

ANALISIS PENGGANTIAN MOORING STRUKTUR TERAPUNG

Mooring Replacement on Floating Structures Analysis

Wisnu Setia Dharma ¹ dan Krisnaldi Idris, Ph.D²
Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan ITB,
Bandung email: wisnusetiadharma@gmail.com

ABSTRACT

Mooring system is a sea-keeping structure to withstand the load effect of environment on floating structures, so that the floating structures will not exceed the design criterion. After the mooring system have met the end of service life, assuming there is still oil reserve in the location, the replacement of the mooring system shall be made that the operation will keep going on. The main parameters of the analysis are tension on the cable and the response of the vessel. In this case study, is it mandatory to create models of the floating structures to gain the hydrodynamic properties and RAO of the model. Environmental loads used here are regular wave and random wave with JONSWAP theoretical spectrum. There are two major parts of the analysis: Mooring Installation and Mooring Operation. The analysis shall be made regarding the API RP2SK and DNV OS301 design criterion for tension and response of the vessel. In conclusion, tension at fairlead in mooring installation fit the design criterion, and response and tension of the floating structure in intact condition fits the design criterion, however the response of floating structure in damage condition exceed the design criterion.

Key Words/Phrase: *Mooring, Response, Tension, Replacement, Floating Structure*

PENDAHULUAN

Kebutuhan manusia dalam hal energi yang semakin meningkat merupakan suatu keniscayaan. Sumber energi terbesar manusia saat ini yang tidak dapat dipungkiri adalah minyak dan gas. Eksplorasi yang awalnya berada di daratan dan perairan dangkal pun bergerak menuju laut dalam demi memenuhi kebutuhan energi manusia. Sistem *mooring* diperlukan untuk menunjang keberjalanan upaya produksi minyak dan gas pada sebuah struktur terapung, yang seiring berjalannya waktu diperlukan penggantian *mooring* apabila masa layan struktur tersebut telah habis namun cadangan minyak dan gas masih tersedia, sehingga diperlukan studi kasus mengenai penggantian *mooring* tersebut, dalam kasus ini diketahui sebuah *Floating Production Unit* yang masih terus memproduksi namun masa layan dari *mooring*-nya telah habis.

Dalam penggantian *mooring*, diperlukan dua studi kasus yaitu ketika proses instalasinya dan ketika *mooring* sudah terpasang, adapun pemaparan proses instalasi *mooring* hanya untuk satu tali saja. Parameter desain dalam suatu kelayakan sistem *mooring* adalah *tension* yang terjadi pada tali tersebut dan respon pergerakan kapalnya akibat beban lingkungan. Oleh karena itu, pada setiap studi kasus yang dilakukan akan ditinjau kesesuaiannya pada parameter desain dengan mengacu pada API RP2SK dan DNV OS301. Adapun pembebanan lingkungan yang diberikan adalah akibat arus, angin, gelombang *regular* dan gelombang

irregular dalam tiga arah yaitu Utara, Timur Laut, dan Timur.

Untuk analisis akibat pembebanan akibat gelombang *irregular*, perlu ditinjau persebaran data dan spektrum dari respon dan *tension* yang terjadi untuk menguantifikasi besaran dari efek gelombang acak tersebut.

TEORI DAN METODOLOGI

Dalam tugas akhir ini berlaku teori gelombang difraksi dimana gaya eksitasinya menurut Chakrabarti dinyatakan dalam persamaan (1) berikut

$$F = - \int \rho \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} n \, ds + - \int \rho \frac{\partial \Phi_D}{\partial t} n \, ds \quad (1)$$

