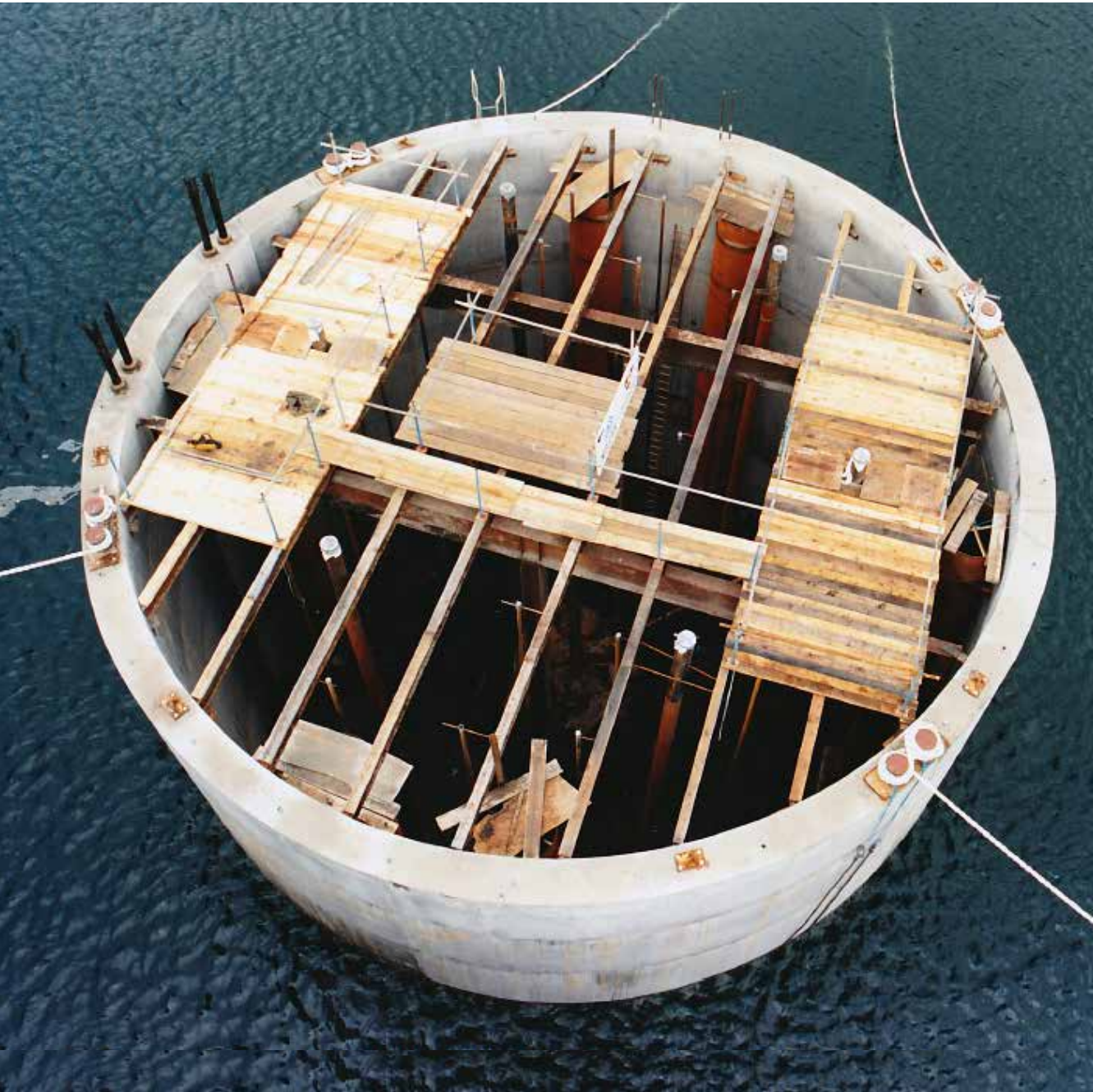




# PERENCANAAN FONDASI JEMBATAN DI LAUT



# **PERENCANAAN FONDASI JEMBATAN DI LAUT**

Penyusun  
*Almuhitsyah*



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN  
Badan Penelitian dan Pengembangan  
Kementerian Pekerjaan Umum  
[www.pusjatan.pu.go.id](http://www.pusjatan.pu.go.id)

## PERENCANAAN FONDASI JEMBATAN DI LAUT

Almuhithsyah  
Desember 2012

Cetakan Ke-1 2012, 88 halaman  
© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Cover Luar : <http://www.red7marine.co.uk/assets/Uploads/BS-5.PNG>

No. ISBN : 978-602-8256-90-2  
Kode Kegiatan : 14-PPK2-001107-A-12  
Kode Publikasi : TR-59/ST/2012

Kata kunci : investigasi tanah, teknologi fondasi, perencanaan fondasi

### Ketua Program Penelitian:

Redrik Irawan, Puslitbang Jalan dan Jembatan

### Ketua Sub Tim Teknis:

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2012, pada paket pekerjaan Penyusunan Naskah Ilmiah Litbang Teknologi Jembatan Bentang Panjang (Kajian Perencanaan Fundasi Khusus).

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum, unsur pimpinan, maupun institusi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan Umum. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum.

### Diterbitkan oleh:

Kementerian Pekerjaan Umum  
Badan Penelitian dan Pengembangan  
Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan  
Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung – Bandung 40293

### Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan  
[info@pusjatan.pu.go.id](mailto:info@pusjatan.pu.go.id)



## Puslitbang Jalan dan Jembatan

**Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan)** adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PU dalam menyelenggarakan jalan di Indonesia dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi, dan nilai-nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan dukungan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

### KEANGGOTAAN TIM TEKNIS & SUB TIM TEKNIS

#### Tim Teknis

Prof.(R).DR. Ir. M.Sjahdanulirwan, M.Sc.  
Ir. Agus Bari Sailendra, MT  
Ir. I Gede Wayan Samsi Gunarta, M.Appl.Sc  
DR. Ir. Dadang Mohammad, M.Sc  
DR. Ir. Poernornosidhi, M.Sc  
DR. Drs. Max Antameng, MA  
DR. Ir. Hedy Rahadian, M.Sc  
Ir. Iwan Zarkasi, M.Eng.Sc  
Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto  
Prof.(R).DR. Ir. Furqon Affandi, M. Sc  
Ir. GJW Fernandez  
Ir. Joko Purnomo, MT  
Ir. Soedarmanto Darmonegoro  
Ir. Lanny Hidayat, M.Si  
Ir. Moch. Tranggono, M.Sc  
DR. Ir. Djoko Widayat, M.Sc  
Redrik Irawan, ST., MT.  
DR. Ir. Didik Rudjito, M.Sc  
DR. Ir. Triono Jumono, M.Sc  
Ir. Palgunadi, M.Eng, Sc  
DR. Ir. Doni J. Widiyanto, M.Eng.Sc  
Ir. Teuku Anshar  
Ir. Gandhi Harahap, M.Eng.Sc

Ir. Yayan Suryana, M.Sc  
DR. Ir. Rudy Hermawan, M.Sc  
Ir. Saktyanu, M.Sc  
Ir. Herman Darmansyah  
Ir. Rachmat Agus  
DR. Ir. Hasroel, APU  
DR. Ir. Chaidir Amin, M.Sc  
Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE. Ph.D  
Kemas Ahmad Zamhari  
Dr. Ir. Mochammad Amron, M.Sc  
Djoko Mujanto

#### Sub Tim Teknis

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto  
Ir. Rahadi Sukirman  
Herbudiman, ST., MT.  
Abinhot Sihotang, ST., MT.  
Ir. Samun Haris, MT.  
DR. Made Suangga  
DR. Aswandy  
Ir. Ahmad Yunaldi

# Kata Pengantar

Pembangunan fondasi merupakan langkah awal dalam pembangunan jembatan. Proses ini mencakup investigasi geoteknik secara mendetail pada lokasi rencana pembangunan jembatan. Setelah itu dilakukan pemilihan jenis fondasi seperti fondasi tiang dsb. Pemilihan fondasi disesuaikan dengan kondisi lapisan tanah dan karakteristik jembatan yang diinginkan. Karakteristik tanah akan menentukan kapasitas daya dukung dan parameter penting lainnya.

Dengan semakin berkembangnya teknologi jembatan tersebut, maka juga perlu dipelajari perkembangan teknologi pada fondasi. Beberapa jenis fondasi khusus telah dibangun di berbagai negara untuk berbagai jenis konstruksi. Jenis-jenis fondasi khusus diantaranya adalah fondasi lepas pantai, dan caisson. Fondasi ini dapat diaplikasikan pada jembatan dengan bentang panjang yang melintasi permukaan laut. Naskah ilmiah ini mengkaji beberapa standar dan literatur yang memiliki kaitan dengan perencanaan fondasi jembatan di lautan dan dibatasi hanya untuk tahapan perencanaan.

Berdasarkan studi literatur terdapat beberapa hal yang perlu dikaji dalam melakukan perencanaan fondasi jembatan di laut. Dalam melakukan perencanaan fondasi jembatan di laut perlu diperhatikan mengenai investigasi tanah, sifat lapisan tanah di lautan, teknologi fondasi, kapasitas fondasi, interaksi tanah dengan struktur, dan likuifaksi.

Bandung, Desember 2012

**Almuhithsyah**  
*Penyusun*

# Daftar Isi

Kata Pengantar .....	v
Daftar Isi .....	vi
Daftar Gambar .....	vii
Daftar Tabel .....	x
<b>Bab 1 Pendahuluan .....</b>	<b>13</b>
Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam desain struktur di lautan.....	13
Perkembangan Teknologi Geoteknik Lepas Pantai .....	15
<b>Bab 2 Investigasi Awal .....</b>	<b>19</b>
Studi Geologi.....	19
Survey Geofisika.....	20
Survey Geoteknik.....	23
Monitoring .....	30
<b>Bab 3 Sifat Lapisan Tanah di Lautan .....</b>	<b>35</b>
Fitur topografi dasar laut.....	35
Sumber, Klasifikasi, dan Distribusi Sedimen di Lautan.....	37
<b>Bab 4 Teknologi Fondasi.....</b>	<b>43</b>
Pile Foundation.....	44
Gravity Foundation.....	47
Jackets / Tripod Foundation .....	53
<b>Bab 5 Kapasitas Fondasi .....</b>	<b>55</b>
Tahanan Aksial .....	55
Tahanan Lateral .....	58
Stabilitas Fondasi.....	63
Perencanaan Kondisi Batas.....	66
<b>Bab 6 Interaksi Tanah dan Struktur .....</b>	<b>69</b>
Reaksi Fondasi untuk Struktur Tiang.....	70
Reaksi Tanah untuk Struktur Gravity Based .....	71

<b>Bab 7 Likuifaksi.....</b>	<b>75</b>
Faktor-faktor yang Mempengaruhi Likuifaksi.....	76
Evaluasi Potensi Likuifaksi.....	76
<b>Bab 8 Penutup.....</b>	<b>85</b>
<b>Daftar Pustaka.....</b>	<b>86</b>

## Daftar Gambar

<b>Gambar 1</b> Teknologi yang terkait dalam perencanaan struktur lepas pantai (Graff, 1981).....	13
<b>Gambar 2</b> Gaya-gaya lingkungan yang bekerja pada struktur lepas pantai (Selnes, 1982).....	14
<b>Gambar 3</b> Beberapa permasalahan dalam geoteknik kelautan (Focht and Kraft, 1977) .....	15
<b>Gambar 4</b> Perbandingan antara struktur gravity di lepas pantai dengan bangunan bertingkat umum di daratan (Young et al, 1975) .....	17
<b>Gambar 5</b> Peta batimetri yang ditunjukkan dengan garis kontur dan gradasi warna (courtesy of bakosutarnal) .....	21
<b>Gambar 6</b> Konsep survai Batimetri dengan menggunakan Echosounder ( <a href="http://dennipasca.blogspot.com/2010/09/konsep-dasar-survei-batimetri.html">http://dennipasca.blogspot.com/2010/09/konsep-dasar-survei-batimetri.html</a> ) .....	22
<b>Gambar 7</b> Sonic prospecting (Parr, 1962) .....	22
<b>Gambar 8</b> Contoh pencatatan pasang surut air laut ( <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Tide">http://en.wikipedia.org/wiki/Tide</a> ).....	23
<b>Gambar 9</b> Cone Penetration Test (courtesy of USGS) .....	24
<b>Gambar 10</b> Seismic cone test (courtesy of Fugro Company).....	25
<b>Gambar 11</b> Conductivity Probing (Courtesy of BMNED).....	26

<i>Gambar 12</i>	Field Vane Shear Test (Courtesy of D.S.E CO, Ltd) .....	27
<i>Gambar 13</i>	NGI's Deepwater Gas Probe (after Mokkelbost and Strandvik, 1999) .....	28
<i>Gambar 14</i>	T-Bar (Courtesy of Soil Interactions Laboratory) .....	29
<i>Gambar 15</i>	Skema pengujian load cell (College of Civil Engineering, 2006) .....	31
<i>Gambar 16</i>	Konsep pengujian sonic echo (FHWA, 2007) .....	33
<i>Gambar 17</i>	Fitur topografi utama di dasar laut.....	35
<i>Gambar 18</i>	Hubungan antara continental slope dengan continental shelf-nya pada beberapa wilayah (Poulos, 1988) .....	36
<i>Gambar 19</i>	Ukuran partikel dari bermacam-macam sumber (Gross, 1977) .....	38
<i>Gambar 20</i>	Proses yang terlibat dalam formasi sedimen di lautan (Silva, 1974) .....	41
<i>Gambar 21</i>	Jenis fondasi secara umum.....	43
<i>Gambar 22</i>	Single stage straight bored piles (Poulos, 1988).....	44
<i>Gambar 23</i>	Belled pile (Poulos, 1988) .....	44
<i>Gambar 24</i>	Konstruksi bored pile dan instalasi pile cap pada Busan Geoje Bridge .. (Korea Selatan) (Courtesy of COWI).....	45
<i>Gambar 25</i>	Sistem fondasi yang digunakan pada Faro bridge di Denmark (Courtesy of COWI).....	45
<i>Gambar 26</i>	Fondasi yang digunakan pada Sutong Bridge (China) (Courtesy of COWI).....	46
<i>Gambar 27</i>	Sistem fondasi pada Jamuna River bridge (Bangladesh).....	46
<i>Gambar 28</i>	Opened caisson (Triger, 1846).....	47
<i>Gambar 29</i>	Pneumatic caisson ( <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/caisson_%28engineering%29">http://en.wikipedia.org/wiki/caisson_%28engineering%29</a> ).....	47
<i>Gambar 30</i>	Prefabricated caisson yang diinstallasi dengan crane terapung pada Great Belt West Bridge (Denmark) (Courtesy of COWI) .....	48
<i>Gambar 31</i>	Prefabricated caisson yang diinstallasi dengan crane terapung pada ..... Confederation Bridge (Kanada) (Courtesy of COWI) .....	49
<i>Gambar 32</i>	Fondasi caisson yang diinstallasi di dok kering dan ditransportasikan menggunakan tongkang dan rangka baja pada Oresund Bridge (Denmark) (Courtesy of COWI).....	49
<i>Gambar 33</i>	Fondasi yang digunakan pada Great Belt East Bridge (Denmark) (Courtesy of COWI).....	50

<i>Gambar 34</i>	Fondasi yang digunakan pada Rion-Antirion Bridge (Yunani) (Courtesy of COWI).....	50
<i>Gambar 35</i>	Repair wharf naval station Mayport (Courtesy of Ed Waters & Sons Contracting Co., Inc.) .....	51
<i>Gambar 36</i>	Troll offshore platform yang memiliki tinggi 600 m (Courtesy of COWI) .....	52
<i>Gambar 37</i>	Beberapa contoh fondasi offshore (Courtesy of NaturalGas) .....	53
<i>Gambar 38</i>	Kriteria untuk memprediksi kapasitas (Det Norske Veritas, 1992).....	57
<i>Gambar 39</i>	Kurva p-y untuk sebuah tiang (Det Norske Veritas, 1992).....	59
<i>Gambar 40</i>	Kriteria untuk memprediksi kurva p-y. (a) Beban statis short-time, (b) kesetimbangan dibawah beban siklik inisial, (c) reloading setelah perulangan (Det Norske Veritas, 1992).....	61
<i>Gambar 41</i>	Koefisien C1, C2, C3 sebagai fungsi $\Phi'$ (Det Norske Veritas, 1992) .....	62
<i>Gambar 42</i>	Modulus reaksi subgrade inisial (k) sebagai fungsi relative density dan sudut geser (Det Norske Veritas, 1992) .....	62
<i>Gambar 43</i>	Contoh pembebanan elemen tanah disepanjang kemungkinan permukaan runtuh pada fondasi dibawah gravity platform lepas pantai. (Det Norske Veritas, 1992) .....	64
<i>Gambar 44</i>	Beban yang bekerja pada fondasi dan tanah di dasar laut (Det Norske Veritas, 1992) .....	65
<i>Gambar 45</i>	Kemungkinan bentuk keruntuhan fondasi (Det Norske Veritas, 1992) .....	65
<i>Gambar 46</i>	Korelasi antara CN dengan tegangan berlebih efektif (Department of Defense Handbook, 1997) .....	77
<i>Gambar 47</i>	Cyclic resistance ratio (CRR) untuk clean sand dengan kondisi level tanah berdasarkan SPT (Robertson and Fear, 1996) .....	78
<i>Gambar 48</i>	Cyclic resistance ratio (CRR) untuk clean sand dengan kondisi level tanah berdasarkan CPT (Robertson and Fear, 1996) .....	79
<i>Gambar 49</i>	Koreksi nilai SPT dan CPT untuk kadar halus (Department of Defense Handbook, 1997).....	80
<i>Gambar 50</i>	Kisaran faktor skala magnitud terhadap magnitud gempa (Department of Defense Handbook, 1997).....	81



<i>Gambar 51</i>	Koreksi ( $K_c$ ) terhadap tahanan penetrasi CPT pada lapisan tanah tipis (Department of Defense Handbook, 1997) .....	82
------------------	---	----

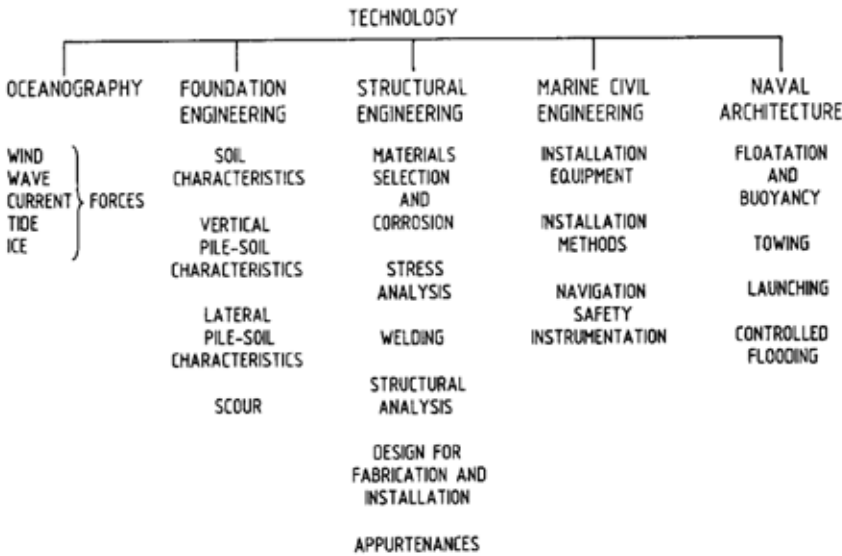
## Daftar Tabel

<i>Tabel 1</i>	Perkembangan teknologi geoteknik lepas pantai (Poulos, 1988) .....	16
<i>Tabel 2</i>	Klasifikasi partikel sedimen berdasarkan ukuran (Gross, 1977) .....	37
<i>Tabel 3</i>	Ukuran partikel dan specific gravity beberapa jenis sedimen pada batas kontinental (Hamilton, 1974) .....	38
<i>Tabel 4</i>	Ukuran partikel dan specific gravity beberapa jenis sedimen pada dataran dan bukit di lautan (Hamilton et al, 1974) .....	39
<i>Tabel 5</i>	Parameter rencana untuk tahanan aksial dari tiang pancang pada tanah tidak kohesif (API RP 2A, 1987) .....	58
<i>Tabel 6</i>	Kurva p-y untuk kasus beban statis short-term. (Det Norske Veritas, 1992) .....	60
<i>Tabel 7</i>	Kurva p-y untuk kasus dimana kesetimbangan dicapai saat beban siklik (Det Norske Veritas, 1992) .....	60
<i>Tabel 8</i>	Faktor reduksi kekuatan untuk parameter tanah (BMS, 1992) .....	66
<i>Tabel 9</i>	Faktor reduksi kekuatan berdasarkan pengukuran lapangan (BMS, 1992) .....	67
<i>Tabel 10</i>	Tahanan nominal tiang tunggal menggunakan metode analisis statik pada kondisi terkompresi aksial, $f_{\varphi}, f_q = f_{stat}$ (AASHTO, 2010) .....	67
<i>Tabel 11</i>	Rasio energi untuk prosedur SPT (National research council, 1985) .....	78

# Pendahuluan

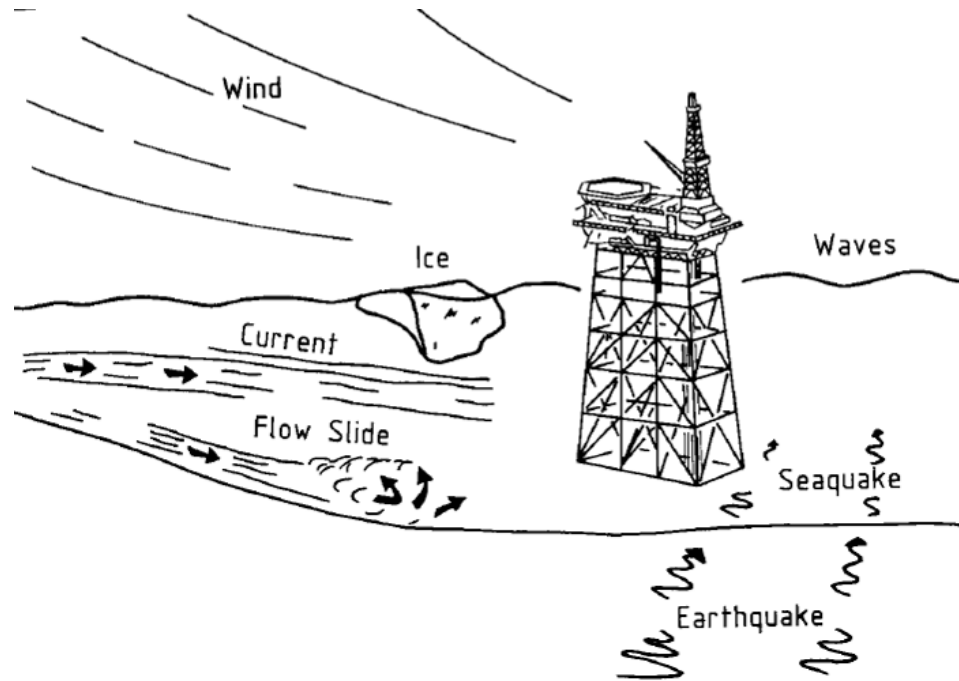
Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam desain struktur di lautan

Dalam mendesain fondasi di lautan dibutuhkan teknologi dari multidisiplin ilmu yang mencakup bidang rekayasa geoteknik, rekayasa struktur, teknik kelautan, arsitektur, dan sebagainya. Graff (1981) merangkum bidang ilmu dan permasalahan yang terkait dengan setiap bidang ilmu seperti diperlihatkan pada *Gambar 1*.



