

ANALISIS DAYA DUKUNG TIANG PANCANG DENGAN METODE STATIK, DINAMIK, DAN PERSAMAAN GELOMBANG *SOFTWARE* GRLWEAP

Chris Tengdyantono¹, Gregorius Sandjaja Sentosa² dan Aksan Kawanda³

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: christengg_3@yahoo.com

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: gregoriuss@ft.untar.ac.id

³Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: akawanda@geotech-indonesia.com

ABSTRAK

Formula pemancangan tiang secara luas digunakan untuk menentukan daya dukung statis dari tiang. Dedikasi dan kecerdasan yang luar biasa telah dikeluarkan oleh para insinyur dalam pengembangan formula pemancangan tiang. Terdapat banyak sekali formula yang digunakan untuk pemancangan tiang, dan para insinyur tidak bisa menyetujui formula mana yang terbaik. Akibatnya, semua rumus pemancangan tiang bersifat empiris dan hanya berlaku untuk jenis atau panjang tertentu. Esai ini disajikan dengan tujuan memberikan insinyur konsepsi tentang metode mana meminimalkan risiko tersebut, termasuk bagaimana menerapkan GRLWEAP untuk menganalisis driveability tanah dengan menyediakan parameter. Penggunaan formula program GRLWEAP direkomendasikan dalam perhitungan kapasitas daya dukung aksial karena memiliki tingkat akurasi mencapai rentang $\pm 5\%$ jika dibandingkan terhadap hasil uji PDA / Pile Driving Analyzer proyek jembatan yang berlokasi di Jakarta Utara dan dapat memudahkan proses simulasi serta mengurangi resiko kegagalan konstruksi yang dapat menimbulkan dampak kerugian biaya, material, dan waktu..

Kata kunci: pemancangan tiang, kapasitas daya dukung, formula dinamik, GRLWEAP, PDA

1. PENDAHULUAN

Latar belakang

A.T Kearney, a leading global management consulting firm berbasis di Chicago mengidentifikasi kota-kota dan mengkategorikan kota-kota tersebut sebagai Emerging Cities Outlook (ECO). Jakarta, Manila, dan Kuala Lumpur adalah tiga kota di Asia Tenggara yang diproyeksikan sebagai kota yang berprospek di masa yang akan datang. Jakarta berada di urutan pertama ECO dengan indeks 24,7. Aspek-aspek yang dinilai dalam ECO yaitu sumber daya manusia, inovasi, aktivitas bisnis dan sektor pembangunan. Perusahaan konsultan berbasis internasional ini menggambarkan bahwa pembangunan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi indeks kualitas hidup, maka dari itu demi meningkatkan kualitas hidup manusia pembangunan harus tetap dikembangkan.

Fondasi merupakan salah satu bagian konstruksi bangunan yang berfungsi meneruskan beban bangunan di atasnya (termasuk beban sendiri), kepada tanah tempat fondasi tersebut berpijak, tanpa mengakibatkan terjadinya penurunan bangunan di luar batas toleransinya. Sehingga dalam perencanaan fondasi harus dilakukan dengan teliti dan secermat mungkin, setiap fondasi harus dapat memikul beban yang telah ditentukan atau bahkan beban maksimum yang mungkin terjadi. Oleh karena itu, dengan melihat komparasi dari metode yang akan disajikan melalui studi berikut, diharapkan para perencana fondasi akan dapat merencanakan daya dukung fondasi, serta menanggulangi settlement atau penurunan secara akurat, teliti, dan efektif.

Identifikasi masalah

Seringkali kita dapat terjadinya settlement atau penurunan karena diakibatkan oleh beban struktur bangunan yang melampaui batas toleransinya. Sehingga dalam perencanaan fondasi harus dilakukan dengan teliti dan secermat mungkin, setiap fondasi harus dapat memikul beban yang telah ditentukan atau bahkan beban maksimum yang mungkin terjadi. Oleh karena itu perlu dilakukan evaluasi dan komparasi dari berbagai metode guna memperoleh nilai daya dukung fondasi yang tepat secara efektif.

Perencanaan fondasi dapat dilakukan dengan melakukan perhitungan secara manual ataupun menggunakan bantuan program simulasi. Salah satu program simulasi yang dapat digunakan dalam perencanaan fondasi antara lain

GRLWEAP. Program ini dapat digunakan untuk perencanaan fondasi di daratan maupun di lepas pantai (*offshore*). Dalam studi ini, program GRLWEAP akan digunakan dalam perencanaan fondasi di daratan.

Tujuan penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar kapasitas daya dukung aksial tiang pancang berdasarkan formula statik, dinamik, persamaan gelombang program GRLWEAP serta mengetahui seberapa relevan komparasi kapasitas daya dukung aksial tiang pancang dari seluruh metode terhadap hasil uji PDA di lapangan.

Lingkup penelitian

Adapun lingkup pada penelitian ini, yaitu analisis kapasitas daya dukung aksial tiang pancang berdasarkan formula statik, dan formula dinamis menggunakan program Microsoft Excel, analisis kapasitas daya dukung aksial tiang pancang berdasarkan persamaan gelombang menggunakan program simulasi GRLWEAP, beban yang digunakan hanya beban aksial, dan melakukan perbandingan analisis kapasitas dengan formula statik, dinamik, GRLWEAP, dan aktual lapangan dari hasil uji PDA.

2. DASAR TEORI

Kapasitas aksial fondasi tiang pancang ditentukan oleh kemampuan material tiang untuk menahan beban (kapasitas struktural) atau daya dukung tanah, dengan daya dukung terkecil yang lebih menentukan. Daya dukung tanah pada fondasi tiang pancang dapat dihitung dengan cara statik, berdasarkan korelasi langsung dengan uji lapangan (*in-situ test*), dengan formula dinamik (dari rekaman pemancangan), analisis perambatan gelombang, berdasarkan hasil pendongkrakan secara hidrolik, dan dengan pengujian di lapangan.

