

# PERILAKU TIANG BOR PENOPANG INFRASTRUKTUR PADA TANAH LUNAK AKIBAT BEBAN STATIK

Wimpie Agoeng N. Aspar

Pusat Teknologi Industri dan Sistem Transportasi

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi

E-mail: wimpieaspar2001@yahoo.com

## Abstract

*Bored piles have been used to support transportation infrastructures (offices, a terminal building, power house, warehouses and workshop) in a harbor. The bored piles were penetrated into mostly old alluvial deposits and dilluvial deposits of very stiff marine clay with traces of shell debris. A bored pile was tested as part of this research program to verify the accuracy of the predicted pile capacities. The proposed static prediction capacity methods include Meyerhof,  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\lambda$  methods. The results of the analysis show that Meyerhof method (1951) with inputs of laboratory test data provides closely agreement with static loading test results. The other methods give somewhat conservative prediction. This paper discusses bearing capacity analysis of bored piles based on soil characteristics and static loading test results. Results of the analysis indicate that the bored piles capable of resisting load transmitted from the upper structure. The research will be of interest to many practicing engineers using this kind of piles.*

**Katakunci:** pondasi, tiang bor, karakteristik tanah, uji benan statis, uji penetrasi standard, daya dukung tiang statis

## 1. PENDAHULUAN

Pengembangan konstruksi infrastruktur transportasi yang sangat mendesak tidak bisa dihindari untuk mengakomodasi pertumbuhan aktifitas bongkar-muat barang dan pelayanan penumpang di suatu pelabuhan. Aktifitas konstruksi infrastruktur transportasi yang perlu dipertimbangkan untuk dikembangkan adalah pembangunan pergudangan sementara dan permanen, perbengkelan dan perluasan terminal penumpang. Akan tetapi, pelaksanaan konstruksi prasarana transportasi tersebut sedikit menghadapi hal-hal yang harus diperhitungkan dengan teliti. Areal pengembangan yang tersedia relatif sangat terbatas dan kondisi tanah relatif sangat lunak berupa endapan aluvial dan lempung marina yang relatif sangat tebal. Disamping itu, aktifitas konstruksi tidak boleh mengganggu aktifitas harian yang sudah ada dan sedang berlangsung. Dengan demikian, diperlukan pemilihan konstruksi yang sesuai dengan kondisi di lapangan khususnya konstruksi pondasi untuk mendukung konstruksi di atasnya.

Pemilihan pondasi tiang bor dilakukan mengingat beban dari struktur atas relatif sangat besar. Selain itu, keberadaan tanah keras yang akan menahan pondasi tiang relatif sangat dalam. Keberadaan infrastruktur transportasi yang sudah

ada di sekitar lokasi kegiatan sangat tidak mendukung bila pemancangan pondasi tiang dilakukan. Gangguan terhadap keberadaan pondasi infrastruktur transportasi yang telah ada menjadi kontra produktif dengan pemancangan tiang. Dengan demikian pemilihan pondasi tiang bor menjadi alternatif yang lebih sesuai. Namun demikian, kapasitas daya dukung tiang bor perlu perhitungan lebih teliti mengingat kondisi geoteknis bawah permukaan. Oleh karena itu, pengujian pembebanan tiang bor di lapangan akan sangat membantu dalam memprakirakan kapasitas daya dukung tiang bor. Daya dukung yang sebenarnya harus dibuktikan dengan minimal satu uji pembebanan statis terutama pada pondasi untuk struktur yang pembebanannya kritis. Dengan diperolehnya daya dukung tiang bor dari hasil uji pembebanan statis dan membandingkannya dengan perhitungan berdasarkan rumus-rumus statis, maka spesifikasi empiris dapat ditetapkan untuk tiang produksi selanjutnya (Lambe dan Whitman, 1969).

Untuk menyelesaikan kesulitan tersebut dilakukan studi atas data masukan pada tahap perencanaan: parameter hasil uji laboratorium mekanika tanah dan pengujian penetrasi standard yang sering dikenal dengan *SPT (Standard Penetration Test)*. Pada tahap uji beban dilakukan analisis atas berbagai metode evaluasi secara

grafis dan evaluasi secara analitis atas hasil pengujian pembebanan di lapangan dengan skala penuh. Hasil analisis dibandingkan dengan daya dukung yang sebenarnya yang diperoleh dari hasil uji pembebanan sehingga akan diperoleh tingkat ketepatan dan dipilih yang paling optimal

Maksud penelitian ini adalah untuk menganalisis daya dukung tiang bor berdasarkan hasil uji beban statis dan karakteristik tanah menggunakan metode statis. Sedangkan tujuannya adalah mengevaluasi agar rancangan yang dihasilkan memenuhi kriteria disain dengan memperhatikan faktor pembebanan yang terjadi secara statik dan mampu menahan beban rencana. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai dasar untuk kriteria disain produksi tiang bor.

