

## Analisis Pemilihan Modifikasi Konfigurasi Mooring Leg Pada Fasilitas CALM Buoy 35,000 DWT Dengan Metode Kuasi Statik

Marcus.A.Talahatu dan Reza Ajiputra

Departemen Teknik Mesin Program Studi Teknik Perkapalan  
Universitas Indonesia, Depok,  
email : talahaturutong@yahoo.com, reza.ajiputra@yahoo.com

### Abstrak

*CALM Buoy merupakan salah satu fasilitas offshore yang digunakan untuk keperluan loading dan offloading muatan cair dari kapal tanker ke fasilitas di darat atau sebaliknya. Dalam makalah ini hendak di bahas proses relokasi CALM Buoy 35,000 DWT dari kedalaman 14 m ke kedalaman 22 m. Relokasi CALM buoy memerlukan beberapa perubahan konfigurasi pada bagian mooring legnya, dikarenakan faktor perubahan lingkungan yang ada, dan juga terkait rencana pembelian fasilitas CALM buoy yang baru dimasa depan yang mengharuskan penggunaan mooring leg minimal 6 buah, sehingga letak jangkar atau konfigurasi yang dirancang dapat dipakai lagi di masa depan. Untuk memilih konfigurasi yang sesuai maka ditentukan 3 jenis modifikasi awal yaitu dengan jumlah mooring 4-4, 6-4 dan 8-4, kemudian dihitung besarnya tegangan rantai dan respon gaya pengembali dari setiap konfigurasi. Perhitungan ini dilakukan secara iteratif menggunakan persamaan catenary dengan pendekatan kuasi statik pada arah beban horizontal dan vertikal. Hasil akhir dari makah ini adalah menemukan konfigurasi baru yang sesuai, posisi titik jangkar, tipe jangkar yang dipilih dan arrangement dari rangkaian mooring leg.*

*Kata kunci : Tegangan rantai, gaya pengembali, beban horizontal dan konfigurasi*

### Abstract

*CALM Buoy is one of the offshore structure which is used for loading/unloading liquid cargo to/from oil tanker from/to onshore facilities. This paper will analyze the relocation process of 35,000 DWT from 14 m depth to 22 m depth. The relocation of CALM Buoy needs some configuration changes in its mooring system due to changes of environmental factors and future requirements for minimum 6 legs mooring. So that its anchors and other configuration can be reused. For this purpose three preliminary modifications are proposed, i.e. 4-4, 6-4, and 8-4, each of the configuration is then calculated for their chain tension and restoring forces. Iterative calculation is carried out using catenary equation with quasi static approach on horizontal and vertical load directions. The objective of this analysis is to obtain a new suitable configuration, anchor position and anchor type for the mooring leg arrangement.*

*Key words : Mooring tension, restoring force, horizontal loads and configurations*

### 1. Latar Belakang

Dalam rencana pengoptimalan penggunaan sarana CALM buoy 35,000 DWT pada PT. X dilakukanlah pengkajian terhadap relokasi fasilitas yang ada ke laut yang lebih dalam. Keperluan relokasi ini juga dikaitkan rencana perusahaan untuk mempersiapkan lokasi baru tersebut untuk pembelian dan penempatan fasilitas CALM yang baru di masa depan, ketika yang lama

sudah habis masa pakainya. Ini berarti lokasi yang baru tersebut harus dapat menerima CALM buoy yang baru di masa yang akan datang, yang notabene harus dapat memenuhi regulasi dari OCIMF yang mensyaratkan pemakaian minimum 6 mooring leg pada konstruksi CALM buoy baru. Dengan demikian dengan keadaan CALM buoy saat ini yaitu dengan 6 mooring leg pada kedalaman 14 m, maka akan memiliki konfigurasi yang berbeda di

masa depan. Untuk itu dalam relokasi ini perlu dikaji proses pemindahan yang sesuai agar tidak memerlukan banyak proses perubahan konfigurasi dan modifikasi lain di masa yang akan datang.

Untuk mengetahui itu maka di lakukan analisa terhadap 3 jenis konfigurasi yaitu dengan konfigurasi 4-4, 6-4 maupun 8-4 mooring leg.

