

PENGARUH BEBAN VERTIKAL TERHADAP DAYA DUKUNG LATERAL PONDASI TIANG

Rudy Suryadi¹⁾, Soewignjo Agus Nugroho²⁾, Muhandi³⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, ²⁾³⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Riau, Pekanbaru 28293
E-mail : rudy.suryadi20@gmail.com

ABSTRACT

Pile foundations are intended to hold both vertical and horizontal loads. Pile foundation design must take into account the lateral carrying capacity, especially on those that experience large lateral force. In fact, vertical load and horizontal load work simultaneously on the piles. Therefore it is necessary to look at the effect of the vertical load towards the carrying capacity the lateral piles. This study uses several models of pile foundation. The inclination of which the models are varied pile into three kinds, namely the inclination of 0° (upright pole), the inclination of 15° and 30°. While the vertical load is varied into four kinds, namely 0 kg load (no-load), 0,5 kg, 1 kg and 2 kg.

The tests were done by inflicting horizontal loading on each variation of test models. Load test results are interpreted using the Tangent Intersection, Davisson method, the Chin method, and Mazurkiewicz method to get the ultimate lateral bearing capacity. The interpretation result of Tangent Intersection method showed the tendency to increase the carrying capacity of the lateral pile models as the vertical load increase. While the results of interpretation met of Chin method, generally showed the same trend. However, the interpretation of Davisson method and Mazurkiewicz methods did not indicate any trend of increasing the lateral carrying capacity with the increase of vertical load. The relationship between the carrying capacity and the inclination of the pile, from the interpretation of the data of load test results, did not indicate a trend of increasing the lateral carrying capacity of the pile models as the inclination of the piles increase.

Keywords : pile foundation, model, lateral, vertical load

I. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pondasi tiang merupakan suatu konstruksi bangunan yang berfungsi sebagai penopang bangunan dan meneruskan beban bangunan di atasnya ke lapisan tanah dalam yang cukup kuat daya dukungnya. Pondasi tiang tidak selalu mengalami beban vertikal saja. Pada beberapa jenis konstruksi, ada kemungkinan beban vertikal lebih kecil dari pada beban horisontal. Oleh karena itu pondasi tiang juga digunakan untuk menahan beban horisontal.

Salah satu cara mengatasi beban horisontal yang besar dalam perencanaan

pondasi tiang adalah dengan memiringkan pondasi tiang. Dalam beberapa konstruksi, pondasi tiang sengaja dimiringkan untuk menahan beban horisontal yang melebihi daya dukung izin lateral pada pondasi tiang tegak (vertikal). Menurut Pect et al., (1953) dan McNulty (1956) di dalam Manoppo (2008) pondasi tiang miring dapat digunakan untuk menaikkan kapasitas dukung jika pondasi tiang vertikal tidak mampu memikul beban lateral yang ada.

Pada kenyataannya beban yang berkerja pada pondasi tiang tidak hanya beban vertikal atau beban horisontal saja,

tetapi kedua beban tersebut berkerja bersamaaan. Pondasi tiang yang mendapat tekanan kebawah akibat beban vertikal, mestinya mengalami defleksi akibat gaya horisontal lebih kecil dibandingkan dengan pondasi tiang yang tidak mendapat tekanan kebawah. Karena akan membutuhkan gaya horisontal yang lebih besar lagi bila tiang mendapatkan tekanan dari atas akibat beban vertikal.

Zhang (2002) meneliti tentang afek beban mati terhadap respon lateral pondasi tiang miring grup. Penelitian dilakukan dengan metode *centrifuge test*. Zhang melakukan delapan belas variasi pada tiang grup 3x3 dan tiang grup 4x4. Beban mati yang diberikan mulai dari 20% hingga 80% dari kapasitas ultimit vertikal tiang grup. Dari penelitiannya disimpulkan bahwa efek dari beban mati vertikal terhadap tahanan lateral pondasi tiang tergantung dari susunan tiang, keiringan tiang, dan kepadatan tanah.