## 2. BAHAN DAN METODE

Untuk dapat melakukan analisis dan pembahasan sesuai dengan yang diharapkan dalam penelitian ini diperlukan data pendukung berupa kondisi tanah, sebagai masukan dalam analisis daya dukung statik pondasi tiang bor. Data kondisi tanah didapatkan dengan melakukan investigasi di lapangan dan pengujian di laboratorium. Parameter data tanah tersebut digunakan untuk melakukan analisis perilaku pondasi tiang bor.

### 2.1. Bahan

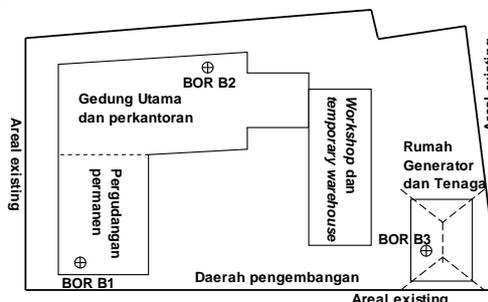
Bahan yang digunakan untuk pengujian ini adalah tiang bor berikut perlengkapannya. Tiang bor uji terbuat dari beton bertulang dengan diameter 150 cm dan panjang 40,50 m. Tiang uji diletakkan di tengah-tengah antara tiang penopang dan balok beton penyangga blok beton. Balok beton penopang blok beton pemberat (*counter weight*) disangga oleh 6 (enam) tiang bor berdiameter masing-masing 80 cm. Blok beton pemberat diletakkan di atas balok sekunder WF 70cm x 30cm x 1,3cm x 2,4cm.

### 2.2. Penelitian di Lapangan

Secara umum maksud penyelidikan tanah ini untuk memberikan informasi mengenai perilaku teknis tanah dalam rangka mendapatkan parameter tanah. Untuk maksud penelitian ini dilakukan pengeboran sebanyak 1 (satu) titik bor dengan kedalaman 80 m dan 2 (dua) titik bor kedalaman 50 m). Lokasi titik-titik bor dapat dilihat pada Gambar 1.

Pengujian lapangan dilakukan dengan pengeboran dan pengambilan sampel tanah tak terganggu. Contoh tanah sepanjang lubang bor diambil sebagai hasil pemboran dan setelah dikeluarkan dari tabung, contoh tanah kemudian

disimpan secara berurutan menurut kedalamannya dalam peti contoh inti yang mempunyai panjang 1 m dan dapat memuat 5 m contoh inti. Pada peti contoh ini, contoh inti yang tidak terambil dan contoh tanah yang dipakai untuk keperluan pengujian laboratorium, ditandai sesuai dengan kedalamannya dengan potongan kayu sebagai pengganti.



Gambar 1. Lokasi titik-titik bor

Sambil melakukan pengeboran dilakukan pengujian kepadatan tanah dengan uji penetrasi standard (*SPT*). *SPT* dilakukan pada interval 1,00 meter kedalamannya kecuali pada lokasi pengambilan sampel tanah tak terganggu. Uji penetrasi standard (*SPT*) dilakukan dengan alat *cable hoisted hammer*. Pengujian ini mengikuti standar ASTM D1586-08a (2008). Pengujian dilakukan dengan menjatuhkan palu (*hammer*) seberat 63 kg (0,62 kN) secara jatuh bebas melalui suatu tali (*cable hoisted hammer*) dengan ketinggian 76 cm. Energi yang dihasilkan dari gerak jatuh bebas ini digunakan untuk memukul konus masuk ke dalam tanah. Besarnya energi yang disalurkan melalui tali ini menunjukkan faktor yang berpengaruh paling besar terhadap angka *N-SPT* (Kovacs dan Salomone, 1982). Jumlah pukulan atau *N-SPT* dipertimbangkan sebagai hambatan penetrasi pukulan per 30 cm.

Selain dilakukan uji penetrasi standard (*SPT*) pada semua titik bor, uji tekanan menggunakan elastometer meter juga dilakukan. Uji di tempat ini yang biasa disebut *Pressure Meter Test (PMT)*. *PMT* dilakukan sebanyak 1 (satu) kali pengujian pada lubang bor inti (B2) dengan kedalaman 9,50 meter. *PMT* dilaksanakan untuk mengetahui karakteristik deformasi lapisan tanah/batuan, seperti tekanan tanah pada kondisi netral ( $\sigma_0$ ), tekanan leleh ( $\sigma_y$ ), koefisien horisontal reaksi tanah dasar ( $K_m$ ), dan modulus elastisitas ( $E$ ).