**2. Studi Literatur**

**2.1. CALM buoy**

CALM buoy merupakan fasilitas offshore terapung yang berfungsi sebagai sarana tambat kapal sekaligus sarana loading/unloading muatan cair, yang pada umumnya adalah minyak, dari kapal ke darat maupun sebaliknya. CALM buoy biasanya memiliki konfigurasi mooring berjumlah 4 hingga 16 tergantung kapasitas kapal yang tambat (dalam ukuran DWT). CALM buoy memiliki bagian-bagian utama seperti :

1. Turntable
2. Fix body
3. Mooring system
4. Piping system

**2.2. Beban**

CALM buoy didesain untuk dapat mengatasi beban-beban baik yang berasal dari lingkungan maupun dari kapal yang tambat baik dalam kondisi normal maupun badai. Untuk itu di ambil beban lingkungan dengan periode 100 tahun dan periode signifikan

*Beban Angin Pada Buoy*

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{air} \bar{V}^2 C_D A C_H \quad (1)$$

*Beban Arus Pada Buoy*

$$F_C = \frac{1}{2} C_D \rho_{SW} A V_C^2 \quad (2)$$

Keterangan :

- $\bar{V}$  = Kecepatan angin rata-rata
- A = Luas permukaan obyek
- CH = Koefisien ketinggian
- C<sub>D</sub> = Koefisien drag

$V_C$  = Kecepatan arus  
*Beban Gelombang Pada Buoy*

Perhitungan beban gelombang sebelumnya diawali dengan penggolongan jenis gelombang dengan menggunakan teori gelombang linear (Airy), teori cnoidal atau teori stokes dengan orde yang lebih tinggi, bergantung pada ratio  $h/L$ , dan Ursell

$$\text{parameter } (U) = \frac{HL^2}{h^3} \quad (3)$$

Apabila rasio diameter buoy terhadap panjang gelombang ( $d/L$ ) < 0.2 maka berlaku persamaan Morisson.

Kecepatan partikel gelombang

$$U = \frac{HL}{2hT} \cos 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (4)$$

Percepatan partikel Gelombang

$$\dot{U} = \frac{\pi HL}{T^2 h} \sin 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (5)$$

Beban gelombang

$$F_W = F_D + F_i$$

$$F_W = \frac{1}{2} \rho C_D D \int_a^b U|U| + \rho C_M \pi \frac{D^2}{4} \int_a^b \dot{U} dy \quad (6)$$

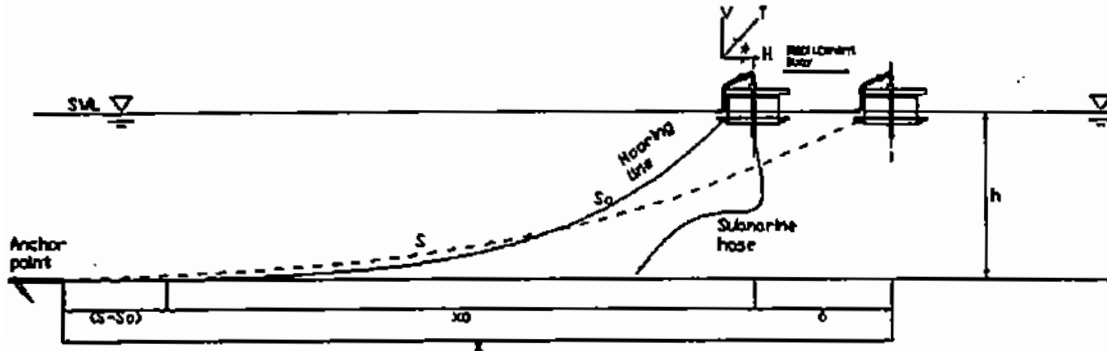
Beban diambil pada fase gelombang tertinggi.

*Beban Angin Pada Kapal Tambat*

$$C_{wx} = a_0 + \sum_{n=1}^5 a_n \cos(n\alpha) \quad (7)$$

Koefisien	Tanker (bangunan atas dibelakang midship)	Tanker (bangunan atas pada midship)
a0	-0.01	-0.074
a1	0.83	1.05
a2	0.031	0.017
a3	0.012	-0.062
a4	0.021	0.08
a5	-0.072	0.11





Gambar 1. Perpindahan Buoy Akibat Pembebanan Dalam Arah Horizontal

$$C_{wy} = \sum_{n=1}^5 b_n \sin(n\alpha) \quad (8)$$

Order	Value	Value
b1	0.718	0.707
b2	0.032	-0.013
b3	0.01	0.028
b4	-0.001	0.007
b5	-0.04	-0.044

