

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PENDAHULUAN

Pelabuhan disebut juga sebagai *port* dan *harbour*, dimana *harbour* merupakan suatu perairan yang terlindung terhadap angin & gelombang lepas, sedangkan *port* merupakan suatu perairan tempat untuk berlabuh dan bersandar kapal untuk melakukan bongkar muat barang melalui terminal (dermaga, lapangan penumpang dll), serta merupakan titik perpindahan barang dan penumpang dari transportasi laut ke darat dan sebaliknya.

Pelabuhan memiliki beberapa fasilitas, diantaranya:

- Struktur-struktur pelindung: penahan gelombang (*breakwaters*), *seawalls*, *bulkheads*, *groins*.
- Fasilitas bersandar (*berthing facilities*): *piers*, *jetties*
- Fasilitas tambatan (*mooring facilities*): *dolphins*
- Fasilitas navigasi (*navigation facilities*)
- Alat bantu navigasi (*navigation aids*)
- Fasilitas-fasilitas pemeliharaan (*maintenance facilities*)

Pier atau *jetty* adalah jalur memanjang hingga menuju ke permukaan air laut (bagi pejalan kaki ke menuju dermaga), dimana jalur tersebut berada diatas permukaan air laut, yang disokong oleh tiang-tiang. Struktur *pier* tidak menghalangi aliran arus atau pasang, tetapi jika pondasi semakin rapat, *pier* dapat berfungsi sebagai *breakwater*, dan akhirnya lumpur akan mengendap di sekitar struktur.



Gambar 2. 1. *The Scheveningen pier, near The Hague* (wikipedia)

Dolphin adalah struktur marina yang muncul hingga diatas level permukaan air laut dan tidak terhubung dengan struktur dermaga atau pantai. *Dolphin* biasanya digunakan sebagai tambatan (*berthing dolphin*) atau untuk mengikat tali kapal (*mooring dolphin*). Selain itu, *dolphin* juga digunakan sebagai tempat pemberi informasi pada kapal seperti batas kecepatan, dll, atau sebagai tempat untuk informasi navigasi. Struktur *dolphin* merupakan struktur yang terdiri dari tiang yang dipancang ke dasar laut dan dihubungkan secara bersamaan oleh *pilecap* yang akan menjadi *platform*.



Gambar 2. 2. Berthing Dolphin, Port of Hamburg (Thyssen Mannesmann Handel)

Dalam perencanaan pelabuhan, kriteria desain yang digunakan harus ditinjau terhadap faktor lingkungan, pelayanan dan kondisi konstruksi, jenis material dan kebutuhan sosial. Kriteria desain harus dipertimbangkan secara matang, karena hal tersebut berpengaruh terhadap keamanan, fungsi dan biaya konstruksi. Biasanya pertimbangan desain ditetapkan berdasarkan hasil tes dan survei.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan pelabuhan antara lain fungsi dari pelabuhan, kondisi lingkungan (tanah, gelombang, gempa), beban yang bekerja, material yang digunakan, faktor keamanan, metode konstruksi dan biaya konstruksi. Adapun yang akan dibahas disini hanya berdasarkan pada hal-hal yang berkaitan dengan struktur dari *berthing dolphin* yaitu mencakup dimensi, gaya yang bekerja, material yang digunakan serta daya dukung terhadap tanah.

2.2 KAPAL DAN PENGARUHNYA TERHADAP STRUKTUR

Dalam merancang dermaga, perlu diketahui berbagai sifat dan fungsi kapal, karena dengan data tersebut dapat diketahui ukuran-ukuran pokok dari kapal yang berguna dalam merencanakan ukuran-ukuran teknis dermaga. Sesuai dengan perkembangan teknologi, maka dermaga sebagai prasarana harus direncanakan sedemikian rupa sehingga dapat melayani kapal dan muatan dengan baik. Karena antara kapal dan dermaga terdapat hubungan ketergantungan (interdependensi).

Kapal sebagai sarana pengangkut muatan mempunyai ciri-ciri tersendiri dalam menangani muatannya. Muatan tersebut dapat berbentuk gas, padat, dan cair. Kapasitas angkut kapal biasanya diukur dengan satuan DWT (*dead weight tonnage*) yaitu selisih dari *displacement* kapal yang bermuatan penuh (*extrem weight*) dan kapal kosong (*light weight*) dihitung dalam satuan ton metrik. Atau secara umum, DWT adalah kemampuan daya muat barang didalam kapal dihitung dalam satuan ton metrik. Satuan lain dalam mengukur besar kapal adalah GT (*gross tonnage*), yaitu jumlah isi dari ruang kapal secara keseluruhan dalam satuan 'registered ton' dimana satu unit *registered ton* adalah 100 cft atau 2.83 m³. Tergantung dari jenis muatan yang diangkut, bentuk badan kapal, kecepatan dan lain-lain, maka ukuran besar kapal tersebut menentukan dimensi kapal yaitu panjang/lebar dan kedalaman dalam ukuran satuan panjang.

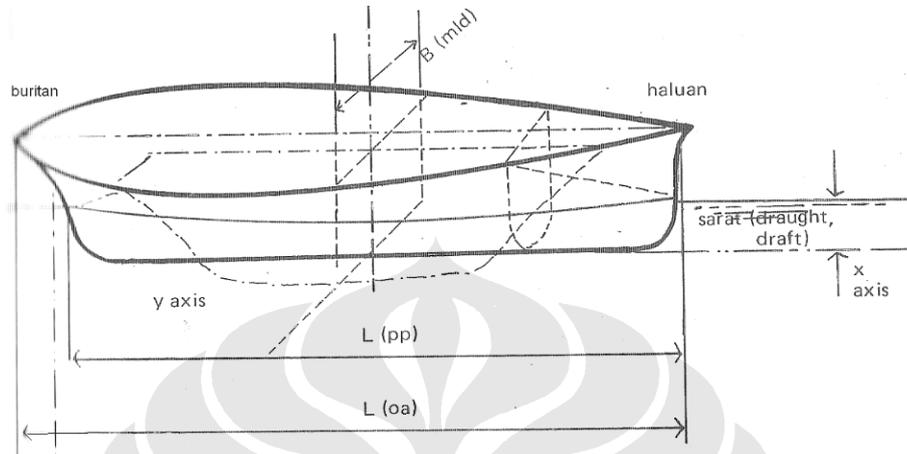
Hubungan antara DWT (*dead weight tonnage*) dan GT (*gross tonnage*) adalah:

- Kapal cargo : GT = 0.541 DWT
- Kapal container : GT = 0.880 DWT
- Kapal Tanker/minyak : GT = 0.553 DWT
- Kapal ro-ro : GT = 0.808 DWT

Ukuran-ukuran tersebut berguna bagi perencana dermaga dalam menentukan panjang dermaga, lebar dan kedalaman dermaga, yaitu:

- *Overall length* (L): ukuran panjang kapal dalam satuan panjang, dihitung mulai dari titik haluan sampai dengan buritan kapal.
- *Midship*: titik tengah dari L.
- *Breadth* (B): lebar badan kapal melalui titik *midship*.

- *Depth (D)*: kedalaman/ketinggian kapal melalui titik *midship*.
- *Draft/draught*: ukuran kedalaman antara '*designed load water line*' dengan titik terendah.
- *Knot*: satuan kecepatan dinyatakan dalam NM/h (*nautical miles per hour*)



Gambar 2. 3. Dimensi kapal

Standar ukuran kapal berdasarkan muatan yang dapat diangkut dapat ditentukan berdasarkan tabel dibawah ini.

Tabel 2. 1. Ukuran Standar Kapal

(units in m)

Type	Tonnage	Overall length	Moulded breadth	Moulded depth	Full load draft	Type	Tonnage	Overall length	Moulded breadth	Moulded depth	Full load draft	
passanger ship	GT					container ship	DWV					
	2,000	88	13.2	6.4	4.0		40,000	263	33.5	20.7	12.4	
	3,000	99	14.7	7.6	4.5		50,000	280	35.8	22.6	13.0	
	oil tanker	DWV					oil tanker	DWV				
		1,000	61	9.8	4.4	4.0		1,000	61	9.8	4.4	4.0
		2,000	77	12.2	5.6	5.0		2,000	77	12.2	5.6	5.0
		3,000	88	13.8	6.5	5.6		3,000	88	13.8	6.5	5.6
		5,000	104	16.2	7.8	6.5		5,000	104	16.2	7.8	6.5
10,000		130	20.1	10.1	8.0	10,000		130	20.1	10.1	8.0	
15,000		148	22.8	11.7	9.0	15,000		148	22.8	11.7	9.0	
20,000		162	24.9	13	9.8	20,000		162	24.9	13	9.8	
30,000		185	28.3	15.2	10.9	30,000		185	28.3	15.2	10.9	
40,000		204	30.9	16.6	11.8	40,000		204	30.9	16.6	11.8	
ferry boat	4,000	127	20.2	12.2	5.3	50,000	219	33.1	17.5	12.7		
	6,000	138	22.4	13.2	5.9	60,000	232	35	18.4	13.6		
	10,000	170	25.4	14.5	6.5	70,000	244	36.4	19.2	14.3		
	13,000	188	27.1	15.3	6.7	80,000	255	38.3	19.9	14.9		
	15,000	200	28.1	15.7	6.9							
	cargo ship	GT					pure car carrier	GT				
		DWV						700	77	12.8	6.9	4.3
		700	58	9.7	5.5	3.7		1,000	86	14.1	8	4.7
1,000		64	10.4	5.8	4.2	2,000		105	17.1	10.7	5.5	
2,000		81	12.7	6.8	4.9	3,000		117	19.1	12.7	6.0	
3,000		92	14.2	7.7	5.7	5,000		136	22	15.8	6.8	
5,000		109	16.4	9	6.8	6,000		144	23.1	17.1	7.1	
8,000		126	18.7	10.3	8.0	10,000		166	26.6	21.2	8.0	
10,000		137	19.9	11.1	8.5	15,000		187	29.8	25.1	8.8	
15,000		153	22.3	12.5	9.3	20,000		203	32.2	28.4	9.5	
30,000		186	27.1	15.2	10.9	gas tanker	GT					
40,000		201	29.4	16.5	11.7		1,000	70	11.7	5.7	5.0	
50,000		216	31.5	17.5	12.4		2,000	87	14.3	7.3	5.9	
70,000		235	33.8	19.2	13.4		3,000	99	16.1	8.5	6.6	
90,000		252	37.2	20.6	14.2		5,000	117	18.6	10.2	7.5	
100,000	259	38.7	21.2	15.8	10,000	145	22.7	13.1	9.0			
150,000	290	45	23.7	17.5	15,000	165	25.5	15.2	10.2			
container ship	DWV					20,000	181	27.7	16.9	11.0		
	20,000	201	27.1	15.6	10.6	30,000	206	31.2	19.6	12.0		
	30,000	237	30.7	18.4	11.6	50,000	242	36.1	23.6	13.5		

Sumber: *Technical Standards For Port And Harbour Facilities In Japan*

Tabel 2. 2. Dimensi Standar Berthing Pada Kapal Besar

Kind of ships	Length of Berth	Water Depth of Berth	Size of Ships	Kind of ships	Length of Berth	Water Depth of Berth	Size of Ships
passanger ship	(m)	(m)	gross tons	tanker	(m)	(m)	DWT
	100	4.5	2,000		170	9	10,000
	120	5	3,000		190	10	15,000
	150	6	5,000		210	11	20,000
	170	6.5	8,000		240	12	30,000
	190	7	10,000		260	13	40,000
	220	7.5	15,000		280	14	50,000
	240	9	20,000		300	15	60,000
	280	10	30,000		310	16	70,000
cargo ship			DWT	car carrier	320	17	80,000
	70	4.5	700				gross tons
	80	5	1,000		100	5	700
	100	5.5	2,000		110	5.5	1,000
	110	6.5	3,000		130	6.5	2,000
	130	7.5	5,000		150	7	3,000
	160	9	8,000		170	7.5	5,000
	170	10	10,000		180	8	6,000
	190	11	15,000		210	9	10,000
	240	12	30,000		240	10	15,000
	260	13	40,000		260	11	20,000
	280	14	50,000				gross tons
	300	15	70,000		90	5.5	1,000
	320	16	90,000		110	6.5	2,000
	330	18	100,000		130	7.5	3,000
370	20	150,000	150	8.5	5,000		
tanker			DWT	gas carrier	190	10	10,000
	80	4.5	1,000		210	12	15,000
	100	5.5	2,000		230	13	20,000
	110	6.5	3,000		260	14	30,000
	130	7.5	5,000		310	15	50,000

2.3 GAYA-GAYA YANG BEKERJA PADA STRUKTUR DERMAGA

Dalam mendesain suatu dermaga atau pelabuhan, maka diperlukan desain tiang pondasi yang baik. Dalam mendesain tiang pondasi, hal pertama yang dilakukan adalah menentukan beban yang terjadi pada tiang tersebut. Gaya yang terjadi pada tiang tidak hanya beban mati dan gaya gelombang yang terjadi pada tiang itu sendiri, tetapi juga harus memperhatikan gaya-gaya yang terjadi pada struktur di atasnya, misalnya struktur tambatan kapal (*berthing dolphin*). Dan gaya-gaya yang dimaksud diantaranya adalah gaya angin pada kapal, arus pada kapal, tambatan kapal, dan lain sebagainya.

2.3.1 Gaya Yang Terjadi Akibat Kapal

Gaya luar yang terjadi akibat kapal dan bekerja pada fasilitas tambatan, baik pada saat kapal bertambat atau diikat, sebaiknya ditentukan dengan menggunakan metode yang tepat dengan menghitung ukuran kapal yang akan bertambat pada dermaga yang akan didesain.

A. Tumbukan Kapal

Pada saat kapal bertambat, terdapat energi yang ditimbulkan, yaitu energi tambatan kapal yang dapat dihitung dengan metode kinetik dengan persamaan dibawah ini:

formula 1:

$$E_f = \frac{W_a V^2}{2g} C_e \cdot C_m \cdot C_s \cdot C_c \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana: E_f : energi tambatan kapal (tf.m)

g : percepatan gravitasi (m/s^2)

W_a : *displacement tonnage* (ton) → berat kapal dengan beban penuh.

V : kecepatan kapal bertambat pada saat bertumbuk dengan *fender* (m/s)

C_e : faktor eksentrisitas

C_m : faktor massa virtual

C_s : faktor kelembutan (standar = 1.0)

C_c : faktor bentuk/ukuran tambatan (standar = 1.0)

Energi kinetik dari kapal bertambat E_f (tf.m) sama dengan $(W_s/V^2)/(2g)$ jika kapal bergerak pada arah lateral. Bagaimanapun, dermaga umumnya dilengkapi dengan *fender*, sehingga energi tambatan kapal akan diserap oleh *fender*, dan energi tambatan kapal menjadi $f.E_s$. Dimana $f = C_e \cdot C_m \cdot C_s \cdot C_c$.

Selain formula diatas, energi tambatan kapal juga dapat dihitung dengan beberapa formula berikut:

formula 2:

$$E = \frac{(W_1 + W_2) V^2}{2g} \times K \dots\dots\dots 2.2$$

formula 3:

$$E = \frac{1}{2g} \times W \times V_n^2 \times C_E \times C_H \times C_S \times C_C \dots\dots\dots 2.3$$

Dimana: E : energi tambatan kapal (tf.m)

g : percepatan gravitasi (m/s^2)

W_1 : *displacement tonnage* (ton)

W_2 : *additional weight* (ton)

V : kecepatan kapal bertambat pada saat bertumbuk dengan *fender* (m/s)

C_E atau K : faktor eksentrisitas

C_H : *hydrodynamic coefficient*

C_S : faktor kelembutan (standar = 1.0)

C_C : faktor bentuk/ukuran tambatan (standar = 1.0)

Secara umum, kecepatan bertambat untuk kapal kecil dibawah 10000 DWT adalah 0.1 – 0.3 m/sec, dan untuk kapal medium antara 10000 – 50000 DWT adalah kurang dari 0.2 m/sec. Namun demikian, sebagian besar kapal tanker dan *carrier* bertambat dengan cara berhenti terlebih dahulu secara paralel dengan jarak sekitar 10 – 20 m dari dermaga, kemudian secara perlahan didorong oleh kapal penarik menuju dermaga. Jika terdapat tiupan angin tidak menuju dermaga, maka kapal bertambat dengan cara ditarik melawan angin. Ketika beberapa metode tambatan digunakan, kecepatan bertambat sekitar 0.1 – 0.15 m/sec diambil dalam desain. Secara umum, dapat digunakan kecepatan bertambat untuk desain sebagai berikut:

Tabel 2. 3. Kecepatan Bertambat

Size of vessel (DWT)	Actual speed (m/sec)	Design speed (m/sec)
Under 10000 tons	0.1 – 0.3	0.2
10000 – 50000 tons	0.1 – 0.2	0.15
Over 50000 tons	0.1 – 0.15	0.15

Sumber: Bridgestone, Marine Fender Design Manual

Faktor kelembutan C_s adalah rasio antara energi tambatan kapal dengan energi yang diserap oleh deformasi lambung kapal. Normalnya energi yang diserap oleh lambung kapal, sangat kecil, sehingga $C_s = 1.0$ dapat digunakan.