Penelitian ini merupakan tentang pengaruh beban vertikal terhadap daya dukung lateral pondasi tiang tunggal pada tanah pasir. Jika beban vertikal dapat meningkatkan daya dukung lateral pondasi tiang, maka penggunaan tiang miring dapat dihindari. Karena pemancangan pondasi tiang miring di lapangan lebih sulit dibandingkan dengan pemancangan pondasi tiang tegak (vertikal).

Tujuan dan Manfaat

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari kecenderungan kapasitas dukung lateral pondasi tiang yang mendapat tekanan akibat beban vertikal, sehingga dapat:

- a. Mengkaji bagaimana pengaruh beban vertikal terhadap kapasitas dukung lateral pondasi tiang dan korelasinya.
- b. Mengkaji bagaimana pengaruh kemiringan tiang terhadap kapasitas dukung lateral pondasi tiang dengan menggunakan panjang tiang yang sama.

Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

- a. Model tiang yang digunakan berpenampang lingkaran diameter 2 cm dengan bentuk seragam yang terbuat dari beton mortar.
- b. Tanah yang digunakan adalah pasir yang dikeringkan terlebih dahulu.
- c. Berat pondasi tiang diabaikan.
- d. Metode yang digunakan untuk interpretasi data hasil uji pembebanan menggunakan metode *Tangent Intersection*, metode Davisson, metode Mazurkiwicz dan metode Chin.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pondasi tiang

Pondasi tiang digunakan pada suatu bangunan yang tanah dasarnya tidak mempunyai daya dukung (*bearing capacity*) yang cukup untuk memikul beban yang diterimanya, sedangkan tanah keras terletak pada kedalaman yang sangat dalam. Pondasi tiang juga diperlukan apabila terdapat beban lateral yang diperhitungkan, karena pondasi tiang tiang dapat menahan lateral dengan lenturannya. Pemasangan pondasi tiang dapat dilakukan dengan pemancangan tiang-tiang baja/beton pracetak atau dengan membuat tiang-tiang beton bertulang yang langsung dicor di tempat (*cast in place*), yang sebelumnya telah disiapkan lubang terlebih dahulu.

Gaya lateral pondasi tiang

Perencanaan pondasi tiang tidak hanya memperhitungkan gaya aksial saja, tetapi sering harus dirancang dengan memperhitungkan beban horisontal atau lateral. Gaya lateral yang diterima pondasi tiang dapat disebabkan oleh angin, gelombang air, benturan kapal pada struktur dermaga, dan lain-lain. Gaya lateral pondasi tiang bergantung pada kekakuan atau tipe tiang, macam tanah, penanaman ujung tiang ke dalam

pelat penutup kepala tiang, sifat gaya-gaya dan besar defleksi (Hardiyatmo, 2010). Apabila pondasi tiang menerima gaya lateral yang besar, maka dapat digunakan tiang miring.

Berdasarkan ikatan dengan pelat penutup tiang, pondasi tiang dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu tiang ujung bebas (*free end pile*) dan tiang ujung jepit (*fix end pile*).

Tiang panjang atau tiang tidak kaku adalah dimana kondisi tiang terjadi gaya lateral ultimit tiang lebih ditentukan oleh besarnya momen maksimum yang dapat ditahan tiang, dimana tekanan tanah belum terlampaui pada saat gaya lateral telah bekerja penuh. Momen maksimum yang bekerja pada tiang tidak boleh melampaui tahanan momen tiangnya sendiri. Jika momen yang bekerja lebih besar dari momen tahanan tiang, dengan menganggap tahanan tanah telah termobilisasi sepenuhnya, maka akan terjadi patah pada tiang.

Uji pembebanan pondasi tiang

Secara umum uji beban pondasi ada tiga, yaitu *Slow Maintained Load test* (SML), *Quick Load Test*, dan *Constant Rate of Penetration* (CRP).

