

STUDI PERBANDINGAN PERFORMA *HULL FORM* FPSO BERBENTUK KAPAL DAN FPSO BERBENTUK SILINDER DI PERAIRAN LEPAS PANTAI UTARA NATUNA-INDONESIA

Rani Komala Sari¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Good Rindo¹⁾

¹⁾ S1 Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Indonesia

Email: ranikomalasari34@yahoo.com , ahmadfzakki@undip.ac.id , goodrindo@undip.ac.id

Abstrak

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) menjadi salah satu alternatif pilihan yang diminati Investor. Dari segi investasi lebih efisien dari pada FSO, karena FPSO selain *mobile* juga dapat melakukan proses produksi, serta *reliability* dalam pengoperasiannya. Revolusi teknologi di bidang FPSO kini berkembang dari *hull form* berbentuk kapal konvensional menjadi *hull form* berbentuk silinder. Ditinjau dari bentuk lambungnya FPSO silinder menawarkan kelebihan-kelebihan antara lain: olah gerak, kompartemen tanki, stabilitas dan kekuatan memanjang yang lebih baik dari FPSO berbentuk kapal. Berdasarkan studi literatur tersebut, maka dilakukanlah studi perbandingan performa *hull form* antara FPSO berbentuk kapal dan FPSO berbentuk Silinder yang akan dioperasikan pada perairan lepas pantai Utara Natuna. Dari hasil analisa kekuatan memanjang FPSO Kapal memiliki moment yang lebih signifikan 417,11 ton.m dan FPSO Silinder 45,53 ton.m. Dilihat dari olah geraknya FPSO Kapal memiliki gerakan *heave* yang lebih baik dari silinder saat sudut gelombang 90°, 135°, dan 180°. Namun FPSO Silinder memiliki gerakan *Roll*, dan *Pitch* yang lebih baik dari FPSO Kapal saat sudut gelombang 90°, 135°, dan 180°. Berdasarkan hasil analisis numerik yang dilakukan tersebut, keduanya layak untuk beroperasi namun FPSO Silinder lebih banyak menawarkan keunggulan performa. Dari keunggulan yang ditawarkan tersebut, FPSO Silinder dapat dijadikan acuan alternatif pilihan *hull form* yang lebih menguntungkan untuk dioperasikan di lepas pantai Indonesia khususnya Utara Natuna - Indonesia.

Kata kunci: *Reliability* , Stabilitas, *Hull Form*, *Heaving*, *Rolling*, *Pitching*, Utara Natuna

Abstract

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) became one of the alternative options that investors demand. In terms of investment is more efficient than the FSO, FPSO apart because the mobile can also make the production process, as well as *reliability* in operation. The technological revolution in the field of FPSO *hull form* has now evolved from conventional ship shaped into cylindrical *hull form*. Judging from the shape of cylindrical FPSO hull offers advantages such as: navigation, compartment tank, stability and longitudinal strength better than ship-shaped FPSO. Based on the literature study, we conducted a study perbandingan performance *hull form* of the ship-shaped FPSO and FPSO-shaped cylinder that will be operated on the offshore waters of the North Natuna. From the analysis of longitudinal strength of the FPSO vessel has a more significant moment ton.m 417.11 and 45.53 Cylindrical FPSO ton.m. Judging from the FPSO vessel if the motion had better *heave* motion of the cylinder when the wave angle of 90 °, 135 °, and 180 °. But have a Cylinder FPSO motions *Roll*, and *Pitch* better than the FPSO vessel is currently a wave angle of 90 °, 135 °, and 180 °. Based on the results of the numerical analysis performed, both deserve to operate but more Cylindrical FPSO offers superior performance. Of the advantages offered, Cylindrical FPSO referable alternative *hull form* which is more profitable to operate off the coast of Indonesia, particularly the North Natuna - Indonesia.

Keywords: *Reliability*, *Stability*, *Hull Form*, *Heaving*, *Rolling*, *Pitching*, North Natuna

1. PENDAHULUAN

a. Latar Belakang

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral [1] menjelaskan, Indonesia dikaruniai sumber daya alam melimpah. Sumber daya minyak dan gas yang diperkirakan mencapai 87,22 miliar barel dan 594,43 TSCF tersebar dibanyak titik di Indonesia. Salah satu cadangan hidrokarbon yang sedang dieksplor adalah lepas pantai Utara Natuna. Secara astronomis, Kabupaten Natuna terletak pada titik koordinat 1016' – 7019' LU dan 105000' – 110000' BT.

Kepulauan Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik bahkan di Dunia. Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik Hal ini merujuk pada salah satu ladang gas yang terletak 225 kilometer (km) sebelah utara Natuna. Kurang lebih tersimpan cadangan gas alam dengan volume sebesar 222 triliun kaki kubik (TCT). Selain itu, gas hidrokarbon yang bisa ditambang mencapai 46 TCT. Angka itu tentu saja belum termasuk cadangan gas alam yang terdapat di bagian barat Natuna.[6] Untuk mengeksplor cadangan hidrokarbon yang tersebar dibanyak titik tersebut maka FPSO menjadi salah satu alternatif pilihan yang diminati investor dari segi investasi lebih efisien karena FPSO menjadi salah satu alternatif pilihan yang diminati Investor dari segi investasi lebih efisien dari pada FSO karena FPSO selain *mobile* juga dapat melakukan proses produksi, serta *reliability* dalam pengoperasiannya

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) adalah sebuah fasilitas di atas bangunan terapung yang dioperasikan di suatu ladang minyak dan gas bumi lepas pantai yang berfungsi untuk menerima, memproses, menyimpan dan menyalurkan hidrokarbon yang secara permanen ditambatkan di tempatnya beroperasi dan dapat dipindahkan dari satu tempat ke tempat lain. Ditinjau dari bentuk bangunannya, FPSO terbagi menjadi dua yaitu berbentuk kapal dan berbentuk silinder.

Berdasarkan dari bentuk lambungnya, FPSO silinder menawarkan olah gerak, stabilitas dan kekuatan memanjang yang lebih baik dari FPSO berbentuk kapal [2]. Sebagai akedemisi di bidang naval architecture ingin melakukan penelitian mengenai hal tersebut tersebut, maka pada Tugas Akhir ini akan di lakukannya “Studi

Perbandingan Performa *Hull Form* FPSO Berbentuk Kapal dan FPSO Berbentuk Silinder di Perairan Lepas Pantai Utara Natuna-Indonesia”.