1	2	3	4	5
0.908	0.00	-0.118	0.00	-0.033

$$F_{wx} = \frac{1}{2} \rho_{air} V_w A_L (C_{wx}(\alpha)) \quad (9)$$

$$F_{wy} = \frac{1}{2} \rho_{air} V_w A_T (C_{wy}(\alpha)) \quad (10)$$

Beban Arus Pada Kapal Tambat  
Gaya arus dalam arah longitudinal :

$$F_{cx} = C_{cx} \frac{1}{2} \rho_{sw} S V_c^2 \cos\alpha |\cos\alpha| \quad (11)$$

$$C_{cx} = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (12)$$

$$Rn = \frac{V_c L_{pp} \cos\alpha}{\nu} \quad (13)$$

S = luas bidang basah kapal

Gaya arus dalam arah transversal :

$$F_{cy} = \frac{1}{2} \rho_{sw} V_c^2 (C_{cy}(\alpha))$$

Menurut Remery dan Van Oortmersen koefisien  $C_{cy}$  untuk tanker dapat dihitung dengan persamaan :

$$C_{cy} = \sum_{n=1}^5 b_n \sin(n\alpha) \quad (14)$$

Beban Gelombang terhadap tanker

$$F_{MD} = 0.13 C_{MD} B^2 L_{pp} H_s^2 \quad (15)$$

Dimana :

$C_{MD}$  = drift force coefficient (fungsi  $T_s$  dan  $T_H$ )

$T_H$  = characteristic wave period

$$= 0.33 \sqrt{L_{pp}}$$

### 2.3. Rantai

Kekuatan rantai dihitung berdasarkan kekuatan materialnya sebagai berikut (DNV OS-E301) :

$$CBS = n \cdot c \cdot d^2 (44 - 0.08d) \quad (16)$$

Apabila H adalah total horizontal force/ beban horizontal, maka dapat dicari :

$$x = \frac{H}{w} \cosh^{-1} \left( \frac{hw}{H} + 1 \right) \quad (17)$$

$$s = \frac{H}{w} \sinh \left( \frac{wx}{H} \right) \quad (18)$$

$$\delta = x - x_0 - (s - s_0) \quad (19)$$

### 2.4. Proses Modifikasi

Pembebanan pada buoy menyebabkan perpindahan buoy atau disebut dengan

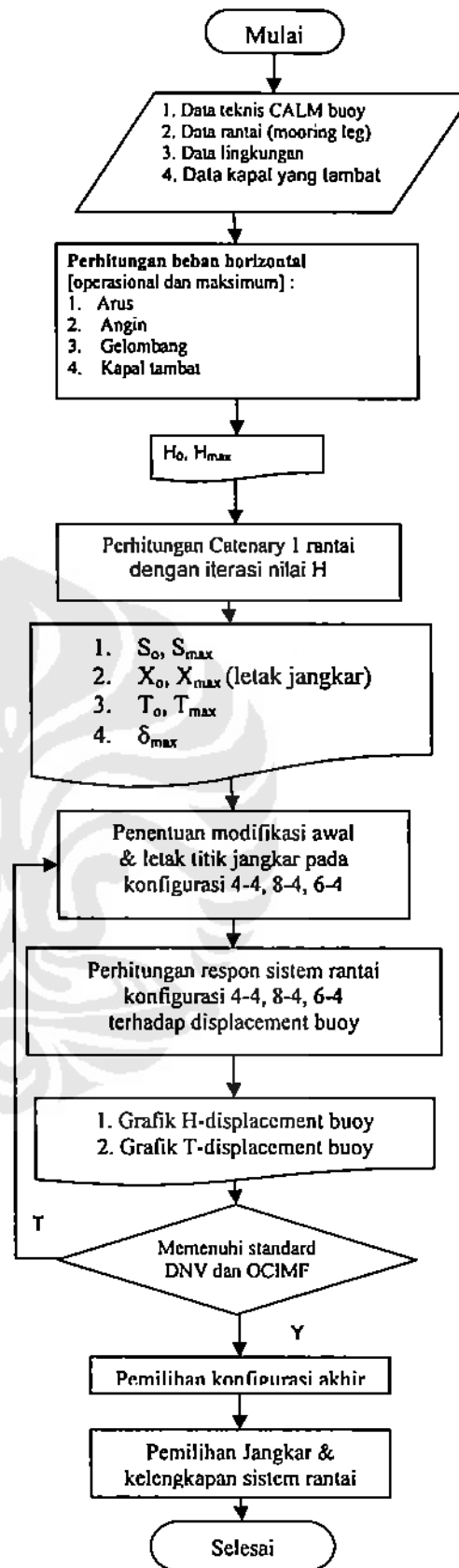
defleksi ( $\delta$ ). Pada teori catenary single line didapatkan besarnya  $\delta$  didapat dari iterasi nilai  $H$  dari  $H_0$  hingga  $H_{max}$ , sedangkan  $-H_{max}$  didapat dari iterasi kebalikan pada nilai  $\delta$  negatif. Pada sistem multi rantai, perpindahan ( $\delta$ ) juga terjadi secara positif dan negatif. Bila sebagian rantai mengalami  $\delta$  positif maka di bagian berlawanan akan mengalami  $\delta$  negatif. Sehingga nilai  $H$  yang didapat dari masing-masing rantai harus dijumlahkan menurut vektornya sehingga didapat  $\Sigma H$  yang merupakan total gaya horizontal sebenarnya