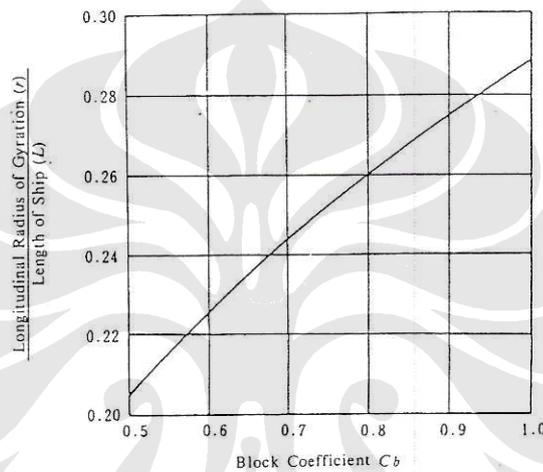
Pada saat kapal bergerak maka akan menimbulkan pergerakan massa air disekitar kapal, dan massa air ini tidak berpengaruh banyak pada *berthing dolphin*. Tetapi, selama kapal bertambat, maka massa air antara kapal dan *berthing dolphin* akan tertekan sehingga menghasilkan efek bantalan (*cushion*), sehingga energi yang diserap oleh *fender* akan berkurang. Efek ini harus dipertimbangkan ketika menentukan faktor ukuran tambatan.

Faktor eksentrisitas selama kapal bertambat harus dihitung dengan persamaan:

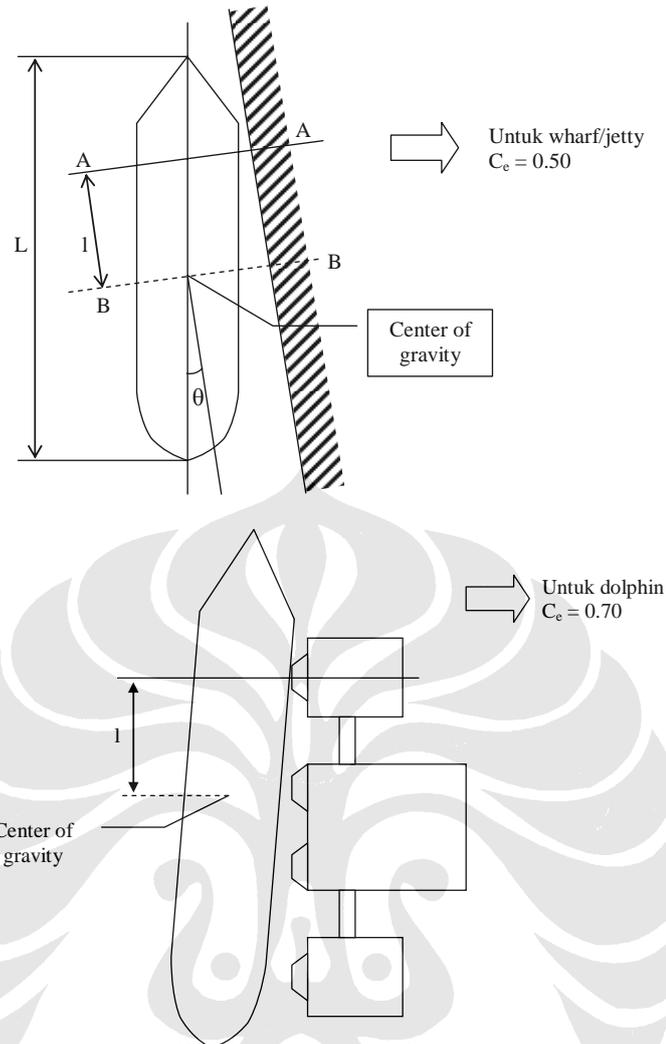
$$C_e = \frac{1}{1 + (l/r)^2} \dots\dots\dots 2.4$$

Dimana: l : jarak dari titik kontak kapal dengan *berthing dolphin*, ke titik berat kapal (m)

r : jari-jari girasi longitudinal kapal (m), yang dapat diperoleh dari grafik berikut:



Gambar 2. 4. Longitudinal Radius of Gyration as Function of Block Coefficient (Myers 1969)



Gambar 2. 5. Jarak Titik kontak antara kapal dengan dermaga ke titik berat kapal (*Sumber:* Presentasi, Ir. Sjahril A. Rahim, M.Eng)

Kapal pada saat bertambat tidak sejajar dengan garis dermaga, dan terhadap reaksi dari *fender*, kapal akan mulai untuk berotasi (*yawing*) pada titik kontak dengan *fender* dan juga akan mulai untuk berputar (*rolling*). Hasilnya, sebagian dari energi kinetik dihilangkan. Namun demikian, kehilangan energi akibat *rolling* lebih kecil daripada akibat *yawing*, jadi dapat diabaikan. Oleh karena itu, hanya kehilangan energi akibat *yawing* yang akan diperhitungkan.

Secara umum, untuk *displacement tonnage* ditentukan untuk mengetahui energi tambatan:

$$\text{full load displacement (FLD)} = \text{light weight (LW)} + \text{dead weight (DW)}$$

Light weight adalah berat kapal pada saat kapal belum diberi muatan. Tabel 2.4 adalah tabel *displacement tonnage* untuk beberapa spesifikasi kapal.

Tabel 2. 4. Displacement Tonnage

Tipe Kapal	Tonase (ton)	DPT (ton)	Tipe Kapal	Tonase (ton)	DPT (ton)
penumpang	GT		peti kemas	DWT	
	2000	2287		20000	30741
	3000	3419		30000	46903
	5000	5675		40000	63297
	8000	9046		50000	79867
	10000	11287	tanker minyak	DWT	
	15000	16876		1000	1467
	20000	22449		2000	2859
	30000	33565		3000	4210
general cargo	DWT			5000	6853
	700	1138		10000	13276
	1000	1583		15000	19546
	2000	3029		20000	25719
	3000	4426		30000	37865
	5000	7140	40000	49823	
	8000	11086	50000	61643	
	10000	13660	60000	72365	
	15000	19966	70000	84975	
	30000	38199	100000	119417	
	40000	50003			
	50000	61617			
	70000	84426			
	90000	95929			
	100000	106932			
150000	117635				

Sumber: Perancangan Teknis Dermaga, Ir. Suwandi Saputro, MSc, 2005

Pada saat kapal bertambat, air laut di sekitar kapal juga ikut bergerak searah kapal bertambat. Sehingga massa yang terjadi akibat tambatan kapal, adalah penjumlahan dari berat kapal itu sendiri ditambah massa air di sekitar kapal.

Untuk faktor massa virtual dihitung dengan persamaan berikut:

$$C_m = 1 + \frac{\pi}{2} C_b \frac{d}{B} \dots\dots\dots 2.5$$

Dimana: C_b : block coefficient $[= W_s / (LBd_w_o)]$

d : draft (m)

B : moulded breadth (m)

L : panjang kapal (m)

w_o : berat jenis air laut (tf/m^3)

$$\text{atau, } C_m = \frac{M_s + M_w}{M_s} \dots\dots\dots 2.6$$

Dimana: C_m : factor massa virtual

M_s : massa kapal (perpindahan kapal/percepatan gravitasi)

M_w : penambahan massa dari massa air di sekitar kapal

Selain cara diatas, untuk menghitung *additional weight* dapat dihitung dengan cara:

1. *additional weight* (W_2)

$$W_2 = \rho L H^2 \times \frac{\pi}{4} \dots\dots\dots 2.7$$

Dimana: ρ : berat jenis air laut (1.025 ton/m^3)

L : panjang kapal (m)

H : full draft kapal (m)

2. *hydrodynamic coefficient* (C_H)

$$C_H = 1 + \frac{2D}{B} \dots\dots\dots 2.8$$

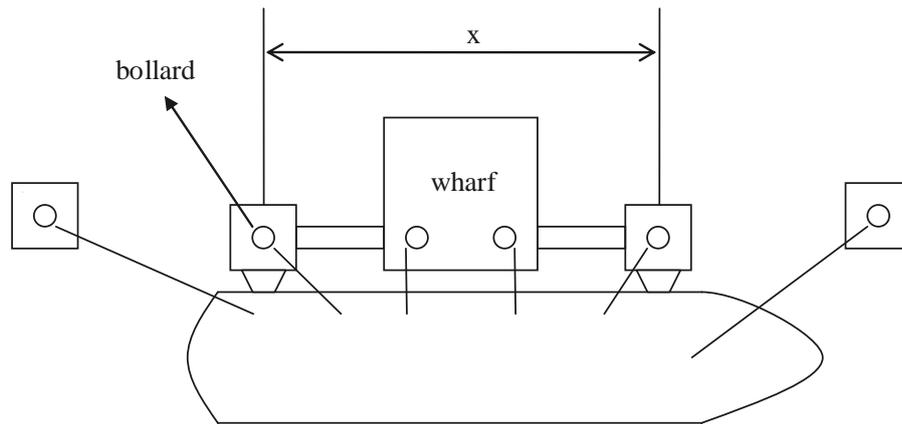
Dimana: D: full draft kapal (m)

B: lebar kapal (m)

B. Goyangan Kapal

Ketika kapal diikat pada *berthing dolphin*, kapal dapat terkena gelombang, angin, arus, dan faktor lainnya. Dan gaya luar akibat goyangan pada kapal yang terikat tersebut harus diperhitungkan.

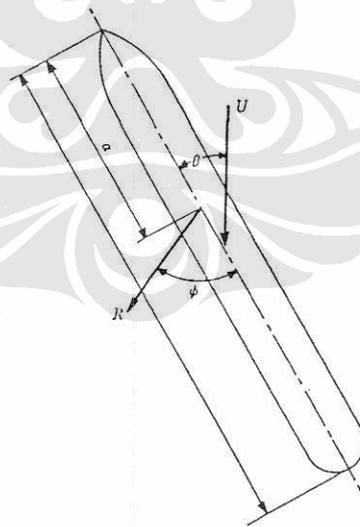
Kapal yang diikat pada lokasi lepas pantai atau dekat pintu masuk pelabuhan untuk kapal, dimana terjadinya gelombang dapat terjadi dalam jangka waktu yang lama, atau kapal yang diikat pada saat cuaca buruk, maka kapal akan bergoyang akibat gaya dari gelombang, angin atau arus. Terkadang energi kinetik terhadap goyangan dari kapal yang terikat akan melebihi energi tambatan. Karena hal ini, pada desain *bollards*, *bitts* atau *fender*, gaya tarik dan tumbukan karena goyangan akibat kapal yang terikat tersebut harus diperhitungkan.



Gambar 2. 6 Letak Bollard

Gaya luar akibat goyangan dapat ditentukan dari mengestimasi goyangan yang disebabkan oleh gaya gelombang, tekanan angin, tekanan arus, dengan melihat karakteristik sistem *mooring* dan lain sebagainya.

Gaya gelombang yang bekerja pada kapal yang terikat dapat dihitung dengan metode yang tepat seperti metode potongan (*strip*), *source method*, metode elemen batas, metode elemen hingga, dan lain sebagainya, tetapi metode *strip* lebih banyak digunakan untuk kapal.



Gambar 2. 7. Diagram Perhitungan Tekanan Angin (Sumber: *Technical Standards For Port And Harbour Facilities In Japan*)

Nilai tekanan angin yaitu koefisien C dapat dihitung dari persamaan berikut;

a. Nilai C

untuk kapal cargo:

$$C = 1.325 - 0.05 \cos 2\theta - 0.35 \cos 4\theta - 0.17 \cos 6\theta \dots\dots\dots 2.9$$

untuk kapal penumpang:

$$C = 1.142 - 0.142 \cos 2\theta - 0.367 \cos 4\theta - 0.133 \cos 6\theta \dots\dots\dots 2.10$$

untuk kapal tanker:

$$C = 1.20 - 0.083 \cos 2\theta - 0.25 \cos 4\theta - 0.177 \cos 6\theta \dots\dots\dots 2.11$$

b. Titik Resultan Tekanan Angin

$$\frac{a'}{l} = 0.291 + 0.0023\theta \dots\dots\dots 2.12$$

c. Arah Kerja Resultan Tekanan Angin

$$\phi = \{1 - 0.15(1 - \theta/90) - 0.80(1 - \theta/90)^3\} \times 90 \dots\dots\dots 2.13$$

Suzuki et al. merevisi persamaan diatas menjadi:

$$\phi = [3 - (1 - \theta/90)^q] \times 90 \rightarrow \theta \geq 0 \dots\dots\dots 2.14$$

$$\phi = [1 + (1 - \theta/90)^q] \times 90 \rightarrow \theta < 0$$

Dimana eksponen q adalah 5 untuk kapal cargo dan tanker dalam kondisi bermuatan dan 3 untuk kapal tanker penuh muatan.

Untuk kecepatan angin U, berarti kecepatan angin dalam 10 menit dapat digunakan.

C. Tarikan Kapal

Gaya tarik yang terjadi pada *berthing dolphin* sebaiknya ditentukan berdasarkan hal-hal berikut ini:

1. gaya tarik pada *bollards* adalah nilai yang disebutkan pada tabel 2.5 yang berhubungan dengan *gross tonage* kapal, dimana nilai yang disebutkan dan 1/2 dari nilai yang disebutkan pada arah vertikal bekerja secara simultan.
2. gaya tarik pada *bitts* adalah nilai yang disebutkan pada tabel 2.5 yang berhubungan dengan *gross tonage* kapal, bekerja di segala arah.
3. gaya tarik kapal tidak disebutkan pada tabel 2.5 (kapal dengan *gross tonage* kurang dari 200 tons atau lebih dari 10000 tons) dan untuk *berthing dolphin* yang menampung kapal pada cuaca buruk dan dibangun di area perairan

dengan kondisi laut buruk, harus ditentukan dengan mempertimbangkan cuaca dan kondisi laut, struktur *dolphin* dan data pengukuran gaya tarik.

Tabel 2. 5. Gaya Tarik Kapal

Gross tonnage	Tractive force on bollard (tf)	Tractive force on bitts (tf)
200 – 500	15	15
501 – 1000	25	25
1001 – 2000	35	25
2001 – 3000	35	35
3001 – 5000	50	35
5001 – 10000	70	50 (25)
10001 – 15000	100	70 (25)
15001 – 20000	100	70 (35)
20001 – 50000	150	100 (35)
50001 – 100000	200	100 (50)

The parenthesized values are for the force on the mooring posts installed around midship which have no more than 2 spring lines.

Sumber: *Technical Standards For Port And Harbour Facilities In Japan*

D. Gaya Angin

Dalam desain fasilitas dermaga, elemen meteorologi harus diperhatikan seperti angin, tekanan atmosfer dan temperatur, kabut, dan hujan. Tekanan angin akan berpengaruh pada struktur dengan cara menerpa kapal, yang sedang bertambat dan memiliki ketinggian yang cukup tinggi, terlebih dahulu, kemudian pengaruh kapal itu akan mengenai struktur. Sehingga pengaruh akibat angin ini harus diperhitungkan.

Gaya angin yang terjadi pada kapal yang tertambat dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$R_w = \frac{1}{2} \times \rho \times C \times U^2 \times (A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta) \text{ (Kg)} \dots\dots\dots 2. 15$$

Dimana: R_w = gaya angin (kg)

ρ = kepadatan udara (= 0.123 kg.sec²/m⁴)

U = kecepatan angin (m/sec)

A = luas bagian depan kapal pada permukaan laut (m²)

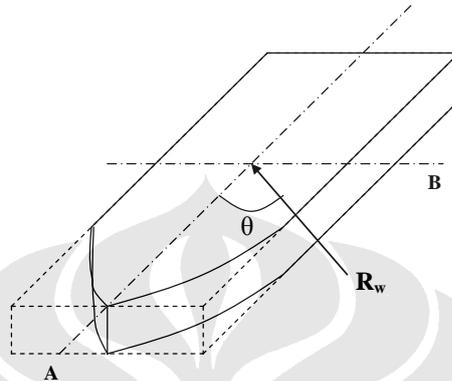
B = luas bagian samping kapal pada permukaan laut (m²)

θ = sudut arah angin terhadap garis pusat kapal

C = koefisien tekanan angin

Maksimum gaya angin pada persamaan diatas terjadi ketika $\theta = 90^\circ$. Koefisien tekanan angin adalah 1.2 pada saat $\theta = 90^\circ$ dan gaya angin (R_w) akan menjadi:

$$R_w = 0.0738 \times B \times U^2 (kg) \dots\dots\dots 2.16$$



Gambar 2. 8 Arah Angin
(Sumber: Bridgestone, *Marine Fender Design Manual*)

Kecepatan dan arah angin yang digunakan untuk menentukan gelombang badai, sebaiknya diperhitungkan dari pengukuran nilai dan gradien angin dengan koreksi yang sesuai. Desain kecepatan angin yang bekerja langsung terhadap struktur dan kapal dianjurkan untuk ditentukan berdasarkan data statistik periode sekurangnya 30 tahun.