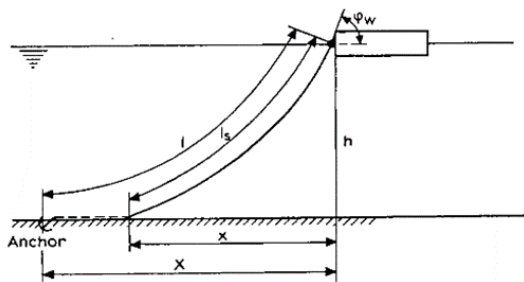
Lalu dari gaya eksitasi tersebut jika diberikan pada struktur maka akan terbentuk persamaan gerak struktur terapung yang dinyatakan dalam Chakrabarti dengan persamaan (2) berikut ini

$$(M + A)\ddot{X} + B\dot{X} + CX = F \quad (2)$$

Mooring yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah *catenary mooring*, ilustrasinya bersumber dari Faltinsen ditunjukkan pada **Gambar 1** di bawah ini

¹ Mahasiswa Tugas Akhir

² Dosen Pembimbing Tugas Akhir



Gambar 1 Sketsa Definisi Catenary Mooring
Sumber: Faltinsen, 1990

Dengan jarak vertikal tali *mooring* menurut Faltinsen pada setiap titik tinjau dinyatakan pada persamaan (3) berikut ini

$$Y = \frac{T_H}{w} \cosh \left[\frac{w}{T_H} (X - x) - 1 \right] \quad (3)$$

Tension yang terjadi pada setiap titik tinjau menurut McCormick dinyatakan pada persamaan (4) sebagai berikut

$$T = T_H \cosh \left[\frac{w}{T_H} (X - x) \right] \quad (4)$$

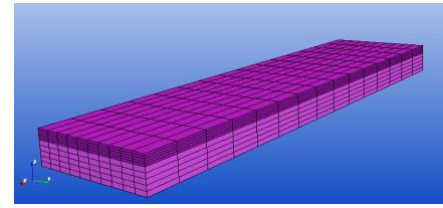
Analisis penggantian *mooring* dilakukan dengan beberapa tahapan yang diawali dengan pemodelan struktur terapung yang akan digunakan. Terdapat tiga model struktur terapung yang disederhanakan menjadi balok terapung dari bentuk asalnya sebuah kapal, balok tersebut dibuat dengan mempertahankan dimensi aslinya, setelah struktur selesai dimodelkan dihitung parameter hidrodinamik serta RAO dari model. Tiga buah struktur terapung yang dimodelkan tersebut adalah HUV, BOT, dan FPU.

Keluaran dari hasil pemodelan struktur terapung menjadi masukan dalam pemodelan proses instalasi *mooring* dan struktur *mooring* yang sudah terpasang. Proses instalasi *mooring* terbagi menjadi dua sub-bagian yaitu penurunan *mooring line* dan penurunan *suction pile* yang keduanya dibuat dalam tujuh fase yang merepresentasikan penurunan pada setiap kedalaman hingga mencapai *seabed*. Proses instalasi *mooring* hanya dibebani gelombang *regular*.

Pada studi kasus *mooring* terpasang, dilakukan dua pembebanan gelombang akibat gelombang *regular* dan *irregular*, konfigurasi *mooring* dari struktur adalah *spread mooring* dengan jumlah total 12 tali, konfigurasi tersebut mengikuti standar yang ada pada API RP2SK dikarenakan keterbatasan data.

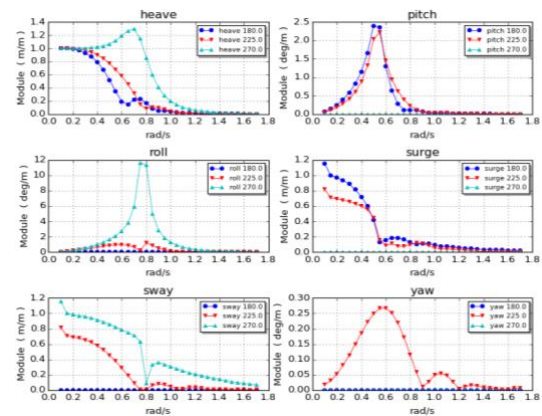
HASIL DAN ANALISIS

Berikut ini adalah ilustrasi hasil pemodelan struktur terapung yang disederhanakan menjadi balok terapung, dari tiga pemodelan struktur yang dibuat, pada **Gambar 2** yang ditampilkan hanya model struktur terapung FPU