Kondisi lingkungan lepas pantai Utara Natuna dipilih sebagai salah satu contoh karena disana memiliki kondisi lingkungan laut yang ekstrim dan merupakan pengasil hidrokarbon yang sedang dieksplor. Harapannya, hasil dari studi perbandingan ini dapat menjadi acuan dalam pemilihan alternatif desain bentuk lambung yang tepat untuk kondisi lingkungan perairan lepas pantai Indonesia khususnya Utara Natuna.

b. Rumusan Masalah

Pertama kali FPSO berbentuk kapal tongkang didedikasikan oleh *Arco* yang diberi nama *Ardjuna* dan beroperasi pada kedalaman 42,7 meter di Lepas Pantai Laut Jawa pada tahun 1976 (D'Souza et al. 1994). Kemudian disusul FPSO *Castellon* di lepas pantai Itali pada tahun 1977 yang berbentuk kapal Tanker dengan desain masa operasi hingga 10 tahun. Seiring meningkatnya kebutuhan minyak-gas bumi dan untuk efisiensi biaya eksplorasi kini FPSO-FPSO yang beroperasi didesain dengan masa operasi hingga 100 tahun [3].

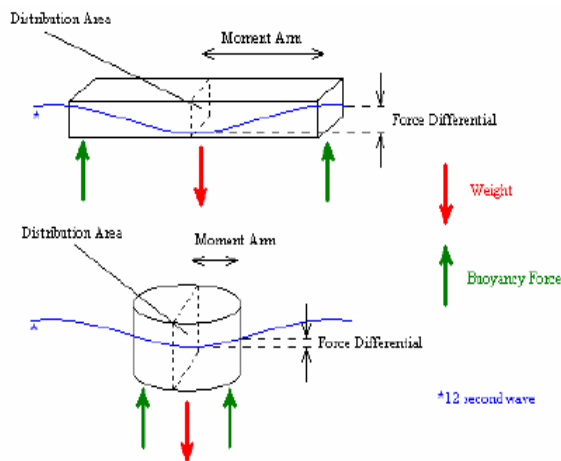
Revolusi teknologi dibidang FPSO tidak berhenti sampai disitu, kini FPSO tidak hanya berbentuk kapal tapi juga berbentuk silinder. FPSO silinder pertama di dunia adalah FPSO *Sevan Piranema*. FPSO silinder tersebut merupakan hak paten desain dari *Sevan Marine* yang beroperasi pada tahun 2007 dilepas pantai Brazil dengan desain operasi di perairan ultra-dalam, mulai 1000 m – 1600 m [2]. Kemudian disusul dengan pembangunan FPSO silinder lainnya antara lain: FPSO *Hummingbird*, FPSO *Voyageur* dan FPSO *Golliath*.

Ditinjau dari bentuk lambungnya FPSO silinder menawarkan kelebihan-kelebihan antara lain: olah gerak, equilibrium, stabilitas dan kekuatan memanjang yang lebih baik dari FPSO berbentuk kapal [2]. FPSO Kapal memiliki gerakan roll yang signifikan dari pada FPSO berbentuk silinder. Tentunya untuk mengatasi tingginya intensitas gerakan yang terjadi maka dibutuhkan biaya yang mahal untuk sistem tambat pada FPSO berbentuk kapal.[4]

FPSO berbentuk Kapal memiliki kapasitas berbeda tiap kompartemen tankinya yang

mendistribusi berat muatan dari sekat kamar mesin sampai sekat tubrukan sedangkan FPSO berbentuk silinder memiliki kompartemen yang memiliki tanki dengan kapasitas merata dan terpusat ke tengah. Hal tersebut menyebabkan kestabilan FPSO Kapal tidak lebih baik dari silinder yakni memiliki lengan GZ lebih pendek dari silinder. [4]

Berdasarkan struktur lambung FPSO kapal yang ramping dan memanjang hampir menyerupai kotak dibandingkan struktur lambung silinder yang bulat dan kompak menyebabkan *bending moment* dan *force* pada FPSO berbentuk kapal lebih *significant* dari pada Silinder ketika mendapat gaya dari gelombang.[5] Gambar dibawah ini merupakan contoh ilustrasi fenomena tersebut.



Gambar 1. *Forces, Bending Moment* dan *Stresses* pada Balok dan Silinder Saat Mendapat Gaya dari Gelombang

Pada Gambar diatas dapat dilihat bahwa *force* pada balok jauh lebih besar dari pada silinder dikarenakan lengan moment pada kapal lebih panjang dari pada silinder. Lengan moment pada kapal jauh lebih panjang akibat dari beban dari tengah kapal dan gaya angkat yang terletak pada *after* dan *forepeak* kapal.

Kelebihan – kelebihan yang ditawarkan FPSO berbentuk Silinder berdasarkan dari studi litelatur tersebut yang melatarbelakangi dilakukannya studi perbandingan antara FPSO berbentuk kapal dan silinder agar didapatkan hasil numeriknya.

c. Tujuan Penelitian

Tujuan utama studi perbandingan ini diharapkan mampu membuktikan kelebihan-kelebihan FPSO silinder secara teknis dan numerik. Tentunya studi perbandingan *hullform* dilakukan dengan menggunakan FPSO yang memiliki volume ruang muat yang kurang lebih hampir sama . Adapun tujuan khusus dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mendapatkan ukuran utama *hull form* FPSO berbentuk kapal dan Silinder dari SEVAN MARINE
- Mendapatkan model *hullform* FPSO berbentuk kapal dan silinder dengan bantuan *software Rhinoceros 5.0*
- Mendapatkan model pembagian kompartemen tanki dengan bantuan *software Maxsurf*
- Melakukan analisis numerik pada FPSO Kapal dan Silinder untuk mendapatkan karakteristik equilibrium, stabilitas, kekuatan memanjang dan olah gerak masing-masing objek.

d. Manfaat Tugas Akhir

Studi perbandingan *hull form* FPSO berbentuk kapal dan FPSO berbentuk silinder ini dapat menjadi acuan dalam pemilihan alternatif bentuk lambung yang tepat untuk perairan lepas pantai Indonesia khususnya lepas pantai Utara Natuna.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Wilayah Natuna

