN didapatkan defleksi lateral tiang paling atas berturut-turut sebesar 0,60 cm, 0,12 cm, dan 0,179 cm. Jadi perhitungan yang saling mendekati adalah perhitungan manual metode kurva p-y dengan perhitungan dengan software Allpile. Perhitungan nilai Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) metode kurva p-y dengan software Plaxis pada beban lateral 25 kN, 50 kN, dan 75 kN didapatkan nilai NSE berturut-turut sebesar -5,946, -6,439, dan -30,118 yang ketiganya memiliki rating performa tidak memuaskan. Berbeda dengan metode kurva p-y dibanding dengan Allpile memiliki nilai NSE berturut-turut sebesar 0,876, 0,876, dan 0,605 ketiganya mempunyai rating performa yang sangat baik.



This is an open access article under the [CC-BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

*Corresponding author.

E-mail: fahrul.lafit@gmail.com

<https://doi.org/10.21831/inersia.v17i2.27092>

Received 12 September 2019; Revised 27 December 2021; Accepted 29 December 2021

Available online 31 December 2021

1. Pendahuluan

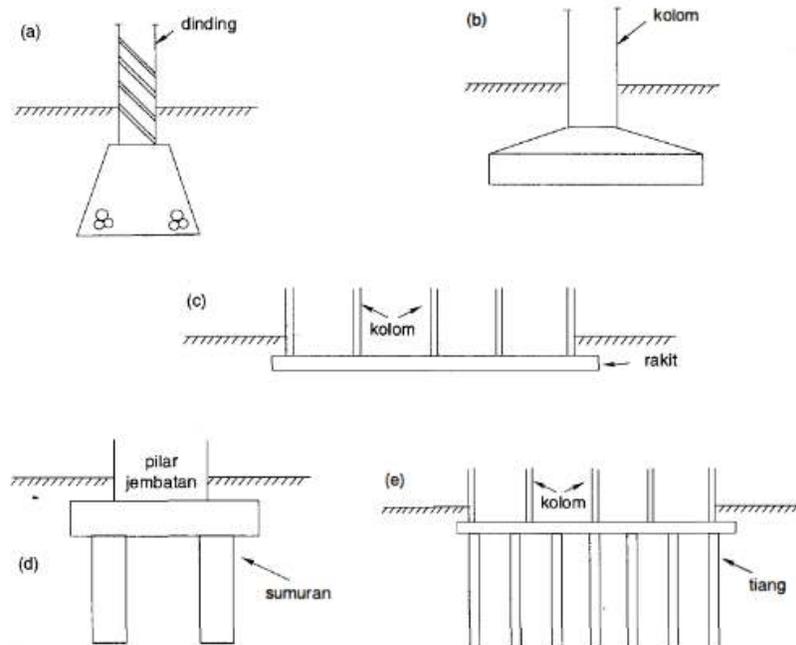
Seiring dengan berkembangnya zaman, infrastruktur merupakan bagian penting dari bagian negara. Salah satunya yaitu di negara Indonesia, dimana di Indonesia pembangunan infrastruktur terus ditingkatkan diantaranya berupa jalan, gedung, jembatan, bandara, waduk, dan infrastruktur lainnya. Seperti yang sudah tertuang dalam Peraturan Presiden Republik Indonesia nomor 3 tahun 2016 [1] yang diperbarui dengan Peraturan Presiden Republik Indonesia nomor 58 tahun 2017 tentang percepatan pelaksanaan proyek strategis nasional [2]. Semakin jelas dengan munculnya perpres tersebut bahwa infrastruktur merupakan bagian penting dari berdirinya suatu negara.

Berdiri kokohnya suatu bangunan tidak terlepas dari struktur bawah bangunan yang kokoh juga, biasanya disebut dengan fondasi. fondasi yaitu bangunan struktur yang berada pada susunan paling bawah suatu bangunan yang memiliki fungsi menerima beban dari pile cap atau beban yang berada di atasnya yang kemudian akan

diteruskan ke tanah yang berada di bawah fondasi tersebut.

Salah faktor yang menentukan jenis fondasi adalah jenis tanah dimana bangunan akan berdiri. Pada analisis ini pondasi berdiri di atas tanah pasir. Tanah pasir merupakan tanah yang sangat lepas dan tidak padat. Tanah pasir memiliki gradasi butiran yang seragam, kekuatan geser yang rendah karena tidak memiliki daya ikat antar butiran satu sama lainnya dan sulit untuk dipadatkannya sehingga tanah seperti ini butuh perbaikan jika akan dibangun konstruksi di atasnya [3].

Menurut Hardiatmo [4] fondasi adalah bagian terendah dari bangunan yang meneruskan beban bangunan kedalam tanah atau batuan yang berada di bawahnya. Terdapat dua klasifikasi fondasi, yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam (Gambar 1).



Gambar 3.1 Macam-macam tipe fondasi.
 (a) Fondasi memanjang.
 (b) Fondasi telapak.
 (c) Fondasi rakit.
 (d) Fondasi sumuran.
 (e) Fondasi tiang.

Gambar 1. Jenis-jenis fondasi [4]

Fondasi dangkal didefinisikan sebagai fondasi yang mendukung bebannya secara langsung, seperti: fondasi telapak, yaitu fondasi yang berdiri sendiri dalam mendukung kolom, fondasi memanjang, yaitu fondasi yang digunakan untuk mendukung dinding memanjang atau digunakan untuk mendukung sederet kolom yang berjarak dekat, sehingga bila dipakai fondasi telapak sisi-sisinya akan berimpit satu sama lain dan fondasi rakit, yaitu fondasi yang digunakan untuk mendukung bangunan yang terletak pada tanah lunak atau digunakan bila susunan kolom-kolom jaraknya sedemikian dekat di semua arahnya

Fondasi dalam didefinisikan sebagai fondasi yang meneruskan beban bangunan ke tanah keras atau batu yang terletak relatif jauh dari permukaan, contohnya fondasi sumuran, merupakan bentuk peralihan antara fondasi dangkal dan fondasi tiang digunakan bila tanah dasar yang kuat terletak pada kedalaman yang relatif dalam.

Salah satu fondasi dalam yang sering digunakan adalah fondasi tiang pancang karena pelaksanaan cukup mudah dan biaya relatif lebih murah dibandingkan dengan bore pile. Dalam kerangka yang diusulkan oleh [5], fondasi tiang pancang digunakan untuk fondasi suatu bangunan apabila tanah dasar di bawah bangunan tersebut tidak mempunyai daya dukung yang cukup untuk berat bangunan dan bebannya atau apabila tanah keras yang mana yang mempunyai daya dukung yang cukup untuk memikul berat bangunan dan bebannya letaknya sangat dalam. fondasi tiang pancang berfungsi untuk memindahkan atau mentransfer beban dari konstruksi di atasnya ke lapisan tanah yang dalam. Menurutnya apabila fondasi tiang pancang diperlukan untuk menahan gaya-gaya horizontal maka tiang pancang akan dipancang miring, sudut kemiringannya tergantung daripada alat pancang serta disesuaikan dengan perencanaannya.

