

DESAIN STRUKTUR SPAR DI PERAIRAN SELAT MAKASSAR

Design of Spar Structure in Makassar Strait

I Gusti Made Agni Prameswara¹ dan Rildova²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan

Institut Teknologi Bandung

Jln. Ganeca 10 Bandung 40132

¹madeagni@yahoo.com dan ²rildova@ocean.itb.ac.id

Abstrak: Energi yang masih banyak digunakan oleh manusia saat ini merupakan energi fosil, salah satunya adalah minyak bumi. Namun cadangan minyak bumi di darat sudah menipis sehingga manusia harus melakukan eksplorasi dan eksploitasi sumber energi tersebut ke laut. Cadangan minyak bumi di laut paling banyak berada di laut dalam. Salah satu alternatif untuk melakukan eksploitasi minyak bumi di perairan laut dalam adalah dengan menggunakan struktur terapung tipe Spar. Pada Tugas Akhir dilakukan perancangan struktur Spar dengan tujuan untuk mengetahui respons dinamik dari dimensi dari Spar desain. Dilakukan perhitungan secara analitik untuk mengetahui dimensi struktur, respons *heave*, respons *roll* dan sistem *mooring* struktur Spar. Dimensi dan sistem *mooring* Spar digunakan sebagai input untuk pemodelan struktur. Respons dinamik struktur dan gaya tarik sistem *mooring* akan dibandingkan dengan perhitungan analitik. Hasil analisis dari Tugas Akhir adalah diameter *hull* sebesar 35 m, tinggi *hull* 190 m, *draft* 175 m, ketebalan *hull* 250 mm, tinggi *ballast* 122,5 m, tipe *mooring taut leg*, panjang *mooring* 6100 m, respons *heave* maksimum 1 m, *roll* maksimum 1 derajat, *offset* horizontal maksimum 34,7 m dan gaya tarik *mooring* maksimum 3030 kN.

Kata Kunci: Spar, Respons Dinamik, Gaya Tarik *mooring*.

Abstract: The main energy that humans still use today is the fossil energy, one of them is oil. But the oil reserves on land has become thin so humans need to explore and exploit those energy sources to the ocean. The oil reserves mostly resides in the deep water. One of the alternatives to do exploitation on oil in deep water is using Spar type floating structure. This final project will design Spar structure with the main purpose on the dynamic responses from the dimensions of the designed Spar. Structure dimension, heave response, roll response and mooring system will be calculated with analytic calculation. The structure dimension and mooring system will be used as input for structure modelling. The dynamic responses and mooring tension from the modelling will be compared to the analytic calculation. The result of this final project analysis are 35 m of hull diameter, 190 m of hull height, 175 m of draft, 250 mm of hull thickness, 122,5 of ballast height, taut leg mooring system, 6100 m of mooring length, 1 m of maximum heave response, 1 degree of maximum roll response, 34,7 of maximum horizontal offset and 3030 kN of maximum mooring tension.

Keywords: Spar, Dynamic Response, Mooring Tension.

PENDAHULUAN

Manusia membutuhkan energi untuk mendukung aktivitasnya sehari – hari. Energi utama yang saat ini banyak digunakan untuk kebutuhan manusia adalah energi fosil seperti minyak bumi. Namun cadangan minyak bumi di darat semakin menipis sehingga manusia melakukan eksplorasi dan eksploitasi minyak bumi di laut. Cadangan minyak paling banyak yang dapat di eksploitasi paling banyak di laut dalam. Salah satu alternatif untuk melakukan eksploitasi minyak bumi di laut dalam adalah dengan menggunakan struktur terapung tipe Spar. Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah menentukan dimensi struktur Spar, menentukan respons dinamik struktur Spar, dan menentukan sistem *mooring* yang digunakan.

TEORI DAN METODOLOGI

Metodologi Penelitian

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan ilmu – ilmu dasar dalam proses desain struktur Spar. Studi literatur meliputi mengkaji kode/standar desain seperti SPM 1984 dan buku panduan berjudul *Handbook of Offshore Engineering*.

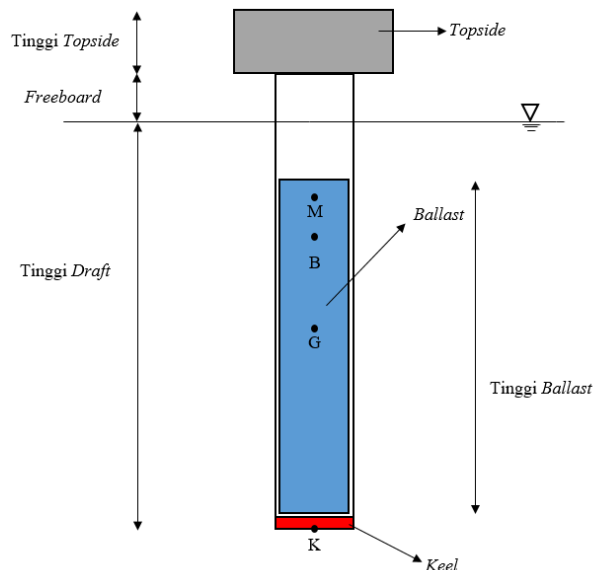
Data yang digunakan dalam proses desain merupakan data sekunder yang diambil dari berbagai sumber.

Setelah data yang diperlukan untuk desain didapatkan, maka perhitungan analitik dilakukan meliputi *hindcasting*, analisis ketebalan Spar, analisis kestabilan statik, analisis gerakan *heave* Spar, analisis gerakan *roll* dan analisis sistem *mooring*. Kemudian dilakukan pemodelan Spar dari hasil analisis analitik.

Definisi Spar

Spar merupakan struktur terapung di laut yang digunakan untuk melakukan produksi minyak bumi. Struktur Spar memiliki *hull* yang berbentuk silinder dengan bagian atas struktur terdiri atas fasilitas – fasilitas untuk

memproduksi minyak bumi yang disebut dengan *topside*. Sebagian dari *hull* Spar berada di bawah permukaan air berfungsi sebagai *ballast* agar struktur stabil. Spar juga dilengkapi dengan sistem *taut leg mooring* untuk menahan gaya *drag* akibat gelombang dan arus di laut. Desain Spar pada tugas akhir ini ditunjukkan oleh **Gambar 1**.



