

# INTERAKSI SIMULTAN BEBAN AXIAL-LATERAL PADA PONDASI TIANG TUNGGAL

Sumiyati Gunawan<sup>1\*</sup>, Vienti Hadsari<sup>1</sup>, Oktoditya Ekaputra<sup>1</sup> dan Christin Sri Hastuti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44, Daerah Istimewa Yogyakarta

e-mail: [sumiyati.gunawan@uajy.ac.id](mailto:sumiyati.gunawan@uajy.ac.id)\*

e-mail: [vienti.hadsari@uajy.ac.id](mailto:vienti.hadsari@uajy.ac.id)

e-mail: [oktoditya.putra@uajy.ac.id](mailto:oktoditya.putra@uajy.ac.id)

e-mail: [christin.hastuti@uajy.ac.id](mailto:christin.hastuti@uajy.ac.id)

## ABSTRAK

Pondasi tiang adalah salah satu bentuk struktur bawah dalam konstruksi sipil. Aplikasi di lapangan, pondasi tiang mendukung beban axial dari berat struktur dan lateral dari angin, gempa bumi, atau tekanan tanah lateral secara bersamaan. Perilaku pondasi tiang di bawah beban axial dan lateral secara terpisah banyak dipelajari, interaksi antara kedua jenis beban ini masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa bagaimana beban axial mempengaruhi daya dukung lateral pondasi tiang tunggal, dan sebaliknya. Penelitian ini akan menganalisa secara eksperimental laboratorium dan dibandingkan dengan teori *Reese Matlock* 1956, penurunan vertikal dan perpindahan horisontal pada pondasi tiang tunggal, akibat pembebanan axial dan lateral yang bekerja simultan. Uji eksperimental model skala laboratorium, yaitu berupa kotak uji dengan ukuran (90x90x100) cm<sup>3</sup> yang diisi dengan *sample* tanah *silty sand* sebagai gambaran kondisi di lapangan, sedangkan pondasi tiang tunggal menggunakan baja dengan ukuran panjang 60,0cm dan 50,0cm serta diameter 2,0cm dan 1,5cm dengan variasi beban axial dan beban lateral serta kombinasi beban simultan. Hasil penelitian mencatat bahwa pembebanan lateral tanpa beban axial, tidak menyebabkan penurunan vertikal, dan sebaliknya. Kombinasi beban simultan menambah daya dukung lateral dan mengurangi daya dukung axial.

Kata kunci: beban-axial-lateral, perpindahan-vertikal-horisontal, daya-dukung-pondasi-tiang

## 1. PENDAHULUAN

Pondasi adalah struktur bangunan paling dasar yang meneruskan beban struktur atas ke tanah dasar untuk dukungannya. Pondasi tiang menopang beban bangunan ke lapisan tanah dalam yang cukup kuat untuk mendukung beban. Beban pondasi tiang tidak hanya beban aksial (vertikal) saja, tetapi pondasi tiang juga menerima beban lateral (horisontal) yang dapat berasal dari angin, gempa, atau beban tidak simetris dari struktur atas. Interaksi antara beban aksial dan lateral ini secara signifikan mempengaruhi daya dukung, deformasi, dan stabilitas tiang.

Beban axial dan lateral, walaupun seringkali bekerja bersamaan pada pondasi tiang, namun umumnya dianalisa secara terpisah - atau tidak bersamaan - dengan terlebih dahulu menganalisis beban aksial untuk menentukan kapasitas dukung axial dan penurunannya, kemudian menganalisis beban lateral untuk menentukan kapasitas dukung lateral dan defleksinya. Demikian juga pada percobaan pembebanan di Indonesia, umumnya tidak dilaksanakan secara bersamaan, tetapi dilaksanakan secara *independent*, meskipun telah ada peraturan dalam (ASTM D3966 2013), tentang *simultant loading test*, yang menjelaskan tentang test pembebanan di lapangan dengan kombinasi beban simultan.

Interaksi simultan antara beban aksial dan lateral pada pondasi tiang tunggal merupakan fenomena kompleks yang mempengaruhi perilaku tiang secara keseluruhan. Beban aksial akan meningkatkan daya dukung lateral pondasi tiang, sedangkan beban lateral cenderung menambah penurunan daya dukung vertikal.

Penelitian ini menyajikan hasil eksperimen di laboratorium yang bertujuan menganalisis efek pembebanan axial dan lateral yang bekerja secara simultan dan pengaruhnya terhadap penurunan vertikal dan perpindahan horisontal pada pondasi tiang tunggal. Selanjutnya, teori *Reese & Matlock* (1956) akan digunakan sebagai pembanding dari analisis tersebut.

## 2. TINJUAN PUSTAKA

Penelitian (Ibrahim, et al 2018) menunjukkan bahwa defleksi akibat gaya horisontal lebih kecil akibat pondasi tiang yang mendapat beban vertikal, dibandingkan dengan pondasi tiang yang tidak mendapat beban vertikal..