Gambar 2 Hasil Pemodelan Struktur Terapung FPU

Warna yang berbeda menunjukkan bagian yang terendam oleh air dan tidak. Keluaran daripada pemodelan struktur adalah parameter hidrodinamik dan RAO, berikut ini akan ditampilkan RAO dari FPU. RAO ditampilkan dalam tiga arah saja sesuai dengan arah pembebanan lingkungan



Gambar 3 RAO FPU

Berdasar grafik RAO pada Gambar 3 di atas, frekuensi natural untuk setiap arah gerak respon tentu berbeda namun memiliki kecenderungan berada di frekuensi rendah. Frekuensi natural yang tidak berada pada frekuensi rendah disebabkan karena pemodelan struktur terapung menjadi balok yang tidak memiliki bentuk *hull* yang hidrodinamis.

Pembebanan gelombang *regular* dengan periode ulang 5 Tahun diberikan pada proses penurunan *suction pile* dan *mooring line* pada 7 fase, rekapitulasi hasilnya terpapar pada **Tabel 1** dan **Tabel 2** berikut ini

Tabel 1 Rekapitulasi Hasil Penurunan Suction pile

Penurunan Suction pile		
Fase	Paid Out Length (m)	Tension (kN)
Fase 1	100	1432.010599
Fase 2	300	1123.808612
Fase 3	500	1089.245043
Fase 4	700	1089.892408
Fase 5	1000	1110.756694
Fase 6	1050	1115.41429
Fase 7	1100	1120.277039

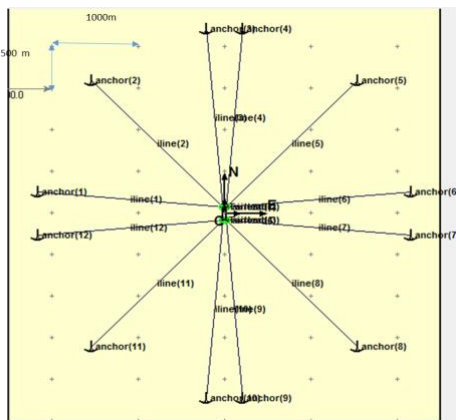
Tabel 2 Rekapitulasi Hasil Penurunan Mooring Line

Penurunan Mooring Line		
Fase	Paid Out Length (m)	Tension (kN)
Fase 1	100	703.36
Fase 2	300	826.96
Fase 3	500	929.73
Fase 4	700	1035.29
Fase 5	1000	1053.71
Fase 6	1050	1053.75
Fase 7	1100	1120.28

Tabel di atas menunjukkan nilai *tension* maksimum pada *fairlead* dari tiga arah akibat pembebanan gelombang *regular*. Nilai *tension* tersebut memiliki kecenderungan semakin besar seiring bertambahnya kedalaman, anomali besaran *tension* terjadi karena pemilihan metode pemodelan bertemu dengan keterbatasan dari perangkat lunak. Keseluruhan nilai *tension* yang terjadi masih memenuhi *safety factor* yang diatur dalam API RP2SK.

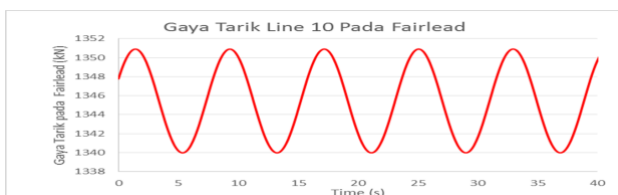
Pembebanan akibat gelombang *regular* dan *irregular* diberikan dalam rangka studi kasus *mooring* yang telah terpasang, dalam kondisi *intact* dan *damage*.

