

Optimasi Desain FPSO Berbasis Damage Stability
Optimization Design Of FPSO Based Damage Stability

Mochammad Zaky dan Arif Purwono

PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero)
Jl. Yos Sudarso Sudarso No. 38-39-40 Tanjung Priok, Jakarta
e-mail: zaky@bki.co.id

Naskah diterima 01 Oktober 2014, diedit 15 Oktober 2014, dan disetujui terbit 28 Nopember 2014

ABSTRAK

Floating Production Storage and Offloading (FPSO) memiliki tingkat resiko yang berbeda dibandingkan anjungan kapal lepas pantai dan kapal tangki minyak. Penyebabnya adalah wahana yang diletakkan dalam suatu lokasi dan secara rutin dikunjungi oleh *supply vessel* dan *shuttle tanker*. Akibatnya, terjadi resiko tabrakan antara kapal-kapal tangki minyak dengan kapal-kapal lain yang rute pelayarannya melewati lokasi FPSO, sehingga mengalami kebocoran pada bagian lambung. Pada makalah ini dilakukan perhitungan *damage stability* dan skenario kebocoran FPSO dengan menggunakan metode deterministik dan probabilistik. Metode deterministik menggunakan penyekatan dan perhitungan kebocoran melalui kriteria *floodable length*. Sedangkan metode probabilistik menggunakan kriteria sesuai ketentuan SOLAS 2009 Chapter II-1 tentang perhitungan indek penyekatan R (*required subdivision index*) dan A (*attained subdivision index*). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui posisi isolasi utama dan ukuran optimal sehingga memenuhi kriteria yang diperlukan. Hasil perhitungan *floodable length* pada desain awal FPSO menunjukkan bahwa zona 2 dan 8 tidak memenuhi, sehingga perlu dilakukan modifikasi pergeseran sekat.

Kata kunci: FPSO, *Damage Stability*, Kebocoran, Deterministik, Probabilistik, *Floodable Length*, *Subdivision*.

ABSTRACT

Floating Production Storage and Offloading (FPSO) has a different level of risk compared to forecastle off-shore and oil tankers. The cause was an object placed in a location and regularly visited by the supply vessel and shuttle tankers. As a result, there is a risk of collision between the oil tanker ships with other ships that sail past the location of the FPSO, so occur a leak in the hull. In this paper carried out the calculation of damage stability and leakage scenarios FPSO using deterministic and probabilistic methods. Deterministic method using insulation and calculation of leakage through the floodable length criteria. While the probabilistic method based on the criteria SOLAS Chapter II-1 in 2009 about the calculation of the partition index R (*required subdivision index*) and A (*attained subdivision index*). This study aims to determine the position of the main insulation and optimal size so that comply with the required criteria. Results calculation of floodable length on the initial design of FPSO indicates that the zone 2 and 8 did not meet, so that needs to be done modification shift partition.

Keywords: FPSO, *damage stability*, leakage, deterministic, probabilistic, *floodable length*, *subdivision*.

PENDAHULUAN

Dalam rangka meningkatkan produksi migas nasional, salah satu cara yang ditempuh adalah dengan mengalihkan daerah operasi dari perairan dangkal menuju perairan dalam (*deep water*). FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) menjadi salah satu konsep yang lebih tepat untuk kondisi perairan dalam. Sistem FPSO dinilai cukup efektif karena mampu dioperasikan hingga kedalaman laut 1400 meter, Shimamura (2002), [9] dan memanfaatkan kapal-kapal tanker yang telah ada melalui sistem konversi, karena hampir 70% FPSO yang beroperasi diseluruh dunia adalah hasil konversi, Potthurst (2003), [6]. Hal tersebut dilakukan karena waktu pembuatan FPSO secara konversi lebih singkat 1 – 2 tahun dari pada pembuatan FPSO baru dan jadwal proses operasi FPSO lebih cepat, Leick R.(2000), [3].

Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) sebagai badan klasifikasi nasional yang mengelaskan kapal niaga berbendera Indonesia dan kapal berbendera asing yang secara reguler beroperasi di perairan Indonesia hingga saat ini telah mengelaskan kapal sejumlah 8192 unit, dimana 1% dari jumlah tersebut adalah FSO/FPSO, BKI Register (2012), [1]. Jumlah ini akan bertambah seiring dengan ketentuan asas cabotage melalui Inpres No. 5 Tahun 2005 yang mengharuskan kapal-kapal yang beroperasi Indonesia harus berbendera Indonesia. Salah satunya yaitu FSO/FPSO yang berada dibawah naungan industri hulu migas.