(C. Anagnostopoulos 1993) mengemukakan bahwa pembebanan horisontal murni tidak menyebabkan pergerakan penurunan vertikal, tetapi untuk kombinasi beban, beban horisontal menambah pergerakan penurunan vertikal.

Penelitian (Suryadi, et al 2016) menyajikan hasil pengujian pendahuluan terhadap pasir yang digunakan dalam penelitian maka pasir digolongkan dalam klasifikasi *Poorly Graded Sand* (SP). Pengujian utama terdiri dari beberapa variasi tiang dan beberapa variasi pembebanan dengan beberapa metode menunjukkan peningkatan daya dukung lateral pondasi tiang seiring bertambahnya beban vertikal.

(Zhu et al. 2017) menganalisis pengaruh beban vertikal pada kapasitas dukung lateral tiang pada beban gabungan. Kapasitas dukung lateral utama akan berkurang secara signifikan jika tiang yang tertanam dikurangi dan defleksi lateral akan berkurang dengan meningkatnya beban vertikal pada head pile.

(Brown, et al 1989) melakukan uji metode numerik dengan GEOFEM3D dari studi kasus di lapangan (*case study 1*, (E.M. Comodromos 1977)) dan studi kasus di laboratorium (*case study 2*, (Achmus et al 2010)) tentang respon tiang tunggal dengan beban simultan, pada tanah lempung homogen dan tanah berpasir homogen, menunjukkan pengaruh beban aksial pada defleksi horisontal tiang tunggal di tanah berpasir, terlihat bahwa dukungan lateral meningkat seiring bertambahnya beban aksial.

(Khodair et al 2014) menganalisis mengenai studi numerik interaksi tiang-tanah dikenakan beban aksial dan lateral secara bersamaan dengan menggunakan LPILE, elemen hingga (FE) model interaksi tiang-tanah telah dikembangkan menggunakan Abaqus / Cae dan SAP2000 untuk mempelajari efek pembebanan lateral pada tiang yang tertanam di tanah liat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban axial, mengurangi momen lentur yang diinduksi dan perpindahan lateral pada tiang dan karenanya meningkatkan kapasitasnya untuk menahan gaya lateral.

(K. Rajagopal 2008) menyajikan beberapa hasil dari analisis elemen hingga tiga dimensi yang menunjukkan pengaruh signifikan beban vertikal dan lateral yang bekerja bersama. Analisis dilakukan di tanah lempung homogen dan tanah berpasir homogen. Hasilnya menunjukkan bahwa pengaruh beban vertikal pada respons lateral tiang secara signifikan meningkatkan kapasitas di tanah berpasir dan sedikit menurun kapasitas tanah liat. Secara umum, ditemukan bahwa efek beban vertikal pada tanah berpasir adalah signifikan bahkan untuk tiang pancang yang panjang sepanjang 30D, sedangkan untuk tanah lempung, efeknya tidak signifikan untuk tiang di atas panjang 15D.

### 3. METODOLOGI

#### a. Model Laboratorium

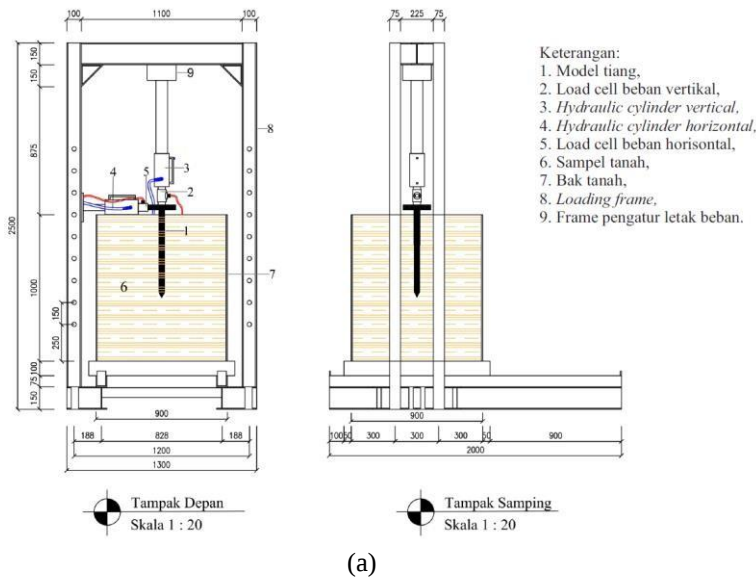
Penelitian ini melaporkan hasil pemodelan skala laboratorium dengan memperhitungkan beberapa variasi pembebanan : 1. Perpindahan horisontal akibat beban lateral, 2. Perpindahan vertikal akibat beban aksial, 3. Perpindahan horisontal akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial, 4. Deformasi sepanjang tiang akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial, dan 5. Pembebanan axial, dengan, dan tanpa beban lateral, serta pembebanan lateral, dengan, dan tanpa beban axial (dijelaskan pada Gambar 4.)