Tekanan angin sebaiknya ditentukan dengan memperhitungkan faktor konfigurasi fasilitas dan kondisi di lokasi.

E. Gaya Arus

Arus pasang adalah salah satu faktor yang harus diperhatikan seperti tekanan angin; namun demikian, dermaga dan fasilitas tambatan di desain untuk tidak terpengaruh oleh arus pasang. Tetapi di beberapa kasus gaya arus ini harus diperhatikan, dengan persamaan yang telah disebutkan pada persamaan 2.17.

$$R_p = K \times D \times V_t^2 \dots\dots\dots 2.17$$

Dimana: R_p = maksimum gaya arus pasang (kg)

K = koefisien arus (=1.00)

D = (draft) x (panjang kapal atau lebar kapal) x 0.9

V_t = kecepatan arus pasang (m/sec)

2.3.2 Beban Hidup

Beban hidup yang terjadi pada struktur pelabuhan diantaranya adalah beban muatan kapal, kereta, kendaraan, *tractor* dan *trailer*, pejalan kaki (0.5 tf/m²), dan peralatan-peralatan yang digunakan untuk menyusun muatan. Untuk beban kendaraan sebaiknya berdasarkan spesifikasi jalan yang ada. Sedangkan untuk perhitungan pembebanan dari muatan ini harus memperhatikan jumlah muatan maksimum kapal yang akan diletakkan dan periode pembebanan tersebut. Selain itu, harus pula memperhatikan kondisi beban pada saat gempa terjadi. Untuk muatan diatas dermaga yang berupa material, maka harus mengetahui berat jenis material tersebut. Dibawah ini adalah tabel berat jenis beberapa material:

Tabel 2. 6. Berat Jenis Material (tf/m³)

materials	Unit weight	materials	Unit weight
steel	7.85	Asphalt concrete	2.3
Casting steel	7.85	Stone	2.6
Casting iron	7.25	Sand, gravel, rubble (dry condition)	1.6
Plain concrete	2.3	Sand, gravel, rubble (wet condition)	1.8
Reinforced concrete	2.45	Sand, gravel, rubble (saturated condition)	2.0
timber	0.8	Sand, gravel, rubble (effective weight in water)	1.0

Sumber: *Technical Standars For Port And Harbour Facilities In Japan*

2.3.3 Beban Mati

Beban mati yang terjadi pada struktur pelabuhan diantaranya adalah beban berat sendiri struktur dan beban yang berasal dari peralatan-peralatan yang diletakkan dan tetap diatas dermaga. Namun pada struktur *berthing dolphin* yang sedang ditinjau, tidak ada peralatan yang akan diletakkan diatas *pilecap*.

2.3.4 Gaya Gelombang Laut

Gaya gelombang yang terjadi pada struktur dapat ditentukan dengan metode penelitian dan formula desain yang tepat dengan memperhatikan tipe struktur, topografi dasar laut, kedalaman air, dan karakteristik gelombang. Hal ini juga penting untuk memperhatikan ketidakseragaman gelombang.

Sebenarnya, gelombang laut memiliki tinggi dan periode gelombang yang tidak seragam, dan melalui tingkat *non-breaking*, *breaking*, dan *post-breaking*, tergantung dari kedalaman air dan topografi dasar laut. Jadi, pada perhitungan gaya gelombang, gelombang yang paling berpengaruh pada struktur harus termasuk dalam perhitungan, dengan memperhatikan juga gelombang yang tidak seragam dan karakteristik gaya gelombang yang dihasilkan pada tipe struktur yang diperhitungkan.

Secara umum dapat dikatakan bahwa gelombang yang paling tinggi adalah gelombang yang mempunyai gaya yang paling besar, jadi hanya gaya gelombang dari gelombang maksimum diantara deretan gelombang yang tidak seragam yang menabrak struktur harus diperhatikan dalam desain struktur. Bagaimanapun, dalam perhitungan gaya gelombang yang bekerja pada struktur tiang dan struktur yang mengapung, harus memperhatikan efek dari gaya gelombang yang terus-menerus terjadi pada struktur tersebut.

A. Gaya Gelombang yang Terjadi pada Tiang

Gaya gelombang yang bekerja pada tiang, dimana tidak menghalangi penyebaran gelombang air, dapat dihitung sebagai penjumlahan gaya tarik yang tepat dengan kecepatan partikel air kuadrat dan gaya inersia terhadap percepatan dengan rumus sebagai berikut:

$$\vec{f}_n = C_D \frac{w_o}{2g} D \vec{u}_n |u_n| \Delta s + C_M \frac{w_o}{g} A \vec{\alpha}_n \Delta s \dots\dots\dots 2.18$$

Dimana:

\vec{f}_n = gaya yang bekerja dengan panjang yang tak terhingga Δs (m) pada tiang dengan arah tegak lurus dengan sumbu tiang pada bidang sumbu tiang dan arah pergerakan partikel air (ft)

$\vec{u}_n, \vec{\alpha}_n$ = komponen kecepatan (m/s) dan komponen percepatan (m/s²) partikel air dengan arah tegak lurus pada sumbu tiang (dengan arah yang sama dengan \vec{f}_n) pada bidang sumbu tiang dan arah pergerakan partikel air (komponen-komponen tersebut terkait dengan gelombang yang terjadi tidak terganggu oleh tiang)

$|u_n|$ = nilai tetap (m/s)

C_D = koefisien tarik

C_M = koefisien gaya inersia

D = kedalaman tiang pada arah tegak lurus terhadap sumbu tiang seperti yang terlihat pada arah \vec{f}_n (m)

A = luas penampang tiang sepanjang bidang tegaklurus dengan sumbu tiang (m²)

w_0 = berat jenis air laut (tf/m³)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

Ketika gelombang pecah mengenai struktur yang berada pada lereng dasar laut yang curam, maka gaya gelombang impulsif terjadi pada struktur sehingga menambah gaya tarik dan inersia. Hal ini harus juga dimasukkan dalam perhitungan. Selain itu, gaya dorong keatas juga terjadi pada beberapa tiang bawah laut, sehingga menambah gaya tarik dan inersia. Juga, tiang yang langsing dimungkinkan untuk mengalami getaran dari gaya dorong.

Pada penelitian ini, struktur *berthing dolphin* yang ditinjau tidak memperhatikan gaya gelombang yang terjadi. Karena struktur *berthing dolphin* ini akan diletakkan pada perairan yang tenang, hal ini disebabkan struktur berada di balik *breakwater*. Jadi, sebelum gelombang laut mencapai struktur, gelombang sudah dipecah terlebih dahulu.

2.3.5 Gaya Gempa

Dalam desain fasilitas pelabuhan efek gempa harus diperhatikan dalam perhitungan, sehingga struktur tersebut nantinya mempunyai ketahanan terhadap gempa.

Dalam menentukan pengaruh gempa rencana yang harus ditinjau dalam perencanaan struktur gedung menurut *SNI Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*, bergantung pada probabilitas terjadinya keruntuhan struktur gedung selama umur gedung dan umur gedung tersebut yang diharapkan, pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalihkan dengan suatu faktor keutamaan, I , menurut persamaan:

$$I = I_1 I_2 \dots\dots\dots 2.19$$

Dimana I_1 adalah faktor keutamaan untuk menyesuaikan perioda ulang gempa berkaitan dengan penyesuaian probabilitas terjadinya gempa itu selama umur gedung, sedangkan I_2 adalah faktor keutamaan untuk menyesuaikan perioda ulang gempa berkaitan dengan penyesuaian umur gedung tersebut. Faktor-faktor keutamaan I_1 , I_2 , dan I ditetapkan menurut tabel berikut,

Tabel 2. 7. Koefisien Keutamaan

Kategori Gedung	Faktor Keutamaan		
	I_1	I_2	I
Gedung umum seperti untuk penghunian, perniagaan dan perkantoran	1,0	1,0	1,0
Monumen dan bangunan monumental	1,0	1,6	1,6
Gedung penting pasca gempa seperti rumah sakit, instalasi air bersih, pembangkit tenaga listrik, pusat penyelamatan dalam keadaan darurat, fasilitas radio dan televisi.	1,4	1,0	1,4
Gedung untuk menyimpan bahan berbahaya seperti gas, produk minyak bumi, asam, bahan beracun.	1,6	1,0	1,6
Cerobong, tangki diatas menara	1,5	1,0	1,5

Sumber: *SNI 03-1726-2002, Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*

Dan pada penelitian ini, untuk faktor keutamaan I_1 yang akan digunakan adalah 1,2.

Dalam *SNI Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*, juga disebutkan bahwa struktur bangunan dibagi menjadi dua kategori yaitu gedung beraturan dan tidak beraturan. Dan dalam penelitian ini, struktur dermaga dengan tiang pondasi, akan dianggap sebagai gedung beraturan. Sehingga pengaruh gempa rencana dapat ditinjau sebagai pengaruh gempa statik ekuivalen, maka menurut standar SNI analisisnya dapat dilakukan berdasarkan analisis statik ekuivalen.

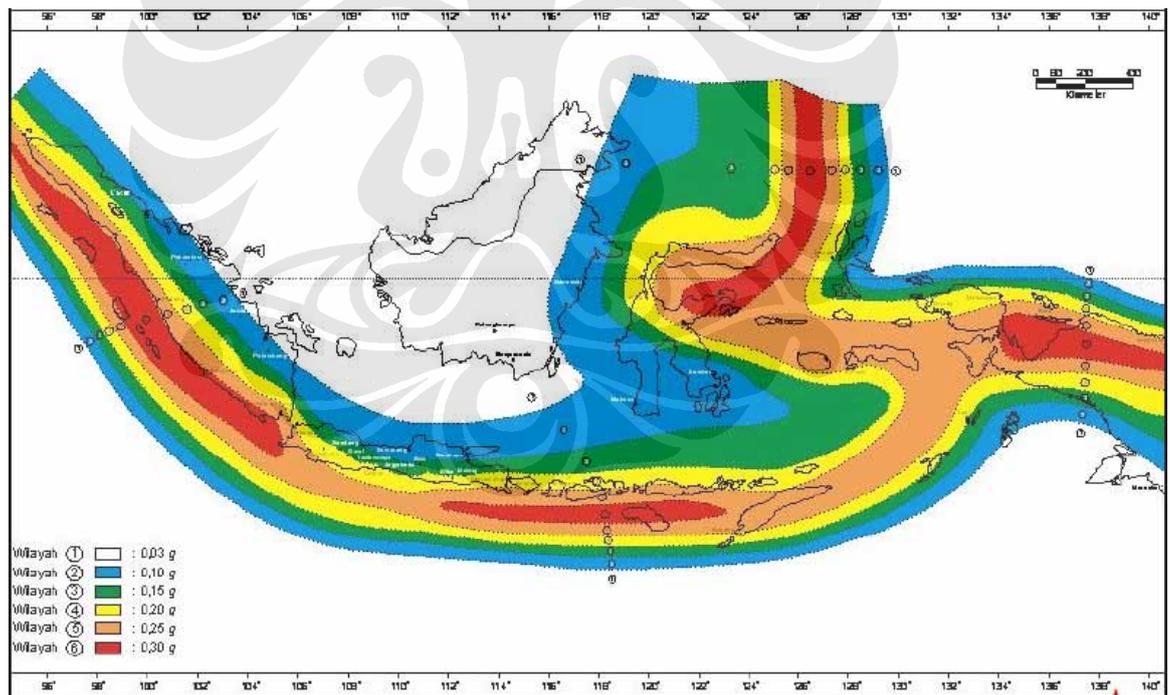
Struktur gedung beraturan dapat direncanakan terhadap pembebanan gempa nominal akibat pengaruh gempa rencana dalam arah masing-masing sumbu utama denah struktur tersebut, berupa beban gempa nominal statik ekuivalen.

Apabila kategori struktur memiliki faktor keutamaan (I), dan strukturnya untuk suatu arah sumbu utama denah struktur dan sekaligus arah pembebanan gempa rencana memiliki faktor reduksi gempa (R) dan waktu getar alami fundamental (T_1), maka beban geser dasar nominal statik ekuivalen (V) yang terjadi di tingkat dasar dapat dihitung menurut persamaan:

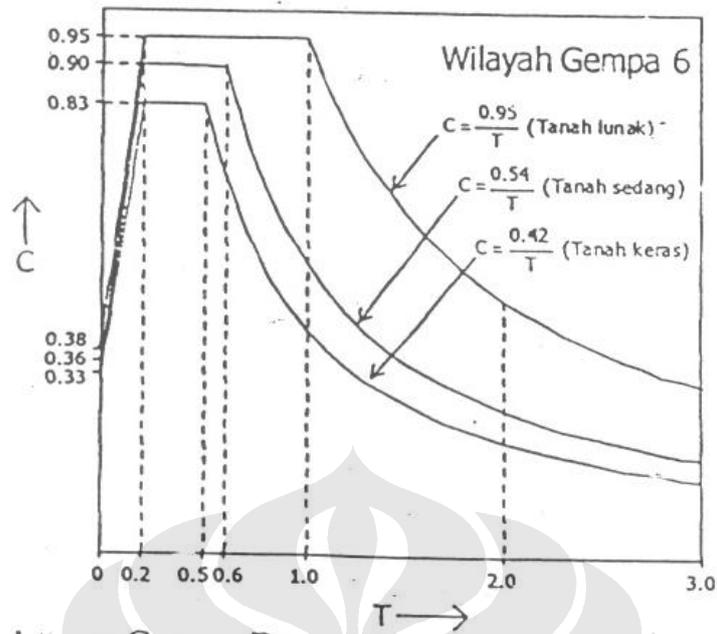
$$V = \frac{C_1 I}{R} W_t \dots\dots\dots 2.20$$

Dimana C_1 adalah nilai faktor respons gempa yang didapat dari spektrum respons gempa rencana untuk waktu getar alami fundamental T_1 , sedangkan W_t adalah berat total struktur, termasuk beban hidup yang sesuai.

Dalam penelitian yang akan dibahas adalah proyek pelabuhan di Teluk Bayur, yang berada di Padang, Sumatera Barat. Maka wilayah ini berada di wilayah gempa di zona 6 (gambar 2.9). Dan untuk spektrum respons gempa rencana yang akan digunakan seperti pada gambar 2.10.



Gambar 2.9. Wilayah Gempa Indonesia dengan Percepatan Puncak Batuan Dasar dengan Perioda Ulang 500 tahun (Sumber: SNI 03-1726-2002, Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung)



Gambar 2. 10. Spektrum Respons Gempa Rencana (Sumber: SNI 03-1726-2002, Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung)

Dengan waktu getar alami fundamental struktur,

$$T = 6.3 \sqrt{\frac{Wd^2}{gFd}} \dots\dots\dots 2. 21$$

Dimana W adalah berat struktur, dan F adalah beban geser dasar nominal statik ekuivalen.

Untuk faktor reduksi gempa, berdasarkan persamaan,

$$1.6 \leq R = \mu f_1 \leq R_m \dots\dots\dots 2. 22$$

Dimana R_m adalah faktor reduksi gempa maksimum yang dapat dikerahkan oleh sistem struktur dan f_1 (faktor kuat lebih beban dan bahan yang terkandung di dalam struktur) sama dengan 1,6. Berdasarkan SNI, dalam menentukan faktor daktilitas maksimum dan faktor reduksi gempa maksimum telah ditentukan. Dan untuk sistem struktur pada penelitian ini, masuk dalam kategori sistem struktur gedung kolom kantilever (sistem struktur yang memanfaatkan kolom kantilever untuk memikul beban lateral). Dimana $\mu_m = 1.4$, dan $R_m = 2.2$. Karena kategori struktur termasuk elastic penuh, maka dapat digunakan $\mu = 1.0$, dan $R = 1.6$.