Dalam operasinya FPSO dapat mengalami kerusakan pada bagian lambung yang disebabkan oleh beberapa faktor antara lain tabrakan, kandas atau terjadi ledakan. Selanjutnya mengakibatkan masuknya air ke badan FPSO sehingga menyebabkan oleng dan langsung tenggelam. Hal ini disebabkan bangunan apung tidak memiliki stabilitas yang baik karena tidak mampu kembali ke posisi semula, Rawson dan Tupper (2001), [7]. Salah satu langkah yang dapat dilakukan adalah dengan membagi kapal menjadi beberapa ruangan dengan memberikan sekat kedap pada kapal secara melintang dan memanjang. Adapun fungsi dari pembagian ruangan ini adalah untuk mengurangi hilangnya stabilitas melintang dan memanjang akibat kebocoran, melindungi kerusakan pada muatan dan mengurangi hilangnya daya apung cadangan kapal, Nickum (1988), [5].

Pada makalah ini dilakukan optimasi desain sebuah FPSO melalui pendekatan damage stability, dengan melakukan beberapa variasi desain melalui pergeseran sekat dan optimasi ukuran utama. Untuk memperoleh penyekatan dan ukuran utama yang

optimal digunakan perhitungan damage stability menggunakan metode deterministik dan probabilitas. Untuk mengetahui pengaruh dari kebocoran pada kompartemen kapal yang berhubungan langsung dengan air diluar maka digunakan metode *lost buoyancy*. Pada metode *lost buoyancy* displasemen sisa kapal tidak berubah atau tetap, yang berubah hanya bidang bagian yang tercelup. Oleh karena itu metode ini juga disebut dengan constant displacement method, Semyonov dkk (1963), [8]. Untuk perhitungan kebocoran dihitung menggunakan *software hydromax*.

Pada metode deterministik menggunakan kriteria panjang penyekatan maksimum (*floodable length*), dimana volume kompartemen bocor tidak boleh melebihi volume apung dengan kriteria yaitu oleng yang terjadi tidak boleh lebih dari 6° (stabilitas awal) dan garis air maksimal setelah bocor adalah pada margin line (garis yang jaraknya 76 mm atau 3 inch dibawah geladak kekuatan). Adapun metode probabilitas mengacu pada Peraturan SOLAS 2009 tentang standar penyekatan yang bertujuan untuk mendapatkan jarak sekat optimal sehingga diperoleh indek penyekatan, A. Indek penyekatan A tidak boleh kurang dari indek yang dipersyaratkan, R. MSC Circular 1226 (2007), [4]. Nilai setiap indek bagian AS, AP, dan AI tidak boleh kurang dari 0.5R. Indek R untuk kapal barang dengan panjang penyekatan lebih dari 100 m yaitu:

$$R = 1 - \frac{128}{L_s + 152} \dots\dots\dots(1)$$

Selanjutnya nilai indek A diperoleh melalui penjumlahan indek bagian AS, AP, dan AI dimana nilainya dihitung berdasar sarat Deepest subdivision draught (ds), Partial subdivision draught (dp), dan *Light service draught* (dl) Sehingga rumus menjadi:

$$A = 0.4A_s + 0.4A_p + 0.2A_l \dots\dots\dots(2)$$

Setiap indek bagian merupakan penjumlahan kontribusi untuk semua kasus kebocoran yang diperhitungkan, dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$A = \sum p_i s_i \dots\dots\dots(3)$$

dimana i=kompartemen atau group kompartemen yang diperhitungkan; pi =jumlah kemungkinan dari kompartemen atau group kompartemen yang diperhitungkan bocor, dengan mengabaikan setiap subdivisi horisontal; si =jumlah kemungkinan kapal dapat bertahan setelah kebocoran pada tiap kompartemen atau group kompartemen yang diperhitungkan, termasuk pengaruh dari setiap subdivisi horisontal.