Tabel 1  
Data Teknis CALM Buoy Sebelum Modifikasi

Data	Nilai	Satuan	Keterangan
Kedalaman (h)	22	m (SWL)	
Suhu udara	22.8 - 32	°C	
Seawater density ( $\rho_{sw}$ )	1025	kg/m <sup>3</sup>	
Seawater kinematic viscosity	$1.05 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s	
Angin (Wind)			
Vw max	35.8	Knot	100 year period
Vw max	50	Knot	Kondisi Badai
Arus (Current)			
Vc	0.47	m/s	
Gelombang (Wave)			
Hs	3.35	m	Sig. wave height
Ts	7	s	Sig. wave period
Hmax	6	m	100 year period
Tmax	9	s	100 year period
Seabed			
Jenis tanah	mud		

Dalam memodifikasi dilakukan dengan 3 cara yaitu dengan menggunakan :

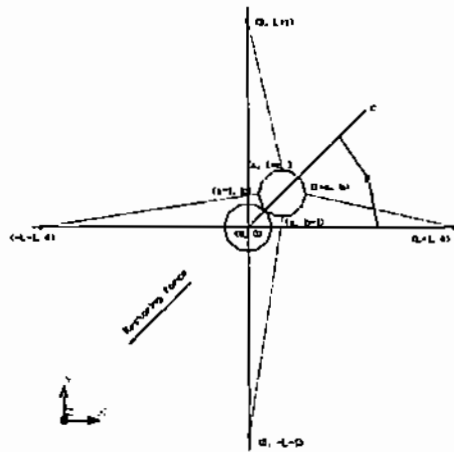
1. 4 rantai dengan panjang yang disesuaikan, dengan 4 jangkar dan 4 rantai yang masuk ke chain stopper, atau konfigurasi buoy 4-4.
2. 8 rantai dengan 8 rantai jangkar dan 4 rantai yang masuk ke chain stopper, disebut dengan konfigurasi 8-4.
3. 6 rantai dengan 6 rantai jangkar dan 4 rantai yang masuk ke chain stopper disebut dengan konfigurasi 6-4.



Gambar 2  
Flow Chart Perhitungan

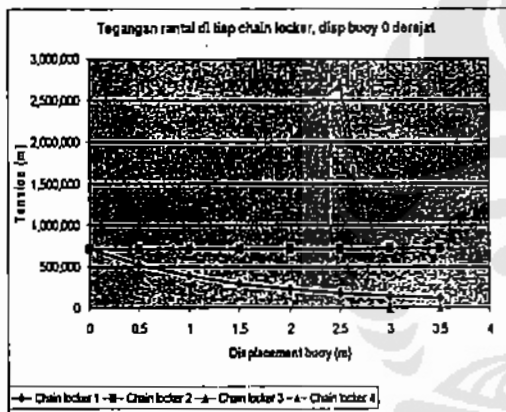
Tabel 2.  
Data Lingkungan

Uraian	Simbol	Nilai	Satuan	Keterangan
<b>Buoy</b>				
Diameter buoy	D	8	m	diameter luar tanpa fender dari keel hingga top deck
Tinggi buoy	H	3.7	m	
Draught buoy	d	1.61	m	
Diameter skirt	Dskirt	11.24	m	
Berat total	Wbuoy	81.2	ton	berat tanpa rantai
<b>Rantai</b>				
Chain stopper		4	buah	
Diameter rantai	dchain	2.25	inchi	
Grade				U3