2.3.6 Kombinasi Beban (LRFD)

Struktur dan komponen struktur harus direncanakan hingga semua penampang mempunyai kuat rencana minimum sama dengan kuat perlu, yang dihitung berdasarkan kombinasi beban dan gaya terfaktor yang sesuai. Maka untuk kombinasi beban yang akan digunakan pada analisa pondasi dalam penelitian ini adalah:

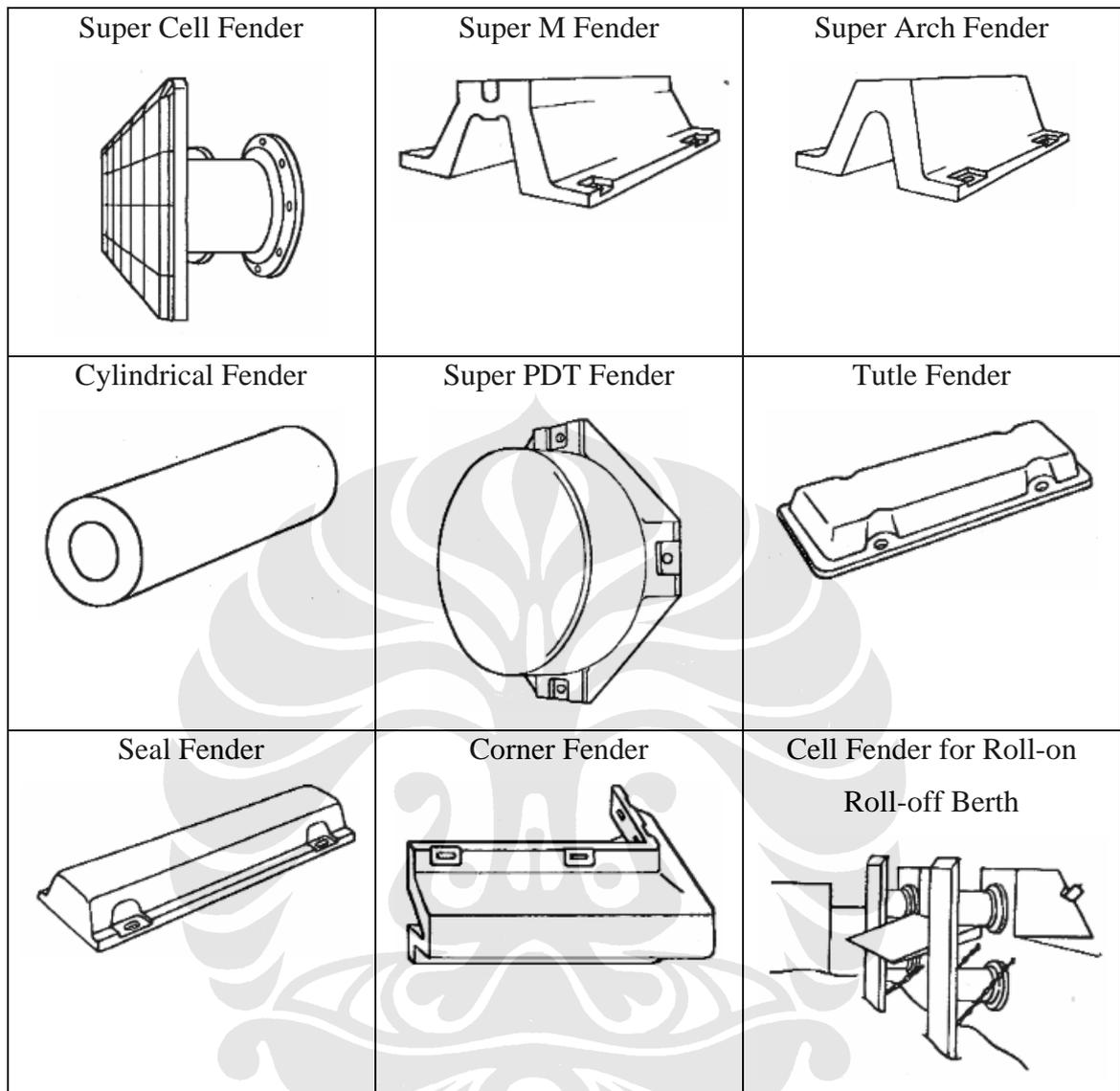
Tabel 2. 8. Kombinasi Beban

Load Type	Vacant Condition	Mooring & Breasting Condition	Berthing Condition	Earthquake Condition
Dead load (D)	1,2 ^a	1,2	1,2	0,9 (1,2) ^c
Live load (L)	1,6 ^b	1,6	1,6(0,5)	0,0(0,50)
Buoyancy (B)	1,3	1,3	1,3	
Wind on Structure (W)	1,3	1,3	1,0	
Current on Structure (C)	1,3	1,3	1,0	
Earth Pressure on the Structure (H)	1,6	1,6	1,6	1,0
Mooring/Breasting Load (M)		1,3		
Berthing Load (Be)			1,6	
Earthquake Load (E)				1,0
a. Reduced load factor for dead load (D) to 0,90 to check components for minimum axial load and maximum moment. b. The load factor for live load (L) may be reduced to 1,3 for the maximum outrigger float from a truck crane. c. 0,90 and 1,20				

Sumber: Presentasi, Ir. Sjahril A. Rahim, M.Eng

2.4 SISTEM FENDER

Tujuan dari adanya sistem *fender* adalah sebagai penahan (*bumper*) untuk menahan lambung kapal dan fasilitas tambatan dari kerusakan pada saat kapal bertambat. Fungsi lainnya adalah sebagai penyerap energi tambatan kapal pada saat bertambat dan menghaluskan tumbukan antara kapal dan fasilitas tambatan. Gambar 2.11 menggambarkan beberapa contoh tipe *fender*.



Gambar 2. 11 Contoh Tipe *Fender* (Sumber: Bridgestone, Marine *Fender* Design Manual)

Dari dua fungsi yang telah disebutkan, maka adanya sistem *fender* di suatu dermaga sangat penting. Dan dengan mengetahui sistem *fender* yang akan digunakan pada dermaga dapat mengetahui gaya akhir yang terjadi pada dermaga, yang kemudian disalurkan ke tiang pondasi. Oleh sebab itu, dalam mendesain sistem *fender* harus tepat agar dapat bekerja sesuai dengan fungsinya, dan ekonomis agar dapat mengurangi biaya konstruksi pembangunan dermaga. Tahap-tahap dalam desain sistem *fender* adalah:

2.4.1 Perhitungan Energi Tambatan

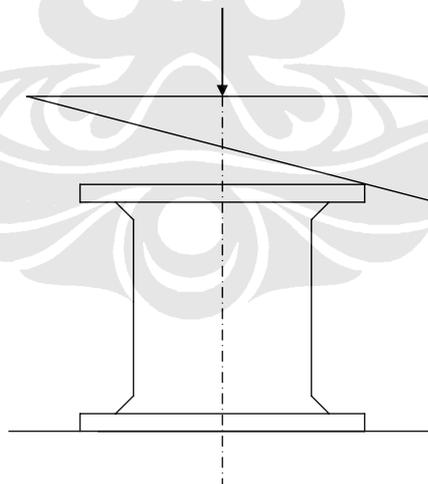
Penjelasan mengenai perhitungan energi tambatan kapal ini dapat dilihat pada sub-bab 2.3.1.A.

2.4.2 Pengaruh Angular

Jika pengaruh sudut pada saat tumbukan akan terjadi, maka dianjurkan untuk memperhitungkan kehilangan energi sistem terhadap defleksi yang tidak seragam dan penyerapan energi oleh setiap *fender* dalam sistem. Kehilangan energi dapat terjadi pada efek sudut dan harus dimasukkan dalam analisa. Sudut yang terjadi didefinisikan sebagai sudut yang dibuat oleh lambung kapal dengan struktur tambatan dan tidak perlu memperhatikan arah dari gerak kapal.

Pada kasus struktur tambatan untuk kapal besar, efek tekanan sudut pada *fender* biasanya diperhitungkan dalam desain. Tetapi pada kasus dermaga yang menerus dimana banyak *fender* terpasang dengan spasi tertentu, efek sudut ini biasanya tidak diperhatikan.

Berdasarkan dari hasil yang diperoleh pada survei lapangan, sudut bertambat kurang dari 3 derajat pada banyak kasus, dan maksimum 6 derajat (gambar 2.12).



Gambar 2. 12 Arah Tekanan (Sumber: Bridgestone, Marine Fender Design Manual)

Dalam memilih sistem *fender*, harus menentukan faktor koreksi untuk pembebanan angular (sudut) dalam perhitungan. Setiap faktor koreksi adalah

perbandingan gaya reaksi (R) dan penyerapan energi (E) pada sudut (θ) dibagi dengan nilai yang sama pada sudut nol ($\theta = 0^\circ$).

2.4.3 Penyerapan Energi Oleh *Fender*

Perilaku *fender* ditentukan oleh efek angular. Perilaku angular yang diperoleh dengan mengalikan perilaku normal ($\theta = 0^\circ$) dengan faktor koreksi angular harus sama dengan atau lebih besar dari energi tambatan efektif, seperti persamaan dibawah ini:

$$E < E_a = E_n \times F_{ae}, \dots\dots\dots 2. 23$$

dimana E: energi tambatan efektif

E_a : penyerapan energi pada tekanan angular

E_n : penyerapan energi pada tekanan normal

F_{ae} : faktor koreksi angular untuk menentukan penyerapan energi

Selain itu, persamaan dibawah ini harus digunakan jika terdapat batasan gaya reaksi pada dermaga:

$$R_{ma} > R_n \text{ dan } R_a (= R_n \times F_{ar}), \dots\dots\dots 2. 24$$

dimana R_{ma} : gaya reaksi ijin maksimum

R_n : gaya reaksi pada tekanan normal

R_a : gaya reaksi pada tekanan angular

F_{ar} : faktor koreksi angular untuk gaya reaksi

Langkah-langkah untuk mengecek perilaku *fender*:

1. *Fender* yang memiliki penyerapan energi lebih besar pada tekanan normal daripada energi tambatan efektif (E) sebaiknya dipilih.
2. Membaca nilai E_n pada defleksi ijin maksimum untuk sudut yang ditentukan dari kurva perilaku normal pada tabel dan mengalikan E_n dengan F_{ae} pada defleksi ijin maksimum. Nilai ($E_n \times F_{ae}$) adalah penyerapan energi pada tekanan angular (E_a).
3. Dengan cara yang sama, R_a dapat diperoleh dengan menggunakan kurva perilaku normal dan F_{ar} pada defleksi ijin maksimum untuk sudut yang ditentukan.
4. Jika nilai E_a , R_a , dan R_n tidak dapat ditentukan dengan persamaan ini, maka ukuran *fender* yang berbeda harus ditentukan.

2.4.4 Batasan Pada Kondisi Tambatan

Beberapa "pembatasan pada kondisi tambatan" harus diperhitungkan dalam memilih sistem *fender* yang berhubungan dengan beberapa spesifikasi dermaga. Beberapa batasan tersebut adalah:

○ Gaya Reaksi Ijin Maksimum.

Macam-macam dan tipe tambatan memiliki gaya reaksi yang bervariasi; terutama dermaga dan *dolphin* yang terdiri dari tiang-tiang yang sangat dibatasi gaya reaksi ijinnya. Bahkan dermaga tipe gravitasi terkadang sangat dibatasi gaya reaksi ijinnya dengan kekuatan beton dan ketebalannya.

Pada beberapa kasus, gaya reaksi ijin untuk sistem *fender* yang dipilih harus kurang dari gaya reaksi ijin maksimum (R_{ma}). Hal utama yang harus dicek adalah gaya reaksi normal (R_n) dan gaya reaksi angular (R_a) dengan hubungan seperti dibawah ini:

$$R_{ma} > R_n \text{ dan } R_a$$

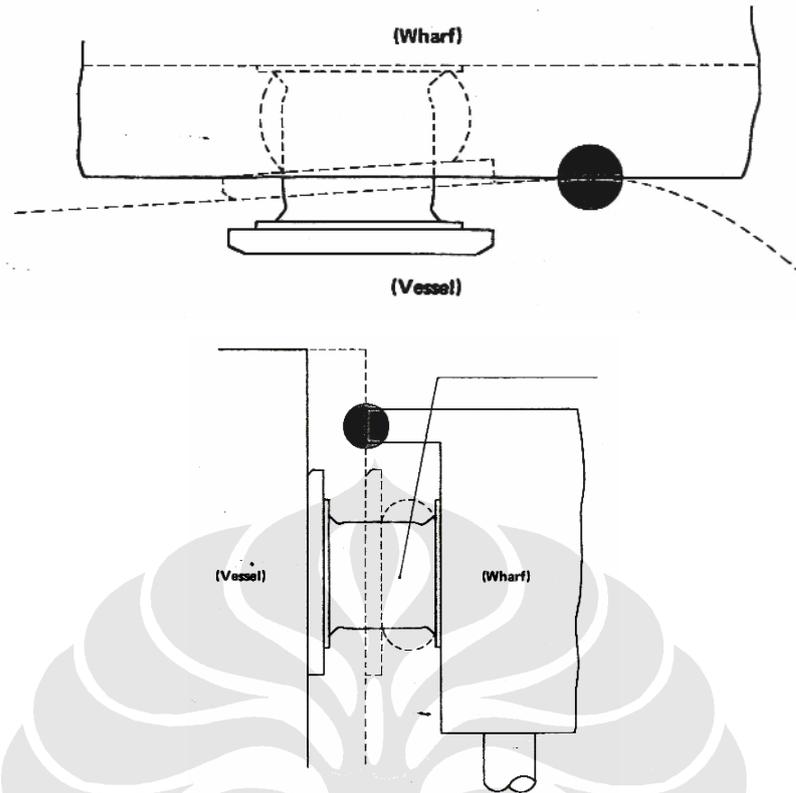
Jika memperhitungkan hal diatas, sistem *fender* dengan keefisienan yang tinggi untuk menyerap energi dalam gaya reaksi ijin dapat dipilih.

○ Luas Pemasangan Yang Diijinkan.

Jika area pemasangan dibatasi terhadap ketebalan dermaga, sistem *fender* sebaiknya memiliki rancangan yang padat pada area minimum, dimana tetap berperilaku sesuai dengan desain.

○ Tinggi Fender Ijin Maksimum.

Terdapat beberapa kasus dimana dalam sistem *fender* harus termasuk penyesuaian tinggi terhadap panjang "lengan pembebanan", dll. Pada beberapa kasus, sangat dianjurkan untuk mengkombinasi sejumlah *fender* yang lebih kecil untuk sistem *Cell* dan *Super Cell* dan *fender* yang lebih kecil dan lebih panjang untuk sistem *Super M* dan *Super Arch*. Salah satu aplikasi khusus terdapat pada gambar dibawah, dimana kasusnya sangat penting untuk mendesain sistem *fender* dimana kapal tidak akan menabrak dermaga walaupun jika sistem tertekan hingga mencapai defleksi *fender* desain.



Gambar 2. 13 Contoh (Sumber: Bridgestone, *Marine Fender Design Manual*)

o Penyesuaian Dermaga Eksisting.

Jika mampu disesuaikan, *fender* dapat langsung dipasang pada dinding dermaga eksisting. Untuk beberapa kasus, pengangkuran khusus seperti *One Touch Anchor* dan *Resin Anchor* dianjurkan melakukan pemasangan yang tepat. Banyak dermaga tua konvensional memiliki *fender* kayu pada dinding dermaga yang sangat tipis. Jika *up-grading* beberapa dermaga diperlukan untuk *fender* karet, beberapa peralatan harus diperhitungkan, terutama untuk pemasangan *fender* tersebut.

2.4.5 Pembatasan Dari Kapal

Beberapa pembatasan dari kapal perlu diperhatikan dalam pemilihan sistem *fender*. Beberapa pembatasan tersebut adalah:

- Tekanan lambung kapal

Lambung kapal diperkuat oleh balok longitudinal dan balok transversal. Tekanan lambung telah ditentukan secara teori, dengan melihat kekuatan balok-

balok ini, jarak antara balok dan area kontak *fender*. Jika *fender* kecil dengan gaya reaksi yang besar menabrak lambung kapal, beberapa denting atau kerusakan serius terhadap lambung dapat terjadi. Agar dapat mencegah beberapa kerusakan, *fender* dengan tekanan permukaann yang lebih kecil daripada tekanan yang diperlukan lambung sebaiknya dipilih.

Di beberapa kasus kapal kecil, spasi antara balok-balok ini saling berdekatan, jadi permukaan *fender* dapat kontak setidaknya dengan salah satu balok pada lambung kapal. Dan beberapa balok, secara umum, memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan gaya reaksi *fender*. Oleh karena itu, beberapa kasus untuk *fender* yang kecil, tekanan lambung atau tekanan permukaan tidak terlalu penting untuk kapal yang lebih besar.

Salah satu *fender-fender* dibawah ini sebaiknya dipilih dengan memperhatikan syarat untuk tekanan permukaan. Tekanan permukaan setiap tipe *fender* ditentukan dari kualitas karet dan/atau ukuran frame bagian depan. Variasi tekanan permukaan terdapat pada tabel 2.9.

Tabel 2. 9. Tekanan Permukaan

Tipe <i>fender</i>	Tekanan permukaan T/m ² (kips/ft ²)
Cell dan Super Cell	Approx. 10 (2.05) ~ 50 (10.24)
Super M	50 (10.24) ~ 90 (18.43)
Super Arch	48 (9.83) ~ 110 (22.53)

Sumber: Bridgestone, Marine Fender Design Manual

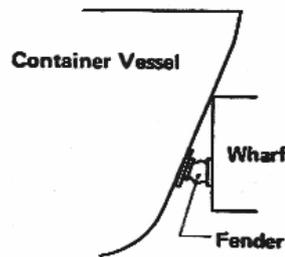
- Lekukan lambung kapal

Sesuai dengan lambung kapal yang memiliki banyak lekukan pada arah horizontal dan vertikal, *fender* akan tertekan pada bentuk yang rumit dengan beberapa lekukan.