Secara astronomis, Kabupaten Natuna terletak pada titik koordinat 1016' – 7019' LU dan 105000' – 110000' BT. [6] Kepulauan Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik bahkan di Dunia. Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik Hal ini merujuk pada salah satu ladang gas yang terletak 225 kilometer (km) sebelah utara Natuna. Kurang lebih tersimpan cadangan gas alam dengan volume sebesar 222 triliun kaki kubik (TCT). Selain itu, gas hidrokarbon yang bisa ditambah mencapai 46 TCT. Angka itu tentu saja belum termasuk cadangan gas alam yang terdapat di bagian barat Natuna. Adapun kondisi lingkungan perairan lepas pantai Utara Natuna [7] sebagai berikut:

PERINGATAN CUACA BURUK						
Gelombang Laut dengan tinggi 2.0 meter sampai 3.0 meter berpeluang dapat terjadi di : Laut Cina Selatan Utara Natuna						
RINGKASAN KONDISI CUACA						
Angin di atas wilayah Perairan Kalimantan Barat, di Utara Khatulistiwa umumnya bertiup dari Barat Daya hingga Barat, dan di Selatan Khatulistiwa umumnya bertiup dari arah Tenggara hingga Barat Daya dengan kecepatan angin berkisar antara 3 sampai 27 Knot.						
Keadaan cuaca di Perairan Kalimantan Barat pada umumnya Hujan Ringan - Hujan Sedang						
Tinggi Gelombang Maksimum di Perairan Kalimantan Barat 0.5 - 3.0 meter dengan arah gelombang dari Tenggara hingga Barat Daya.						
NO	NAMA WILAYAH PERAIRAN	ARAH ANGIN	KEC. ANGIN (KNOT)	CUACA	TINGGI GEL. SIG (METER)	TINGGI GEL. MAX (METER)
1	Laut Cina Selatan utara Natuna	Barat Daya - Barat	15 - 20 KT	Hujan Ringan	1.0 - 2.0 M	2.0 - 3.0 M
2	Perairan Kep. Natuna	Selatan - Barat Daya	10 - 15 KT	Hujan Ringan	0.3 - 0.7 M	1.0 - 2.0 M
3	Perairan Kep. Anambas	Selatan - Barat Daya	8 - 13 KT	Hujan Ringan	0.3 - 0.7 M	0.7 - 1.5 M
4	Laut Natuna	Tenggara - Barat Daya	10 - 15 KT	Hujan Ringan	0.3 - 0.7 M	1.0 - 2.0 M

Tabel 1. Data Lingkungan Perairan Utara Natuna

2.2 FPSO (Floating Production, Storage and Offloading)

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) adalah sebuah fasilitas di atas bangunan terapung yang dioperasikan di suatu ladang minyak dan gas bumi lepas pantai yang berfungsi untuk menerima, memproses, menyimpan dan menyalurkan hidrokarbon yang secara permanen ditambatkan di tempatnya beroperasi dan dapat dipindahkan dari satu tempat ke tempat lain. FPSO menjadi salah satu alternatif pilihan yang diminati investor dari segi investasi lebih efisien karena FPSO bersifat *mobile* dapat dipindah dari satu titik ke titik lain, perilaku hidrodinamis, kemampuan mobilitas, serta *reliability* dalam pengoperasiannya.

2.3 Revolusi Teknologi FPSO Berbentuk Kapal ke Bentuk Silinder

Pertama kali FPSO berbentuk kapal tongkang didedikasikan oleh *Arco* yang diberi nama *Ardjuna* dan beroperasi pada kedalaman 42,7 meter di Lepas Pantai Laut Jawa pada tahun 1976 (D'Souza et al. 1994). Kemudian disusul FPSO *Castellon* di lepas pantai Itali pada tahun 1977 yang berbentuk kapal Tanker dengan desain masa operasi hingga 10 tahun. Seiring meningkatnya kebutuhan minyak-gas bumi dan untuk efisiensi biaya eksplorasi kini FPSO-FPSO yang beroperasi didesain dengan masa operasi hingga 100 tahun [3].

Revolusi teknologi dibidang FPSO tidak berhenti sampai disitu, kini FPSO tidak hanya berbentuk kapal tapi juga berbentuk silinder. FPSO silinder pertama di dunia adalah FPSO *Sevan Piranema*. FPSO silinder tersebut merupakan hak paten dari *Sevan Marine* yang beroperasi pada tahun 2007 dilepas pantai Brazil dengan desain operasi di perairan ultra-dalam,

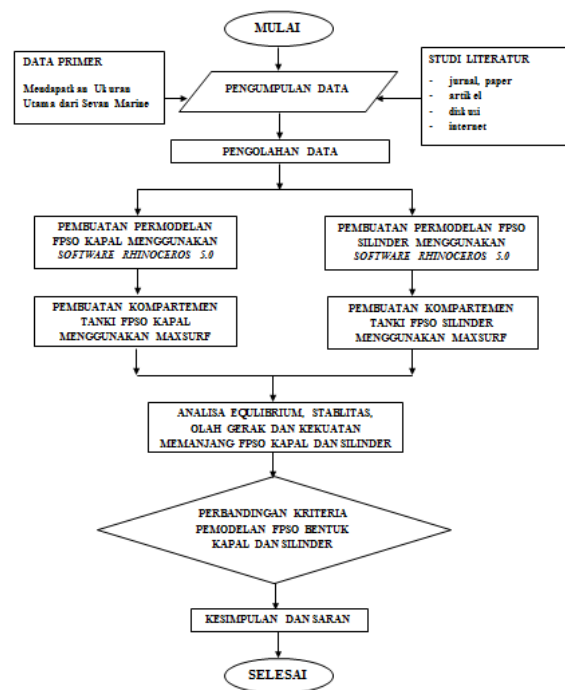
mulai 1000 m – 1600 m [2]. Kemudian disusul dengan pembangunan FPSO silinder lainnya antara lain: FPSO *Hummingbird*, FPSO *Voyageur* dan FPSO *Golliath*.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Adapun langkah-langkah dalam melakukan studi perbandingan ini adalah :

1. Mendesain model FPSO berbentuk Silinder dan Kapal yang memiliki jumlah DWT yang kurang lebih sama dengan ukuran utama yang didapat dari *Sevan Marine*
2. Membuat kompartemen tanki pada FPSO berbentuk kapal dan silinder
3. Menganalisa stabilitas, equilibrium dan olah gerak serta kekuatan memanjang FPSO berbentuk Kapal dan Silinder.