Penentuan daya dukung aksial fondasi tiang pancang cara statik

Penentuan daya dukung aksial fondasi tiang pancang dengan cara statik dapat dilakukan dengan beberapa cara berikut.

Daya dukung ujung tiang (Q_p)

- Pada Tanah Pasir

$$Q_{p1} = A_p \cdot q_p = A_p \cdot q' \cdot N_{q*} \quad (1)$$

keterangan : Q_{p1} = Daya dukung ultimit ujung tiang (ton), A_p = Luas penampang ujung tiang (m^2), $q_p = q' \cdot N_{q*}$ = Daya dukung per satuan luas (ton/m^2), q' = Tegangan vertikal efektif (ton/m^2), N_{q*} = Faktor daya dukung ujung tiang.

- Pada Tanah Lempung

$$Q_p = A_p \cdot q_p = A_p \cdot (C_u \cdot N_{c*}) \approx A_p \cdot (9 \cdot C_u) \quad (2)$$

keterangan : Q_p = Daya dukung ultimit ujung tiang (ton), A_p = Luas penampang ujung tiang (m^2), C_u = Kohesi tak terdrainase (ton/m^2), N_{c*} = Faktor daya dukung ujung.

Daya dukung selimut tiang (Q_s)

$$Q_s = \Sigma (A_s \cdot f_s) \quad (3)$$

keterangan : A_s = Luas selimut tiang (m^2) = $p \times \Delta L$, ΔL = Panjang segmen tiang (m), f_s = Gesekan selimut satuan (ton/m^2).

Berikut adalah beberapa metode yang dapat digunakan untuk menentukan selimut (f_s) dari tiang.

- Pada Tanah Pasir

$$f_s = K \cdot \sigma'_v \cdot \tan \delta \quad (4)$$

$$K_0 < K < 1.8 K_0$$

- Metode Alpha (Tomlinson)

$$f_s = \alpha \cdot C_u \quad (5)$$

keterangan : f_s = Gesekan selimut (ton/m²), α = Faktor adhesi, C_u = Kohesi tak terdrainase (ton/m²).

- Metode Beta (Metode tegangan efektif)

$$f_{s\text{ ave}} = \beta \cdot \sigma'_v \quad (6)$$

keterangan : $f_{s\text{ ave}}$ = Gesekan selimut rata - rata (ton/m²), $\beta = K \cdot \tan \theta_r$, θ_r = Sudut geser terdrainase dari sampel tanah yang teremas (*remolded*), $K = (1 - \sin \theta_r) \cdot OCR^{0.5}$, σ'_v = Tegangan vertikal efektif tanah.

Penentuan daya dukung aksial fondasi tiang pancang cara dinamik

1. Formula Hiley (a)

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h}{s + 0.5 \cdot (k_1 + k_2 + k_3)} \cdot \frac{W_r + n^2 \cdot W_p}{W_r + W_p} \quad (7)$$

keterangan : k_1 = dari tabel 1.1 (dengan memperkirakan nilai RUT), $k_2 = \frac{RUT \cdot L}{(A \cdot E)}$, k_3 = *Quake* dari tanah.

Cara perhitungan dilakukan dengan iterasi hingga konvergen.

2. Formula Hiley (b)

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h}{s + 0.5 \cdot C_x} \cdot \frac{W_r + n^2 \cdot W_p}{W_r + W_p} \quad (8)$$

Dimana C_x adalah pencatatan *rebound* dari pukulan terakhir.

3. Formula PCUBC

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h \cdot C_1}{s + C_2} \quad (9)$$

keterangan : $C_1 = \frac{W_r + k \cdot W_p}{W_r + W_p}$, $C_2 = \frac{RUT \cdot L}{(A \cdot E)}$, $k = 0.25$ (untuk tiang baja), $k = 0.1$ (untuk tiang lain)

Cara perhitungan dilakukan dengan iterasi hingga konvergen.

4. Formula Gates

$$RUT = 104.5 \cdot \sqrt{e_h \cdot E_h \cdot (2.4 - \log s)} \quad (10)$$

5. Formula *Modified* ENR

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h \cdot h}{s + 0.254} \cdot \frac{W_r + n^2 \cdot W_p}{W_r + W_p} \quad (11)$$

6. Formula Janbu

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h}{K_u \cdot s} \quad (12)$$

keterangan : $K_u = C_d \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}}\right)$, $C_d = 0.75 + 0.15 \cdot \frac{w_p}{w_r}$, $\lambda = \frac{e_h \cdot E_h \cdot L}{A \cdot E \cdot s^2}$

7. Formula Danish

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h}{s \cdot C_1} \quad (13)$$

keterangan : $C_1 = \sqrt{\frac{e_h \cdot E_h \cdot h \cdot L}{2 \cdot A \cdot E}}$

8. Formula *Canadian National Building Code* (CNBC)

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h \cdot C_1}{s + C_2 \cdot C_3} \quad (14)$$

keterangan : $C_1 = \frac{W_r + n^2 \cdot 0.5 \cdot W_p}{W_r + W_p}$, $C_2 = \frac{RUT}{2A}$, $C_3 = \frac{L}{E} + 0.0001$

Cara perhitungan dilakukan dengan iterasi hingga konvergen.