Gambar 1 Struktur Spar

Pengolahan Data Lingkungan

Struktur Spar akan mengalami gaya – gaya lingkungan seperti gaya gelombang dan gaya arus. Gaya gelombang didapatkan dari parameter gelombang signifikan yang terjadi pada lokasi yang ditinjau. Sedangkan gaya arus didapatkan dari data arus yang berada pada lokasi yang ditinjau.

Data Gelombang didapatkan dari data angin. Data angin yang digunakan merupakan data sekunder yang berasal dari BMKG. Parameter gelombang didapatkan dengan melakukan proses *hindcasting*. *Hindcasting* merupakan proses konversi data angin menjadi prediksi data gelombang dan minimal *range* data angin yang digunakan adalah 10 tahun.

Output dari *hindcasting* berupa prediksi tinggi gelombang signifikan dan periode signifikan untuk periode ulang yang diinginkan. Dalam tugas akhir ini, periode ulang yang digunakan adalah 100 tahun.

Parameter gelombang lain dari tinggi gelombang signifikan dan periode signifikan didapatkan dengan menggunakan teori gelombang linier. Teori ini memiliki asumsi bahwa tinggi gelombang relatif kecil dibandingkan dengan panjang gelombang dan kedalaman perairan. Berikut adalah persamaan – persamaan hasil penurunan teori gelombang linier.

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

$$\Phi = \frac{gH \cosh k(h+z)}{2\omega \cosh k(h)} \sin(kx - \omega t)$$

Keterangan

- Φ : potensial kecepatan gelombang
 H : tinggi gelombang (m)
 g : percepatan gravitasi (m/s^2)
 ω : frekuensi sudut gelombang (rad/s)
 k : bilangan gelombang (1/m)
 h : kedalaman perairan (m)
 L : panjang gelombang (m)
 T : periode gelombang (s)
 η : muka air gelombang (m)

Data arus dalam tugas akhir ini berasal dari data sekunder. Data arus diperlukan untuk menghitung gaya yang disebabkan oleh arus.

$$F_{Arus} = \frac{1}{2} \rho C_D A^* U^2$$

Keterangan

- ρ : massa jenis air laut
 C_D : koefisien drag
 A^* : luas proyeksi struktur tegak lurus arah arus
 U : kecepatan arus

Analisis Syarat Terapung

Syarat yang harus dipenuhi dahulu adalah struktur akan terapung saat akan diberikan beban. Maka untuk memenuhi syarat tersebut digunakan persamaan berikut.

$$W_{Topside} = F_{Apung} = \rho g \pi r_{hull}^2 D$$

Keterangan

- ρ : massa jenis air laut
 g : percepatan gravitasi
 r_{hull} : jari – jari hull
 D : draft hull

Untuk memenuhi syarat kestabilan, maka nilai draft dapat ditambahkan.

Analisis Ketebalan Hull Spar

Struktur Spar yang berbentuk silinder akan mengalami tekanan hidrostatik yang bertambah seiring kedalamannya. Tekanan hidrostatik yang bekerja pada struktur terjadi secara lateral dan longitudinal. Tekanan hidrostatik lateral yang bekerja mengarah ke titik pusat penampang silinder Spar. Sedangkan Tekanan hidrostatik longitudinal bekerja pada luasan penuh penampang struktur.

$$P_{hidrostatik} = \rho gh$$

Keterangan

- ρ : massa jenis air laut
 g : percepatan gravitasi
 h : kedalaman perairan

Tebal silinder Spar dapat dihitung dengan mengasumsikan bahwa Struktur Spar merupakan silinder yang mengalami tegangan hoop dan tegangan longitudinal. Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung ketebalan hull akibat tekanan lateral.

$$f_{yield} = \frac{P_{hidrostatik lateral} r_{hull}}{b_{hull}}$$

Keterangan

- b_{hull} : tebal minimum silinder
 f_{yield} : tegangan leleh baja
 r_{hull} : radius hull
 $P_{hidrostatik lateral}$: tekanan hidrostatik lateral

Nilai tebal minimum silinder yang disebabkan oleh tekanan hidrostatik longitudinal didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$f_{yield} = \frac{P_{hidrostatik longitudinal} r_{hull}}{2b_{hull}}$$

Keterangan

b_{hull} : tebal minimum silinder
 f_{yield} : tegangan leleh baja
 r_{hull} : radius hull
 $P_{hidrostatik longitudinal}$: gaya hidrostatik longitudinal

Dari kedua nilai ketebalan yang didapat, maka nilai ketebalan yang paling besar yang digunakan sebagai ketebalan struktur desain.

Analisis Kestabilan Statik Spar

Setelah nilai *draft* dan tebal minimum Spar, berat Spar dapat dihitung dengan cara menggabungkan berat *hull*, berat *topside* dan berat *keel*.

$$W_{SPAR} = W_{hull} + W_{keel} + W_{topside}$$

Kemudian gaya apung yang bekerja pada struktur dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$F_{apung} = \rho \forall g$$

Selisih antara gaya apung dan berat struktur diisi dengan tangki *ballast*. Berikut adalah persamaan yang digunakan.

$$V_{ballast} = \frac{W_{air}}{g \cdot \rho_{air}}$$

$$Tinggi_{ballast} = \frac{V_{ballast}}{Luas alas}$$

Setelah dimensi *ballast* dan beratnya diketahui, maka titik pusat gravitasi struktur dapat dihitung. Kemudian jarak dari titik gaya apung ke titik metasentris dihitung dengan persamaan berikut.

$$\overline{BM} = \frac{I_A}{\forall}$$

Keterangan

$\forall$: volum tercelup Spar
 I_A : Inersia penampang melintang Spar

Analisis Gerakan Heave

Gerakan heave terjadi akibat naik turunnya permukaan air sehingga menambah dan

mengurangi gaya apung yang bekerja. Persamaan gerak *heave* untuk struktur Spar adalah:

$$\begin{aligned} \Sigma F &= m\ddot{z} \\ -\rho g A(z - \eta) - C(\dot{z} - \dot{\eta}) &= m\ddot{z} \\ m\ddot{z} + C\dot{z} + \rho g A z &= \rho g A \eta + C\dot{\eta} \\ m\ddot{z} + C\dot{z} + Kz &= \rho g A \eta + C\dot{\eta} \end{aligned}$$

Keterangan:

m : massa Spar
 ρ : massa jenis air laut
 g : percepatan gravitasi
 A : luas penampang Spar
 η : elevasi muka air $\left(\frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)\right)$
 C : koefisien damping $\left(0.5\rho \frac{8}{3\pi} AC_D \dot{\eta}_{max}\right)$
 K : kekakuan struktur $(\rho g A)$