Tampak atas dari pemodelan terdapat pada **Gambar 4** berikut ini



Gambar 4 Tampak atas sistem mooring

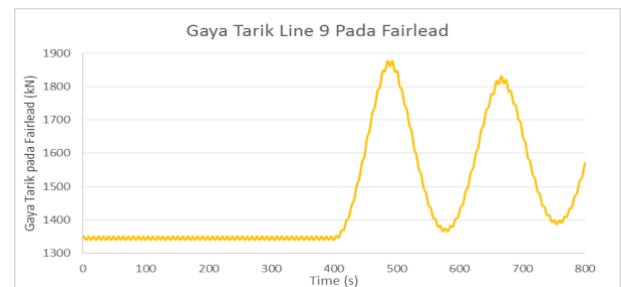
Simulasi dinamik akibat gelombang *regular* dijalankan selama 1800 detik, contoh hasil simulasi untuk *tension* maksimum pada kondisi *intact* terdapat pada Gambar 5 di bawah ini,



Gambar 5 Hasil Simulasi Tension Maksimum Akibat Gelombang Regular Kondisi Intact

Pada contoh hanya ditampilkan satu gambar karena karakteristik dari hasil simulasi akibat gelombang *regular* memiliki kesamaan, yaitu periodenya mengikuti periode gelombang. Pada Gambar 5 di atas, merupakan hasil simulasi arah Utara dengan $H_s = 2.5$ m dan $T_s = 5.98$ s sehingga dapat terlihat pada gambar terjadi pengulangan puncak setiap sekitar 6 s mengikuti periode gelombang.

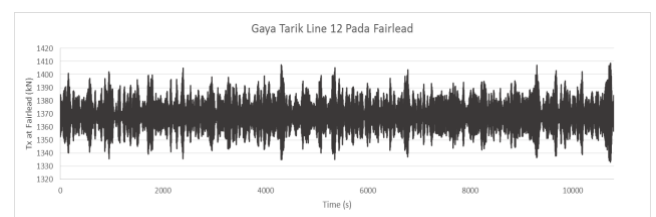
Contoh hasil simulasi untuk *tension* maksimum pada kondisi *damage* terdapat pada Gambar 6 berikut



Gambar 6 Hasil Simulasi Tension Maksimum Akibat Gelombang Regular Kondisi Damage

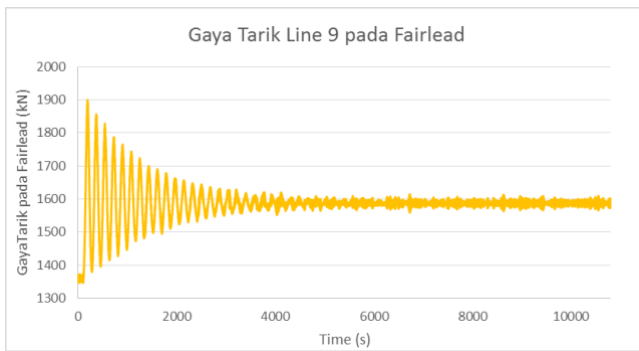
Pada gambar di atas terlihat ada perubahan signifikan dari *tension* yang terjadi sebelum tali putus, yaitu sebelum detik ke-400, dan setelahnya. Setelah tali putus *tension* akan berosilasi dan semakin teredam pada nilai rata-rata yang baru. Seluruh osilasinya mengikuti periode gelombang

Pada pembebanan akibat gelombang *irregular* dengan periode ulang 100 Tahun, digunakan spektrum gelombang JONSWAP. Pada abstrak ini hanya akan ditampilkan hasil simulasi dinamik *tension* maksimum yang terjadi akibat gelombang arah Timur, simulasi dinamik dilakukan selama 3 jam. Hasil simulasi yang menghasilkan *Tension* maksimum akibat gelombang *irregular* pada kondisi *intact* terdapat pada **Gambar 7** berikut ini