Uji pembebanan pondasi tiang metode SML ada dua jenis, yaitu monotonik dan siklik. Pada metode SML monotonik beban tetap dipertahankan hingga penambahan beban tahap selanjutnya, sedangkan pada metode SML siklik dilakukan pelepasan beban sebelum dilakukan penambahan beban tahap selanjutnya.

Berbeda dengan metode SML, pada metode ini dikontrol oleh waktu dan penurunan. Setiap delapan tahapan beban ditahan dalam waktu yang singkat tanpa memperhatikan kecepatan pergerakan tiang. Waktu yang dibutuhkan pada pengujian ini adalah 3 hingga 6 jam. Pengujian dilakukan hingga tiang mencapai keruntuhan atau hingga mencapai beban tertentu.

Sedangkan metode CRP adalah dengan membebani tiang secara terus-menerus hingga kecepatan penetrasi tiang ke dalam tanah konstan. Pada tanah lempung umumnya diambil patokan sebesar 0,245 cm/menit atau lebih rendah.

Interpretasi Data Hasil Uji Pembebanan

Interpretasi data hasil uji pembebanan metode *Tangent Intersection* menggunakan kurva beban-penurunan (defleksi). Pada metode *Tangent Intersection* digambarkan dua garis yang saling berpotongan. Garis pertama digambarkan untuk mewakili bagian kurva awal atau bagian elastis, sedangkan garis kedua digambarkan untuk mewakili kurva bagian akhir atau bagian plastis. Kemudian digambarkan suatu garis lurus yang bermula dari titik perpotongan dua garis sebelumnya, hingga memotong sumbu beban. Maka didapatlah daya dukung ultimit dari kurva beban-penurunan tersebut secara langsung.

Coduto (2001), menyebutkan bahwa interpretasi hasil uji pembebanan statik metode Davisson (1973) merupakan salah satu yang paling terkenal. Namun Kulhawy (2009) menyebutkan bahwa metode Davisson masih konservatif, namun dapat diterapkan pada hampir semua data uji beban. Metode ini dikemukakan oleh Davisson sebagai beban yang sesuai dengan pergerakan dimana melebihi tekanan elastis (yang diasumsikan sebagai kolom yang berdiri bebas) dengan suatu nilai 0,15 inch dan suatu faktor sepadan dengan ukuran diameter tiang yang dibagi seratus dua puluh (Arifin, 2007).

Chin (1971) mengemukakan bahwa kurva beban-penurunan berbentuk hiperbola dan dianggap bahwa hanya terjadi deformasi geser. Meskipun uji beban tiang belum dilakukan hingga batas beban kegagalan, dengan anggapan

grafik tersebut maka beban kegagalan dapat diperkirakan.

Prakash, S. dan Sharma, H. (1990) didalam Arifin (2007) mengatakan metode ini diasumsikan bahwa dengan kapasitas tahanan terbesar akan didapatkan dari beban yang berpotongan, diantaranya beban yang searah sumbu tiang untuk dihubungkan beban dengan titik-titik dari posisi garis terhadap sudut 45° pada beban sumbu yang berbatasan dengan beban.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Umum

Metode penelitian berisikan tentang tahapan jalannya penelitian, mulai dari persiapan alat dan bahan, setting alat, instalasi model pondasi tiang, serta tahap pengujian. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Riau.