Maka solusi *steady – state* lengkap dimana ada posisi (x) dan tidak berotasi yang digunakan adalah berikut.

$$z(t) = \frac{H}{2} \sqrt{(C\omega)^2 + K^2} \cdot DAF \cdot \cos(kx - \omega t - \alpha)$$

Keterangan

z : perpindahan struktur arah sumbu z
 H : tinggi gelombang
 DAF : *dynamic amplification factor* yaitu sebesar $\frac{1}{\sqrt{(K - m\omega^2)^2 + (C\omega)^2}}$
 α : beda fasa

Frekuensi alamiah struktur didapatkan dengan persamaan berikut

$$f_n = \sqrt{\frac{\rho g A}{m}}$$

Keterangan

f_n : frekuensi alamiah struktur
 ρ : massa jenis air laut
 g : percepatan gravitasi
 A : luas penampang Spar

Perbandingan antara nilai amplitudo gerakan *heave* dengan amplitudo gelombang dapat diekspresikan dalam satu fungsi transfer. Fungsi transfer ini disebut sebagai RAO (*Response*

Amplitude Operator). RAO digunakan untuk memperkirakan respon struktur jika diberikan beban berupa gelombang acak yang fungsi spektrumnya diketahui. Respon struktur dapat diperoleh dengan cara mengalikan RAO dengan spectrum gelombang acak seperti pada persamaan berikut.

$$S_{zz} = ((C\omega)^2 + K^2) \cdot DAF^2 \cdot S_{\eta\eta}$$

$$S_{zz} = RAO^2 \cdot S_{\eta\eta}$$

Keterangan

S_{xx} : spektrum dari kerapatan perpindahan x

$S_{\eta\eta}$: spektrum dari kerapatan gelombang

RAO^2 : fungsi transfer RAO

ω : kecepatan sudut gelombang

Analisis Gerakan Roll

Gerakan *roll* terjadi akibat adanya gaya gelombang yang menghantam struktur. Selain itu, kemiringan gelombang yang terjadi juga mengakibatkan gerakan *roll* yang searah dengan arah gelombang. Gerakan *roll* Spar berputar pada titik pusat massanya. Berikut adalah persamaan gerakan *roll* untuk struktur Spar dalam sebagai berikut.

$$\Sigma M = I\ddot{\theta}$$

$$I\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + J\theta = M_{gelombang}$$

Keterangan:

I : momen inersia Spar

B : redaman *roll* Spar

J : momen pembalik Spar

$M_{gelombang}$: momen akibat gaya gelombang

Perhitungan gaya gelombang menggunakan persamaan Morrison. Morrison menyatakan bahwa komponen gaya *drag* dan gaya inersia dijumlahkan secara linier. Berikut adalah persamaan gaya gelombang menurut persamaan Morrison.

$$F = F_{inersia} + F_{drag}$$

$$F = \rho C_M \forall \dot{u} + \frac{1}{2} \rho C_D A^* u |u|$$

Keterangan:

ρ : massa jenis air laut

d : diameter struktur laut

u : kecepatan partikel air arah horizontal

$\dot{u}$: percepatan partikel air arah horizontal

C_m : koefisien inersia

C_D : koefisien *drag*

A^* : luas proyeksi membujur silinder

$\forall$: volume Spar di bawah permukaan air

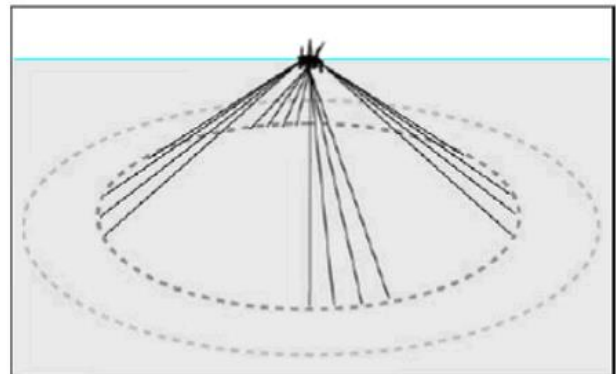
Momen akibat gelombang dibagi menjadi tiga yaitu momen akibat gaya *drag* gelombang, momen akibat gaya inersia gelombang dan momen akibat kemiringan gelombang.

Kemudian dari persamaan tersebut digunakan untuk mencari sudut gerakan *roll* maksimum dan RAO (*Response Amplitude Operator*) *roll* struktur.

Analisis Sistem Mooring

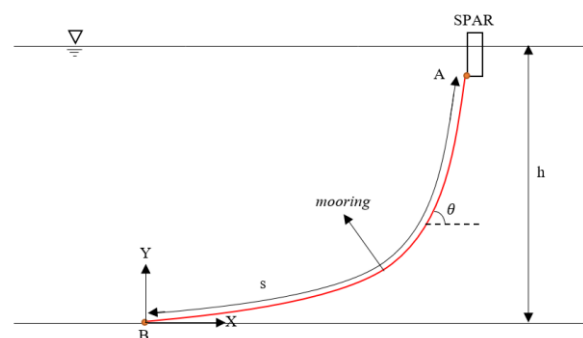
Sistem *mooring* dimanfaatkan untuk menahan pergerakan bangunan terapung agar tetap pada posisinya. Dalam tugas akhir ini, sistem yang digunakan adalah *taut leg mooring* pada

Gambar 1



Gambar 2 Taut leg Mooring

Gambar 3 merupakan ilustrasi sistem *taut leg mooring*.



Gambar 3 Ilustrasi Sistem Taut leg Mooring

Keterangan:

A : titik origin
B : titik *fairlead*
S : panjang *mooring*
 θ : sudut untai *mooring*
h : kedalaman perairan

Titik origin adalah titik di mana sistem tambat terpancang pada *seabed*. *Fairlead* adalah tempat menempelnya sistem tambat pada Spar dan terletak pada *keel*. Sudut untai dibentuk oleh *mooring* berubah – ubah seiring dengan panjang dari titik origin. Nilai sudut untai pada titik origin adalah 0^0 .