9. Formula Eytelwein

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h}{s + 0.1 \left(\frac{W_p}{W_r} \right)} \quad (15)$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

Konsep penelitian

Melakukan perhitungan daya dukung aksial fondasi tiang pancang dengan variasi formula statik, formula dinamik, dan pemodelan struktur program simulasi GRLWEAP relevan dengan output dari perangkat pengolah data hasil uji PDA proyek. Untuk mendapatkan semua parameter yang dibutuhkan, digunakan beberapa korelasi baku dengan tabel dan beberapa peraturan. Diawali dengan mengumpulkan literatur untuk melakukan analisis kapasitas daya dukung tiang pancang berupa buku-buku, jurnal, dan tutorial penggunaan simulasi program serta peraturan-peraturan yang digunakan. Data yang diperoleh dari studi literatur ini akan digunakan sebagai acuan dalam perhitungan guna memperoleh kapasitas daya dukung tiang pancang. Banyak literatur membahas mengenai perhitungan daya dukung gaya lateral dan sebagainya, namun penulis akan memfokuskan penelitian mengenai daya dukung gaya aksial tiang pancang.

Analisis dan pembahasan

Analisis data dari penelitian ini dilakukan dengan cara mengkomparasikan nilai daya dukung aksial fondasi tiang pancang dengan variasi formula statik, formula dinamik, dan pemodelan struktur formulasi rambatan gelombang dengan program simulasi GRLWEAP terhadap perangkat pengolah data hasil uji PDA proyek menggunakan grafik pada Microsoft Excel.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Studi kasus ini menggunakan spesifikasi sesuai dengan proyek yang berlokasi di kawasan Jakarta Utara untuk pembangunan jembatan dengan daya dukung rencana aktual sebesar 300 ton.

Parameter tiang

Spesifikasi yang digunakan sebagai data pengolahan adalah *spun pile* dengan diameter 600 mm, *thickness* 100 mm, *cross section area* 1570.8 cm², *toe area* 2827 cm², *perimeter* 1.885 cm, *concrete modulus* 34500 MPa, dan *specific weight* 23.6 kN/m³ untuk seluruh perhitungan *pile*.

Parameter *hammer* dan parameter *cushion*

Tabel 1. *Hammer* parameter

| <i>Hammer Parameter</i> | | | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|--|---|--------------------------|-------------------|
| <i>Hammer Type</i> (id) | <i>RAM</i> <i>Weight</i> (kN) | <i>Maximum</i> <i>Stroke</i> (m) | <i>Maximum</i> <i>Energy</i> (kN.m) | <i>Pressure</i> (kPa) | <i>Efficiency</i> |
| JUWEI DD56 | 53.92 | 3.00 | 156.92 | 10000 | 0.7 |
| JUWEI DD63 | 63.73 | 3.00 | 189.274 | 10000 | 0.5 |
| JUWEI DD65 | 63.73 | 2.97 | 189.274 | 10000 | 0.7 |
| PILECO D46-32 | 45.12 | 3.23 | 145.75 | 9825 | 0.8 |

Tabel 2. *Pile* Parameter

| <i>Pile Parameter</i> | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|---|---|---------------------------------|--|--|
| Diameter (mm) | Thickness (mm) | <i>Pile Area</i> (cm²) | | <i>Perimeter</i> (cm) | <i>Concrete</i> <i>Modulus</i> (MPa) | <i>Spesific</i> <i>Weight</i> (kN/m ²) |
| | | <i>Cross Area</i> <i>Section</i> | <i>Toe</i> <i>Area</i> | | | |
| 600 | 100 | 15708 | 2827 | 1.885 | 34500 | 25 |

Tabel 3. *Hammer cushion* parameter

| <i>Manufacturer's Recommended Driving System</i> | | | | | |
|--|-----------------------------------|--------------------------|--|--|---|
| <i>Hammer Type</i> (id) | <i>Area</i> (cm ²) | <i>Thickness</i> (mm) | <i>Helmet</i> <i>Weight</i> (kN) | <i>Modulus</i> <i>Elasticity</i> (MPa) | <i>Coefficient</i> <i>of</i> <i>Restitution</i> |
| JUWEI hammer didn't use any hammer cushion | | | | | |
| PILECO D46-32 | 2677.41 | 88.9 | 29.358 | 3240.5 | 0.8 |

Parameter tanah

Referensi jenis tanah yang digunakan sebagai data pengolahan merupakan data tanah proyek konstruksi jembatan di kawasan Jakarta Utara, didasari oleh hasil penelitian dari PT. Wijaya Karya Laboratorium Jasa Konstruksi. Data Penelitian yang diperoleh dalam bentuk *drilling log*, *layout*, *pile driving record*, *settlement diagram of driving*, dan *summary soil investigation* beberapa titik *pile* dari proyek konstruksi tersebut.

Tabel 4. *Soil data references* by PT. Wika Laboratorium

| Bored Hole A1-A48 | | | |
|--------------------------|-----------|-------|---------------------|
| Layer | Depth (m) | N-SPT | Soil Classification |
| 1 | 0 – 12 | 2 | Very Soft Clay |
| 2 | 12 – 14 | 60 | Very Dense Sand |
| 3 | 14 – 15 | 6 | Loose Sand |
| 4 | 15 – 27 | 15.8 | Stiff Clay |
| 5 | 27 – 29 | 5 | Loose Sand |
| 6 | 29 – 32 | 26 | Very Stiff Clay |
| 7 | 32 – 37 | 42.7 | Dense Sand |
| 8 | 37 – 39 | 24 | Medium Sand |
| 9 | 39 – 44 | 22.7 | Very Stiff Clay |
| 10 | 44 – 48 | 17 | Medium Sand |
| 11 | 48 – 50 | 30 | Very Stiff Clay |
| 12 | 50 – 52 | 41 | Dense Sand |
| 13 | 52 – 56 | 27.3 | Very Stiff Clay |

