

ANALISIS NUMERIK PENGARUH *MULTIBODY* PADA KONFIGURASI TRANSFER LNG SECARA *SIDE-BY-SIDE* DENGAN VARIASI JARAK

NUMERICAL ANALYSIS OF *MULTIBODY* EFFECT ON *SIDE-BY-SIDE* TRANSFER LNG CONFIGURATION WITH DISTANCE VARIATIONS

Yuni A. Wibowo*¹ dan Anas N. Firdaus¹

¹Departemen Teknologi Kelautan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Pangandaran, Jl. Raya Babakan KM. 02 Pangandaran, 46396-Jawa Barat, Indonesia

Teregistrasi 1 tanggal: 20 Desember 2019; Diterima setelah perbaikan tanggal: 04 Februari 2020; Disetujui terbit tanggal: 06 Februari 2020

ABSTRAK

Kebutuhan akan energi bersih dalam satu dekade terakhir terus meningkat seiring dengan kesadaran *user* dan *regulator* untuk menjaga kelestarian lingkungan, sehingga dibutuhkan berbagai macam upaya untuk mengelola dan memperluas produksinya. Salah satu jenis clean energy yang akhir-akhir ini menyita perhatian industri global adalah *Liquefied Natural Gas* (LNG). Asia Pasifik memiliki 9,4% dari cadangan gas dunia, dengan Indonesia menyumbang 1,53%. Kebanyakan cadangan LNG ditemukan pada laut lepas (*offshore*) dan terisolasi dari infrastruktur daratan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut dibutuhkanlah fasilitas struktur bangunan apung, seperti FSRU. FSRU sendiri biasanya ditambatkan pada *jetty*/dermaga dengan sistem *berthing*. Dalam mendesain dermaga perlu dipertimbangkan gaya-gaya yang timbul akibat kondisi *berthing* dengan konfigurasi *side-by-side*. Konfigurasi ini menciptakan efek *multibody* dalam perilaku hidrodinamika, sehingga penelitian ini bertujuan mengkaji efek *multibody* antara FSRU dan LNGC dengan variasi jarak satu sama lain 2, 4, 6 dan 8 m. Gerakan FSRU ditinjau dalam penelitian ini dengan skenario pemodelan tanpa pengaruh dan terpengaruh LNGC. Hal ini penting dilakukan dalam perancangan *jetty* karena FSRU ditambatkan pada *jetty*. Berdasarkan simulasi numerik analisis dinamis *frequency domain* yang dihasilkan, didapatkan bahwa efek *multibody* terlihat pada model *side-by-side*. Efek *multibody* akibat propagasi gelombang dari arah *head seas* ($\mu = 180^\circ$) tidak menyebabkan dampak signifikan pada variasi jarak, kecuali pada jarak 2 m akibat fenomena *standing wave*. Pada gelombang yang berpropagasi arah seperempat haluan ($\mu = 225^\circ$) dan arah samping ($\mu = 270^\circ$) juga terlihat adanya efek *multibody* pada variasi jarak. Pada model dengan jarak 4 dan 8 m, karakter RAO cenderung lebih rendah atau sama dengan RAO pada model *FSRU free floating*. Namun pada jarak 2 dan 6 m, karakter RAO lebih tinggi dari RAO FSRU *free floating*. Selain menaikkan dan menurunkan harga RAO gerakan, efek *multibody* juga menggeser frekuensi natural (?) struktur bangunan apung dengan beda 0.1 – 0.3 rad/s. Hal ini penting diketahui karena posisi frekuensi natural dapat memicu magnifikasi gerakan jika terjadi resonansi.

Kata Kunci: *side-by-side, multibody, RAO, frekuensi natural*

ABSTRACT

The demand of clean energy in the last decade continues to increase along with the awareness of users and regulators to preserve the environment, so that efforts are needed to manage and expand their production. A type of clean energy that has recently caught the attention of the global industry is *Liquefied Natural Gas* (LNG). Asia Pacific has 9.4% of the world's gas reserves, with Indonesia contributing 1.53%. Most LNG reserves are located in offshore and isolated from land infrastructure. To overcome these problems, floating structures, such as the FSRU, are needed. The FSRU is usually moored to the jetty / dock with the berthing system. In designing the jetty it is necessary to consider the forces that arise due to berthing condition with side-by-side configuration. This configuration create a multibody effect in hydrodynamic behavior, this study aims to examine the multibody effects between FSRU and LNGC with variations in distance 2, 4, 6 and 8 m. The FSRU movement was reviewed in this study with a modeling scenario without the influence and influence of the LNGC. This is important to evaluate in designing the jetty because the FSRU is moored to the jetty. According to the numerical simulation