Gaya tarik horizontal yang bekerja pada *mooring* berasal dari gaya *drag* akibat arus dan gelombang yang menghantam struktur. Besarnya gaya akibat arus dan gelombang adalah sebagai berikut:

$$F_H = F_{\text{arus}} + F_{\text{Gelombang}}$$

$$F_H = 0,5 \rho C_D A^* U^2 + \frac{1}{2} \rho C_D A^* u_{\text{max}} |u_{\text{max}}|$$

Keterangan:

F_{arus} : gaya akibat arus
 $F_{\text{Gelombang}}$: gaya akibat gelombang
 F_H : gaya tarik horizontal pada *mooring*
 ρ : massa jenis air laut
 C_D : koefisien drag
 A^* : luas proyeksi membujur struktur
 U : kecepatan arus
 u_{max} : kecepatan partikel air maksimum

Kemudian dipilih jenis *mooring* yang sesuai dengan beban gaya *drag* yang bekerja menggunakan spesifikasi *mooring*. Kemudian berat *mooring* per meter dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$W_{\text{mair}} = W_{\text{udara}} - F_{\text{mapung}}$$

Keterangan:

W_{mair} : berat *mooring* di air
 W_{udara} : berat *mooring* di udara

F_{mapung} : gaya apung yang bekerja pada *mooring*

Sehingga jarak horizontal dari titik *origin* ke titik *fairlead* dapat dihitung mencari nilai x dari persamaan berikut.

$$d = \left(\frac{T_H}{W_{\text{mair}}} \right) \left[\cosh \left(\frac{W_{\text{mair}} x}{T_H} \right) - 1 \right]$$

Dan panjang *mooring* dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$s = \left(\frac{T_H}{W_{\text{mair}}} \right) \sinh \left(\frac{W_{\text{mair}} x}{T_H} \right)$$

Sehingga nilai gaya tarik yang bekerja pada *mooring* dihitung dengan persamaan berikut.

$$F_{\text{Tarik}} = \frac{w(s^2 + d^2)}{2d}$$

Keterangan:

d : kedalaman perairan dari *fairlead*
 s : panjang *mooring*
 x : jarak horizontal dari
 F_H : gaya tarik horizontal pada *fairlead*
 F_{Tarik} : gaya tarik yang bekerja pada *mooring*

Berat tambahan dari *mooring* diseimbangkan dengan mengurangi tinggi tangki *ballast* agar *draft* struktur tidak berubah. Berat air yang dikurangi sama dengan berat sistem *mooring* total pada struktur sehingga kesetimbangan statis tetap terjadi. Besarnya tinggi tangki *ballast* yang berkurang adalah sebagai berikut.

$$T_{\text{ballast baru}} = T_{\text{ballast lama}} - \frac{W_{\text{total mooring dalam air}}}{\rho g \pi r_{\text{ballast}}^2}$$

Gerakan Surge Izin

Struktur akan mengalami gerak horizontal yang disebabkan oleh gaya *drag* arus dan gelombang. Struktur Spar memiliki *offset* horizontal izin yang ditetapkan oleh standar DNV-OS-E301 yang menyatakan bahwa *offset* horizontal yang tidak lebih dari 2,5% kedalaman perairan.

HASIL DAN ANALISIS

Data lingkungan yang dianalisis diantaranya adalah data angin, data kedalaman perairan, dan data tinggi gelombang. Data tinggi gelombang didapatkan dari hasil analisis *hindcasting* dengan periode ulang 100 tahun.

Lokasi Tinjauan

lokasi yang ditinjau untuk mendapatkan data lingkungan desain berada pada Selat Makassar, tepatnya pada koordinat $1^{\circ}15'0.00''\text{S}$ dan $117^{\circ}55'0.00''\text{E}$.

Kedalaman pada lokasi tinjauan didapatkan dari data sekunder yaitu navionics. Pada nautical chart navionics, kedalaman yang digunakan untuk desain pada lokasi tinjauan adalah 1500 meter.

Analisis Data Angin dan Gelombang

Data angin yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah data angin dari BMKG pada Kota Sambit. Data angin yang digunakan adalah data kecepatan dan arah angin setiap jam dari pertengahan tahun 2004 sampai pertengahan tahun 2015.

Data fetch efektif yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 1**

Arah	Fetch Efektif (km)
Utara	894.13
Timur Laut	184.84
Timur	171.00
Tenggara	589.67
Selatan	196.51
Barat Daya	73.42
Barat	121.18
Barat Laut	309.74

Tabel 1 Fetch Efektif Lokasi Tinjauan

Dengan data tinggi gelombang maksimum tiap tahun ditunjukkan pada **Tabel 2**

Tahun	Hs Max (m)	Ts (detik)
2004	3.60	9.49
2005	5.06	11.25
2006	3.63	9.53
2007	4.36	10.44
2008	5.02	11.21
2009	4.89	11.06
2010	4.32	10.40
2011	1.04	5.09
2012	4.37	10.45
2013	5.92	12.17
2014	9.06	15.15
2015	6.07	12.32

Tabel 2 Tinggi Gelombang Maksimum tiap Tahun

Hasil analisis ekstrim gelombang untuk periode ulang 100 tahun adalah gelombang dengan tinggi 9,15 m dan periode gelombang 14,77 s.

Data Arus

Data arus didapatkan dari data sekunder. Untuk tugas akhir ini, data arus didapatkan dari Pusat Riset Kelautan Kementrian Kelautan dan Perikanan. Kecepatan arus yang diambil adalah nilai kecepatan arus terbesar selama 1 tahun pada tahun 2017. Kecepatan arus laut terbesar yang terjadi pada lokasi tinjauan selama 1 tahun adalah 1.5 m/s sehingga kecepatan arus desain yang digunakan adalah 1.5 m/s.

Perhitungan Analitik Spar

Tabel 3 merupakan rangkuman data awal yang digunakan dalam proses perhitungan analitik struktur.

Tinggi Gelombang	9,15 (m)
Periode Gelombang	14,77 (s)
Panjang Gelombang	340,32 (m)
Frekuensi Sudut	0,43 (rad/s)
Bilangan Gelombang	0,035
Kecepatan Arus	1.5 (m/s)
Bilangan Gelombang	0.018
Massa Topside	5000 (ton)
Tinggi Topside	12 (m)
Diameter SPAR	35 (m)
Freeboard	15 (m)
Tegangan Leleh Baja	250 MPa

Tabel 3 Data Awal Desain

Analisis Syarat Terapung

Perhitungan yang digunakan dalam memenuhi syarat terapung adalah persamaan berikut.

$$W_{topside} = \rho g \pi r_{hull}^2 D$$

$$5.000.000 \cdot 9,81 = 1025 \cdot 9,81 \cdot \pi \cdot 17,5^2 \cdot D$$

$$D = 5,07 \text{ m}$$

Maka *draft* minimum Spar agar struktur mengapung adalah 5,07 m. Dalam desain diambil *draft* awal sebesar 175 m agar struktur stabil.