Gambar 7 Hasil Simulasi Tension Maksimum Akibat Gelombang Irregular Kondisi Intact

Tension yang terjadi bersifat acak dengan nilai, untuk memastikan *tension* ini berada pada pengaruh gelombang pada abstrak ini akan ditampilkan sebaran datanya dan analisis pada domain frekuensi. Hasil *tension* maksimum akibat gelombang *irregular* pada kondisi *damage* adalah sebagai berikut



Gambar 8 Hasil Simulasi Tension Maksimum Akibat Gelombang Iregular Kondisi Intact

Pada kondisi *damage*, tali diputus pada detik ke-100. Setelah diputus, *tension* akan meningkat secara signifikan dengan tetap berosilasi. Dengan adanya redaman *tension* akan teredam hingga tercapai nilai rata-rata yang baru sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 8**.

Rekapitulasi *tension* dan respon maksimum yang terjadi pada studi kasus *mooring* terpasang disampaikan pada **Tabel 3** berikut ini

Tabel 3 Rekapitulasi Hasil Studi Kasus Mooring Terpasang

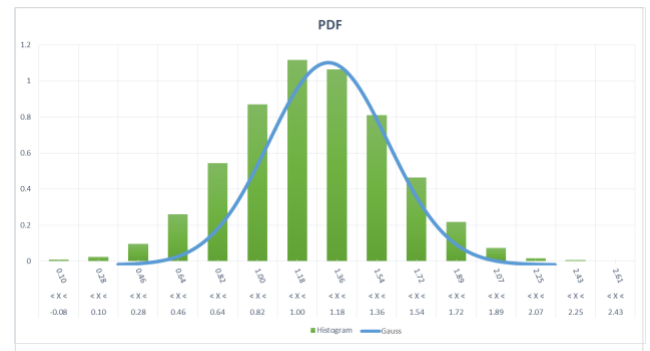
Gelombang	Kondisi	Respon	Tension
Reguler	Intact	1.25 m	1350 kN
	Damage	35 m	1876 kN
Iregular	Intact	2.5 m	1412 kN
	Damage	35.2 m	1911.5 kN

Untuk *tension*, keseluruhan hasilnya masih memenuhi standar keamanan yang disyaratkan oleh API-RP2SK. Untuk respon, seluruh respon dalam kondisi *damage* mengalami kegagalan.

Selanjutnya akan dilihat sebaran data *tension* dan respon akibat gelombang ireguler arah Timur pada kondisi *intact*, jika histogram distribusi dan PDF teoritis digabung pada satu grafik, hasilnya ada pada **Gambar 9** dan **Gambar 10** berikut ini



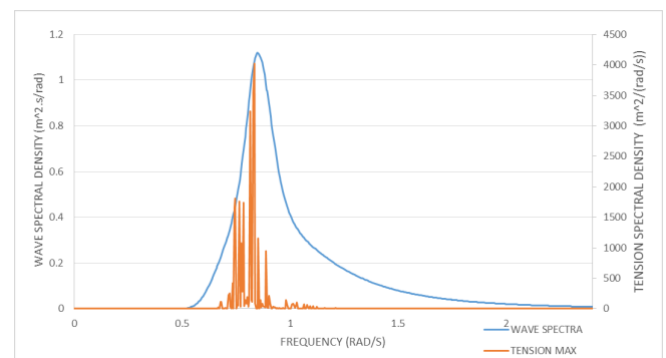
Gambar 9 PDF Tension Dari Time Series dan Teoritis



