

# KAJIAN NUMERIK KETIDAKSTABILAN FPSO TERTAMBAT DALAM KONDISI ALAMI KERUSAKAN PADA KONDISI *MOORING LINE* YANG BERBEDA

## *Numerically Study of Instability Moored FPSO in Damage Condition with Different Mooring Line Configuration*

Arifin

UPT Balai Pengkajian dan Penelitian Hidrodinamika, BPPT-Surabaya  
Email : arifinsah03@gmail.com

Diterima: 4 Agustus 2015; Direvisi: 8 September 2015; Disetujui: 18 September 2015

### Abstrak

Dalam perencanaan suatu kapal yang mendapatkan beban lingkungan seperti angin, gelombang dan arus, adalah sangat penting mengetahui tegangan maksimum yang bekerja pada *mooring line*. Pada kondisi cuaca yang agak buruk, hal tersebut memungkinkan terjadinya kerusakan/kegagalan pada tali *mooring*. Kondisi tersebut akan menyebabkan ketidakstabilan terhadap respon gerakan kapal dan tegangan pada *mooring line*. Suatu pendekatan numerik dilakukan untuk mensimulasikan pengaruh dari *mooring line* yang mengalami kerusakan serta pengaruh konfigurasi *mooring line* yang berbeda. Pada akhir pembahasan, suatu analisis dilakukan untuk menentukan kestabilan FPSO dan *mooring line* dalam kondisi alami kerusakan.

**Kata Kunci :** FPSO, Ketidakstabilan, Respon Gerakan, Tegangan *Mooring Line*, Pendekatan Numerik

### Abstract

*In designing a ship exposed by environmental loading such as wind, wave and current, it is important to know the maximum tension which is acting on the mooring lines. In severe condition, it was probabled one of the mooring line damage. These conditions become affect instabilities to the motion response and mooring lines tension. A Numerically approach has been carried out at to simulate the effect of broken mooring lines and different mooring line configuration. Finally, an analysis was done to establish the FPSO and mooring line stability in damage condition.*

**Keywords :** FPSO, Instability, Motions Response, Mooring Line Tension, Numerically Approach

### PENDAHULUAN

Cadangan minyak dan gas di Selat Makassar akan dieksplorasi di masa mendatang. Pada aktifitas tersebut, kapal jenis *Floating Production, Storage and Offloading (FPSO)* memegang peranan penting untuk mendukung aktifitas produksi dan distribusi. Salah satu kelebihan penggunaan FPSO dalam aktifitas tersebut adalah relatif lebih murah dan mudah dipindahkan ke lokasi lainnya dibandingkan bangunan apung lepas pantai yang lain. Adapun karakteristik

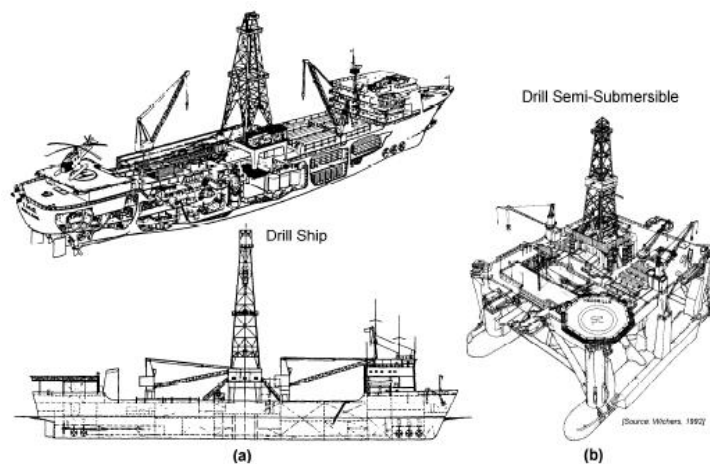
terpenting FPSO adalah kemampuannya dalam menghadapi kondisi lingkungan laut yang cukup ekstrim sekalipun. Namun, tentunya harus didukung oleh sistem penambatan yang handal.