Analisis Ketebalan Hull Spar

Nilai tekanan hidrostatik lateral dan hidrostatik longitudinal adalah sebagai berikut.

$$P_{hlateral} = P_{hlongitudinal} = 1025 \cdot 9,81 \cdot 175$$

$$P_{hlateral} = P_{hlongitudinal} = 1.759.130,63 \text{ Pa}$$

Kemudian ketebalan *hull* yang diperlukan akibat tekanan hidrostatik lateral dihitung dengan persamaan berikut.

$$250.000.000 = \frac{1.759.130,63 \cdot 17,5}{b_{hull}}$$

$$b_{hull} = 123,14 \text{ mm}$$

Sedangkan ketebalan *hull* yang diperlukan akibat tekanan hidrostatik longitudinal dihitung dengan persamaan berikut.

$$250.000.000 = \frac{1.759.130,63 \cdot 17,5}{2 \cdot b_{hull}}$$

$$b_{hull} = 61,57 \text{ mm}$$

Maka ketebalan struktur Spar yang digunakan adalah 250 mm

Analisis Kestabilan Statik Spar

Berat total Spar adalah sebagai berikut.

$$W_{SPAR} = 522.475,48 \text{ kN}$$

Sedangkan gaya apung yang bekerja pada struktur adalah sebagai berikut.

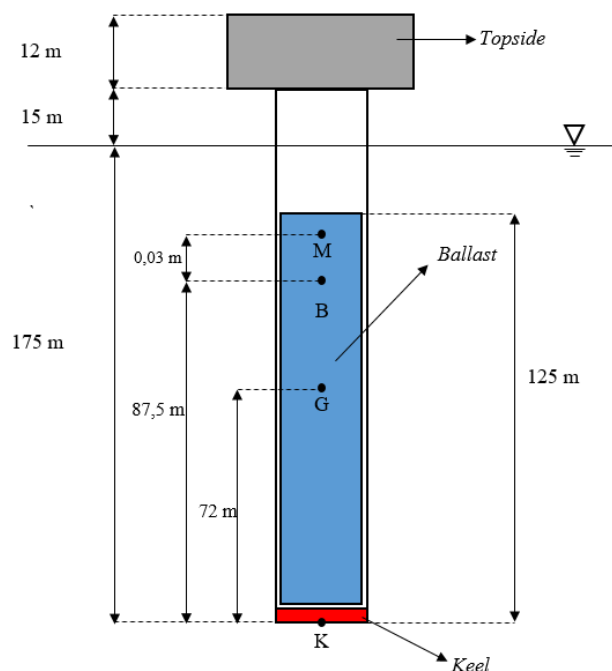
$$F_{apung} = 1.692.482,01 \text{ kN}$$

Dari selisih antara berat Spar maka didapatkan tinggi *ballast* sebagai berikut.

$$T_{ballast} = \frac{116.393,37}{\pi(17,5 - 0,25)^2} = 124,51 \text{ m}$$

Sehingga titik pusat massa Spar didapatkan yaitu 71,59 m dari *keel*.

Nilai panjang titik metasentris dari titik pusat gaya apung yang didapatkan adalah 0,024 m. Sehingga desain struktur ditunjukkan pada **Gambar 4**.



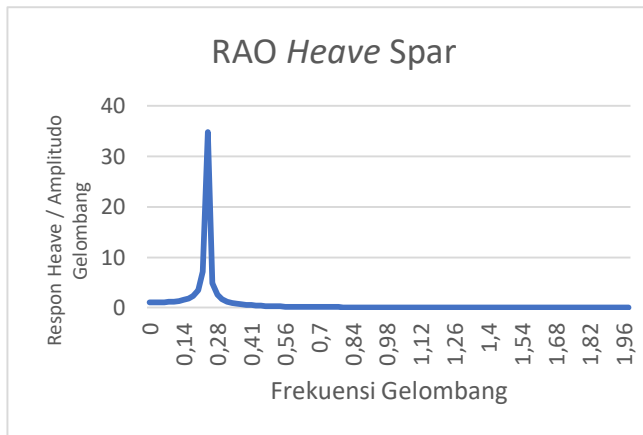
Gambar 4 Komponen Spar Desain

Maka jarak dari titik *keel* ke titik metasentris adalah 87,524 m yang lebih besar dari jarak dari titik pusat massa ke titik gaya yaitu 71,59 m. Sehingga struktur stabil statis.

Analisis Gerakan Heave

Nilai respons *heave* maksimum hasil perhitungan analitik adalah 2,048 m. frekuensi alamiah struktur desain adalah 0,237 rad/s.

Grafik RAO *heave* struktur hasil perhitungan analitik ditunjukkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5 Grafik RAO *Heave*

Analisis Gerakan *Roll*

Persamaan gerakan *roll* struktur Spar desain adalah sebagai berikut.

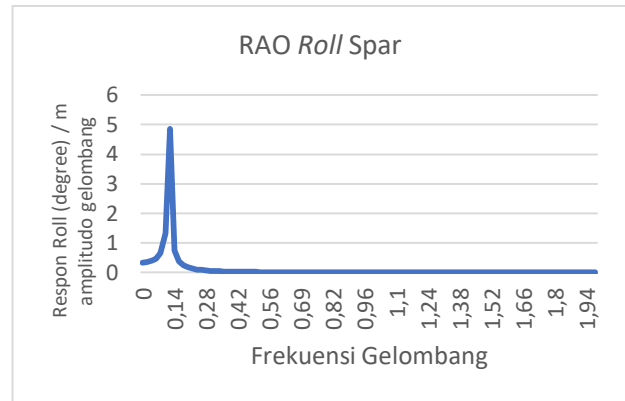
$$617.502.073.150 \ddot{\theta} + 5.732.861.550 \dot{\theta} + 8.318.000.000 \theta = 369.730.988,55 \cos(0,018x - 0,43t)$$

Solusi yang didapatkan dari persamaan tersebut adalah sebagai berikut.

$$\theta(t) = 0,00357 \cdot \cos(0,018x - 0,43t)$$

Dari persamaan tersebut didapatkan respons gerakan *roll* maksimum adalah **0,205°**. Frekuensi alamiah struktur adalah **0,116 rad/s**.