Analisis daya dukung aksial fondasi tiang pancang dengan cara statik

Perhitungan yang dilakukan berdasarkan data proyek pembangunan yang ditinjau yaitu pada titik *pile* A1-A48, dan P3-D43. Berikut merupakan contoh perhitungan formula statik Meyerhof (1976) pada kedalaman 31.5 m *pile* A1-A48:

Jenis lapisan tanah merupakan lanau (MH)

$$N = 38.75$$

$$N_K = 15 + 0.5 \cdot (N - 15) \text{ untuk } N > 15 = 15 + 0.5 \cdot (38.75 - 15) = 26.87$$

$$\phi = 37.5^\circ$$

$$N_{q*} = 200$$

Diperoleh berdasarkan pembacaan gambar faktor daya dukung ujung N_{c*} dan N_{q*} (Meyerhof, 1976).

$$\sigma'_v = 19.24$$

$$Q_s = (A_s \cdot f_s) = (1.884 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}) \cdot (2 \times 26.875) = 101.265 \text{ kN pada kedalaman 31.5 m}$$

$$Q_{sk} = 1742.04 \text{ kN} + 101.265 \text{ kN} = 1843.31 \text{ kN} = 184.31 \text{ ton}$$

$$Q_p = A_p \cdot q' \cdot N_{q*} = 0.2826 \text{ m}^2 \cdot 19.2465 \text{ ton/m}^2 \cdot 200 \text{ ton/m}^2 = 108.7812 \text{ ton}$$

$$Q_{Ult} = Q_p + Q_{sk} = 108.781 \text{ ton} + 184.31 \text{ ton} = 293.112 \text{ ton}$$

Jadi, nilai kapasitas daya dukung *ultimate* tiang pancang A1-A48 menurut formula statik Meyerhof (1976) sebesar 293.112 ton dengan *skin friction* sebesar 184.31 ton dan *end bearing* sebesar 108.781 ton pada kedalaman 31.5 m.

Analisis daya dukung aksial fondasi tiang pancang dengan cara dinamik

Perhitungan yang dilakukan berdasarkan data proyek pembangunan yang ditinjau yaitu pada titik *pile* A1-A48, A1-A91, P1-B37, P1-B43, P1-B76, P1-B80, P3-D43, dan P3-D86. Contoh perhitungan kapasitas daya dukung aksial diolah menggunakan data *pile* A1-A48 sebagai acuan dengan beberapa variasi metode dinamik antara lain:

1. Formula Hiley (a)

$$k_1 = 0.0009 \text{ m}$$

Diperoleh berdasarkan pembacaan tabel 2.4, tegangan pemancangan RUT/A pada kepala tiang pancang yang penulis asumsikan sebesar 1050 ton/m² dan tiang pancang beton pracetak dengan topi setebal 7.5 – 10 cm.

$$k_2 = \frac{RUT \cdot L}{(A \cdot E)} = \frac{1050 \text{ ton} \cdot 31.5 \text{ m}}{(0.15708 \text{ m}^2 \cdot 3538000 \text{ ton/m}^2)} = 0.059514 \text{ m}$$

$$k_3 = 0.0035 \text{ m}$$

$$\frac{0.85 \cdot 12.488 \text{ ton/m}}{0.004 \text{ m} + 0.5 \cdot (0.0009 \text{ m} + 0.059514 \text{ m} + 0.00035 \text{ m})} \cdot \frac{5.6 \text{ ton} + 0.4^2 \cdot 11.89 \text{ ton}}{5.6 \text{ ton} + 11.89 \text{ ton}}$$

$$RUT_1 = 126.6297 \text{ ton (Iterasi ke-1)}$$

$$RUT_{21} = 306.096 \text{ ton (Iterasi ke-21)}$$

$$RUT_{22} = 306.104 \text{ ton (Iterasi ke-22)}$$

Jadi, nilai kapasitas daya dukung *ultimate* tiang pancang A1-A48 menurut formula Hiley (a) sebesar 306.104 ton.

2. Formula Hiley (b)

$$C_x = 0.02 \text{ m}$$

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h}{s + 0.5 \cdot C_x} \cdot \frac{W_r + n^2 \cdot W_p}{W_r + W_p} = \frac{0.85 \cdot 12.488 \text{ ton/m}}{0.004 \text{ m} + 0.5 \cdot 0.02 \text{ m}} \cdot \frac{5.6 \text{ ton} + 0.4^2 \cdot 11.89 \text{ ton}}{5.6 \text{ ton} + 11.89 \text{ ton}}$$

$$= 325.232 \text{ ton}$$

Jadi, nilai kapasitas daya dukung *ultimate* tiang pancang A1-A48 menurut formula Hiley (b) sebesar 325.232 ton.

3. Formula PCUBC

$k = 0.1$, Diperoleh berdasarkan spesifikasi tiang yang digunakan yaitu tiang beton.

$$C_1 = \frac{W_r + k \cdot W_p}{W_r + W_p} = \frac{5.6 \text{ ton} + 0.1^2 \cdot 11.89 \text{ ton}}{5.6 \text{ ton} + 11.89 \text{ ton}} = 0.388163$$

RUT sebesar 300 ton untuk perhitungan C_2 pada iterasi awal.

$$C_2 = \frac{RUT \cdot L}{(A \cdot E)} = \frac{300 \text{ ton} \cdot 31.5 \text{ m}}{(0.15708 \text{ m}^2 \cdot 3538000 \text{ ton/m}^2)} = 0.017004 \text{ m}$$

$$RUT_1 = \frac{e_h \cdot E_h \cdot C_1}{s + C_2} = \frac{0.85 \cdot 12.488 \text{ ton/m} \cdot 0.388163}{0.004 \text{ m} + 0.017004 \text{ m}} = 196.1654 \text{ ton (Iterasi ke-1)}$$

$$RUT_{20} = 236.937 \text{ ton (Iterasi ke-20)}$$

$$RUT_{21} = 236.394 \text{ ton (Iterasi ke-21)}$$

Jadi, nilai kapasitas daya dukung *ultimate* tiang pancang A1-A48 menurut formula *Pasific Coast Uniform Building Code* (PCUBC) sebesar 236.394 ton.