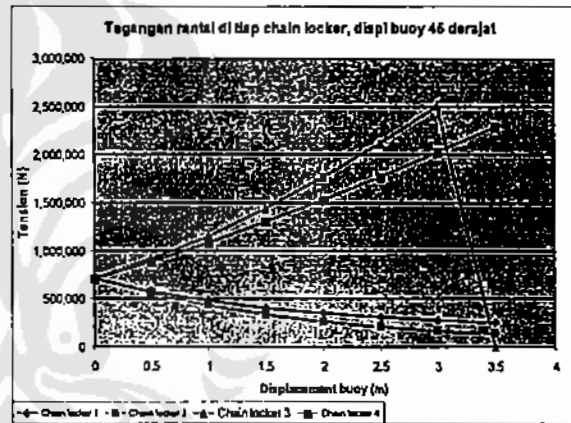


Gambar 5.  
Sketsa Perpindahan Buoy pada Arah  $\beta$  Konfigurasi 4-4

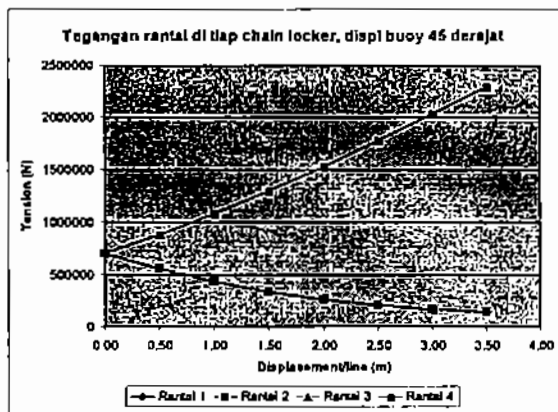
### 3. Pengolahan Data



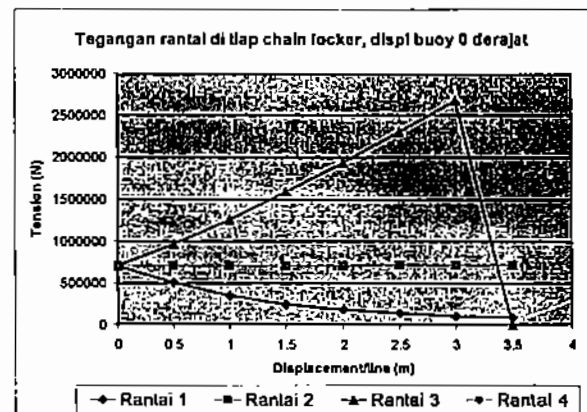
Gambar 3.  
Tegangan Chain Locker pada Arah Displacement  $0^\circ$



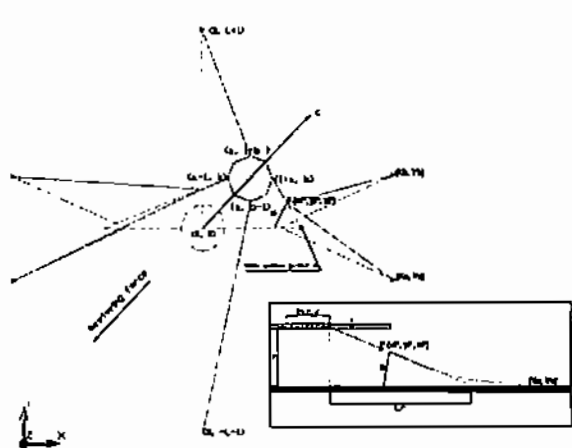
Gambar 6.  
Tegangan Chain Locker pada Arah Displacement  $0^\circ$



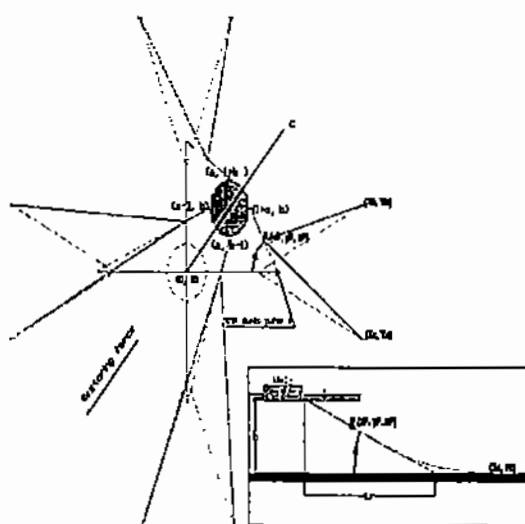
Gambar 4.  
Tegangan Chain Locker pada Arah Displacement  $45^\circ$