**Gambar 1** Teknologi yang terkait dalam perencanaan struktur lepas pantai (Graff, 1981)





**Gambar 2** Gaya-gaya lingkungan yang bekerja pada struktur lepas pantai (Selnes, 1982).

Graff (1981) juga mengidentifikasi lima tahapan utama dalam proses perencanaan struktur lepas pantai, yaitu:

a. Penentuan kriteria operasional

Hal ini mencakup jumlah titik bor, jenis peralatan pengeboran, dan sebagainya

b. Penentuan kriteria lingkungan

Mencakup evaluasi gaya-gaya yang bekerja pada struktur seperti gelombang, arus laut, angin, dan gempa. Gaya-gaya ini diilustrasikan seperti pada *Gambar 2*.

c. Perencanaan fondasi

Memerlukan penentuan sejarah geologi pada suatu daerah, karakteristik tanah dasar laut dari hasil pengujian, dan analisis yang tepat untuk memastikan bahwa fondasi tersebut dapat dengan aman memikul gaya-gaya yang bekerja.

d. Perencanaan struktur

Perlu dilakukan analisis struktur untuk memastikan bahwa struktur bangunan atas dapat memikul beban-beban yang bekerja.

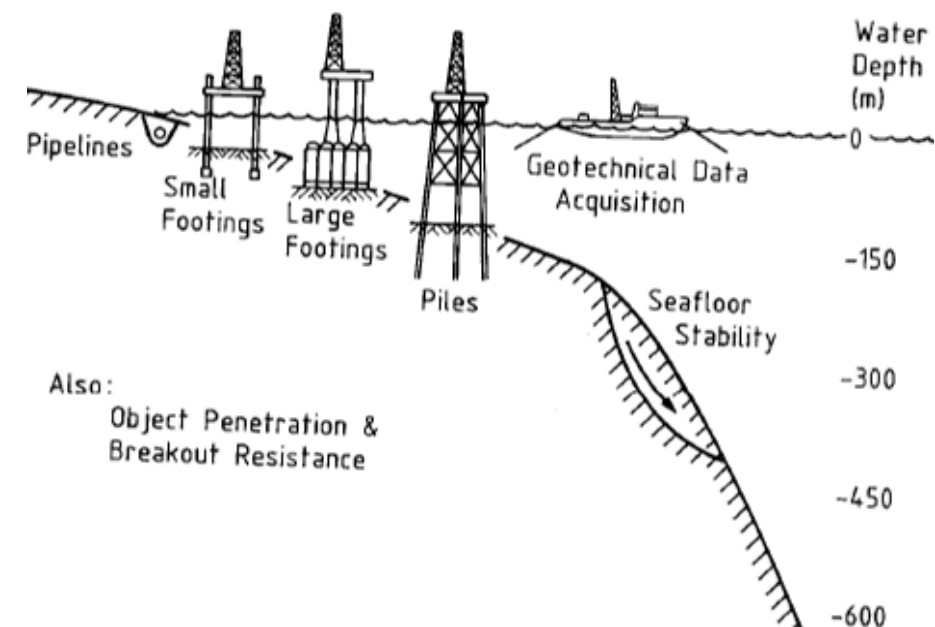
e. Konstruksi dan instalasi

Konstruksi struktur lepas pantai biasanya dilakukan langsung di lautan. Oleh karena itu perlu diperhatikan mengenai transportasi komponen-komponen yang akan diinstallasi di lautan. Salah satunya adalah diperlukan tongkang yang besar atau kapal bila akan menggunakan fondasi gravity.

Terdapat beberapa permasalahan geoteknik dalam perencanaan struktur di lautan terutama pada batas daratan maupun palung. Permasalahan tersebut dapat dilihat pada *Gambar 3* (Focht and Kraft, 1977).

## Perkembangan Teknologi Geoteknik Lepas Pantai

Teknologi fondasi lepas pantai telah mengalami perkembangan. Perkembangan signifikan teknologi fondasi antara tahun 1940 hingga 1980 dirangkum seperti yang terlihat pada *Tabel 1*. Peningkatan laju perkembangan teknologi geoteknik kelautan dapat terlihat jelas dari tabel tersebut. Contohnya kesulitan dalam konstruksi fondasi pada tanah berkapur ditemui pada akhir tahun 1960. Namun dimulai dari awal tahun 1980 dilakukan penelitian secara intensif untuk memecahkan masalah tersebut.



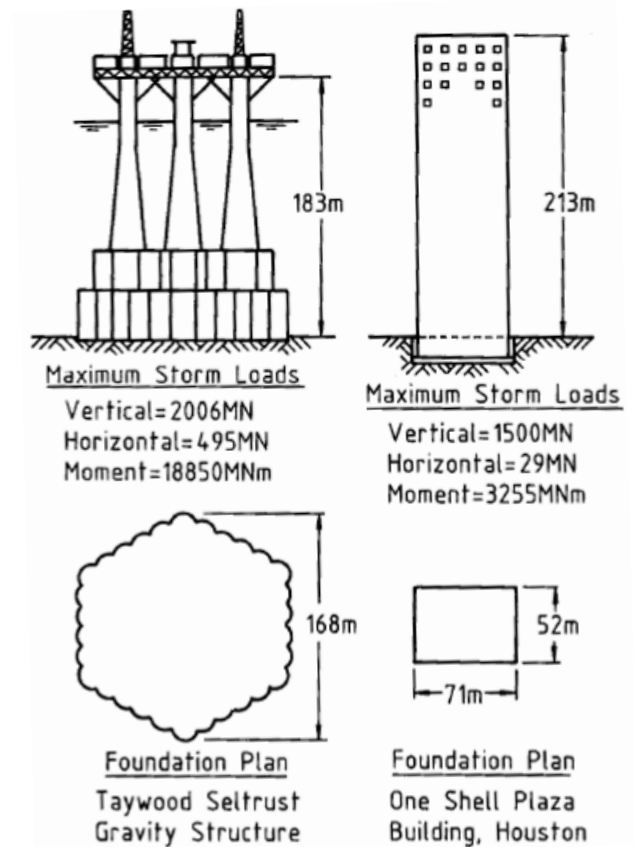
**Gambar 3** Beberapa permasalahan dalam geoteknik kelautan (Focht and Kraft, 1977)

**Tabel 1** Perkembangan teknologi geoteknik lepas pantai (Poulos, 1988)

Dekade	Kejadian	Lokasi
1940-an	Pemboran lepas pantai pertama	Gulf of Mexico
	Struktur lepas pantai untuk minyak pertama	
	Submersible mobile unit pertama	
1950-an	Fondasi tiang lateral dengan platform pemboran bergerak	South Pass Block42 (Mr Gus I)
	Investigasi lapangan dengan tongkang terapung	Passamaquoddy Project, Gulf of Mexico (Hurricane Audrey)
	Kapasitas tarik tiang pada pasir	Gulf of Mexico
	Gaya apung dan penurunan pipa kilang minyak	
1960-an	Investigasi lapangan pada perairan dalam	Gulf of Mexico, Wireline sampling
	Ketahanan terhadap penetrasi dan breakout	Loss of submarine Tresher
	Penggunaan <i>piles grouted</i> pada lubang bor	Cook inlet Alaska, Arabian Gulf various, pengembangan prosedur API
	Prosedur memprediksi kapasitas tiang	West Sole gasfield
	Penggunaan analisis persamaan gelombang untuk prediksi tiang pancang	
	Kapasitas tiang pada tanah berkapur	Bass Strait, Australia
	Ketidakstabilan dasar laut	Gulf of Mexico, Hurricane Camille
1970-an	Struktur <i>gravity</i>	Ekofisk Tank, North Sea
	Pengaruh beban berulang pada kekuatan tanah	North Sea, Forties field
	Penggunaan <i>underreamed footings</i>	
	Penggunaan <i>cone penetrometer</i> dasar laut	
	Analisis grup tiang yang dibebani secara lateral	
	Penggunaan secara intensif analisis persamaan gelombang	
	Review prediksi kapasitas tiang	API
	Pengaruh gempa pada fondasi kelautan	Hondo platform
	Pulau buatan di Arctic	Beaufort sea
	<i>Tension leg platform</i>	Hutton field, North Sea
	<i>Guyed tower platform</i>	Lena platform, Gulf of Mexico
1980-an	Pengukuran performa tiang fondasi di lapangan	Magnus platform, North Sea
	Konsep platform <i>gravity</i> perairan dalam	North Sea
	Kapasitas tiang pada tanah sementasi berkapur	North Rankine platform, Australia

Terdapat beberapa perbedaan antara perencanaan fondasi di lautan dengan struktur fondasi yang umum di daratan. Untuk struktur di lepas pantai :

- Magnitude* beban rencana umumnya sangat besar yang menyebabkan ukuran fondasi menjadi besar.
- Beban lateral dan momen guling sangat besar. *Gambar 4* memperlihatkan perbedaan antara beban rencana maksimum untuk struktur lepas pantai dengan bangunan bertingkat di daratan. Terlihat bahwa nilai beban vertikal tidak begitu berbeda, namun beban-beban lainnya memiliki nilai yang sangat jauh berbeda.
- Respon terhadap beban *cyclic* dapat mempengaruhi pemilihan jenis fondasi. Platform konvensional akan memikul beban *cyclic* berupa beban *mean compressive*, sedangkan *tension leg platforms* akan memikul beban *cyclic* berupa beban *mean tensile*.
- Deposit tanah di lautan seringkali adalah *normally consolidated*, dan sangat lunak pada dasar laut. Beberapa deposit tanah juga memperlihatkan karakteristik yang tidak lazim, seperti pasir berkapur, pasir diatom, dan lanau Arctic.
- Biaya eksplorasi dan pengujian di lapangan sangat mahal, sama dengan mahalnya biaya fondasi. ■

**Gambar 4** Perbandingan antara struktur gravity di lepas pantai dengan bangunan bertingkat umum di daratan (Young et al, 1975)

*Bab 2*

# Investigasi Awal

U rutan penyelidikan tanah untuk struktur lepas pantai adalah sebagai berikut:

- a. Pengumpulan data geologi, geoteknik, dan performa fondasi pada daerah tersebut
- b. Melakukan survey geofisika pada tahap awal dalam pengembangan wilayah, yang terdiri dari:
  - ▶ Survey bathymetry dan dasar laut
  - ▶ Profil lapisan tanah di dasar laut

Penyelidikan-penyelidikan tanah yang diperlukan dalam perencanaan fondasi di lautan akan dipaparkan sebagai berikut.

## Studi Geologi

Studi geologi harus berdasarkan informasi mengenai sejarah geologis umum pada daerah yang akan dikembangkan. Tujuan studi geologis ini adalah untuk memastikan dasar dalam pemilihan metode dan lingkup penyelidikan lapangan.

## Survey Geofisika

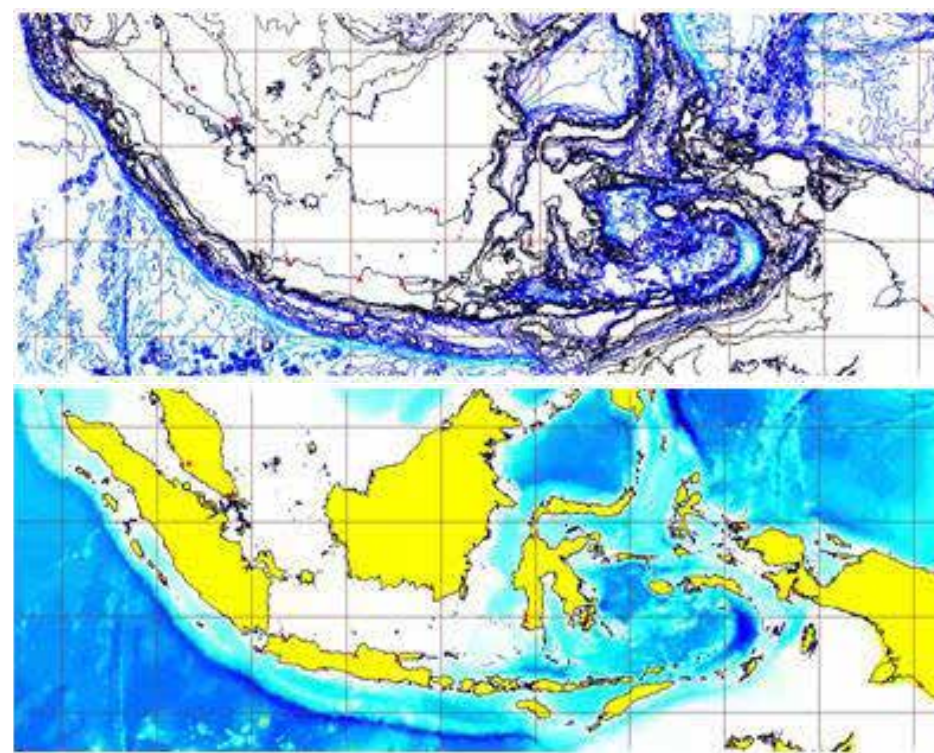
Tujuan utama survey geofisika adalah untuk mengembangkan informasi lokal dari hasil pengeboran dan pengujian lapangan untuk mendapatkan pemahaman mengenai topografi dasar laut dan stratifikasi tanah pada daerah yang ditentukan. Dengan demikian, survey ini dapat memberikan panduan dalam pemilihan lokasi yang tepat untuk dilakukan eksplorasi. Beberapa survey geofisika yang perlu dilakukan dihabarkan sebagai berikut.

### Bathymetrical Survey

Dari kamus Hidrografi yang dikeluarkan oleh Organisasi Hidrografi Internasional (International Hydrographic Organization, IHO) tahun 1994 istilah batimetri dalam bahasa aslinya adalah *bathymetry* memiliki makna penentuan kedalaman lautan. Secara umum batimetri merupakan ilmu yang mempelajari kedalaman bawah air pada lautan maupun danau. Sebuah peta batimetri umumnya menampilkan relief lantai atau dataran dengan garis-garis kontur yang disebut kontur kedalaman (*isobath*) dan dapat juga memiliki informasi navigasi permukaan.

Kepulauan Indonesia merupakan gugusan pulau yang terdiri dari lima pulau besar (Pulau Sumatera, Jawa, Kalimantan/Borneo, Sulawesi dan Papua) dan gugusan

pulau Nusantara, Maluku serta ribuan pulau kecil tersebar dalam untaian yang serasi dan indah di sekitar garis lintang nol derajat (khatulistiwa). Perairan yang terletak di antara pulau-pulau tersebut memiliki kedalaman laut yang sangat bervariasi. Di sebelah barat Pulau Sumatera dan sebelah selatan Pulau Jawa terdapat palung (*trench*) yang merupakan pertemuan lempeng samudera dan lempeng benua dan memiliki kedalaman laut antara 2500 meter hingga 5000 meter. Perairan di antara Pulau Sumatera, Jawa dan Kalimantan yang terletak pada paparan Sahul, memiliki kedalaman yang relatif dangkal (kurang dari 500 meter, bahkan kurang dari 200 meter). Di Selat Makassar kedalaman bervariasi relatif berubah secara gradual. Dari pantai timur Kalimantan kedalaman laut bertambah secara perlahan, sementara di pantai barat Sulawesi kedalaman laut bertambah secara cepat, sehingga bagian laut yang terdalam dari Selat Makassar (sekitar 2000 meter) terletak lebih dekat dengan Pulau Sulawesi. Selanjutnya ke arah timur Maluku dan Papua, termasuk Bali dan Nusantara memiliki kondisi batimetri bervariasi yang sangat mencolok hingga lebih dari 5000 meter. Indonesia memiliki fenomena yang sangat unik yakni adanya pertemuan tiga lempeng besar (lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan lempeng Pasifik) yang bertemu di Laut Banda. Pada



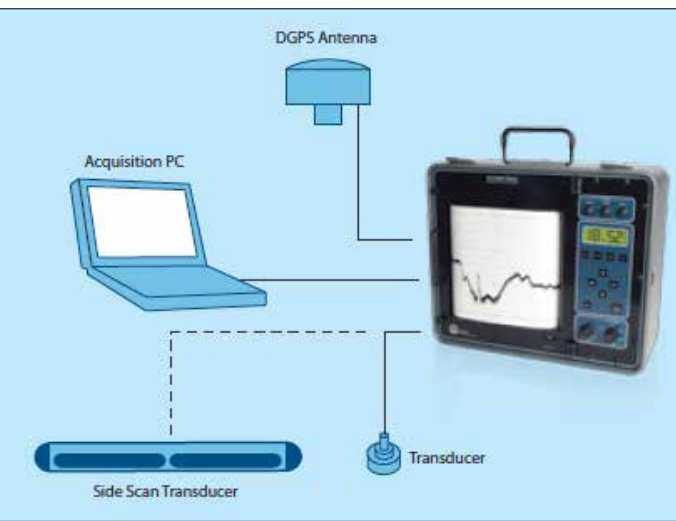
**Gambar 5** Peta batimetri yang ditunjukkan dengan garis kontur dan gradasi warna (courtesy of bakosutarnal)

daerah ini dikenal dengan zona tumbukan kompleks (*complex collision zone*), sehingga terdapat laut yang sangat dalam berbentuk palung (*trench*) dengan kedalaman lebih dari 7000 meter. Lokasi ini terdapat di sebelah tenggara Pulau Banda dan di antara Pulau Seram dan Pulau Yamdena.

Survei batimetri adalah survei yang dilakukan untuk mengetahui nilai kedalaman dari dasar laut. Tujuan survei batimetri bermacam-macam yaitu pengerukan pelabuhan, perencanaan bangunan di laut (pelabuhan, Platform, sumur minyak), dll.

Alat yang dibutuhkan untuk pengukuran dasar laut ini ada dua macam, diantaranya Echosounder Single Frekwensi dan Echosounder Double Frekwensi. Echosounder Single Frekwensi hanya menggunakan frekwensi tinggi (kedalaman hanya sampai lapisan paling atas dari tanah) yang berarti kedalaman tidak bisa menembus lumpur (Contoh alat :Echosounder Hydrotrac ODOM). Pada Echosounder Double Frekwensi, terdapat 2 frekwensi yang digunakan sekaligus, yaitu frekwensi tinggi (untuk pengukuran kedalaman dasar laut teratas) dan frekwensi rendah (untuk





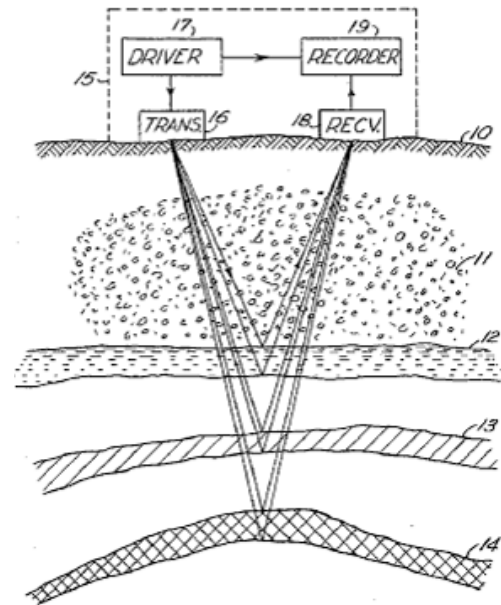
**Gambar 6** Konsep survei Batimetri dengan menggunakan Echosounder (<http://dennipasca.blogspot.com/2010/09/konsep-dasar-survei-batimetri.html>)

pengukuran kedalaman dasar laut yang dapat menembus lumpur), sehingga ada 2 data kedalaman sekaligus yang didapatkan. (Contoh alat: Echosounder MK III). Instalasi Alat yang dipergunakan untuk pengukuran batimetri adalah:

- GPS Antena: Untuk mendapatkan data posisi koordinat
- Transducer: Alat yang memancarkan sinyal akustik ke dasar laut untuk data kedalaman
- Echosounder: Alat yang menampilkan angka kedalaman
- Laptop: Untuk pengoperasian yang mengintegrasikan GPS, transducer, dan echosounder.

## Sonic Prospecting

*Sonic prospecting* bertujuan untuk menampilkan lapisan geologis dalam tanah. Dalam *sonic prospecting* prosedur yang biasa digunakan adalah menanamkan energi sonik pada permukaan tanah lalu menangkap, mendeteksi dan merekam sinyal sonik yang telah melalui berbagai lapisan tanah. Ketika kondisi lapisan tanah yang terekam cukup bagus, sejumlah refleksi dapat diidentifikasi dengan inspeksi visual hasil rekaman. Namun terkadang penentuan kedalaman mengalami kesulitan pada area tertentu akibat variasi kecepatan yang cukup besar.



**Gambar 7** Sonic prospecting (Parr, 1962)

## Tidal Current Survey

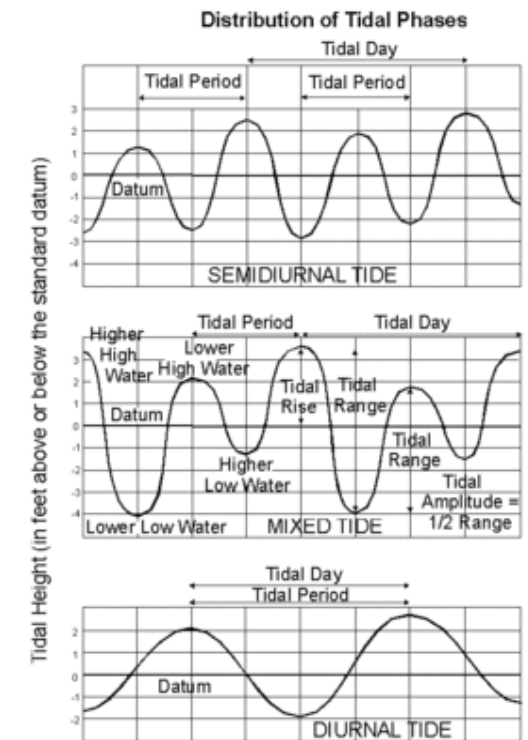
Pasang surut (*tides*) merupakan peristiwa naik dan turunnya permukaan air laut yang disebabkan pengaruh kombinasi gaya gravitasi bulan, matahari, dan rotasi bumi. Waktu dan amplitudo pasang surut air laut dipengaruhi oleh penjarangan bulan dengan matahari, pola pasang surut pada lautan yang dalam, bentuk garis pantai, dan batimetri disekitar pantai.

Pasang surut bervariasi terhadap waktu dengan kisaran jam hingga tahun tergantung faktor-faktor yang mempengaruhinya. Untuk mendapatkan pencatatan pasang surut yang akurat dapat dipasang *tide gauges* pada suatu posisi tetap untuk mengukur level air sepanjang waktu. *Gauges* ini mengabaikan variasi yang disebabkan oleh gelombang dengan periode lebih kecil dari satu menit. Data ini nantinya dibandingkan dengan titik referensi atau datum yang disebut *mean sea level*.