Ketika perkiraan kondisi suatu lokasi telah dapat ditentukan berdasarkan hasil survey geologi, sehingga dapat ditentukan adanya prospek potensi kandungan migasnya, maka ladang migas tersebut sudah bisa dibor untuk menguji perkiraan tersebut. Dalam tahapan pengeboran yang menggunakan *drilling unit*

maka dipersyaratkan oleh regulasi bahwa drilling unit tersebut harus mampu bekerja pada kondisi laut yang buruk sekalipun (Journee, 2001). Ada beberapa alternatif jenis bangunan lepas pantai yang dapat digunakan untuk kegiatan pengeboran diantaranya adalah *barge*, *semisubmersible*, *jack-up* dan lain-lain sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai berikut.

Pada kondisi laut yang cukup dalam, FPSO

dianggap lebih memiliki daya tarik ekonomi yang lebih besar. FPSO memiliki peralatan produksi dan akomodasi yang ditempatkan di atas geladak kapal. Migas yang sudah diproduksi dan disimpan di FPSO dipindahkan secara periodik ke daratan melalui kapal tanker. Terkadang migas dari FPSO tersebut disalurkan ke SBM yang terletak pada jarak tertentu melalui sistem perpipaan dimana kapal tanker dapat ditambatkan.



Gambar 1. *Drilling Unit*

Pada umumnya FPSO didesain untuk masa pengoperasian yang cukup panjang. Oleh karena itu, respon gerakan FPSO yang terjadi perlu dianalisa dengan cermat. Demikian halnya dengan tegangan pada tali tambat perlu dianalisa untuk mengetahui *safety factor* tali tambat, apakah memenuhi kriteria desain yang ditentukan oleh Badan Klasifikasi tertentu seperti Bureau Veritas, BV. Dengan demikian gerakan *surge*, *sway* dan *yaw* FPSO yang disebabkan oleh gaya-gaya *drift* perlu diperkirakan karena dianggap sangat penting terutama kemungkinan pada daerah resonansi.

Pada tahapan awal perencanaan sistem mooring, *safety factor* tegangan tali tambat perlu dipertimbangkan benar. Titik tambat *mooring line* pada *fairlead* harus diperiksa sedemikian rupa hingga tegangan yang bekerja masih berada dalam batasan *safety factor* yang ditentukan.

Perpindahan posisi arah horisontal maksimum merupakan jumlah perpindahan/pergerakan yang diakibatkan oleh gelombang dan pergerakan yang disebabkan oleh frekuensi rendah. Gerakan *surge* dan

*sway* disyaratkan berada dalam batas pergerakan yang diijinkan sehingga tegangan pada tali tambat masih memiliki *safety factor*. *Safety Factor* tersebut yang berhubungan dengan Badan Klasifikasi merupakan kriteria desain tali tambat (Tai Pil Ha, 2011).

Perubahan displacement kapal akibat perubahan sarat kapal dapat dianggap seperti tegangan tali tambat yang dipengaruhi oleh pergerakan *surge* dan *sway* maksimum. Kondisi lingkungan ekstrim yang terjadi dalam kurun 100 tahunan biasanya digunakan untuk menentukan besaran pergerakan *surge* dan *sway* serta tegangan tali maksimum.

Seiring dengan perkembangan bangunan lepas pantai migas menuju laut dalam, tuntutan akan kemampuan *station keeping* menjadi sangat ketat akibat penggunaan anjungan terapung. Jenis bangunan terapung yang digunakan untuk produksi biasanya menggunakan sistem tambat. Dalam kenyataan di lapangan, sistem mooring *catenary* yang bersifat tradisional masih banyak dijumpai penggunaannya (Beck, 2011)

Dengan bertambahnya kedalaman laut, berat rantai

dan tali baja menjadi sangat besar sehingga biayanya sangat besar dan tidak ekonomis. Salah satu metode penyelesaian masalah tersebut diatas adalah penggunaan tali fiber sintetis untuk menggantikan kabel baja dan menggantikan sistem tambat dengan sistem semi-taut atau taut mooring. Akan tetapi, adanya segmen rantai yang tergeletak di dasar laut, sistem *catenary* mempunyai *safety factor* yang lebih tinggi dibanding sistem taut terutama pada kondisi laut yang buruk (Sun, 2010).

Penggunaan buoy dalam sistem tambat *catenary* dapat juga dianggap sebagai satu metode yang cukup efektif untuk mengurangi respon gerakan dan tegangan tali tambat yang terjadi. Beberapa keuntungan penggunaan buoy dalam sistem tambat diantaranya adalah:

- Mengurangi beban akibat berat tali tambat dan rantai serta mengurangi *pre-tension*.
- Mengurangi radius *mooring*.
- Menyimpan sebagian gaya pengembali dan kemampuan menahan gaya lingkungan yang cukup besar.