Bahan dan Alat Pengujian

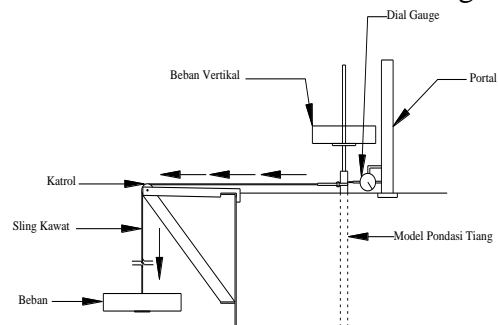
Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah pasir bersih yang berasal dari sungai kampar, yang dikeringkan terlebih dahulu. Pada penelitian ini diperlukan berbagai macam alat sebagai penunjang dalam melakukan penelitian. Adapun peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Alat uji propertis tanah (kadar air, berat volume, *specific gravity*, *direct shear*, dan lain-lain).
- Dial gauge*.
- Satu set beban terukur.
- Model pondasi tiang penampang lingkaran dengan diameter 2 cm dan panjang 55 cm yang terbuat dari adukan semen dan pasir.
- Satu set bak pengujian berukuran lebar 1,5 m, lebar 0,9 m, tinggi 0,9 m yang dilengkapi portal, katrol, sling kawat, dan lain-lain.
- Alat bantu lainnya.

Prosedur Pengujian

Pengujian terdiri dari dua macam, yaitu pengujian pendahuluan dan pengujian utama. Pengujian pendahuluan adalah pengujian terhadap propertis tanah, sedangkan pengujian utama adalah sebagai berikut:

- Memasukkan pasir kedalam bak uji secara bertahap, yang dibagi menjadi tiga tahap atau tiga lapis. Setiap lapis dibebani tekanan sebesar $0,009 \text{ kg/cm}^2$, kemudian diuji kepadatan dengan menggunakan alat *Nuclear Density*.
- Merangkai alat uji pembebanan dan memancang model pondasi tiang kedalam pasir dengan perlahan.
- Melakukan uji beban horisontal pada model pondasi tiang. Model pondasi tiang dipancang dengan berbagai variasi kemiringan, yaitu kemiringan dengan sudut 0° (tiang tegak), sudut 15° , dan sudut 30° . Namun panjang tiang yang tertanam dalam tanah tetap sama, yaitu 55 cm. Pembebanan ada 4 variasi, yaitu pembebanan horisontal, pembebanan horisontal dengan dibebani beban vertikal sebesar 0,5 kg, pembebanan horisontal dengan dibebani beban vertikal sebesar 1 kg, dan pembebanan horisontal dengan dibebani beban vertikal sebesar 2 kg.



Gambar 1. Detail pembebanan

- Mencatat defleksi yang terjadi pada saat uji beban. Pembebanan dilakukan secara bertahap. Penambahan beban dilakukan jika tidak ada pergerakan tiang lagi.

Pembebanan dihentikan pada saat defleksi telah mencapai 1 cm.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Propertis Tanah

Hasil pengujian propertis tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian propertis tanah

Pengujian	Nilai
Kadar Air (w)	0,071 %
Berat Jenis (Gs)	2,649
D10	0,190 mm
D30	0,324 mm
D60	0,563 mm
Coefficient of uniform (C_u)	2,96
Coefficient of curvature (C_c)	0,98

Dari data pengujian didapat $C_u < 6$ dan $C_c < 1$, maka berdasarkan ASTM D2847 pasir yang digunakan pada penelitian ini termasuk dalam klasifikasi pasir dengan pembagian ukuran butiran buruk atau *poorly graded sand* (SP).

Berat Volume, Kuat Geser, dan Kerapatan Relatif Pasir

Dari beberapa pengujian berat volume metode tinggi jatuh yang telah dilakukan, maka didapatkan hasil berat volume pasir dengan cara pengujian metode tinggi jatuh pada ketinggian tertentu seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Berat volume berdasarkan pengujian metode tinggi jatuh

Tinggi Jatuh	γ rata-rata (gr/cm ³)
50 cm	1,498
60 cm	1,501
70 cm	1,519
80 cm	1,516
90 cm	1,520
100 cm	1,510

Berdasarkan pengujian berat volume pasir, maka kepadatan pasir di dalam bak pengujian ditetapkan pada berat volume 1,501 gr/cm³ sampai 1,520

gr/cm³. Hasil pengujian kepadatan menggunakan alat *Nuclear Density* pada pasir di dalam bak uji dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Berat volume pasir menggunakan alat *Nuclear Density*