METODE

Analisa Desain Awal

Analisa dilakukan pada sebuah FPSO klas BKI yang merupakan konversi dari kapal tanker. Ukuran utama sesuai tabel 1.

Tabel 1.

Ukuran utama konversi dari kapal tanker

No.	Ukuran		
1.	Panjang keseluruhan, L_{OA}	176.00	m
2.	Panjang, L_{pp}	169.00	m
3.	Panjang penyekatan, L_s	175.72	m
4.	Lebar, B	32.00	m
5.	Tinggi, H	15.10	m
6.	Sarat, T	11.247	m
7.	Displase men	49576.22	Ton
8.	Deadweight	40296.00	Ton

Sumber: PT. BKI (Persero)

Kondisi FPSO sesuai gambar 1. memiliki 8 sekat kedap melintang dari alas sampai geladak utama. Sehingga dari penyekatan tersebut diperoleh 9 zona kebocoran dengan rincian sebagai berikut :

- zona 1 – tangki ceruk buritan, tangki air tawar, ruang kemudi, gudang
- zona 2 – kamar mesin
- zona 3 – ruang muat tengah dan samping 6, tangki dasar ganda 6, slop tank
- zona 4 – ruang muat tengah dan samping 5, tangki dasar ganda 5
- zona 5 – ruang muat tengah dan samping 4, tangki dasar ganda 4
- zona 6 – ruang muat tengah 3, tangki samping 3, tangki dasar ganda 3
- zona 7 – ruang muat tengah dan samping 2, tangki dasar ganda 2
- zona 8 – ruang muat tengah dan samping 1, tangki dasar ganda 1
- zona 9 – tangki ceruk haluan

Posisi kritis merupakan posisi terjadinya air masuk melalui bukaan-bukaan secara terus menerus sehingga menyebabkan FPSO tenggelam. Pada kasus ini setiap bukaan yang ditutup dengan penutup kedap cuaca diasumsikan sebagai titik kritis. Adapun posisi titik kritis didefinisikan sesuai tabel 2.

Tabel 2.

Titik kritis

	Jarak dari AP m	Jarak dari CL m	Jarak dari BL m
Downflooding point	18.400	5.600	18.000

Sumber: Data diolah

HASIL DAN PEMBAHASAN

Langkah pertama yaitu menghitung kebocoran menggunakan kriteria floodable length sesuai data awal FPSO. Pada tahap ini dihitung panjang kebocoran dan panjang kompartemen tiap-tiap zona. Gambar 2. memperlihatkan hasil perhitungan *floodable length* yang menunjukkan zona 2 (Kamar mesin) dan zona 8 (Ruang muat 1) tidak memenuhi, dikarenakan panjang kompartemen melebihi panjang kebocoran (*floodable length*), sehingga perlu dilakukan modifikasi pergeseran sekat.

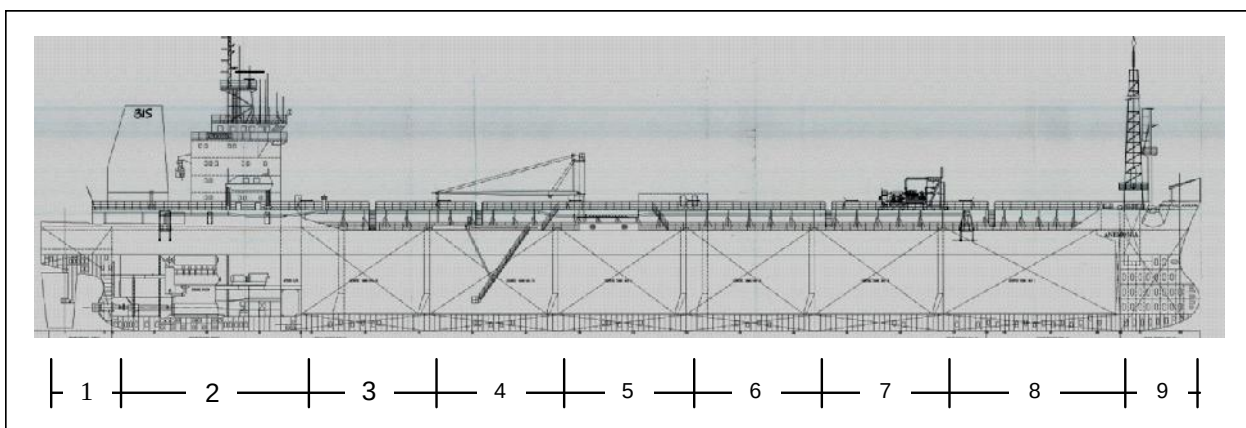
Langkah berikutnya yaitu melakukan perhitungan kebocoran menggunakan metode probabilistik yang mengacu pada SOLAS 2009 Ch. II. Perhitungan dilakukan menggunakan data awal FPSO, Terdapat tiga kondisi pemuatan yaitu *Deepest subdivision*, *Partial Subdivision* dan *Light Service* Data pemuatan sesuai tabel 3.