Adapun beberapa kelemahan penggunaan buoy dalam sistem tambat *catenary* adalah:

- Menambah kesulitan dalam proses pemasangan.
- Karakteristik dinamis sistem tambat menjadi lebih rumit.

Dalam kaitannya dengan besarnya respon gerakan bangunan apung dan tension yang terjadi pada sistem *mooring catenary*, beberapa parameter lain yang berpengaruh dalam perencanaan perlu dipertimbangkan. Beberapa parameter yang dianggap cukup berpengaruh diantaranya adalah perencanaan konfigurasi *mooring* dan kondisi operasionalnya (Klaka, 2000).

Pada pembahasan ini, akan dilakukan kajian numerik pengaruh konfigurasi mooring dan kondisi operasional pengujian. Dalam simulasi tersebut akan dianalisa 2 (dua) macam konfigurasi mooring yaitu 1-2 dan 2-1. Adapun parameter kondisi operasional yang dianalisa adalah kondisi operasional sistem tambat, *intact* dan *damage*.

Dari kajian ini diharapkan, akan diperoleh data tegangan tali tambat maksimum yang mungkin terjadi pada sistem tambat, yang dibandingkan dengan kapasitas tali tambat sehingga diperoleh informasi seberapa besar *safety factor* yang dimiliki oleh sistem tambat.

## DASAR TEORI

Struktur apung yang dikenal dengan *floating production unit, floating storage and offloading, floating production storage and off-take* merupakan fasilitas dan sarana yang diperlukan dalam kegiatan eksplorasi minyak dan gas. Pada umumnya struktur apung tersebut berupa *tanker* dan *barge* (tongkang), dimana di atas struktur itu terdapat berbagai peralatan yang digunakan untuk proses produksi atau penyimpanan minyak atau gas yang dihasilkan dari proses produksi dan selanjutnya minyak tersebut disalurkan dan dipindahkan ke tempat tujuan dengan kapal tanker yang lainnya atau melalui pipa bawah laut.

Efektifitas pengoperasian suatu struktur apung di laut, baik kapal ataupun anjungan minyak lepas pantai pada dasarnya sangat dipengaruhi oleh kehandalan dari sistem tersebut terhadap kondisi lingkungan perairan dimana struktur dioperasikan. Dalam hal ini sistem penambatan (*mooring line system*) pada struktur apung sangat berperan untuk memperkecil gerakan dan menjaga keseimbangan struktur untuk tetap pada posisinya dalam melakukan aktifitas pengoperasiannya. Untuk itu perlunya perencanaan yang sistematis dan perhitungan yang akurat dalam mendesain barge, *mooring line system* dalam mengatasi beban-beban yang diakibatkan oleh angin, gelombang dan arus.

### Beban Lingkungan

Dalam perencanaan sistem penambatan suatu struktur apung, FPSO, faktor lingkungan sangat penting untuk diketahui. Tidak hanya dalam pemilihan jenis *mooring line* namun juga untuk pertimbangan operasionalnya. Faktor lingkungan dapat berupa arus, angin, ombak, pasang surut permukaan laut dan lain lain.

#### Arus

Arus pada perencanaan dan pengoperasian FPSO dapat dihitung dengan formulasi pendekatan walaupun sangat kompleks. Beban arus pada struktur apung tergantung besarnya sarat FPSO, kecepatan dan arah arus. Sedangkan gaya yang bekerja pada *mooring line* tidak begitu signifikan mengingat kecilnya struktur tali tambat (*mooring line*).

Gaya yang ditimbulkan oleh arus laut dapat dibagi atas gaya transversal dan longitudinal (Journe, 2001).

a) *Gaya arus transversal* ( $C_T$ )

$$C_T = 0,5 \times P_w V_c^2 C_{TC}(\alpha) A_{LS} \quad (1)$$

dimana :

- $P_w$  : Massa jenis air laut
- $V_C^2$  : Kecepatan Arus
- $C_{TC}$  : Koef. yang tergantung pada arah arus
- $(\alpha)$  : Sudut datang arus
- $A_{LS}$  : Luas sisi struktur di bawah permukaan laut.