1. lekukan pada arah vertikal

Secara umum, seperti kapal muatan dan tanker mempunyai garis vertikal yang hampir lurus dimana mereka kontak dengan sistem *fender*, selain itu juga memiliki lekukan di bagian haluan dan buritan, hal ini tidak penting untuk diperhitungkan dalam desain. Namun demikian, kapal container memiliki lekukan di skitar area kontak, maka penting untuk memperhatikan lekukan dalam desain.

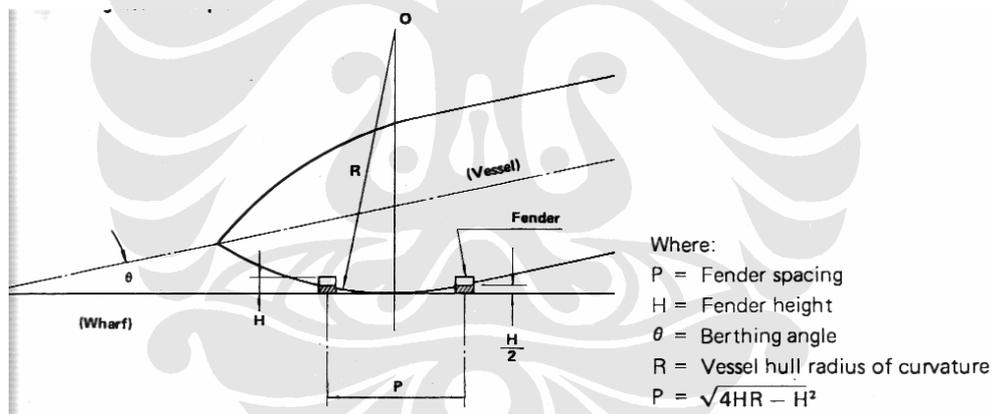
Jika *fender* dipasang pada posisi yang rendah, kapal dapat menabrak dermaga sebelum *fender* dapat tertekan sesuai defleksi dalam desain.



Gambar 2. 14 Contoh (Sumber: Bridgestone, Marine *Fender* Design Manual)

2. lekukan pada arah horizontal

Terdapat beberapa kapal container yang lekukannya mengenai *fender* dengan kondisi seperti gambar dibawah, maka dari hal tersebut perlu untuk menentukan spasi antar *fender* yang cukup untuk mencegah kapal menabrak dermaga.



Gambar 2. 15 Contoh (Sumber: Bridgestone, Marine *Fender* Design Manual)

2.4.6 Pengaruh Dari Kondisi Alam

Pengaruh dari kondisi alam yang terjadi pada kapal perlu diperhatikan dalam mendesain sistem *fender*. Diantara faktor-faktor alam yang terjadi adalah:

- Gaya gelombang.
- Pasang laut.
- Tekanan angin.

Dan penjelasan mengenai hal diatas telah disebutkan dalam sub-bab 2.3.

2.4.7 Pemilihan *Fender*

Hal terpenting dalam memilih *fender* dermaga yang tepat adalah kemampuannya untuk menyerap energi tambatan kapal agar dapat bertambat dengan aman. Dibawah ini adalah prosedur untuk memilih sistem *fender*:

- Untuk memperoleh energi tambatan yang benar adalah dengan menggunakan “prosedur untuk menghitung energi tambatan”. Karena terdapat banyak faktor yang tak tentu, maka sangat sulit menentukan kriteria desain untuk sistem *fender* yang mencakup semua faktor. Maka penting untuk membuat kejelasan kriteria mana yang digunakan dalam desain diantara banyak faktor dan formula.
- Untuk memilih sistem *fender* yang sesuai untuk menyerap energi tambatan dengan memperhatikan efek angular, dan lain-lain.
- Untuk memilih sistem *fender* dengan memperhatikan beberapa batasan, teruatam seperti:
 1. gaya reaksi *fender* tidak boleh lebih dari gaya reaksi ijin maksimum dermaga dibawah kondisi normal.
 2. sistem *fender* harus dipasang pada area yang didesain.
 3. tekanan permukaan sistem *fender* harus kurang dari tekanan ijin lambung kapal. Pada kasus tekanan lambung yang sangat rendah, sistem *fender* Cell atau Super Cell dengan diberi frame di bagian depan, dimana memiliki fleksibilitas yang besar pada tekanan permukaannya, adalah paling sesuai.
- Untuk menentukan spasi sistem *fender* adalah dengan memperhatikan lekukan minimum kapal yang kontak dengan *fender*.

2.5 DAYA DUKUNG MATERIAL TIANG

2.5.1 Baja

Baja yang akan digunakan untuk struktur harus sesuai dengan standar kualitas dan bentuk yang terdapat pada tabel dibawah ini. Jenis-jenis baja yang

disebutkan dalam tabel dibawah ini adalah baja yang biasa digunakan pada struktur pelabuhan.

Tabel 2. 10. Standar Kualitas Baja

Kind of steel	Name of standard		Symbol	Kind
Structural steel	JIS G 3101	Rolled steel for general structures	SS 41, SS 50	Steel bars, steel sections, steel plates, steel flats
	JIS G 3106	Rolled steel for welded structures	SM 41, SM 50, SM 50 Y, SM 53	steel sections, steel plates, steel flats
	JIS G 3114	Hot-rolled atmospheric corrosion resisting steel for welded structure	SMA 41, SMA 50	Steel sections, steel plates
Steel pipe	JIS G 3444	Carbon steel tubes for general structural purposes	STK 41, STK 50	
Steel pile	JIS A 5525	Steel pipe pile	SKK 41, SKK 50	
	JIS A 5526	Steel H pile	SHK 41, SHK 41 M, SHK 50 M	

Sumber: Technical Standars For Port And Harbour Facilities In Japan

Tabel 2. 11. Standar Bentuk Baja

Kind of steel		standard	symbol
Structural steel	Steel bars	JIS G 3191	SS 41, SS 50
	Steel sections	JIS G 3192	SS 41, SS 50, SM 41, SM 50, SM 50 Y,
	Steel plates	JIS G 3193	SM 53, SMA 41, SMA 50
	Steel flats	JIS G 3194	SS 41, SS 50, SM 41, SM 50 Y, SM 53
Steel pile	Steel pipe pile	JIS A 5525	SKK 41, SKK 50
	Steel H pile	JIS A 5526	SHK 41, SHK 41 M, SHK 50 M

Sumber: Technical Standars For Port And Harbour Facilities In Japan

Dalam perhitungan desain struktur baja, beberapa nilai dibawah ini harus dimasukkan:

$$\text{Young's modulus} = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{Shearing modulus} = 8.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{Poisson's ratio} = 0.30$$

$$\text{Coefficient of thermal expansion} = 12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$$

Selain nilai-nilai diatas, harus diperhatikan pula tegangan yang diijinkan, sesuai dengan tabel 2.12 dan 2.13.

Tabel 2. 12. Tegangan Ijin Struktur Baja (kgf/cm²)

Kind of stress	SS 41, SM 41, SMA 41	SM 50	SM 50 Y, SM 53, SMA 50
Axial tensile stress (per net sectional area)	1400	1900	2100
Axial compressive stress (per gross sectional area)	1400	1900	2100
Bending tensile stress (per net sectional area)	1400	1900	2100
Bending compressive stress (per gross sectional area)	1400	1900	2100
Shearing stress (per gross sectional area)	800	1100	1200
Bearing stress (between steel plates)	2100	2800	3100

Sumber: *Technical Standards For Port And Harbour Facilities In Japan*

Tabel 2. 13. Tegangan Ijin Tiang Baja (kgf/cm²)

Kind of stress	SKK 41, SHK 41, SHK 41 M, SKY 41	SKK 51, SHK 50 M, SKY 50
Axial tensile stress (per net sectional area)	1400	1900
Axial compressive stress (per gross sectional area)	$\frac{l}{r} \leq 20 \rightarrow 1400$ $20 < \frac{l}{r} < 93 \rightarrow 1400 - 8.4 \left(\frac{l}{r} - 20 \right)$ $\frac{l}{r} \geq 93 \rightarrow \frac{12000000}{6700 + (l/r)^2}$	$\frac{l}{r} \leq 15 \rightarrow 1900$ $15 < \frac{l}{r} < 80 \rightarrow 1900 - 13 \left(\frac{l}{r} - 15 \right)$ $\frac{l}{r} \geq 80 \rightarrow \frac{12000000}{5000 + (l/r)^2}$
Bending tensile stress (per net sectional area)	1400	1900
Bending compressive stress (per gross sectional area)	1400	1900
Member which receives combined axial and bending stress	1. in case of the axial tensile stress $\sigma_t + \sigma_{bt} \leq \sigma_{ta}$ and $-\sigma_t + \sigma_{bc} \leq \sigma_{ba}$ 2. in case of the axial compressive stress $\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{ba}} \leq 1.0$	
Shearing stress (per gross sectional area)	800	1100

Sumber: *Technical Standards For Port And Harbour Facilities In Japan*

Simbol pada tabel diatas adalah:

l : panjang tekuk efektif tiang (cm)

γ : jari-jari girasi area penampang tiang (cm)

σ_t, σ_c : tegangan tarik oleh gaya tarik aksial dan tegangan tekan oleh bending momen yang bekerja pada penampang (kgf/cm²)

σ_{bt}, σ_{bc} : tegangan tarik maksimum dan tegangan tekan maksimum karena bending momen yang bekerja pada penampang (kgf/cm²)

σ_{ta}, σ_{ca} : tegangan tarik ijin dan tegangan tekan aksial ijin pada sumbu dengan momen inersia terkecil (kgf/cm²)

σ_{ba} : tegangan tekan bending ijin (kgf/cm²)

Secara umum, hampir seluruh fasilitas pelabuhan yang digunakan akan mengalami kondisi korosi yang sangat tinggi. Maka tindakan untuk melawan korosi pada struktur harus dilakukan. Dan nilai tipe rata-rata korosi untuk struktur baja disebutkan dalam tabel dibawah ini. Nilai yang disebutkan adalah rata-rata korosi pada salah satu bagian saja.

Tabel 2. 14. Rata-rata Korosi Baja

Corrosive environment		Corrosion rate (mm/year)
Sea side	Above HWL	0.3
	HWL ~ HWL - 1.0m	0.1 - 0.3
	HWL - 1.0m ~ the sea bottom	0.1 - 0.2
	Below the sea bottom	0.03
Land side	In marine atmosphere	0.1
	In soil (above the residual water level)	0.03
	In soil (below the residual water level)	0.02

Sumber: *Technical Standards For Port And Harbour Facilities In Japan*

Terdapat beberapa metode pencegahan korosi pada baja, tetapi dalam pemilihan metode terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan. Diantaranya adalah kondisi lingkungan, umur struktur berdasarkan metode pencegahan korosi, kemudahan pekerjaan, ekonomis, dan lain sebagainya.

Metode pencegahan korosi diantaranya adalah:

1. *painting and lining method*, untuk bagian struktur diatas zona pasang
2. *cathodic protection method*, untuk bagian struktur dalam air laut atau dibawah lantai laut.

2.5.2 Beton

Durability

Ketahanan (durability) suatu struktur beton untuk fasilitas pelabuhan harus diperhatikan, dikarenakan adanya fenomena laut atau kondisi meteorologi, dan ketahanan yang diperlukan harus dipastikan dengan metode yang sesuai. Terutama, area yang mengalami abrasi dan memberi pengaruh yang kuat harus dilindungi dengan material yang tepat di permukaannya atau perhitungan lainnya

sebaiknya dilakukan, seperti meningkatkan luas penampang tiang atau ketebalan selimut beton pada beton bertulang.

Kerusakan pada struktur pelabuhan terkadang dimulai dari sambungan konstruksi pada struktur beton. Oleh sebab itu, jika dimungkinkan sambungan sebaiknya dihindarkan.

Ketebalan selimut beton yang menyelimuti tulangan baja sebaiknya lebih besar dari nilai pada tabel 2.15.

Tabel 2. 15. Nilai Standar Selimut untuk Tulangan Baja

Portion directly washed by sea water and portion subjected to severe sea breeze	7 cm
Portions other than the above	5 cm

Sumber: Technical Standards For Port And Harbour Facilities In Japan

Terdapat beberapa material pelindung permukaan beton seperti kayu, material batuan yang baik, baja, dan lain sebagainya. Baru-baru ini, lapisan permukaan menggunakan material bermolekul tinggi dan beton diisi polymer telah dikembangkan.

Ketika kerusakan akibat garam sangat kuat, maka ketebalan selimut beton harus ditingkatkan, atau pelindungan permukaan atau pengecatan tulangan dapat dilakukan. Tulangan baja yang dicat epoxy telah dikembangkan.

Tipe struktur sangat berhubungan dengan terjadinya kerusakan akibat garam. Dengan memperhatikan batang-batang struktur, balok, dan pelat lantai cenderung lebih mungkin mengalami kerusakan akibat garam daripada kolom dan dinding. Selain itu, klorida, oksigen dan air, sebagai penyebab kerusakan akibat garam, merusak beton melalui permukaan beton itu sendiri, jadi permukaan sebaiknya sekecil mungkin jika dimungkinkan. Misalnya, penggunaan balok tipe box dan pelat lebih baik menggunakan balok tipe T atau I. Tipe-tipe struktur yang mudah untuk dilakukan perbaikan, penulangan atau penempatan, jika struktur mulai rusak, lebih diharapkan.

Material

Material yang harus dipilih untuk membuat beton harus sesuai dengan kekuatan yang diinginkan dan ketahanan yang diperoleh dengan harga yang ekonomis.

Diantara berbagai macam semen, yang memiliki ketahanan air laut yang tinggi adalah *moderate-heat portland cement*, *blast furnace slag cement* yang memiliki kandungan *slag* yang tinggi, dan *fly-ash cement*. Untuk ketahanan air laut yang tinggi, macam-macam semen tersebut memiliki beberapa keuntungan seperti meningkatkan umur kekuatan lebih lama dan panas hidrasi yang lebih sedikit; namun sebaliknya, semen tersebut memiliki kekuatan yang lebih rendah. Jadi, proses *curing* pada semen tersebut harus dilakukan dengan baik.

Utamanya, hasil dari anti korosi pada tulangan baja dalam beton dibuat oleh *blast furnace slag cement* kelas B sangat baik, dan oleh sebab itu beton ini sebaiknya digunakan. Dalam kasus ini, hasil anti korosi yang sangat baik hanya dapat diperoleh dari proses *curing* yang sempurna.

Penggunaan air laut sebagai bahan campuran beton harus dihindarkan jika dimungkinkan. Namun demikian, jika air tawar yang bersih tidak mudah diperoleh, air laut dapat digunakan untuk beton sederhana. Jika air laut digunakan, waktu pengerasan semen lebih singkat, dan konsistensi beton cenderung hilang pada tingkat lebih awal. Hal ini membutuhkan perhatian yang lebih.

Ketika menggunakan *admixture* untuk tujuan meningkatkan properti beton, *admixture* sebaiknya secara hati-hati diperiksa untuk memastikan bahwa *admixture* yang digunakan tidak memberikan efek yang negatif. Efek *admixture* terkadang tergantung pada kualitas semen, pasir dan kerikil sebagai kualitas beton. Oleh karena itu, *admixture* harus benar-benar disurvei berdasarkan hasil dari penggunaan *admixture* tersebut sebelumnya dan penghargaan yang diperoleh dan telah diuji dengan material konstruksi untuk memperjelas efek yang akan terjadi. Beberapa jenis *admixture* yang dapat digunakan adalah:

1. *fly-ash, fine particles of blast furnace slag and silica fumes*

ketahanan beton dapat ditinggikan dengan menggunakan jenis *admixture* ini yang berkualitas baik dengan jumlah yang tepat.

2. *AE agents and water reducing admixture*

ketahanan beton dapat ditinggikan dengan menggunakan jenis *admixture* ini dengan tepat.

3. *expansion agents*

dengan penggunaan *expansion agents* dan *curing* yang tepat, retak permulaan dapat dicegah, dengan meningkatnya ketahanan beton.

Dalam penggunaan agregat kasar untuk campuran beton harus berkualitas baik dan keras. Batuan yang mudah pecah, agregat dengan kekuatan rendah, penyerapan air yang tinggi atau *swelling* tidak tepat untuk digunakan. Dan penggunaan pasir laut harus dihindarkan jika dimungkinkan.