Tabel 3.

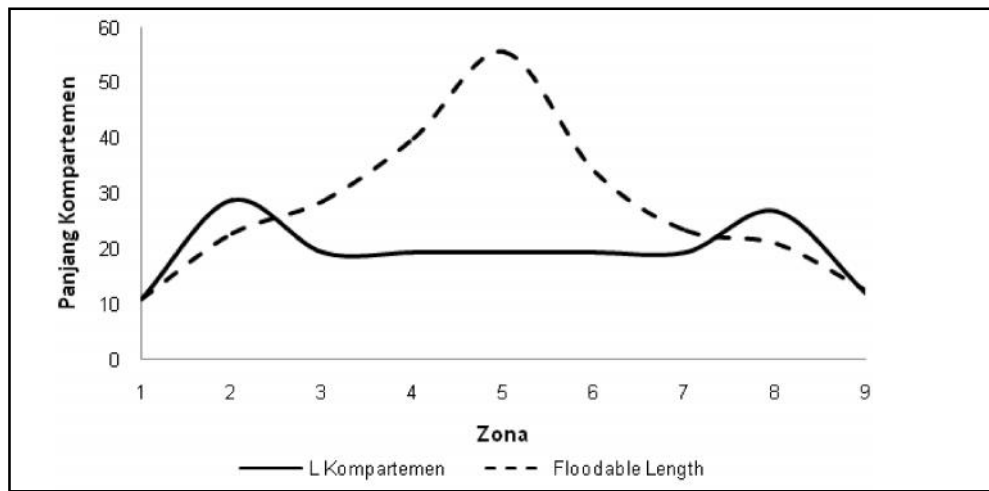
Data kondisi pemuatan

N0.	Loadcase	Berat (Ton)	LCG (m)	KG (m)	TCG (m)
1.	Deepest Subdivision	49576	87.894	9.296	0.049
2.	Partial Subdivision	38777	86.465	8.504	0.063
3.	Light Service	23705	86.599	9.188	-0.005

Sumber: BKI diolah



Gambar 1. Penyekatan tangki & kompartemen dalam zona kebocoran



Gambar 2. Kurva panjang kebocoran tiap zona

Selanjutnya dilakukan perhitungan kebocoran untuk kompartemen dan grup kompartemen pada setiap kondisi pemuatan. Adapun hasil perhitungan subdivisi A dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4.

Indek penyekatan – Initial desain

No.	Jumlah zona kebocoran	A_s	A_p	A_1
1.	1	0.4406	0.5376	0.5376
2.	2	0.0403	0.2537	0.4120
3.	3	0.0000	0.0080	0.0304
4.	4	0.0000	0.0000	0.0013
Indek parsial =		0.4809	0.7993	0.9813

Sumber: Hasil analisis

$$A = 0.4A_s + 0.4A_p + 0.2A_1 = 0.7083 \dots\dots\dots(4)$$

Tabel 5. menunjukkan bahwa distribusi untuk kontribusi keseluruhan indek tiap zona menunjukkan bahwa zona 8 (ruang muat 1) memiliki kontribusi yang paling kecil. Beberapa kombinasi kompartemen tidak ditampilkan karena memiliki nilai s_i nol sehingga tidak memiliki kontribusi terhadap pencapaian indek A. Hal ini disebabkan garis air untuk kasus kebocoran yang dihitung pada kondisi *sinkage*, *heel* dan *trim*, *titik downflooding* terendam air laut.

Tabel 5.