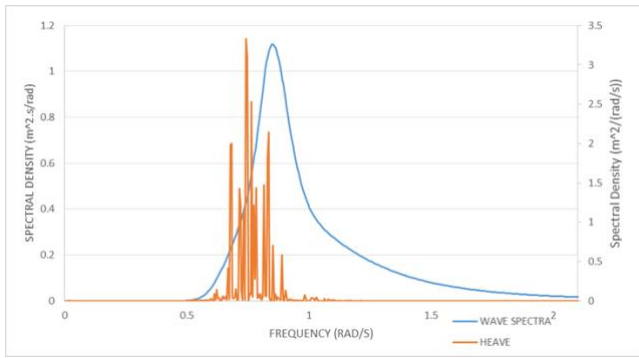
Gambar 10 PDF Respon Dari Time Series dan Teoritis

PDF dari *time series* mengikuti pola distribusi normal, maka karakteristik daripada distribusi normal berlaku. Berdasarkan karakteristik distribusi normal didapat nilai maksimum dari distribusi adalah 1402.86 kN dan nilai minimum 1332.71 kN. Hal serupa ditemukan juga pada PDF dari respon sway dengan nilai maksimum 2.5 m dan minimum 0.07 m. Dalam tugas akhir ini, didapatkan nilai rata-rata dijumlah dengan tiga kali nilai standar deviasi (nilai maksimum) memiliki nilai yang lebih kecil daripada nilai maksimum gaya tarik yang terjadi. Hal ini disebabkan karena pemodelan yang dilakukan berada pada rentang terjadinya tinggi gelombang maksimum, selain itu simulasi pemodelan yang dilakukan selama 10800 detik sudah sesuai dengan standar API RP2L dimana pemodelan untuk analisis sistem *mooring* dilakukan selama 3 jam.

Selanjutnya akan ditinjau *spectrum* dari *tension* dan respon yang dibandingkan dengan *spectrum* gelombang, ilustrasinya terdapat pada **Gambar 11** dan berikut ini



Gambar 11 Spektrum Gaya Tarik Maksimum dan Spectrum Gelombang



Gambar 12 Spektrum Respon Heave dan Spectrum Gelombang

Pada **Gambar 11** dan **Gambar 12** di atas terlihat *spectrum tension* dan respon berada di bawah *spectrum gelombang*, dengan frekuensi puncak pada 0.85 rad/s ($T_p=7.4s$) yang sama dengan frekuensi puncak gelombang, sehingga dapat disimpulkan bahwa respon struktur dipengaruhi oleh beban gelombang.

KESIMPULAN

Kesimpulan Studi Kasus Instalasi *Mooring* adalah

1. *Tension* maksimum yang terjadi pada kegiatan penurunan *suction pile* memiliki nilai yang lebih besar daripada *tension* yang terjadi pada kegiatan penurunan *mooring line*, hal ini dikarenakan berat dari *suction pile* yang lebih besar daripada *SMC Male* dan ukuran vessel yang lebih besar,
2. *Tension* maksimum yang terjadi pada kegiatan penurunan *suction pile* dan penurunan *mooring line* sebesar 1432 kN berada di bawah *allowable minimum breaking load* sebesar 3188 kN dan memenuhi standar *safety factor* pada API RP2SK.
3. Metode pemodelan yang digunakan dalam tugas akhir ini terbentur oleh batasan yang ada pada *software*, yaitu:
 - a) Pemodelan titik akhir *suction pile* dan *subsea mooring connector* yang mengapung sebagai titik *anchor* sehingga tumpuannya bersifat *fixed* ketika seharusnya menggantung bebas,
 - b) Proses penurunan *subsea mooring connector* seharusnya dimodelkan pada kapal yang bergerak dengan kecepatan tertentu, Ariane7 tidak dapat memodelkan hal tersebut,
 - c) Bentuk daripada *suction pile* dan *subsea mooring connector* seharusnya tidak menyerupai bentuk *mooring line* tetapi dimodelkan sebagai silinder yang terintegrasi dengan *mooring line*, karena struktur dari *suction pile* dan *subsea*