Grafik RAO *roll* struktur hasil perhitungan analitik ditunjukkan pada



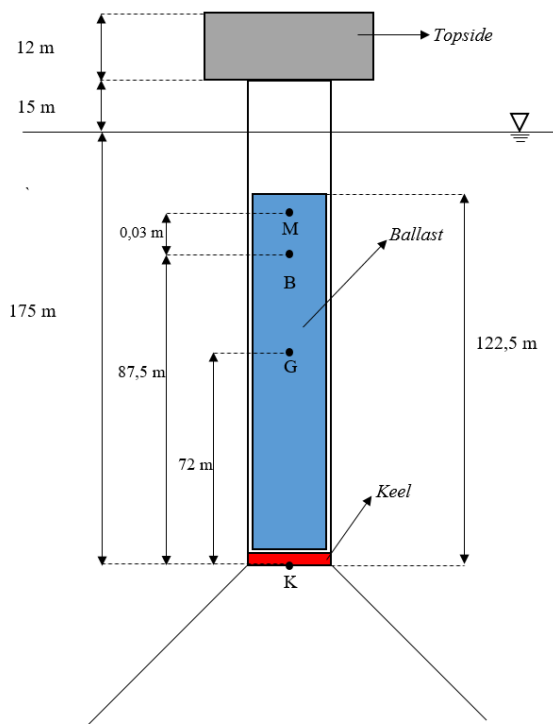
Gambar 6 Grafik RAO *Roll* Spar Desain Analisis Sistem **Mooring**

Besarnya gaya akibat arus dan gelombang adalah **12.309,73 kN**.

Gaya *drag* pada struktur ditahan dengan 4 kabel setiap arah sehingga gaya *drag* untuk setiap *mooring* bernilai **3.077,432 kN**.

Kemudian dipilih *mooring* tipe *wire-rope* yang memiliki spesifikasi kapasitas tarik **3.690 kN** massa per meter di udara **25,5 kg** dan volume per meter adalah **0,00322 m³**. Sehingga Berat *mooring* per meter di air adalah **0,22 kN**.

Jarak horizontal dari titik *origin* ke titik *fairlead* adalah **6.042 m** dan panjang kabel *mooring* adalah **6.100 m**. Gaya tarik yang bekerja pada *mooring* adalah **3.235 kN**. Tinggi *ballast* baru akibat berat tambahan dari sistem *mooring* adalah **122,5 m**.



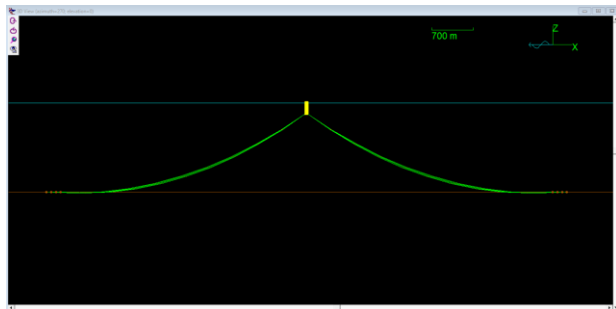
Gambar 7 Spar Desain dengan *Mooring*

Gerakan Surge Izin

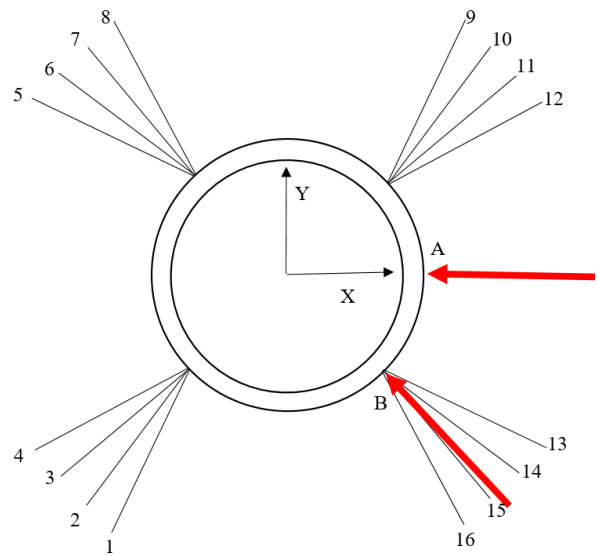
offset horizontal maksimum yang diizinkan adalah 37,5 m

Pemodelan Struktur Spar

Hasil input pemodelan struktur pada perangkat lunak dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**



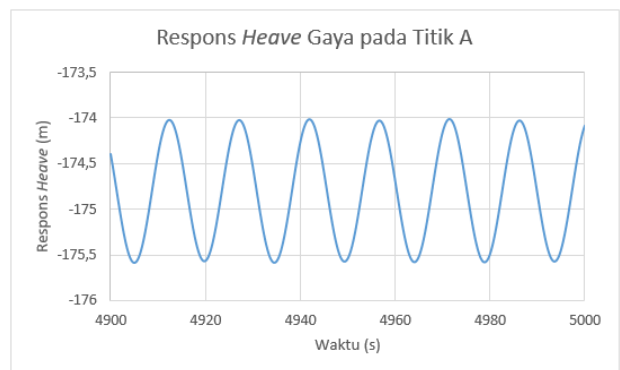
Gambar 8 Hasil Input Tampak Samping Spar Analisis dinamik dilakukan dengan 2 kasus, yaitu gaya lingkungan arah A dan B seperti pada **Gambar 9**.



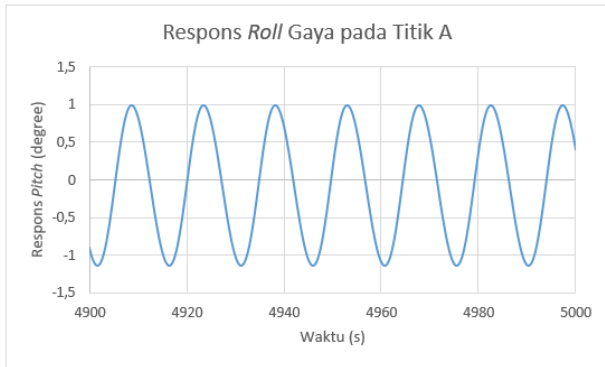
Gambar 9 Arah Gaya Lingkungan pada Spar

Analisis Dinamik Gaya Lingkungan pada Titik A

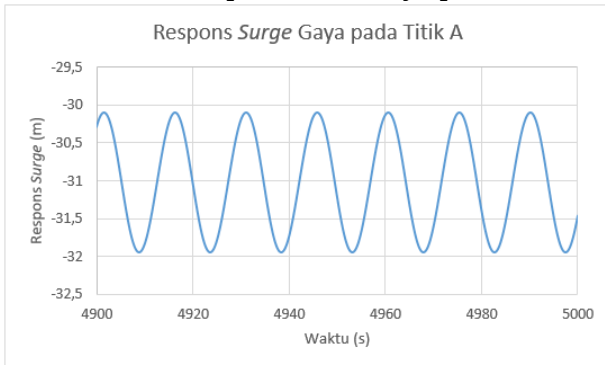
Hasil analisis dinamik gaya lingkungan pada titik A menghasilkan respon *Heave*, *roll*, *surge*, dan gaya tarik *mooring* yang ditunjukkan pada **Gambar 10**, **Gambar 11**, **Gambar 12**, **Gambar 13** dan **Gambar 14**.