b) *Gaya arus longitudinal ( $C_L$ )*

Yaitu gaya arus yang bekerja pada struktur secara longitudinal ditambahkan gaya gesekan, dirumuskan dengan :

$$C_L = \left( \frac{0,075}{(\log Rn - 2)^2} \right) \times 0,5 P_w S V_C^2 \cos \alpha / \cos \alpha \quad (2)$$

dimana :

$$\left( \frac{0,075}{(\log Rn - 2)^2} \right) = \text{gaya gesek}$$

- $Rn$  : Reynold number
- $Rn = Vc^2 \cos \alpha / L \nu$
- $\nu$  : viskositas kinetik air laut.
- $S$  : Luas bidang basah

Angin

Gaya angin yang bekerja pada struktur merupakan fungsi dari kecepatan angin, orientasi struktur serta parameter lainnya. Untuk menghitung besarnya gaya angin pada struktur tersebut dapat dihitung dengan formulasi sebagai berikut:

a) Untuk gaya yang searah dengan arah angin :

$$F_D = 0.5 \dots C_d \cdot V_z^2 \cdot A \quad (3)$$

b) Untuk gaya yang tegak lurus dengan arah angin

$$F_L = 0.5 \dots C_l \cdot V_z^2 \cdot A \quad (4)$$

dimana :

- $C_d$  = koefisien drag
- $C_l$  = koefisien gaya angkat
- $\rho$  = rapat massa udara
- $A$  = frontal area
- $V_z$  = kecepatan angin pada ketinggian z

Gelombang

Bentuk fisik gelombang air merupakan aliran tiga dimensi yang merambat secara random dan kontinyu serta mempunyai gaya atau energi yang dapat

menimbulkan beban pada struktur (*offshore platform*), yang selanjutnya beban tersebut dapat mengakibatkan terjadi 6 derajat kebebasan gerakan struktur yakni gerakan translasi (*heave, surge* dan *sway*) dan gerakan rotasi (*pitch, roll, dan yaw*). Gaya yang diakibatkan oleh gelombang pada struktur merupakan gaya / beban yang paling dominan dari pada gaya arus dan angin

Ada 3 parameter pokok yang sangat menentukan pemilihan metode, pendekatan atau prosedur untuk perhitungan beban gelombang adalah :

- Geometri struktur,
- Panjang gelombang dan
- Tinggi gelombang.

Ketiga parameter ini umumnya dinyatakan dalam bentuk perbandingan (rasio) yaitu : perbandingan antara diameter silinder atau lebar struktur dengan panjang gelombang ( $D/\lambda$ ) dan perbandingan antara tinggi gelombang dengan diameter silinder ( $H/D$ ).

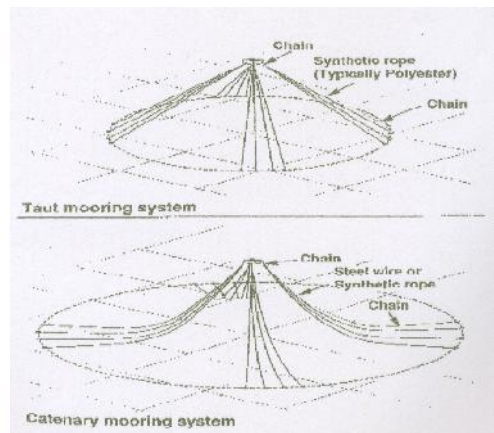
Di bawah ini merupakan perbandingan-perbandingan dimensi untuk beberapa persamaan gelombang yang dipakai dalam perhitungan beban gelombang, sebagai berikut :

- $D/\lambda > 0.2 \rightarrow$  menggunakan teori gelombang difraksi
- $D/\lambda < 0.2 \rightarrow$  menggunakan teori gelombang *Morison* ( lebih tepat )

**Sistem Tambat**

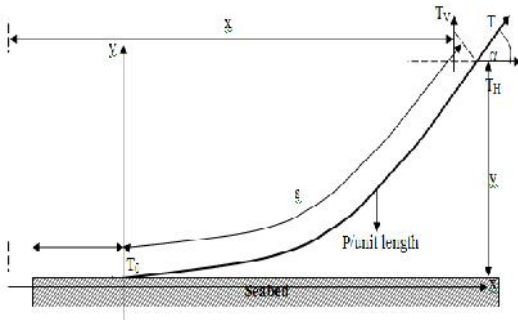
Secara umum, sistem tambat dapat dibagi menjadi beberapa kelompok (lihat Gambar 2) sebagai berikut:

- *Catenary mooring*
- *Semi-taut mooring*
- *Taut mooring*



Gambar 2. Taut dan *Catenary Mooring*

Kata *Catenary* sebenarnya berasal dari rumus yang dipakai untuk perencanaan sistem tersebut. Rumus *Catenary* menjelaskan sebuah tali yang ditambat pada kedua ujungnya, satu pada dasar laut dan yang lainnya pada FPSO, penyebab bentuk *mooring line* yang landai adalah beratnya. Sehingga bentuk bentangan *mooring line* dari struktur apung (FPSO) hingga ke jangkar (*seabed*) tidak tegang tetapi renggang. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3 berikut ini :



Gambar 3. Sketsa *catenary mooring*

dimana :

- y : Jarak vertikal antara permukaan laut dan dasar laut
- x : Jarak horisontal antara jangkar dan FPSO
- T : Tegangan pada *mooring line*
- Tv : Tegangan pada *mooring line* dalam arah vertikal
- Th : Tegangan pada *mooring line* dalam arah horisontal
- S : Panjang keseluruhan *mooring line* diukur dari FPSO ke jangkar
- $\alpha$  : Sudut yang dibentuk *mooring line* dengan permukaan laut
- P : berat *mooring line* per meter

Persamaan umum *catenary mooring* adalah :

$$y = \frac{T_0}{P} \left[ \cosh\left(\frac{Px}{T_0}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

Tegangan yang terjadi pada *mooring line* dirumuskan :

$$T = \sqrt{(Th^2 - Tv^2)} \quad (6)$$

dimana :

$$TH = T \cos \alpha$$

Tegangan awal pada *mooring line* dirumuskan :

$$T_0 = \sqrt{T^2 - (Ps)^2} \quad (7)$$

Panjang tali dirumuskan:

$$s = \frac{T_0}{P} \left[ \sinh\left(\frac{Px}{T_0}\right) \right] \quad (8)$$

dimana :

$$x = \frac{T_0}{P} \sinh^{-1}\left(\frac{Ps}{T_0}\right) \quad (9)$$

### SIMULASI NUMERIK

Simulasi respon gerakan kapal/FPSO pada kondisi *free-floating* dilakukan dengan menggunakan *software* MOSES untuk menghitung gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada kapal. Output dari program MOSES v6.0 akan diinputkan kedalam program ORCAFLEX v8.4.9 *software* untuk mensimulasikan respon kapal pada kondisi ditambat dengan *mooring lines* dalam analisa *time domain*.

### Orcaflex

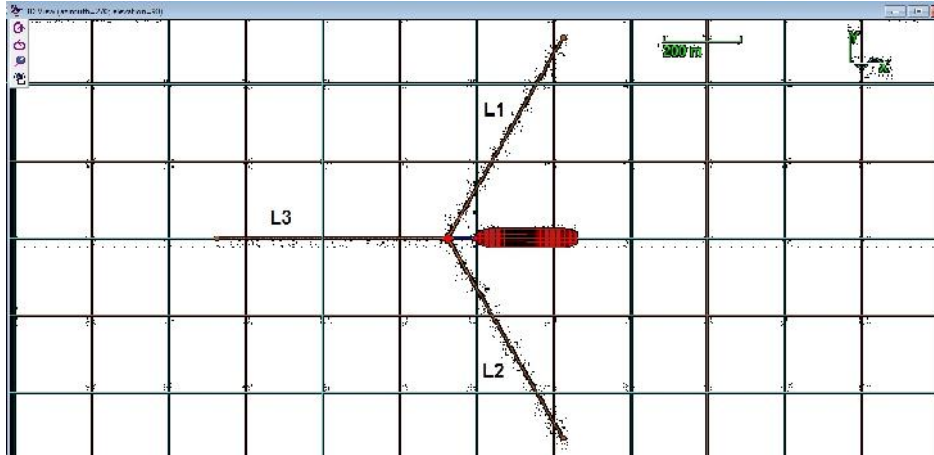
Orcaflex merupakan suatu program *marine dynamics* yang dikembangkan oleh Orcina untuk analisa statik and analisa dinamik untuk berbagai sistim struktur apung bangunan lepas pantai, termasuk *marine risers (rigid and flexible), global analysis, moorings, installation* dan *towed systems*.