mooring connector seharusnya memiliki parameter struktur tersendiri

Kesimpulan Studi Kasus *Mooring* Terpasang adalah

1. *Tension* maksimum yang terjadi pada kegiatan penggantian *mooring* akibat gelombang *regular* pada kondisi *intact* sebesar 1350 kN masih berada di bawah *allowable minimum breaking load* sebesar 2270 kN dan *damage* sebesar 1876 kN masih berada di bawah *allowable minimum breaking load* sebesar 3033 kN dan memenuhi standar *safety factor* di API RP2SK,
2. Nilai perpindahan struktur maksimum akibat gelombang *regular* untuk kondisi *intact* sebesar 1.25 m memenuhi kriteria desain sebesar 6m, sedangkan nilai perpindahan struktur maksimum pada kondisi *damage* sebesar 35 m tidak memenuhi kriteria desain sebesar 6 m.
3. *Tension* maksimum yang terjadi pada kegiatan penggantian *mooring* akibat gelombang *irregular* pada kondisi *intact* sebesar 1412 kN masih berada di bawah *allowable minimum breaking load* sebesar 2270 kN dan *damage* sebesar 1911.5 kN masih berada di bawah *allowable minimum breaking load* sebesar 3033 kN dan memenuhi standar *safety factor* di API RP2SK,
4. Nilai perpindahan struktur maksimum akibat gelombang *regular* untuk kondisi *intact* sebesar 2.5 m memenuhi kriteria desain sebesar 6 m, sedangkan nilai perpindahan struktur maksimum pada kondisi *damage* sebesar 35.18 m tidak memenuhi kriteria desain sebesar 6 m.

SARAN

1. Perlu data *hull* dari struktur terapung sehingga bisa dilakukan pemodelan dari struktur sesuai bentuk aslinya, agar hasil yang didapat lebih merepresentasikan kondisi nyata.
2. Perlu dilakukan metode pemodelan yang tepat sehingga tidak berbenturan dengan keterbatasan *software*, dengan terlebih dahulu menelusuri kemampuan dari *software* lebih jauh lagi.
3. Perlu dilakukan pemodelan dengan *software* yang sanggup memodelkan tahapan instalasi *mooring* dengan meminimalisir penyederhanaan kondisi aktual.
4. Perlu dilakukan pemodelan dengan menyesuaikan koordinat *mooring* sesuai kondisi di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- American Petroleum Institute. 2005. *API RP 2SK: Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*. Washington D.C. : American Petroleum Institute
- Research Department Bureau Veritas. 2011. *Ariane 7 User Guide*. Veristar Offshore.
- Research Department Bureau Veritas. 2014. *Hydrostar fo Experts User Manual*. Veristar Offshore
- Chakrabarti, Subrata K. 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Plainfield: Computational Mechanics Publication
- Dean, Robert G. dan Robert A. Dalrymple. 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientist*. Singapura: World Scientific
- Faltinsen, O.M. 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structure*. Cambridge: Cambridge University Press
- Goda, Yoshimi. 2010. *Random Seas And Design Of Maritime Structures*. Singapura: World Scientific
- Hotma, Gerhard Fernanto. 2010. *Prosedur Instalasi Mooring Pada Floating Production Unit (FPU)*. Laporan Tugas Akhir Tidak Diterbitkan. Bandung: Institut Teknologi Bandung
- McCormick, Michael E. 2010. *Ocean Engineering Mechanics with Applications*. Cambridge: Cambridge University Press
- Paz, Mario. 1985. *Structural Dynamics: Theory and Computation*. New York: Van Nostrand Reinhold Company
- Putri, Anggraeni Eka. 2015. *Analisis Sistem Mooring Pada Pipelay Barge Dalam Kegiatan Instalasi Bawah Laut*. Laporan Tugas Akhir Tidak Diterbitkan. Bandung: Institut Teknologi Bandung
- Seno Field Deepwater Facilities. 2000. *Field Design Basis Summary*