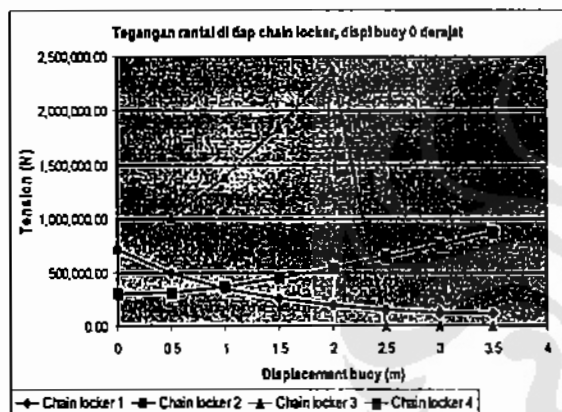
Gambar 7.  
Tegangan Chain Locker pada Arah Displacement  $45^\circ$



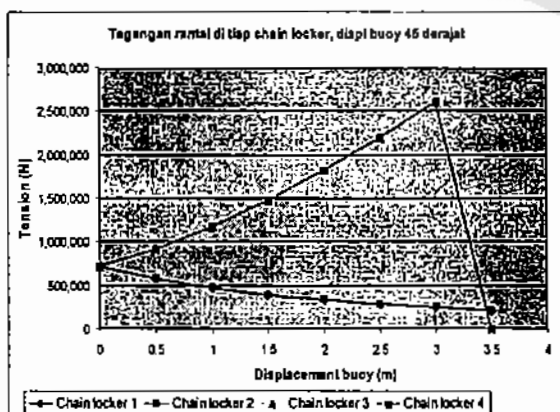
Gambar 8. Sketsa Perpindahan Buoy pada Arah  $\beta$  Konfigurasi 6-4



Gambar 11. Sketsa Perpindahan Buoy pada Arah  $\beta$  Konfigurasi 8-4



Gambar 9. Tegangan Chain Locker pada Arah Displacement  $0^\circ$



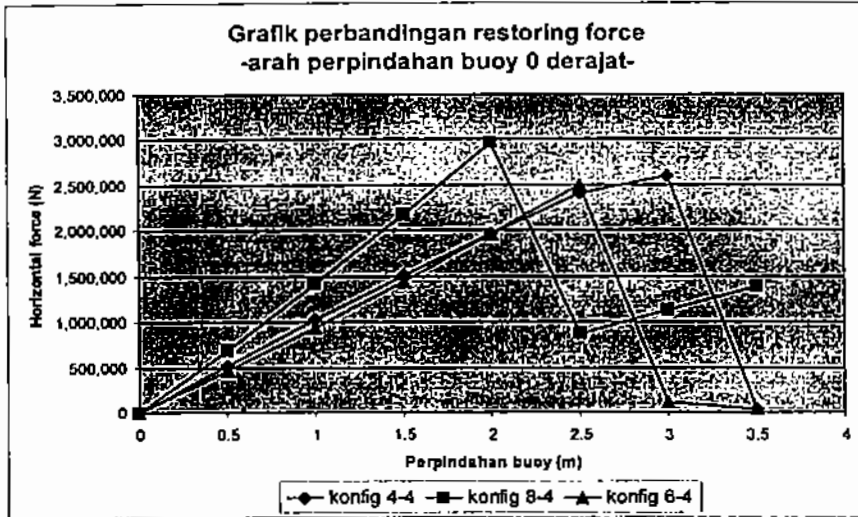
Gambar 10. Tegangan Chain Locker pada Arah Displacement  $45^\circ$

Tabel 3. Total Beban yang Bekerja

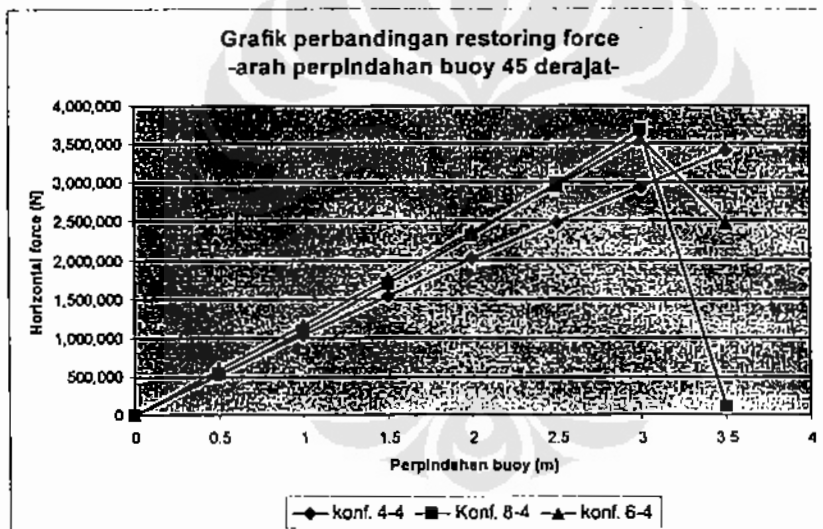
BEBAN	Unit: Kg	Unit: N
<b>Buoy</b>		
angin	5,109.19	9,966.12
arus	2,109.84	2,109.84
gelombang	123,722.18	221,591.97
Beban buoy	130,941.21	233,667.92
<b>Kapal Tambak</b>		
angin	224,446.33	437,810.79
arus	2,558.30	2,558.30
gelombang	339,608.41	1,089,409.92
Beban kapal	566,613.04	1,529,779.01
<b>TOTAL (N)</b>	<b>697,554.25</b>	<b>1,763,446.93</b>