### 2.3. Pengujian di Laboratorium

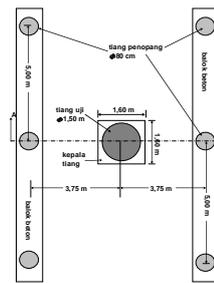
Pengujian di laboratorium dilakukan dengan menggunakan peralatan dan metode standard yang berlaku untuk mengetahui indeks perilaku tanah, klasifikasi tanah, parameter kekuatan geser tanah dan parameter konsolidasi. Metode pengujian laboratorium yang dilakukan meliputi pengujian

kadar air alami, *Atterberg limit*, *Unconsolidated* dan *Consolidated Undrained triaxial Test*, dan pengujian konsolidasi.

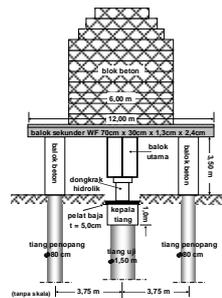
Pengujian kadar air alami dilakukan untuk mengetahui kadar air contoh tanah tak terganggu dengan mengikuti prosedur standar ASTM D2216-09 (2009). Pengujian *Atterberg limit* dilakukan untuk mengetahui respon tanah terhadap air yang meliputi batas cair, batas plastik dan indeks plastisitas tanah. Pengujian ini mengacu pada prosedur standar ASTM D4318-09 (2009). Tujuan dilakukannya pengujian *unconsolidated undrained Triaxial* adalah untuk mendapatkan parameter kekuatan tanah dalam kondisi *undrained*. Pengujian ini mengacu pada prosedur standar ASTM D2850-03a (2007). Sedangkan *consolidated undrained Triaxial test* dilakukan untuk memperoleh parameter kekuatan tanah setelah mengalami konsolidasi dan kemudian dimampatkan dalam kondisi *undrained*. Parameter yang didapat dari pengujian ini dapat digunakan untuk analisis dengan menggunakan konsep tegangan total dan efektif. Untuk pengujian *Triaxial* ini contoh tanah diberi tekanan berdasarkan pada kedalaman dimana contoh tanah tak terganggu ini didapat. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D4767-04 (2008). Pengujian konsolidasi dilakukan untuk memperoleh nilai koefisien konsolidasi ( $c_v$ ) dan indeks pemampatan ( $c_c$ ) yang selanjutnya dipergunakan untuk memprediksi lama waktu konsolidasi dan besarnya penurunan tanah akibat beban di atasnya. Pengujian ini dilakukan mengikuti standard prosedur ASTM D2435-04 (2008).

## 2.4. Pengujian Pembebanan Statis

Untuk dapat melaksanakan pengujian pembebanan statis secara praktis, maka pelaksanaan pengujian mengikuti rekomendasi yang disarankan oleh Crowther (1988). Setting pelaksanaan pengujian dapat dilihat pada Gambar 2. Pembebanan dilakukan menggunakan dongkrak hidrolik yang diletakkan di atas kepala tiang yang dilapisi pelat baja setebal 5,0 cm dan diletakkan di bawah balok utama yang terbuat dari baja. Pengukuran pembebanan dicatat melalui *load cell* dan dongkrak hidrolik. Sedangkan penurunan dicatat dari cakram pengukur (*dial gage*) sesuai dengan besarnya beban yang diterapkan.



a. Skematik *lay-out* pengujian



b. Potongan melintang A – A

Gambar 2. Seting uji pembebanan statis

Pelaksanaan pengujian pembebanan statis dilakukan sesuai dengan prosedur ASTM D1143-M-07e1 (2007). Hasil uji pembebanan statis selanjutnya diplot dalam grafik pembebanan-penurunan untuk bisa langsung dievaluasi saat terjadi regangan ataupun kapasitas dukung batasnya, dan dievaluasi pada saat pengujian terjadi keruntuhan (*failure*). Untuk dapat menginterpretasikannya dapat dilakukan dengan membuat beberapa plot yang lebih detil dengan cara Davisson (1973), log P dan log S (JSF 1811, 1993) ataupun dengan cara rumus-rumus analitis.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis perhitungan daya dukung tiang dilakukan dengan menerapkan rumus-rumus statis. Persamaan untuk menentukan daya dukung tiang statik mengikuti ketentuan yang direkomendasikan oleh Meyerhof (1951, 1956, 1959 dan 1976) untuk tanah kohesif dan non-kohesif.

Untuk tiang dalam pasir, dimana  $c = 0$ , maka daya dukung ujung tiang bor adalah

$$Q_p = A_p q_p = A_p q' N_q^* \quad (1)$$

$A_p$  adalah luas penampang tiang bor. Akan tetapi, harga  $Q_p$  tidak boleh melebihi harga batas, atau  $A_p q_h$ , jadi

$$Q_p = A_p q' N_q^* \leq A_p q_h \quad (2)$$

Harga batas untuk hambatan ujung adalah

$$q_h \text{ (kN/m}^2\text{)} = 50 N_q^* \text{ tg } \phi \quad (3)$$

dimana  $\phi$  adalah sudut geser dalam tanah pada lapisan daya dukung.