Metode yang digunakan pada penelitian ini terangkum secara sistematis dalam diagram alir di bawah ini :



4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Desain Hullform FPSO Berbentuk Silinder Beserta Kompartemen Tanki

Ukuran utama desain FPSO berbentuk kapal [2]:

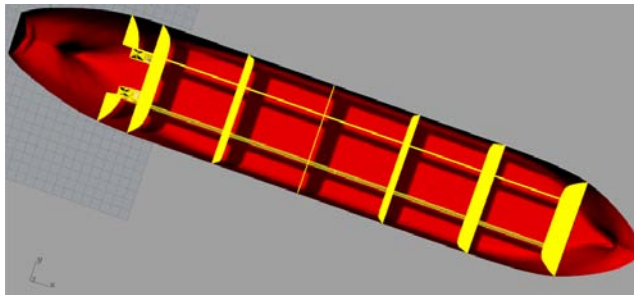
- LPP : 300,313 m
- B : 52,69 m

- H : 25 m
- T : 16 m
- CB : 0,8
- Disp Δ : 206088 ton
- LWT : 31292,487 ton
- DWT : 174795,513 ton



Gambar 2. Desain Hullform FPSO Kapal

Dari model yang telah dibuat maka dilanjutkan dengan pembuatan kompartemen tanki, sebagai berikut:

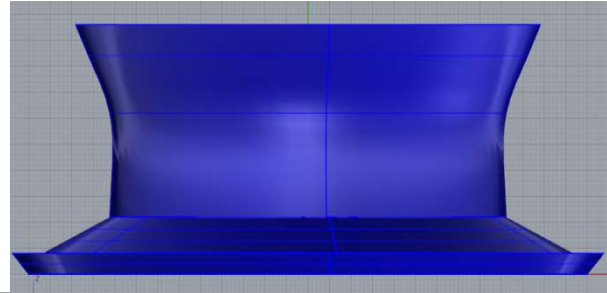


Gambar 3. Desain 3D Kompartemen Tanki Kapal

4.2. Desain Hullform FPSO Berbentuk Silinder Beserta Kompartemen Tanki

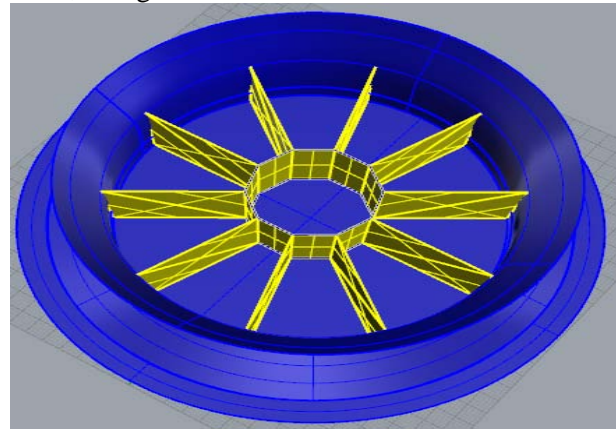
Ukuran utama desain FPSO berbentuk silinder [2]:

- Hull Diameter : 93 meter
- Bilge Box Diameter : 124 meter
- Bilge Box diameter : 138 meter
- Main Deck Diameter : 103 meter
- Process Deck Diameter : 109 meter
- Draft, ballast : 42 meter
- Draft Loaded : 48 meter
- Constant Draft : 27 meter
- Freeboard to Ballast : 20 meter
- Freeboard to Loaded : 11 meter
- Cb : 0,959
- Displacement : 260097 ton
- LWT : 94203,967 ton
- DWT : 165893,033 ton



Gambar 4. Desain Hullform FPSO Silinder

Dari model yang telah dibuat maka dilanjutkan dengan pembuatan kompartemen tanki, sebagai berikut:



Gambar 5. Desain 3D Kompartemen Tanki Kapal

4.3. Analisa Equilibrium dan Stabilitas

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	x (+ve aft) Arm m	y (+ve stbd) Arm	z (+ve up) Arm
Lightship	1	31292,49	31292,5			-156,57	0	7,603
OIL TANK 1 CENTER	100%	8767,533	8767,53	9284,69	9284,69	-271,813	0	8,027
OIL TANK 2 CENTER	100%	19830,3	19830,3	21000	21000	-233,95	0	8
OIL TANK 3 CENTER	100%	17601,75	17601,7	18640	18640	-184,4	0	8
OIL TANK 4 CENTER	100%	17601,75	17601,8	18640	18640	-137,8	0	8
OIL TANK 5 CENTER	100%	21334,06	21334	22592,4	22592,4	-86,259	0	8,003
OIL TANK 2 PORT	100%	10380,71	10380,7	10993	10993	-233,383	-19,08	8,191
OIL TANK 2 STARB	100%	10380,71	10380,7	10993	10993	-233,383	19,082	8,191
OIL TANK 4 PORT	100%	9540,842	9540,84	10103,6	10103,6	-137,816	-19,29	8,141
OIL TANK 4 STARB	100%	9540,842	9540,84	10103,6	10103,6	-137,816	19,291	8,141
WB 1 PORT	100%	2625,079	2625,08	2561,05	2561,05	-269,121	-16,71	8,911
WB 1 STARB	100%	2625,079	2625,08	2561,05	2561,05	-269,121	16,71	8,911
WB 3 PORT	100%	10365,34	10365,3	10112,5	10112,5	-184,4	-19,3	8,138
WB 3 STARB	100%	10112,53	10112,5	10112,5	10112,5	-184,4	19,296	8,138
WB 5 PORT	100%	8535,527	8535,53	8327,34	8327,34	-94,665	-18,95	8,317
WB 5 STARB	100%	8535,527	8535,53	8327,34	8327,34	-94,665	18,953	8,317
FOT PORT	100%	996,382	996,382	1055,16	1055,16	-53,553	-16,76	10,06
FOT STARB	100%	996,382	996,382	1055,16	1055,16	-53,553	16,763	10,06
DOT PORT	100%	280,225	280,225	333,601	333,601	-55,742	-10,14	8,156
DOT STARB	100%	280,225	280,225	333,601	333,601	-55,742	10,136	8,156
SLOP TANK PORT	100%	2232,365	2232,37	2445,09	2445,09	-66,224	-17,75	9,083
SLOP TANK STARB	100%	2232,365	2232,37	2445,09	2445,09	-66,224	17,745	9,083
Total Loadcase			206088	182020	182020	-165,693	-0,024	8,08
FS correction								0
VCG fluid								8,08