4. Formula Gates

$$RUT = 104.5 \cdot \sqrt{0.85 \cdot 124.88 \text{ kN/m} \cdot (2.4 - \log 4)} = 1443.64 \text{ kN} = 144.364 \text{ ton}$$

Jadi, nilai kapasitas daya dukung *ultimate* tiang pancang A1-A48 menurut formula *Gates* sebesar 144.364 ton.

5. Formula Modified ENR

$$RUT = \frac{0.85 \cdot 12.488 \text{ ton/m} \cdot 0.223 \text{ m}}{0.4 \text{ m} + 0.254 \text{ m}} \cdot \frac{0.56 \text{ ton} + 0.4^2 \cdot 0.01189 \text{ ton}}{0.56 \text{ ton} + 0.01189 \text{ ton}} = 355.621 \text{ ton}$$

Jadi, nilai kapasitas daya dukung *ultimate* tiang pancang A1-A48 menurut formula *Modified ENR* sebesar 355.621 ton.

6. Formula Janbu

$$C_d = 0.75 + 0.15 \cdot \frac{W_p}{W_r} = 0.75 + 0.15 \cdot \frac{11.89 \text{ ton}}{5.6 \text{ ton}} = 1.068485$$

$$\lambda = \frac{e_h \cdot E_h \cdot L}{A \cdot E \cdot s^2} = \frac{0.85 \cdot 12.488 \text{ ton/m} \cdot 31.5 \text{ m}}{0.15708 \text{ m}^2 \cdot 3538000 \text{ ton/m}^2 \cdot 0.004^2} = 37.6031$$

$$K_u = C_d \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}} \right) = 1.068485 \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{37.6031}{1.068485}} \right) = 7.496548$$

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h}{K_u \cdot s} = \frac{0.85 \cdot 12.488 \text{ ton/m}}{7.496548 \cdot 0.004 \text{ m}} = 353.990 \text{ ton}$$

Jadi, nilai kapasitas daya dukung *ultimate* tiang pancang A1-A48 menurut formula Janbu sebesar 353.990 ton.

7. Formula Danish

$$C_1 = \sqrt{\frac{e_h \cdot E_h \cdot h \cdot L}{2 \cdot A \cdot E}} = \sqrt{\frac{0.85 \cdot 12.488 \text{ ton/m} \cdot 2.23 \text{ m} \cdot 31.5 \text{ m}}{2 \cdot 0.15708 \text{ m}^2 \cdot 3538000 \text{ ton/m}^2}} = 0.025901$$

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h}{s \cdot C_1} = \frac{0.85 \cdot 12.488 \text{ ton/m}}{0.004 \text{ m} \cdot 0.025901} = 355.003 \text{ ton}$$

Jadi, nilai kapasitas daya dukung *ultimate* tiang pancang A1-A48 menurut formula Danish sebesar 355.003 ton.

8. Formula *Canadian National Building Code* (CNBC)

$$C_1 = \frac{W_r + n^2 \cdot 0.5 \cdot W_p}{W_r + W_p} = \frac{5.6 \text{ ton} + 0.4^2 \cdot 0.5 \cdot 11.89 \text{ ton}}{5.6 \text{ ton} + 11.89 \text{ ton}} = 0.374567$$

RUT sebesar 100 ton untuk perhitungan C_2 pada iterasi awal.

$$C_2 = \frac{RUT}{2A} = \frac{100 \text{ ton}}{2 \cdot 0.15708 \text{ m}^2} = 318.3091$$

$$C_3 = \frac{L}{E} + 0.0001 = \frac{31.5 \text{ m}}{3538000 \text{ ton/m}^2} + 0.0001 = 0.000109$$

$$RUT_1 = \frac{e_h \cdot E_h \cdot C_1}{s + C_2 \cdot C_3} = \frac{0.85 \cdot 12.488 \text{ ton/m} \cdot 0.374567}{0.004 \text{ m} + 318.3091 \cdot 0.000109} = 102.831 \text{ ton (Iterasi ke-1)}$$

$$RUT_{40} = 101.5003 \text{ ton (Iterasi ke-40)}$$

$$RUT_{41} = 101.466 \text{ ton (Iterasi ke-41)}$$

Jadi, nilai kapasitas daya dukung *ultimate* tiang pancang A1-A48 menurut formula *Canadian National Building Code* (CNBC) sebesar 101.466 ton.

9. Formula Eytelwein

$$RUT = \frac{e_h \cdot E_h}{s + 0.1 \left(\frac{W_p}{W_r} \right)} = \frac{0.85 \cdot 12.488 \text{ ton/m}}{0.004 \text{ m} + 0.1 \cdot \frac{11.89 \text{ ton}}{5.6 \text{ ton}}} = 49.069 \text{ ton}$$

Jadi, nilai kapasitas daya dukung *ultimate* tiang pancang A1-A48 menurut formula Eytelwein sebesar 49.069 ton.

Analisis daya dukung aksial fondasi tiang pancang dengan program GRLWEAP

Spesifikasi tiang yang digunakan sebagai data pengolahan adalah spun pile dengan diameter 600 mm, thickness 100 mm, cross section area 1570.8 cm², toe area 2827 cm², perimeter 1.885 cm, concrete modulus 34500 MPa, dan specific weight 23.6 kN/m² untuk seluruh perhitungan pile.