Skala *prototype* dan model dihitung menggunakan Teori Model Struktur dan Teknik Eksperimental sehingga perilaku benda uji skala model yang akan dibuat sesuai dengan perilaku *prototypenya*. Hal ini terlihat pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Pemodelan di laboratorium

| No. | Variabel                  | Notasi       | Satuan            | Prototype  | Model      |
|-----|---------------------------|--------------|-------------------|------------|------------|
| 1   | Panjang tiang             | $L_1$        | meter             | 18,0       | 0,600      |
|     |                           | $L_2$        | meter             | 17,0       | 0,500      |
| 2   | Diameter tiang            | $D_1$        | meter             | 0,6        | 0,020      |
|     |                           | $D_2$        | meter             | 0,5        | 0,015      |
| 3   | Defleksi horisontal       | $\delta y_1$ | mm                | 10,0       | 0,33       |
|     |                           | $\delta y_2$ | mm                | 10,0       | 0,29       |
| 4   | Penurunan vertikal        | $\delta x_1$ | mm                | 6,0        | 0,20       |
|     |                           | $\delta x_3$ | mm                | 6,0        | 0,20       |
| 5   | Tinggi box                | Z            | meter             | 22,8       | Min 0,76   |
| 6   | Lebar box                 | B            | meter             | 13,20      | Min 0,44   |
| 9   | Modulus elastisitas beton | E            | kN/m <sup>2</sup> | 2,50E+07   | -          |
| 10  | Modulus elastisitas baja  | E            | kN/m <sup>2</sup> | -          | 1,00E+08   |
| 11  | Beban Aksial              | V            | ton               | 250,0      | 0,87       |
| 12  | Beban Lateral             | H            | ton               | 10,0       | 0,03       |
| 13  | Momen inersia             | $I_1$        | m <sup>4</sup>    | 6,3617E-03 | 1,4569E-09 |
|     |                           | $I_2$        | m <sup>4</sup>    | 3,0680E-03 | 4,1006E-10 |

Pemodelan skala di laboratorium dibuat dengan menggunakan kotak uji dengan ukuran (900x90x100) cm<sup>3</sup> yang diisi dengan *sample* tanah lanau pasir (Gambar 1) untuk sedekat mungkin menggambarkan kondisi di lapangan. *Sampel* diambil di dusun Karang, Kalitirto, Berbah, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, dengan parameter tanah pada Tabel 2. Pondasi tiang tunggal dimodelkan dengan menggunakan baja dengan ukuran panjang 60cm dan 50cm, serta diameter 2cm dan 1,5cm (Gambar 2.a.) yang dibebani secara axial, lateral, dan kombinasi beban (Gambar 2.b.).



Gambar 1.a. Sket kotak uji

Gambar 1.b. Kotak uji

Tabel 2. Parameter sample tanah eksperimental laboratorium

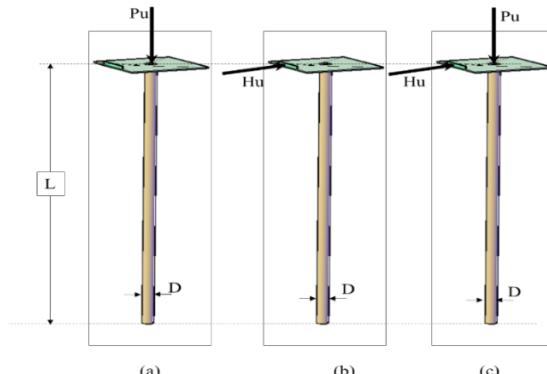
| Nama/symbol                                | BH1 (m)  |          |          | BH2 (m)  |          | sample kotak uji |          |
|--------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------|----------|
|                                            | -1,2     | -2,2     | -3,7     | -1,2     | -2,2     | -4,0             |          |
| Water Content (%)                          | 16,78    | 28,78    | 24,33    | 31,50    | 28,66    | 22,67            | 25,45    |
| Specific Gravity G                         | 2,73     | 2,55     | 2,56     | 2,54     | 2,51     | 2,61             | 2,60     |
| Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )           | 16,55    | 17,57    | 16,50    | 18,30    | 17,60    | 16,00            | 17,09    |
| Dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> )       | 14,17    | 13,64    | 13,27    | 13,92    | 13,68    | 13,04            | 13,62    |
| Saturated unit weight (kN/m <sup>3</sup> ) | 18,79    | 18,10    | 17,90    | 18,25    | 18,04    | 17,86            | 18,19    |
| Void ratio, e                              | 0,89     | 0,83     | 0,89     | 0,79     | 0,80     | 0,96             | 0,87     |
| Poisson Ratio,                             | 0,30     | 0,30     | 0,30     | 0,30     | 0,30     | 0,30             | 0,30     |
| Cohesion, c (kN/m <sup>2</sup> )           | 1,00     | 1,00     | 1,00     | 1,00     | 1,00     | 1,00             | 1,00     |
| Angle of internal friction, (°)            | 20,23    | 17,65    | 25,47    | 19,60    | 18,34    | 26,50            | 21,30    |
| Ko=1-sin                                   | 0,65     | 0,70     | 0,57     | 0,66     | 0,69     | 0,55             | 0,64     |
| ' (kN/m <sup>2</sup> )                     | 19,86    | 38,65    | 61,05    | 21,96    | 38,72    | 64,00            | -        |
| m (kN/m <sup>2</sup> )                     | 15,28    | 30,84    | 43,55    | 17,05    | 30,60    | 44,96            | -        |
| Relative Density, Dr                       | 0,50     | 0,50     | 0,50     | 0,50     | 0,50     | 0,50             | 0,56     |
| Secant shear Modulus, Gs                   | 1,84E+04 | 2,33E+04 | 3,18E+03 | 1,99E+04 | 2,29E+04 | 2,77E+04         | 1,92E+04 |
| Modulus Young's, E (kN/m <sup>2</sup> )    | 4,78E+04 | 6,06E+04 | 8,28E+03 | 5,18E+04 | 5,94E+04 | 7,20E+04         | 5,00E+04 |