Table

1 1. Equilibrium FPSO Berbentuk Kapal dengan Kondisi Muatan 100%

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	x (+ve aft) Arm m	y (+ve stbd) Arm m	z (+ve up) Arm m
Lightship	1	94203,97	94204			-0,108	-0,008	19,51
TANK 1	100%	13302,97	13303	14087,7	14087,7	30,585	10,165	19
TANK 2	100%	13381,19	13381,2	14170,5	14170,5	19,021	26,214	19
TANK 3	100%	13384,79	13384,8	14174,3	14174,3	-0,127	32,498	19
TANK 4	100%	13320,28	13320,3	14106	14106	-19,249	26,172	19
TANK 5	100%	13210,42	13210,4	13989,6	13989,6	-30,507	10,232	19
TANK 6	100%	13208,26	13208,3	13987,4	13987,4	-30,506	-10,23	19
TANK 7	100%	13319,79	13319,8	14105,5	14105,5	-19,249	-26,17	19
TANK 8	100%	13385,57	13385,6	14175,1	14175,1	-0,128	-32,5	19
TANK 9	100%	13380,63	13380,6	14169,9	14169,9	19,027	-26,24	19
TANK 10	100%	13302,97	13303	14087,7	14087,7	30,585	-10,17	19
TANK CENTER	100%	14089,75	14089,7	14920,8	14920,8	-0,115	0	19
WATER BALLAST 1	100%	1805,352	1805,35	1761,32	1761,32	30,588	10,167	5,5
WATER BALLAST 2	100%	1795,035	1795,04	1751,25	1751,25	-30,789	10,176	5,5
WATER BALLAST 3	100%	1815,562	1815,56	1771,28	1771,28	19,028	-26,24	5,5
WATER BALLAST 4	100%	1805,352	1805,35	1761,32	1761,32	30,588	-10,17	5,5
WATER BALLAST 5	100%	1860,563	1860,56	1860,56	1860,56	-0,115	0	5,5
FOT	100%	1673,196	1673,2	1771,89	1771,89	-0,128	32,499	5,5
DOT	100%	1481,441	1481,44	1763,62	1763,62	-19,253	26,173	5,5
FOT	100%	1665,387	1665,39	1763,62	1763,62	-19,253	-26,17	5,5
DOT	100%	1488,388	1488,39	1771,89	1771,89	-0,128	-32,5	5,5
SLOP TANK	100%	1617,248	1617,25	1771,36	1771,36	19,022	26,214	5,5
SLOP TANK	100%	1598,894	1598,89	1751,25	1751,25	-30,789	-10,18	5,5
Total Loadcase			260097	175474	175474	-0,004	-0,012	18,22
FS correction								0
VCG fluid								18,22

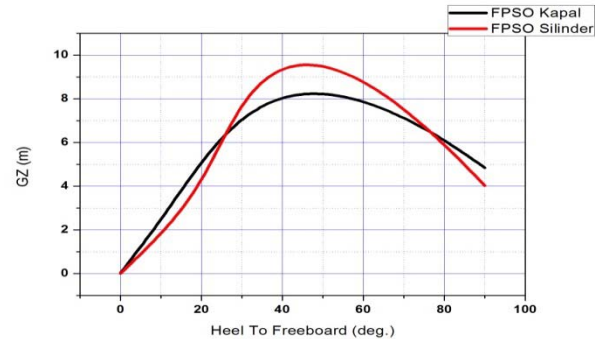
Tabel 3. Equilibrium FPSO Berbentuk Silinder dengan Kondisi Muatan 100%

Dapat kita lihat pada kedua tabel equilibrium di atas, volume tiap kompartemen dari FPSO silinder lebih merata dari pada FPSO kapal. Tentunya penyebaran tiap kompartemen yang memiliki volume merata akan berpengaruh pada stabilitas. Penyebaran volume ruang muat yang merata pada silinder dipengaruhi oleh bentuk lambung yang bulat dan terpusat. Dapat dilihat pada Gambar 3. dan Gambar 6. dengan total DWT yang kurang lebih sama namun bentuk dan pembagian kompartem tanki pada tiap-tiap FPSO mempengaruhi penyebaran berat muatan. Hal tersebut membuktikan bahwa *hull form* FPSO silinder memiliki keunggulan dalam hal ruang muat.

Nama	Silinder	Kapal
Draft Amidships m	31,237	15,931
Displacement t	260096	206080
Heel deg	0	0
Draft at FP m	30,904	17,916
Draft at AP m	31,57	13,945
Draft at LCF m	31,237	16,015
Trim (+ve by stern) m	0,666	-3,971
WL Length m	92,782	295,154
Beam max extents on WL m	92,754	52,691
Wetted Area m ²	28460,687	20727,823
Waterpl. Area m ²	6706,195	13463,676
KB m	13,47	8,311
KG fluid m	18,219	8,08
BMt m	14,263	13,737
BML m	13,977	382,838
GMt corrected m	9,513	13,968
GML m	9,228	383,069
KMt m	27,732	22,047
KML m	27,447	391,116
Immersion (TPc) tonne/cm	68,738	138,003
MTC tonne.m	260,08	2628,688
RM at 1 deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	43183,417	50236,028
Trim angle (+ve by stern) deg	0,4132	-0,7576

Tabel 3. Hasil Analisa Equilibrium FPSO Berbentuk Silinder dan Kapal dengan Kondisi Muatan 100%

Dapat dilihat pada tabel di atas, nilai Trim by stern pada FPSO berbentuk Kapal lebih besar yaitu -3,971 m dan Trim Anglanya -0,76° sedangkan pada FPSO silinder 0,666 m dan 0,4132°. Dan pada silinder tidak memiliki selisih yang jauh berbeda dengan draft AP 31,57 m dan FP 30,904 m. Sedangkan FPSO berbentuk Kapal memiliki selisih yang lebih besar ± 3 m dengan draft AP 13,945 m dan FP 17,916 m.



