

OPERABILITAS *OFFLOADING* PADA *FLOATING STORAGE REGASIFICATION UNIT (FSRU)*

Anggoronadhi Dianiswara¹, Rima Gusriana Harahap², Amalia Ika Wulandari³

^{1,2}Prodi Teknik Kelautan, Jurusan Sains, Teknologi Pangan dan Kemaritiman, Institut Teknologi Kalimantan, Jalan Sukarno Hatta KM. 15, Karang Joang, Balikpapan Utara, Kota Balikpapan, Kalimantan Timur 76127

³Prodi Teknik Perkapalan, Jurusan Sains, Teknologi Pangan dan Kemaritiman, Institut Teknologi Kalimantan, Jalan Sukarno Hatta KM. 15, Karang Joang, Balikpapan Utara, Kota Balikpapan, Kalimantan Timur 76127

Email: anggoronadhi@lecturer.itk.ac.id¹, rimagusrianahrp@lecturer.itk.ac.id², amaliaikaw@lecturer.itk.ac.id³

Abstrak

Operabilitas *offloading* adalah *availability* atau kemungkinan yang terjadi pada momen yang berubah-ubah, saat waktu tertentu, dalam rangka kesanggupan untuk melakukan siklus *offloading*. Siklus *offloading* merupakan salah satu proses yang penting untuk diketahui tingkat operabilitasnya. Operabilitas yang dikaji meliputi kemampuan LNGC dalam mendekati FSRU, kemampuan tali tambat, kemampuan *fender*, gerakan relatif LNGC terhadap FSRU pada *midship* yang berpengaruh pada sistem transfer LNG, serta kemampuan LNGC dalam menjauhi FSRU. Skema *offloading* yang dikaji adalah *side-by-side*. Beban lingkungan yang dimodelkan dalam pemodelan beban pada kajian ini adalah angin, arus, gelombang akibat angin, dan *swell*. Pemodelan numeris dengan simulasi *time response* atau *time domain* digunakan untuk mengetahui respon sistem tambat serta pola gerak FSRU dan LNGC. Berdasarkan korelasi antara kriteria operabilitas *offloading* dengan skema *side-by-side* dan data distribusi gelombang dan data lingkungan yang lain, maka dapat disimpulkan bahwa operabilitas yang dicapai adalah 100%.

Kata Kunci: Operabilitas, *offloading*, FSRU, *side-by-side*.

Abstract

Offloading operability is offloading availability that occurs at a changing moment, at a certain time, to be able to carry out the offloading cycle. The offloading cycle is one of the important processes to know the level of operability. Operability assessed includes LNGC's availability to approach FSRU, mooring availability, fender availability, LNGC's relative movement to FSRU in midship that effect on LNG transfer systems, and LNGC's availability to stay away from FSRU. The offloading scheme assessed is side-by-side. The environmental loads modeled in the load modeling in this study are wind, current, wind wave, and swell. Numerical modeling with a simulation of time response or time domain is used to determine the mooring system response and motion patterns of FSRU and LNGC. Based on the correlation between the criteria of offloading operability with side-by-side schemes and wave distribution data and other environmental data, it can be concluded that the operability achieved is 100%.

Keywords: Operability, offloading, FSRU, side-by-side.

1. PENDAHULUAN

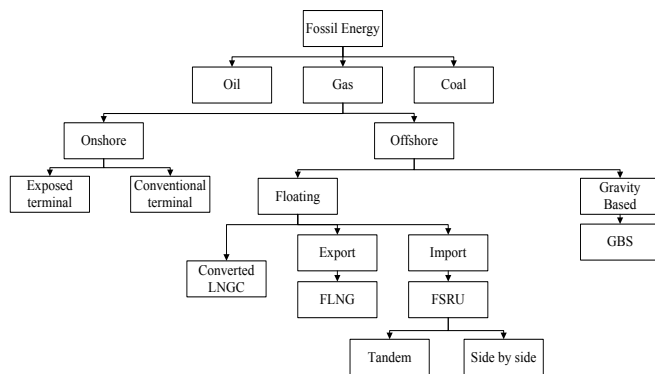
Operabilitas *offloading* adalah *offloading availability* atau kemungkinan yang terjadi pada momen yang berubah-ubah, saat waktu tertentu, dalam rangka kesanggupan untuk melakukan siklus *offloading* (*approach*, menyandarkan kapal, melakukan operasi *offloading* secara tuntas, dan melakukan *sail away* secara aman). Sedangkan *downtime*

adalah kemungkinan waktu jeda selama *offloading* tidak sukses dilakukan [1].

Prosedur umum yang diterapkan untuk melakukan evaluasi operabilitas adalah dengan mengkorelasikan hasil prediksi respon gerakan di laut riil dengan sistem batas operasional. Operabilitas dicapai jika batasan kriteria tidak terlampaui oleh salah satu elemen karakteristik respon di laut. Sebaliknya, keadaan di mana satu atau beberapa batasan yang ditetapkan dalam

kriteria telah dilmpai, berarti telah terjadi kegagalan, sehingga bangunan laut harus menghentikan operasi atau diistilahkan sebagai *down time* [2].

Gambar 1 menjelaskan bahwa, energi yang berasal dari fosil, dalam hal ini adalah gas, membutuhkan beberapa jenis alat transportasi untuk pendistribusiannya. Dari segmen lepas pantai, terdapat dua jenis bangunan yang mampu mengakomodasi kegiatan pendistribusian ini, yaitu: bangunan laut terapung (*floating*) dan Struktur berbasis gravitasi (*Gravity Based Structure* atau GBS). Pada bangunan laut terapung, pengelompokan jenis bangunan apung didasarkan pada tujuan bangunan apung tersebut diciptakan. Terdapat tiga jenis yang umum dipahami dalam transportasi gas, yaitu: LNG carrier (LNGC), terminal ekspor (FLNG), dan terminal impor (FSRU). Kemudian dalam operasi offloading pada FSRU, terdapat dua bentuk skema penambatan, yaitu: *tandem* dan *side by side*.