### MOSES

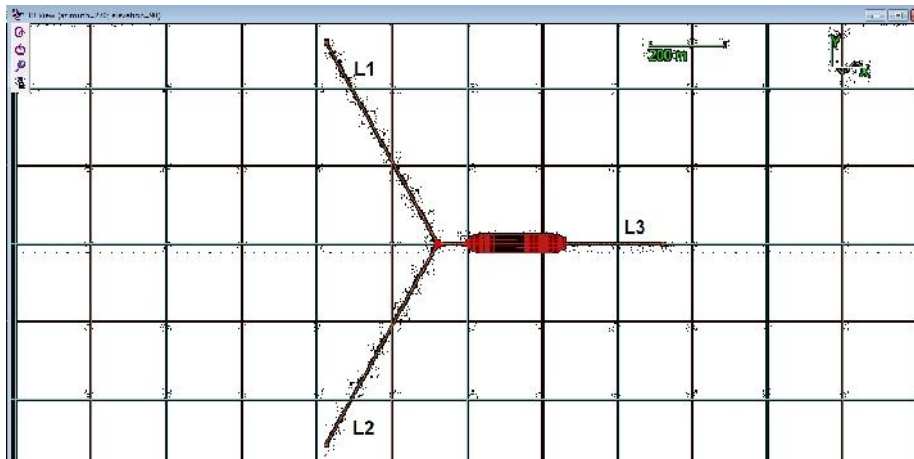
MOSES merupakan suatu integrasi program simulasi untuk menganalisa performansi struktur bangunan lepas pantai. Program "MOSES" dapat menghitung *vessel hydrostatics, ballasting* dan *stability* maupun kinerja *seakeeping* struktur pada gelombang tidak teratur (*random*).

### Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik model FPSO yang ditambat pada buoy yang ditambat secara *catenary mooring* menggunakan kombinasi chain dan wire rope, dengan setup menggunakan 2 konfigurasi *mooring line* yang berbeda sebagaimana diperlihatkan pada gambar 4a dan 4b berikut.



Gambar 4a. Konfigurasi *Mooring A*



Gambar 4b. Konfigurasi *Mooring B*

Dalam simulasi numerik, *running* program dilakukan pada 2 macam setup *mooring* seperti gambar di atas. Selain itu, *running* program juga dilakukan pada 2 kondisi *mooring system* yaitu *intact* dan *damage* sebagaimana ditunjukkan oleh Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Kondisi *Running* Program Numerik

KONDISI	Intact	Damage
Konfigurasi A	A	A1 (L1 putus)
		A3 (L3 putus)
Konfigurasi B	B	B1 (L1 putus)
		B3 (L3 putus)

Beberapa data masukan yang perlu diumpangkan pada program Orcaflex meliputi:

- *Offset* kapal  
Data *lines/body plan* kapal per *station*
- RAO kapal dalam 6 derajat kebebasan (6 DoF)  
Gerakan *surge, sway, heave, roll, pitch* dan *yaw*
- *Hydrodynamic Drag*

Data yang diperlukan adalah drag origin, luasan yang berpengaruh terhadap gaya *drag*, momen dan koefisien gaya *drag*

- *Wind Drag*  
Data koefisien gaya drag yang ditimbulkan oleh angin
- *Wave Drift*  
Data yang diperlukan adalah koefisien gaya *drift* pada setiap frekuensi yang ditinjau

- *Inersia dan Damping*  
Data yang diperlukan adalah *added mass* dan *damping* terutama untuk gerakan *surge*, *sway* dan *yaw*.
- *Connector*  
Adalah data panjang *hawser*, diameter, serta karakteristik material *hawser*.
- Buoy  
Seluruh dimensi dan karakteristik buoy yang digunakan dalam sistem tambat.
- *Mooring Line*  
Data yang diperlukan adalah titik koneksi, panjang segmen, jenis material, diameter, kekakuan, dan lain-lain.
- Data lengkungan

### Data-data

#### Data Kapal:

- Length Overall : 268.4 m
- Breadth Moulded : 41.60 m
- Draft (Fully Loaded) : 11.3 m
- Displacement : 96075.1 ton