Berdasarkan pengamatan lapangan, Meyerhof (1956 dan 1976) menyarankan bahwa hambatan ujung ultimit,  $q_p$ , dalam tanah berbutir homogen dimana  $L = L_b$ , bisa diperoleh dari angka penetrasi standard ( $N-SPT$ ) sebagai berikut

$$q_p \text{ (kN/m}^2\text{)} = 40 N_{kor} \quad L/D \leq 400 N_{kor} \quad (4)$$

dimana  $N_{kor}$  adalah angka  $N-SPT$  rata-rata yang sudah terkoreksi di ujung tiang bor.

Untuk tiang bor yang menembus dalam lempung jenuh pada kondisi takteralirkan ( $\phi = 0$ ),

$$Q_p = N_c c_u A_p = 9 c_u A_p \quad (5)$$

dimana  $c_u$  adalah kohesi tanah pada kondisi takteralirkan yang berada di bawah ujung tiang.

Daya dukung selimut tiang pada tanah kohesif dihitung menggunakan metode  $\lambda$  dan mengikuti rumusan yang disarankan oleh Vijayvergiya dan Focht (1972). Metode lain yang digunakan untuk menghitung hambatan kulit pada tanah lempung adalah metode  $\alpha$  (Das, 1999). Untuk tanah lempung jenuh, prediksi hambatan kulit digunakan metode  $\beta$  (Burland, 1973). Pada lempung jenuh, tekanan air pori di sekitar tiang bor akan naik, untuk itu gesekan kulit tiang bor dihitung berdasarkan parameter tegangan efektif lempung. Dalam hal ini data masukan yang diperlukan untuk perhitungan secara statis daya dukung tiang bor adalah :

- data perilaku teknis tanah dari hasil uji laboratorium mekanika tanah, dan
- data uji penetrasi standard ( $SPT$ ).

### 3.1 Hasil Pengujian di Lapangan

Pemboran inti dilaksanakan dengan tujuan untuk mendapatkan data geologi dan geoteknik lapisan tanah bawah permukaan di daerah penelitian. Pekerjaan pemboran inti dilakukan dengan menggunakan mesin bor putar hidrolik, yang masing-masing dilengkapi dengan pompa air, *core barrel* dan perlengkapan penunjang lainnya.

Pada pelaksanaannya, pemboran menembus lapisan tanah aluvial yang mudah runtuh. Untuk

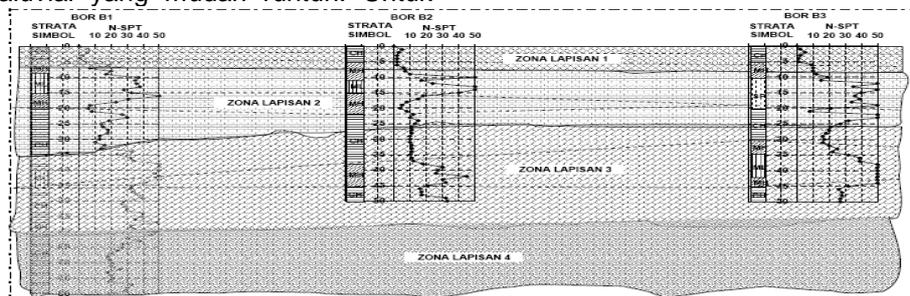
mencegah runtuhnya dinding lubang bor, pipa pelindung (*casing*) berdiameter 89 mm diturunkan sampai dasar lubang bor mengikuti kemajuan pemboran. Selama pekerjaan pemboran inti berlangsung, muka air tanah (MAT) dalam lubang bor diamati setiap pagi sebelum pemboran dimulai dan pada sore hari sesudah pemboran selesai pada hari yang bersangkutan.

Berdasarkan hasil penyelidikan tanah tersebut, dibuat profil tanah bawah permukaan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Mengacu pada profil tanah tersebut, lapisan tanah bawah permukaan yang menyusun daerah penelitian sampai dengan dasar lubang bor, dapat diklasifikasikan menjadi 4 (empat) zona lapisan utama.