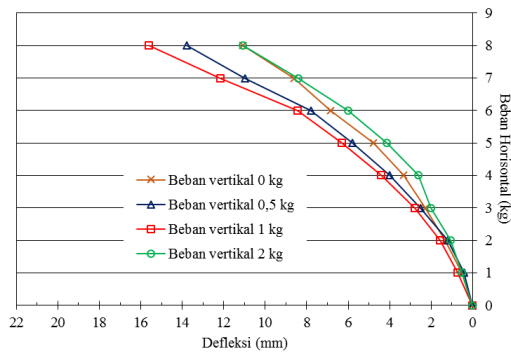
Lapisan	Berat Volume (gr/cm ³)
I	1,50
II	1,52
III	1,51

Dari uji geser langsung yang dilakukan, maka didapatkan nilai ϕ tanah pasir dengan kepadatan 1,520 gr/cm³ adalah 32,54° dan nilai kohesi (c) adalah 0,0169 kg/cm².

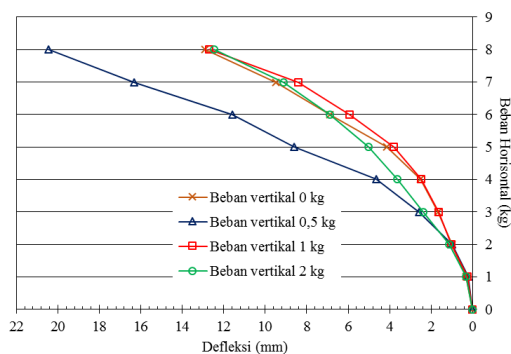
Dengan nilai γ adalah 1,520 gr/cm³, γ_{maks} adalah 1,777 gr/cm³, dan γ_{min} adalah 1,478 gr/cm³, maka nilai kerapatan relatif (D_r) pasir adalah 17%. Sehingga pasir dapat digolongkan kedalam pasir lepas atau tidak padat.

Hasil Pengujian Model Pondasi Tiang

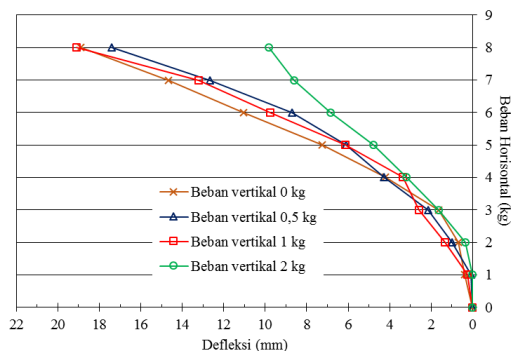
Hasil pengujian model pondasi tiang disusun berdasarkan kemiringan tiang, yaitu tegak, kemiringan 15°, dan kemiringan 30°. Masing-masing variasi kemiringan mempunyai 4 macam pembebanan lateral, yaitu pembebanan lateral tanpa beban vertikal pada model pondasi tiang, pembebanan lateral dengan beban vertikal pada model pondasi tiang sebesar 0,5 kg, 1 kg, dan 2 kg. Hasil pengujian disajikan dalam grafik hubungan defleksi dan beban yang ditampilkan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.



Gambar 3. Grafik hasil pengujian pembebanan lateral model pondasi tiang tegak



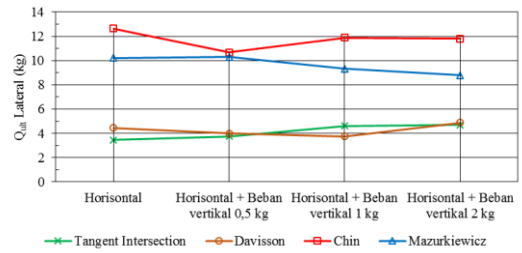
Gambar 4. Grafik hasil pengujian pembebanan lateral model pondasi tiang kemiringan 15°



Gambar 5. Grafik hasil pengujian pembebanan lateral model pondasi tiang kemiringan 30°