## Survey Geoteknik

Metode utama yang dilakukan dalam investigasi geoteknik adalah:

- Pengambilan sampel untuk pengujian laboratorium
  - Pengujian lapangan
- Investigasi lapangan dan laboratorium harus dapat memastikan stratigrafi tanah secara detail di sepanjang



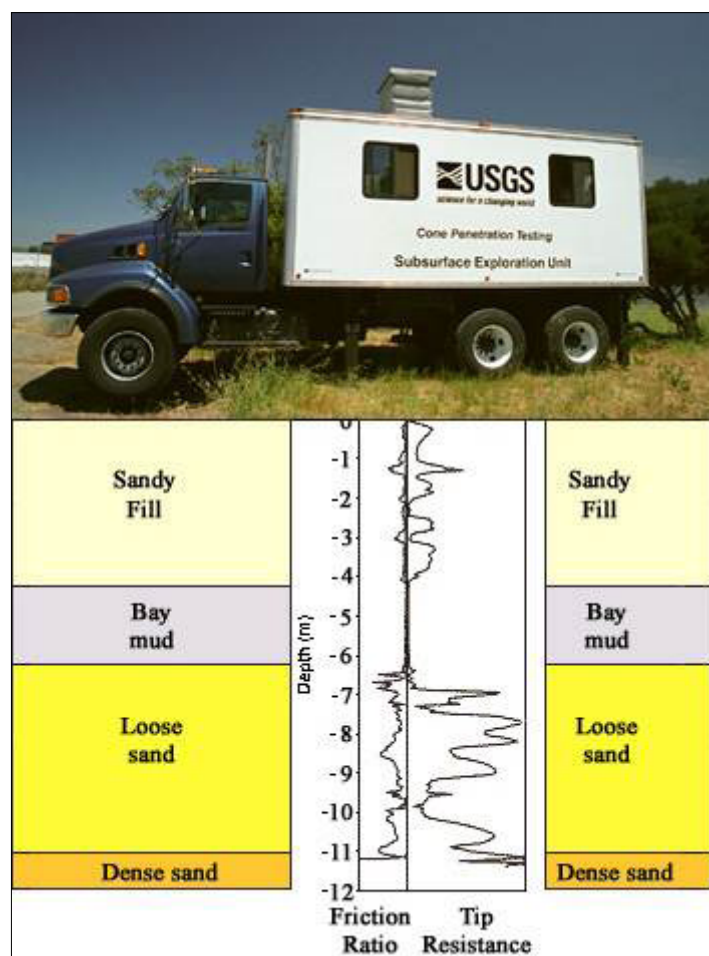
**Gambar 8** Contoh pencatatan pasang surut air laut (<http://en.wikipedia.org/wiki/Tide>)

lokasi dengan menyediakan jenis data geoteknik berikut untuk seluruh lapisan tanah:

- Data klasifikasi dan deskripsi tanah
- Parameter yang dibutuhkan untuk perencanaan fondasi secara detail dan lengkap

## Pengambilan sampel dari lubang pengeboran

Untuk pengambilan sampel pada lokasi yang dalam direkomendasikan



**Gambar 9** Cone Penetration Test (courtesy of USGS)

untuk melakukan pengeboran. Peralatan *sampling* lalu ditempatkan lebih rendah didalam rangkaian bor pada dasar *bore-hole* pada kedalaman yang akan dilakukan pengambilan sampel. Lubang bor dibuat dengan teknik pengeboran *straight flush rotary*. Pengeboran lumpur diperlukan untuk membersihkan potongan tanah dan untuk menstabilisasi lubang bor. Bagian atas perangkat bor dihubungkan dengan *motion compensator* pada puncak menara

bor sehingga perangkat bor berada dalam tekanan konstan.

### Investigasi lapangan

#### Cone Penetrometer Test (CPT)

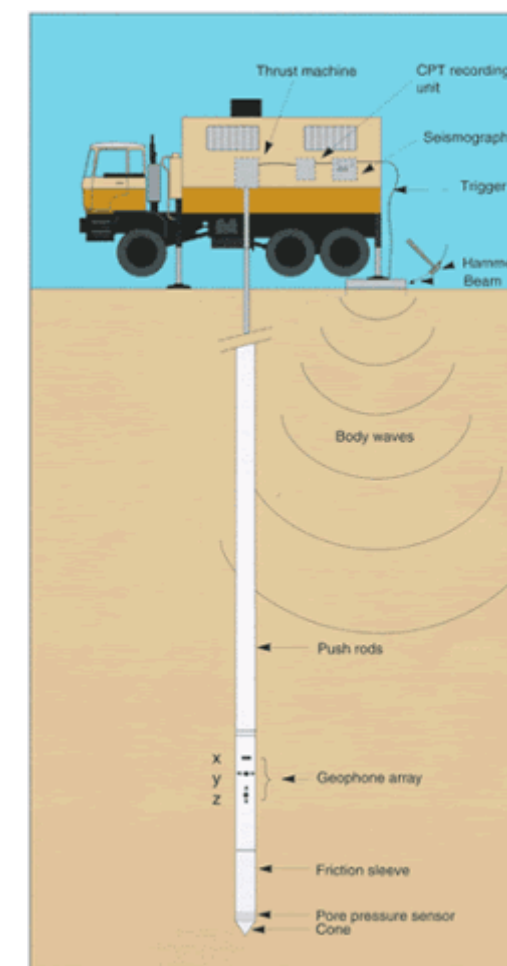
Cone Penetrometer Test (CPT) merupakan metode pengujian lapangan yang paling umum dalam investigasi tanah lepas pantai. Pengujian dapat dilakukan

dari alat pemboran bawah air tanpa melakukan pemboran *borehole*, dari suatu unit *seafloor-based jacking*, atau membuat lubang tanpa menggunakan unit dasar laut.

Pengujian dilakukan dengan menekan kerucut seluas 10 cm<sup>2</sup> dengan kecepatan penetrasi 2 cm/s ke dalam tanah. Ujung kerucut secara serentak mengukur tahanan ujung (kerucut) dan friksi di sepanjang lengan kerucut. Hasil pengujian ini menghasilkan informasi yang berguna secara kuantitatif dan kualitatif mengenai kekuatan tanah dan karakteristik tegangan-regangan. Piezo cone penetrometer dengan menggabungkan *pressure transducer* pada ujungnya untuk mengukur tekanan pori, sangat umum digunakan dalam investigasi daerah lepas pantai.

### Seismic Cone Test

Teknologi dalam survey kegempaan didasarkan pada prinsip bahwa bagian dari energi akustik yang masuk ke tanah pada lokasi tertentu akan direfleksikan kembali ke permukaan ketika ditemukan material dengan density yang berbeda. Sumber dari energi akustik terdiri dari *power-assisted hammers*, *dropped weights*, atau ledakan. Gelombang akustik berjalan ke dalam tanah pada suatu kecepatan yang tergantung dari *density* dan *elastic properties* material yang dilaluinya. Ketika gelombang mencapai



**Gambar 10** Seismic cone test (courtesy of Fugro Company)

permukaan dimana kecepatan lapisannya berubah secara signifikan sebagai hasil perubahan *physical properties*, bagian energi tersebut direfleksikan kembali ke permukaan, dan sisanya ditransmisikan kedalam lapisan yang lebih rendah. Saat kecepatan permukaan yang lebih rendah adalah lebih tinggi daripada kecepatan lapisan di atasnya,

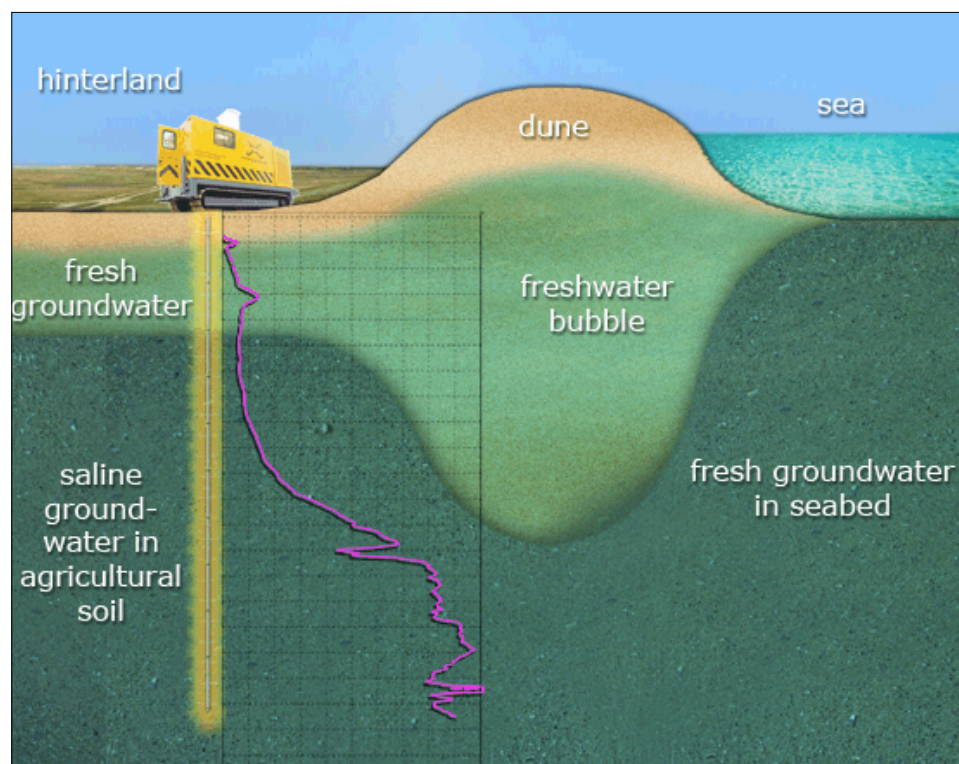


bagian energi juga direfraksikan secara kritis di sepanjang *interface* lapisan tanah. Gelombang yang direfraksikan secara kritis tersebut berjalan di sepanjang *interface* pada kecepatan lapisan yang lebih rendah dan terus menerus merefraksikan energi kembali ke permukaan.

*Seismic cone* harus dapat mengukur kecepatan gelombang geser yang dihasilkan dari sumber pada dasar lautan dan juga dapat dioperasikan sebagai *cone penetrometer* biasa. Dalam beberapa kasus *seismic cone test* juga dibutuhkan untuk mengukur gelombang-P.

### Electrical Conductivity Cone / EC Probing

*Conductivity probing / EC Probing* diaplikasikan untuk menentukan konduktivitas elektrik dari tanah. Informasi dapat diperoleh dengan memperhatikan kontaminan logam atau indikasi kadar klorida. Perlu dicatat bahwa indikasi kadar klorida adalah turunan (kalkulasi) dari konduktivitas, dan informasi ini tingkat kepercayaannya sekitar 50 %. *EC Probing* terutama digunakan untuk menentukan transisi daerah dari air tawar ke air payau, dan secara opsional air tanah



**Gambar 11** Conductivity Probing (Courtesy of BMNED)

asin yang mana dibutuhkan investigasi lebih lanjut. Dikarenakan *electrical conductivity* tanah tergantung dari jenis tanah selama pelaksanaan *conductivity probe*, parameter dasar CPT dengan tekanan air dan suhu tidak diperhitungkan.

### Field Vane Test

*Vane Shear Test* dasarnya terdiri dari alat vane bermata pisau empat yang ditempatkan pada tanah *undisturbed* dan diputar dari permukaan untuk menentukan gaya yang dibutuhkan untuk menyebabkan permukaan berbentuk silinder menjadi terpotong oleh alat *vane*. Gaya ini lalu dikonversikan menjadi satuan tahanan geser dari permukaan berbentuk silinder. Perlu diperhatikan bahwa friksi dari batang *vane* dan instrument diperhitungkan, jika tidak friksi yang dicatat sebagai kekuatan tanah akan tidak tepat. Pengukuran friksi dalam

keadaan tanpa beban akan lebih baik karena torsi yang diaplikasikan oleh keseimbangan momen tidak menghasilkan nilai yang tepat. Batang *vane* memiliki kekakuan yang cukup sehingga batang *vane* tersebut tidak terpelintir dalam kondisi dengan beban. Jika tidak maka perlu dilakukan koreksi pada kurva torsi-putaran yang telah diplot.

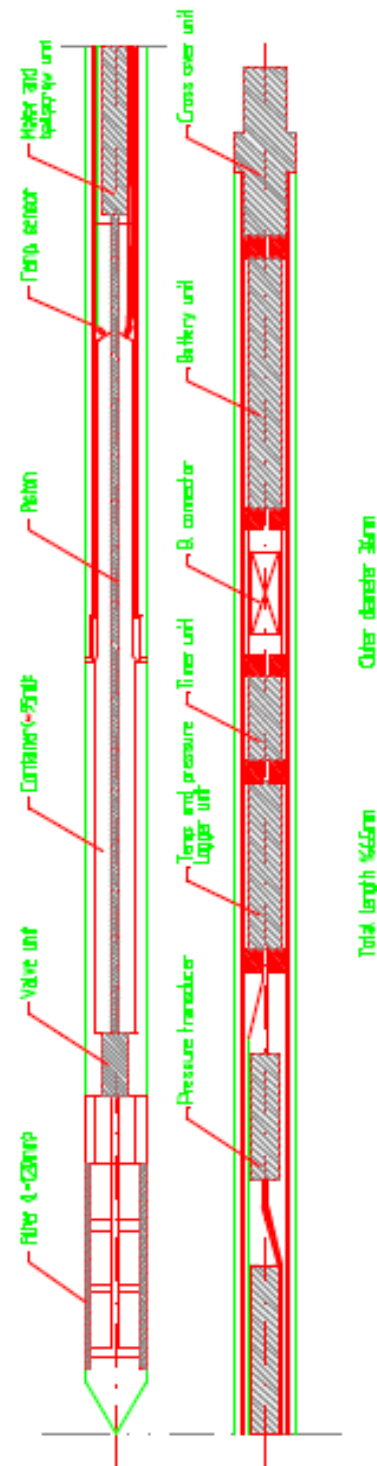
### BAT Probe Test / Deep Water Gas Probe (DGP)

BAT probe terutama digunakan dalam pengeboran. BAT probe dioperasikan dengan tenaga listrik dan transfer sinyal melalui kabel menuju geladak. DGP menggunakan tenaga baterai *down-hole* dan operasinya adalah *pre programmed*. Pengukuran yang dilakukan selama pengujian disimpan pada unit memori untuk mendownload dan memproses ketika probe mencapai geladak. Sampel diambil dari air pori yang mana



**Gambar 12** Field Vane Shear Test (Courtesy of D.S.E CO, Ltd)





**Gambar 13** NGI's Deepwater Gas Probe (after Morkelbost and Strandvik, 1999)

dapat mengandung gas apapun. Hasil dari uji BAT / DGP dapat berupa :

- ▶ Koefisien permeabilitas pada tanah yang berdekatan dengan filter probe
- ▶ Derajat kejenuhan gas air pori

### T-Bar Test

T-Bar adalah penetrometer jenis *flow-round*, dimana (terpisah dari batang yang digunakan untuk menekan penetrometer ke dalam tanah) tanah diizinkan untuk mengalir di sekitar penetrometer sewaktu penetrometer menembus tanah. T-Bar adalah *cone penetrometer* yang dimodifikasi dengan tulangan baja yang di las tegak lurus terhadap *cone penetrometer*.

Menurut Randolph (1998), keuntungan yang dimiliki T-Bar atas CPT adalah:

- ▶ Tegangan *overburden* dalam keseimbangan di atas dan di bawah penetrometer (diluar daerah batang yang ditekan), sehingga *load cell* hanya mengukur perbedaan gaya yang dibutuhkan untuk menekan batang. Selain itu *load cell* dapat memiliki resolusi yang tinggi (karena daerahnya lebih besar dibandingkan *cone penetrometer*)
- ▶ Tahanan penetrasi dapat dikalkulasi secara langsung dengan solusi plastis atau analisis numeric, dan hanya bergantung pada kekuatan



**Gambar 14** T-Bar (Courtesy of Soil Interactions Laboratory)

geser tanah, dan tidak tergantung pada index kekakuan atau kondisi tegangan di lapangan

- ▶ Tahanan T-bar dapat diukur selama pencabutan dan pemasukan, yang mana memungkinkan penilaian kekuatan geser *remoulded* dan juga sensitivitas.

### Investigasi laboratorium

Jenis pengujian yang perlu dilakukan terdiri dari:

- ▶ *Classification and index test* seperti: berat jenis sampel, berat jenis partikel padat, kadar air, batas cair dan batas plastis, distribusi ukuran partikel, kadar garam, kadar karbonat
- ▶ Pengujian permeabilitas

- ▶ Pengujian konsolidasi
- ▶ Pengujian statis untuk menentukan parameter kekuatan geser : uji tri-axial dan uji *direct simple shear*
- ▶ Pengujian untuk menentukan kekuatan geser *remoulded*
- ▶ Pengujian *cyclic* untuk menentukan parameter kekuatan dan kekakuan: uji triaxial, uji *direct simple shear*, *resonant column*, pengukuran kecepatan gelombang geser

#### a. Classification and Index Test

Parameter yang didapatkan seperti: berat jenis sampel, berat jenis partikel padat, kadar air, batas cair dan batas plastis, distribusi ukuran partikel, kadar garam, kadar karbonat.

#### b. Consolidation Test

Pengujian ini dilakukan untuk memberikan karakteristik penurunan tanah dan input penting yang berkaitan dengan sejarah tegangan tanah. Program pembebanan dan siklus *unloading-reloading* harus dipilih secara hati-hati.

#### c. Triaxial Test

Pengujian *triaxial* harus dilakukan untuk menyediakan karakteristik kekuatan geser dan hubungan tegangan-regangan tanah. Untuk pengujian *undrained* dengan pengukuran tekanan pori, parameter *dilatancy* juga dapat diperoleh.

d. Direct Simple Shear Test

Dalam pengujian *direct shear*, sampel tanah dikonsolidasikan dibawah kondisi  $K_0$  dan diberikan tegangan geser horizontal. Hasil pengujian ini adalah kekuatan geser dan karakteristik tegangan-regangan tanah dalam arah horizontal.

e. Ring Shear Test

*Ring Shear Test* merupakan metode untuk menginvestigasi pengembangan tegangan geser pada sampel tanah atau disepanjang *interface* antara tanah dan elemen struktur selama deformasi besar dan dapat dilakukan berdasarkan ASTM D6467-99. Jenis yang paling umum adalah perangkat Bishop dan perangkat Bromhead.

f. Resonant Column Test

Pengujian *resonant column* bertujuan untuk menentukan modulus geser dan redaman tanah pada regangan kecil.

g. Piezometric Bender Element Test

Hasil dari pengujian *piezometric bender element* adalah kecepatan gelombang geser, yang mana dapat digunakan untuk menghitung modulus geser regangan kecil,  $G_{max}$ , pada sampel tanah. Teknik *piezometric bender element* dapat digunakan pada tahapan triaxial apapun, dan pengujian konsolidasi tanpa mengganggu pengujian.

h. Thixotropy Test

Pengujian ini menyediakan data saat peningkatan kekuatan geser *undrained* dengan waktu pada sampel *remoulded*, termasuk pengaruh konsolidasi.

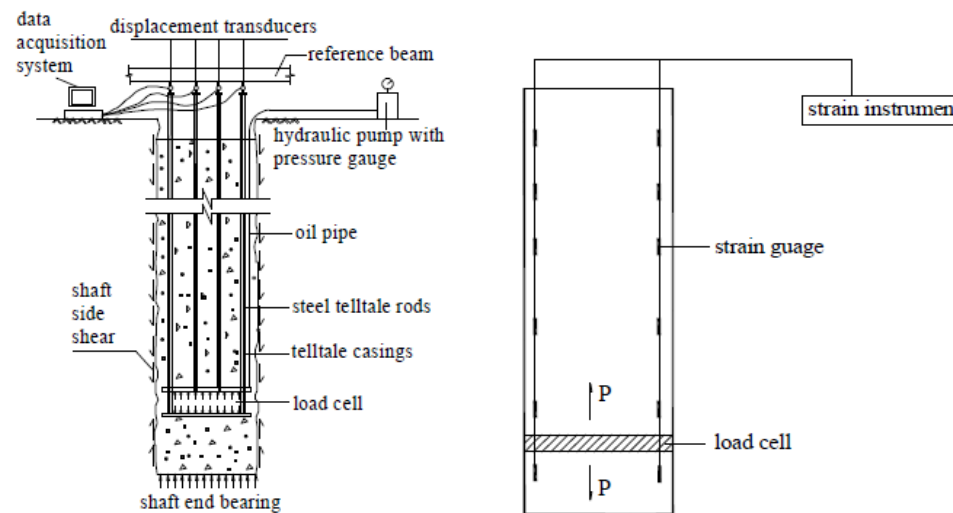
i. Heat Conductivity Test

Metode laboratorium yang menggunakan *thermal needle probe*, dapat memberikan konduktivitas panas suatu sampel tanah *undisturbed* atau *remoulded*. Jarum panjang berdiameter kecil dimasukkan ke dalam specimen. Jarum terdiri dari elemen pengukur panas dan temperature. Dengan mengaplikasikan arus konstan ke alat pemanas, peningkatan suhu direkam sebagai fungsi waktu dan konduktivitas termal, yang diperoleh dari analisis kurva suhu-waktu.

## Monitoring

### Load Cell Method

Pengujian load cell dilakukan setelah konstruksi fondasi selesai dilakukan. Metode pengujian *load cell* adalah membebani tiang fondasi dengan *load cell* yang ditanamkan. Pertama-tama harus dihitung titik ekuilibrium (biasanya di sekitar dasar tiang), untuk menentukan lokasi *load cell*. *Load cell* merupakan perlengkapan pembe-



Gambar 15 Skema pengujian load cell (College of Civil Engineering, 2006)

banan yang didesain khusus, yang terdiri dari *plunger*, plat atas, plat bawah, dan *cell walls*.

Tekanan *load cell* dapat diukur menggunakan manometer, sedangkan *displacement* pada plat atas dan plat bawah dapat diukur dengan *displacement transducer*. Tekanan pada *load cell* dihasilkan oleh *oil pump* bertekanan tinggi pada permukaan tanah. Ketika dibebani *load cell* akan mengembang, dengan menekan bagian atas ke arah atas, dan bagian bawah ke arah bawah. Hal ini akan memobilisasi tahanan samping dan tahanan ujung pada bagian atas dan bagian bawah tiang.

Berdasarkan hubungan antara pergerakan dengan beban yang diberikan, kurva P-s dapat diperoleh. Berdasarkan dua buah kurva P-s dengan kurva s-lgt dan kurva

s-lgP yang berhubungan, kapasitas ujung pada bagian atas dan bagian bawah tiang dapat ditentukan. Prinsip pengujian *load cell* ditunjukkan pada Gambar 15.

Perhitungan daya dukung dapat dilakukan menggunakan persamaan berikut (DB32/T291-1999),

$$Q_u = \{(Q_{uU} - W) / \gamma\} + Q_{uL}$$

dengan:

$Q_u$  = Daya dukung ultimit

$Q_{uU}$  = Daya dukung bagian atas tiang hasil pengujian

$Q_{uL}$  = Daya dukung bagian bawah tiang hasil pengujian

W = Beban mati efektif tiang bagian atas

$\gamma$  = Koefisien koreksi terhadap tahanan friksi untuk bagian bawah tiang. Untuk lempung dan lanau = 0,8 sedangkan untuk tanah berpasir = 0,7

## Pile Integrity Test

Sonic echo test (low strain integrity testing) telah berhasil digunakan untuk memeriksa integritas tiang setelah diinstalasi. Tak dapat dipungkiri bahwa tiang yang dicetak di tempat pada kebanyakan kasus mengalami kegagalan karena cacat penyusutan batang tiang, diskontinuitas beton, intrusi material asing dan kesalahan formasi ujung tiang disebabkan kontaminasi beton dengan partikel tanah pada dasar fondasi, pencucian beton disebabkan arus air yang tinggi, adopsi dari metode konstruksi yang tidak benar, dan pengendalian kualitas beton yang buruk. Retak berkembang selama penanganan tiang pracetak dapat juga menjadi penyebab kegagalan. Jika integritas tiang dapat ditentukan sebelum penyelesaian kepala tiang, maka hal ini akan menjamin integritas tiang yang baik.