BH = bore hole



(a)

Gambar 2.a. Tiang Baja



(b)

Gambar 2.b. Sket pembebanan tiang tunggal di laboratorium  
(a) Beban axial  $P_u$ ; (b) Beban lateral  $H_u$ ; (c) Beban simultan axial lateral

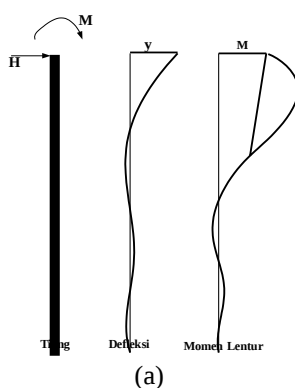
## (b) Pembebanan Laboratorium

Penambahan beban aksial  $P_u$  pada tiang tunggal dilakukan dengan *interval load* 2500 gr. Hal ini dilakukan dengan penambahan beban aksial berangsur angsur dinaikkan hingga runtuh. Kriteria keruntuhan yang dipakai yaitu jika laju penurunan vertikal lebih dari 0,05 mm/10 menit atau lebih dari 0,0125mm/2 menit atau penurunan vertikal terus bertambah tanpa tambahan beban (ASTM D3966 2013).

Penambahan beban lateral,  $H_u$  pada tiang tunggal dilakukan dengan *interval load* 500 gr. Hal ini dilakukan dengan penambahan beban lateral berangsur angsur dinaikkan hingga runtuh. Kriteria keruntuhan yang dipakai yaitu jika laju defleksi horisontal lebih dari 0,05 mm /10 menit atau 0,0125 mm/2,5 menit atau hingga *poer* mengalami defleksi horisontal max 5% D (D = Diameter tiang) (ASTM D3966 2013).

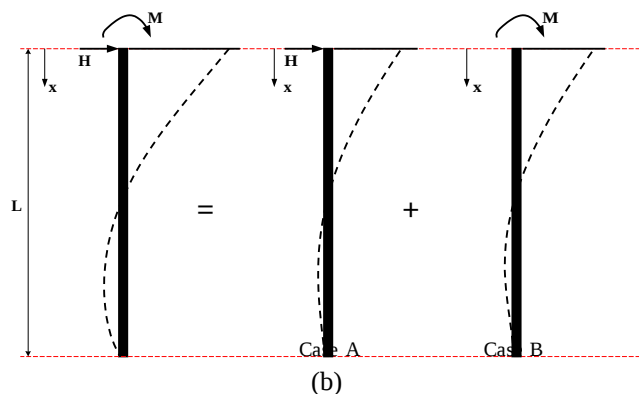
## (c) Perilaku tiang terhadap beban horisontal

Eksperimen di laboratorium menganalisis efek pembebanan aksial dan lateral yang bekerja secara simultan dan pengaruhnya terhadap penurunan vertikal dan perpindahan horisontal pada pondasi tiang tunggal, dibandingkan dengan teori (Reese and Matlock 1956) yang menggunakan analogi balok diatas dukungan elastis seperti pada Gambar 2.3.berikut ini,



(a)

Gambar 3.a. Deformasi tiang akibat beban horisontal H dan momen M, (Reese and Matlock 1956)



(b)