Jika klorida terdapat dalam material beton, korosi tulangan baja atau penurunan kualitas beton itu sendiri akan terjadi, jadi, total jumlah klorida yang terdapat dalam beton harus dikontrol sesuai dengan standar yang ada. Pengontrolan nilai jumlah klorida pada beton segar dijelaskan dibawah ini:

- jumlah klorida yang diijinkan untuk beton bertulang, beton *prestressed* tipe *post-tension* (kecuali *grout in sheath*) dan beton biasa yang mempunyai baja tambahan adalah 0.6 kg/m^3 (berat Cl).
- jumlah klorida yang diijinkan pada beton *prestressed* tipe *post-tension*, *grout in sheath* dan produk yang di-*curing* dengan *autoclave* adalah 0.3 kg/m^3 (berat Cl).
- Jika semen *alumina* digunakan atau arus yang menyimpang akan terjadi, jumlah klorida yang diijinkan harus ditentukan secara tepat dari hasil tes atau, jika tidak ada data, adalah 0.3 kg/m^3 (berat Cl).

Pada kasus struktur beton di pelabuhan, nilai-nilai ini harus melebihi kondisi tulangan di beberapa tahun bahkan jika selimut beton sudah cukup tebal.

Membatasi reaksi agregat alkali, salah satu empat pengukuran dibawah ini harus diambil sebagai aturan:

- Penggunaan agregat, harus diakui aman
- Gunakan tipe semen dengan alkali rendah
- Gunakan semen campuran yang memiliki *reaction-restricting effect*
- Batasi jumlah alkali dalam beton

Jumlah total alkali dikonversi menjadi Na_2O yang dikandung dalam 1m^3 beton harus kurang dari 3.0 kg.

Kualitas Beton

Kualitas beton harus ditentukan berdasarkan tegangan yang didesain, ketahanan dan kemudahan pengerjaannya sesuai untuk penempatan, tipe struktur dan kondisi lingkungan. Pada umumnya, beton *ready-mix* lebih dianjurkan.

Rasio air-semen harus ditentukan dengan mengambil kekuatan desain dan ketahanan betonnya dalam perhitungan. Ukuran maksimum agregat kasar diusahakan sebesar dengan *range* ukuran yang diijinkan oleh spesifikasi standar.

Konsistensi beton yang ditunjukkan dengan slump sebaiknya memiliki kekakuan yang tepat untuk penempatan. Adanya kandungan udara dalam beton juga dianjurkan, dan standar kandungan udara sebaiknya sebesar 4%.

Beton Dibawah Air

Penempatan beton dibawah air harus didesain berdasarkan Spesifikasi Standar untuk Beton Bertulang dan Biasa, dan Spesifikasi Umum untuk Pekerjaan Pelabuhan dan Dermaga.

Struktur utama sebaiknya dibangun dengan salah satu dari *prepacked concrete*, *tremy concrete*, atau *pumped concrete*. Selain itu, beton harus memiliki ketahanan dan kekuatan yang sesuai. Dan sambungan konstruksi sebaiknya dihindarkan. Ketebalan selimut beton harus 10 cm atau lebih pada beton yang ditempatkan dalam air.

Berdasarkan SNI *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, beton yang akan mengalami pengaruh lingkungan yang khusus harus memenuhi rasio air-semen dan persyaratan kuat tekan beton sesuai pada tabel 2.16.

Tabel 2. 16. Persyaratan Untuk Pengaruh Lingkungan Khusus

Kondisi lingkungan	Rasio air-semen maksimum	F_c' minimum (Mpa)
Beton dengan permeabilitas rendah dan terkena pengaruh lingkungan air	0.5	28
Untuk perlindungan tulangan terhadap korosi pada beton yang terpengaruh lingkungan yang mengandung klorida dari garam atau air laut	0.4	35

Sumber: RSNi Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung

Perawatan Beton

Pekerjaan pemeliharaan seperti inspeksi situasi memburuk harus dilakukan untuk beton agar dapat menjaga fungsi struktur berdasarkan umur layannya. Banyak struktur beton di pelabuhan telah mendapatkan pemeliharaan. Pada faktanya, banyak *breakwaters* dan dermaga yang dibangun antara 1910 – 1930 dapat menjaga fungsi aslinya dengan baik hingga saat ini. Bagaimanapun, fungsi beberapa struktur telah menurun dari tahun ke tahun terhadap penyebaran kualitas beton dan tebal selimut beton atau kerusakan akibat garam. Hal ini juga tidak dapat dihindarkan pada struktur beton.

Pekerjaan pemeliharaan termasuk inspeksi untuk mengukur tingkat kerusakan struktur, deteksi penyebab kelainan berdasarkan hasil inspeksi, penentuan berhenti/ terusnya tingkat layan, pemutusan untuk perbaikan atau penulangan, dan pelaksanaan pekerjaan perbaikan/penulangan. Untuk tujuan ini, mengukur kondisi struktur sebenarnya secara rutin sangat penting, dan hal ini mengharuskan pengaturan dan akumulasi data seperti dokumen desain dan data inspeksi. Lebih dari itu, kehati-hatian sangat penting dari tingkat desain untuk membangun struktur beton yang hanya membutuhkan pemeliharaan yang mudah.

Penjelasan diatas adalah mengenai material beton dan baja yang biasa digunakan pada tiang pondasi. Tabel 2.17 adalah perbandingan antara tiang pancang baja dan beton.

Tabel 2. 17. Perbandingan Antara Tiang Pancang Baja dan Beton

Aspek	Tiang pancang baja	Tiang pancang beton
Bahan	Biaya tinggi	Biaya rendah
Pengawasan dan perawatan	Memerlukan pengawasan dan sertifikasi mutu pekerjaan yang sederhana; pembersihan dan kemungkinan sandblasting di tempat	Memerlukan pengecekan lapangan dan pekerjaan yang teliti
Penganganan	Mudah dibawa dan kokoh	Berat dan harus dibawa dan hati-hati
Pemancangan	Bertahan dalam pemancangan yang berat	Pemancangan harus hati-hati dan resiko pecah
Penambahan/ penyambungan	Siap ditambah dengan mengelas	Penambahan menghabiskan waktu atau perlu sambungan konstruksi yang sulit
Pemeliharaan	Bisa kena korosi dan memerlukan pengecatan, ketebelan tembok ekstra atau perlindungan dengan katoda	Sedikit perawatan bila buaatannya sempurna dan tidak rusak

2.6 DAYA DUKUNG TIANG

2.6.1 Klasifikasi Tanah

Pada setiap bangunan selalu dihadapkan pada masalah pondasi dan stabilitas yang erat kaitannya dengan masalah karakteristik, klasifikasi dan daya dukung tanah. Karakteristik dan struktur tanah sebagai pendukung bangunan secara keseluruhan banyak ditentukan oleh kekuatan tanah tersebut dan diukur sebagai tekanan tanah yang diijinkan. Kapasitas daya dukung ultimate (ultimate bearing capacity) adalah nilai intensitas pembebanan netto pada saat tanah mengalami pergeseran (defleksi), disebabkan gaya geser yang terjadi sebagai akibat kekuatan tekan tanah maksimal. Untuk jenis-jenis tanah untuk pendukung bangunan dapat diklasifikasikan seperti pada tabel 2.18.

Tabel 2. 18. Klasifikasi Ukuran Butiran Tanah

	1 μ	5 μ	74 μ	0.42 mm	2 mm	5 mm	20 mm	75 mm	30 cm	
	colloid	clay	silt	fine sand	coarse sand	fine gravel	medium gravel	coarse gravel		
				sand		gravel				
	soil material								cobble	boulder
									rock material	

Sumber: Japanese Unifed Soil Classification System

Properti tanah yang diperlukan untuk analisa daya dukung tanah adalah nilai kohesi (c), sudut geser (ϕ), dan berat jenis (γ). Nilai-nilai tersebut umumnya diperoleh berdasarkan hasil pengujian tanah di laboratorium. Akan tetapi, untuk properti sudut geser (ϕ) dan c_u dimana pengujian sampel tanah tidak dilakukan hingga kedalaman yang ditinjau. Maka dari itu, nilai ϕ ditentukan dengan pendekatan terhadap hasil pengujian tanah pada proyek yang karakteristik tanahnya menyerupai kondisi eksisting, yaitu pada proyek Reklamasi Ancol Timur, Jakarta Utara. Sedangkan untuk parameter nilai c_u ditentukan berdasarkan tabel 2.19.

Tabel 2. 19. Nilai Tipikal Untuk Tahanan Geser

Undrained Shear Strength	Su (kPa)	
Hard soil	Su > 150 kPa	
Stiff soil	Su = 75 - 150 kPa	
Firm soil	Su = 40 - 75 kPa	
Soft soil	Su = 20 - 40 kPa	
Very soft soil	Su < 20 kPa	
Drained Shear Strength	c' (kPa)	Φ' (deg)
Compact sands	0	35° - 45°
Loose sands	0	30° - 35°
Unweathered overconsolidated clay		
critical state	0	18° - 25°
peak state	10 - 25 kPa	20° - 28°
residual	0 - 5 kPa	8° - 15°

Sumber: <http://www.uwe.ac.uk/geocal/> ; <http://fbe.uwe.ac.uk/> (Based on part of the *GeotechniCAL reference package* by Prof. John Atkinson, City University, London)

Tabel 2. 20. Nilai Tipikal Untuk Tahanan Geser Berdasarkan N-SPT

SPT	CPT	Pressuremeter Test		Consistency	Undrained Shear Strength
n30	qs	pl	E^M		kN/m2
	MN/m2	MN/m2			
<2	<0.25	<0.15	1.5	very soft	20
2 to 4	0.25 to 0.5	0.15 to 0.35	1.5 to 5.25	soft	20 ton 40
				soft to firm	40 to 50
4 to 8	0.5 to 1	0.35 to 0.55	5.25 to 8.25	firm	50 to 75
				firm to stiff	75 to 100
8 to 15	1 to 2	0.55 to 1	8.25 to 20	stiff	100 to 150
15 to 30	2 to 4	1 to 2	20 to 40	very stiff	150 to 200
> 30	> 4	> 2	> 40	hard	> 200

*SPT values are not normally used for evaluating clay layers. NOTE: 1MN/m2 = 10 bar

Sumber: installation of steel sheet pile, by TESPA (Technical European Sheet Piling Association)

2.6.2 Daya Dukung Ijin Aksial Tiang

Beban vertikal yang terjadi pada tiang tidak boleh melebihi daya dukung ijin aksial tiang tersebut. Persamaan untuk mengecek daya dukung ijin aksial tiang adalah sebagai berikut:

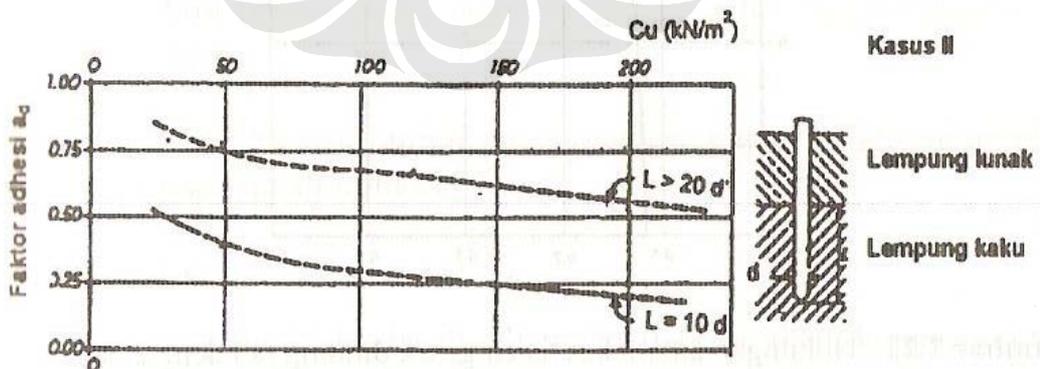
$$Q_u = Q_f + Q_b - W_p$$

$$Q_a = \frac{Q_u}{SF} \quad \dots\dots\dots 2.25$$

Untuk tahanan friksi pada tanah kohesif:

$$c_a = \alpha \times c_u \rightarrow \alpha \text{ berdasarkan grafik Tomlinson}$$

$$Q_f = c_a \times A_s$$



Gambar 2. 16 adhesion factor (α) (Tomlinson)

Untuk tahanan friksi pada tanah non-kohefif:

$$Q_f = (\bar{\sigma}_v \times K_s \times \tan \phi_a) A_s \rightarrow \phi_a \text{ dan } K_s \text{ berdasarkan tabel Broms}$$

Tabel 2. 21. Nilai K_s Dan ϕ_a Untuk Jenis-Jenis Tiang (Broms)

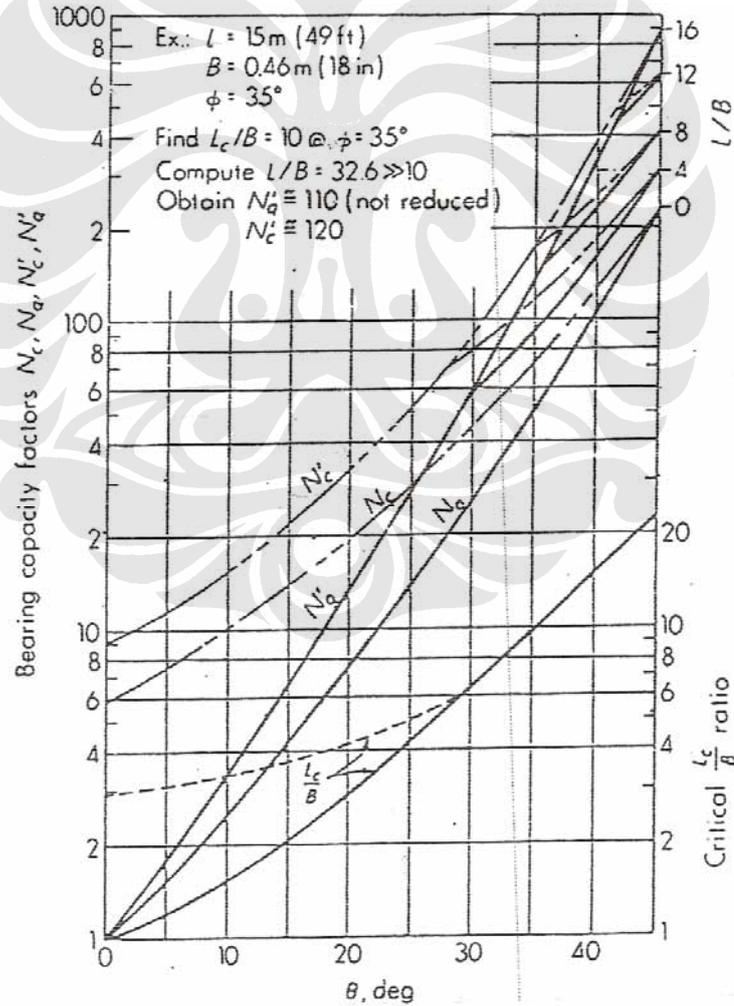
Pile Type	ϕ_a'	Ks value	
		Low Dr	High Dr
Steel	20	0.5	1
Concrete	$3/4\phi$	1	2
Wood	$2/3\phi$	1.5	4

Untuk tahanan ujung:

$$f_b = cN_c + \sigma_v N_q$$

$$Q_b = f_b \times A$$

2. 26



Gambar 2. 17 Bearing Capacity Factors N_c, N_q (Meyerhof)

Untuk berat tiang:

$$W_p = A \times l \times \gamma_{\text{beton}} \dots\dots\dots 2.27$$

Dimana : Q_u = daya dukung ultimat (kN)

Q_a = daya dukung ijin (kN)

A_s = luas selimut tiang (m^2)

A = luas penampang tiang (m^2)

l = panjang tiang (m)

c_u = undrained shear strength (kN/ m^2)

σ_v = tegangan vertikal efektif (kN/ m^2)

SF = faktor keamanan (=3)

2.6.3 Daya Dukung Ijin Lateral Tiang

Kapasitas tiang beban lateral dibatasi oleh 3 hal yaitu:

- Kapasitas geser pada tanah
- Kapasitas struktur dari tiang yang meliputi gaya geser dan momen lentur
- Deformasi pada tiang