Indek penyekatan tiap zona – Initial desain

No	Zona	p_i	s_i	$p_i \times s_i$	A
1.	1	0.0407	1.0000	0.0407	0.0407
2.	2	0.0998	0.9222	0.0920	0.1327
3.	3	0.0526	1.0000	0.0526	0.1853
4.	4	0.0526	1.0000	0.0526	0.2379
5.	5	0.0526	1.0000	0.0526	0.2904
6.	6	0.0526	1.0000	0.0526	0.3430
7.	7	0.0526	1.0000	0.0526	0.3956
8.	8	0.0892	0.0000	0.0000	0.3956
9.	9	0.0450	1.0000	0.0450	0.4406
10.			1-zona kebocoran :		0.4406
11.	1+2	0.0525	0.0000	0.0000	0.4406
12.	4+5	0.0494	0.8145	0.0403	0.4809
13.			2-zona kebocoran :		0.0403
14.			Tota Indek dicapai (A_s) :		0.4809
15.			Indek dipersyaratkan (R) :		0.6094

Sumber: Hasil analisis

Modifikasi Pergeseran Sekat Melintang

Karena zona 2 dan zona 8 tidak memenuhi, maka perlu dilakukan modifikasi melalui pergeseran sekat. Hal ini dilakukan untuk memperpendek jarak antar sekat dan memperkecil volume bocor, gambar 3. menunjukkan hasil modifikasi, dimana panjang kebocoran (*floodable length*) seluruh zona lebih besar daripada panjang kompartemen.

Untuk metode probabilistik, terdapat kenaikan nilai indek penyekatan A karena adanya penambahan kontribusi dari zona 2 dan 8. Perhitungan hasil modifikasi ditampilkan pada tabel 6 dan tabel 7.

Variasi Ukuran Utama

Variasi rasio L/B dan B/T dilakukan dengan nilai displasemen dan koefisien blok konstan. Adapun variasi rasio yaitu -8% sampai dengan +8% dengan interval 2%. Rentang variasi akan memberikan informasi yang jelas terhadap tren grafik indek A dan R akibat perubahan ukuran utama. Nilai ukuran utama yang baru dihitung menggunakan rumus:

$$L = \sqrt[3]{\frac{V(L/B)^2(B/T)}{C_B}} \dots\dots\dots(6)$$

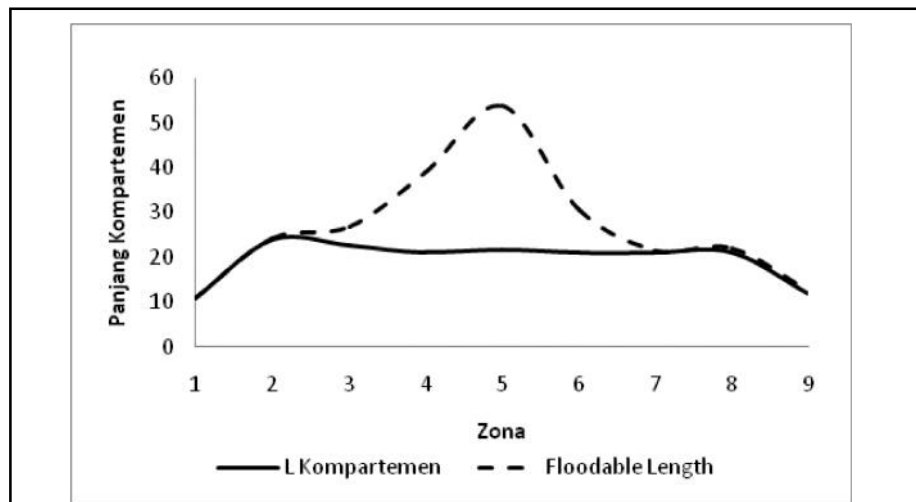
$$B = \frac{L}{L/B} \dots\dots\dots(7)$$

$$T = \frac{B}{B/T} \dots\dots\dots(8)$$

Dimana V = displasemen desain awal (49576.22 Ton); C_B = Koefisien blok desain awal (0.777).

Selanjutnya skala desain sesuai tabel 8. dilakukan di *software hydromax* dengan posisi tinggi geladak utama tetap.

Dengan variasi rasio L/B nilai indek R berubah seiring dengan perubahan panjang penyekatan (L_s). Nilai indek A mengalami perubahan akibat perubahan nilai sarat dan lebar badan FPSO. Pada modifikasi



Gambar 3: Kurva panjang kebocoran setelah modifikasi pergeseran sekat

Tabel 6.