Dalam pengujian ini logam kecil atau palu karet keras digunakan untuk menghasilkan ketukan ringan pada pangkal tiang. Kejutan merambat ke bawah tiang direfleksikan kembali dari ujung tiang dan direkam melalui *transducer / accelerometer* yang sesuai (juga berada pada pangkal tiang didekat titik ketukan) kedalam komputer untuk analisis berikutnya.

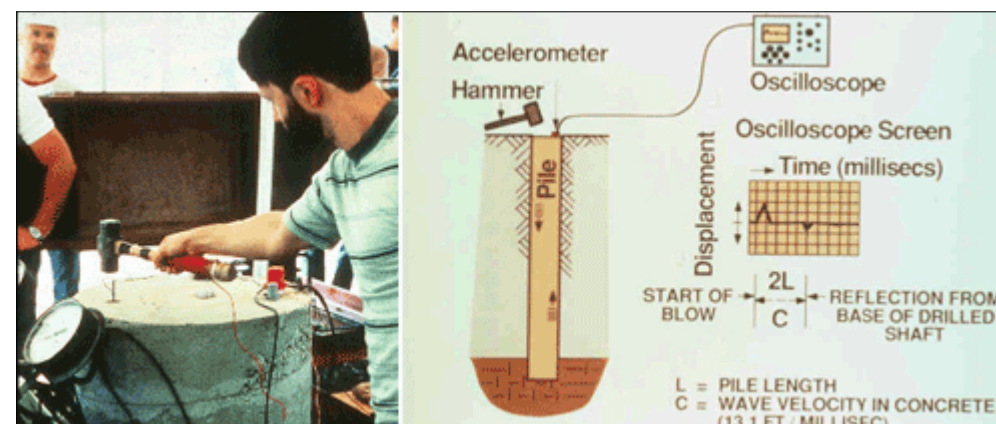
Gelombang getaran primer yang berjalan turun sepanjang tiang direfleksikan dari ujung tiang oleh perubahan

kepadatan antara beton dengan lapisan dibawahnya. Namun bila tiang memiliki ketidaksempurnaan atau diskontinuitas di dalamnya akan memunculkan refleksi sekunder yang mana akan ditambahkan ke sinyal yang kembali. Dengan analisis yang cermat terhadap sinyal yang tertangkap, pengetahuan terhadap kondisi tanah, dan umur beton, gambaran lokasi bermasalah pada tiang dapat dihasilkan. Untuk kasus tiang berdiameter besar, pengujian dilakukan pada lima hingga enam tempat untuk mencakup keseluruhan bagian tiang.

Persyaratan umum pengujian integritas tiang yaitu:

- Tiang harus dipangkas hingga level pemotongan sebelum pengujian selesai
- Daerah yang mengelilingi tiang harus bebas dari genangan air dan harus terus di-*dewatering* selama pengujian
- Tiang yang dicetak ditempat biasanya tidak diuji sebelum berumur 14 hari
- Tiang uji, bila tersedia di lokasi dapat digunakan untuk menentukan kecepatan getaran dan karakteristik sinyal yang dihasilkan. Ini juga dapat dilakukan dari tiang dengan kedalaman yang telah direkam secara akurat.

Berikut ini merupakan pengujian pelengkap terhadap metode pengujian integritas regangan rendah. Pengujian ini dapat digunakan untuk memeriksa kondisi beton saat pengujian dan untuk menilai



Gambar 16 Konsep pengujian sonic echo (FHWA, 2007)

kecepatan gelombang beton tiang berdasarkan kepadatan beton dan kondisi di lokasi. Pemeriksaan tersebut terdiri dari:

- Pengujian kecepatan getaran ultrasonik. Pengujian ini dilakukan pada pangkal tiang untuk mendapatkan kecepatan perambatan suara melalui beton di dalam pipa.
- Pengujian penetrasi. Pengujian ini digunakan untuk menilai kekuatan beton pada pangkal tiang untuk memastikan bahwa tiang cukup perawatan dan siap untuk NDT.
- Pengujian kepadatan cetakan kubus. Untuk menentukan kepadatan beton menggunakan kubus harus diukur kepadatan dengan menimbang di udara dan di air.

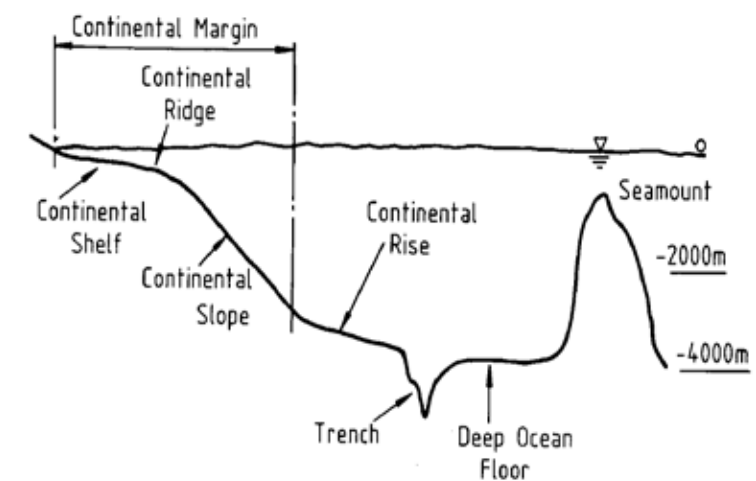
Pengujian *sonic echo* dapat diaplikasikan terhadap tiang pancang dan bor yang dicetak di lokasi. Namun pengujian ini tidak dapat dilakukan setelah pengecoran *pile cap*. Selain itu metode ini tidak cocok untuk tiang yang dikelilingi oleh air karena dapat memberikan hasil yang tidak tepat. Kehilangan lokal selimut, intrusi kecil atau jenis kondisi pada dasar tiang juga tidak dapat dideteksi. ■

## Bab 3

# Sifat Lapisan Tanah di Lautan

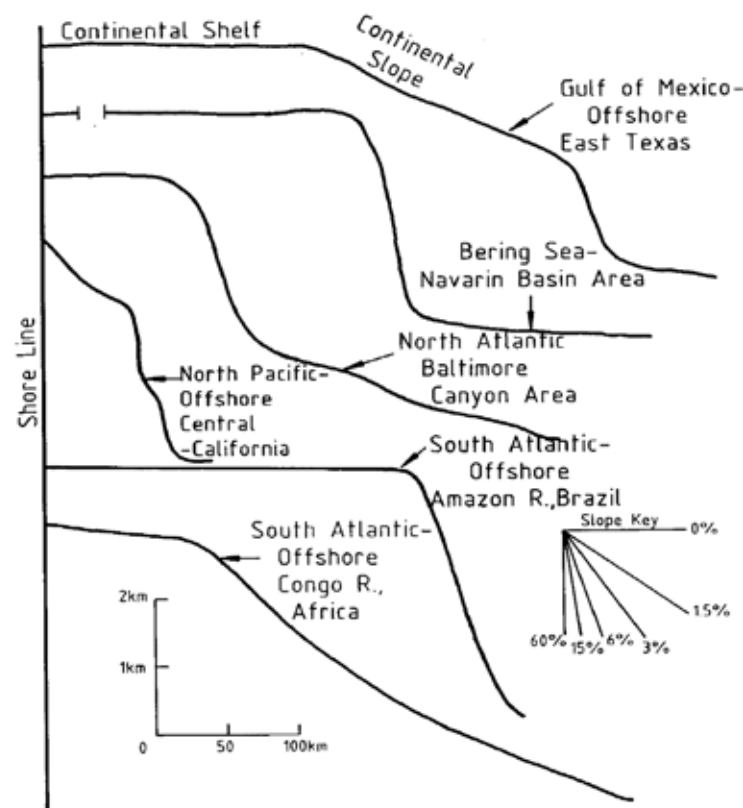
## Fitur topografi dasar laut

Terdapat tiga fitur topografis umum yang utama di lautan yaitu batas kontinental (*continental margins*), dasar lautan (*ocean floors*), dan system pegunungan di lautan. Hal ini diilustrasikan seperti pada *Gambar 17*. Batas kontinental umumnya disusun oleh *continental shelf*, *continental slope*, dan *continental rise*. Batas kontinental tersebut mencakup 21 % dari total wilayah lautan dengan rincian *continental shelf* seluas  $27 \times 10^6$  m<sup>2</sup>, *continental slope* seluas  $28 \times 10^6$  m<sup>2</sup>, dan *continental rise* seluas  $74 \times 10^6$  m<sup>2</sup> (Poulos, 1988). Deskripsi mengenai asal dan karakteristik yang lebih detail dijelaskan pada beberapa tulisan yang berhubungan dengan geologi kelautan seperti Shepard (1963), Keen (1968), dan Shepard (1977).



**Gambar 17** Fitur topografi utama di dasar laut (Poulos, 1988)





**Gambar 18** Hubungan antara continental slope dengan continental shelf-nya pada beberapa wilayah (Poulos, 1988)

*Continental shelf* merupakan topografi dan geologi lanjutan dari daratan di sekitarnya yang terbenam oleh air dengan perubahan akibat erosi di lautan maupun deposit sedimen. Lebar *continental shelf* rata-rata adalah 70 km dengan kemiringan rata-rata dibawah 1°. *Continental shelf* yang paling lebar terdapat pada samudera Arctic dan di sepanjang bagian utara dan barat samudera Pacific. Sedangkan *continental shelf* yang paling sempit terdapat disekitar daerah pegunungan muda.

*Continental slope* memiliki kemiringan yang lebih curam daripada

*continental shelf*. Kemiringan lereng pada *continental slope* tidak seragam, dapat mencapai hingga 6° di pantai, namun bisa juga hanya 1° pada sungai besar. **Gambar 18** memperlihatkan kemiringan *continental slope* untuk beberapa wilayah pengembangan minyak.

*Continental rise* terdapat pada dasar *continental slope* dan pada kebanyakan wilayah dapat berupa fitur deposit. *Continental rise* terbentuk oleh *sediment slurry*, dan *pelagic sediment* dengan ketebalan dapat mencapai hingga 1,6 km. Sedimen tersebut kebanyakan berasal dari daratan.

**Tabel 2** Klasifikasi partikel sedimen berdasarkan ukuran (Gross, 1977)

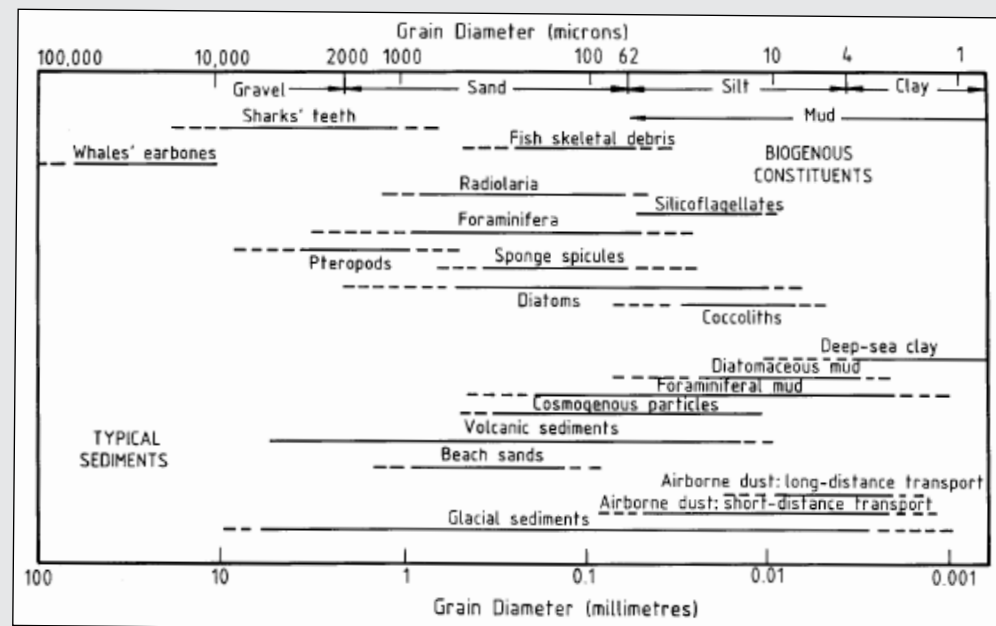
Size fraction	Particle diameter (mm)
boulders	>256
cobbles	64-256
pebbles	4-64
granules	2-4
sand	0.062-2
silt	0.004-0.062
clay	<0.004

Dasar lautan mencakup segala sesuatu di lautan setelah batas kontinental selain system pegunungan di lautan. Daratan yang berdekatan dengan *continental rise* sangat luas pada wilayah Atlantik dan tersebar di wilayah Pasifik. Semua dataran dihubungkan oleh ngarai maupun saluran lain yang menuju sumber sedimen di daratan. Gunung di bawah laut mengisolasi dasar lautan dimulai dari sumber vulkanik yang mana tidak melewati permukaan lautan. Kebanyakan system pegunungan di lautan membentuk beberapa wilayah topografi tinggi yang berhubungan di lautan dengan lebar antara 1000 km hingga 4000 km dengan relief antara 2 km hingga 4 km di atas dasar laut, dan terkadang menonjol dari permukaan laut sebagai pulau. Palung sangat dalam, celah yang curam, khususnya terlihat di sekitar cekungan samudera pasifik. Palung merupakan bagian yang paling dalam dari lautan, dengan kedalaman yang dapat mencapai 8 km. Palung terdalam adalah palung Mariana dengan dalam 11 km.

### Sumber, Klasifikasi, dan Distribusi Sedimen di Lautan

Sedimen di lautan disusun oleh *detrital material* dari daratan dan zat-zat hasil proses pengolahan biologi dan kimia. *Detrital material* terdiri dari partikel-partikel yang terbawa oleh sungai, gletser, dan angin, dengan mana material organik kebanyakan berasal dari kulit dan tulang organisme-organisme di lautan. Ukuran partikel secara umum berkurang terhadap jarak dari tepi pantai. Sedimen biasanya sangat tebal di sekitar benua dan sangat tipis pada pegunungan yang baru terbentuk di tengah samudera. Namun beberapa daerah di dasar samudera sama sekali tidak tertutup oleh lapisan sedimen, akibat tersapu bersih oleh arus yang sangat kuat.

Terdapat dua cara untuk mengklasifikasi partikel-partikel sedimen, yaitu oleh ukurannya dan oleh asalnya. Klasifikasi berdasarkan ukuran yang umum ditunjukkan oleh **Tabel 2** (Gross, 1977). Ukuran partikel merupakan property penting suatu



**Gambar 19** Ukuran partikel dari bermacam-macam sumber (Gross, 1977)

**Tabel 3** Ukuran partikel dan specific gravity beberapa jenis sedimen pada batas kontinental (Hamilton, 1974)

Sediment type	Number of samples	Mean grain diameter		Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Specific gravity
		mm	$\phi$				
sand							
coarse	2	0.5285	0.92	100.0	0.0	0.0	2.710
fine	18	0.1638	2.61	92.4	4.2	3.4	2.708
very fine	6	0.0915	3.45	84.2	10.1	5.7	2.693
silty sand	14	0.0679	3.88	64.0	23.1	12.9	2.704
sandy silt	17	0.0308	5.02	26.1	60.7	13.2	2.668
silt	12	0.0213	5.55	6.3	80.6	13.1	2.645
sand-silt-clay	18	0.0183	5.77	33.3	40.2	26.5	2.705
clayey silt	54	0.0074	7.07	5.9	60.6	33.5	2.656
silty clay	19	0.0027	8.52	4.8	41.2	54.0	2.701

**Tabel 4** Ukuran partikel dan specific gravity beberapa jenis sedimen pada dataran dan bukit di lautan (Hamilton et al, 1974)

Environment Sediment type	Number of samples	Mean grain diameter		Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Specific gravity
		mm	$\phi$				
<b>Abyssal plain</b>							
sandy silt	1	0.0170	5.88	19.4	65.0	15.6	2.461
silt	3	0.0092	6.77	3.2	78.0	18.8	2.606
sand-silt-clay	2	0.0208	5.59	35.2	33.3	31.5	2.653
clayey silt	21	0.0056	7.49	5.0	55.4	39.6	2.636
silty clay	36	0.0021	8.91	2.7	36.0	78.3	2.638
clay	5	0.0014	9.51	0.0	21.7	78.3	2.672
<b>Bering Sea and Okhotsk Sea (diatomaceous)</b>							
silt	1	0.0179	5.80	6.5	76.3	17.2	2.474
clayey silt	5	0.0049	7.68	8.1	49.1	42.8	2.466
silty clay	23	0.0024	8.71	3.0	37.4	59.6	2.454
<b>Abyssal hill, deep-sea ('red') clay</b>							
clayey silt	17	0.0056	7.49	3.9	58.7	37.4	2.678
silty clay	60	0.0049	8.76	2.1	32.2	65.7	2.717
clay	45	0.0024	9.43	0.1	19.0	80.9	2.781
<b>Calcareous ooze</b>							
sand-silt-clay	34	0.0154	6.02	37.3	22.3	40.4	2.703
silt	1	0.0169	5.89	16.3	75.6	8.1	2.625
clayey silt	15	0.0069	7.17	3.4	60.7	35.9	2.678
silty clay	151	0.0056	7.48	14.1	33.3	52.6	2.653

sedimen, karena menentukan cara transportasinya dan juga menentukan seberapa jauh perjalanan partikel tersebut sebelum mengendap pada dasar samudera. Ukuran partikel tipikal yang berasal dari bermacam sumber dapat dilihat pada **Gambar 19** (Gross, 1977).

**Tabel 3** dan **Tabel 4** merangkum ukuran partikel dan *specific gravity* untuk bermacam-macam jenis sedimen dari batas benua dan lautan dalam (termasuk dataran dan lingkungan perbukitan) (Hamilton, 1974, Hamilton et al 1982). Variasi karakteristik partikel diantara jenis sedimen yang berbeda terlihat jelas pada tabel tersebut.

Bila diklasifikasikan berdasarkan asalnya, sedimen terbagi dalam tiga kelompok yaitu:

- Lithogenous particles*, merupakan butiran mineral silikat yang berasal dari kerusakan batuan silikat selama pelapukan. Gunung berapi juga dapat menjadi sumber *lithogenous particles*
- Biogenous particles*, merupakan sisa tulang, gigi, maupun cangkang organisme laut yang tak dapat dihancurkan
- Hydrogenous particles*, terbentuk dari reaksi kimia yang terjadi pada air laut atau di dalam sedimen. Bijih mangan merupakan contoh dari partikel jenis

ini, yang terbentuk dalam waktu sangat lama antara 1-100 mm per sejuta tahun.

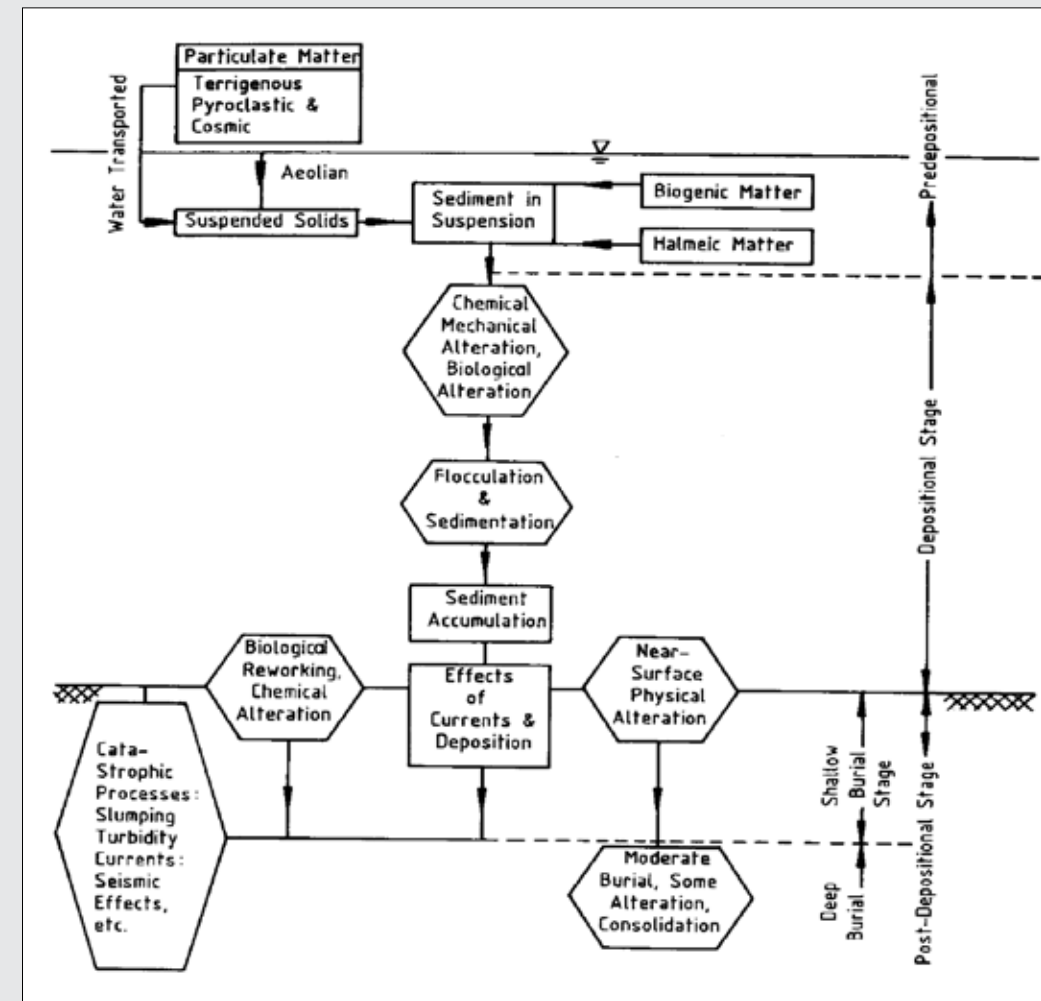
Sistem menyeluruh mengenai klasifikasi sedimen di lautan telah diusulkan oleh Noorany (1983). *Gambar 20* merangkum proses yang bersangkutan dengan pembentukan sedimen lautan (Silva, 1974). Terdapat perbedaan lingkungan dan komposisi diantara sedimen di daratan dengan sedimen di lautan yang mencakup :

- Sedimen lautan telah jenuh dengan air pori yang mengandung garam
- Komposisi sedimen di lautan dapat berbeda dengan sedimen di daratan karena *biogenous particles* yang berbeda

c. Kecepatan deposisinya jauh lebih lambat, khususnya pada lautan yang dalam

d. Tekanan yang tinggi dan lingkungan bertemperatur rendah pada sedimen lautan dapat mempengaruhi mikrostrukturnya.