#### Data Mooring:

- Type : Catenary
- Wire Size, Diameter : 10.27 mm (4")
- Grade : R3
- Wire Break Load : 9425.5 kN
- Wire Weight In Water : 0.050 ton/m
- Weight in Air : 0.057 ton/m

#### Data Lingkungan

- Kedalaman laut : 693 m
- Gelombang 100 years
  - Tinggi gelombang, Hs : 7.28 m
  - Peak Period, Tp : 10.11 m
- Tipe gelombang : JONSWAP

Setelah semua data-data yang diperlukan sudah diinputkan semua, maka tahapan berikutnya adalah melakukan perhitungan statis terlebih dahulu. Kemudian dilakukan perhitungan dinamis dalam rentang waktu perhitungan tertentu.

### HASIL SIMULASI

Dari proses *running* program Orcaflex yang dilakukan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1, maka diperoleh hasil sebagaimana ditunjukkan oleh Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil Simulasi Numerik

Kondisi Simulasi	Maksimum Mooring Line Tension (kN)		
	L1	L2	L3
A	2082.58	2082.58	4901.88
A1	---	2317.19	4403.79
A3	2599.45	2599.45	---
B	3284.22	3284.22	3528.34
B1	---	2371.79	4552.89
B3	3611.36	3611.36	---

Berdasarkan hasil sebagaimana ditampilkan di atas, dapat diketahui bahwa pada kondisi *intact* konfigurasi A, maksimum *mooring line tension* maksimum terjadi pada *mooring line* L3 yaitu sebesar 4901.88 kN. Adapun pada kondisi *damage* yang terjadi pada *mooring line* L1, menyebabkan posisi buoy bergeser sehingga menyebabkan penambahan tegangan pada *mooring line* L2. Sedangkan tegangan pada *mooring line* L3 mengalami penurunan.

Pada kasus kondisi *intact* konfigurasi B, maksimum *mooring line tension* maksimum terjadi pada *mooring line* L3 yaitu sebesar 3528.34 kN. Adapun pada kondisi *damage* yang terjadi pada *mooring line* L1, menyebabkan posisi buoy bergeser yang menyebabkan penambahan tegangan pada *mooring line* L3 menjadi 4552.89 kN. Pada kasus dimana *mooring line* L3 putus, maka tegangan pada *mooring line* L1 dan L2 akan mengalami penambahan tegangan sama besar yaitu 3611.36 kN.

Secara umum dari hasil simulasi yang dilakukan, dapat diketahui bahwa konfigurasi *mooring* B menunjukkan distribusi tegangan yang lebih baik karena tegangan maksimum yang terjadi sedikit lebih kecil sehingga memperbesar *Safety Factor* ( $SF = \text{Wire Break Load} / \text{Maximum Tension Line}$ ),  $SF = 1.92$

Selain itu, terjadinya kondisi *damage* pada salah satu *mooring line* sudah barang tentu akan menyebabkan perbedaan pada respon gerakan yang terjadi. Akan tetapi, besarnya perubahan tersebut akan dijelaskan pada pembahasan lainnya.

### KESIMPULAN

Berdasarkan kajian numerik yang dilakukan terhadap pengaruh perbedaan kondisi konfigurasi *mooring line* serta kondisi *intact/damage* pada salah satu *mooring line* terhadap *mooring line tension*, maka dapat disimpulkan bahwa Konfigurasi B memiliki

karakteristik kestabilan *mooring line* yang lebih baik dan Semua kondisi simulasi yang dikaji masih menunjukkan *Safety Factor* yang masih berada dalam batas aman ( $SF > 1.67$ , API RP 2A Standard).

#### **DAFTAR PUSTAKA**

Beck, J. W., Vandenworm, N. J. (2011), Mooring System Design for a Circular Hull Shape FPSO Floater with Spar like Responses, *Offshore Technology Conference Brazil*, Rio de Janeiro, Brazil.

Journe J.M and Massie W.W, (2001), *Offshore Hydromechanics*, Delft University.

Klaka, K. (2000), *Response of a vessel to waves at zero ship speed*.

Sun, J. W., Wang, S. Q. (2010), Study on Motion Performance of Deepwater Spar Platform under Different Mooring Methods, *Period of Ocean University of China*, p. 147-153.

Tai Pil Ha (2011), *Frequency and Time Domain Motion and Mooring Analyses for a FPSO Operating in Deep Water*, New Castle University.