#### Zona Lapisan Pertama

Zona lapisan pertama memiliki kepadatan yang dinilai dengan angka  $N-SPT$  kurang dari 10. Standard korelasi nilai  $N-SPT$  mengindikasikan bahwa tanah tersebut relatif lunak (Bowles, 1997) dan memiliki sifat mampu mampat (*compressible*) sangat tinggi. Zona lapisan pertama pada umumnya didominasi oleh lapisan tanah urug dan deposit endapan muda. Zona ini menempati lapisan bagian atas dari daerah penelitian dan dijumpai pada semua titik-titik mulai dari permukaan sampai kedalaman kira-kira 4,00 meter di titik B2 sampai 6,00 meter di titik B3.

Zona lapisan ini di bagian permukaan berupa tanah urug dengan ketebalan berkisar 1,75 sampai dengan 3,00 meter dan terdiri dari lempung lateritik kelanauan kemerahan dan sebagian lempung lunak keabu-abuan. Zona lapisan ini di bagian bawahnya berupa lapisan deposit muda yang terdiri dari lempung tufaan berlanau dengan konsistensi rendah. Di bagian bawahnya lagi mendekati zona lapisan kedua berupa lapisan lempung kaku cukup konsisten dengan ketebalan kira-kira 4,00 sampai dengan 6,00 meter. Karena lapisan bagian bawah sudah terbebani oleh lapisan urugan lebih dari 30



Gambar 3. Profil melintang stratigrafi tanah

tahun, maka tanah pada lapisan ini mengalami kondisi terlalu terkonsolidasi (*overconsolidated*).

#### Zona Lapisan Kedua

Pada zona lapisan kedua ini deposit endapan terdiri dari lapisan-lapisan campuran silih berganti antara lapisan lanau vulkanik dan bekas-bekas

pasir yang tersementasi. Deposit endapan ini secara lokal dikenal dengan nama lapisan "lahar". Ketebalan lapisan ini mulai 15,0 meter pada titik B3 dan selanjutnya menebal sampai 25 meter pada titik B2. Konsistensi tanah pada lapisan zona ini berkisar dari sangat kaku sampai sangat keras dan padat. Hasil pengujian penetrasi standar (*SPT*) memberikan nilai *N-SPT* berkisar antara 10 sampai 20 pada kedalaman 8,00 meter sampai 12,00 meter di bawah permukaan tanah. Akan tetapi nilai *N-SPT* meningkat sampai 50 pada kedalaman 12,00 meter sampai 20,00 meter di bawah permukaan tanah. Khusus pada titik Bor B1 dan B2, nilai *N-SPT* turun drastis sampai 10 setelah kedalaman 15,00 meter di bawah muka tanah.

Mengacu pada hasil pengujian *unconfined compressive tests* dan *unconsolidated undraied triaxial compressive tests* yang dilaksanakan pada sampel tanah tak terganggu, memberikan nilai *unconfined compressive strength*,  $q_u$  berkisar 7,015 kg/cm<sup>2</sup> (688,17 kPa) dan kohesi tak teralirkan berkisar antara 0,20 kg/cm<sup>2</sup> sampai 0,60 kg/cm<sup>2</sup> (16,62 – 59,00 kPa). Sudut geser dalam adalah berkisar 12<sup>o</sup>. Hasil pengujian *PMT* yang dilakukan di titik bor B2 pada kedalaman 9,50 m memberikan nilai modulus reaksi tanah dasar ( $K_m$ ) sebesar 32,70 kg/cm<sup>3</sup> dan nilai modulus elastisitas ( $E_m$ ) sebesar 159,10 kg/cm<sup>2</sup> (920,00 MPa), tekanan saat istirahat sebesar 0,55 kg/cm<sup>2</sup> (54,00 kPa) dan tekanan luluh sebesar 8,14 kg/cm<sup>2</sup> (798,53 kPa).

### Zona Lapisan Ketiga

Zona lapisan ketiga terdiri dari lapisan lempung lanau bercampur dengan sisa-sisa bahan organik dan sebagian lagi tersementasi. Konsistensi lapisan lempung ini berkisar dari sangat kaku hingga keras. Zona lapisan ketiga ini relatif cukup tebal dengan ketebalan 8,00 meter sampai dengan 40,00 meter dan berada pada kedalaman 25 meter di bawah permukaan tanah.

Hasil pengujian penetrasi standar pada zona lapisan ini memberikan nilai *N-SPT* bervariasi antara 8 hingga 50 pukulan untuk penetrasi 30 cm. Kecuali pada kedalaman 5,00 meter bagian atas di titik bor B2, *N-SPT* berkisar antara 10 dan 20. Pada ketebalan 5,00 meter di bagian bawah lapisan tanahnya relatif semakin padat dan semakin tersementasi bercampur pasir dengan nilai *N-SPT* lebih dari 60. Selanjutnya *N-SPT* turun dengan nilai 40.