Oleh karena itu dapat diperkirakan bahwa beberapa aspek dari perilaku teknis sedimen lautan dapat berbeda dengan sedimen yang terdapat di daratan. ■



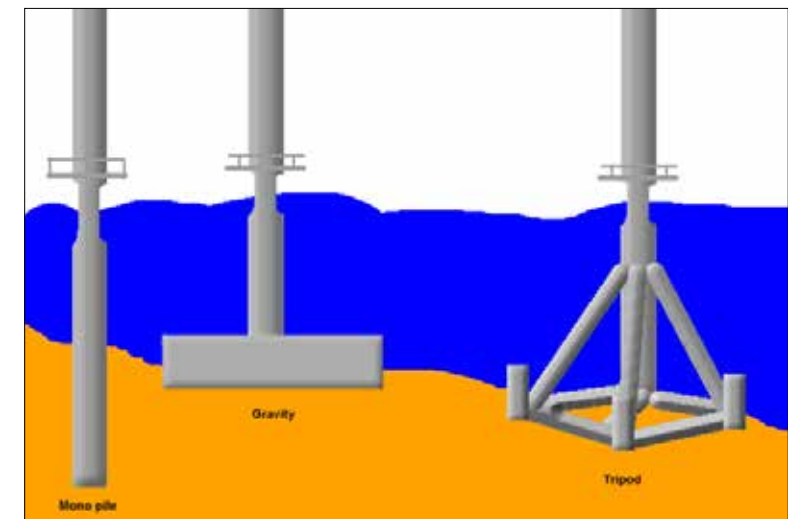
**Gambar 20** Proses yang terlibat dalam formasi sedimen di lautan (Silva, 1974)



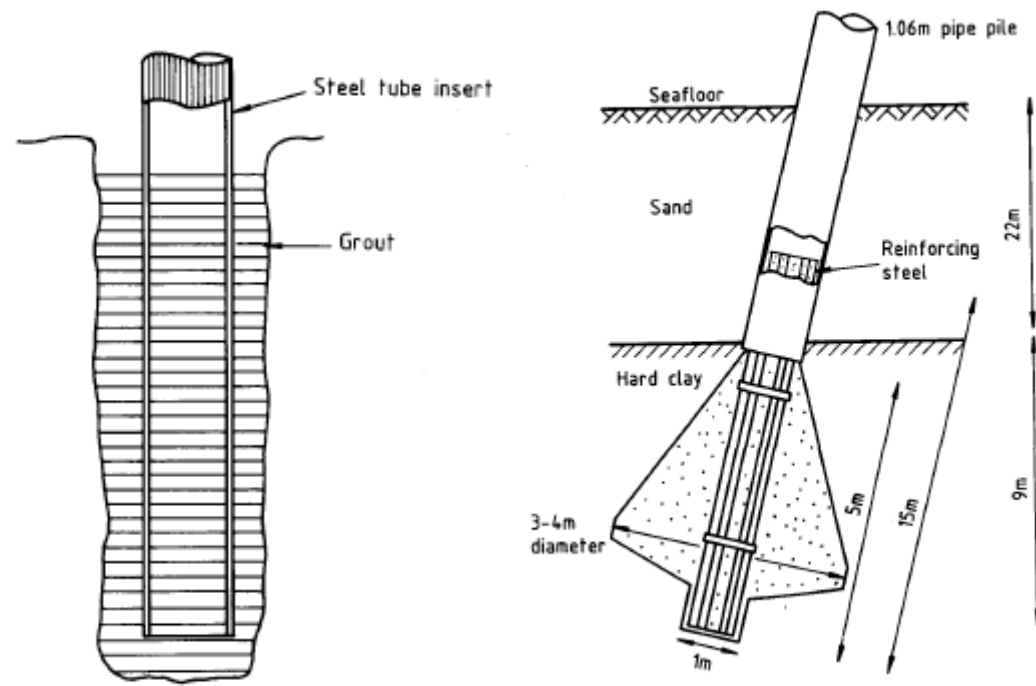
**Bab 4**

# Teknologi Fondasi

Secara garis besar terdapat tiga jenis fondasi utama, yaitu *monopiles*, *gravity-based*, dan *jackets/tripods*. Beberapa teknologi fondasi yang dapat digunakan dalam pembangunan jembatan bentang panjang dijabarkan sebagai berikut.



**Gambar 21** Jenis fondasi secara umum



**Gambar 22** Single stage straight bored piles (Poulos, 1988)

**Gambar 23** Belled pile (Poulos, 1988)

## Pile Foundation

Terdapat beberapa jenis pile foundation yaitu:

- Driven Piles
- Bored Piles

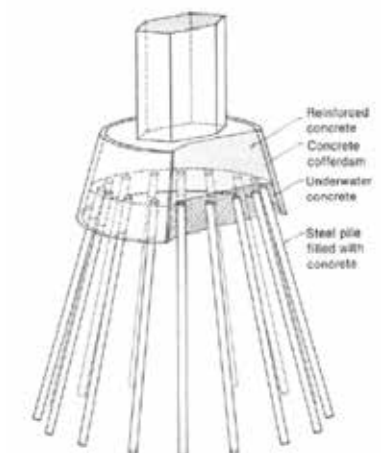
George (1976) mengidentifikasi fondasi bored pile lepas pantai menjadi tiga jenis yaitu: *single stage straight bored piles*, *driven primary and straight bored piles*, *belled piles*. *Single stage straight bored piles* dibangun dengan melakukan pem-

boran lubang dengan ukuran *oversize* hingga kedalaman yang diperlukan, lalu memasukkan pile tabung baja lalu di *grouting* pada bagian antara pile dengan tanah.

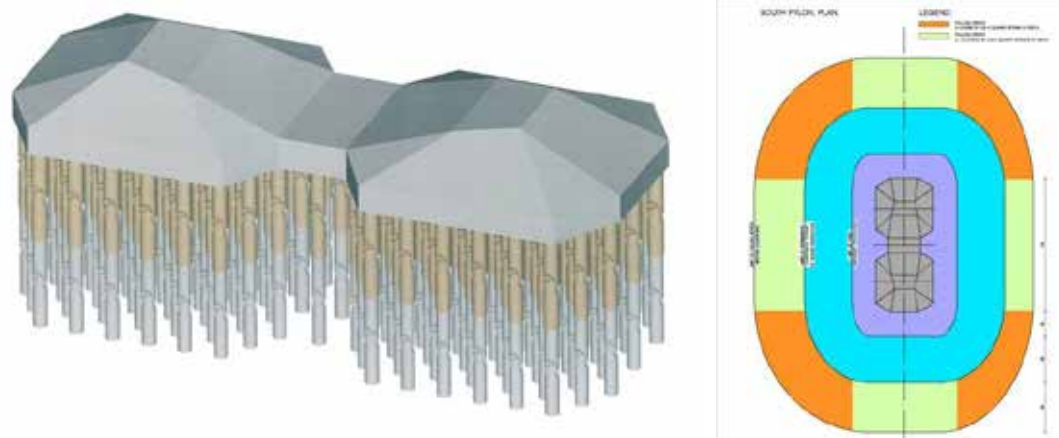
*Belled piles* dibentuk dengan meng-*underreaming* bagian bawah fondasi menggunakan alat, dan pada bagian atasnya biasanya dibentuk dari tiang pancang. Fondasi tersebut dapat mengakomodir kapasitas *end bearing* dan *uplift*.



**Gambar 24** Konstruksi bored pile dan instalasi pile cap pada Busan Geoje Bridge (Korea Selatan) (Courtesy of COWI)



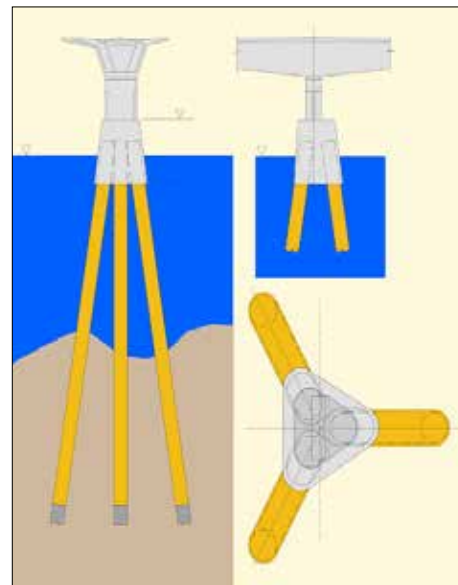
**Gambar 25** Sistem fondasi yang digunakan pada Faro bridge di Denmark (Courtesy of COWI)



**Gambar 26** Fondasi yang digunakan pada Sutong Bridge (China) (Courtesy of COWI)

Sutong bridge di China juga mengaplikasikan sistem fondasi tiang. Dimensi *pile group* yang digunakan adalah 48 x 114 m. Fondasi yang digunakan adalah 131 buah *bored pile* berdiameter 2,8 m dengan kedalaman 120 m. Fondasi pada Sutong bridge ini juga telah memasang pengaman gerusan mengelilingi *pile group*.

Contoh lain aplikasi fondasi tiang pada jembatan yang melintasi lautan adalah pada Jamuna River bridge di Bangladesh. Fondasi yang digunakan pada Jamuna River bridge dapat dilihat pada **Gambar 27**.



**Gambar 27** Sistem fondasi pada Jamuna River bridge (Bangladesh)

## Gravity Foundation

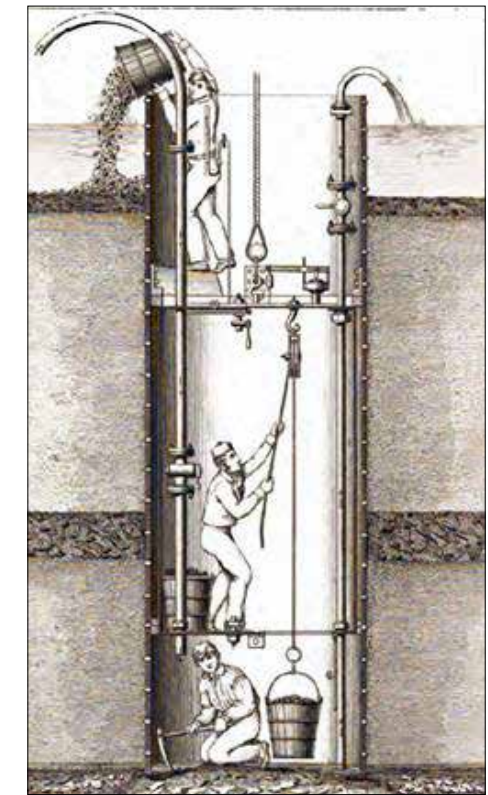
*Gravity foundation* dapat mencapai kedalaman air laut hingga 60 m (COWI). Beberapa jenis *gravity foundation* yaitu:

### a. Caisson

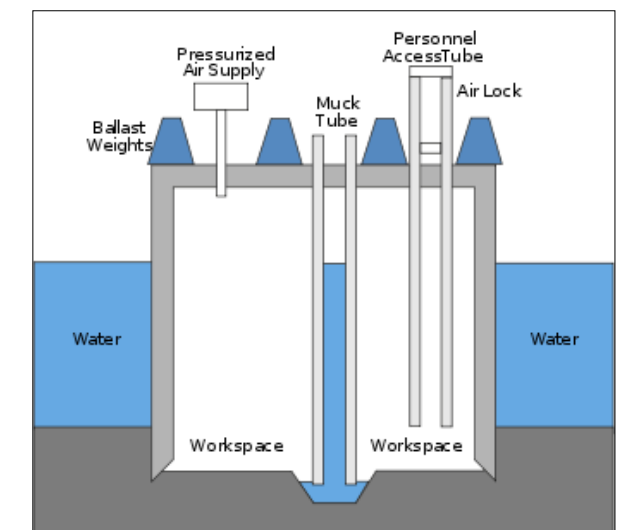
Caisson merupakan struktur yang digunakan untuk konstruksi di bawah permukaan air maupun sebagai fondasi. Caisson biasanya berbentuk persegi atau lingkaran dengan diameter yang besar. Beberapa jenis fondasi caisson yaitu *box caisson*, *opened caisson*, *pneumatic caisson*, dan *monolithic caisson*.

Konstruksi *box caisson* terbuka pada bagian atas namun tertutup pada bagian bawah. Caisson ini biasanya dibangun di daratan lalu di launching secara terapung dan dibenamkan ke lokasi fondasi yang telah dipersiapkan dengan bagian atas caisson tetap di atas permukaan air. Box caisson dapat juga berfungsi sebagai *pier*, *seawall*, *breakwater*, dan *jetty*.

Konstruksi *opened caisson* terbuka pada bagian atas dan bawah. Saat proses penggalian dan pembenaman caisson, bagian tambahan ditambahkan pada bagian atas caisson. Proses ini dilanjutkan hingga caisson telah terbenam pada kedalaman yang diinginkan. Lalu lantai yang biasanya terbuat dari beton ditempatkan pada dasar caisson.



**Gambar 28** Opened caisson (Triger, 1846)



**Gambar 29** Pneumatic caisson  
([http://en.wikipedia.org/wiki/caisson\\_%28engineering%29](http://en.wikipedia.org/wiki/caisson_%28engineering%29))





**Gambar 30** Prefabricated caisson yang diinstallasi dengan crane terapung pada Great Belt West Bridge (Denmark) (Courtesy of COWI)

*Pneumatic caisson* hampir mirip dengan *opened caisson*. Bagian *working chamber* pada caisson diberi tekanan sesuai keperluan untuk mengendalikan masuknya tanah dan air. Lalu galian dapat dilakukan oleh pekerja yang bekerja pada *working chamber* pada dasar caisson.

*Monolithic caisson* bersifat monolit dan sesuai namanya memiliki ukuran lebih besar dibandingkan dengan jenis yang lain namun serupa dengan *opened caisson*.

Great Belt East bridge di Denmark memiliki panjang 6,6 km dengan panjang bentang 110 m. Great Belt East bridge menggunakan *prefabricated caisson* yang diinstallasi dengan menggunakan *crane* terapung.

Confederation bridge di Kanada juga menggunakan sistem *prefabricated caisson*. Confederation bridge memiliki panjang 12,9 km dengan panjang bentang 250 m. Kedalaman air laut pada lokasi jembatan adalah 30 m.

Pada Oresund bridge di Denmark, sistem Caisson yang digunakan adalah *self floating caisson*. Pembuatan fondasi *caisson* dilakukan pada dok kering. Setelah selesai fondasi *caisson* tersebut lalu di pindahkan ke lokasi yang telah ditentukan. Pemindahan fondasi *caisson* dilakukan dengan bantuan dua buah kapal tongkang yang dihubungkan dengan dua rangka baja besar seperti terlihat pada *Gambar 32*.



**Gambar 31** Prefabricated caisson yang diinstallasi dengan crane terapung pada Confederation Bridge (Kanada) (Courtesy of COWI)

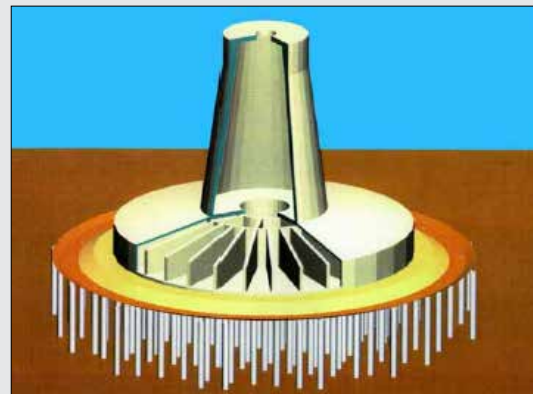


**Gambar 32** Fondasi caisson yang diinstallasi di dok kering dan ditransportasikan menggunakan tongkang dan rangka baja pada Oresund Bridge (Denmark) (Courtesy of COWI)





**Gambar 33** Fondasi yang digunakan pada Great Belt East Bridge (Denmark)  
(Courtesy of COWI)



**Gambar 34** Fondasi yang digunakan pada Rion-Antirion Bridge (Yunani)  
(Courtesy of COWI)

Selain Oresund bridge, jembatan yang menggunakan fondasi dengan sistem *self floating caisson* adalah Great Belt East bridge (Denmark), Tacoma bridge (USA) dan Rion Antirion bridge (Yunani).



**Gambar 35** Repair wharf naval station Mayport  
(Courtesy of Ed Waters & Sons Contracting Co., Inc.)

#### b. Cofferdam

Cofferdam merupakan bangunan sementara yang memisahkan bagian air dengan lokasi konstruksi untuk menciptakan lingkungan bekerja yang kering. Cofferdam umumnya digunakan untuk konstruksi dan perbaikan *oil platform*, pier jembatan, dan struktur yang dibangun pada daerah perairan lainnya. Cofferdam biasanya menggunakan struktur baja dengan pengelasan dan terdiri dari *sheet pile*, *wales*, dan *cross braces*.

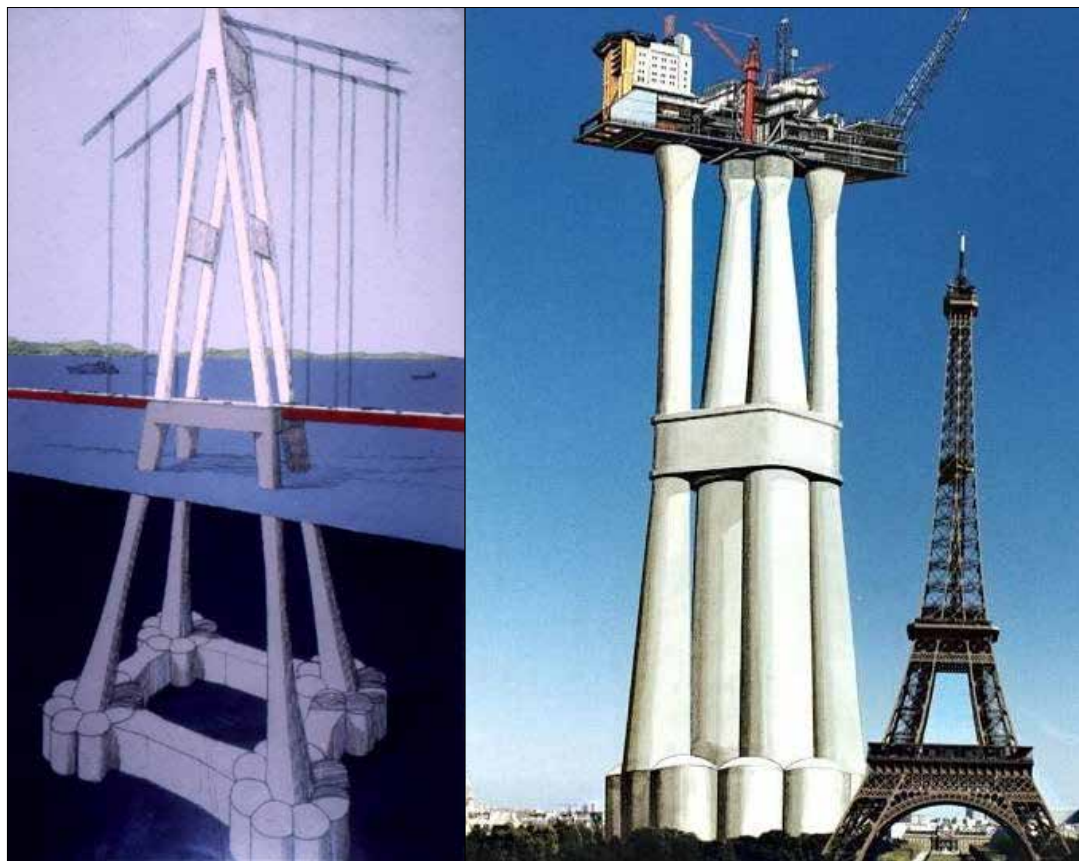
Beberapa aplikasi cofferdam yaitu *stormwater retention vault cofferdam Jacksonville beach*, *casey canal cofferdam Savannah*, dan *repair wharf naval station Mayport*. *Repair wharf naval station Mayport* menggunakan *sheet pile* baja *flat-web* memiliki panjang 70' dengan kekuatan *interlock* tinggi. Apabila diisi, cofferdam ini akan menjadi struktur yang stabil.

c. Deep Water Bridge Foundation

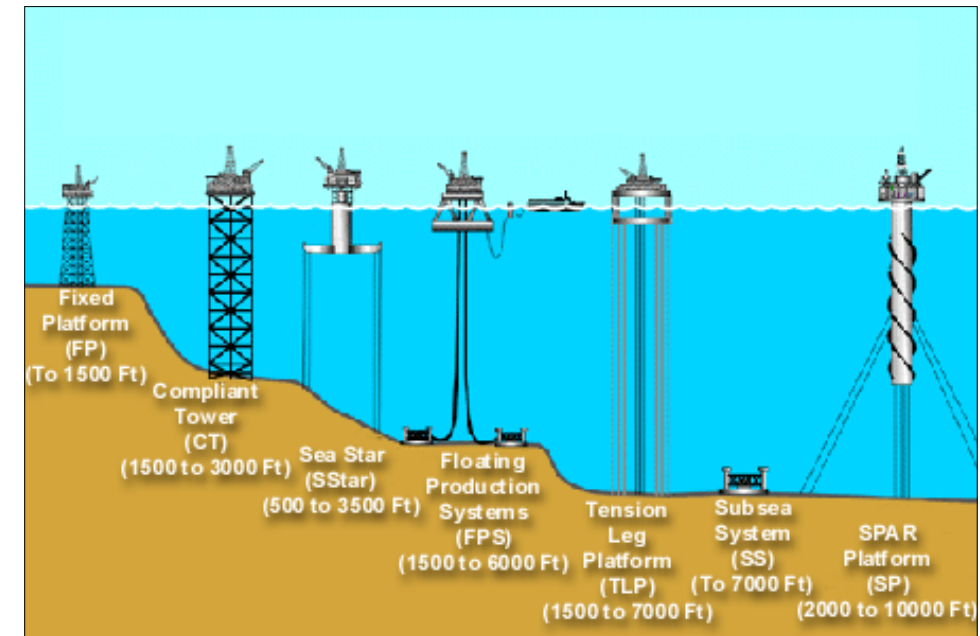
*Deep water bridge foundation* dapat mencapai kedalaman air laut hingga 300 m (COWI). Beberapa jembatan yang menggunakan *deep water bridge foundation* yaitu Yemen-Djibouti Bridge, dan Gibraltar Bridge (Spanyol-Moroko).

Salah satu contoh deep water bridge foundation adalah Troll offshore

platform. Troll offshore platform dengan tinggi pylon 600 m telah dibangun di laut utara yang memiliki kedalaman 300 m. Teknologi *offshore platform* diaplikasikan sebagai landasan yang menyangga pylon. Gaya-gaya akibat lingkungan juga telah diperhitungkan, karena Troll ini telah di desain untuk gelombang setinggi 30 m.



**Gambar 36** Troll offshore platform yang memiliki tinggi 600 m (Courtesy of COWI)



**Gambar 37** Beberapa contoh fondasi offshore (Courtesy of NaturalGas)

### Jackets / Tripod Foundation

Jackets / tripod foundation biasanya digunakan oleh struktur bangunan lepas pantai. Kedalaman fondasi jenis ini dapat mencapai kedalaman hingga ribuan meter ke dasar laut. Tantangan geoteknik lepas pantai yang utama adalah mengendalikan beban cyclic dari gelombang dan angin. Berbagai macam sistem fondasi telah digunakan untuk mendukung infrastruktur yang berhubungan dengan struktur lepas pantai. ■

*Bab 5*

# Kapasitas Fondasi

Dalam melakukan perencanaan fondasi di lautan terdapat beberapa hal yang harus dianalisis, diantaranya tahanan aksial dan tahanan lateral.

## Tahanan Aksial

Tahanan aksial tiang terdiri atas dua bagian, yaitu:

- ▶ Akumulasi tahanan selimut tiang
- ▶ Tahanan ujung tiang

Tiang yang menanggung beban terutama dari mobilisasi tahanan ujung disebut *end bearing piles*, sedangkan istilah *friction piles* digunakan untuk tiang yang menanggung beban terutama dari mobilisasi friksi tiang.

Daya dukung tiang dapat dihitung menggunakan analisis tegangan total atau efektif tergantung dari analisis mana yang merepresentasikan kondisi aktual lebih baik. Terlepas dari metode yang diaplikasikan untuk mengkalkulasi tahanan selimut, harus diperhitungkan pengaruh dari beberapa faktor seperti prosedur instalasi tiang (tiang pancang atau bor), jenis lumpur hasil pengeboran, panjang dan geometri tiang (lingkaran



atau dengan pembesaran diameter dasar), dan pengaruh lainnya.