DOI: <http://dx.doi.org/10.15578/marlin.V1.11.2020.25-37>

Korespondensi penulis:
e-mail: yuniariwibowo@gmail.com



of the dynamic frequency domain analysis, it was found that the multibody effect was found in the side-by-side model. The multibody effect due to wave propagation from the direction of the head seas ($\mu = 180^\circ$) does not cause a significant impact on the variation of the distance, except at a distance of 2 m due to the standing wave phenomenon. While the waves propagating in the direction of a quarter of the bow ($\mu = 225^\circ$) and the side direction ($\mu = 270^\circ$) a multibody effect is also found in the variation of distance. In models with a distance of 4 and 8 m, the RAO character tends to be lower or equal to RAO in the free floating FSRU model. Therefore at a distance of 2 and 6 m, the RAO character is higher than that of the RAO free floating FSRU. In addition to raising and lowering the RAO price of the movement, the multibody effect also shifts the natural frequency of the floating structure with a difference of 0.1 - 0.3 rad/s. This is important to investigate because the position of natural frequencies can trigger magnification of the movement in the event of resonance.

Keywords: side-by-side, multibody, RAO, natural frequency

PENDAHULUAN

Dalam satu dekade terakhir permintaan akan energi bersih (*clean energy*) terus meningkat seiring dengan kesadaran *user* (pemakai) dan *regulator* (pemerintah) untuk menjaga kelestarian lingkungan, sehingga dibutuhkan berbagai macam upaya untuk mengelola dan memperluas produksinya. Salah satu jenis *clean energy* yang akhir-akhir ini menyita perhatian industri global, salah satunya di Asia Pasifik adalah *Liquefied Natural Gas* (LNG). Asia Pasifik memiliki 9,4% dari cadangan gas dunia, yang mana Cina memiliki 2,9%, dan Indonesia memiliki 1,53% dari cadangan gas dunia, (Gus, 2019). Menurut catatan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada Januari 2018, total cadangan gas bumi di Indonesia mencapai 135,55 triliun standar kaki kubik (TSCF), Siswanto, Djoko 2018. Selain memiliki cadangan gas yang cukup besar, Indonesia juga termasuk dalam peringkat lima besar negara eksportir LNG di dunia, dengan lima teratas konsumen LNG Indonesia berdasarkan pangsa adalah Jepang, Korea, Taiwan, Cina dan AS, (Gus, 2019).

Kebanyakan cadangan LNG ditemukan pada laut lepas (*offshore*) dan terisolasi dari infrastruktur daratan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut dibutuhkanlah fasilitas

struktur bangunan apung yang dalam satu dekade ini sedang dikembangkan secara masif oleh para ahli di bidang industri teknologi kelautan, seperti halnya *Floating Storage Regasification Unit* (FSRU). FSRU merupakan fasilitas terapung yang berfungsi untuk menampung dan memproses LNG dari bentuk gas ke cair dan sebaliknya (proses regasifikasi). FSRU ini ditambatkan pada *jetty* sebagai LNG *receiving terminal*. Pada dasarnya pola kerja dari terminal ini adalah sebagai berikut : LNG diangkut oleh *LNG Carrier* (LNGC) dari ladang gas lepas pantai, kemudian ditambatkan pada FSRU secara *side-by-side*. FSRU sendiri diikat dengan sistem *berthing* pada *jetty*. Muatan LNG dari LNGC ditransfer ke FSRU melalui *loading arms* yang mampu menahan suhu cryogenic LNG yang mencapai -160°C .

Sistem tambat *side-by-side* mengharuskan LNGC berada secara paralel dengan FSRU dan saling berhimpit satu sama lain dengan jarak aman yang diatur oleh OCIMF, sekitar 2 s.d. 8 meter, (OCIMF, 2008). Sistem ini berakibat pada timbulnya efek *multibody* pada gerakan struktur apung, dimana gerakan LNGC akan mempengaruhi FSRU dan sebaliknya. Efek *multibody* ini perlu ditinjau dalam merancang *jetty* yang mampu menahan gerakan dari kedua struktur bangunan apung.



Gambar 1. Konfigurasi *side-by-side* pada transfer LNG (Sumber : <http://mfame.guru/worlds-biggest-ship-to-ship-lng-transfers-starts-off-in-turkey/>).