Gambar 3.b. Superposisi akibat H dan akibat M (Reese and Matlock 1956)

Defleksi  $y(x)$  merupakan fungsi ( $H, M, EI, k, L_s$ , dan  $T$ ); dimana  $T$  adalah faktor kekakuan relatif ( $T = L/\lambda$ );  $\lambda$  adalah bilangan bulat postif. Dengan demikian secara matematis dapat ditulis seperti pada Persamaan 1 berikut,

$$y(x) = F(x, T, L_s, k, EI, H, M) \quad 1$$

Tiang dan tanah masih dalam keadaan elastis, maka dapat digunakan prinsip superposisi. Dengan demikian, deformasi akibat H dan akibat M dapat dipisahkan, seperti terlihat pada Gambar 2.4.b.

$y_A$  adalah defleksi akibat gaya horisontal  $H$ , dan  $y_B$  akibat  $M$ , maka:  $y = y_A + y_B$   
 Penyelesaian elastis, rasio  $y_A/H$  dan  $y_B/M$  adalah faktor penting yang perlu diperhatikan, maka penyelesaian kasus A (akibat  $H$ ) dan kasus B (akibat  $M$ ) dapat diekspresikan sebagai Persamaan 2 berikut,

$$\begin{aligned} (y_A/H) &= f_A(x, T, L_s, k, EI) \text{ dan } (y_B/M) \\ &= f_B(x, T, L_s, k, EI) \end{aligned} \quad 2$$

dengan  $f_A$  dan  $f_B$  adalah dua buah fungsi berbeda

Pada setiap kasus, ada enam suku dengan dua dimensi yaitu: gaya dan panjang, maka diringkas menjadi 4 buah faktor tidak berdimensi yang tidak saling bergantung, seperti terlihat pada Persamaan 3 dan 4 berikut,

$$K \left( \frac{E}{T} \right)^{1/3} \left( \frac{L_s}{T} \right)^{1/3} \left( \frac{k}{E} \right)^{1/3} \left( \frac{T}{EI} \right)^{1/3} \quad 3$$

$$K \left( \frac{E}{T} \right)^{1/2} \left( \frac{L_s}{T} \right)^{1/2} \left( \frac{k}{E} \right)^{1/2} \left( \frac{T}{EI} \right)^{1/2} \quad 4$$

Parameter tak berdimensi tersebut dapat diberi simbol dan diberi nama sebagai Persamaan 5 sampai dengan Persamaan 9 berikut ini,

$$\left( \frac{E}{T} \right) = \dots \quad 5$$

$$\left( \frac{L_s}{T} \right) = \dots \quad 6$$

$$\left( \frac{k}{E} \right) = \dots \quad 7$$

$$\left( \frac{T}{EI} \right) = \dots \quad 8$$

$$\left( \frac{E}{T} \right)^{1/2} = \dots \quad 9$$

Persamaan 5 sampai dengan Persamaan 9, menghasilkan Persamaan 10 sebagai berikut,

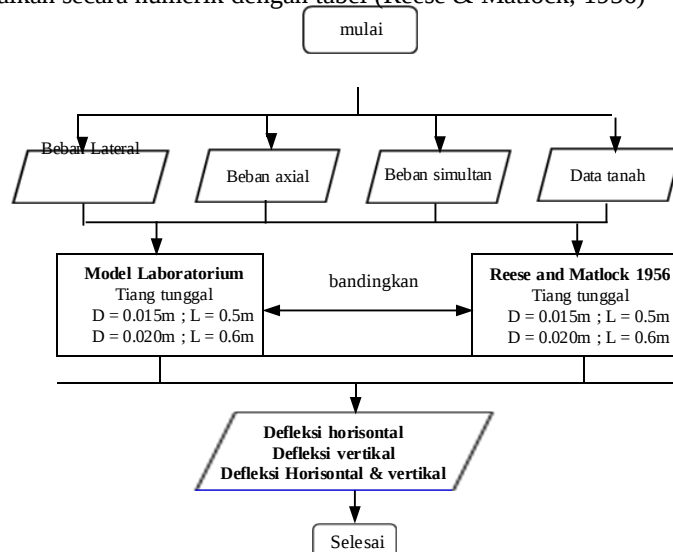
$$\dots = \dots + \dots = \dots \left( \frac{E}{T} \right)^{1/2} + \dots \left( \frac{E}{T} \right)^{1/2} \quad 10$$

Persamaan 11 sampai dengan Persamaan 14, diperoleh dari turunan Persamaan 10 sebagai berikut ini,

$$\dots, \dots = \dots + \dots = \dots \left( \frac{T}{EI} \right) + \dots \left( \frac{E}{T} \right) \quad 11$$

$$\dots, \dots = \dots + \dots = \dots \left( \frac{T}{EI} \right) + \dots \left( \frac{E}{T} \right) \quad 12$$