Tahanan aksial tiang dapat ditentukan berdasarkan salah satu atau kombinasi metode berikut:

- ▶ *Load testing* pada tiang
- ▶ Formula tiang statis
- ▶ Formula tiang dinamis (hanya untuk tiang pancang)
- ▶ Metode semi-empiris berdasarkan pengujian lapangan

Formula tiang dinamis, dipahami berdasarkan teori perambatan gelombang, tidak diterima sebagai satu-satunya metode untuk menentukan daya dukung tiang. Tahanan aksial tiang harus dihitung sesuai dengan metode yang lebih cocok dari beberapa metode yang berbeda.

Metode yang akan digunakan harus dikembangkan berdasarkan pengujian yang menyerupai kondisi terkini dengan menyesuaikan pada kondisi tanah, penentuan parameter tanah, ukuran tiang, beban, dan sebagainya.

Bila galian tanah yang diandalkan untuk transfer beban dari satu elemen tiang ke yang lainnya atau dari elemen tiang ke tanah dasar, maka permukaan harus bebas dari karat, yang mana dapat mengurangi kapasitas untuk transfer beban. Lebih jauh galian tanah tersebut memiliki karakteristik tegangan-regangan yang memungkinkan transfer beban.

### Tahanan pada tanah kohesif

Daya dukung tiang,  $R$ , disusun atas dua bagian, bagian pertama adalah akumulasi tahanan selimut,  $R_s$ , dan bagian lainnya adalah tahanan ujung,  $R_p$ :

$$R = R_s + R_p = \sum f_{si} A_{si} + q_p A_p$$

dimana:

$f_{si}$  = Satuan friksi selimut rata-rata sepanjang tiang pada lapisan  $i$

$A_{si}$  = Area tiang pada layer  $i$

$q_p$  = Satuan tahanan ujung

$A_p$  = Luas ujung bruto dari tiang

Tahanan ujung,  $q_p$ , pada tiang di tanah kohesif umumnya diambil sebesar sembilan kali kuat geser *undrained* tanah pada puncak tiang, asalkan proses instalasi tidak mengurangi kuat geser. Besarnya tahanan ujung dibatasi oleh kapasitas intern tanah yang terdapat pada tiang.

Untuk tiang pada tanah kohesif, tahanan selimut rata-rata dapat dikalkulasi berdasarkan:

- ▶ Metode tegangan total, misalnya metode- $\alpha$
- ▶ Metode tegangan efektif, misalnya metode- $\beta$
- ▶ Kombinasi metode tegangan total / efektif, misalnya metode- $\lambda$

Berdasarkan metode  $\alpha$ , dalam bentuk paling sederhana friksi selimut rata-rata pada lapisan  $i$  diberikan oleh:

$$f_{si} = \alpha c_u$$

dimana

$\alpha$  = pengali yang berhubungan dengan  $c_u$  dan besarnya sama atau lebih kecil dari 1  
 $c_u$  = Kuat geser *undrained* berdasarkan pengujian triaksial UU

Modifikasi dari persamaan di atas direkomendasikan dengan mempertimbangkan pengaruh panjang tiang. Sehingga friksi selimut di sepanjang tiang diperoleh dari persamaan:

$$f_s = \alpha p F c_u$$

dimana

$\alpha p$  = Koefisien friksi puncak,  $c_u/p_0$

$F$  = Faktor panjang,  $L/D$

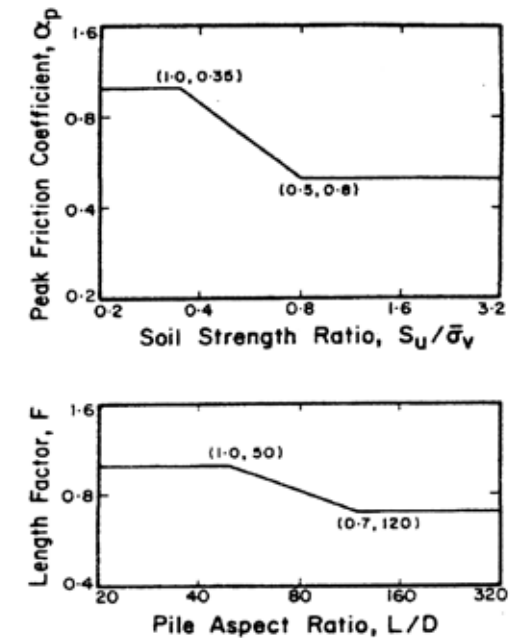
$c_u$  = kuat geser *undrained* rata-rata dari uji triaksial UU disepanjang tiang yang terbenam,  $L$

$p_0$  = Tekanan overburden efektif disepanjang tiang yang terbenam

Beberapa referensi telah dibuat untuk menentukan  $\alpha p$  dan  $F$  seperti pada **Gambar 38**.

### Tahanan pada tanah tidak kohesif

Prediksi kapasitas aksial tiang pancang lepas pantai pada tanah tidak kohesif (lanau dan tanah yang mengandung silika) seringkali membutuhkan ekstrapolasi melebihi batas dari sebuah data dengan mengindahkan ukuran tiang, penetrasi tiang, beban tiang, dan kondisi tanah. Ini dikhususkan untuk tiang yang didesain pada tanah



**Gambar 38** Kriteria untuk memprediksi kapasitas (Det Norske Veritas, 1992)

dimana tanahnya sangat padat dan seringkali telah overkonsolidasi.

Untuk tiang pada tanah tidak kohesif, friksi selimut  $f_s$  dapat diambil sebagai:

$$f_s = K p_0 \tan \delta \leq f_l$$

dimana

$K$  = Koefisien tekanan tanah lateral

= 0,8 untuk tiang dengan ujung terbuka

= 1,0 untuk tiang dengan ujung tertutup

$p_0$  = Tekanan overburden efektif pada titik yang akan dicari

$\delta$  = Sudut dari friksi tanah pada dinding tiang

$f_l$  = Batasan friksi selimut

**Tabel 5** Parameter rencana untuk tahanan aksial dari tiang pancang pada tanah tidak kohesif (API RP 2A, 1987)

Density	Soil description	$\delta$ (degrees)	$f_1$ (kPa)	$N_q$ (—)	$q_1$ (MPa)
Very loose Loose Medium	Silt Sand-silt <sup>2)</sup> Silt	15	48	8	1.9
Loose Medium Dense	Sand Sand-silt <sup>2)</sup> Silt	20	67	12	2.9
Medium Dense	Sand Sand-silt <sup>2)</sup>	25	81	20	4.8
Dense Very dense	Sand Sand-silt <sup>2)</sup>	30	96	40	9.6
Dense Very dense	Gravel Sand	35	115	50	12.0

Tabel di atas hanya sebagai panduan. Apabila informasi lebih detail seperti pengujian *cone penetrometer* lapangan, pengujian kekuatan pada sampel tanah berkualitas, pengujian model atau tersedia data *pile driving*, maka nilai lainnya dapat dibenarkan.

Tahanan ujung dari tiang pada tanah tidak kohesif,  $q_p$ , dapat diambil sebagai:

$$q_p = p_0 N_q \leq q_1$$

dimana

$p_0$  = Tekanan overburden efektif pada ujung tiang

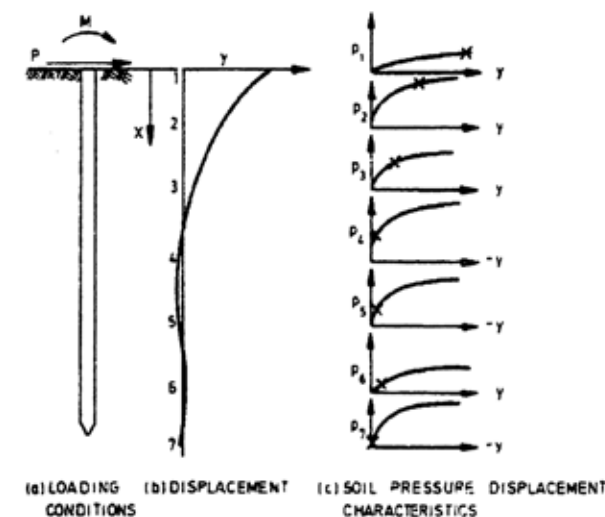
$N_q$  = Faktor daya dukung

$q_1$  = Batasan tahanan ujung

### Tahanan Lateral

Metode paling umum berdasarkan penggunaannya untuk analisis tiang yang dibebani secara lateral disebut kurva p-y. Berdasarkan metode ini kurva beban-defleksi (p-y) lateral dikhususkan untuk mensimulasikan mobilisasi dari tanah sekitarnya ketika tiang mengalami defleksi. Tiang lalu dibagi menjadi beberapa elemen dan tahanan lateral dari setiap titik akan dikarakteristikan oleh kurva p-y.

Dalam pembuatan kurva p-y perlu diberikan pertimbangan pada jenis tanah, jenis beban, pembentukan kembali (*remoulding*) akibat instalasi tiang, pengaruh gerusan, pengaruh gaya lumpur yang terselip, dan lain-lain.



**Gambar 39** Kurva p-y untuk sebuah tiang (Det Norske Veritas, 1992)

Tahanan Lateral pada tanah kohesif

Untuk beban lateral statis, tahanan lateral ultimit per satuan panjang  $p_u$  untuk tanah dengan diameter  $D$  pada lempung lunak bervariasi antara  $8c_u D$  dan  $12c_u D$  kecuali pada kedalaman dangkal, dimana keruntuhan terjadi dalam cara berbeda dikarenakan tekanan overburden minimum. Beban siklik menyebabkan penurunan tahanan lateral dibawah beban statis.

Karena ketiadaan kriteria yang lebih definitive direkomendasikan sebagai berikut:  $p_u$  meningkat dari  $3c_u D$  hingga  $9c_u D$  sebagaimana meningkatnya  $X$  dari 0 hingga  $X_r$  berdasarkan kepada:

$$p_u = (3c_u + \gamma' X) D + J c_u X$$

dan

$$p_u = 9c_u D$$

untuk  $X > X_r$

dimana

$p_u$  = tahanan ultimit per satuan panjang (kN/m)

$c_u$  = kuat geser *undrained* untuk sampel tanah lempung *undisturbed* (kPa)

$D$  = Diameter tiang (m)

$\gamma'$  = Berat jenis efektif tanah (kN/m<sup>3</sup>)

$J$  = Koefisien empiris tak berdimensi dengan nilai berkisar antara 0,25 – 0,50. Batas atas diambil untuk tanah kohesif normally consolidated lunak.

$X$  = Kedalaman dibawah permukaan tanah (m)

$X_r$  = kedalaman dibawah permukaan tanah hingga bagian bawah daerah dengan pengu-rangan tahanan (m). Untuk kondisi dimana kekuatan konstan terhadap kedalaman :

$$X_r = (6D) / (\gamma' (D/c_u) + J)$$

**Tabel 6** Kurva  $p$ - $y$  untuk kasus beban statis short-term.  
(Det Norske Veritas, 1992)

$p/p_u$	$y/y_c$
0	0
0.5	1.0
0.72	3.0
1.00	8.0
1.00	$\infty$

Kurva beban-defleksi ( $p$ - $y$ ) untuk tanah lunak

Kurva  $p$ - $y$  untuk tiang pada lempung lunak umumnya tidak linear.

dimana

$p$  = tahanan lateral aktual (kN/m)

$y$  = defleksi aktual (mm)

$y_c = 2,5 \epsilon_c D$  (mm)

$\epsilon_c$  = Regangan yang terjadi saat setengah dari tegangan maksimum pada uji kompresi *undrained* sampel tanah *undisturbed* laboratorium.

Bentuk dari bagian pre-plastis kurva tahanan statis (poin e pada *Gambar 40*)

dapat didekati dengan parabola:

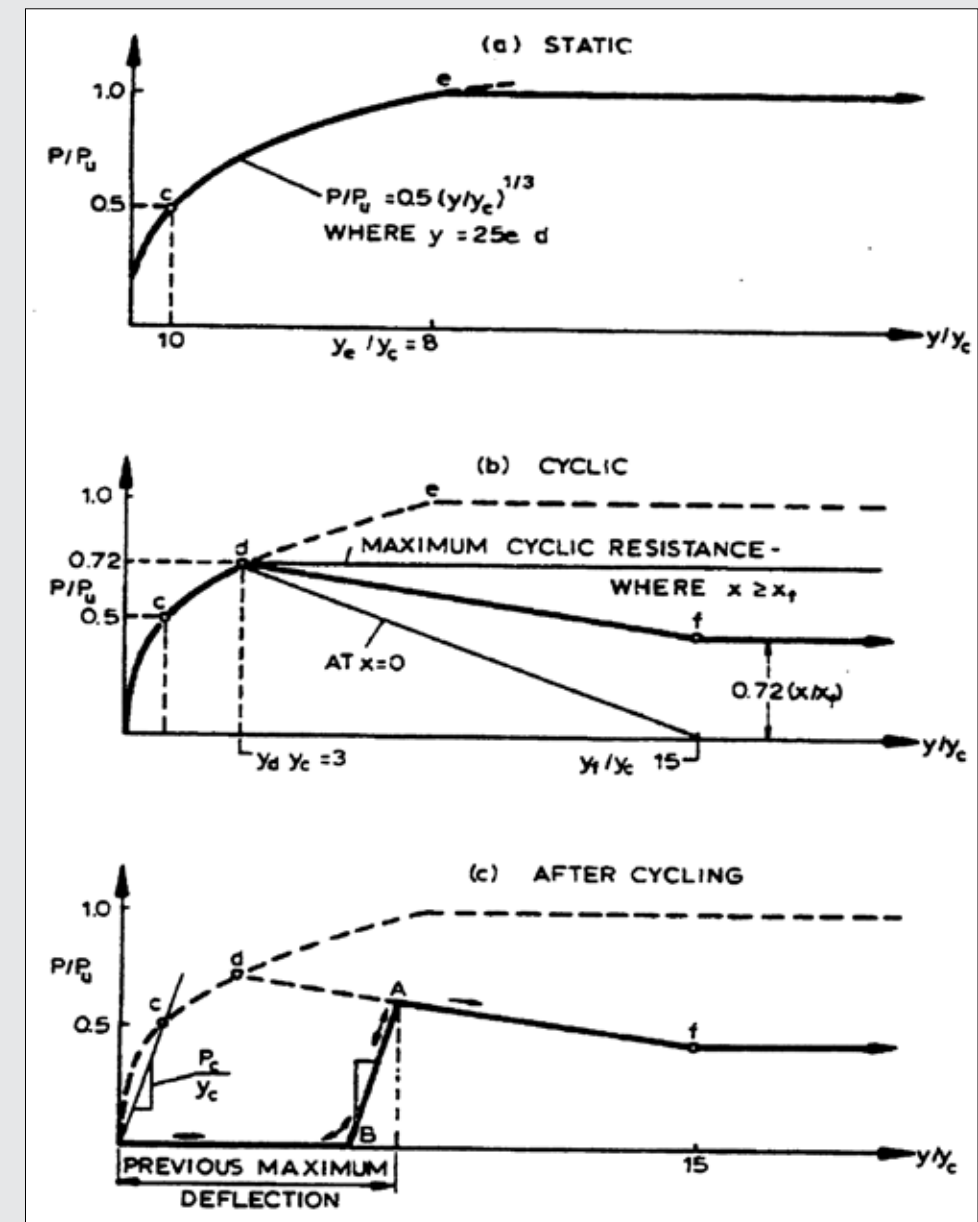
$$(p/p_u) = 0,5 (y/y_c)^{1/3}$$

Untuk kasus dimana kesetimbangan dicapai saat beban siklik, bentuk parabola mengikuti titik d dari titik berbentuk garis lurus hingga titik f. Berdasarkan rasio  $X/X_R$ , nilai  $p/p_u$  dapat bervariasi antara 0 dan 0,72 sebagaimana ditunjukkan pada *Gambar 40*. Untuk defleksi  $y > 15 y_c$ , bentuknya adalah garis horizontal lurus.

Untuk kasus *reloading* setelah beban siklis, kurva  $p$ - $y$  pada *Gambar 40* dapat dimodifikasi untuk menjelaskan kemungkinan celah antara tanah dan tiang akibat beban siklis sebelumnya (lebih intensif).

**Tabel 7** Kurva  $p$ - $y$  untuk kasus dimana kesetimbangan dicapai saat beban siklik (Det Norske Veritas, 1992)

$X > X_R$		$X < X_R$	
$p/p_u$	$y/y_c$	$p/p_u$	$y/y_c$
0	0	0	0
0.5	1.0	0.5	1.0
0.72	3.0	0.72	3.0
0.72	$\infty$	$0.72 X/X_R$	15.0
		$0.72 X/X_R$	$\infty$



**Gambar 40** Kriteria untuk memprediksi kurva  $p$ - $y$ . (a) Beban statis short-time, (b) kesetimbangan dibawah beban siklik inisial, (c) reloading setelah perulangan (Det Norske Veritas, 1992)

## Tahanan Lateral pada tanah tidak kohesif

Tahanan lateral ultimit per satuan panjang  $p_u$  untuk pasir bervariasi dari nilai pada kedalaman dangkal diikuti nilai pada kedalaman lebih besar. Pada kedalaman tertentu persamaan yang memberikan nilai  $p_u$  terkecil harus digunakan sebagai tahanan ultimit.

$$p_{us} = (C_1 H + C_2 D) \gamma' X$$

$$p_{ud} = C_3 D \gamma' X$$

dimana

$p_{us}$  = tahanan ultimit dangkal (kN/m)

$p_{ud}$  = tahanan ultimit dalam (kN/m)

$\gamma'$  = Berat jenis efektif tanah (kN/m<sup>3</sup>)

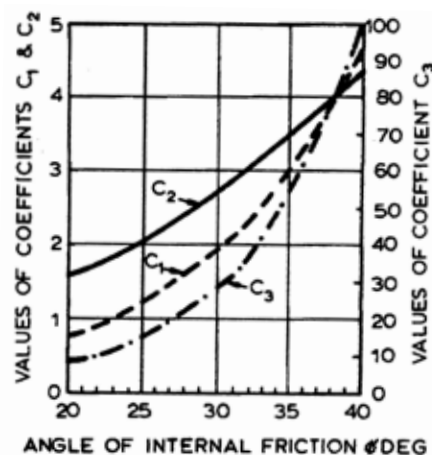
$X$  = Kedalaman (m)

$C_1, C_2, C_3$  = Koefisien yang ditentukan dari

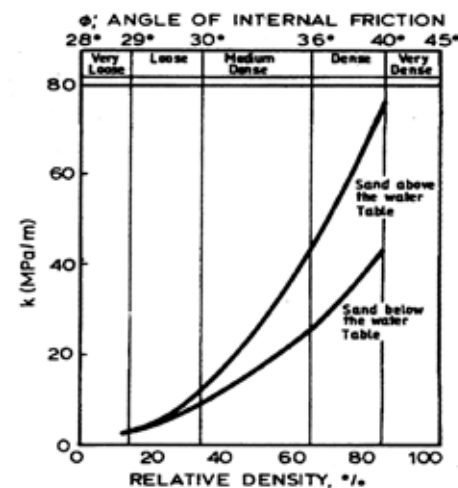
**Gambar 41** sebagai fungsi dari  $\Phi'$

$\Phi'$  = Sudut geser pasir (derajat)

$D$  = Diameter rata-rata tiang dari permukaan ke kedalaman aktual (m)



**Gambar 41** Koefisien  $C_1, C_2, C_3$  sebagai fungsi  $\Phi'$  (Det Norke Veritas, 1992)



**Gambar 42** Modulus reaksi subgrade inisial ( $k$ ) sebagai fungsi relative density dan sudut geser (Det Norke Veritas, 1992)

## Kurva beban-defleksi ( $p$ - $y$ ) untuk tanah tidak kohesif

Hubungan beban-defleksi ( $p$ - $y$ ) tahanan tanah lateral untuk tiang pada pasir juga tidak linear dan dengan ketiadaan informasi lebih definitif dapat didekati pada setiap kedalaman tertentu  $X$  dengan mengikuti persamaan :

$$p = A p_u \tanh((k X y) / (A p_u))$$

dimana

$A$  = Faktor untuk menghitung kondisi beban statis atau siklik, dievaluasi dengan:

$$A = 0,9$$

untuk beban siklik

$$A = (3,0 - 0,8 H / D) \geq 0,9$$

untuk beban static

$p_u$  = tahanan ultimit pada kedalaman  $H$  (kN/m)

$k$  = Modulus reaksi *subgrade* inisial

(MN/m<sup>3</sup>), meningkat secara linear terhadap kedalaman, ditentukan sebagai fungsi sudut geser  $\Phi'$

$y$  = defleksi lateral aktual (mm)

$X$  = kedalaman dibawah permukaan tanah (m)

## Stabilitas Fondasi

Persyaratan stabilitas fondasi seringkali merupakan faktor yang paling menentukan dalam penentuan luas fondasi, kedalaman fondasi, dan berat tertanam untuk struktur dengan fondasi jenis gravity. Oleh karena itu dalam proses perencanaan yang optimal perlu diberikan perhatian dalam perhitungan stabilitas fondasi.

Stabilitas fondasi umumnya dipecahkan dengan metode kesetimbangan terbatas, dengan memastikan kesetimbangan antara gaya yang menggerakkan dengan gaya yang menahan fondasi. Dalam menggunakan metode kesetimbangan terbatas perlu dilakukan analisis beberapa bidang runtuh untuk menemukan keruntuhan yang paling kritis. Sebagai alternatif *Finite Element Method* dapat digunakan untuk melihat bidang runtuh kritis yang merupakan bagian dari analisis.

Formula daya dukung umum untuk kondisi ideal akan menjadi terlalu kasar untuk perhitungan stabilitas fondasi sebuah *gravity base platform* lepas pantai.

Perbandingan perhitungan sederhana dengan analisis yang lebih terperinci sangat penting dalam tahap awal perencanaan.

Sesuai dengan definisi umum kondisi batas ULS, keruntuhan fondasi didefinisikan sebagai keadaan ketika deformasi tanah menjadi sangat besar sehingga kerusakan dapat terjadi terhadap struktur atau perlengkapan vital seperti *casing* atau *riser*. Hal ini harus dipertimbangkan ketika parameter kuat geser dipilih untuk analisis stabilitas. Untuk analisis tegangan total, kuat geser *undrained* harus didefinisikan pada level regangan yang sesuai, yaitu regangan rata-rata, regangan *cyclic* maupun kombinasi dari keduanya.

Untuk analisis tegangan efektif, keruntuhan didefinisikan dengan mencapai tegangan geser yang dicirikan dengan:

$$\tau = \frac{\sigma' \tan \phi'}{\gamma_m}$$

Dengan

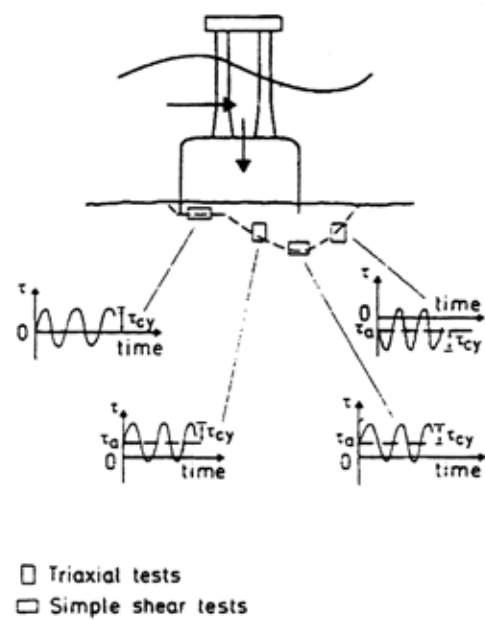
$\sigma'$  = Tegangan normal pada permukaan geser

$\phi'$  = Sudut geser saat runtuh

$\gamma_m$  = Koefisien material

Pengaruh beban *cyclic* terhadap kuat geser harus dihitung untuk dapat digunakan. Hal ini normalnya dibutuhkan untuk *gravity base platform* biasa dimana beban





**Gambar 43** Contoh pembebanan elemen tanah disepanjang kemungkinan permukaan runtuh pada fondasi dibawah gravity platform lepas pantai. (Det Norske Veritas, 1992)

gelombang diatur untuk stabilitas fondasi. Untuk analisis tegangan total, kekuatan *cyclic* harus didefinisikan. Untuk analisis tegangan efektif, tekanan pori yang dihasilkan beban *cyclic* harus dihitung.