Tabel 4. Efek Penambahan Berat Kapal yang Tambat

draught (m)	C/D	Beban kapal-Hs (N)	Beban kapal-Bmax (N)
12	6.8	339,608.4109	1,089,409.92
15	6	558,728.8089	1,635,700.33
18	5.3	587,809.4218	1,846,690.41



Gambar 12.  
Perbandingan ketiga Jenis Konfigurasi



Gambar 13.  
Perbandingan Ketiga Jenis Konfigurasi

#### 4. Analisa

Konfigurasi 4-4 pada arah beban horizontal menunjukkan lebih mampu menahan beban akibat kenaikan beban horizontal yang dialami oleh buoy, namun besarnya horizontal force maksimum yang dapat oleh sistem rantai relatif lebih rendah dari pada konfigurasi yang lain.

Walaupun restoring force/ gaya pengembali pada konfigurasi 6-4 dan 8-4 lebih besar namun pencabangan sistem

rantai yang dilakukan pada konfigurasi 8-4 dan 6-4 ternyata memberikan tegangan diatas ketentuan standard OCIMF yaitu 1/3 dari CBS rantai sebesar 957,239.97 N, tegangan yang besar tersebut terjadi pada rantai yang masuk ke dalam chain stopper, sedangkan tegangan pada rantai cabangnya (pada triplates) masih memenuhi persyaratan tersebut.

Karena restoring force adalah reaksi akibat besar beban nyata yang diterima oleh sistem/buoy maka dilihat dari pertambahan

beban maksimum akibat kenaikan draught kapal yang tidak melebihi 2000 kN dan masih dibawah CBS rantai, maka ke tiga konfigurasi dianggap masih mampu untuk menahan beban akibat pertambahan sarat kapal.

Dalam menentukan jenis konfigurasi, beban awal buoy disetting agar tidak bergerak pada beban horizontal sebesar 697,554.25 N. Sedangkan beban maksimum tidak bisa memakai kondisi pada Hmax karena pada saat itu gelombang sudah sangat tinggi dan berbahaya bagi kondisi penambatan dan orang-orang yang bekerja diatasnya.

**Tabel 5.**  
Konfigurasi 4-4 yang Dipasang dengan Spesifikasi

Jenis rantai	Stud	
Grade	U3	
Diameter rantai (d)	2.25	in
Panjang rantai (S)	349.979	m
x max (letak titik jangkar)	349.123	m
x awal	219.372	m
Sudut antar rantai jangkar	90	derajat
Jenis anchor	Moorfast	
Kategori anchor	HHP	
Berat anchor	30	ton
Fluke angle	50	derajat
d anchor shackle	80	mm
d joining shackle	72	mm
Jumlah length	13	rangkaian
Jumlah joining shackle	13	buah
Jumlah end link	1	buah
Jumlah enlarged link	27	buah
Arrangement common link	L-2	
Coupling anchor	A-3	

Walaupun buoy masih dapat bertahan hingga nilai CBS rantainya tercapai, namun kondisi yang aman bagi operator di lapangan tidak diketahui, serta pembahasan hanya terbatas pada kekuatan mooring leg-nya saja, maka dalam menentukan batas maksimum operasional penambatan kapal disetting ketika tegangan di tiap chain locker berada pada nilai 1/3 CBS rantai (sesuai dengan standard OCIMF). Didapat

dari hasil perhitungan bahwa kondisi tersebut tercapai pada kondisi beban horizontal 944.263 N atau diperkirakan pada saat tinggi gelombang mencapai 4.275 m dengan periode gelombang 7 detik