Fondasi tiang pada tanah granuler sudut geser tanah adalah nol, oleh sebab kondisi daya rekat untuk fondasi tiang kurang kuat sehingga ketika di sekitar fondasi terdapat aliran air akan menimbulkan erosi yang akan menggeser kedudukan fondasi tiang.

Fondasi tiang pancang didesain untuk menahan beban axial, lateral, dan *uplift*. Salah satu faktor penting dalam perencanaan struktur-struktur bangunan tinggi adalah

beban lateral. Beban lateral yang bekerja pada tiang pancang mengakibatkan terjadinya defleksi atau pergeseran.

Sebagaimana telah dilaporkan oleh [6], *lateral load* merupakan gaya yang terjadi pada tiang yang berasal dari berbagai sumber dari sumber tersebut dapat dikategorikan sebagai beban aktif maupun pasif. Beban aktif dianggap bergantung pada waktu atau pembebanan hidup. Beban hidup dapat berasal dari angin, gelombang, arus, es, lalu lintas, tumbukan kapal, dan kekuatan tambahan. Sedangkan beban pasif pada prinsipnya tidak bergantung waktu atau pembebanan pasif. Beban pasif berasal dari tekanan tanah atau tanah yang berpotensi bergerak, tetapi mungkin juga berasal dari pemuatan mati seperti dari jembatan lengkung.

Penentuan kapasitas daya dukung lateral selain memperhitungkan beban lateral, karakteristik tanah dan defleksi lateral yang terjadi juga perlu diperhitungkan. Defleksi maksimum arah lateral yang terjadi tidak boleh melebihi defleksi lateral yang diizinkan. Pada umumnya defleksi lateral yang diizinkan pada fondasi tiang tidak lebih dari 2,50 cm [7].

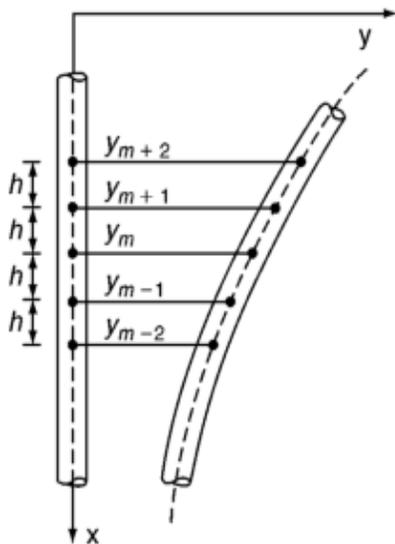
Besarnya defleksi lateral yang terjadi pada tiang dapat diketahui dengan melakukan pengujian lapangan atau yang sering disebut dengan lateral test. Selain dengan menggunakan lateral test untuk mengetahui defleksi lateral dapat digunakan juga dengan perhitungan manual Metode Broms 1964 dan metode Kurva p-y, dengan pendekatan Beda Hingga. Selain dengan perhitungan *manual* defleksi lateral juga dapat di hitung dengan software *Allpile* dan *Plaxis*.

Plaxis merupakan salah satu software teknik sipil yang digunakan secara khusus untuk menganalisis deformasi dan stabilitas dalam bidang geoteknik, seperti defleksi lateral dan daya dukung tanah. Kondisi sesungguhnya dapat dimodelkan dalam regangan bidang maupun secara axisymetris. Program ini menerapkan metode antarmuka grafis yang mudah digunakan sehingga pengguna dapat dengan cepat membuat model geometri dan jaring elemen berdasarkan penampang melintang dari kondisi yang ingin dianalisis. *Output* dari program ini dapat berupa angka maupun grafik.

Allpile merupakan salah satu software teknik sipil yang digunakan secara khusus untuk menganalisis perilaku

pondasi dalam bidang geoteknik, seperti defleksi beban lateral dan daya dukung tanah. Penggunaan *software* Allpile dapat dikategorikan mudah karena pilihan sudah tersedia dengan jelas dan kita hanya menginput data yang dibutuhkan. Output dari program ini dapat berupa angka maupun grafik.

Metode kurva p-y dengan pendekatan beda hingga merupakan sebuah metode manual untuk mencari defleksi tiang lateral (**Gambar 2**). Metode ini menggunakan perhitungan berbasis matriks dengan 4 macam persamaan.



Gambar 2. Defleksi tiang (Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading:33)

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) merupakan metode yang digunakan untuk memberikan peringkat kinerja dan pedoman standar untuk kriteria efisiensi. Pedoman standar pada rentang nilai dari kriteria efisiensi yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja sebuah metode.

2. Metode

Perhitungan defleksi lateral tiang tunggal menggunakan 3 metode yaitu perhitungan manual metode kurva p-y dengan pendekatan beda hingga dan perhitungan *software* Plaxis dan Allpile. Tujuan menggunakan 3 metode dalam perhitungan ini yaitu membandingkan defleksi tiang dengan perhitungan antar metode.

Perhitungan manual metode kurva p-y dengan pendekatan beda hingga mengacu pada buku yang berjudul "Single Piles and Pile Groups Under Lateral

Loading" yang telah diusulkan oleh [6]. Berikut adalah langkah-langkahnya;

Persamaan tiang perkedalaman;

$$E_p \cdot I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} - p + W = 0 \tag{1}$$

Keterangan;

- E_p = Modulus elastisitas tiang (kN/m²)
- I_p = Momen Inersia (m⁴)
- P_x = Beban aksial (kN)
- p = Reaksi tanah perkedalaman
- W = Beban terdistribusi sepanjang tiang

Modulus elastisitas (kN/m²);

$$E_p = 4700 \cdot \sqrt{f_c'} \tag{2}$$

f_c' = Kuat tekan beton (kN/m²)

Momen Inersia (m⁴);

$$I_p = \frac{1}{64} \times 3,14 \times d^4 \tag{3}$$

d = diameter tiang (m)

Tiang yang dipakai merupakan tiang dengan lubang di tengah dan tebal selimut sebesar 0,1 meter maka momen inersia yang dipakai adalah sebagai berikut;

$$I_p = \left(\frac{1}{64} \cdot 3,14 \cdot d^4\right) - \left(\frac{1}{64} \cdot 3,14 \cdot [d - 2 \times tb]^4\right) \tag{4}$$

Kekakuan *bending* (kN.m²)

$$R_m = E_p \cdot I_p \tag{5}$$

Dari persamaan tiang per kedalaman tersebut dapat diturunkan menjadi persamaan 6 berikut;

$$y_{m-2} \cdot R_{m-1} + y_{m-1} \cdot (-2R_{m-1} - 2R_m + P_x h^2) + y_m (R_{m-1} + 4R_m + R_{m-1} - 2P_x h^2 + E_{pym} \cdot h^4) + y_{m+1} \cdot (-2R_m - 2R_{m-1} + P_x h^2) + y_{m+2} \cdot R_{m-1} + W_m \cdot h^4 = 0 \tag{6}$$