Gambar 1. Skema terminal gas [3]

FSRU adalah bangunan laut yang berfungsi sebagai terminal impor. FSRU atau Floating storage Regasification Unit, seperti pada Gambar 2., berfungsi sebagai tempat regasifikasi LNG menjadi gas alam serta sebagai penampung gas alam tersebut.

LNGC adalah singkatan dari *Liquified Natural Gas Carrier*. Sampai saat ini kapasitas *storage* LNGC bervariasi, hingga

mencapai kapasitas *storage* 250.000 m³. Pada umumnya tipe *storage* pada LNGC ada dua, yaitu: *moss spherical tanks* dan *membrane gaz transport*. Bentuk *storage* LNGC berpengaruh pada reaksi LNGC akibat gaya angin.

Siklus offloading dapat dibagi menjadi 3 fase, dan tiap fase terdiri dari beberapa operasi [1], yaitu:

Approach/ berthing

- *Initial approach* adalah prosedur awal ketika posisi LNGC mendekati FSRU dengan jarak yang jauh. Operasi ini berakhir ketika posisi LNGC sudah dalam posisi sejajar dengan FSRU pada radius 100 – 150 meter.
- *Hold station* adalah posisi yang menjelaskan bahwa LNGC berada sejajar dengan FSRU dengan jarak 100 – 150 meter dan tetap berada diposisi tersebut hanya dengan bantuan *tug boat*.
- *Parallel berthing* adalah posisi ketika LNGC bergerak mendekati FSRU secara perlahan dengan bantuan *tug boat*.
- *Fender kissing* adalah saat pertama kali terjadinya tumbukan pada *fender*.
- *Mooring* adalah saat pengikatan dan pemberian *pre-tension* pada tali tambat.
- *Loading arm connection* adalah kegiatan menyambungkan *loading arm* pada FSRU ke *manifold* pada LNGC.

Offloading

- Proses ini berlangsung ketika tali tambat dan *fender* bekerja optimal dan dipastikan bahwa *loading arm* berada pada *operating envelope*.

Depart/ Sail away

- *Disconnection* adalah operasi ketika *loading arm* dilepaskan dari *manifold*.
- *Unmooring* adalah kegiatan saat tali tambat dilepaskan.

- *Sail away* adalah proses menjauhnya LNGC dari FSRU dengan bantuan *tug boat* maupun dengan menggunakan sistem penggerak LNGC.



Gambar 2. Hoegh LNG FSRU dengan *Tower yoke Mooring System*. [4]

Berdasarkan uraian di atas, maka penelitian ini fokus menguraikan operabilitas *offloading* pada FSRU dengan skema *side-by-side* akibat beban lingkungan. Operabilitas yang dikaji meliputi kemampuan LNGC dalam mendekati FSRU, kemampuan tali tambat, kemampuan fender, gerakan relatif LNGC terhadap FSRU pada *midship* yang berpengaruh pada sistem transfer LNG, serta kemampuan LNGC dalam menjauhi FSRU.

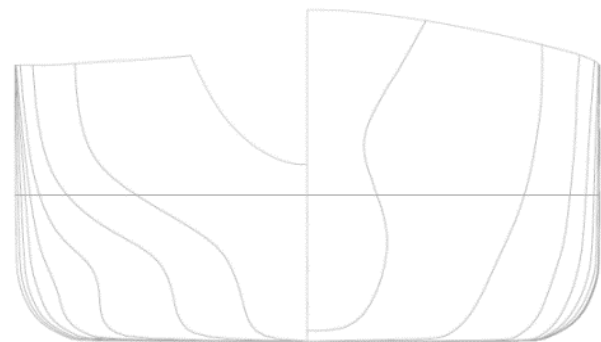
2. METODE

Dalam kajian ini, dilakukan pemodelan dua buah bangunan apung, yaitu FSRU dan LNGC menggunakan program ANSYS Aqwa. Bangunan apung dengan kapasitas *storage* 17.000 m³ akan dimodelkan sebagai FSRU yang ditambatkan dengan sistem tambat *Tower Mooring*. Selanjutnya, LNGC dengan kapasitas *storage* 135.000 m³ akan dimodelkan untuk melengkapi operasi siklus *offloading* dengan skema *side-by-side* pada perairan dengan kedalaman 23 meter.

FSRU yang digunakan dalam kajian ini memiliki dimensi seperti pada Tabel 1 dan *body plan* seperti digambarkan pada Gambar 3 berikut:

Tabel 1 Data FSRU

Data Geometri	Nilai
<i>Length overall</i>	294 m
<i>Breadth moulded</i>	46 m
<i>Draft (full)</i>	11,6 m
<i>Draft (ballast)</i>	10,5 m
<i>Depth</i>	26 m
<i>Displacement (full)</i>	1271191,76 m ³
<i>Displacement (ballast)</i>	113931,03 m ³
KG	0,06 L
Kxx	0,36 B
Kyy, Kzz	0,25L



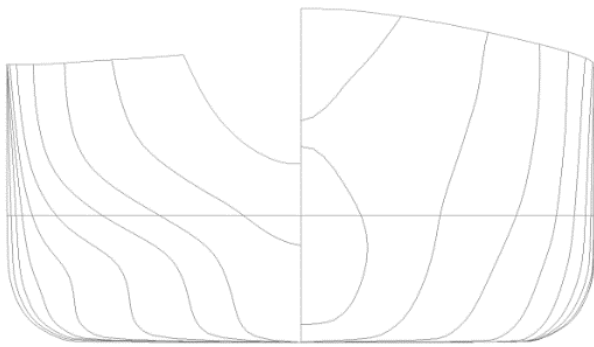
Gambar 3. *Body plan* FSRU 170.000 m³

LNGC yang digunakan dalam kajian ini memiliki kapasitas *storage* 135.000 m³ dengan dimensi seperti pada Tabel 2 dan *body plan* seperti digambarkan pada Gambar 4 berikut:

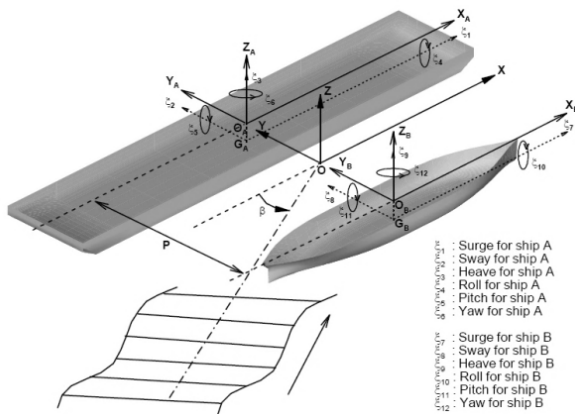
Tabel 2 Data LNGC

Data Geometri	Nilai
<i>Length overall</i>	274 m
<i>Breadth moulded</i>	44,2 m
<i>Draft (full)</i>	11 m
<i>Draft (ballast)</i>	9,5 m
<i>Depth</i>	25 m
<i>Displacement (full)</i>	99716,22 m ³
<i>Displacement (ballast)</i>	84685,91 m ³
KG	16,30 m
Kxx	70 m
Kyy, Kzz	15,15 m

Sumber: [5]



Gambar 4. Body plan LNGC 135.000 m³



Gambar 5. Sistem koordinat [6]

Dengan asumsi bahwa respon-respon adalah linear dan harmonis, 12 persamaan gerakan untuk dua bangunan apung dapat digambarkan seperti Gambar 5 dan dituliskan sebagai berikut, di mana moda gerakan 1 sampai 6 adalah moda gerakan bangunan apung A dan moda gerakan 7 sampai 12 adalah moda gerakan untuk bangunan B [6]:

$$\sum_{j=1}^{12} [-\omega_e^2 (M_{ij} + A_{ij}) - i\omega_e B_{ij} + C_{ij}] \xi_j = F_i$$

for $i = 1, 2, \dots, 12$

Di mana:

M_{ij} = Bentuk umum matriks massa untuk bangunan apung A dan B.

C_{ij} = Matriks gaya pengembali untuk bangunan apung A dan B.

ξ_j = Amplitudo kompleks dari gerak respon 6 derajat kebebasan pada tiap bangunan apung.

F_i = Amplitudo kompleks dari eksitasi gaya gelombang pada bangunan apung A dan B

Gerakan relatif arah longitudinal, lateral, dan vertikal antara bangunan apung A dan B pada posisi tertentu dapat dituliskan menjadi tiga komponen [6], yaitu:

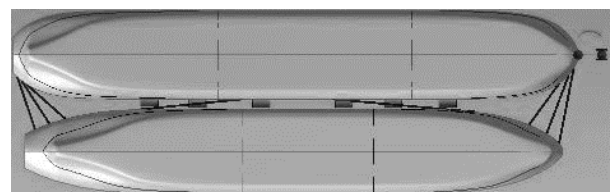
$$\frac{L_R}{\zeta_a} = \frac{1}{\zeta_a} [(\xi_1 + z_A \xi_5 - y_A \xi_6) - (\xi_7 + z_B \xi_{11} - y_B \xi_{12})]$$

$$\frac{H_R}{\zeta_a} = \frac{1}{\zeta_a} [(\xi_2 + x_A \xi_6 - z_A \xi_4) - (\xi_8 + x_B \xi_{12} - z_B \xi_{10})]$$

$$\frac{V_R}{\zeta_a} = \frac{1}{\zeta_a} [(\xi_3 - x_A \xi_5 + y_A \xi_4) - (\xi_9 - x_B \xi_{11} + y_B \xi_{10})]$$

(x_A, y_A, z_A) dan (x_B, y_B, z_B) adalah posisi koordinat terhadap titik acuan pada masing-masing bangunan apung dan ζ_a adalah amplitudo gelombang.

Skema *side-by-side* akan ditunjang dengan delapan tali tambat, yaitu: tiga *breast line* pada haluan kapal, dua *spring line* pada midship, dan tiga *breast line* pada buritan kapal. Selain itu, enam *fender* akan diposisikan pada *gap* antara FSRU dengan LNGC untuk meredam tumbukan yang terjadi. Konfigurasi tali tambat dan *fender* digambarkan pada Gambar 8.



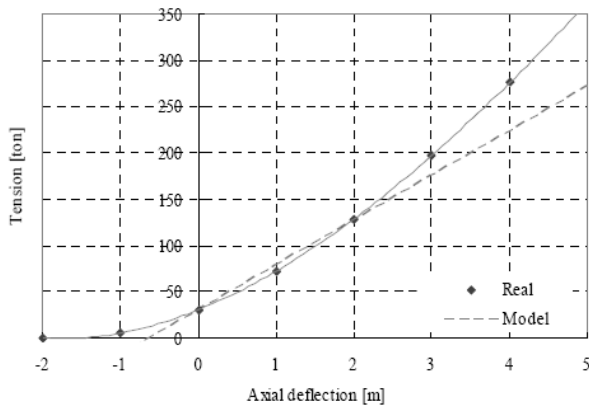
Gambar 6. Konfigurasi sistem tambat

Pada kajian ini, pemodelan tali tambat dan *fender* menggunakan komponen dengan karakteristik sebagai *spring linear*. Gaya yang terjadi, F , bergantung pada kekakuan (*stiffness*) yang dinotasikan sebagai k dan panjang regangan yang dinotasikan sebagai Δx . Regangan terjadi akibat beban, dalam hal

ini adalah akibat gerakan bangunan apung. Persamaan yang dipakai mengacu pada Hukum Hooke, yaitu:

$$F = k \Delta x$$

Tali tambat dimodelkan dengan *linear spring* yang mempunyai konstanta kekakuan konstan [7]. Penentuan konstanta kekakuan tali tambat dilakukan dengan meninjau Gambar 10 berikut. Kemudian ditentukan *pre-tension* pada tiap-tiap tali tambat, seperti Tabel 6.