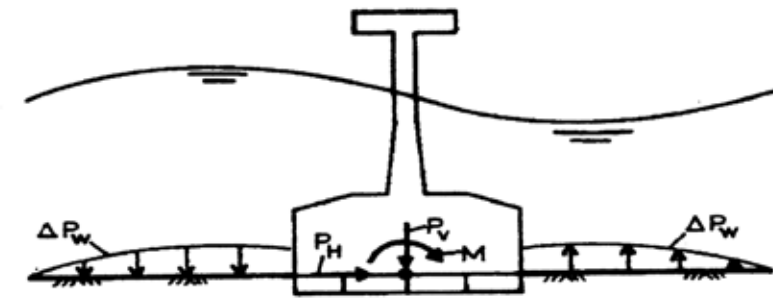
### Metode Penyelesaian

Analisis dapat dilakukan dengan dasar tegangan total, dengan menggunakan kuat geser *undrained* maupun dengan dasar tegangan efektif. Sebagai alternative, stabilitas fondasi dapat dipecahkan menggunakan metode *Finite Element* menerapkan model *constitutive* tanah tidak linier. Bila stabilitas

fondasi dipecahkan dengan analisis *finite element* perlu dievaluasi kemungkinan sumber terjadinya *error* dan pengaruhnya terhadap hasil seperti:

- ▶ Model tanah *constitutive*, misalnya kemungkinan memasukkan kuat geser *isotropic*
- ▶ Prosedur iterasi. Harus memastikan bahwa tegangan geser yang telah ditentukan tidak terlampaui
- ▶ Elemen *mesh*. *Mesh* harus cukup halus dengan rasio lebar/panjang/tinggi elemen yang tepat untuk memastikan distribusi beban melalui tanah tepat.

Analisis kesetimbangan batas biasanya dilakukan dengan menentukan beban desain, seperti memasukkan koefisien beban pada beban yang diaplikasikan dalam analisis. Lalu koefisien material tanah akan dihasilkan dari analisis. Ketika menggunakan analisis *finite element* untuk membuktikan kebenaran stabilitas fondasi menggunakan filosofi keadaan batas dengan koefisien keamanan parsial, direkomendasikan untuk menggunakan kuat geser desain, seperti memasukkan koefisien material tanah, sebagai kakuatan batas dalam model tanah. Beban tersebut harus diaplikasikan pada langkah-langkah hingga atau diatas beban desain untuk menunjukkan bahwa keruntuhan tidak terjadi pada level beban desain.



**Gambar 44** Beban yang bekerja pada fondasi dan tanah di dasar laut (Det Norske Veritas, 1992)

Analisis stabilitas standar untuk beban gelombang harus mencakup:

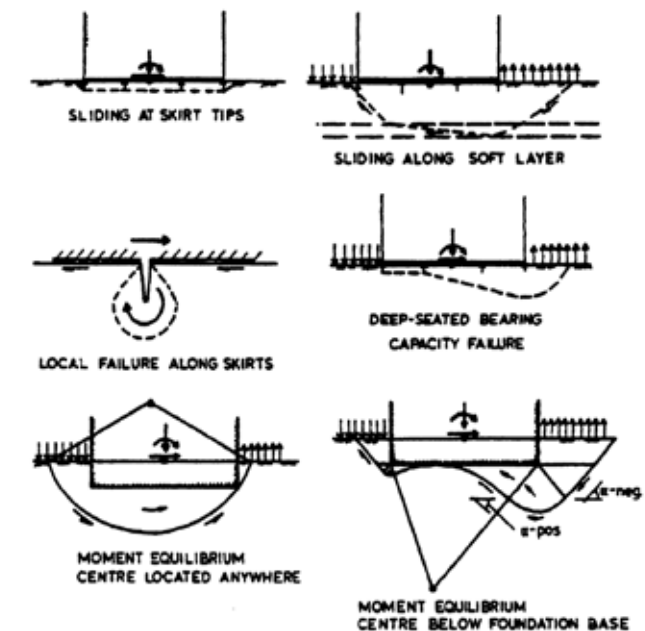
- ▶ Beban mati terbenam
- ▶ Beban angin
- ▶ Kombinasi beban arus dan gelombang

Kombinasi semua beban pada struktur menghasilkan gaya : gaya horizontal, gaya vertikal dan momen guling pada pusat bidang platform di lapisan lumpur. Sebagai tambahan, gaya hidrodinamik pada dasar laut diluar platform harus tercakup. Karena tekanan hidrodinamik dasar laut menghasilkan gaya penggerak tambahan dalam arah horizontal.

Berbagai bentuk keruntuhan perlu dianalisis untuk menemukan bentuk keruntuhan yang paling kritis. Bidang runtuh kritis akan tergantung pada berbagai komponen beban seperti halnya variasi pada tanah dan pada geometri fondasi (ukuran dan bentuk, konfigurasi, dan penetrasi). Beberapa bentuk keruntuhan yang perlu dipertimbangkan yaitu:

- ▶ Geser di sepanjang tepi fondasi

- ▶ Geser di sepanjang lapisan lunak di bawah tepi fondasi
- ▶ Geser pada dasar dengan keruntuhan lokal disekitar tepi fondasi
- ▶ Keruntuhan daya dukung *deepseated*
- ▶ Keruntuhan *deepseated* yang dipengaruhi kesetimbangan momen dengan pusat rotasi di atas atau di bawah dasar fondasi



**Gambar 45** Kemungkinan bentuk keruntuhan fondasi (Det Norske Veritas, 1992)

## Perencanaan Kondisi Batas

Dalam melakukan perencanaan perlu dipenuhi ketentuan bahwa tahanan struktur harus lebih besar daripada beban yang bekerja. Faktor tahanan dan beban dengan LRFD (*Load Resistance Factor Design*) telah menggantikan faktor keamanan yang biasanya digunakan oleh ahli geoteknik dalam metode ASD (*Allowable Stress Design*). Dalam perencanaan struktur dengan metode ASD, biasanya digunakan tegangan ijin daripada faktor keamanan. Tegangan ini dipilih dan dikodifikasikan berdasarkan pengalaman, dan faktor keamanan tidak diperlihatkan oleh perencanaan. Berdasarkan perbandingan, tegangan ijin tidak ditetapkan untuk aspek perencanaan geoteknik. Karena kekuatan telah ditentukan dan digunakan faktor keamanan. Sehingga dalam bidang geoteknik, terdapat kebiasaan untuk mengevaluasi keberterimaan perencanaan berdasarkan perhitungan kekuatan disertai faktor keamanan. Ketika dikonversi ke metode LRFD, proses

perencanaannya diinginkan dapat menghasilkan perencanaan yang sama dengan yang dihasilkan oleh metode ASD menggunakan faktor keamanan. Hal ini berarti jumlah dari faktor pengaruh pada beban dan tahanan LRFD harus sama dengan faktor keamanan pada ASD.

Menurut *Bridge Design Manual* (BMS) 1992, perencanaan keadaan batas didekati dengan:

Faktor reduksi kekuatan dikalikan kapasitas nominal harus lebih besar daripada faktor beban dikalikan dengan beban nominal. Untuk perhitungan kapasitas fondasi dalam yang menggunakan parameter geomaterial  $c$  dan  $\phi$ , pendekatan faktor material (material factor approach, MFA) digunakan dengan faktor reduksi yang tercantum pada *Tabel 8*. Untuk kapasitas fondasi dalam yang ditentukan berdasarkan pengukuran lapangan, pendekatan faktor tahanan (resistance factor approach, RFA) digunakan dengan faktor reduksi yang tercantum pada *Tabel 9*.

**Tabel 8** Faktor reduksi kekuatan untuk parameter tanah (BMS, 1992)

Parameter tanah	Faktor reduksi
<b>Tangen dari sudut geser dalam, <math>\tan \phi</math></b>	
Berdasarkan pengujian	0,8
Tidak berdasarkan pengujian	0,7
<b>Kohesi, <math>c</math></b>	
Berdasarkan pengujian	0,6
Tidak berdasarkan pengujian	0,5

**Tabel 9** Faktor reduksi kekuatan berdasarkan pengukuran lapangan (BMS, 1992)

Parameter tanah	Faktor reduksi
<b>Tahanan ultimit fondasi tiang statik</b>	
Uji pembebanan statik rutin	0,6
Uji pembebanan statik beban tinggi	0,7
<b>Tahanan ultimit fondasi tiang dinamik</b>	
Analisis wave equation berdasarkan perkiraan sistem pemancangan dan data tanah	0,3
Solusi dinamis closed form berdasarkan perkiraan faktor damping	0,4
Analisis wave equation dikorelasikan dengan analisis pengukuran dinamis	0,45
Solusi dinamis closed form dikorelasikan dengan analisis pengukuran dinamis yang dianalisis dengan wave equation	0,5
Pengukuran dinamis yang dianalisis dengan wave equation	0,6

Untuk melakukan analisis fondasi terdapat beberapa metode. Dengan metode analisis yang berbeda, maka faktor tahanan yang digunakan juga berbeda. Faktor tahanan untuk beberapa metode analisis tersebut dapat dilihat pada *Tabel 10*. ■

**Tabel 10** Tahanan nominal tiang tunggal menggunakan metode analisis statik pada kondisi terkompresi aksial,  $f_{\phi}, f_q = f_{stat}$  (AASHTO, 2010)

Kondisi/ metode pemilihan faktor tahanan	Faktor tahanan
<b>Tahanan gesek dan daya dukung ujung : lempung dan tanah-campuran (mixed soils)</b>	
Metode $\alpha$ (Tomlinson, 1987; Skempton, 1951)	0.35
Metode $\beta$ (Esrig & Kirby, 1979; Skempton, 1951)	0.25
Metode $\lambda$ (Vijayvergiya & Focht, 1972; Skempton, 1951)	0.40
<b>Tahanan gesek dan daya dukung ujung : pasir</b>	
Metode Nordlund/Thurman (Hannigan et al, 2005)	0.45
Metode SPT (Mayerhof)	0.30
Metode CPT (Schmertmann)	0.50
Daya dukung ujung pada batuan (Canadian geotech Society, 1985)	0.45

## Bab 6

# Interaksi Tanah dan Struktur

Interaksi antara struktur dengan tanah melalui elemen struktur fondasi memiliki pengaruh terhadap beberapa aspek dalam respon struktur, seperti:

- ▶ Respon global dari struktur yang sensitif secara dinamis dimana kekakuan fondasi akan sangat mempengaruhi respon tersebut
- ▶ Tegangan kontak antara elemen tanah dan struktur dipengaruhi oleh kekakuan dan kekuatan tanah sebagaimana kekakuan struktur
- ▶ Tegangan dan *displacement* dari tiang dan elemen struktural sebuah *jacket platform* dihasilkan dari kekuatan dan kekakuan tanah sebagaimana kekakuan tiang dan kekakuan struktur.

Kekakuan fondasi global, atau umumnya impedansi fondasi (kekakuan kompleks) harus ditentukan sebagai dasar dari respon dinamik terhadap beban gempa dan gelombang. Impedansi fondasi yang mana *real term*-nya dapat diinterpretasikan sebagai kekakuan, dan *imaginary term* sebagai redaman, adalah bergantung pada frekuensi. Ketergantungan terhadap frekuensi ini harus dipertimbangkan bila relevan dan sangat penting dalam penentuan respon dinamis akibat gempa.



Kekakuan fondasi tergantung pada kekakuan dan kekuatan tanah dan juga kekakuan dari elemen fondasi struktural. Idealnya tanah harus dimodelkan dan di analisis dalam analisis terintegrasi bersama dengan struktur menggunakan model tanah non linear. Meskipun demikian, dikarenakan keterbatasan pada *software* yang tersedia maupun kapasitas komputer, maka diperbolehkan melakukan pendekatan dengan penyederhanaan. Tingkat penyederhanaan yang diperbolehkan tergantung pada sensitivitas dari respon siklik terhadap variasi dari kekakuan dan redaman.

Reaksi tanah terhadap elemen struktural apapun tergantung pada kekakuan dan kekuatan struktur maupun tanah. Secara normal, struktur dapat dipertimbangkan elastis, sedangkan untuk tanah perlu mempertimbangkan karakteristik tegangan-regangan non linier. Karakteristik tersebut tidak hanya tergantung pada karakteristik tanah, tetapi juga tergantung pada pola pembebanan dan perbedaan antara pembebanan jangka panjang (*long term*) dan jangka pendek (*short term*), yang mana tanah akan berperilaku *undrained*. Ini harus dipertimbangkan dalam menghitung reaksi tanah. Waktu untuk menyelesaikan keluarnya air dari tanah akan bervariasi dari hitungan detik hingga tahun tergantung dari kondisi tanah, ukuran fondasi, dan sebagainya. Aspek waktu tersebut harus diperhitungkan dengan baik.

## Reaksi Fondasi untuk Struktur Tiang

Untuk struktur berupa fondasi tiang, respon tiang lebih baik ditentukan dari analisis terintegrasi terhadap fondasi tiang dan strukturnya. Non linieritas tanah dapat dihitung dengan memodelkan tiang sebagai balok elastis yang didukung oleh pegas dengan karakteristik non linier.

Pegas aksial non linier untuk mensimulasikan mobilisasi *skin friction* (kurva  $t-z$ ) dan daya dukung ujung tiang (kurva  $q-z$ ) dapat dipilih sesuai dengan penerapan yang telah diakui. Untuk tiang fleksibel yang relatif panjang kurva  $t-z$  bilinear dapat diterima dengan asumsi daya tahan maksimum akan terjadi saat defleksi sekitar 0,5 persen dari diameter tiang. Untuk tiang dengan proporsi besar dari kapasitas tiang diambil dari daya tahan ujung, harus diarahkan pada representasi yang baik dari kurva  $q-z$ . Dapat diasumsikan defleksi sebesar 5 – 10 persen dari diameter tiang untuk mencapai daya tahan ujung maksimum.

Analisis terintegrasi dari sistem struktur dan tiang dapat dipecahkan secara iterasi menggunakan cara superelemen untuk mengurangi ukuran permasalahan. Bila interaksi tidak dipecahkan dalam sebuah analisis terintegrasi, matriks kekakuan tiang dapat dihitung dari analisis dengan sistem tiang digunakan sebagai input analisis struktur. Untuk menghitung non linieritas tanah,

analisis tiang untuk menurunkan matriks kekakuan tiang harus dilakukan pada level beban yang mewakili. Kesesuaian antara analisis struktur dengan analisis fondasi tiang harus ditunjukkan misalnya dengan memberikan gaya pangkal tiang dari analisis struktur sebagai input analisis fondasi tiang dan membandingkan defleksi yang dihasilkan.

## Reaksi Tanah untuk Struktur Gravity Based

Idealnya analisis global dari substruktur GBS harus dilakukan sebagai analisis terintegrasi struktur dan tanah secara bersamaan. Hal ini dalam kebanyakan kasus tidak praktis dikarenakan kurangnya *software* yang memadai dan dikarenakan ukuran permasalahan analisis, khususnya bila mencakup non linieritas tanah. Oleh karena itu praktek normalnya dengan melakukan analisis dan evaluasi bebas untuk menentukan reaksi tanah untuk digunakan dalam analisis struktur global.

Distribusi realistis dari kontak tegangan terhadap seluruh bagian fondasi (misalnya dasar fondasi) harus ada untuk seluruh komponen dari jenis beban yang relevan mencakup seluruh fase. Dalam penentuan reaksi tanah harus diperhitungkan:

a. Fleksibilitas struktur fondasi mencakup

fleksibilitas (global) dari *caisson* dan fleksibilitas (lokal) dasar fondasi

- b. Karakteristik tegangan-regangan tanah non linier tanah dan perubahannya terhadap waktu
- c. Pengaruh instalasi

Reaksi tanah berikut mungkin relevan untuk dipertimbangkan sebagai dasar untuk definisi reaksi tanah beberapa kasus pembebanan:

- a. Reaksi dikarenakan berat terendam statis dalam kondisi *drained* atau *undrained*
- b. Reaksi dikarenakan komponen apapun dari beban lingkungan global
- c. Reaksi tanah internal tidak berhubungan dengan gaya global

Untuk setiap jenis reaksi tanah distribusi dari reaksi tanah terhadap setiap elemen struktural saat kontak dengan tanah harus ditentukan, misalnya pembagian reaksi vertikal antara *baseplate*, daya tahan ujung *skirts*, friksi dinding dan bagaimana komponen reaksi ini bervariasi di seluruh wilayah fondasi dan dengan waktu setelah instalasi. Ketidakpastian dalam distribusi reaksi dihasilkan dari ketidakpastian dalam kekakuan struktural, dalam kekakuan tanah dan dalam prosedur analisis menghendaki lebih dari satu solusi untuk distribusi reaksi dipertimbangkan untuk komponen beban yang sama. Solusi distribusi yang berbeda dapat membahayakan untuk aspek berbeda dari perencanaan struktur.

Kompleksitas permasalahan untuk menentukan reaksi tanah merupakan variabel yang tergantung pada kompleksitas *base* dan *skirts*, kompleksibilitas fleksibilitas dari bagian fondasi struktural dan pentingnya representasi yang baik dari non linieritas tanah. Salah satu cara untuk mengurangi kompleksitas analisis adalah diawali dengan melakukan analisis dengan tanah non linier berdasarkan model struktur fondasi yang disederhanakan. Modulus geser tanah yang dihasilkan dapat digunakan untuk analisis elastis dengan model struktur yang lebih detail.

Untuk desain awal dan kompleksitas rendah, solusi-solusi yang tersedia dapat digunakan, misalnya solusi untuk fondasi pada tanah elastis. Konsentrasi tegangan yang tinggi terhadap ujung-ujung fondasi seperti yang dihasilkan dari solusi tersebut perlu disesuaikan berdasarkan batasan dalam kekuatan geser tanah.

Salah satu jenis reaksi tanah yang ketika diintegrasikan tidak memberikan gaya global apapun adalah tekanan tanah horizontal terhadap *skirts* yang muncul dari beban vertikal pada dasar. Tekanan ini merupakan yang paling tinggi untuk kondisi pembebanan *undrained* lengkap dimana tekanan isotropik harus dipertimbangkan.

Demikian juga penetrasi *skirts* selama instalasi dapat menyebabkan tekanan horizontal yang tinggi terhadap *skirts*. Tekanan ini dapat ditentukan dari kalkulasi tekanan tanah horizontal saat runtuh, dari model analisis *elastoplastic*, atau teori pengembangan rongga yang ditemukan paling relevan dalam setiap kasus. Ketebalan *skirts* dan batasan dengan *skirts* yang berdekatan harus dihitung.

Perbedaan tekanan dari satu sisi terhadap sisi lainnya adalah penting untuk dihitung dalam perencanaan struktural dan terutama pada kedua sisi di sekeliling *skirts*. Tekanan dikarenakan penetrasi *skirts* yang utama adalah tekanan pori. Sebagai tambahan untuk kemungkinan tekanan awal tinggi pada bagian dalam, perbedaan antara bagian dalam dan bagian luar dapat meningkat dengan waktu dikarenakan konsolidasi yang cepat pada bagian luar, yang mana harus dipertimbangkan.

Perbedaan tekanan dari satu sisi *skirts* terhadap sisi lainnya dapat berkurang ketika mempertimbangkan fleksibilitas *skirts*. Bila reduksi tersebut dihitung, perlu didokumentasikan dengan baik. ■

*Bab 7*

# Likuifaksi

Dalam beberapa kasus kerusakan terhadap bangunan pada tanah lunak atau tanah lepas bukan disebabkan oleh beban bangunan namun disebabkan oleh penurunan tidak seragam fondasi akibat kombinasi guncangan tanah dengan variabel natural lapisan tanah. Kerusakan besar jenis ini dapat juga terjadi terhadap bangunan yang terletak pada timbunan.

Pada tanah berbutir lepas hingga medium padat, guncangan gempa dapat menghasilkan regangan geser yang tidak dapat diterima. Regangan ini kemungkinan hasil dari tegangan geser yang melebihi kekuatan tanah yang mana lebih lunak bila melebihi tegangan geser puncak. Deformasi geser yang tinggi dan penurunan kekuatan geser dapat juga merupakan konsekuensi dari penumpukan terus menerus tekanan pori tinggi yang dihasilkan oleh getaran gempa. Dengan terbatasnya drainase, tegangan geser siklik dapat menghasilkan penumpukan terus menerus tekanan air pori yang mana secara signifikan mengurangi tegangan efektif yang mengendalikan kekuatan. Untuk tujuan praktis, tegangan efektif setelah siklus regangan geser dapat dikurangi menjadi nol, mengarah ke likuifaksi. Pelemahan secara terus menerus sebelum likuifaksi total disebut mobilitas siklik (*cyclic mobility*).

## Faktor-faktor yang Mempengaruhi Likuifaksi

Karakteristik gerakan tanah (*ground motion*), jenis tanah, dan kondisi tegangan setempat merupakan tiga faktor utama yang menentukan perkembangan mobilitas siklik maupun likuifaksi. Karakteristik gerakan tanah (akselerasi dan frekuensi) menentukan pengembangan regangan geser yang menyebabkan likuifaksi. Untuk akselerasi yang sama, magnitud gempa yang lebih besar akan lebih merusak dikarenakan jumlah penerapan regangan siklik yang lebih tinggi.

Tanah yang terdrainase bebas memiliki kemungkinan likuifaksi yang lebih kecil. Tanah berbutir dibawah tegangan keliling efektif inisial yang lebih besar memiliki kemungkinan likuifaksi yang lebih kecil. Kasus-kasus yang pernah terjadi mengindikasikan bahwa likuifaksi biasanya terjadi pada kedalaman 50 feet atau kurang. Likuifaksi lebih mungkin terjadi pada tanah berbutir bersih. Tanah dengan kandungan halus (< saringan 200) memiliki kemungkinan kecil untuk likuifaksi, khususnya bila partikel halusny adalah lempung.

## Evaluasi Potensi Likuifaksi

Kerentanan likuifaksi pada suatu lokasi umumnya diekspresikan dalam isti-

lah faktor keamanan terhadap terjadinya likuifaksi. Faktor ini didefinisikan sebagai rasio antara ketahanan tanah yang tersedia terhadap likuifaksi, dinyatakan dalam istilah tegangan siklik yang dibutuhkan untuk menyebabkan likuifaksi tanah, dan tegangan siklik yang dihasilkan oleh gempa rencana. Kedua parameter tersebut umumnya dinormalisasi dengan mengacu kepada tegangan berlebih efektif pada kedalaman yang diminta. Dikarenakan kesulitan dalam model analisis kondisi tanah pada lokasi likuifaksi, penggunaan metode empirik menjadi prosedur standar dalam praktek rutin *engineering*.