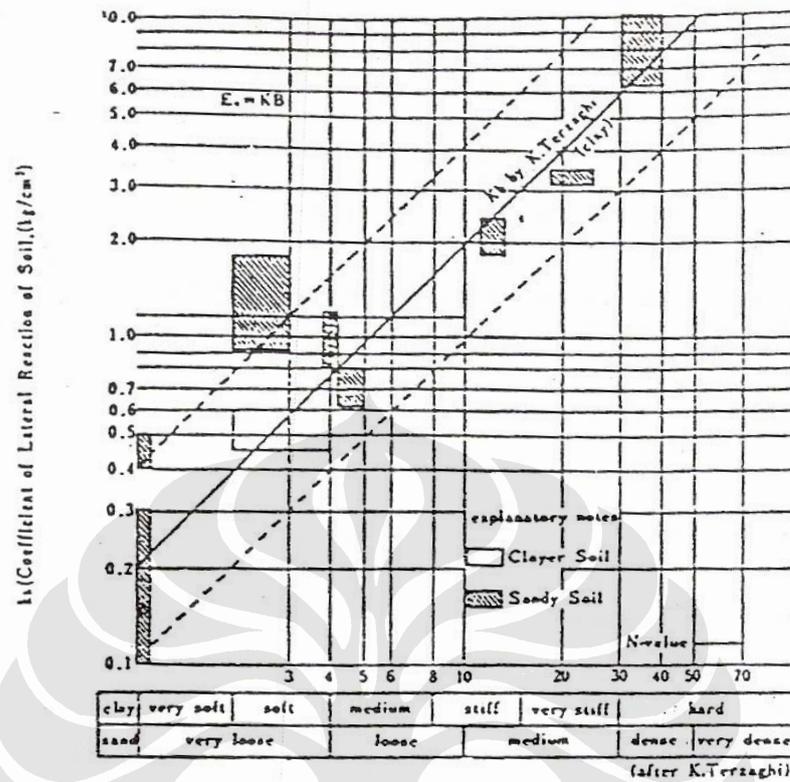
Untuk mengetahui daya dukung lateral tiang, maka dilakukan dengan pendekatan subgrade reaction. Pemodelan subgrade reaction dari perilaku tanah, menganggap tanah sebagai rangkaian spring (pegas) linier-elastis yang tidak saling berhubungan satu dengan yang lain, atau disebut juga sebagai winkler spring model. Nilai modulus subgrade reaction (k_h), dapat ditentukan berdasarkan hasil pengujian N-SPT dilapangan. Dengan mengetahui nilai k_h , maka dapat ditentukan kekakuan pegas (k_s) dengan persamaan:

$$k_s = k_h \times A \dots\dots\dots 2.28$$

Dimana : k_s = kekakuan pegas (kN/m)

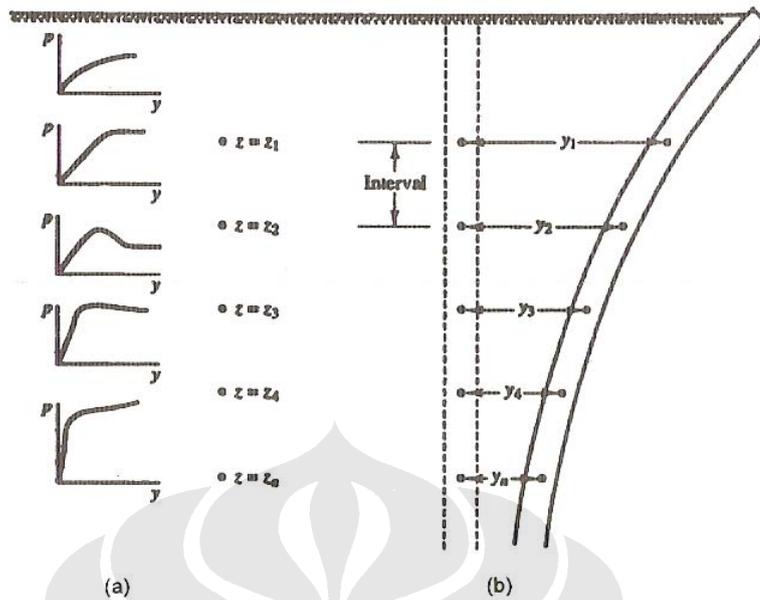
k_h = modulus subgrade reaction (kN/m^3)

A = luas permukaan tiang yang terkena tanah (m^2)



Gambar 2. 18 Nilai k_h Berdasarkan Yokohama (Sumber: Steel Sheet Piling Design Manual)

Untuk analisa daya dukung lateral tiang dimana hubungan antara tekanan tanah dan defleksi adalah nonlinier, pendekatan yang dapat digunakan adalah kurva P-y (Matlock & Reese). Penyelesaian nonlinier ini memerlukan kurva P-y untuk berbagai kedalaman disepanjang tiang.



Gambar 2. 19 Konsep Kurva P-y pada Kedalaman Bervariasi (Matlock)

Adapun kurva P-y untuk jenis tanah clay(kohesif) dapat ditentukan sebagai berikut:

- Tahanan tanah ultimat, P_u pada tiap kedalaman ditentukan dengan:

$$P_u = (3 + \gamma z / c_u + 0.5z / d) c_u \cdot d$$

atau **2. 29**

$$P_u = 9 \cdot c_u \cdot d$$

- Defleksi, y_{50} , pada saat tekanan tanah ultimit mencapai kondisi setengah ditentukan dengan:

$$y_{50} = 2,5 \varepsilon_{50} d \rightarrow \varepsilon_{50} \text{ untuk soft clay} = 0,02$$

$$\varepsilon_{50} \text{ untuk stiff clay} = 0,005$$

- Hubungan P-y dapat dihitung berdasarkan persamaan dibawah ini:

$$P / P_u = 0,5 (y / y_{50})^{1/3} \dots\dots\dots \mathbf{2. 30}$$

Nilai P akan cenderung konstan jika $y = 8 \cdot y_{50}$.

Dimana: P_u = tekanan ultimit tiang (kN/m)

y = defleksi pada tanah (m)

d = diameter atau tebal tiang (m)

C_u = undrained shear strength pada kedalaman z (kN/m^2)

ϵ_{50} = regangan pada saat tegangan utama mencapai setengah bagian

2.7 ANALISIS STRUKTUR *BERTHING DOLPHIN*

Dalam perancangan tiang pondasi untuk dermaga, terdapat dua aspek penting yang perlu diperhitungkan dalam perancangan, yaitu aspek geoteknikal dan struktural. Dalam perhitungan berdasarkan aspek geoteknikal telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya. Sedangkan perhitungan berdasarkan aspek struktural akan dilakukan dengan menggunakan program SAP2000. Program ini digunakan untuk analisis struktur *berthing* dan mendesain struktur tiang.

Secara umum, analisis struktur adalah proses untuk mengetahui gaya dalam pada model struktur yang dikenai gaya luar tertentu (dapat berupa beban tetap/semesta, momen, displacement, perubahan suhu dan lain-lain). Semua gaya luar yang bekerja pada struktur dimodelkan dan dianalisis untuk mengetahui gaya dalam berupa momen (lentur, puntir), gaya lintang, gaya normal dan lain-lain (retakan, tekuk, dan sebagainya). Beberapa pendekatan dalam analisis model struktur untuk mengetahui perilaku terhadap pemberian beban, dikategorikan sebagai berikut:

- **Linier – Elastik**

Kata elastik menunjukkan bahwa suatu struktur akan berdeformasi jika diberi suatu pembebanan, dan akan kembali ke posisi awal jika pembebanan tersebut dihilangkan. Sedangkan linier menunjukkan hubungan antara beban dan deformasi bersifat linier/proporsional. Ciri-ciri penyelesaian linier-elastik adalah hasil penyelesaian dapat dilakukan superposisi antara satu dengan yang lain. Contoh *Slope Deflection*, *Cross*, dan Metode Matrik Kekakuan.

- **Non – Linier**

Analisa ini adalah lawan dari analisa linier-elastik, yaitu perilaku hubungan deformasi dan beban tidak proporsional. Deformasi pada suatu kondisi beban tidak bisa digunakan memprediksi deformasi pada kondisi beban lain hanya dengan mengetahui ratio beban-beban tersebut. Kondisi yang menyebabkan struktur dapat berperilaku non-linier dapat dikategorikan sebagai berikut:

- Non-linier geometri: P- Δ efek, *large deformation analysis*

- Non-linier material: plastik, yield
- Non-linier tumpuan: gap (*contact problem*)

Analisa non-linier pada umumnya tidak untuk mencari kuantitas gaya-gaya internal atau lendutan yang terjadi, tetapi lebih diutamakan untuk mengetahui perilaku struktur terhadap pembebanan yang menyebabkan batas-batas dari persyaratan elastik-linier tidak terpenuhi. Misal perilaku keruntuhan struktur terhadap beban gempa, apakah bersifat daktail atau getas, dan sebagainya.

Ciri penyelesaian non-linier umumnya memakai iterasi dan hasilnya spesifik, tidak dapat disuperposisikan antara hasil satu dengan hasil yang lainnya. Dan untuk penyelesaian dengan pendekatan non-linier ini tidak semua software dapat menyelesaikannya. Dan untuk program SAP2000 hanya tahap P- Δ saja.

Dalam penelitian ini, karena daya dukung tanah terhadap tiang pondasi tidak seragam, maka tanah akan dianggap sebagai *spring support* (tumpuan elastis). Dan daya dukung tanah ini dapat dianalisa dengan pendekatan linier maupun non-linier.

Pada penelitian ini, modelisasi struktur akan dilakukan berdasarkan analisis linier dan non-linier. Untuk analisis linier, pegas akan memberikan perilaku sebagai pegas linier. Sehingga sebarang gaya luar yang akan diberikan, pegas akan tetap bekerja (pegas bersifat elastis) dan gaya reaksi pegas juga makin besar. Dan pendekatan non-linier juga akan dilakukan, dimana pendekatan ini merupakan pendekatan yang paling sesuai dengan kondisi real, karena deformasi tanah yang terjadi akibat pembebanan mempunyai batas tertentu, walaupun pembebanan terus bertambah. Sehingga jika gaya luar yang diberikan sudah terlalu besar dan pegas tidak dapat menahan lagi, maka pegas akan bersifat plastis.

Desain struktur adalah proses yang dilakukan sebagai tindak lanjut dari proses analisis struktur. Gaya dalam yang ada harus mampu ditahan oleh elemen struktur yang direncanakan. Proses desain struktur dipengaruhi oleh jenis dan kualitas material (baik baja, beton, atau material yang lain) dan dimensi/penampang material. Semakin besar gaya dalam yang timbul, pada umumnya membutuhkan kualitas material yang lebih baik dan

dimensi/penampang yang lebih besar. Dengan kata lain, kualitas dan dimensi material berbanding lurus dengan gaya dalam yang timbul.

Hasil desain struktur dalam struktur beton adalah kebutuhan tulangan lentur, tulangan geser dan tulangan puntir. Sedangkan hasil desain struktur baja adalah penampang profil beserta pengakunya.

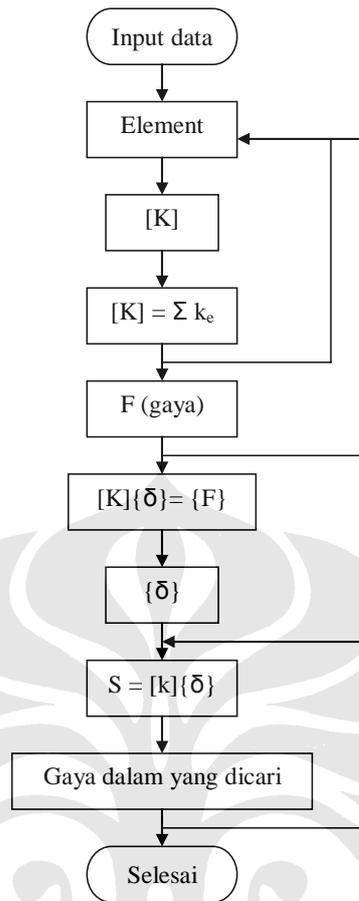
Secara umum, proses analisis melalui tahapan berikut:

1. rencana dan penggambaran model struktur
2. penentuan beban yang bekerja sesuai dengan model rencana. (Jumlah beban dan nilai beban yang timbul tergantung dari model yang direncanakan).
3. dimensi penampang rencana (dimensi ini menentukan kekakuan sistem struktur dan juga sangat tergantung dari model yang direncanakan).
4. analisis struktur atau analisis mekanika teknik (hasil analisis ini dipengaruhi oleh model, pembebanan (gaya luar) dan rencana penampang).
5. gambar gaya dalam (bidang momen, gaya lintang, gaya normal dan momen puntir) yang bekerja.

Setelah mendapatkan gaya dalam yang bekerja, dapat dilakukan proses desain struktur dengan mempertimbangkan faktor-faktor berikut:

1. mutu/kualitas material yang digunakan.
2. kombinasi beban rencana (tetap/rencana) yang paling kritis (berdasarkan analisis mekanika teknik dan peraturan kombinasi beban yang digunakan).
3. faktor reduksi kekuatan sesuai dengan peraturan yang digunakan.

Seperti program-program komputer lainnya, dalam program SAP2000 untuk menghasilkan output data seperti deformasi struktur dan gaya dalam, diperlukan proses data di dalam program tersebut.



Gambar 2. 20 Diagram Alir Proses Pengolahan Data Pada Program SAP2000

Dibawah ini adalah penjelasan mengenai formulasi data dalam program SAP2000.

2.7.1 Metode Matrik Kekakuan

Dasar teori penyelesaian statik yang digunakan program SAP2000 adalah metode matrik kekakuan, dimana suatu persamaan keseimbangan struktur dapat ditulis dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$[K]\{\delta\} = \{F\}, \dots\dots\dots 2. 31$$

Notasi:

[K] adalah matrik kekakuan yang dalam pembahasan sebelumnya dapat disebut sebagai 'unit pendekatan' yang merupakan formulasi matematik yang merupakan representasi perilaku mekanik element yang ditinjau.

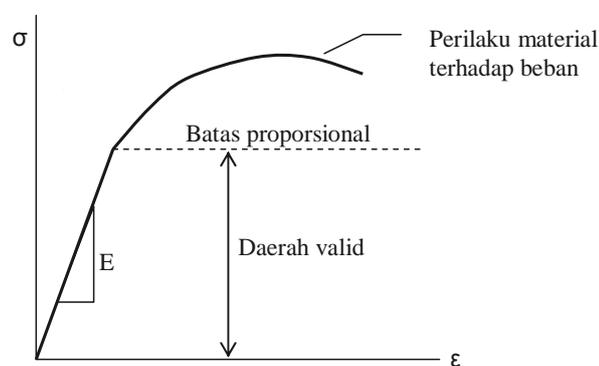
$\{\delta\}$ adalah vektor perpindahan atau deformasi (translasi atau rotasi) struktur.

$\{F\}$ adalah vektor gaya/momen yang dapat berbentuk beban pada titik nodal bebas atau gaya reaksi tumpuan pada titik nodal yang di-*restraint*.

Formulasi persamaan keseimbangan di atas memperlihatkan bahwa besarnya deformasi berbanding lurus dengan gaya yang diberikan, dimana matrik $[K]$ adalah besarnya gaya yang diperlukan untuk menghasilkan perpindahan deformasi sebesar satu satuan.

Jika isi matrik $[K]$ konstan dalam keseluruhan analisis, maka kondisi tersebut menunjukkan bahwa jenis analisa struktur yang digunakan adalah elastik linier sehingga perlu diingat batasan-batasan sebagai berikut:

- Geometri struktur sebelum dan sesudah dibebani dianggap tidak mengalami perubahan. Oleh karena itu, perlu diperiksa apakah deformasi pada salah satu nodal bebas sesudah program dijalankan besarnya relatif kecil dibanding geometri secara keseluruhan. Misalnya untuk *simpel-beam*, lendutan di tengah bentang harus $\ll L/360$.
- Hubungan tegangan-regangan material struktur yang diwakili konstanta Modulus Elastisitas harus mengikuti hukum Hooke, yaitu elastik linier. Oleh karena itu, perlu dicek apakah gaya-gaya internal batang-batang yang terjadi dari proses perhitungan menghasilkan tegangan pada penampang yang masih pada batas proporsionalnya atau tidak. Tentunya kalau sudah melewati tegangan leleh (misalnya pada material baja), maka kondisi tersebut menunjukka bahwa hasil analisis yang ada tidak valid lagi.

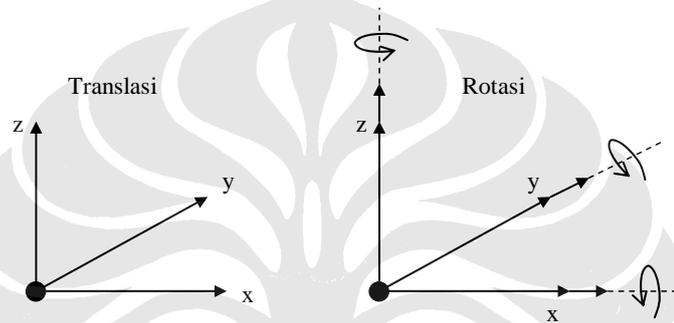


Gambar 2. 21 Pengaruh Tegangan Material Terhadap Hasil Analisis

2.7.2 Degree Of Freedom

Joint atau *nodal* mempunyai peran sangat penting pada pemodelan analisis struktur. *Nodal* merupakan titik di mana elemen-elemen batang bertemu dan terhubung (menyatu) sehingga mempunyai bentuk yang bermakna, yaitu geometri struktur itu sendiri. Selain itu, juga digunakan sebagai lokasi untuk mengetahui besarnya deformasi yang terjadi dari suatu struktur.