Indek penyekatan setelah modifikasi pergeseran sekat

No.	Jumlah zona kebocoran	A_s	A_p	A_i
1.	1	0.5264	0.5339	0.5339
2.	2	0.0986	0.2581	0.4189
3.	3	0.0000	0.0065	0.0324
4.	4	0.0000	0.0000	0.0002
Indek Parsial =		0.6250	0.7985	0.9855

Sumber: Hasil analisis

Sehingga nilai rata-rata indeks A :

$$A = 0.4A_s + 0.4A_p + 0.2A_i = 0.7665 \dots\dots\dots(5)$$

Tabel 7.

Indek penyekatan tiap zona setelah modifikasi pergeseran sekat

No.	Zona	p_i	S_i	$p_i \times S_i$	A
1	1	0.0407	1.0000	0.0407	0.0407
2	2	0.0749	1.0000	0.0749	0.1155
3	3	0.0679	0.8888	0.0604	0.1759
4	4	0.0603	1.0000	0.0603	0.2361
5	5	0.0642	1.0000	0.0642	0.3003
6	6	0.0603	1.0000	0.0603	0.3606
7	7	0.0603	1.0000	0.0603	0.4208
8	8	0.0605	1.0000	0.0605	0.4813
9	9	0.0450	1.0000	0.0450	0.5264
10	1-zona kebocoran :				0.5264
11	1+2	0.0506	0.9633	0.0487	0.5751
12	8+9	0.0499	1.0000	0.0499	0.6250
13	2-zona kebocoran :				0.0986
14	Tota Indek dicapai (A_s) :				0.6250
15	Indek dipersyaratkan (R) :				0.6094

Sumber: Hasil analisis

desain A1 sampai dengan A4 lebar badan FPSO semakin mengecil sehingga stabilitas semakin menurun dan pada desain B1 sampai dengan B4 nilai sarat semakin besar sehingga *freeboard* semakin kecil.

Dari hasil perhitungan pada gambar 4. menunjukkan bahwa nilai indeks A seluruh rasio lebih besar dari indeks yang dipersyaratkan R, dimana nilai

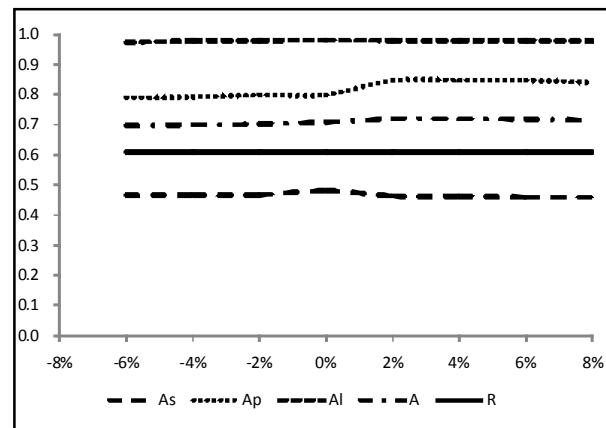
Tabel 8.

Variasi ukuran utama

Initial Design	Ratio	L (m)	B (m)	T (m)
	L/B = 5.281	169	32	11.247
	B/T = 2.845			
A1	L/B+2% = 5.387	171.25	31.79	11.173
A2	L/B+4% = 5.493	173.48	31.58	11.101
A3	L/B+6% = 5.598	175.69	31.38	11.031
A4	L/B+8% = 5.704	177.90	31.19	10.962
B1	L/B-2% = 5.176	166.74	32.22	11.323
B2	L/B-4% = 5.070	164.46	32.44	11.401
B3	L/B-6% = 4.964	162.17	32.67	11.481
B4	L/B-8% = 4.859	159.86	32.90	11.564
C1	B/T+2% = 2.902	170.12	32.21	11.099
C2	B/T+4% = 2.959	171.22	32.42	10.957
C3	B/T+6% = 3.016	172.31	32.63	10.818
C4	B/T+8% = 3.073	173.39	32.83	10.684
D1	B/T-2% = 2.788	167.87	31.79	11.400
D2	B/T-4% = 2.731	166.72	31.57	11.557
D3	B/T-6% = 2.674	165.55	31.35	11.721
D4	B/T-8% = 2.618	164.37	31.12	11.890