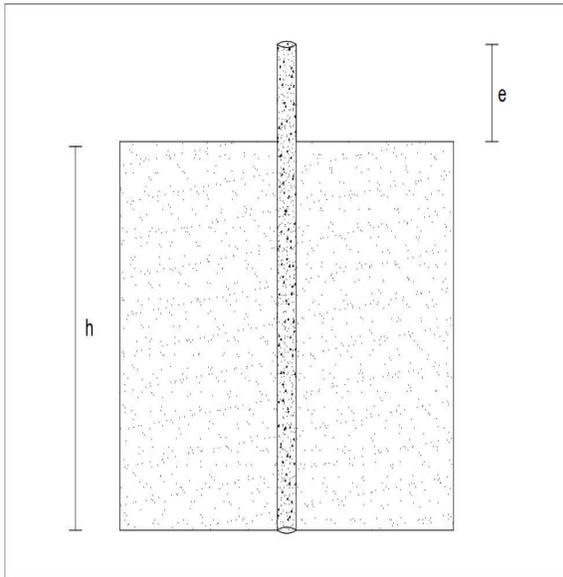
keterangan;

- y_m = y_{m-n} = y_{m+n} = Titik kedalaman tiang yang akan dianalisis
- R_m = R_{m-1} = R_i = Kekakuan bending tiang (kN.m²)
- P_x = Beban horisontal (kN)
- h = Panjang antar titik seperti pada **Gambar 3**
- E_{pym} = Modulus Elastisitas Tanah (kN/m²)

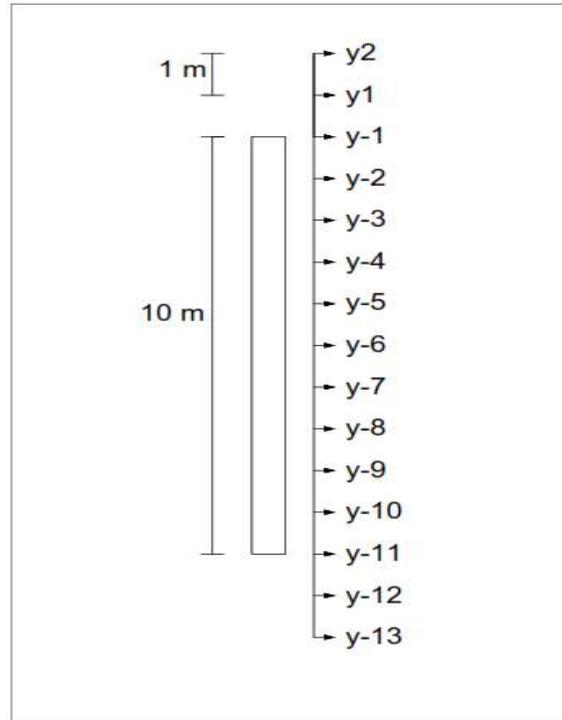
Panjang antar titik (m) (**Gambar 3**)

$$h = L/(L+e)$$

L = Panjang tiang masuk (m)
 e = Panjang Tiang keluar (m)



Gambar 3. Panjang antar titik



Gambar 4. Titik persamaan yang akan dianalisis

Kekakuan Bending (kNm²)

$$R_m = E_p \cdot I_p$$

E_p = Modulus elastisitas tiang (kN/m²)

I_p = Momen Inersia (m⁴)

Modulus Elastisitas Tanah (kN/m²)

$$E_{pym} = 500 \cdot (N\text{-spt} + 15)$$

N-spt = Nilai spt

Setelah mendapatkan persamaan turunan selanjutnya yaitu menganalisis titik per titik pada Gambar 4 didapatkan persamaan di bawah ini:

Persamaan 7

$$(y_2 \cdot R_1) + y_1(-2R_1 - 2R_1 + Px \cdot h^2) + y_{-1}(R_1 + 4R_1 + R_1 - 2Px \cdot h^2 + Epy \cdot h^4) + y_{-2}(-2R_1 - 2R_2 + Px \cdot h^2) + y_{-3}R_1 + W_{-1} \cdot h^4 = 0$$

Persamaan 8

$$(y_1 \cdot R_{-1}) + y_{-1}(-2R_{-1} - 2R_{-2} + Px \cdot h^2) + y_{-2}(R_{-1} + 4R_{-2} + R_{-1} - 2Px \cdot h^2 + Epy \cdot h^4) + y_{-3}(-2R_{-2} - 2R_{-3} + Px \cdot h^2) + y_{-4}R_{-1} + W_{-2} \cdot h^4 = 0$$

Persamaan 9

$$(y_{-1} \cdot R_2) + y_{-2}(-2R_2 - 2R_3 + Px \cdot h^2) + y_{-3}(R_2 + 4R_3 + R_2 - 2Px \cdot h^2 + Epy \cdot h^4) + y_{-4}(-2R_3 - 2R_4 + Px \cdot h^2) + y_{-5}R_2 + W_{-3} \cdot h^4 = 0$$

Persamaan 10

$$(y_{-2} \cdot R_3) + y_{-3}(-2R_3 - 2R_4 + Px \cdot h^2) + y_{-4}(R_3 + 4R_4 + R_3 - 2Px \cdot h^2 + Epy \cdot h^4) + y_{-5}(-2R_4 - 2R_5 + Px \cdot h^2) + y_{-6}R_3 + W_{-4} \cdot h^4 = 0$$

Persamaan 11

$$(y_{-3} \cdot R_4) + y_{-4}(-2R_4 - 2R_5 + Px \cdot h^2) + y_{-5}(R_4 + 4R_5 + R_4 - 2Px \cdot h^2 + Epy \cdot h^4) + y_{-6}(-2R_5 - 2R_6 + Px \cdot h^2) + y_{-7}R_4 + W_{-5} \cdot h^4 = 0$$

Persamaan 12

$$(y_{-4} \cdot R_5) + y_{-5}(-2R_5 - 2R_6 + Px \cdot h^2) + y_{-6}(R_5 + 4R_6 + R_5 - 2Px \cdot h^2 + Epy \cdot h^4) + y_{-7}(-2R_6 - 2R_7 + Px \cdot h^2) + y_{-8}R_5 + W_{-6} \cdot h^4 = 0$$

Persamaan 13

$$(y_{-5} \cdot R_6) + y_{-6}(-2R_6 - 2R_7 + Px \cdot h^2) + y_{-7}(R_6 + 4R_7 + R_6 - 2Px \cdot h^2 + Epy \cdot h^4) + y_{-8}(-2R_7 - 2R_8 + Px \cdot h^2) + y_{-9}R_6 + W_{-7} \cdot h^4 = 0$$