Gambar 6. Grafik Stabilitas FPSO Silinder dan Kapal Kondisi Muatan 100%

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, bahwa penyebaran tiap kompartemen dengan volume merata berpengaruh pada stabilitas FPSO. Dimana pada Gambar 6. menunjukkan bahwa dengan kondisi muatan keduanya 100%, FPSO Silinder memiliki lengan penegak (GZ) lebih panjang dari pada lengan penegak FPSO Kapal dan keduanya masuk dalam standar IMO. FPSO Silinder memiliki Max GZ sepanjang 9,558 m pada 46,4° sedangkan FPSO kapal memiliki Max GZ sepanjang 8,236 m pada 48,2°. Dari hal tersebut dapat disimpulkan bahwa dalam hal stabilitas tidak terdapat perbedaan yang signifikan namun FPSO Silinder memiliki stabilitas yang lebih baik dari FPSO Kapal

4.4 Olah Gerak

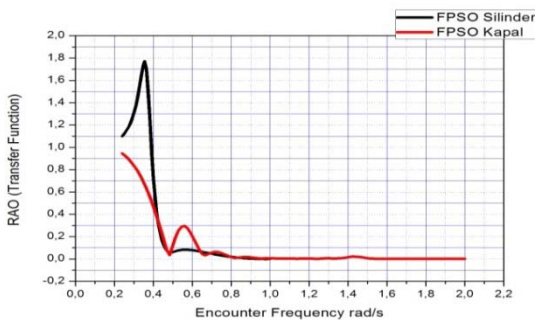
Dalam analisa olah gerak ini, kondisi lingkungan perairan yang digunakan adalah laut Cina Selatan Utara Natuna. Tujuannya agar dapat mengetahui performa kedua *hull form* dalam kondisi lingkungan perairan lepas pantai Indonesia dan nantinya dapat menjadi acuan dalam alternatif pilihan hullform yang tepat di lepas pantai Indonesia khususnya Utara Natuna. Metode yang digunakan dalam analisis numerik

yaitu *Strip Theory* dengan asumsi kecepatan kapal diam dan *standard* kriteria yang digunakan adalah *Nordfosk 1987*. Semua hasil dari analisis numerik menunjukkan bahwa FPSO berbentuk kapal dan silinder masuk ke dalam *standard* kriteria *Nordfosk 1987*.

Criteria for Accelerations and Roll (NORDFORSK, 1987)			
Description	RMS Vertical Acceleration	RMS Lateral Acceleration	RMS Roll Motion
Light Manual Work	0.20 g	0.10 g	6.0°
Heavy Manual Work	0.15 g	0.07 g	4.0°
Intellectual Work	0.10 g	0.05 g	3.0°
Transit Passengers	0.05 g	0.04 g	2.5°
Cruise Liner	0.02 g	0.03 g	2.0°

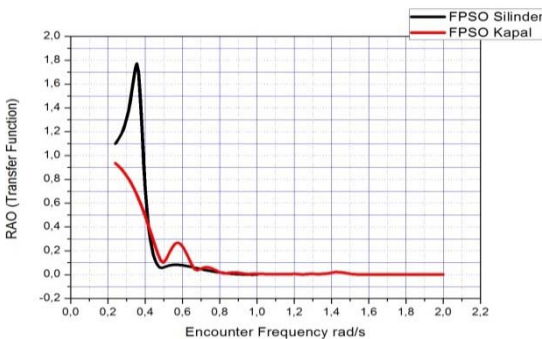
Tabel 4. *Criteria for Accelerations and Roll (Nordfosk, 1987)*

4.4.1 Heave Motion Pada Kondisi Muatan 100%



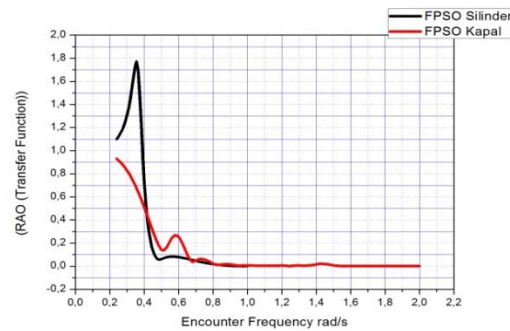
Gambar 7. Grafik *Heave Motion* dengan Sudut gelombang 90°

Pada grafik di atas *Heave Motion* pada silinder mempunyai nilai RAO tertinggi $\pm 1,8$ dengan frekuensi 0,35 rad/s sedangkan FPSO kapal mempunyai nilai RAO sebesar $\pm 0,99$ dengan frekuensi 0,25 rad/s.



Gambar 8. Grafik *Heave Motion* dengan Sudut Gelombang 135°

Pada grafik di atas *Heave Motion* pada silinder mempunyai nilai RAO tertinggi $\pm 1,8$ dengan frekuensi 0,35 rad/s sedangkan FPSO kapal mempunyai nilai RAO sebesar $\pm 0,99$ dengan frekuensi 0,25 rad/s.

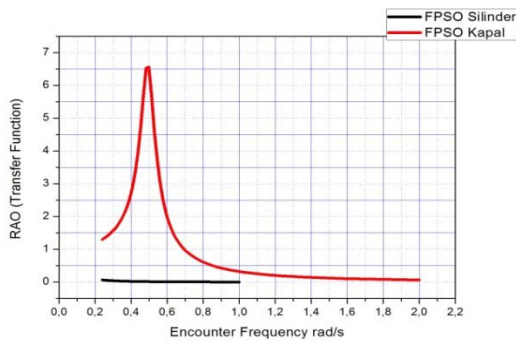


Gambar 9. Grafik *Heave Motion* dengan Sudut Gelombang 180°

Pada grafik di atas *Heave Motion* pada FPSO Silinder mempunyai nilai RAO tertinggi $\pm 1,8$ dengan frekuensi 0,35 rad/s sedangkan FPSO Kapal mempunyai nilai RAO sebesar $\pm 0,99$ dengan frekuensi 0,25 rad/s. Dari ketiga grafik di atas dapat kita simpulkan bahwa FPSO Silinder dan kapal memiliki nilai tertinggi RAO yang konstan di setiap sudut gelombang datang. Nilai tertinggi RAO pada FPSO Silinder $\pm 1,8$ dengan frekuensi 0,35 rad/s dan FPSO Kapal $\pm 0,99$ dengan frekuensi 0,25 rad/s.

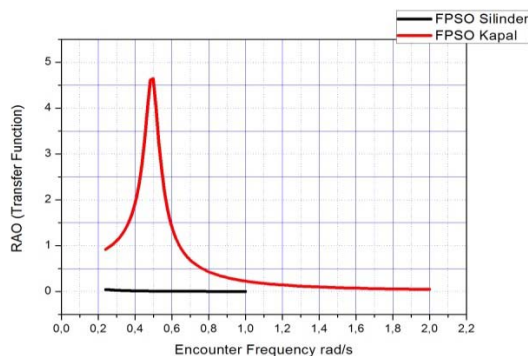
Dari nilai tersebut menunjukkan *Heave motions* pada silinder lebih besar dari kapal, namun tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Besarnya nilai *heave* pada Silinder dari kapal dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: *displacement, water plan area (WPA)*, dan *draft amidship*. Dapat dilihat pada Tabel 4. *Displacement* dan *draft amidship* Silinder lebih besar dari Kapal, sehingga menyebabkan gerakan naik turun di sumbu y pada silinder lebih besar. Dilihat dari *water plan area*, yaitu luas bidang garis air pada silinder lebih kecil dari kapal. Hal tersebut menyebabkan intensitas gerakan naik turun pada silinder lebih memungkinkan untuk terjadi.