Koefisien A dan B diselesaikan secara numerik dengan tabel (Reese & Matlock, 1956)



Gambar 4. Flowchart penelitian

#### **4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

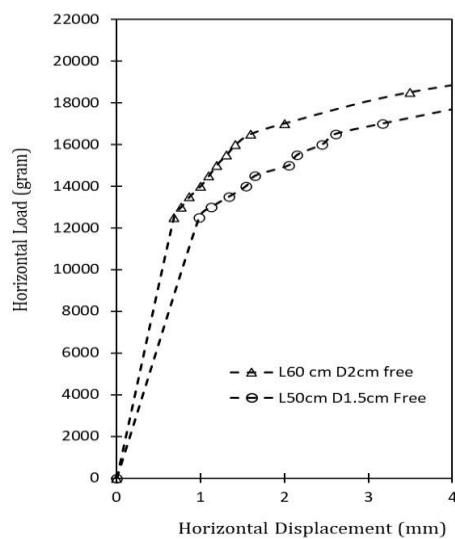
Hasil pembebanan laboratorium pada pondasi tiang tunggal dengan beban independen mencatat perpindahan vertikal dan perpindahan horisontal di kepala tiang, seperti terlihat pada Gambar 5. dan Gambar 6.

Grafik hasil pembebanan independen menunjukkan bahwa semakin panjang ukuran tiang dan semakin besar diameter tiang, maka perpindahan vertikal dan perpindahan horisontal semakin kecil, dengan kata lain daya dukung

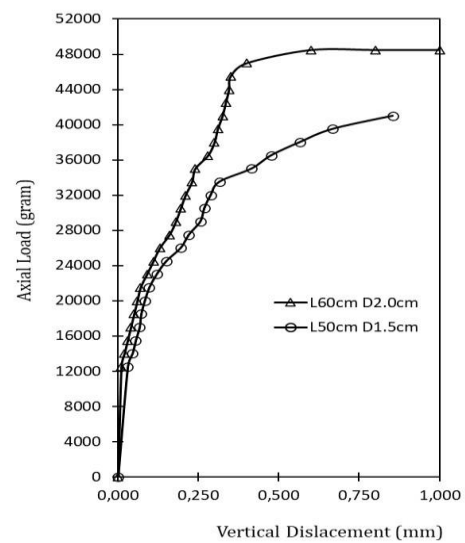
tiang akan semakin besar.

Perpindahan horisontal akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial di laboratorium pada pondasi tiang tunggal disajikan pada Gambar 7. Beban axial  $P_u$  yang digunakan masing masing sebesar 10kg dan 40kg, sedangkan beban lateral berangsur angsur ditambah hingga runtuh. Gambar 7 merupakan pembebanan lateral dengan dan tanpa beban axial, terlihat pada grafik, semakin besar beban axial yang diberikan, perpindahan horisontal semakin berkurang, dengan kata lain daya dukung lateral semakin bertambah.

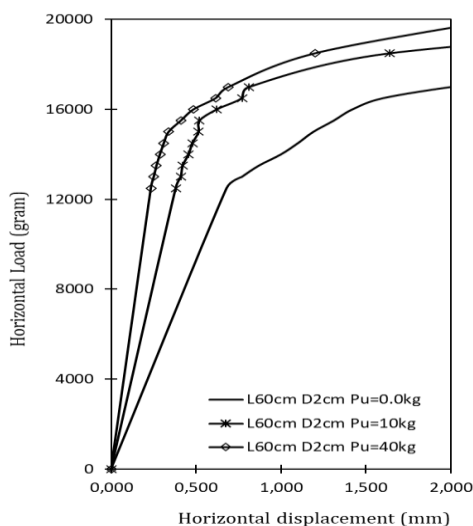
Deformasi sepanjang tiang dengan metode (Reese and Matlock 1956), akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial, disajikan pada Gambar 8. Beban axial masing masing  $P_u=10\text{kg}$  dan  $P_u=40\text{kg}$  serta beban lateral  $H_u=17\text{kg}$ . Terlihat pada grafik hasil pembebanan lateral dengan dan tanpa beban axial, tidak berbeda dengan hasil laboratorium bahwa semakin besar beban axial yang diberikan, perpindahan horisontal semakin berkurang, dengan kata lain daya dukung lateral semakin bertambah.