File Information

Length: 55 m Auto Segments
 Penetration: 54 m Auto. S-Length
 Section Area: 1570.79 cm² Auto. S-St, Wt
 Elast Modulus: 34500 MPa
 Spec Weight: 23.6 kN/m³
 Toe Area: 2827.43 cm² 0 Splices
 Perimeter: 1.885 m File Type:
 Pile Size: 600 mm Unknown

Gambar 1. Tampilan pile information

Hammer ID 2001 6/22/2018

Open End Diesel Hammer Pressures Non Uniform Ram

Manufacturer: JUWEI Model: DD56 Hammer Type: Open End Diesel Units: SI

Rated Energy (kJ): 156.92

Ram
 Weight (kN): 53.9243 Stroke: Geometric Max. (m): 3 Impact Block Weight (kN): 17.0006
 Length (mm): 1077 Equiv. Rated (m): 2.91 Length (mm): 710
 Diameter (mm): 803.443 Efficiency: 0.5 Diameter (mm): 507
 No. of Segments: 2 C. o. R.: 0.9 Round Out (mm): 3.048

Combustion Chamber
 C-Stroke (mm): 622 Combustion Exp. Coef.: 1
 Area (cm²): 2018.9 Delay (sec.): -0.001
 Volume (dm³): 5.7756 Duration (sec.): 0.005

Atomized Injection Volumes
 Ignition (dm³): 0
 Fin. Comb. (dm³): 0

OK Cancel Apply Help

Gambar 2. Tampilan JUWEI DD56 hammer's information

Soil Profile Input for Static Analysis

Profile/Resistance Other Parameters SPT N vs. Depth

Layer: 1 of 28

Penetration: Water Table: 165 m
 Layer Top Depth: 0 m
 Layer Bottom Depth: 2 m
 Layer Thickness: 2 m

Soil Type
☐ Gravel Graded: Size:
☐ Sand: ☐ Silt: ☐ Clay
☐ Rock
☐ Peat or other w/o resistance Description:
☐ Other: ☐ Clay

SPT N Value: 2 <= 60 Intep.
 Unit Weight: 13 kN/m³

Update => R_u=5488.0, R_s=5060.5 kN

Disclaimer
 The GRLWEAP static analysis helps with filling of the S1 form. This analysis should only be used by engineers who are familiar with static pile analyses and their limitations. The user should compare results with those from other static analysis methods.

OK Cancel Help

Gambar 3. Tampilan soil profile input

Soil Profile Input for Static Analysis

Profile/Resistance Other Parameters SPT N vs. Depth

Layer: 1 of 28

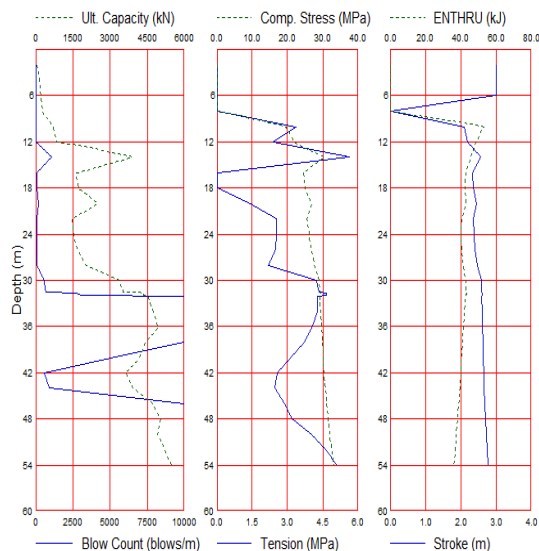
User Defined: Suggested:

Skin Quake: 2.54 2.540 mm
 Toe Quake: 2.54 9.989 mm
 Skin Damping: 0.65 0.656 s/m
 Toe Damping: 0.5 0.490 s/m
 Setup Factor: 2 2.00
 Setup Time: 168 168.00 hours
 Limit Distance: 2 2.00 m

Auto All Parameters for this Layer
☐ Auto Parameter(s) for All Layers
☐ Quake ☐ Skin ☐ Toe
☐ Damping ☐ Skin ☐ Toe
☐ Limit Distance ☐ Setup
 Auto Selected Parameter for All Layers
☐ Auto All Param. for All Layers
☐ Reset All Param. for All Layers