Persamaan 14

$$(y_{-6} \cdot R_7) + y_{-7}(-2R_7 - 2R_8 + Px \cdot h^2) + y_{-8}(R_7 + 4R_8 + R_7 - 2Px \cdot h^2 + Epy \cdot h^4) + y_{-9}(-2R_8 - 2R_9 + Px \cdot h^2) + y_{-10}R_7 + W_{-8} \cdot h^4 = 0$$

Persamaan 15

$$(y_{-7} \cdot R_8) + y_{-8}(-2R_8 - 2R_9 + Px \cdot h^2) + y_{-9}(R_8 + 4R_9 + R_8 - 2Px \cdot h^2 + Epy \cdot h^4)$$

$$+ y_{-10} (-2R_{-9} - 2R_{-10} + P_x \cdot h^2) + y_{-11} \cdot R_{-8} + W_{-9} \cdot h^4 = 0$$

Persamaan 16

$$(y_{-8} \cdot R_{-9}) + y_{-9} (-2R_{-9} - 2R_{-10} + P_x \cdot h^2) \\ + y_{-10} (R_{-9} + 4R_{-10} + R_{-9} - 2P_x \cdot h^2 + Epy \cdot h^4) \\ + y_{-11} (-2R_{-10} - 2R_{-11} + P_x \cdot h^2) + y_{-12} \cdot R_{-9} + W_{-10} \cdot h^4 = 0$$

Persamaan 17

$$(y_{-9} \cdot R_{-10}) + y_{-10} (-2R_{-10} - 2R_{-11} + P_x \cdot h^2) \\ + y_{-11} (R_{-10} + 4R_{-11} + R_{-10} - 2P_x \cdot h^2 + Epy \cdot h^4) \\ + y_{-12} (-2R_{-11} - 2R_{-12} + P_x \cdot h^2) + y_{-13} \cdot R_{-10} + W_{-11} \cdot h^4 = 0$$

Persamaan 7 dimasukkan pada matriks pada baris pertama dan kolom pertama, selanjutnya kolom 2 diletakkan mulai dari baris ke dua dan kolom kedua. Begitu seterusnya sampai pada Persamaan 17.

Persamaan ujung bawah tiang pada kondisi batas, merupakan persamaan yang berada ujung paling bawah tiang, misal kedalaman tiang berada 10 m maka letak persamaan tersebut berada pada kedalaman 10 m. persamaan ujung bawah tiang dianalisis pada kedalaman 10 m lebih tepatnya yaitu y_{11} seperti pada gambar 4. persamaan ujung bawah tiang dimasukkan pada matriks setelah persamaan tiang per kedalaman yaitu berada pada baris ke 18 dan 19 secara berturut-turut berikut adalah persamaannya;

$$y_{-1} - 2y_0 + y_1 = 0$$

$$\frac{R_0}{2h^3} \cdot (y_{-2} - 2y_{-1} + 2y_1 - y_2) + \frac{P_x}{2h} \cdot (y_{-1} - y_1) = V_0$$

Sehingga menghasilkan persamaan 18 dan 19 di bawah ini;

$$1 - 2 + 1 = 0 \quad (18)$$

$$1 - 2 + 0 + 2 - 1 \quad (19)$$

Nilai R_0 dan P_x adalah 0 maka persamaan menjadi seperti persamaan 19. Jika y_0 adalah y_{11} maka y_{-1} adalah y_{10} dan y_{-2} adalah y_9 . Jadi persamaan tersebut terletak pada baris ke 12 dan 13, dan pada kolom 10 dan 9 secara berturut-turut. Nilai V_0 adalah 0 maka diabaikan.

Persamaan beban lateral (P_t) pada kondisi batas, merupakan persamaan beban lateral yang terjadi pada

tiang, pada persamaan inilah yang membedakan akibat perbedaan beban lateral. Persamaan ini ditinjau dari kedalaman tiang 0 m atau pada Gambar 4 berada pada titik y_{-1} yang mana berarti letak persamaan tersebut dimulai pada kolom y_{+2} atau kolom pertama. Persamaan P_t diletakkan di matriks setelah persamaan ujung bawah tiang yaitu pada baris ke 14. Berikut adalah persamaannya;

$$\frac{R_t}{2h^3} \cdot (y_{t-2} - 2y_{t-1} + 2y_{t+1} - y_{t+2}) + \frac{P_x}{2h} \cdot (y_{t-1} - y_{t+1}) = P_t$$

Sehingga mendapatkan persamaan berikut:

$$\frac{R_t}{2h^3} \cdot (y_2 - 2y_1 + 2y_{-1} - y_{-2}) = P_t \quad (20)$$

Persamaan momen (M_t) pada kondisi batas, merupakan persamaan momen yang terjadi pada ujung tiang. Persamaan momen diletakkan setelah persamaan gaya lateral P_t yaitu berada pada persamaan akhir di baris 15. Titik tinjau persamaan ini berada pada kedalaman 0 m meter atau titik y_{-1} pada gambar 4. Jika titik tinjau berada pada y_{-1} maka y_{t-1} adalah y_1 jadi letak persamaan momen ini berada pada baris ke 15 dan dimulai pada kolom 2 atau y_1 . Berikut adalah persamaannya;

$$\frac{R_t}{2h^3} \cdot (y_{t-1} - 2y_t + 2y_{t+1}) = M_t$$

Sehingga menghasilkan Persamaan 21 berikut:

$$\frac{R_t}{2h^3} \cdot (y_1 - 2y_{-1} + 2y_{-2}) = M_t \quad (21)$$

Apabila 4 kategori persamaan yang jika di jumlahkan mempunyai 15 persamaan yaitu;

1. Persamaan tiang per kedalaman mempunyai 11 persamaan
2. Persamaan ujung bawah tiang mempunyai 2 persamaan
3. Persamaan beban lateral P_t mempunyai 1 persamaan
4. Persamaan momen M_t mempunyai 1 persamaan sebagaimana disebutkan sebelumnya.

Langkah selanjutnya yaitu membangun matriks dengan 15 Persamaan tersebut seperti penjelasan pada Gambar 5 di bawah ini:

μ_h = Relative dense untuk tanah pasir keras adalah 34 MN/m³

L = Kedalaman yang ditinjau

d = diameter tiang

Menurut Reese dan Impe [6] nilai e_{50} tanah pasir adalah 0,8

Input semua data yang dibutuhkan pada Allpile kemudian lakukan running, setelah selesai maka output data akan diketahui yaitu defleksi tiang.