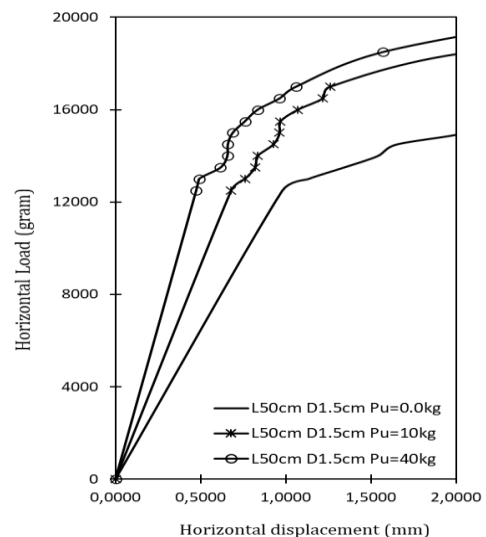
Gambar 5. Perpindahan horisontal akibat beban lateral (Pembebanan laboratorium)



Gambar 6. Perpindahan vertikal akibat beban axial (Pembebanan laboratorium)

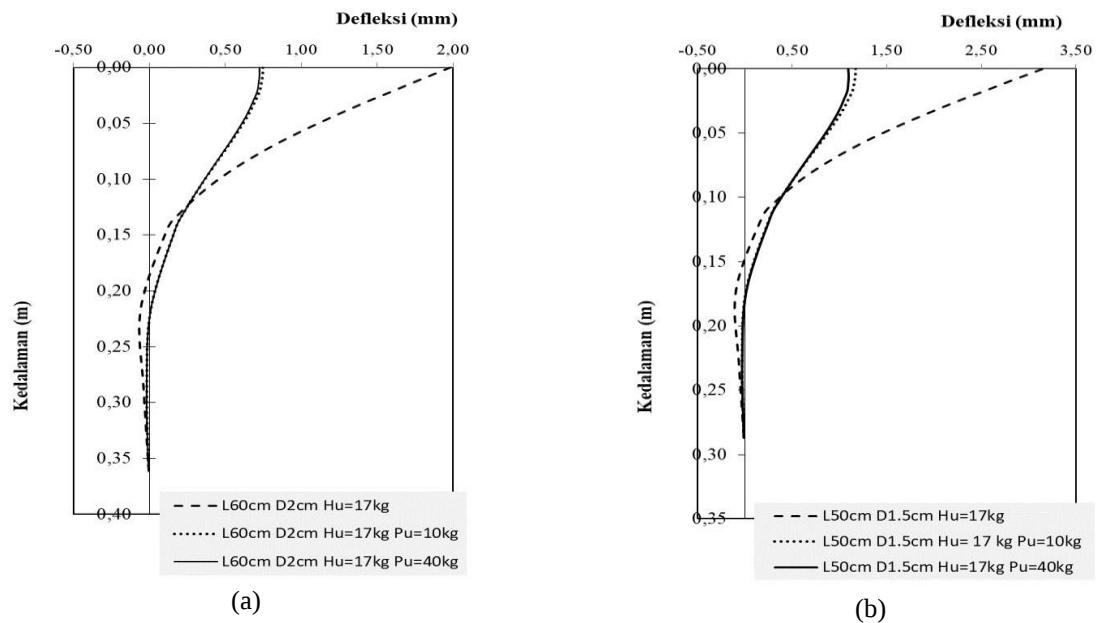


(a)



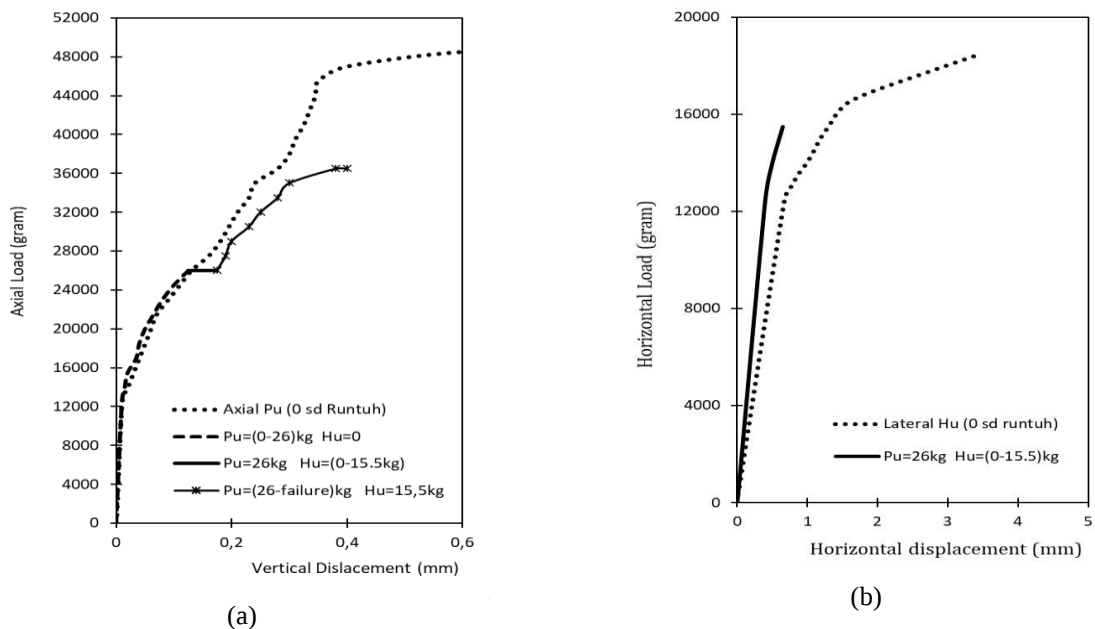
(b)