OK Cancel Help

Gambar 4. Tampilan other parameters soil profile



Geotech Engineering
A1 - A48 JUWEI DD56

2018 Jun 26
GRLWEAP(TM) Version 2005

Gain/Loss 1 at Shaft and Toe 1.000 / 1.000

| Depth m | Ultimate Capacity kN | Friction kN | End Bearing kN | Blow Count blows/m | Comp. Stress MPa | Tension Stress MPa | Stroke m | ENTHRU kJ |
|---------|----------------------|-------------|----------------|--------------------|------------------|--------------------|----------|-----------|
| 2.0 | 43.3 | 12.7 | 30.5 | 0.0 | 0.000 | 0.000 | 3.00 | 0.0 |
| 4.0 | 154.1 | 41.0 | 113.1 | 0.0 | 0.000 | 0.000 | 3.00 | 0.0 |
| 6.0 | 206.1 | 93.0 | 113.1 | 0.0 | 0.000 | 0.000 | 3.00 | 0.0 |
| 8.0 | 271.3 | 158.2 | 113.1 | -1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.0 |
| 10.0 | 700.9 | 242.9 | 458.0 | 14.9 | 19.693 | -3.373 | 2.10 | 52.9 |
| 12.0 | 862.5 | 404.5 | 458.0 | 22.9 | 21.823 | -2.397 | 2.18 | 48.6 |
| 14.0 | 3895.6 | 502.7 | 3392.9 | 1107.4 | 30.482 | -5.819 | 2.55 | 45.6 |
| 16.0 | 1630.6 | 660.3 | 961.3 | 68.0 | 24.537 | 0.000 | 2.32 | 42.8 |
| 18.0 | 1726.8 | 765.5 | 961.3 | 74.2 | 24.986 | 0.000 | 2.34 | 42.1 |
| 20.0 | 2500.4 | 1030.1 | 1470.3 | 186.4 | 26.887 | -1.422 | 2.45 | 42.8 |
| 22.0 | 1465.4 | 1190.6 | 274.8 | 56.4 | 25.543 | -2.521 | 2.34 | 40.7 |
| 24.0 | 1537.5 | 1415.4 | 122.2 | 60.6 | 26.232 | -2.535 | 2.37 | 40.1 |
| 26.0 | 1700.0 | 1577.8 | 122.2 | 71.3 | 26.874 | -2.506 | 2.41 | 40.4 |
| 28.0 | 2030.0 | 1747.3 | 282.7 | 99.4 | 27.645 | -2.165 | 2.47 | 41.0 |
| 30.0 | 3389.6 | 1919.4 | 1470.3 | 565.4 | 29.029 | -4.238 | 2.58 | 42.8 |
| 31.0 | 3480.3 | 2010.1 | 1470.3 | 631.1 | 29.222 | -4.315 | 2.59 | 42.8 |
| 31.5 | 3527.1 | 2056.8 | 1470.3 | 662.1 | 29.188 | -4.346 | 2.59 | 42.6 |
| 31.6 | 4327.9 | 2066.0 | 2261.9 | 2802.6 | 29.445 | -4.642 | 2.61 | 43.0 |
| 31.7 | 4337.1 | 2075.2 | 2261.9 | 2821.0 | 29.504 | -4.645 | 2.61 | 43.1 |
| 31.8 | 4346.4 | 2084.4 | 2261.9 | 2977.2 | 29.427 | -4.643 | 2.61 | 42.9 |
| 31.9 | 4355.7 | 2093.7 | 2261.9 | 3011.3 | 29.462 | -4.646 | 2.61 | 43.0 |
| 32.0 | 4534.6 | 2103.0 | 2431.6 | 9999.0 | 29.254 | -4.281 | 2.59 | 42.5 |
| 34.0 | 4729.9 | 2298.3 | 2431.6 | 9999.0 | 29.408 | -4.268 | 2.60 | 41.5 |
| 36.0 | 4941.5 | 2510.0 | 2431.6 | 9999.0 | 29.675 | -4.073 | 2.61 | 41.9 |
| 38.0 | 4439.4 | 2743.0 | 1696.5 | 9999.0 | 29.871 | -3.724 | 2.62 | 40.9 |
| 40.0 | 4194.7 | 3007.2 | 1187.5 | 5055.5 | 30.101 | -3.108 | 2.63 | 40.5 |
| 42.0 | 3635.6 | 3284.4 | 351.2 | 579.3 | 30.326 | -2.544 | 2.64 | 39.8 |
| 44.0 | 3933.6 | 3567.2 | 366.4 | 935.5 | 30.734 | -2.454 | 2.66 | 39.4 |
| 46.0 | 4714.8 | 3866.6 | 848.2 | 9999.0 | 31.096 | -2.896 | 2.68 | 38.7 |
| 48.0 | 5030.6 | 4182.4 | 848.2 | 9999.0 | 31.580 | -3.193 | 2.69 | 38.0 |
| 50.0 | 4934.7 | 4476.7 | 458.0 | 9999.0 | 31.995 | -4.027 | 2.71 | 37.2 |
| 52.0 | 5205.2 | 4777.7 | 427.5 | 9999.0 | 32.603 | -4.627 | 2.74 | 36.7 |
| 54.0 | 5488.0 | 5060.5 | 427.5 | 9999.0 | 33.148 | -5.090 | 2.76 | 35.9 |

Refusal occurred; no driving time output possible

Gambar 5. Hasil output perhitungan analisis hammer JUWEI DD56


Gambar 5 menunjukkan bahwa pada kedalaman 30 m, terjadi peningkatan pada nilai *ultimate capacity* sebesar 3389.6 kN (1919.4 kN *friction* dan 1470.3 kN *end bearing*) jika dibandingkan terhadap nilai *ultimate capacity* pada kedalaman 28 m sebesar 2030 kN (1747.3 kN *friction* dan 282.7 kN *end bearing*). Pada kedalaman 30 m, *pile* berpijak pada tanah keras dikarenakan sudah tercapainya nilai kapasitas rencana sebesar 3000 KN dan *ultimate capacity* terus mengalami peningkatan.

Tabel 5. Hasil perhitungan daya dukung
aksial terhadap hasil uji PDA

| | A1 - A48 | A1 - A91 | P1 - B37 | P1 - B43 | P1 - B76 | P1 - B80 | P3 - D43 | P3 - D86 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Hiley A | 306.104 | 305.305 | 301.204 | 301.525 | 298.608 | 314.140 | 356.976 | 266.872 |
| Hiley B | 325.232 | 317.901 | 266.901 | 266.340 | 264.624 | 286.908 | 381.922 | 233.566 |
| Gates | 144.364 | 141.751 | 141.496 | 141.338 | 141.338 | 147.169 | 164.680 | 127.560 |
| Modified ENR | 355.621 | 330.746 | 287.524 | 290.847 | 290.775 | 341.810 | 519.413 | 187.123 |
| Janbu | 353.990 | 353.148 | 345.129 | 345.890 | 342.831 | 359.306 | 403.750 | 308.236 |
| Danish | 355.003 | 358.185 | 361.602 | 366.319 | 363.931 | 368.021 | 378.419 | 359.305 |
| CNBC | 101.466 | 100.571 | 102.526 | 101.529 | 101.044 | 105.376 | 118.131 | 91.967 |
| Eytelwein | 49.069 | 48.830 | 52.684 | 51.199 | 50.439 | 54.687 | 68.568 | 43.000 |
| PCUBC | 236.394 | 237.027 | 233.837 | 233.296 | 230.738 | 241.466 | 270.261 | 209.555 |
| Meyerhof 1976 | 293.11 | - | - | - | - | - | 244.95 | - |
| GRLWEAP | 352.71 | - | - | - | - | - | 366.65 | - |
| PDA | 350.1 | 310.3 | 317.1 | 401.1 | 228.2 | 314.9 | 368.3 | 402.3 |