Perhitungan defleksi lateral tiang tunggal menggunakan data sekunder berupa data sondir dan data tanah tes laboratorium. data-data tersebut digunakan untuk menghitung defleksi. Setelah nilai defleksi diketahui semua selanjutnya yaitu mencari koefisien rating peringkat kinerja kriteria efisiensi *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) masing-masing metode yaitu metode kurva p-y dengan Plaxis dan metode kurva p-y dengan Allpile. Berikut persamaan untuk mencari efisiensi kinerja NSE:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{25}$$

keterangan:

E = Nilai NSE

O_i = Nilai defleksi

P_i = Nilai defleksi perbandingan

\bar{O} = Rata-rata defleksi

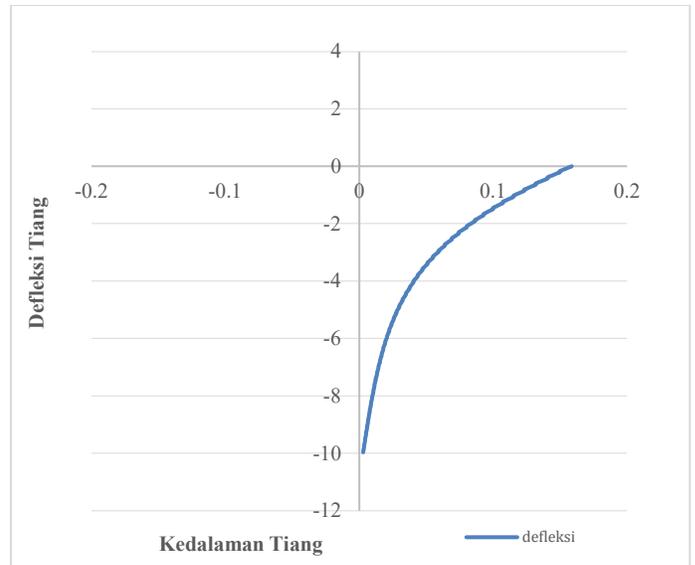
Berikut merupakan tabel rating peringkat kinerja kriteria efisiensi *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE)

Tabel 1. Rating peringkat kinerja kriteria efisiensi [9]

Rating Performa	NSE
Sangat Baik	$0,75 < NSE > 1$
Baik	$0,65 < NSE > 0,75$
Memuaskan	$0,5 < NSE > 0,65$
Tidak Memuaskan	$NSE \leq 0,5$

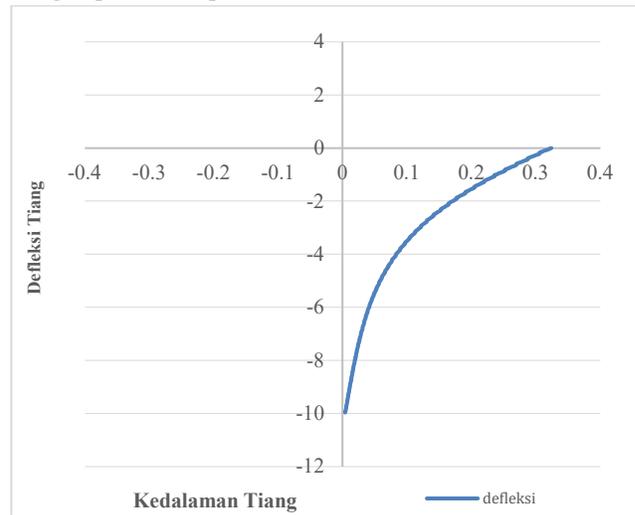
3. Hasil Dan Pembahasan

Perhitungan dengan menggunakan software Plaxis menghasilkan defleksi lateral pada tiang dengan beban lateral 25 kN adalah sebesar 0.159 cm pada ujung atas tiang dapat dilihat pada Gambar 6.



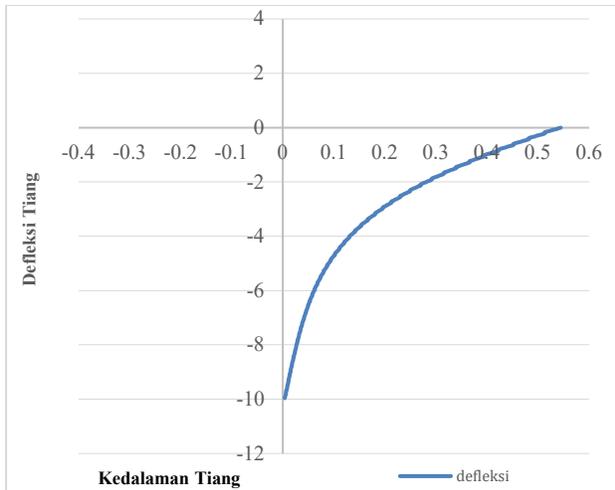
Gambar 6. Grafik defleksi tiang perhitungan software Plaxis dengan beban lateral 25 kN

Perhitungan dengan menggunakan software Plaxis menghasilkan defleksi lateral pada tiang dengan beban lateral 50 kN adalah sebesar 0.324 cm pada ujung atas tiang dapat dilihat pada Gambar 7.



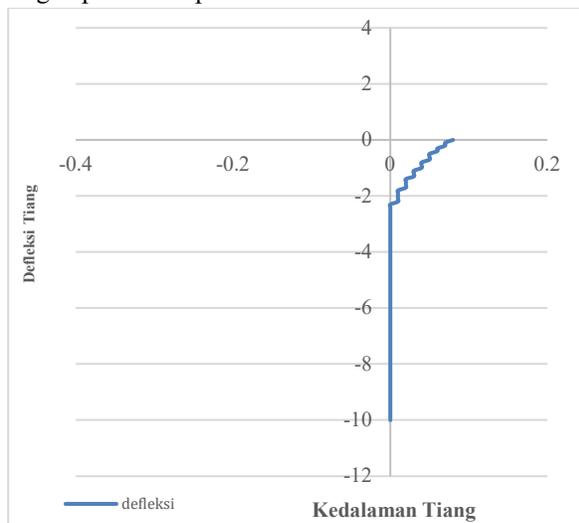
Gambar 7. Grafik defleksi tiang perhitungan software Plaxis dengan beban lateral 50 kN

Perhitungan dengan menggunakan software Plaxis menghasilkan defleksi lateral pada tiang dengan beban lateral 75 kN adalah sebesar 0.545 cm pada ujung atas tiang dapat dilihat pada Gambar 8.



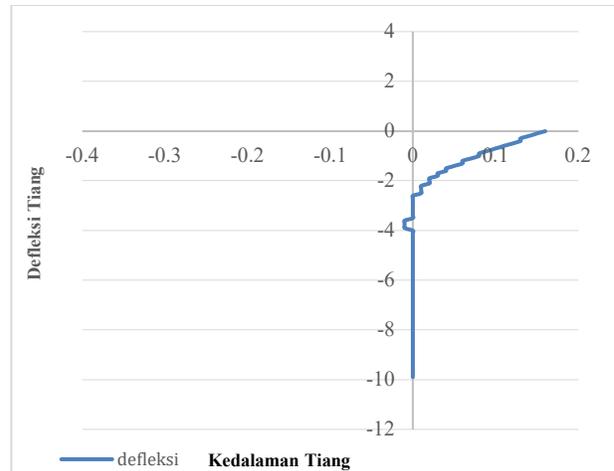
Gambar 8. Grafik defleksi tiang perhitungan software Plaxis dengan beban lateral 75 kN

Perhitungan dengan menggunakan software Allpile menghasilkan defleksi lateral pada tiang dengan beban lateral 25 kN adalah sebesar 0.0764 cm pada ujung atas tiang dapat dilihat pada Gambar 9.