Gambar 7. Perpindahan horisontal akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial  
(a) Tiang L60cm D2cm; (b) Tiang L50cm D1.5cm  
(Pembebanan laboratorium)



Gambar 8. Deformasi sepanjang tiang akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial  
(b) Tiang L60cm D2cm; (b) Tiang L50cm D1.5cm  
(Reese and Matlock 1956)

Hasil pembebanan laboratorium pada pondasi tiang tunggal dengan beban axial yang berangsur angur ditambah sampai runtuh dibandingkan dengan pembebanan axial dengan tambahan beban lateral dan sebaliknya terlihat pada Gambar 9 berikut ini,



Gambar 8. Perpindahan vertikal dan horisontal

- (a) Pembebanan axial dengan dan tanpa beban lateral
- (b) Pembebanan lateral dengan dan tanpa beban axial  
(Pembebanan laboratorium)

## 5. KESIMPULAN dan SARAN

Hasil eksperimen efek simultan dari beban aksial dan lateral serta pengaruhnya terhadap penurunan vertikal dan defleksi horisontal pada pondasi tiang menunjukkan bahwa:

1. Pembebanan lateral murni tidak menyebabkan pergerakan penurunan vertikal.
2. Pada beban lateral dan aksial yang bekerja bersamaan, beban lateral menambah pergerakan penurunan vertikal.
3. beban aksial mengurangi defleksi horisontal / menambah kapasitas dukung lateral pada beban simultan.

Saran:

1. Eksperimen laboratorium yang dilakukan pada beban simultan axial-lateral, sebaiknya ditingkatkan dengan perbandingan tertentu untuk menganalisa pengaruh yang signifikan pada perpindahan vertikal maupun perpindahan horisontal.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan berbagai macam kepadatan tanah dan jenis tanah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Achmus, Martin, and Klaus Thieken. 2014. "On the Behavior of Piles in Non-Cohesive Soil under Combined Horizontal and Vertical Loading." *Acta Geotechnica* 5 (3): 199–210. <https://doi.org/10.1007/s11440-010-0124-1>.
- ASTM D3966. 2013. "Standard Test Methods for Deep Foundations Under Lateral Load." *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 1–18. <https://doi.org/10.1520/D3966-07.recommended>.
- Brown, By Dan A, Clark Morrison, and Lymon C Reese. 1989. "Lateral Load Behaviour of Pile Group in Sand." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 26 (3–4): A145. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)92298-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)92298-5).
- C. Anagnostopoulos, M.Georgiadis. 1993. "Interaction of Axial and Lateral Pile Responses." *Journal of Geotechnical Engineering* 119 (4): 793–98.
- E.M. Comodromos. 1977. "Response Prediction for Horizontally Loaded Pile Groups." *Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society* 2: 123–33.
- Ibrahim, Saad Farhan, Shakir Al-Soud Madhat, and Ibrahim Al-Asadi Fawaz. 2018. "Performance of a Single Pile Under Combined Axial and Lateral Loads in Layered Sandy Soil." *Journal of Engineering and Sustainable Development* 2018 (01): 121–36. <https://doi.org/10.31272/jeasd.2018.1.10>.
- K. Rajagopal, S. Karthigeyan. 2008. "Influence of Combined Vertical and Lateral Loading on Lateral Response of Piled Raft Foundation." *International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, 3272–3282. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.12.002>.
- Khodair, Yasser, and Ahmed Abdel-Mohti. 2014. "Numerical Analysis of Pile–Soil Interaction under Axial and Lateral Loads." *International Journal of Concrete Structures and Materials* 8 (3): 239–49. <https://doi.org/10.1007/s40069-014-0075-2>.
- Reese, L.C., and H Matlock. 1956. *Non-Dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth*. John Wiley & Sons, Inc.
- Suryadi, Nugroho Soewignjo Agus, and Muhandi. 2016. "Pengaruh Beban Vertikal Terhadap Daya Dukung Lateral Pondasi Tiang." *Ph.D. Dissertation, Riau University*, 1–9.
- Zhu, Ming-xing, Yanbei Zhang, Wei-ming Gong, Lei Wang, and Guo-liang Dai. 2017. "Generalized Solutions for Axially and Laterally Loaded Piles in Multilayered Soil Deposits with Transfer Matrix Method." *International Journal of Geomechanics* 17 (4): 04016104. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000800](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000800).