Mengacu pada hasil pengujian *unconfined compressive tests* dan *unconsolidated undraied triaxial compressive tests* yang dilaksanakan pada sampel tanah tak terganggu pada kedalaman 30,00 meter sampai 50,00 meter di bawah permukaan tanah, memberikan nilai *unconfined compressive strength*,  $q_u$  berkisar 6,98 kg/cm<sup>2</sup> (684,75 kPa) dan kohesi tak teralirkan berkisar antara 0,70 kg/cm<sup>2</sup>

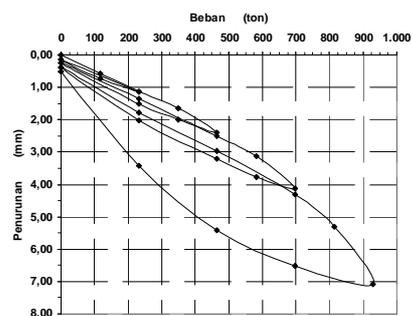
sampai 1,50 kg/cm<sup>2</sup> (68,67 – 147,25 kPa). Sudut geser dalam adalah berkisar 2<sup>o</sup> sampai 9<sup>o</sup>.

### Zona Lapisan Keempat

Zona lapisan kelima terdiri dari deposit diluvial lempung marina sangat kaku. Lapisan lempung pada zona ini bercampur dengan sisa-sisa remukan kulit kerang dan bahan-bahan organik. Lapisan ini memiliki ketebalan berkisar 20,00 meter dan dimulai pada kedalaman kira-kira 60,00 meter di bawah permukaan tanah sampai pada kedalaman 80,00 meter di bawah muka tanah. Pada zona lapisan ini tidak dijumpai batuan dasar yang keras (*bedrock*) sampai akhir ujung pengeboran di titik bor B1. Hasil pengujian penetrasi standar pada zona lapisan ini memberikan nilai *N-SPT* bervariasi antara 18 hingga 40 pukulan untuk penetrasi 30 cm. Nilai *N-SPT* mengecil kurang dari 40 setelah pada kedalaman 65,00 meter di bawah muka tanah.

### 3.2 Evaluasi Pengujian Pembebanan Statis

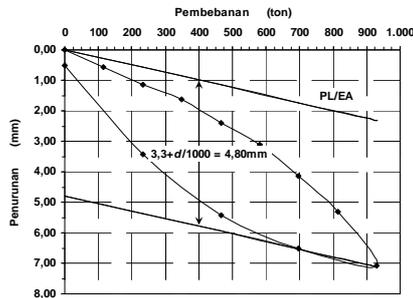
Hasil pengujian pembebanan statis yang telah dilaksanakan diplot dalam bentuk grafik pembebanan-penurunan dan ditunjukkan pada Gambar 4. Nampak bahwa pembebanan dilakukan dalam 4 (empat) siklus. Pembebanan maksimum dilakukan sampai dengan 200% beban rencana yaitu sebesar 930 ton. Setelah itu pembebanan dikurangi perlahan-lahan sampai beban mencapai 0 ton. Pada saat pembebanan mencapai 200% beban rencana, penurunan total yang terjadi sebesar 7,01 mm dengan penurunan elastis sebesar 6,20 mm. Pada saat pelepasan beban mencapai 0 ton, maka penurunan permanen yang terjadi adalah sebesar 0,61 mm.



Gambar 4. Plot grafik pembebanan dan penurunan

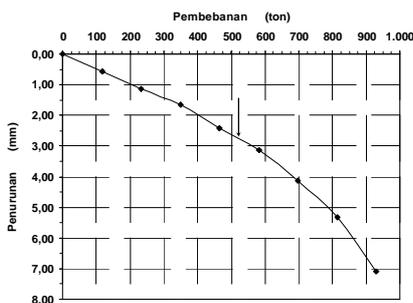
Dari hasil uji beban tersebut dibuat grafik hubungan antara beban dan penurunan pada kondisi siklus yang keempat untuk menerapkan kriteria Davisson (1973) dalam mendapatkan beban runtuh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa garis sejajar dengan garis kompresi elastik memotong grafik pembebanan pada beban sebesar 930 ton (9.123,30 kN). Dengan demikian menurut kriteria

Davisson (1973) beban runtuh terjadi pada beban sebesar 930 ton (9.123,30 kN) dan beban rancangan yang diijinkan adalah sebesar 465 ton (4.561,65 kN).