Sumber: Hasil olah data

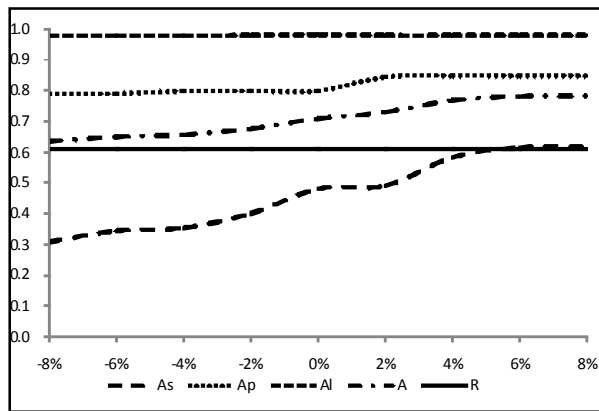
indeks A terbesar yaitu pada desain B1 dengan variasi L/B sebesar -2%.



Gambar 4. Pengaruh variasi L/B terhadap indeks penyekatan

Pada variasi B/T sesuai gambar 5. memiliki tren grafik yang sama dengan tren grafik indeks R, dimana nilai indeks A semakin besar seiring dengan semakin besar rasio B/T. Hal ini diakibatkan semakin besar

lebar badan FPSO maka stabilitas (GM) semakin baik dan nilai sarat berkurang akibat penurunan tinggi *freeboard*, hal ini menyebabkan penurunan margin kebocoran.



Gambar 5. Pengaruh variasi B/T terhadap indeks penyekatan

KESIMPULAN

Perhitungan *floodable length* pada desain awal FPSO menunjukkan bahwa zona 2 dan 8 tidak memenuhi, sehingga perlu dilakukan modifikasi pergeseran sekat. Modifikasi dilakukan dengan memperkecil jarak antar sekat pada zona 2 dan 8 untuk memenuhi ketentuan *floodable length* dan memperbesar nilai indeks penyekatan A.

Pada semua desain menunjukkan nilai indeks A lebih besar daripada indeks R. Dimana variasi rasio L/B terhadap perubahan nilai indeks A tidak terlalu signifikan. Adapun kurva indeks A semakin besar akibat kenaikan rasio B/T sehingga langkah ini yang memungkinkan penambahan indeks A secara signifikan.

Margin yang besar antara indeks A dan R akan memberikan peluang bagi peningkatan aspek yang lain (selain aspek *damage stability*), dengan ketentuan nilai indeks A masih lebih besar dari indeks R. Sementara itu margin yang kecil antara indeks A dan R akan berdampak pada biaya yang mahal pada proses perbaikan atau modifikasi khususnya terhadap bangunan sudah jadi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada segenap manajemen dan direksi PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero) atas bantuan dan dukungannya baik secara moril dan materiil sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik dan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Biro Klasifikasi Indonesia (2012): BKI Ship Register 2012, BKI Jakarta. Hydromax. 2012. User Manual, Jakarta;
- [2] International Maritime Organization (2009): SOLAS Consolidated Edition 2009, London;
- [3] Leick, R. (2000): Conversion and New Build. FPSO Workshop Proceedings Presentations. 8 June 2000.
- [4] MSC Circular 1226 (2007): Interim Explanatory Notes to the SOLAS Chapter II-1 Subdivision and Damage Stability Regulations, IMO, London;
- [5] Nickum, G. C. (1988): Subdivision and Damage Stability. Principle of Naval Architecture Second Revision. E. V. Lewis. Jersey City, SNAME. 1.
- [6] Photturst, R. (2003): Tanker Conversion to FPSO's. OGP Marine Risks Workshop Proceedings.
- [7] Rawson, K.J. dan Tupper, E.C. (2001): Basic Ship Theory, Fifth Edition Volume 1, Butterworth-Heinemann.
- [8] Semyonov-Tyan-Shansky. V (1963): Statics and Dynamics of the Ship, Peace Publishers, Moscow.
- [9] Shimamura, Y. (2002): FPSO/FSO: State of the art. Journal of Marine Science and Technology. Tokyo.