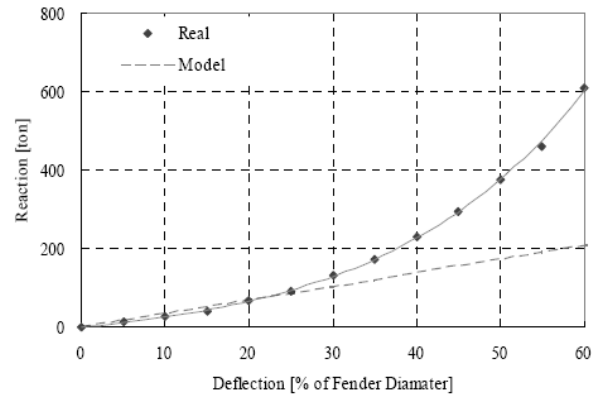
Gambar 7 Grafik perpanjangan aksial vs gaya tarik tali tambat [7]

Tabel 3 Tabel *pre-tension*

Line Number	Stiffness (N/m)	Panjang akhir (m)	Pre-tension (N)	Panjang awal (m)
1	572250	39.825	200000	39.476
2		32.678	355000	32.057
3		26.742	600000	25.694
4		73.809	750000	72.498
5		52.916	750000	51.606
6		27.017	455000	26.222
7		26.532	245000	26.104
8		28.698	110000	28.506

Pemodelan fender pada kajian ini tidak jauh berbeda dengan pemodelan tali tambat, yaitu dengan sifat *linear spring* yang mempunyai konstanta kekakuan tetap. Ukuran diameter

fender yang digunakan adalah 4,5 meter. Sebanyak 6 buah *pneumatic fender* dimodelkan untuk meredam tumbukan yang akan terjadi selama operasi *offloading* [7]. Konstanta kekakuan *fender* dilakukan dengan menelaah Gambar 10 berikut.



Gambar 8 Grafik defleksi fender Vs gaya reaksi [7]

Tabel 4 Kondisi pembebanan

Kondisi Pembebanan		1	2	3	4
Gelombang (JONSWAP)	Hs (m)	1,75	1,5	1,25	1
	Tp (detik)	7,5			
	γ	2,2			
	μ (°)	180			
Swell	H (m)	0,18			
	T (detik)	13,5			
Angin	μ (°)	112,5			
	Vw (m/detik)	15			
Arus	μ (°)	180			
	Vc (m/detik)	0,7			

Pengondisian beban ini dilakukan untuk menganalisis operabilitas *offloading* [8]. Tinggi gelombang signifikan berturut-turut menurun sampai kondisi pembebanan ketiga. Sedangkan nilai yang lainnya tetap. Kondisi pembebanan ditabelkan pada Tabel 4.

Respon linear bangunan apung akibat gelombang dapat digambarkan dengan frekuensi domain. Namun, sebagai langkah pendekatan untuk mengkaji skema *side-by-side* yang mempunyai respon *non-linear*

akibat gaya tali tambat dan *fender* sebagai salah satu contohnya, simulasi frekuensi *domain* dirasa kurang representatif [5]. Oleh karena itu dibutuhkan simulasi *time domain*. Teori respon *impulse* [9], [10] dapat digunakan untuk menjelaskan gaya reaktif fluida pada simulasi *time domain* [11], [12]. Persamaannya adalah:

$$\sum_{j=1}^{12} (M_{ij} + A_{ij}) \ddot{x}_j + \int_{-\infty}^t R_{ij}(t - \tau) \dot{x}(\tau) d\tau + C_{ij} x_j = F_i(t)$$

for $i = 1, 2, \dots, 12$

- x_j = gerakan pada moda j
- $F_i(t)$ = gaya eksternal (*first order wave forces, second order wave forces, gaya angin, gaya arus, gaya pengembali dari tali tambat dan fender*)
- M_{ij} = Matriks massa untuk bangunan apung A dan B.
- A_{ij} = Matriks massa tambah untuk bangunan apung A dan B.
- R_{ij} = Fungsi matriks redaman atau hambatan (*retardation*)
- C_{ij} = Matriks pengembali hidrostatis

Tabel 5. Distribusi tinggi gelombang signifikan dan periode puncak

	Hs (m)							TOT
	0,00-0,25	0,25-0,50	0,50-0,75	0,75-1,00	1,00-1,25	1,25-1,50	1,50-1,75	
0-2,5	20,91	18,05						
2,5-5,0	5,64	15,73	8,69	2,35	0,18			
5,0-7,5	0,96	9,32	12,36	4,14	1,09	0,16		
7,7-10,0	0,60	0,01						
10,0-12,5	0,03							
12,5-15,0	0,23	0,02						
15,0-17,5	0,05	0,02						
17,5-20,0	0,04							
TOT	27,88	43,15	21,05	6,49	1,27	0,16		100

Tabel 5 adalah distribusi tinggi gelombang signifikan dan periode puncak pada suatu lokasi yang kemudian digunakan sebagai data pendukung dalam melakukan kajian operabilitas yang nantinya akan dikorelasikan dengan syarat batas.