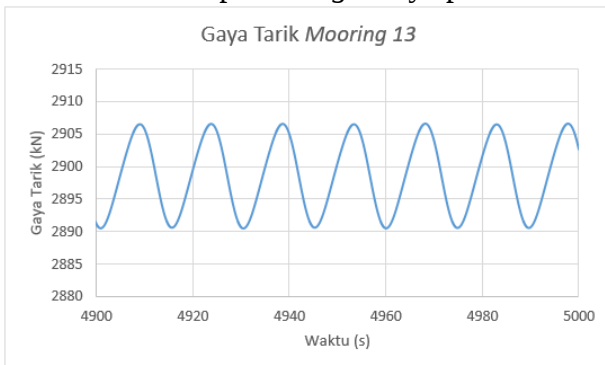
Gambar 10 Respons *Heave* Gaya pada Titik A



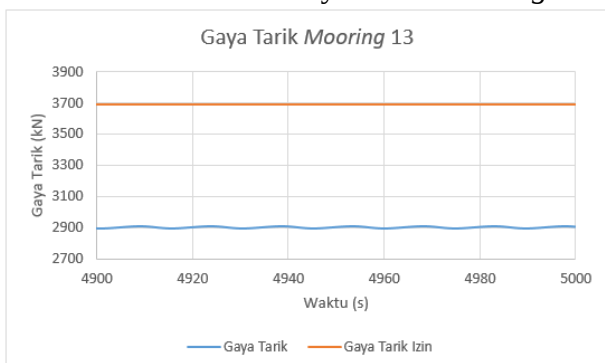
Gambar 11 Respons *Roll* Gaya pada Titik A



Gambar 12 Respons *Surge* Gaya pada Titik A



Gambar 13 Grafik Gaya Tarik *Mooring* 13



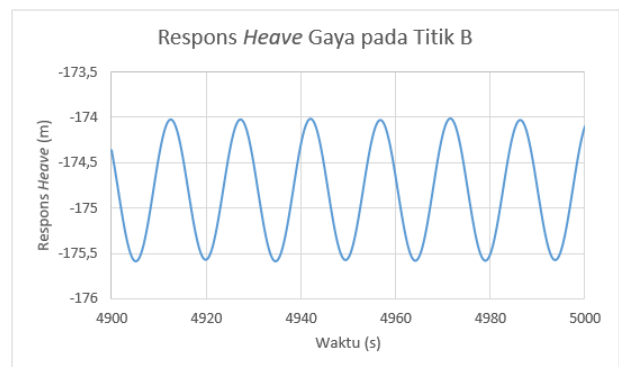
Gambar 14 Grafik Gaya Tarik *Mooring* 13
Sehingga nilai dari respon dan gaya tarik *mooring* maksimum akibat gaya pada titik A dapat dirangkum dalam **Tabel 4**.

Respons <i>Heave</i> Maksimum	1 (m)
Respons <i>Roll</i> Maksimum	1 (derajat)
Respons <i>Surge</i> Maksimum	32 (m)
Gaya Tarik <i>Mooring</i> Maksimum	2910 (kN)

Tabel 4 Rangkuman Respon Gaya pada Titik A

Analisis Dinamik Gaya Lingkungan pada Titik B

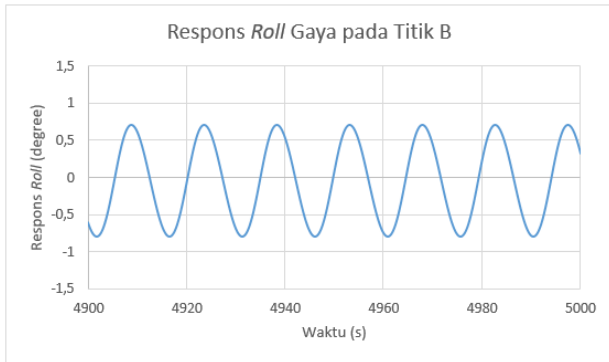
Hasil analisis dinamik gaya lingkungan pada titik B menghasilkan respon *Heave*, *roll*, *pitch*, *sway*, *surge*, dan gaya tarik *mooring* yang ditunjukkan pada **Gambar 15**, **Gambar 16**, **Gambar 17**, **Gambar 18**, **Gambar 19**, **Gambar 20** dan **Gambar 21**



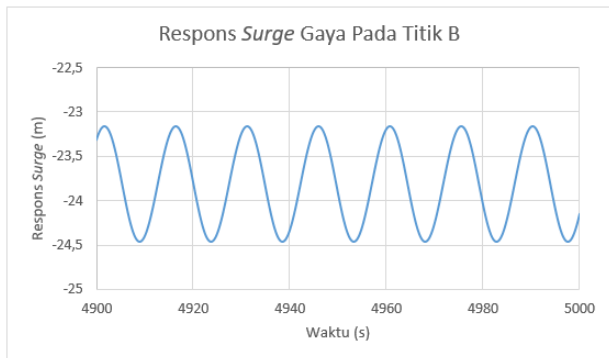
Gambar 15 Respons *Heave* Gaya pada Titik B



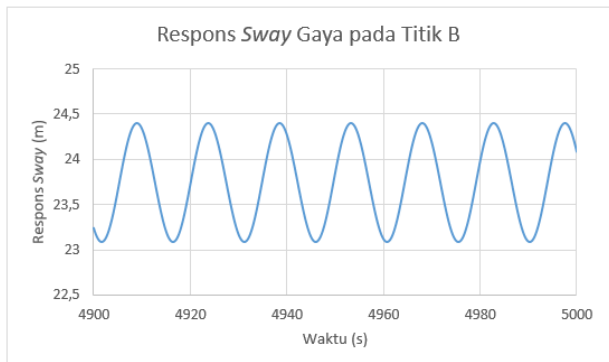
Gambar 16 Respons *Pitch* Gaya pada Titik B