Hingga sekarang prediksi likuifaksi masih merupakan perkiraan. Namun terdapat persetujuan umum bahwa prosedur yang ada bekerja dengan baik untuk tanah rata atau hampir rata. Analisis untuk tanah lereng kurang dapat dipercaya. Dua pendekatan dasar yang digunakan yaitu berdasarkan *standard penetration test* (SPT) dan *cone penetrometer test* (CPT). Faktor keamanan yang digunakan berdasarkan pertimbangan teknis dengan pertimbangan yang tepat untuk jenis dan kepentingan struktur serta potensi deformasi tanah.

Istilah prosedur simplifikasi dikembangkan berdasarkan evaluasi sejarah kasus likuifaksi dan karakteristik kekuatan di lokasi sebagaimana diukur dengan nilai N dari SPT dan data qc dari CPT. Untuk

kebanyakan kasus empiris, tegangan geser siklik akibat gempa diestimasi dari simplifikasi persamaan empiris atau dari analisis respon dinamis menggunakan program komputer.

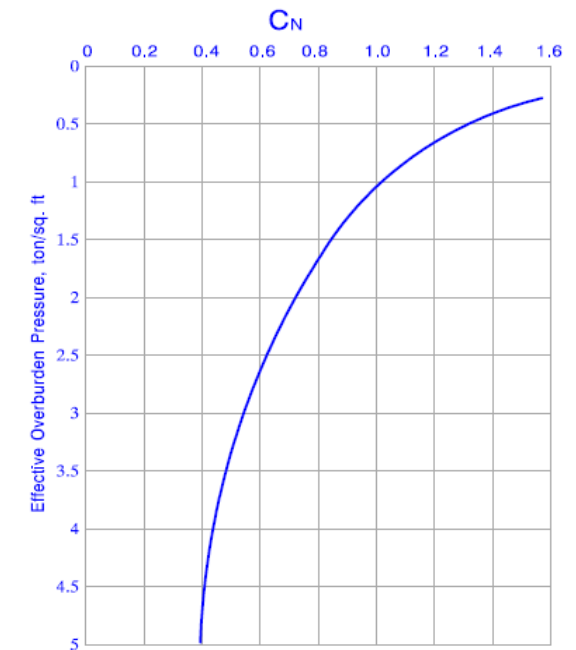
## Metode SPT

- Hitung rasio tegangan siklik, CSR yang berhubungan dengan akselerasi puncak pada permukaan tanah selama gempa rencana:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_o} = 0,65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma'_o}{\sigma'_o} \right) r_d$$

dengan:

- $\tau_{av}$  = Tegangan geser siklik akibat gerakan tanah rencana
- $\sigma'_o$  = Tegangan berlebih efektif statis inisial pada lapisan pasir yang dipertimbangkan
- $\sigma_o$  = Tegangan berlebih total inisial pada lapisan pasir yang dipertimbangkan
- $a_{max}$  = Akselerasi horizontal puncak dalam g's
- $r_d$  = Faktor reduksi tegangan bervariasi dari nilai 1,0 pada permukaan tanah hingga 0,9 pada kedalaman sekitar 30 feet. Bila tegangan dan akselerasi dihitung langsung dalam analisis amplifikasi,  $r_d$  diabaikan atau ditetapkan 1,0.



**Gambar 46** Korelasi antara CN dengan tegangan berlebih efektif (*Department of Defense Handbook, 1997*)

- Koreksi nilai SPT. Untuk nilai SPT, N untuk tegangan berlebih menggunakan **Gambar 46**

$$N_1 = C_N \cdot x N$$

Ini adalah nilai N yang mana diukur bila tegangan berlebih efektif sebesar 1,0 ton/ft<sup>2</sup>. Nilai CN adalah faktor koreksi berdasarkan tegangan berlebih efektif. Karena N juga sensitif terhadap energi yang disediakan peralatan, N1 dikoreksi lebih lanjut terhadap nilai energi input saat 60 %, (N1)<sub>60</sub>. Kombinasi koreksi tersebut yaitu:

$$(N_1)_{60} = C_N ER_m N/60$$

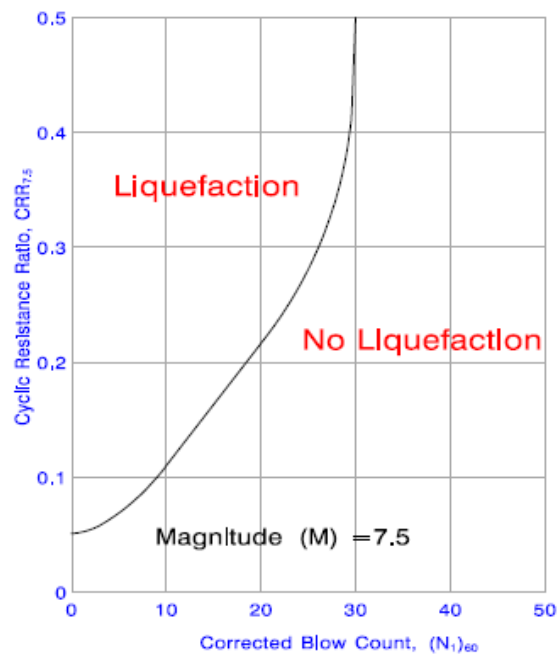
dengan:

ER<sub>m</sub> = Rasio energi terkait dalam persen seperti ditunjukkan pada **Tabel 11**.



**Tabel 11** Rasio energi untuk prosedur SPT (National research council, 1985)

Country	Hammer Type	Hammer Release	Estimated Rod Energy (%)	Correction Factor for 60% Rod Energy
Japan	Donut Donut	Free-fall	78	78/60=1.30
		Rope & Pulley with Special throw release	67	67/60=1.12
U.S.A.	Safety Donut	Rope & Pulley	60	60/60=1.00
		Rope & Pulley	45	45/60=0.75
Argentina	Donut	Rope & Pulley	45	45/60=0.75
China	Donut Donut	Free-fall	60	60/60=1.00
		Rope and Pulley	50	50/60=0.83

**Gambar 47** Cyclic resistance ratio (CRR) untuk clean sand dengan kondisi level tanah berdasarkan SPT (Robertson and Fear, 1996)

- Dengan mengetahui jumlah pukulan yang dinormalisasi,  $(N_1)_{60}$ , estimasi rasio tahanan siklik (CRR) yang dibutuhkan untuk menyebabkan likuifaksi pada pasir mengikuti kondisi level tanah berdasarkan nilai SPT dari **Gambar 47**. Perlu dicatat bahwa kurva ini digunakan untuk magnitud gempa 7,5.
- Hitung faktor keamanan terhadap likuifaksi  $F_s$  untuk setiap lapisan, untuk mendapatkan faktor keamanan yang tepat sesuai dengan jenis struktur.

$$F_s = CRR / CSR$$

dengan:

CRR = Cyclic resistance factor yang dibutuhkan untuk menyebabkan likuifaksi

CSR = Cyclic stress ratio yang dihasilkan oleh gempa rencana

## Metode CPT

- Hitung CSR sebagaimana pada metode SPT.
- Gunakan **Gambar 48** untuk menentukan CRR dari data CPT terkoreksi. Grafik ini berlaku untuk magnitud gempa 7,5 dan material *clean sand*. Lompatan kurva antara material *liquefiable* dan non-*liquefiable* dikarakterisasi oleh persamaan berikut:

$$CRR_{7.5} = 93 [(q_{cIN})_{CS} / 1000]^3 + 0,08$$

$$q_{cIN} = (q_c / P_a) C_Q$$

$$C_Q = (P_a / \sigma'_{vo})^{0.5}$$

dengan:

$(q_{cIN})_{CS}$  = Tahanan penetrasi konus *clean sand* ekuivalen

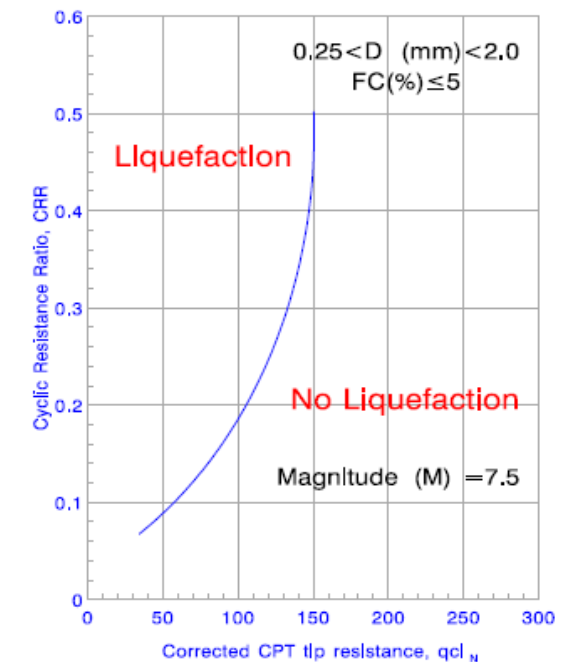
$C_Q$  = Faktor untuk mengoreksi tahanan penetrasi terukur menjadi tekanan satu atmosfer

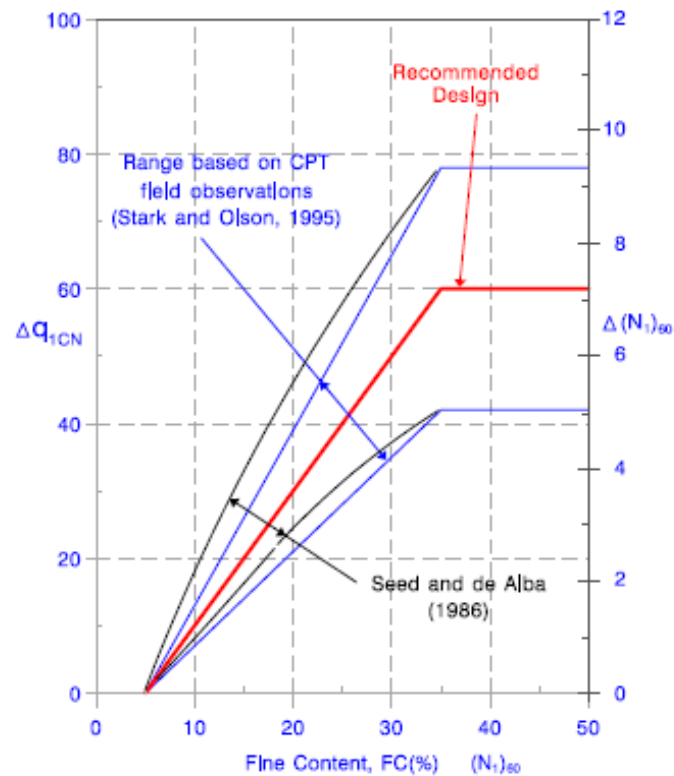
$q_c$  = Tahanan penetrasi konus terukur

$P_a$  = Tekanan atmosfer dalam satuan yang sama dengan tahanan penetrasi konus dan tekanan berlebih

$\sigma'_{vo}$  = Tegangan efektif vertikal eksisting sebelum pemberian beban siklik

- Hitung faktor keamanan,  $F_s$ , sebagaimana dijelaskan pada metode SPT.

**Gambar 48** Cyclic resistance ratio (CRR) untuk clean sand dengan kondisi level tanah berdasarkan CPT (Robertson and Fear, 1996)

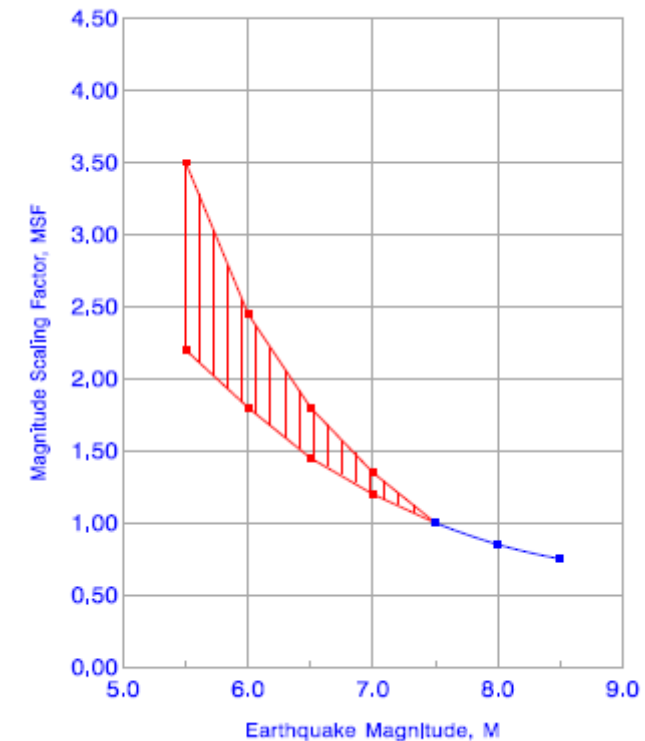


**Gambar 49** koreksi nilai SPT dan CPT untuk kadar halus  
(Department of Defense Handbook, 1997)

### Koreksi untuk kadar halus

Untuk mengkoreksi material dengan kadar halus (FC) lebih besar dari 5 %, kurva dalam **Gambar 49** dapat digunakan. Untuk menggunakan koreksi ini, peningkatan tahanan penetrasi sintetis,  $\Delta q_{1cN}$ , atau  $\Delta(N_1)_{60}$ , ditambahkan untuk menghitung tahanan normalisasi  $q_{1cN}$ . Peningkatan ini dihitung untuk dikombinasi pengaruh kadar halus terhadap tahanan penetrasi sebagai fungsi FC.

Untuk $FC \geq 35\%$	$\Delta q_{1cN} = 60$	$\Delta(N_1)_{60} = 7,2$
Untuk $FC \leq 5\%$	$\Delta q_{1cN} = 0$	$\Delta(N_1)_{60} = 0$
Untuk $5\% < FC < 35\%$	$\Delta q_{1cN} = 2 (FC - 5)$	$\Delta(N_1)_{60} = (1,2 / 5) (FC - 5)$



**Gambar 50** Kisaran faktor skala magnitud terhadap magnitud gempa  
(Department of Defense Handbook, 1997)

### Koreksi untuk magnitud gempa yang berbeda

Untuk menyesuaikan CRR terhadap magnitud selain 7,5, perhitungan CRR<sub>7,5</sub> dikalikan dengan faktor skala magnitud untuk magnitud tertentu yang diperlukan. Faktor skala magnitud yang sama digunakan dengan data penetrasi konus sebagaimana data penetrasi standar. **Gambar 50** dapat digunakan untuk mengkoreksi magnitud gempa yang berbeda.

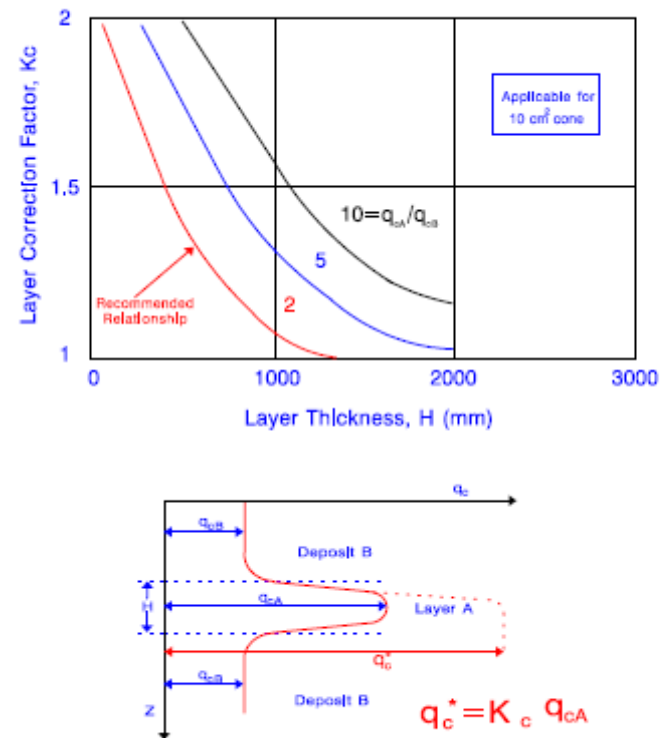
### Koreksi CPT untuk lapisan tanah tipis

Koreksi ini digunakan hanya untuk lapisan keras tipis yang tertanam di dalam lapisan lunak yang tebal. **Gambar 51** dapat digunakan untuk mengkoreksi data CPT. Persamaan untuk mengevaluasi faktor koreksi,  $K_c$ , adalah :

$$K_c = 0,5 [(H / 1000) - 1,45]^2 + 1,0$$

dengan:

H = Ketebalan lapisan dalam mm



**Gambar 51** Koreksi ( $K_c$ ) terhadap tahanan penetrasi CPT pada lapisan tanah tipis (Department of Defense Handbook, 1997)

Menurut Robertson dan Fear (1996), untuk koreksi konservatif gunakan  $q_{cA} / q_{cB} = 2$ , dimana  $q_{cA}$  dan  $q_{cB}$  merupakan tahanan penetrasi konus lapisan keras dan tahanan penetrasi konus lapisan lunak.

Kehalusan plastis

Untuk tanah dengan kehalusan plas-  
tis, kriteria China harus digunakan untuk

menilai kemungkinan likuifaksi (Seed and Idriss, 1982). Dalam kriteria ini likuifaksi hanya dapat terjadi jika tiga kondisi berikut ditemui:

- Kadar lempung (partikel yang lebih kecil dari  $5\mu$ )  $< 15\%$
- Batas cair  $< 35\%$
- Kadar kelembaban alami  $> 0,9$  kali batas cair. ■

## Bab 8

# Penutup

Dalam melakukan perencanaan fondasi khusus perlu diperhatikan mengenai investigasi tanah, sifat lapisan tanah di lautan, teknologi fondasi, kapasitas fondasi, interaksi tanah dengan struktur, dan likuifaksi. Investigasi tanah yang perlu dilakukan terdiri dari studi geologi, survey geofisika, dan survey geoteknik. Investigasi tanah tersebut dilakukan agar diperoleh data-data untuk melakukan perencanaan fondasi.

Sifat-sifat lapisan tanah di lautan perlu dipelajari seperti fitur topografi dasar laut, dan sumber, klasifikasi, serta distribusi sedimen di lautan. Karena sebagian besar permukaan dasar laut ditutupi oleh lapisan sedimen hasil dari pelapukan batuan, gunung berapi, sisa organisme dasar laut, dan reaksi kimia yang terjadi pada air laut. Fitur topografis dasar laut terdiri dari batas kontinental, dasar lautan, dan system pegunungan di lautan yang tentunya memiliki kedalaman yang berbeda dan akan mempengaruhi perencanaan fondasi.

Teknologi fondasi yang digunakan untuk fondasi di lautan bermacam-macam seperti fondasi tiang dan fondasi *gravity*. Fondasi tiang yang digunakan terdiri dari tiang pancang dan tiang bor. Sedangkan contoh fondasi *gravity* adalah *caisson*, *cofferdam*, dan *Troll offshore platform*. Penggunaan teknologi fondasi tersebut dipengaruhi oleh kedalaman dasar laut pada lokasi yang direncanakan. ■

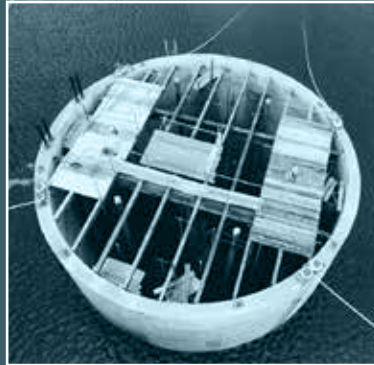


# Daftar Pustaka

- Andersen, Henrik. 2012. “*Design and Construction of Major International Marine Bridges - with focus on Foundations*”. 2nd International Seminar on Long Span Bridges Towards Development of Sunda Strait Bridge. Presentasi oleh Henrik Andersen. 27 Maret, Jakarta.
- Bakorsurtanal. “Batimetri Indonesia “. [http://atlasnasional.bakorsurtanal.go.id/fisik\\_lingkungan/batimetri\\_detail.php?id=1&judul=umum](http://atlasnasional.bakorsurtanal.go.id/fisik_lingkungan/batimetri_detail.php?id=1&judul=umum) (diakses tahun 2012).
- BMNED. “Conductivity probing or EC probing.” <http://www.bmned.com/english/fieldwork/special-cone-penetration-tests/conductivity-probing-or-ec-probing.html> (diakses tahun 2012).
- Brown, D.A. dan kawan-kawan. 2007. *Geotechnical Engineering Circular NO. 8 : Design and Construction of Continuous Flight Auger (CFA) Piles*, Report No. FHWA-HIF-07-03. Washington, D.C.: Federal Highway Administration. <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/gec8/> (diakses tahun 2012).
- College of Civil Engineering. 2006. *Suramadu Main Bridge, Indonesia Load Test Report of Drilled Piles (Load Cell Method)*. Nanjing, RRC: Southeast University.
- Det Norske Veritas AS. 1992. *Foundations*, Classification Notes No.30.4. Høvik, Norwegia: Det Norske Veritas AS.
- Department of Defense. 1997. *Soil Dynamics and Special Design Aspect, Department of Defense Handbook*, MIL-HBK-1007/3: Department of Defense.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 1992. *Bridge Management System atau Sistem Manajemen Jembatan*, Jakarta : Departemen Pekerjaan Umum.
- Goble, G. 1999, *Geotechnical Related Development and Implementation of Load and Resistance Factor Design (LRFD) Methods*, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 276. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Indian Standards. 2001. *Guidelines for Integrity Testing of Piles*: Indian Standards.
- Lunne, Tom. “In Situ Testing in Offshore Geotechnical Investigations.” [http://www.spgeo.it/files/innovazione-innovation/\(CPTWD\)%20Lunne\\_paper1.pdf](http://www.spgeo.it/files/innovazione-innovation/(CPTWD)%20Lunne_paper1.pdf) (diakses tahun 2012).

- Paikowsky, Samuel G. dan kawan-kawan. 2010. *LRFD Design and Construction of Shallow Foundations for Highway Bridge Structures*, National Cooperative Highway Research Program Report 651. Washington, D.C.: Transportation Research Board. [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_rpt\\_651.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_651.pdf) (diakses tahun 2012).
- Parr, Josephus O. dan Olive S. Petty. 1962, *Sonic Prospecting* : United States Patents Office. <http://www.google.com/patents/US3029894?pg=PA3&dq=,+Sonic+Prospecting&hl=id&sa=X&ei=8ptKUYDPCcXOrQeAxYGgAw&ved=0CDMQ6AEwAA#v=onepage&q=%2C%20Sonic%20Prospecting&f=false> (diakses tahun 2012).
- Pascasakti, Denni. “Konsep Dasar Survei Batimetri Menggunakan Echosounder.” <http://dennipasca.blogspot.com/2010/09/konsep-dasar-survei-batimetri.html> (diakses tahun 2012).
- Poulos, H.G. 1988. *Marine Geotechnics* : Allen and Unwin Inc.
- Standard Norway. 2004. *Marine Soil Investigations*, Norsok Standard G-001. Lysaker, Norwegia: Standards Norway. <http://www.standard.no/PageFiles/1253/G-001.pdf> (diakses tahun 2012).
- United States Enviromental Protection Agency- Technoloy Innovation and Field Services Division. “Geotechnical Sensors.” <http://clu-in.org/characterization/technologies/dpgeotech.cfm> (diakses tahun 2012).
- Wikipedia. “Bathymetry.” <http://en.wikipedia.org/wiki/Bathymetry>. (diakses tahun 2012)
- Wikipedia. “Tide.” <http://en.wikipedia.org/wiki/Tide>. (diakses tahun 2012).





PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN  
Badan Penelitian dan Pengembangan  
Kementerian Pekerjaan Umum  
[www.pusjatan.pu.go.id](http://www.pusjatan.pu.go.id)