Tabel 6. Persentase selisih hasil perhitungan
daya dukung aksial terhadap hasil uji PDA

| PERSENTASE (%) | A1 - A48 | A1 - A91 | P1 - B37 | P1 - B43 | P1 - B76 | P1 - B80 | P3 - D43 | P3 - D86 |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Hiley A | -12.57 | -1.61 | -5.01 | -24.83 | 30.85 | -0.24 | -3.07 | -33.66 |
| Hiley B | -7.10 | 2.45 | -15.83 | -33.60 | 15.96 | -8.89 | 3.70 | -41.94 |
| Gates | -58.76 | -54.32 | -55.38 | -64.76 | -38.06 | -53.26 | -55.29 | -68.29 |
| Modified ENR | 1.58 | 6.59 | -9.33 | -27.49 | 27.42 | 8.55 | 41.03 | -53.49 |
| Janbu | 1.11 | 13.81 | 8.84 | -13.76 | 50.23 | 14.10 | 9.63 | -23.38 |
| Danish | 1.40 | 15.43 | 14.03 | -8.67 | 59.48 | 16.87 | 2.75 | -10.69 |
| CNBC | -71.02 | -67.59 | -67.67 | -74.69 | -55.72 | -66.54 | -67.93 | -77.14 |
| Eytelwein | -85.98 | -84.26 | -83.39 | -87.24 | -77.90 | -82.63 | -81.38 | -89.31 |
| PCUBC | -32.48 | -23.61 | -26.26 | -41.84 | 1.11 | -23.32 | -26.62 | -47.91 |
| Meyerhof 1976 | -16.28 | - | - | - | - | - | -33.49 | - |
| GRLWEAP | 0.75 | - | - | - | - | - | -0.45 | - |

 = Berada di dalam rentang $\pm 5\%$ dari PDA

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Tabel 6 menyatakan bahwa persentase selisih hasil perhitungan daya dukung aksial fondasi tiang pancang bervariasi dan memiliki konsistensi yang berbeda – beda pada setiap perhitungan titik *pile*. Hasil daya dukung aksial program simulasi GRLWEAP merupakan hasil yang paling relevan terhadap hasil uji PDA dengan persentase kesalahan 0.75% pada titik *pile* A1–A48 dan 0,45% pada titik *pile* P3-D43.
2. Penggunaan formula program GRLWEAP direkomendasikan dalam perhitungan kapasitas daya dukung aksial karena memiliki tingkat akurasi mencapai rentang $\pm 5\%$ jika dibandingkan terhadap hasil uji PDA / *Pile Driving Analyzer* proyek jembatan yang berlokasi di Jakarta Utara ini.
3. Hasil perhitungan kapasitas daya dukung aksial yang diperoleh dari beberapa metode empiris berbeda – beda dikarenakan adanya perbedaan parameter yang digunakan dalam perhitungan masing – masing metode, banyaknya asumsi, korelasi baku dan penyerdehanaan.
4. Penggunaan program simulasi GRLWEAP dapat memudahkan proses simulasi serta mengurangi resiko kegagalan konstruksi yang dapat menimbulkan dampak kerugian biaya, material, dan waktu. Dapat dilihat berdasarkan nilai *compression stress* dan *tension stress* yang diperoleh berdasarkan perhitungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, Joseph E. 1989. *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Coduto, D.P., William A. Kitch dan Man-chu Ronald Yeung. 1994. *Foundation Design Principles and Practices*. London: Pearson Education Ltd.
- Coduto, D.P., William A. Kitch dan Man-chu Ronald Yeung. 2001. *Foundation Design Principles and Practices Second Edition*. London: Pearson Education Ltd.
- Das, Braja M. 2007. *Principles of Foundation Engineering Sixth Edition*. Canada: Thomson Canada Limited.
- Das, Braja M. 2011. *Geotechnical Engineering Handbook*. USA: J.Ross Publishing, Inc.
- Goble Rausche Likins and Associates, Inc. 2005. *GRLWEAP™ Wave Equation Analysis of Pile Driving: Procedures and Models Version 2005*. USA: Pile Dynamics, Inc.
- Hardiyatmo, Hary Christady. 2008. *Teknik Pondasi 2*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Hardiyatmo, Hary Christady. 2011. *Analisis dan Perancangan Fondasi I. Edisi Kedua*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Rahardjo, P.P., 2005. *Manual Pondasi Tiang. Edisi Ketiga*. Bandung: Geotechnical Engineering Center.
- Sandjaja, Gregorius. 2015. *Diktat Pondasi Tiang II*. Jakarta: Universitas Tarumanagara.
- Terzaghi, Karl dan Ralph B. Peck. 1987. *Mekanika Tanah dalam Praktek Rekayasa Jilid 1. Edisi Kedua*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Terzaghi, Karl dan Ralph B. Peck. 1991. *Mekanika Tanah dalam Praktek Rekayasa Jilid -2. Edisi Kedua*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Tomlinson, M.J., 2001, *Foundation Design and Construction Seventh Edition*, USA: Addison-Wesley Longman Ltd.
- Tomlinson, M.J., 2008, *Pile Design and Construction Practice Fifth Edition*, USA: Taylor & Francis.