4.4.2 Roll Motion Pada Kondisi Muatan 100%



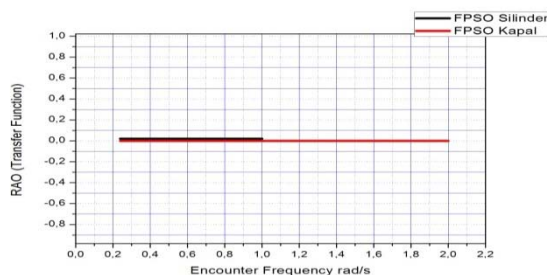
Gambar 10. Grafik *Roll Motion* dengan Sudut Gelombang 90°

Pada grafik di atas *Roll Motion* pada FPSO kapal mempunyai nilai RAO tertinggi ±6,5 dengan frekuensi 0, 5 rad/s sedangkan FPSO silinder mempunyai nilai RAO 0.



Gambar 11. Grafik *Roll Motion* dengan Sudut Gelombang 135°

Pada grafik di atas *Roll Motion* pada FPSO kapal mempunyai nilai RAO tertinggi ±4,56 dengan frekuensi 0, 45 rad/s sedangkan FPSO silinder mempunyai nilai RAO 0.



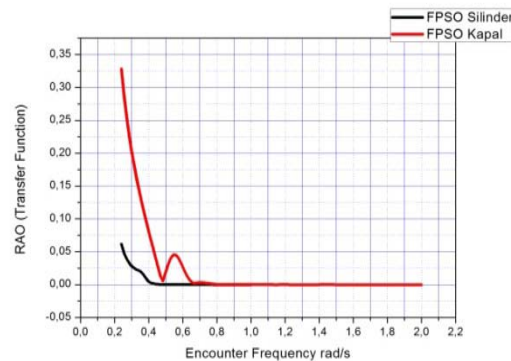
Gambar 12. Grafik *Roll Motion* dengan Sudut Gelombang 180°

Pada grafik di atas *Roll Motion* pada FPSO kapal mempunyai nilai RAO 0 dan FPSO

silinder mempunyai nilai RAO 0. Dari ketiga grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai RAO pada silinder adalah konstan di setiap sudutnya, sedangkan nilai RAO pada FPSO kapal mengalami penurunan di sudut 135° dan 180°. Nilai RAO FPSO Kapal yang ditunjukkan pada Gambar 10. dan Gambar 11. lebih signifikan dari pada Silinder, hal ini dipengaruhi oleh lebar kapal (B), GM_T dan RM at 1 deg.

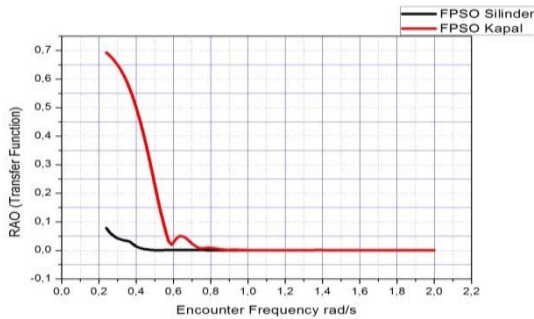
FPSO Silinder memiliki lebar (B) yang lebih besar dari FPSO kapal. Lebar FPSO silinderpun simetris ke segala arah karena berbentuk silinder, sehingga hal tersebut menyebabkan FPSO memiliki keseimbangan pada sumbu x dari pada kapal. Ditinjau dari nilai GM_t dan RM at 1 deg pada silinder, memiliki nilai yang lebih kecil (lihat Tabel 4). Karena nilai yang lebih kecil tersebut mempengaruhi gerakan *roll* pada sumbu x, yaitu *Roll motion* pada silinder lebih kecil dari kapal.

4.4.3 Pitch Motion Pada Kondisi Muatan 100%



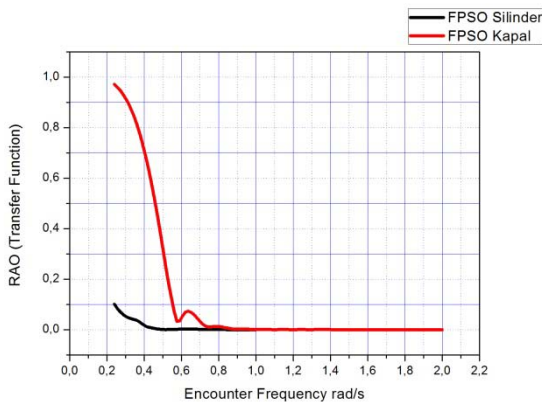
Gambar 13. Grafik *Pitch Motion* dengan Sudut Gelombang 90°

Pada grafik di atas *Pitch Motion* pada FPSO kapal mempunyai nilai RAO tertinggi ±0,65 dengan frekuensi 0,21 rad/s sedangkan FPSO silinder mempunyai nilai RAO sebesar ±0,05 dengan frekuensi 0,21 rad/s.



Gambar 14. Grafik *Pitch Motion* dengan Sudut elombang 135°

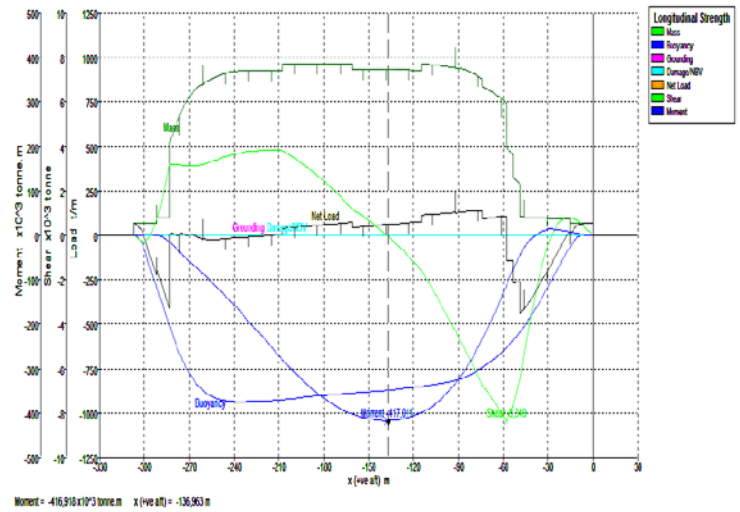
Pada grafik di atas *Pitch Motion* pada FPSO kapal mempunyai nilai RAO tertinggi $\pm 0,7$ dengan frekuensi 0,21 rad/s sedangkan FPSO silinder mempunyai nilai RAO sebesar $\pm 0,09$ dengan frekuensi 0,21 rad/s.