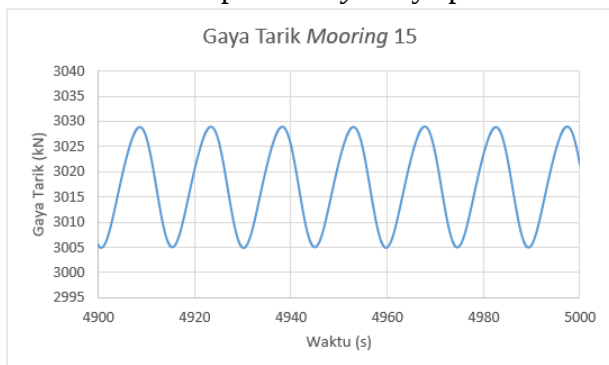
Gambar 17 Respons *Roll* Gaya pada Titik B



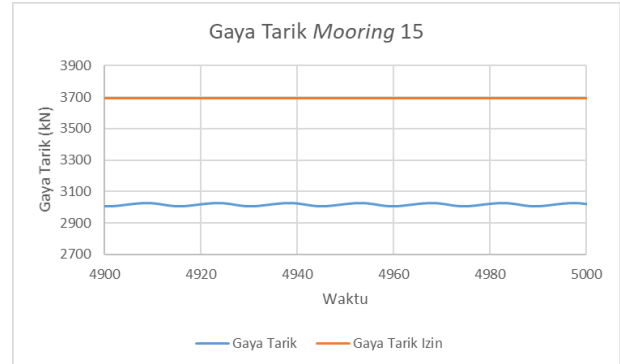
Gambar 18 Respons *Surge* Gaya pada Titik B



Gambar 19 Respons *Sway* Gaya pada Titik B



Gambar 20 Grafik Gaya Tarik *Mooring* 15



Gambar 21 Grafik Gaya Tarik *Mooring* 15
Sehingga nilai dari respon dan gaya tarik *mooring* maksimum akibat gaya pada titik A dapat dirangkum dalam **Tabel 5**.

Respons <i>Heave</i> Maksimum	1 (m)
Respons <i>Pitch</i> Maksimum	1 (derajat)
Respons <i>Roll</i> Maksimum	1 (derajat)
Respons <i>Surge</i> Maksimum	24,5 (m)
Respons <i>Sway</i> Maksimum	24,5 (m)
<i>Offset</i> Horizontal	34,7 (m)
Gaya Tarik <i>Mooring</i> Maksimum	3030 (kN)

Tabel 5 Rangkuman Respons Gaya pada Titik B

Pada Kedua kasus Tersebut, dapat diambil kesimpulan bahwa respon struktur terbesar yang dapat terjadi akibat gaya lingkungan dirangkum dalam **Tabel 6**.

Respons <i>Heave</i> Maksimum	1 (m)
Respons <i>Pitch</i> Maksimum	1 (derajat)
Respons <i>Roll</i> Maksimum	1 (derajat)
Respons <i>Surge</i> Maksimum	32 (m)
Respons <i>Sway</i> Maksimum	24,5 (m)
<i>Offset</i> Horizontal	34,7 (m)
Gaya Tarik <i>Mooring</i> Maksimum	3030 (kN)

Tabel 6 Rangkuman Respons
Respons gerak *surge* maksimum dari gaya pada titik A dan titik B memiliki nilai yang lebih kecil dari *surge* izin yaitu 37,5 m.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan analitik dan pemodelan pada struktur Spar desain, maka dapat disimpulkan:

1. Dimensi Spar:
 - a. Diameter : 35 m
 - b. Panjang : 190 m
 - c. ketebalan *hull* : 250 mm
 - d. tinggi *ballast* : 122,5 m
 - e. tebal *keel* : 1 m
 - f. *freeboard* : 15 m
 - g. *draft* : 175 m
2. Sistem *mooring*
 - a. Jenis : *Taut leg*
 - a. tipe : *Wire-Rope*
 - b. jumlah : 16
 - c. panjang : 6100 m
 - d. jarak horizontal : 6041 m
3. Respons
 - a. *heave* max : 1 m
 - b. *roll* max : 1 derajat
 - c. *offset* horizontal max : 34,7 m
 - d. gaya tarik max : 3030 kN

SARAN

Saran untuk pengembangan Tugas Akhir adalah sebagai berikut.

1. Perhitungan respons dinamik dengan memperhitungkan *mooring*.
2. Menggunakan *software* versi yang lebih baru karena *software* versi baru memiliki fitur – fitur lebih lengkap dalam memasukkan input desain.

DAFTAR PUSTAKA

- Chakrabarti, S. (2005). *Handbook of Offshore Engineering*.
- Det Norske Veritas. (2008). *Offshore Standard DNV - OS - E301 Position Mooring*.
- Engineers, US Army Corps of. (1984). *Shore Protection Manual Volume 1*.
- Robert, G. D., & Robert, A. D. (1984). *Water Wave Mechanics for Engineers and*

- Scientists*. London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Roylance, D. (2000). *Mechanics of Materials*. Cambridge: Wiley.
- Kementrian Perikanan dan Kelautan – RI. 2017. Arus Laut. <http://pusriskel.litbang.kkp.go.id/index.php/en/data/perairan-indonesia/category/457-arus-laut-juli-2017>
- Canuck. (1998). Chain and Shackle Specifications. <http://canuck.seos.uvic.ca/rkd/mooring/chainspecs.html>
- Navionics. Nautical Chart. <https://webapp.navionics.com/?lang=en#boating/mapOptions@7&key=tvbG%7B~vnU>
- Anadarko Petroleum Corporation. Heidelberg Project. https://www.anadarko.com/content/documents/apc/Operations/Gulf_of_Mexico/HeidelbergMediaBooklet-121916-small.pdf
- GlobalSecurity.org. (2019). https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/images/truss_spar.jpg
- GlobalSecurity.org. (2019). https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/images/classic_spar.jpg
- GlobalSecurity.org. (2019). https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/images/cell_spar.jpg
- Dr.ir. S.A. Miedema. 2019. Diperoleh dari [http://www.dredgingengineering.com/moorings/overview/Taut leg.jpg](http://www.dredgingengineering.com/moorings/overview/Taut%20leg.jpg)
- Tokyo Rope MFG. Co., Ltd. 2008. Diperoleh dari <http://www.tokyorope.co.jp/english/product/catalog/pdf/wirerope.pdf>