Pengaruh Beban Vertikal Terhadap Q_{ult} Lateral Pondasi Tiang

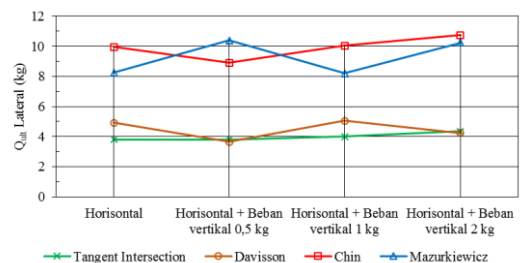
Hubungan nilai Q_{ult} lateral hasil interpretasi model pondasi tiang tegak dengan pembebanan horisitanl dan beban vertikal disajikan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Nilai Q_{ult} lateral pondasi tiang tegak

Gambar 6 memperlihatkan bahwa pada interpretasi metode *Tangent Intersection* terjadi kecenderungan nilai Q_{ult} lateral meningkat seiring bertambahnya beban vertikal pada pondasi tiang. Terlihat bahwa beban vertikal berpengaruh terhadap daya dukung lateral pondasi tiang. Namun pada interpretasi metode Mazurkiewicz, Chin, dan Davisson tidak memperlihatkan perubahan Q_{ult} lateral secara linier.

Hubungan nilai Q_{ult} lateral hasil interpretasi model pondasi tiang kemiringan 15° dengan pembebanan horisitanl dan beban vertikal disajikan dalam Gambar 7.

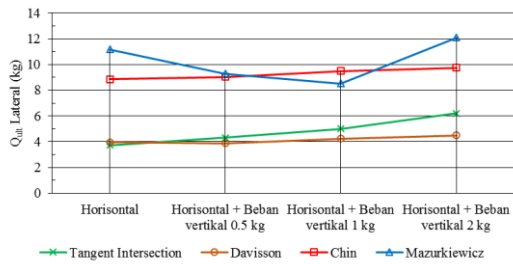


Gambar 7. Nilai Q_{ult} lateral pondasi tiang kemiringan 15°

Gambar 7 memperlihatkan bahwa pada interpretasi metode *Tangent Intersection* terjadi kecenderungan nilai Q_{ult} lateral meningkat seiring bertambahnya beban vertikal pada pondasi tiang. Namun pada interpretasi metode Mazurkiewicz, Chin, dan Davisson tidak memperlihatkan perubahan Q_{ult} lateral secara linier.

Hubungan nilai Q_{ult} lateral hasil interpretasi model pondasi tiang

kemiringan 30° dengan pembebanan horisontal dan beban vertikal disajikan dalam Gambar 8.

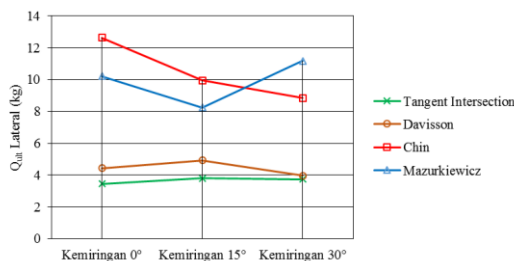


Gambar 8. Nilai Q_{ult} lateral pondasi tiang kemiringan 30°

Gambar 8 memperlihatkan bahwa pada interpretasi metode *Tangent Intersection* dan metode *Chin* terjadi kecenderungan nilai Q_{ult} lateral meningkat seiring bertambahnya beban vertikal pada pondasi tiang. Namun pada interpretasi metode *Mazurkiewicz* dan *Davisson* tidak memperlihatkan perubahan Q_{ult} lateral secara linier.