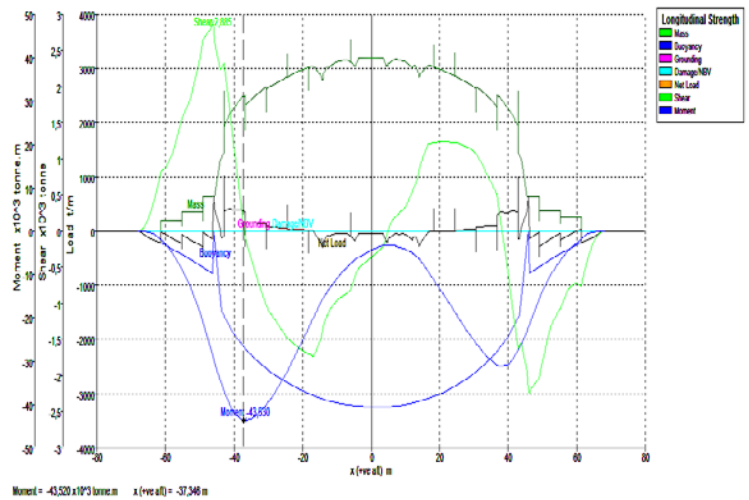
Gambar 15. Grafik *Pitch Motion* dengan Sudut Gelombang 180°

Pada grafik di atas *Pitch Motion* pada FPSO kapal mempunyai nilai RAO tertinggi $\pm 0,9$ dengan frekuensi 0,25 rad/s sedangkan FPSO silinder mempunyai nilai RAO sebesar $\pm 0,5$ dengan frekuensi 0,21 rad/s. Dari ketiga grafik di atas dapat kita lihat bahwa, nilai RAO pada kapal dan silinder mengalami kenaikan nilai dari sudut 90°-180°. Nilai RAO pada FPSO Kapal lebih besar dari pada nilai RAO pada FPSO silinder hal ini disebabkan Panjang (L), Trim dan MG_L . Lihat pada Tabel 4. nilai Trim, MG_L dan panjang pada kapal lebih besar dari silinder sehingga berpengaruh terhadap gerakan anggukan kapal pada sumbu y. Dalam hal ini gerakan *pitch* FPSO silinder lebih baik dari kapal.

4.5 Analisa Kekuatan Memanjang



Gambar 16. Grafik Kekuatan Memanjang FPSO Kapal pada Kondisi Muatan 1



Gambar 17. Grafik Kekuatan Memanjang FPSO Silinder pada Kondisi Muatan 100%

Dari grafik kekuatan memanjang di atas FPSO Kapal memiliki moment yang jauh lebih besar yaitu 417,11 ton.m sedangkan FPSO Silinder hanya 45,53 ton.m. Hal tersebut sesuai dengan teori yang diilustrasikan pada Gambar 1. bahwa lengan moment pada FPSO kapal jauh lebih panjang dari pada FPSO silinder.

4.6 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan yang dapat diambil dari

penelitian ini adalah sebagai berikut :

- 1.) FPSO Silinder memiliki penyebaran muatan tanki yang lebih merata dengan total DWT yang kurang lebih sama dari pada FPSO Kapal pada kondisi muatan 100%.
- 2.) FPSO Silinder dengan max GZ sepanjang 9,558 m pada 46,4° memiliki Stabilitas lebih baik sedangkan FPSO kapal memiliki Max GZ sepanjang 8,236 m pada 48,2° pada kondisi muatan 100%.
- 3.) FPSO Kapal memiliki heave yang lebih baik dari silinder saat sudut gelombang 90°,135°, dan 180°.
- 4.) FPSO Silinder memiliki Roll, dan Pitch yang lebih baik dari FPSO Kapal saat sudut gelombang 90°,135°, dan 180°.
- 5.) FPSO Silinder memiliki moment 10 x lebih kecil 45,53 ton.m dari pada FPSO Kapal 417,11 ton.m.

Berdasarkan hasil analisis numerik yang dilakukan, FPSO Silinder dan Kapal layak untuk beroperasi namun FPSO Silinder lebih banyak memiliki keunggulan. Dari keunggulan yang dimiliki FPSO silinder dapat menjadi acuan alternatif pilihan *hull form* dalam hal performa yang lebih menguntungkan dioperasikan dilepas pantai Indonesia khususnya Utara Natuna. Namun dalam segi ekonomis dan usia pakai, FPSO Silinder masih diperlukan penelitian lanjut. Mengingat berat LWT FPSO Silinder lebih besar dari pada LWT FPSO Kapal dan besar LWT sangat berpengaruh pada biaya produksi. Tentunya untuk mendapat keuntungan, besarnya biaya produksi harus sebanding dengan lama usia pakai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Web Kementrian ESDM, 2014, "Peluang Investasi Migas di Indonesia". <http://www.esdm.go.id/berita/artikel/56-artikel/4586-peluang-investasi-migas-di-indonesia.html>
- [2] Web Sevan Marine, 2014, "Technology". <http://www.sevanmarine.com/>
- [3] Paik, J.K., Thayamballi, A.K., 2007, "ShipShaped Offshore Installations: Design, Building, and Operation", Cambridge University Press, Cambridge,UK, Chap. 1.

- [4] Lamport, WB., Josefsso, P.M., 2008, "The Next Generation of Rpond Fit – For – Purpose Hullform FPSOs Offers Advantages Over Traditional Ship – Shaped Hullforms", Deep Gulf Conference, New Orleans, Louisiana USA 2008.
- [5] Gourdet, G., Biasotto P., 2006, "Converted Single HullF(P)SO Challenges regarding Inspection, Repair andMaintenance", Proceedings of Deep OffshoreTechnology Conference, Houston, Texas 2006
- [6] Web Pemerintah Kabupaten Natunan, 2014, "Kondisi Geografis Kabupaten Natuna".<http://www.natunakab.go.id/kondisi-geografis.html>
- [7] Web BMKG, 2014, "Stasiun Marine". http://maritim.bmkg.go.id/index.php/main/stasiun_maritim/6