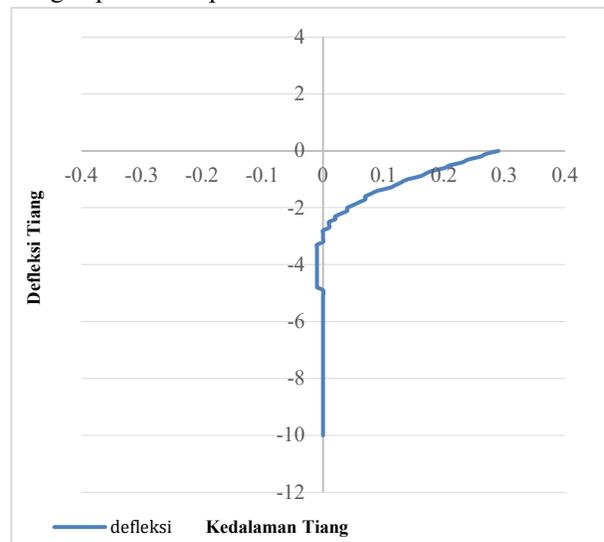
Gambar 9. Grafik defleksi tiang perhitungan software Allpile dengan beban lateral 25 kN

Perhitungan dengan menggunakan software Allpile menghasilkan defleksi lateral pada tiang dengan beban lateral 50 kN adalah sebesar 0.161 cm pada ujung atas tiang dapat dilihat pada Gambar 10.



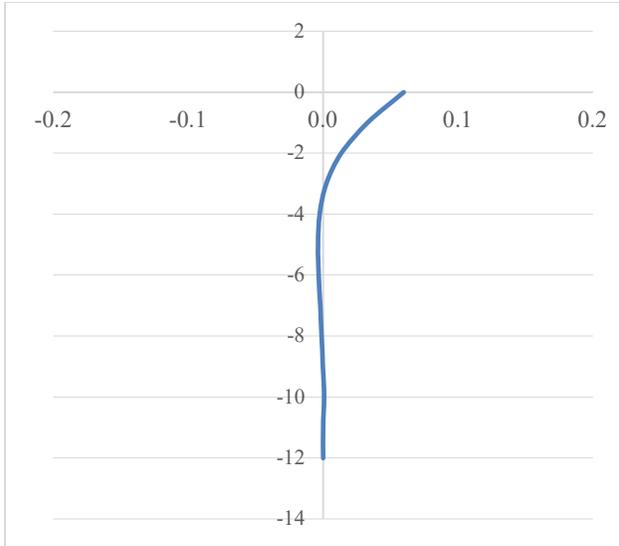
Gambar 10. Grafik defleksi tiang perhitungan software Allpile dengan beban lateral 50 kN

Perhitungan dengan menggunakan software Allpile menghasilkan defleksi lateral pada tiang dengan beban lateral 75 kN adalah sebesar 0.289 cm pada ujung atas tiang dapat dilihat pada Gambar 11.



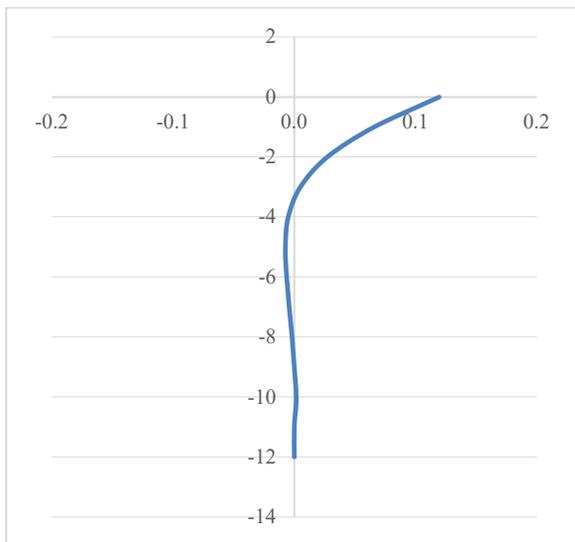
Gambar 11. Grafik defleksi tiang perhitungan software Allpile dengan beban lateral 75 kN

Hasil yang didapatkan setelah melakukan perhitungan manual metode kurva p-y dengan pendekatan beda hingga yaitu defleksi lateral tiang paling atas sebesar 0,0597 dengan beban lateral sebesar 25 kN. Dapat dilihat pada Gambar 12.



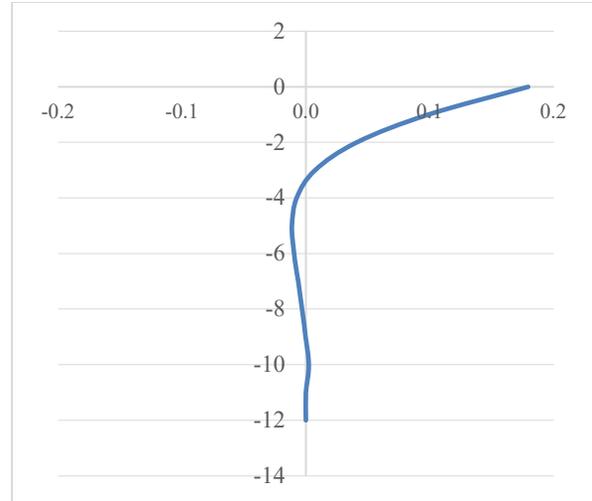
Gambar 12. Grafik defleksi tiang perhitungan metode kurva p-y dengan beban lateral 25 kN

Hasil yang didapatkan setelah melakukan perhitungan manual metode kurva p-y dengan pendekatan beda hingga yaitu defleksi lateral tiang paling atas sebesar 0,119 dengan beban lateral sebesar 50 kN. Dapat dilihat pada [Gambar 13](#).



Gambar 13. Grafik defleksi tiang perhitungan metode kurva p-y dengan beban lateral 50 kN

Hasil yang didapatkan setelah melakukan perhitungan manual metode kurva p-y dengan pendekatan beda hingga yaitu defleksi lateral tiang paling atas sebesar 0,179 dengan beban lateral sebesar 25 kN. Dapat dilihat pada [Gambar 14](#).