## 6. Kesimpulan

1. Pada displacement buoy 0° secara horizontal konfigurasi rantai 4-4 dapat memberikan gaya pengembali pada perpindahan/displacement buoy yang lebih jauh dari posisi awal buoy, dibandingkan dengan konfigurasi rantai 8-4 dan 6-4. Yaitu 1.5 kali atau 50 % lebih jauh dibandingkan konfigurasi 8-4 dan 1.2 kali atau 20% lebih jauh dibandingkan konfigurasi 6-4.
2. Pada displacement buoy 0° secara horizontal konfigurasi 8-4 dapat memberikan ketahanan sistem terhadap beban horizontal 14.2 % lebih besar dibandingkan konfigurasi 4-4 dan 18.5 % lebih besar dibandingkan konfigurasi 6-4 dihitung pada kondisi sebelum sistem tersebut gagal (rantai putus).
3. Konfigurasi 4-4 dipilih sebagai konfigurasi yang baru dikarenakan :
  - a) Tegangan awal yang terjadi pada konfigurasi 8-4 dan 6-4 diatas ketentuan standard OCIMF, untuk grade U3
  - b) Tidak perlu pergantian grade dan diameter yang lebih besar sehingga rantai yang lama dapat dipergunakan lagi. Selain itu adanya keseragaman
  - c) pemakaian jenis rantai di setiap chain stopper memudahkan dalam pemilihan rantai, penyettingan dan proses meintenance.
  - d) Restoring force maksimum yang diberikan dari konfigurasi 4-4 memang tidak setinggi restoring force pada konfigurasi 8-4 dan 6-4, namun dari hasil perhitungan didapatkan kapal dengan draft kapal 12 m hingga 18 m dengan panjang maksimum 200 m, masih dapat diterima oleh buoy tanpa mencapai restoring force maksimumnya.



Adapun pemilihan jenis jangkar tersebut disesuaikan dengan kondisi dasar laut dan regulasi dari DNV-OS-E301.

#### Daftar Acuan

- [1]. A. Jammaluddin, Marjono, M.Z. Arifin, "Model Matematika Untuk Daya Cengkram Jangkar Pada Sistem Penambatan Kapal Apung Lepas Pantai Selat Makasar", *Jurnal pada Seminar Nasional MIPA UI*, 2005
- [2]. Anonymous, *Dynamics of Marine Structure*, (Ciria Underwater Engineering Group, 1978)
- [3]. Anonymous, *Offshore Standard DNV-OS-E301 : Position Mooring*, October 2004. diakses tanggal 5-9-2006 dari Google <http://www.dnv.com/>.
- [4]. Ardian, "Analisa Mooring Pada FPSO Sistem Turret dengan Pendekatan Frekuensi Domain", Prog Studi Teknik Sipil Program Pasca Sarjana BIT-UI, Januari 2004, hal 28
- [5]. de Nevers, Noel, *Fluid Mechanics for Chemical Engineers 2<sup>nd</sup> ed.*, (McGraw-Hill, 1991)
- [6]. Francis Weston Sears, *Mechanic, Wave Motion and Heat*, (Addison-Wesley Publishing company. Inc., 1958)
- [7]. Gani, Pramadji Abdul., "Analisa Pembebanan Rantai dan Posisi Buoy Catenary Anchor Leg Mooring", skripsi S1 Univ. Indonesia, 1990, hal 59
- [8]. IMODCO, SBM .CALM Catenary Anchor Leg Mooring Buoy Terminal System, Company Product. ,diakses tanggal 26-6-2007 dari Google [www.sbmimodco.com](http://www.sbmimodco.com)
- [9]. Ir. M.A. Talahatu, MT, *Teori Merancang Kapal*, (FTUI, 1985)
- [10]. Kramadibrata, Soedjono. *Perencanaan Pelabuhan*. (Bandung, Ganeca Exact)
- [11]. N.D.P. Barltrop, *Floating Structures : A Guide for Design and Analysis*, (The Centre for Marine And Petroleum Technology, 1998), bab 9
- [12]. Prof. B. Boon, *Lokakarya 40 jam, Rancang Bangun Anjungan Lepas Panta Kampus UI Depok 3 s/d 8 Oktober 1988*, (FTUI, 1988)
- [13]. Prof. K. Kokkinowrachos, *Offshore Structure, General Design Consideration*, (Tech University Aachen)
- [14]. Reza Ajiputra, *Laporan Kerja praktek PT PERTAMINA UP VI BALONGAN*, 2006, hal 21-26, 30-33