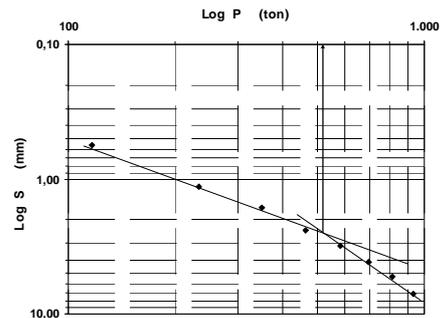


Gambar 5. Plot penentuan beban runtuh

Dari hasil uji beban yang terjadi dibuat grafik hubungan antara beban dan penurunan menurut JSF *Standard* 1811 (1993) untuk menentukan kapasitas regang. Evaluasi secara grafis dengan metode pembebanan-penurunan (P – S) yang lebih detail pada saat pembebanan saja dapat dilihat pada Gambar 6. Observasi terhadap Gambar 6 menunjukkan bahwa terjadinya regangan mulai terlihat pada saat beban mencapai 510 ton (5.000 kN), dimana pada saat itu terjadi penurunan sebesar 2,78 mm akhirnya keruntuhan terjadi pada akhir pembebanan sebesar 930 ton (9.123,30 kN). Untuk lebih mempertegas hasil evaluasi terjadinya regangan atas hasil evaluasi terhadap grafik P – S, maka korelasi tersebut dapat diplot dalam skala logaritma dimana hasilnya ditunjukkan pada Gambar 7. Korelasi pada Gambar 7 tersebut dapat diamati dengan jelas bahwa regangan terjadi pada saat beban mencapai 510 ton (5.000 kN).



Gambar 6. Plot P – S pada kondisi "regang"



Gambar 7. Plot Log P dan log S kondisi "regang"

### 3.3 Analisis Daya Dukung dengan Metode Statis

Dari semua analisis dengan metode statis yang dilakukan, ketepatannya ditentukan melalui uji beban statis tiang bor. Sebagai pembanding dibuat analisis grafis untuk mencari titik regang dan dibagi dengan faktor keamanan 2 akan diperoleh daya dukung ijin. Hasil analisis dari semua metode yang dipertimbangkan dalam studi ini dibandingkan dengan hasil uji pembebanan statis di lapangan untuk mengetahui seberapa besar perbedaannya relatif terhadap hasil uji beban statis.

Hasil perhitungan daya dukung ijin untuk metode log P – log S dan metode yang dihitung menggunakan rumus-rumus statis dibandingkan dengan hasil uji bena statis kriteria Davisson. Hasil analisis dari berbagai metode tersebut dibagi dengan daya dukung hasil uji beban statis kriteria Davisson dan selanjutnya dikalikan 100% untuk mengetahui persentase kesamaan relatif terhadap daya dukung hasil uji beban statis. Hasil perhitungan dan perbandingan tersebut ditabulasikan dan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil perhitungan daya dukung tiang bor

Metoda	Daya dukung ijin (ton)	Kesamaan relatif (%)
<b>Uji beban statis</b>		
a. Kriteria Davisson	465,00	100,00
b. Log P – Log S	510,00	109,68
<b>Rumus Statis</b>		
a. Data SPT <sup>1,2)</sup>	895,64	192,61
b. Data lab <sup>3)</sup>	481,59	103,57
c. Metoda $\lambda$ <sup>4)</sup>	1.478,00	317,85
d. Metoda $\alpha$ <sup>5)</sup>	2.050,40	440,95
e. Metode $\beta$ <sup>6)</sup>	987,63	212,00

<sup>1)</sup> Meyerhof (1956) <sup>4)</sup> Vijayvergiya dan Focht(1972)

<sup>2)</sup> Meyerhof (1976) <sup>5)</sup> Das (1999)

<sup>3)</sup> Meyerhof (1951) <sup>6)</sup> Burland (1973)

Dari hasil analisis dapat dilihat bahwa pada saat perencanaan awal metode perhitungan rumus statis

dengan masukan data uji laboratorium sesuai rekomendasi Meyerhof (1951), hasilnya mendekati hasil uji pembebanan statis dengan skala penuh di lapangan. Dengan demikian, tiang bor produksi selanjutnya dihitung berdasarkan metode Meyerhof (1951) sebagai dasar untuk kriteria disain. Evaluasi terhadap rancangan yang dihasilkan telah memenuhi kriteria disain dengan memperhatikan faktor pembebanan yang terjadi secara statik dan mampu menahan beban rencana.

Untuk kondisi tanah di lokasi penelitian, metode Meyerhof (1951) dengan masukan data hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa hasilnya relatif lebih dapat dipertanggungjawabkan. Sebaliknya metode Meyerhof (1956 dan 1976) dengan masukan nilai *SPT* memberikan hasil lebih konservatif. Analisis dengan metode statis lainnya juga memberikan daya dukung lebih konservatif. Hasil perhitungan analitis menunjukkan bahwa kapasitas daya dukung terjadi pada daya dukung ujungnya. Hal ini sesuai dengan pemahaman bahwa tiang bor merupakan tiang daya dukung ujung (Aspar, 1995). Untuk itu, tiang bor yang dirancang mampu memobilisasi beban dibagian ujungnya.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian dan kajian ini dapat diambil kesimpulan beberapa hal sebagai berikut:

- a. Beban runtuh yang terjadi adalah sebesar 930,00 ton (9.123,30 kN). Penurunan total yang terjadi pada saat runtuh sebesar 7,01 mm dengan penurunan elastis sebesar 6,20 mm.
- b. Pada saat pelepasan beban mencapai 0 ton, maka penurunan permanen yang terjadi adalah sebesar 0,61 mm.
- c. Beban rancangan yang diijinkan adalah sebesar 465,00 ton (4.561,65 kN).
- e. Metode Meyerhof berdasarkan data uji laboratorium lebih sesuai digunakan untuk merancang pondasi tiang bor dengan kondisi tanah di lokasi penelitian. Selanjutnya metode ini digunakan sebagai kriteria disain.
- f. Metode Meyerhof berdasarkan hasil nilai *SPT* dan metode analitis lainnya yang digunakan dalam penelitian ini memberikan hasil lebih konservatif.
- g. Sebagian besar beban dimobilisasi di bagian ujung tiang bor.

Meskipun pondasi tiang bor yang dirancang telah memenuhi kriteria yang dipersyaratkan, namun ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dan disarankan, yaitu

- a. Perlu adanya uji pembebanan dinamik di lapangan yang dilengkapi dengan instrumentasi

guna memeriksa hasil perhitungan analisis pondasi yang telah dilakukan.

- b. Perlu dilakukan *pile integrity test* untuk mengevaluasi rapat jenis (*solidity*) pondasi tiang bor.
- c. Pada saat pelaksanaan uji pembebanan statik, hasilnya akan lebih teliti apabila sepanjang tiang bor dipasang alat ukur (*strain gages*).

#### DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Testing and Materials (ASTM), D1143-M-07e1, "Standard Test Methods for Deep Foundations Under Axial Compressive Loads," *Annual Book of ASTM Standard*, Section 04, 2007.
- American Society for Testing and Materials D2850-03a, "Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils," *Annual Book of ASTM Standard*, 2007.
- American Society for Testing and Materials D1586-08a, "Standard Test Methods for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils," *Annual Book of ASTM Standards*, 2008.
- American Society for Testing and Materials D2435-04, "Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils," *Annual Book of ASTM Standard*, 2008.
- American Society for Testing and Materials D4767-04, "Standard Test Method for Consolidated, Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils," *Annual Book of ASTM Standard*, 2008.
- American Society for Testing and Materials D2216-09, "Standard Test Methods for Laboratory Determination of Moisture Content of Soil and Rock by Mass," *Annual Book of ASTM Standard*, 2009.
- American Society for Testing and Materials D4318, "Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils," *Annual Book of ASTM Standard*, 2009.
- Aspar, W. A. N., "Perilaku Tiang Bor Akibat Pembebanan Desak Vertikal," *Majalah BPPT*, No. LXVI, hal. 125-136, 1995.
- Bowles, J. E., *Foundation Analisis and Design*, edisi ke 5, McGraw-Hill, New York, 1997.

- Burland, J. B., "Shaft Friction Piles in Clay – A Simple Fundamental Approach," *Ground Engineering*, Vol. 6, No. 3, hal. 30–42, 1973.
- Crowther, C. L., *Load Testing of Deep Foundations: The Planning, Design, and Conduct of Pile Load Tests*, John Wiley & Sons, New York, 1988.
- Das, B., M. (1999). *Principles of Foundation Engineering*, edisi ke 4, Cole Publishing Company, Pacific Grove, CA.
- Davisson, M., T, *High Capacity Piles*, Department of Civil Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois, 1973.
- JSF 1811, "Standars For Vertical Load Test of Piles", *Japanesse Society of Soil Mechanic on Foundation Engineering*, Tokyo, 1993.
- Kovacs, W. D., dan Salomone, L. A., "SPT Hammer Energy Measurement," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 108, No. GT4, April, hal. 599-620, 1982.
- Lambe, T. W., dan Whitman R. V, *Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 1969.
- Meyerhof, G. G., "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations," *Geotechnique*, Vol. 2, No. 4, hal. 301-331, 1951.
- Meyerhof, G. G., "Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils," *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Vol. 82, SM 1, Januari, hal. 1-19, 1956.
- Meyerhof, G. G., "Compaction of Sands and Bearing Capacity of Piles," *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Vol. 85, SM 6, Desember, hal. 1-29, 1959.
- Meyerhof, G. G., "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Vol. 102, GT 3, Maret, hal. 195-228, 1976.
- Vijayvergiya, V. N., dan Focht, J. A. Jr.. "A New Way to Predict Capacity of Piles in Clay," *Offshore Technology Conference Paper 1718*, Fourth Offshore Technology Conference, Houston, 1972.