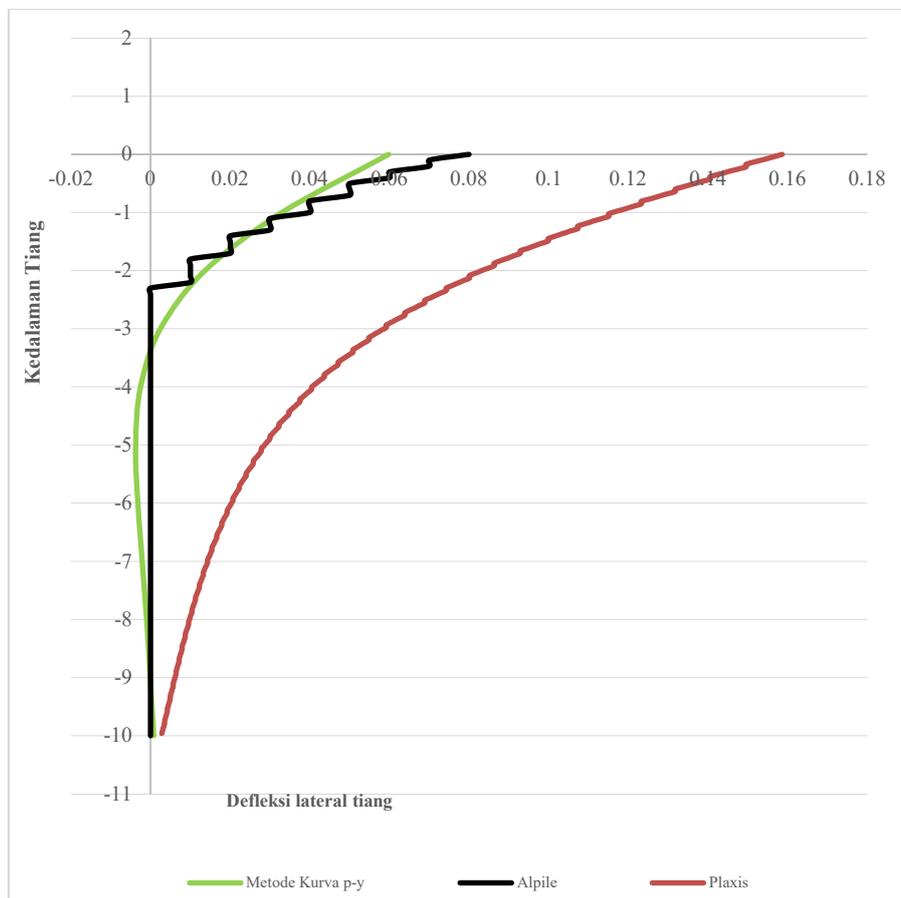
Gambar 14. Grafik defleksi tiang perhitungan metode kurva p-y dengan beban lateral 75 kN

Perhitungan defleksi lateral tiang telah dilakukan semua, baik dengan cara perhitungan manual metode kurva p-y ataupun perhitungan dilakukan dengan *software* plaxis dan Allpile. Masing-masing metode memiliki hasil yang berbeda dan memiliki selisih defleksi yang tidak terlalu signifikan yang dapat dilihat Tabel 2.

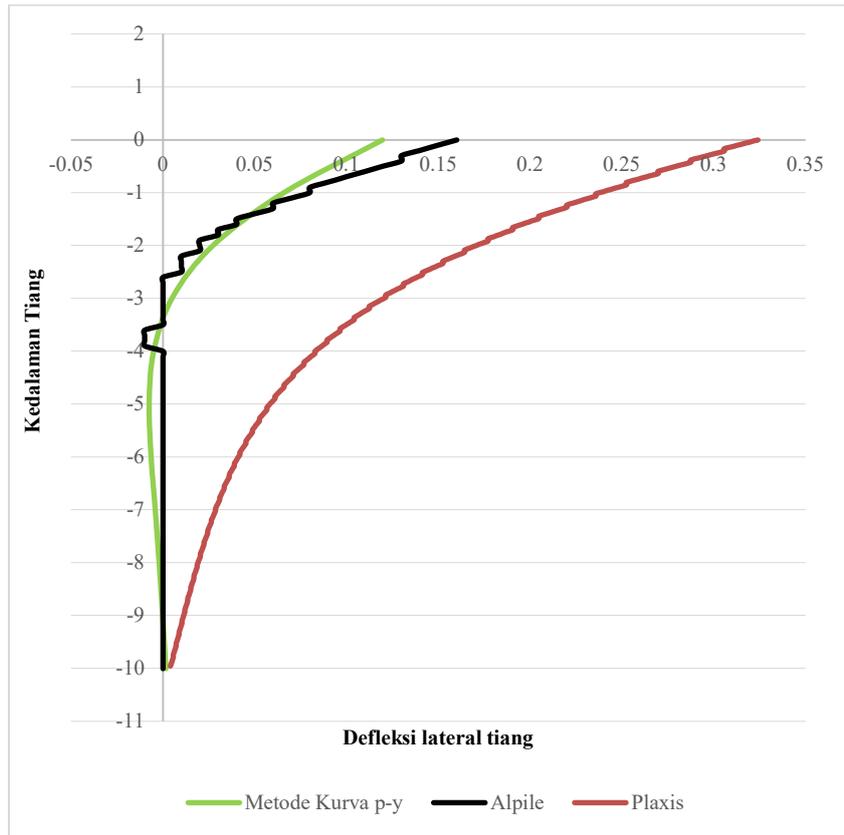
Analisis dilakukan pada kedalaman 0 sampai dengan 10 m, dengan variasi beban sebesar 25 kN, 50 kN dan 75 kN menggunakan perbandingan *software* yang berbeda, sebagai pembandingan hasil analisis.