Degree of freedom (d.o.f) adalah jumlah derajat kebebasan suatu titik nodal untuk mengalami deformasi yang dapat berupa translasi (perpindahan) maupun rotasi (perputaran) terhadap tiga sumbu pada orientasi ruang 3D.



Gambar 2. 22 Deformasi Pada Nodal

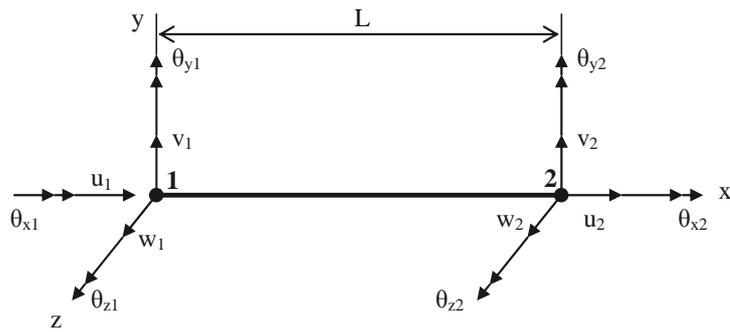
Jadi untuk suatu nodal dapat terjadi 6 bentuk deformasi jika berada pada suatu kondisi ruang bebas, yaitu 3 translasi ($\bar{\delta}_x, \bar{\delta}_y, \bar{\delta}_z$) dan 3 rotasi ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$).

Suatu nodal yang tidak bebas berdeformasi (tertahan) karena diberi *restraint* yang menyebabkan $\theta = 0$ atau/ dan $\bar{\delta} = 0$ disebut tumpuan. Sedangkan nodal yang mempunyai kondisi yang dapat berdeformasi sampai pada batas tertentu, disebut sebagai tumpuan elastis (*spring support*).

2.7.3 Element Frame SAP2000

Element frame pada SAP2000 telah disiapkan untuk memodelkan struktur yang dapat diidealisasikan sebagai rangka (element garis atau element satu dimensi) dalam orientasi ruang/3D.

Formulasi matrik [K] dari element frame mencakup keseluruhan d.o.f. pada nodal-nodal di element, yang diperlihatkan dalam gambar berikut:



Gambar 2. 23 DOF Lengkap Element Frame (Space Frame)

Adapun isi matrik [K] untuk struktur *Space Frame*:

$$[k] = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_1 & 0 & 0 & 0 & Y_2 & 0 & -Y_1 & 0 & 0 & 0 & Y_2 & 0 \\ Z_1 & 0 & -Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_1 & 0 & -Z_2 & 0 & 0 \\ S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -S & 0 & 0 & 0 \\ & & Z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_2 & 0 & Z_4 & 0 & 0 \\ & & & Y_3 & 0 & -Y_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_4 & 0 \\ & & & & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u_1 \\ & & & & & Y_1 & 0 & 0 & 0 & -Y_2 & 0 & v_1 \\ & & & & & & Z_1 & 0 & Z_2 & 0 & 0 & w_1 \\ & & & & & & & S & 0 & 0 & 0 & \theta_{x1} \\ & & & & & & & & Z_3 & 0 & 0 & \theta_{y1} \\ & & & & & & & & & Y_3 & 0 & \theta_{z1} \\ & & & & & & & & & & X & 0 & u_1 \\ & & & & & & & & & & Y_1 & 0 & v_1 \\ & & & & & & & & & & Z_1 & 0 & w_1 \\ & & & & & & & & & & S & 0 & \theta_{x2} \\ & & & & & & & & & & & Z_3 & 0 & \theta_{y2} \\ & & & & & & & & & & & & Y_3 & \theta_{z2} \end{bmatrix} \begin{matrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \theta_{z1} \\ u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ \theta_{z2} \end{matrix}$$

Dimana:

$$X = \frac{AE}{L} \quad S = \frac{GK}{L}$$

$$\phi_y = \frac{12EI_z k_y}{A_z GL^2} \quad Y_1 = \frac{12EI_z}{(1+\phi_y)L^3} \quad Y_2 = \frac{6EI_z}{(1+\phi_y)L^2}$$

$$Y_3 = \frac{(4+\phi_y)EI_z}{(1+\phi_y)L} \quad Y_4 = \frac{(4+\phi_y)EI_z}{(1+\phi_y)L}$$

$$\phi_z = \frac{12EI_z k_z}{A_v GL^2} \quad Z_1 = \frac{12EI_y}{(1+\phi_z)L^3} \quad Z_2 = \frac{6EI_y}{(1+\phi_z)L^2}$$

$$Z_3 = \frac{(4+\phi_z)EI_y}{(1+\phi_z)L} \quad Z_4 = \frac{(4+\phi_z)EI_y}{(1+\phi_z)L}$$

A_v/k_y adalah *luas efektif geser* untuk deformasi geser transversal arah y. Sedangkan A_z/k_z adalah *luas efektif geser* untuk deformasi geser transversal arah z. Dan *luas efektif geser* yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah untuk penampang bulat solid yaitu $0.9\pi r^2$.

Modulus geser, G untuk menghitung deformasi geser dan kekakuan torsi, dengan angka Poisson, ν terkait dengan parameter Modulus Elastisitas, E. Ketiganya membentuk hubungan berikut:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots 2.32$$

K pada formulasi GK/L menunjukkan sifat mekanik penampang terhadap torsi yang disebut konstanta torsi. Sedangkan G adalah modulus geser dan L adalah panjang element. Hanya pada penampang pipa atau solid, seperti tabung silinder, maka konstanta torsi K sama dengan J momen inersia polar penampang terhadap sumbu centroid. Dan rumus K pada kekakuan torsi (GK/L) untuk penampang bulat solid adalah:

$$\frac{1}{2} \pi r^4 \dots\dots\dots 2.33$$

Formulasi konstanta torsi K yang disajikan diambil dari Roark & Young (1989).

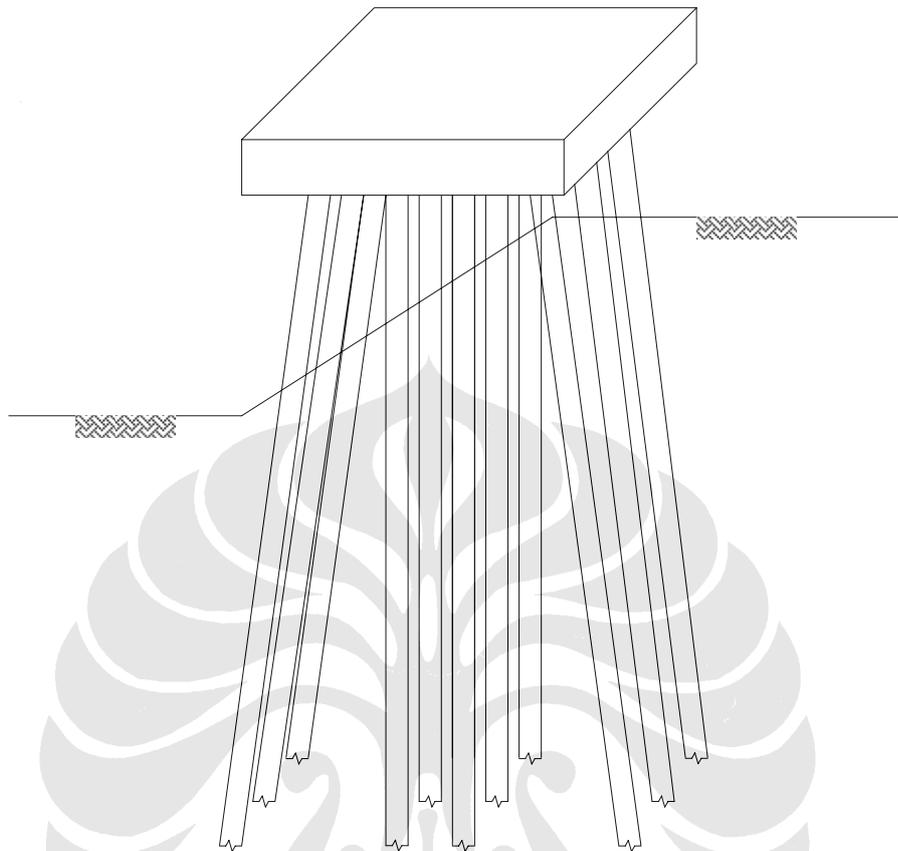
Bentuk-bentuk struktur sebagai hasil penyederhanaan dari struktur *Space Frame* adalah:

- Rangka bidang (*plane truss*)
- Rangka ruang (*space truss*)
- Grid
- Portal bidang (*plane frame*)
- Balok (*beam*)

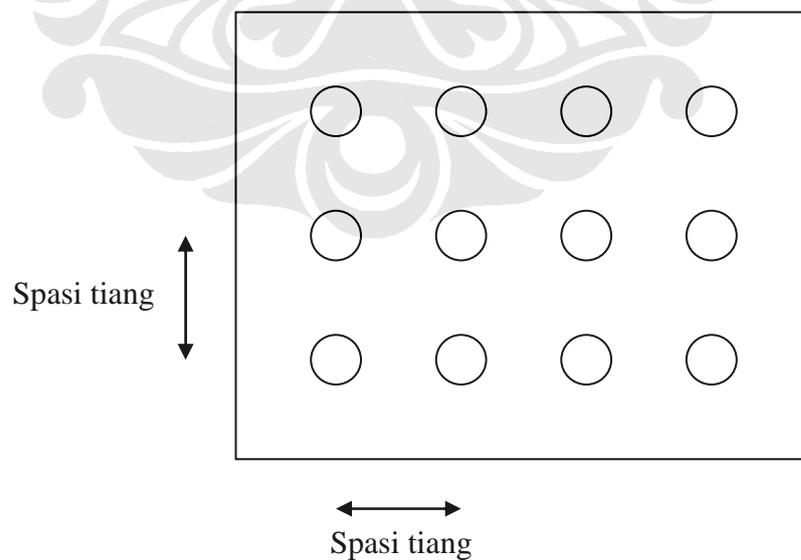
Dalam penelitian mengenai tiang pondasi dermaga ini, formulasi yang akan ditinjau adalah formulasi tiga dimensi (3D).

Dalam perancangan tiang pondasi dermaga pada kasus yang akan dibahas, secara umum tahap-tahap yang dilakukan baik dalam analisis maupun desain pada program SAP2000 sesuai dengan yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada tahap

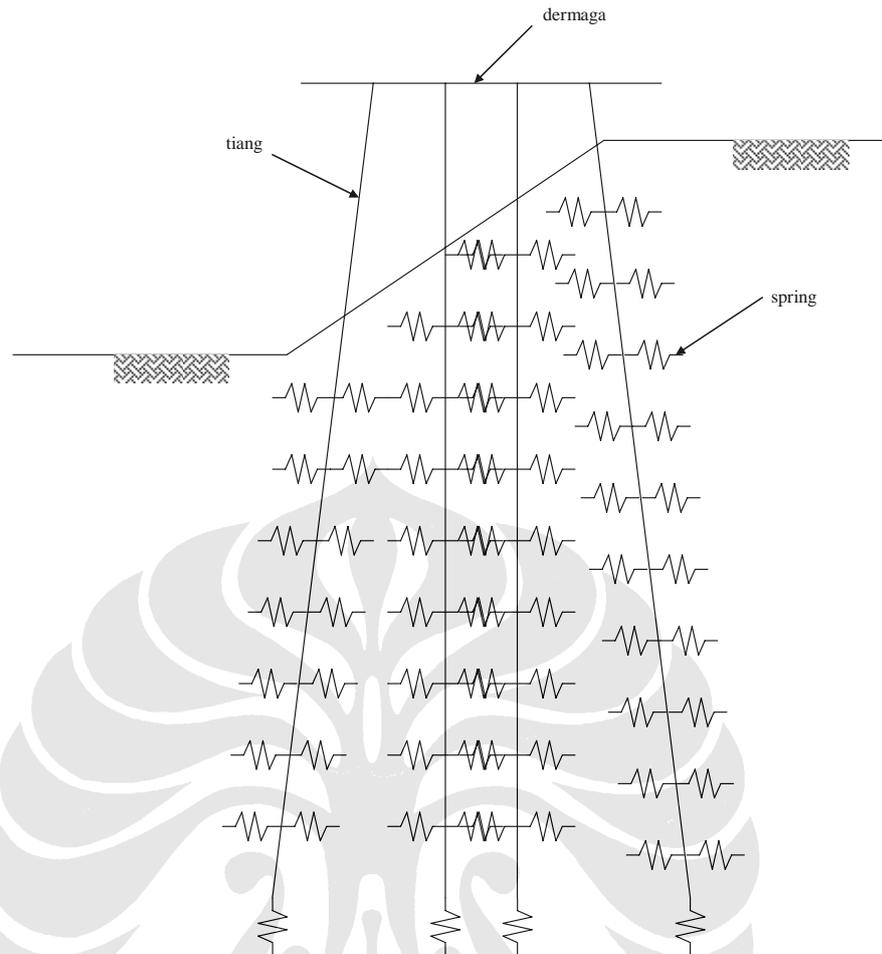
awal untuk melakukan perhitungan dalam program SAP2000 ini, adalah modelisasi struktur seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2. 24 Sketsa Struktur Dermaga



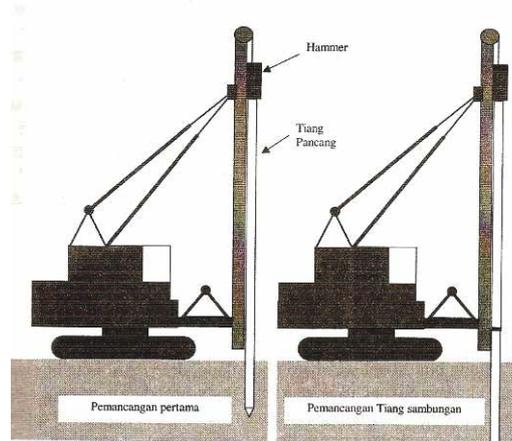
Gambar 2. 25 Posisi Tiang dalam Grup



Gambar 2. 26 Modelisasi Struktur dalam Program SAP2000

2.8 METODE KONSTRUKSI

Metode konstruksi yang digunakan pada struktur tiang dermaga ini merupakan tiang pancang. Jenis material yang digunakan adalah beton bertulang (struktur rigid). Metode pelaksanaannya menyerupai tiang pancang pada konstruksi gedung atau bangunan umumnya, hanya yang berbeda adalah tiang tidak sepenuhnya tertanam dalam tanah, karena permukaan tanah terdapat jauh dibawah muka air. Bila panjang tiang pancang melebihi tinggi alat pancang yang digunakan maka proses pemancangan dapat dibagi menjadi beberapa bagian. Dimana setelah bagian pertama selesai, kemudian disambung dengan bagian kedua.



Gambar 2. 27 Proses Pemancangan dan Sambungan

Metode pelaksanaan pondasi tiang pancang pada dermaga adalah sebagai berikut:

- Pertama, menentukan titik-titik ukur untuk memberikan arahan posisi letak titik pancang. Pengukuran menggunakan theodolit oleh surveyor, kemudian crane diarahkan menuju posisi tersebut. Apabila posisinya sudah tepat maka pemancangan dapat dimulai.
- Karena pemancangan dilakukan dilaut, maka untuk memudahkan pemancangan dibutuhkan alat bantu seperti kapal, ponton, dan crane. Tiang pancang yang terletak di dekat pantai diletakkan pada ponton service menggunakan crane untuk dibawa ke lokasi titik pemancangan. Kemudian tiang diangkat dengan crane dan diletakkan pada alat pemancang.
- Untuk tiang pancang dengan kondisi miring (sudut tertentu) maka dibuat perbandingannya terlebih dahulu dengan menggunakan alat bantu seperti *waterpass*. Apabila sudah tepat maka tiang pancang diturunkan sesuai dengan kemiringannya dan siap untuk dipancang. Pemancangan berhenti jika dirasakan pemukulan sudah mencapai tanah keras. Pada kasus ini kedalaman rata-rata tiang arah vertikal adalah 50 m.
- Kemudian pemancangan terus dilanjutkan dengan memperhatikan urutan pelaksanaan pemancangan. Sebaiknya arah pergerakan ke arah belakang (mundur).

- Selanjutnya tiang pancang yang elevasinya tidak sama dibongkar dengan palu setelah terlebih dahulu diukur elevasinya.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pekerjaan pemancangan antara lain:

- Pemancangan yang dilakukan pada setiap titik sebaiknya dilakukan sampai selesai, hindari pemancangan berhenti di tengah. Karena ketika ditinggal, friksi tanah akan bekerja sehingga tiang akan sulit diturunkan kembali.
- Pemancangan tiang yang jaraknya cukup rapat dapat menimbulkan permasalahan *heaving*, yaitu munculnya kembali tiang yang telah dipancang akibat pengangkatan tanah. Untuk menghindari hal tersebut maka urutan pemancangan harus diperhatikan agar tidak sembarangan.