Persamaan operabilitas dapat dituliskan seperti persamaan berikut [2]:

$$Operabilitas = \left(\frac{N_a}{N_a + N_d} \right) \times 100\%$$

$$Down Time = 100\% - Operabilitas$$

N_a = Banyaknya kejadian di rentang syarat batas.

N_d = Banyaknya kejadian yang melebihi/ di luar syarat batas.

Berdasarkan sejumlah penelitian yang telah dilakukan [13], [14], [15], [16], dan [17] baik secara numeris maupun tes model, dihasilkan batasan-batasan operasi seperti pada Tabel 6.

Tabel 6 Kriteria Operabilitas saat Siklus Offloading

Fase	Keterangan	Desain Kriteria
Approach/ Berthing [13]	Posisi paralel antara LNGC dan FSRU	Double amplitude roll: 12,8°
	LNGC mendekati FSRU dengan bantuan tug boat	Double amplitude pitch: 6°
Offloading	FSRU dan LNGC menyentuh <i>fender</i> , pemasangan tali tambat dan <i>loading arm</i>	Kecepatan vertikal di <i>deck</i> : 2.13 m/s
	Tali tambat dalam batas aman	nylon: 40% dari <i>Breaking Strength</i> [14] Beban maksimal yang diperbolehkan 1354 kN [15]
Offloading	<i>Fender</i> 4,5 m dalam batas aman	Beban maksimal yang diperbolehkan 2492 KN [16] <i>Longitudinal</i> : ± 2 meter [15] Transversal: ± 2,5 meter [15] Vertikal: ± 2 meter [15]
	Gerakan relatif antara FSRU dengan LNGC pada posisi <i>loading arm</i> dan <i>manifold</i> dalam batas aman	<i>Longitudinal</i> : ± 4 meter [17] Transversal: ± 2 meter [17] Vertikal: ± 2 meter [17]

	Pelepasan sistem transfer LNG	Double amplitude roll: 12,8°
Depart/ Sail away [13]	Pelepasan sistem tambat	Double amplitude pitch: 6°
	LNGC menjauhi FSRU	Kecepatan vertikal di deck: 2.13 m/s

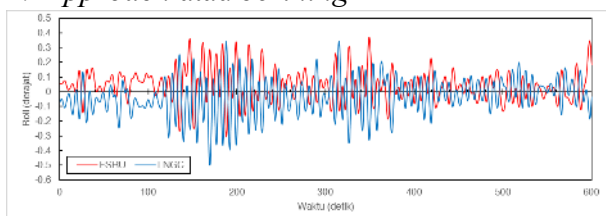
Pada fase *approach* atau *berthing* dan *depart* atau *sail away* digunakan kriteria ketika helikopter akan melakukan operasinya pada sebuah bangunan apung sebagai operasi yang aman [13]. Sedangkan ketika fase *offloading* digunakan kriteria yang disampaikan pada [14], [15], [16], dan [17]. Pada fase *offloading* terdapat tiga elemen penting untuk analisis operabilitas, yaitu: gaya tali tambat, gaya pada *fender*, serta gerakan relatif LNGC terhadap FSRU. Kriteria operabilitas tali tambat disampaikan pada [14] dan [15]. Kemudian, kriteria operabilitas *fender* diperoleh dari [16]. Lalu, kriteria operabilitas gerakan relatif LNGC terhadap FSRU mengacu pada [15] dan [17].

Pada Tabel 6 terdapat perbedaan kriteria operabilitas pada fase *offloading* untuk gerakan relatif FSRU dengan LNGC. Hal ini dapat disebabkan karena perbedaan desain dan karakter dari loading arm yang digunakan.

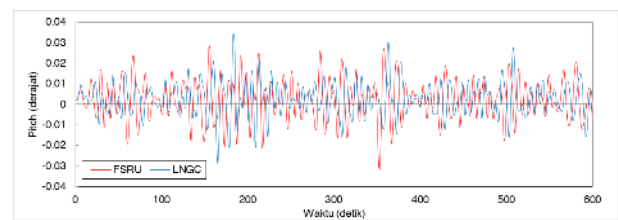
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan akan disajikan berdasarkan tiga fase siklus *offloading*, yaitu: *approach* atau *berthing*, *offloading*, dan *depart* atau *sail away*.

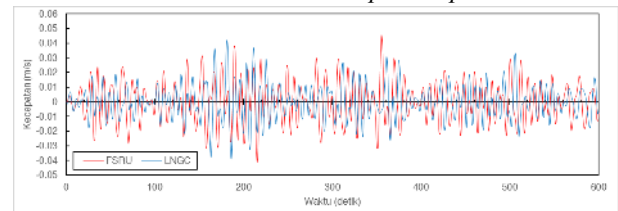
A. Approach atau berthing



Gambar 9. Double amplitude roll



Gambar 10 Double amplitude pitch



Gambar 11 Kecepatan vertikal

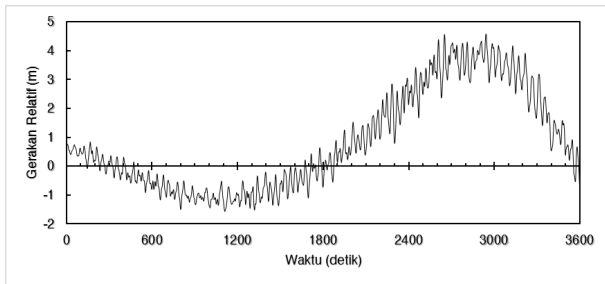
Tabel 7 Respon Gerakan dan Kecepatan Vertikal Maksimum