Tabel 2. Perbedaan defleksi hasil perhitungan manual dan *software*

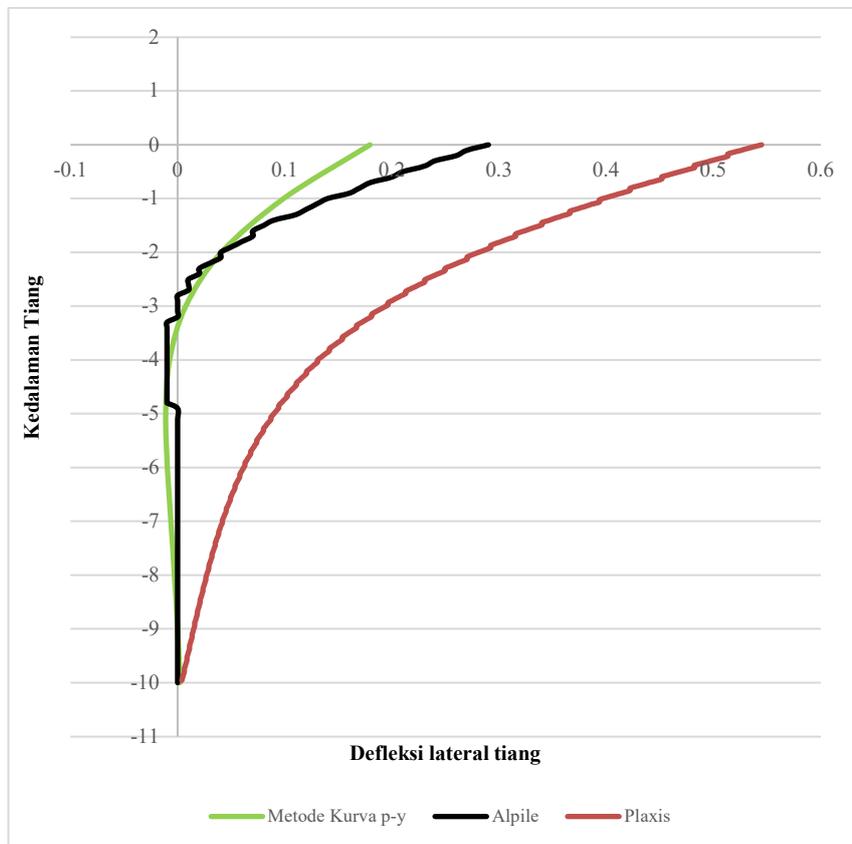
Kedalaman (m)	Defleksi lateral tiang								
	Beban 25 kN			Beban 50 kN			Beban 75 kN		
	Kurva p-y	Plaxis	Allpile	Kurva p0-y	Plaxis	Allpile	Kurva p-y	Plaxis	Allpile
0	0,06	0,159	0,08	0,12	0,324	0,16	0,179	0,545	0,29
-1	0,033	0,166	0,04	0,066	0,240	0,08	0,099	0,395	0,14
-2	0,014	0,083	0,01	0,027	0,171	0,02	0,041	0,281	0,04
-3	0,002	0,058	0	0,005	0,119	0	0,007	0,194	0
-4	-0,003	0,040	0	-0,005	0,082	-0,01	0,007	0,131	-0,01
-5	-0,004	0,028	0	-0,008	0,058	0	-0,008	0,090	0
-6	-0,003	0,020	0	-0,006	0,041	0	-0,010	0,062	0
-7	-0,002	0,014	0	-0,004	0,029	0	-0,006	0,042	0
-8	-0,001	0,010	0	-0,002	0,0019	0	-0,003	0,027	0
-9	0	0,006	0	0	0,011	0	0	0,015	0
-10	0	0,003	0	0,002	0,004	0	0,002	0,004	0



Gambar 15. Grafik perbedaan defleksi antar metode beban 25 kN



Gambar 16. Grafik perbedaan defleksi antar metode beban 50 kN



Gambar 17. Grafik perbedaan defleksi antar metode beban 75 kN

Setelah nilai defleksi diketahui semua selanjutnya yaitu mencari koefisien rating peringkat kinerja kriteria efisiensi *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) masing-masing metode didapatkan sebagai berikut:

Tabel 3. Koefisien Efisiensi kurva p-y dengan Plaxis

Beban	Nilai NSE	Rating
25 kN	-5,9461	Tidak memuaskan
50 kN	-6,4936	Tidak memuaskan
75 kN	-30,118	Tidak memuaskan

Tabel 4. Koefisien Efisiensi kurva p-y dengan Allpile

Beban	Nilai NSE	Rating
25 kN	0,8756	Sangat Baik
50 kN	0,8754	Sangat Baik
75 kN	0,6049	memuaskan

Perhitungan nilai NSE di atas menunjukkan bahwa perhitungan manual kurva p-y dengan pendekatan beda hingga dibandingkan dengan metode software Plaxis tidak direkomendasikan karena memiliki nilai NSE yang cukup jauh dari standar dan rating performanya tidak memuaskan. Namun berbeda dengan perhitungan defleksi manual kurva p-y dengan pendekatan beda hingga dibandingkan dengan perhitungan software Allpile, untuk beban lateral kurang dari 75 kN perbandingan keduanya memiliki nilai NSE di atas 0,75 yang berarti rating performanya sangat baik dan direkomendasikan. Tetapi pada beban lateral 75 kN atau di atasnya kedua metode memiliki Nilai NSE yang rendah atau sebesar 0,6 kisaran angka tersebut memiliki rating performa hanya memuaskan. Jadi tidak disarankan membandingkan untuk beban lateral sebesar 75 kN atau lebih.

4. Simpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dapat disimpulkan: (1) Perhitungan defleksi lateral menggunakan software Plaxis dengan beban 25 kN, 50 kN, dan 75 kN didapatkan defleksi lateral tiang paling atas berturut-turut sebesar 0,159 cm, 0,324 cm, dan 0,545 cm. Perhitungan defleksi lateral menggunakan software Allpile dengan beban 25 kN, 50 kN, dan 75 kN didapatkan defleksi lateral tiang paling atas berturut-turut sebesar 0,08 cm, 0,16 cm, dan 0,29 cm; (2) Perhitungan defleksi lateral tiang secara manual metode kurva p-y dengan pendekatan beda hingga dengan beban 25 kN, 50 kN, dan 75 kN didapatkan defleksi lateral tiang paling atas berturut-turut sebesar 0,60 cm, 0,12 cm, dan 0,179 cm; (3) Perhitungan defleksi lateral tiang yang saling mendekati adalah metode kurva p-y dan perhitungan dengan software Allpile; (4)

Perhitungan nilai NSE metode kurva p-y dengan software Plaxis pada beban lateral 25 kN, 50 kN, dan 75 kN didapatkan nilai NSE berturut-turut sebesar -5,946, -6,493, dan -30,118 yang ketiganya memiliki rating performa tidak memuaskan. Berbeda dengan metode kurva p-y dibanding dengan Allpile memiliki nilai NSE berturut-turut sebesar 0,876, 0,876, dan 0,6 yang memiliki rating performa sangat baik.

Daftar Rujukan

- [1] Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2016 Nomor 4, *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2016. Tentang Percepatan Pelaksanaan Proyek Strategis Nasional*. 12 Januari 2016. 2016.
- [2] Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2017 Nomor 119, *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 58 Tahun 2017. Perubahan Atas Peraturan Presiden nomor 3 Tahun 2016 Tentang Percepatan Pelaksanaan Proyek Strategis Nasional*. 2017.
- [3] A. Hakam, R. Yuliet, and R. Donal, "Studi pengaruh penambahan tanah lempung pada tanah pasir pantai terhadap kekuatan geser tanah," *Jurnal Rekayasa Sipil*, vol. 6, no. 1, p. 11, 2010.
- [4] H. C. Hardiyatmo, *Teknik Fondasi 1*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 1996.
- [5] S. HS, *Pondasi Tiang Pancang*, 1st ed. Surabaya: Sinar Wijaya, 1988.
- [6] L. C. Reese and W. V. Impe, *Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading*, 2nd ed. Leiden: CRC Press/Balkema, 2010.
- [7] F. M. Elfaaz and I. N. Hamdhan, "Analisis Daya Dukung Lateral Fondasi Tiang Tunggal Menggunakan Metode Elemen Hingga," *J. Online Inst. Teknol. Nas.*, vol. 2, no. 3, pp. 83–94, 2016.