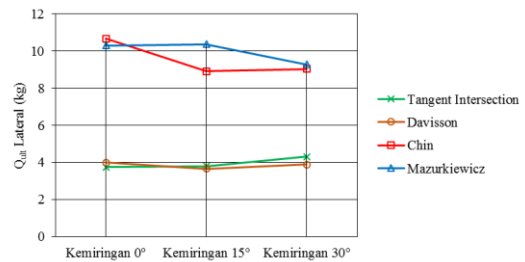
Pengaruh kemiringan tiang terhadap Q_{ult} lateral pondasi tiang

Hubungan kemiringan tiang dengan Q_{ult} lateral model pondasi tiang ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 9, Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12. Pada gambar tersebut disajikan Q_{ult} lateral model pondasi tiang yang diperoleh dari interpretasi data hasil uji beban lateral dengan menggunakan metode *Tangent Intersection*, metode *Davisson*, metode *Chin*, dan metode *Mazurkiewicz*.



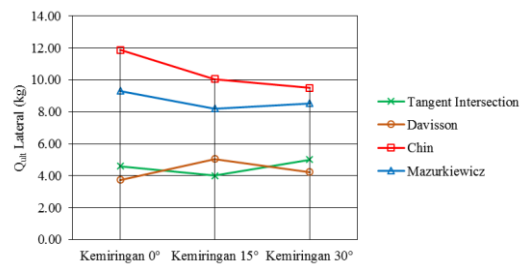
Gambar 9. Hubungan kemiringan tiang dengan Q_{ult} lateral model pondasi tiang tanpa beban vertikal

Pada Gambar 9 menunjukkan bahwa dari empat metode interpretasi yang digunakan, hanya metode *Tangent Intersection* yang menunjukkan kecenderungan perilaku pondasi tiang sesuai dengan hipotesa sebelumnya, yaitu daya dukung lateral pondasi tiang bertambah seiring bertambahnya kemiringan tiang.



Gambar 10. Hubungan kemiringan tiang dengan Q_{ult} lateral model pondasi tiang dengan beban vertikal 0,5 kg

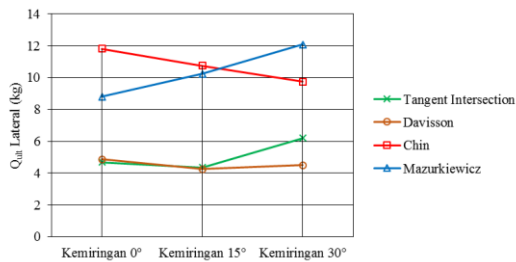
Pada Gambar 10 menunjukkan bahwa dari empat metode interpretasi yang digunakan, hanya metode *Tangent Intersection* yang menunjukkan kecenderungan perilaku pondasi tiang sesuai dengan hipotesa sebelumnya, yaitu daya dukung lateral pondasi tiang bertambah seiring bertambahnya kemiringan tiang.



Gambar 11. Hubungan kemiringan tiang dengan Q_{ult} lateral model pondasi tiang dengan beban vertikal 1 kg

Pada Gambar 11 menunjukkan bahwa dari empat metode interpretasi yang digunakan, tidak ada yang menunjukkan kecenderungan perilaku pondasi tiang sesuai dengan hipotesa sebelumnya, yaitu daya dukung lateral

pondasi tiang bertambah seiring bertambahnya kemiringan tiang.



Gambar 12. Hubungan kemiringan tiang dengan Q_{ult} lateral model pondasi tiang dengan beban vertikal 2 kg

Pada Gambar 12 menunjukkan bahwa dari empat metode interpretasi yang digunakan, metode Mazurkiewicz menunjukkan kecenderungan perilaku pondasi tiang sesuai dengan hipotesa sebelumnya, yaitu daya dukung lateral pondasi tiang bertambah seiring bertambahnya kemiringan tiang.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian pendahuluan terhadap pasir yang digunakan dalam penelitian maka pasir digolongkan dalam klasifikasi *Poorly Graded Sand* (SP) atau pasir dengan pembagian ukuran butiran buruk. Serta berdasarkan nilai kerapatan relatif yang diperoleh maka pasir dikategorikan dalam pasir tidak padat.