FSRU			LNGC		
Double Amplitude Roll (°)	Double Amplitude Pitch (°)	Kecepatan Vertikal (m/s)	Double Amplitude Roll (°)	Double Amplitude Pitch (°)	Kecepatan Vertikal (m/s)
0.37	0.03	0.05	0.34	0.03	0.04
-0.31	-0.03	-0.04	-0.50	-0.03	-0.04

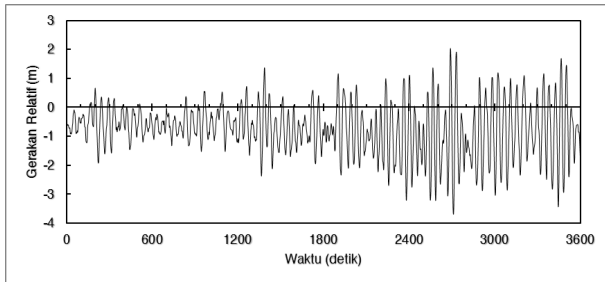
Respon gerakan maupun kecepatan vertikal FSRU dan LNGC ketika fase ini dengan kondisi pembebanan 1 digambarkan pada Gambar 9 sampai Gambar 11 dan nilai maksimumnya dirangkum pada Tabel 7. Amplitudo gerakan *roll* FSRU berada pada kisaran -0.31° sampai 0.37°. Sementara itu amplitudo gerakan *roll* LNGC relatif lebih besar daripada FSRU, yaitu berada pada kisaran -0.50° sampai 0.34°. Perbedaan amplitudo respon gerakan ini disebabkan karena lebar dan sarat FSRU lebih besar daripada LNGC, sehingga *displacement* FSRU lebih besar daripada LNGC yang menyebabkan *restoring force* atau gaya pengembali FSRU lebih besar daripada LNGC. Selain itu, fenomena *standing wave* yang terjadi di antara FSRU dan LNGC juga mempengaruhi gerakan roll pada FSRU dan

LNGC. Amplitudo gerakan *pitch* FSRU dan LNGC berada pada kisaran yang sama, yaitu -0.3° sampai 0.3°. Bentuk umum kapal yang ramping atau *slender* menyebabkan amplitudo gerakan *pitch* relatif lebih kecil daripada amplitudo gerakan *roll*. Jika dikaitkan dengan kriteria batas yang ditabulasikan pada Tabel 6 untuk fase ini, dapat disampaikan bahwa respon gerakan dan kecepatan vertikal pada kondisi pembebanan 1 masih dalam batas aman, sehingga begitu juga untuk kondisi pembebanan 2, 3, dan 4.

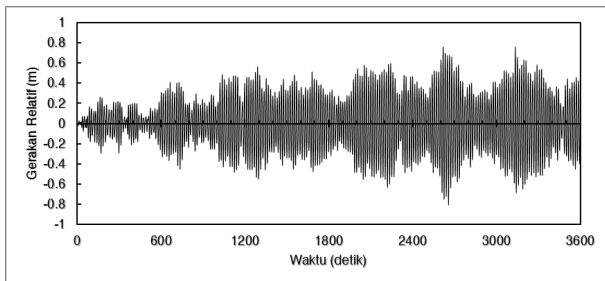
B. Offloading



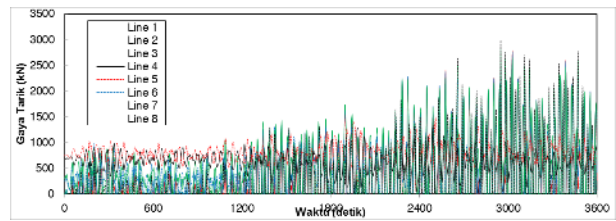
Gambar 12. Gerakan Relatif Longitudinal pada Kondisi Pembebanan 1



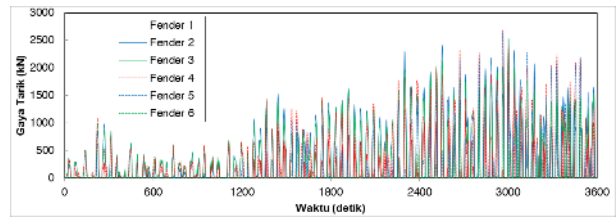
Gambar 13. Gerakan Relatif Transversal pada Kondisi Pembebanan 1



Gambar 14. Gerakan Relatif Vertikal pada Kondisi Pembebanan 1



Gambar 15. Gaya Tarik Tali Tambat pada kondisi Pembebanan 1

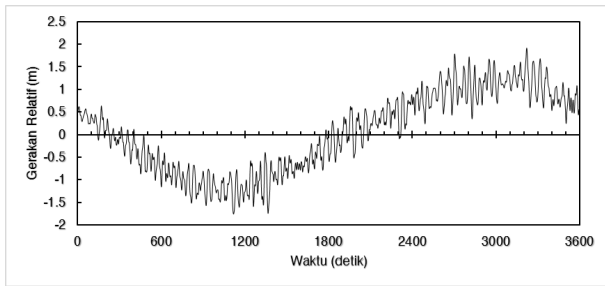


Gambar 16 Gaya Fender pada kondisi Pembebanan 1

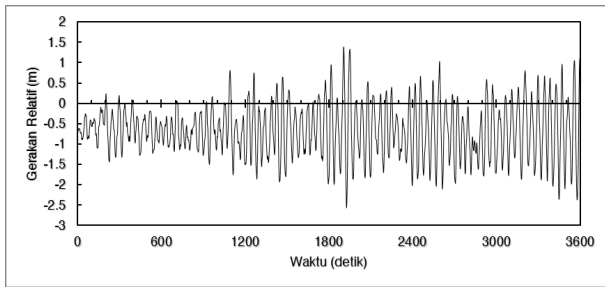
Tabel 8. Rangkuman nilai maksimum Gerakan Relatif, Gaya Tarik Tali Tambat, dan Gaya Fender pada kondisi Pembebanan 1

Gerakan Relatif (m)			Gaya Tarik Tali Tambat kN	Gaya Fender kN
Longitudinal	Transversal	Vertikal		
4.58	2.04	0.76	2444.66	2518.61
-1.58	-3.69	-0.81		

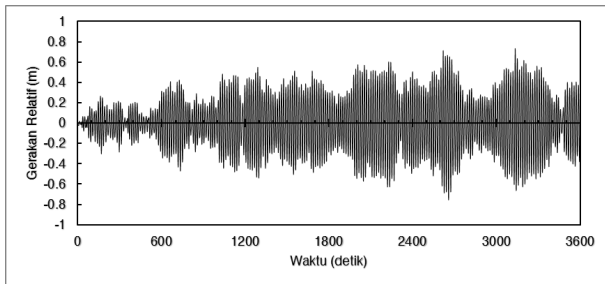
Gerakan relatif FSRU - LNGC, gaya tarik tali tambat, dan gaya fender, ketika kondisi pembebanan 1, seperti digambarkan pada Gambar 12 sampai Gambar 16 dan dirangkum pada Tabel 8 menunjukkan nilai yang melebihi desain kriteria yang terdapat pada tabel 6. Penyebabnya adalah tinggi gelombang signifikan yang terjadi cukup besar, yaitu 1,75 m, sehingga kondisi pembebanan 1 tidak memenuhi desain kriteria. Oleh karenanya, hasil analisis pada kondisi pembebanan 2 perlu disajikan untuk mengetahui respon gerakan dan sistem tambat untuk kondisi pembebanan 2.



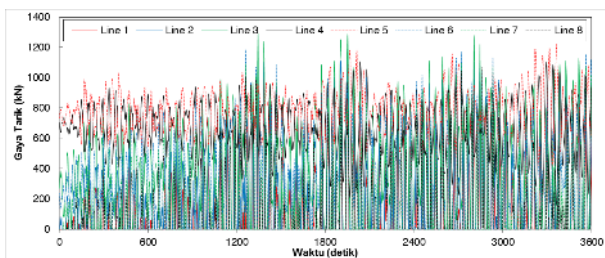
Gambar 17. Gerakan Relatif Longitudinal pada Kondisi Pembebanan 2



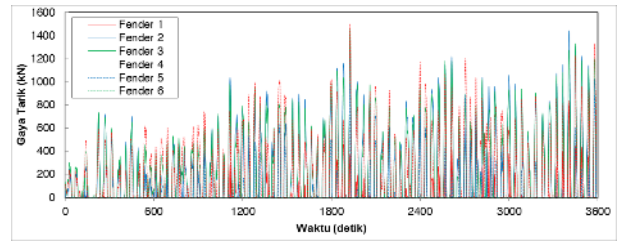
Gambar 18. Gerakan Relatif Transversal pada Kondisi Pembebanan 2



Gambar 19. Gerakan Relatif Vertikal pada Kondisi Pembebanan 2



Gambar 20. Gaya Tarik Tali Tambat pada kondisi Pembebanan 2



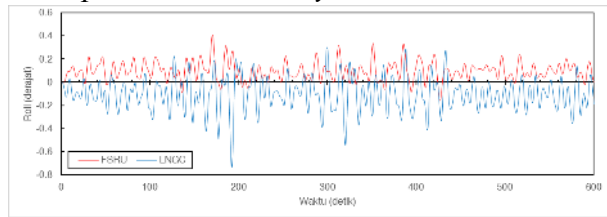
Gambar 21. Gaya Fender pada kondisi Pembebanan 2

Tabel 9. Rangkuman nilai maksimum Gerakan Relatif, Gaya Tarik Tali Tambat, dan Gaya Fender pada kondisi Pembebanan 2

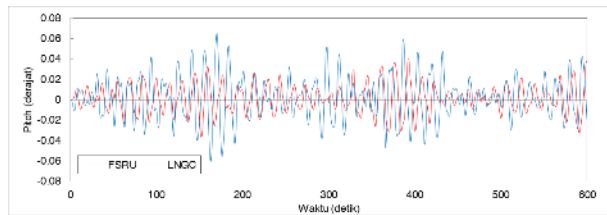
Gerakan Relatif (m)			Gaya Tarik Tali Tambat (kN)	Gaya Fender (kN)
Longitudinal	Transversal	Vertikal		
1,92	1,38	0,73	1292,1	1502,16
-1,76	-2,56	-0,81		

Gerakan relatif FSRU – LNGC, gaya tarik tali tambat, dan gaya fender untuk kondisi pembebanan 2, digambarkan pada Gambar 17 sampai Gambar 21 dan dirangkum pada Tabel 9. Kisaran gerakan relatif secara longitudinal, transversal, dan vertikal secara berturut-turut adalah -1,76 meter sampai 1,92 meter, -2,56 meter sampai 1,38 meter, dan -0,81 meter sampai 0,73 meter. Gaya Tarik tali tambat maksimum adalah 1292,1 kN dan gaya fender maksimum adalah 1502,16 kN. Gelombang signifikan pada kondisi pembebanan 2 relatif lebih kecil daripada kondisi pembebanan 1, sehingga respon gerakan dan sistem tambat lebih tenang. Berdasarkan penjelasan di atas, hasil pemodelan untuk kondisi pembebanan 2 menunjukkan nilai yang masih memenuhi desain kriteria pada tabel 6, begitu juga untuk kondisi pembebanan 3 dan 4.