Pengujian utama terdiri dari beberapa variasi tiang dan beberapa variasi pembebanan. Dari hasil pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Pengaruh beban vertikal terhadap daya dukung lateral pondasi tiang tunggal mempunyai kecenderungan hasil yang berbeda-beda berdasarkan beberapa metode interpretasi data hasil uji pembebanan.
- Hasil interpretasi metode Tangent Intersection menunjukkan kecenderungan adanya peningkatan daya dukung lateral pondasi tiang seiring bertambahnya beban vertikal.

- Secara umum hasil interpretasi metode Chin juga menunjukkan kecenderungan adanya peningkatan daya dukung lateral pondasi tiang seiring bertambahnya beban vertikal, namun pada beberapa variasi model uji memberikan hasil diluar kecenderungan tersebut.
- Interpretasi metode Davisson dan Mazurkiewicz tidak menunjukkan kecenderungan adanya pengaruh beban vertikal terhadap peningkatan daya dukung lateral pondasi tiang.
- Daya dukung lateral hasil interpretasi menggunakan beberapa metode tidak menunjukkan kecenderungan adanya peningkatan daya dukung lateral pondasi tiang terhadap penambahan kemiringan tiang.
- Analisa langsung terhadap grafik hubungan defleksi dan beban menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan daya dukung lateral pondasi tiang pada tahap-tahap awal pembebanan.
- Adanya beberapa hasil yang berada diluar kecenderungan kemungkinan disebabkan oleh kondisi tanah disekitar model pondasi tiang mengalami perubahan akibat proses pemancangan, dan diperkirakan perubahan kondisi tersebut tidak sama atau tidak seragam pada setiap model uji.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM Commite on Standard. (2008). Standard Test Methods for Deep Foundations Under Lateral Load. In *ASTM D 3966*.
- Coduto, D. P. (2001). *Foundation Design* (Second). New Jersey: Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Das, B. (2002). *Principles of foundation engineering* (Seventh Ed). Cengage learning.
- Hardiyatmo, H. C. (2010). *Analisis dan Perancangan FONDASI Edisi Kedua*. Yogyakarta: Gadjah Mada

- University Press.
- Hirany, A., & Kulhawy, F. H. (2002). On the interpretation of drilled foundation load test results. *Deep Foundations 2002*, 1018–1028.
- Karthigeyan, S. (2009). Lateral Response of 2×2 Pile Group Under Combined Axial and Lateral Loading. *Indian Geotech Conf*, 665–669.
- Kishida, H. (1967). Ultimate bearing capacity of piles driven into loose sand. *Soils and Foundations*, 7(3), 20–29.
- Kulhawy, F. H., & Hirany, A. (2009). Interpreted Failure Load for Drilled Shafts via Davisson and L1-L2. In *Proceedings of the 2009 International Foundation Congress and Equipment Expo* (pp. 127–134).
- Liang, F., Zhang, H., & Wang, J. (2015). Variational solution for the effect of vertical load on the lateral response of offshore piles. *Ocean Engineering*, 99(MAY), 23–33.
- Liang, F., Zhang, H., & Wang, J. (2015). Variational solution for the effect of vertical load on the lateral response of offshore piles. *Ocean Engineering*, 99(MAY), 23–33.
- Manoppo, F. J. (2008). Pengaruh Kemiringan Tiang Pada Kapasitas Dukung Tiang Pancang Kelompok Di Tanah Lempung Lunak Akibat Beban Aksial. *Tekno*, 06(No.48).
- Nugroho, S. A. (2011). Studi Daya Dukung Pondasi Dangkal pada Tanah Gambut dengan Kombinasi Geotekstil dan Grid Bambu, 18(1), 31–40.
- Robinsky, E. I., & Morrison, C. F. (1964). Sand Displacement and Compaction around Model Friction Piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(2), 81–93.
- Zhang, L. M., McVay, M. C., Han, S. J., Lai, P. W., & Gardner, R. (2002). Effects of dead loads on the lateral response of battered pile groups.

Canadian Geotechnical Journal,
39(3), 561–575.