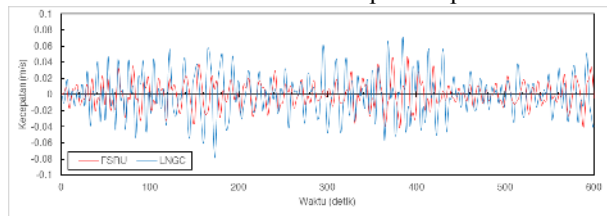
C. Depart atau sail away



Gambar 22. Double amplitude roll



Gambar 23. Double amplitude pitch



Gambar 24. Kecepatan vertical

Tabel 10. Respon Gerakan dan Kecepatan Vertikal Maksimum

FSRU			LNGC		
Double Amplitude Roll (°)	Double Amplitude Pitch (°)	Kecepatan Vertikal (m/s)	Double Amplitude Roll (°)	Double Amplitude Pitch (°)	Kecepatan Vertikal (m/s)
0,41	0,04	0,05	0,30	0,07	0,07
-0,16	-0,04	-0,04	-0,74	-0,06	-0,08

Respon gerakan *roll* dan *pitch* maupun kecepatan vertikal FSRU dan LNGC pada kondisi pembebanan 1 ketika fase ini disajikan dengan gambar 22 sampai gambar 24 dan nilai maksimumnya dirangkum pada Tabel 10. Perubahan amplitudo respon gerakan *roll* FSRU terjadi pada pada fase ini, yaitu menjadi lebih kecil pada kisaran $-0,16^{\circ}$ sampai $0,41^{\circ}$. FSRU cenderung lebih tenang dibandingkan pada fase *approach* atau *berthing* karena pada

fase ini *displacement* FSRU menjadi lebih besar akibat pemindahan muatan. Berbeda dengan gerakan LNGC yang semakin liar, yaitu berada pada kisaran $-0,74^{\circ}$ sampai $0,30^{\circ}$, karena berada pada kondisi muatan kosong. Jika dikaitkan dengan kriteria batas untuk fase ini pada Tabel 6, dapat disampaikan bahwa respon gerakan dan kecepatan vertikal pada kondisi pembebanan 1 masih dalam batas aman. Begitu juga untuk kondisi pembebanan 2, 3, dan 4.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan dari kajian ini, dapat disampaikan bahwa simulasi *time domain* dapat memprediksi pola gerak dinamis dua bangunan apung yang saling berinteraksi beserta respon sistem tambatnya (tali tambat dan *fender*).

Siklus *offloading* dapat berlangsung dengan tinggi gelombang maksimum 1,5 meter sesuai dengan kondisi pembebanan 2 karena respon gerak FSRU dan LNGC serta sistem tambatnya masih berada rentang kriteria batas

Jika hasil pembahasan dikorelasikan dengan distribusi gelombang pada Tabel 5, dengan menggunakan persamaan operabilitas, maka dapat disimpulkan bahwa operabilitas siklus *offloading* pada sistem ini untuk lokasi dengan distribusi tinggi gelombang signifikan terbesarnya adalah 1,5 meter adalah 100%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Institut Teknologi Kalimantan atas pendanaan yang diberikan untuk penelitian ini sesuai Surat Penugasan Pelaksanaan Penelitian No: 1872/IT10.III/PPM.04/2019.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Poldervaart, L. (2006), *Offshore LNG Transfer: A Worldwide Review of Offloading Availability*, Offshore Technology Conference 18026.
- [2] Djatmiko, E.B., (2012), *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di atas Gelombang Acak*, ITS Press, Surabaya.
- [3] De Pee, A., (2005), *Operability of a Floating LNG Terminal*, TU Delft, Shell Global Solutions.
- [4] TEC Moorings Inc, (2019), *Tower Mooring*,
<https://sites.google.com/site/otecmooring/sinc/mooring-systems/tower-mooring>, diakses pada 3 Juli 2019.
- [5] Naciri, M. (2007), Time domain Simulations of Side-by-Side Moored Vessels Lessons Learnt from Benchmark Test, 26th International Conference OMAE, San Diego, California, USA.
- [6] Kim, M.S. (2003), Relative Motions between LNG-FPSO and Side-by-Side positioned LNG Carrier in Waves, HSC-05.
- [7] Hong, P.Y. (2009), An Experimental and Numerical Study on the Motion Characteristics of Side-by-Side Moored LNG-FPSO and LNG carrier, 19th ISOPE Conference, Osaka, Japan.
- [8] Jeong, H. (2010), Offloading Operability Analysis of Side-by-Side Moored LNG FPSO, 19th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Busan, Korea.
- [9] Cummins, W.E., (1962), The Impulse Response Function and Ship Motions, DTMB Report 1661, Washington D.C.
- [10] Ogilvie, T.F., (1964), Recent Progress toward the Understanding and Prediction of Ship Motions, Fifth Symposium on Naval Hydrodynamics, Bergen.
- [11] Oortmerssen, G van, (1973), The Motions of a Moored Ship in Waves, NSMB Publication No. 510.
- [12] Oortmerssen, G van, (1981), Some Hydrodynamical Aspects of Multi-Body Systems, Int. Symposium on Hydrodynamics in Ocean Engineering.
- [13] Olson, S.R. (1977), A Methodology for Quantifying the Operational Effects of Ship Seakeeping Characteristics, Center for Naval Analyses, Virginia.
- [14] OCIMF (1997), Mooring Equipment Guidelines, 2nd Edition, Oil Companies International Marine Forum.
- [15] Hong, P.Y. (2009), An Experimental and Numerical Study on the Motion Characteristics of Side-by-Side Moored LNG-FPSO and LNG carrier, 19th ISOPE Conference, Osaka, Japan.
- [16] Jeong, H. (2010), Offloading Operability Analysis of Side-by-Side Moored LNG FPSO, 19th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Busan, Korea.
- [17] Kim, M.S. (2012), Improvement Method on Offloading Operability of Side-by-side Moored FLNG, 22nd ISOPE Conference, Rhodes, Greece.