Kim, (2003) telah meninjau analisis dinamis multibody struktur apung pada FPSO, dia mengidentifikasi pengaruh kopel dengan tali tambat (*mooring lines*) serta riser pada analisis dinamis. Bunnik, (2009) menganalisis efek damping pada konfigurasi *side-by-side offloading*. Analisis hidrodinamis pada interaksi kedua struktur apung dengan sistem *side by side* juga telah dilakukan oleh Perwitasari, (2010), Perwitasari meninjau interaksi multibody pada FPSO Sevan Marine yang berbentuk silinder. Kemudian menyusul penelitian dengan pokok bahasan yang sama dan dikembangkan untuk mengetahui operabilitas FSRU saat *side by side offloading* akibat beban gelombang oleh Ziyani, (2013). Dalam penelitian tersebut baik Perwitasari maupun Ziyani tidak melakukan analisis terhadap pengaruh jarak horisontal yang terbentuk oleh kedua bangunan apung saat *side by side offloading*. Wibowo, (2014), menganalisis pengaruh jarak pada konfigurasi *side-by-side*, namun belum memasukkan efek *multibody* ke dalam analisis dinamis

Penelitian ini bertujuan mengkaji efek multibody antara FSRU dan LNGC yang ditambatkan secara *side-by-side*

Tabel 1. Ukuran-ukuran utama FSRU dan LNGC

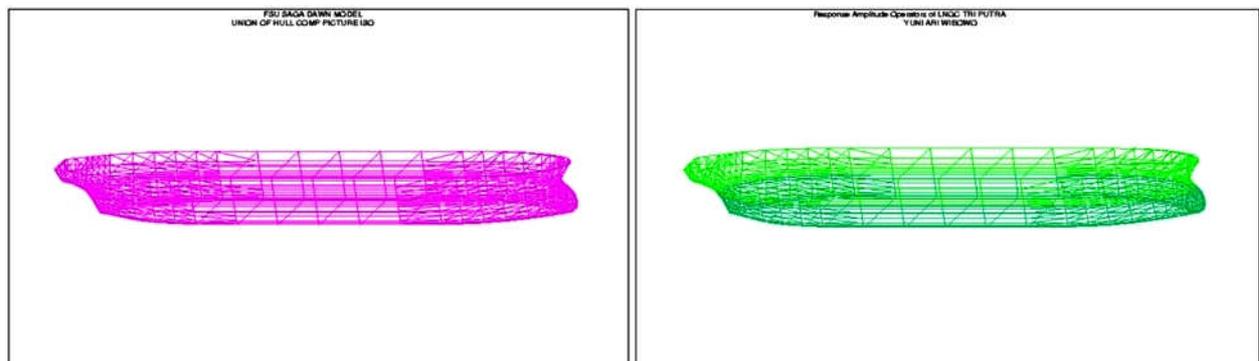
VESSEL PARAMETERS	UNIT	FSRU (45.000 CBM)	LNGC (GT : 20.524 T)
<i>Length over all (LOA)</i>	m	195.30	151.00
<i>Length of perpendicular (LPP)</i>	m	184.80	140.00
<i>Breadth (B)</i>	m	30.00	28.00
<i>Height (H)</i>	m	20.00	16.00
<i>Draft (T)</i>	m	9.00	7.30
<i>Center of Gravity – x-axis (COG_x)</i>	m	89.48	68.98
<i>Center of Gravity – y-axis (COG_y)</i>	m	0.00	0.00
<i>Center of Gravity – z-axis (COG_z)</i>	m	6.41	5.59
<i>Radii of Gyration – x-axis (R_{xx})</i>	m	10.29	9.42
<i>Radii of Gyration – y-axis (R_{yy})</i>	m	53.35	40.41
<i>Radii of Gyration – z-axis (R_{zz})</i>	m	53.35	40.41

dengan variasi jarak satu sama lain 2, 4, 6 dan 8 m. Gerakan FSRU ditinjau dalam penelitian ini dengan skenario pemodelan tanpa pengaruh dan terpengaruh keberadaan LNGC. Hal ini penting dilakukan dalam perancangan *jetty* karena FSRU ditambatkan pada *jetty*.

METODOLOGI PENELITIAN

Pemodelan

Dua struktur apung, FSRU dan LNGC dimodelkan sebagai *rigid body surface model*. Ukuran-ukuran utama (*pricipal dimension*) struktur apung tersebut dapat dilihat pada Tabel 1. Model tersebut menggunakan pendekatan 3D diffraction yang disusun dari susunan *panel method*. Pemodelan struktur apung tersebut dilakukan pada pemrograman komputasi difraksi dan dapat dilihat pada Gambar 2. Untuk mendetailkan pemodelan, dilakukan *mesh refining* membentuk pola *meshing* kotak agar tekanan pada permukaan model dapat terdistribusikan secara akurat (Gambar 3).

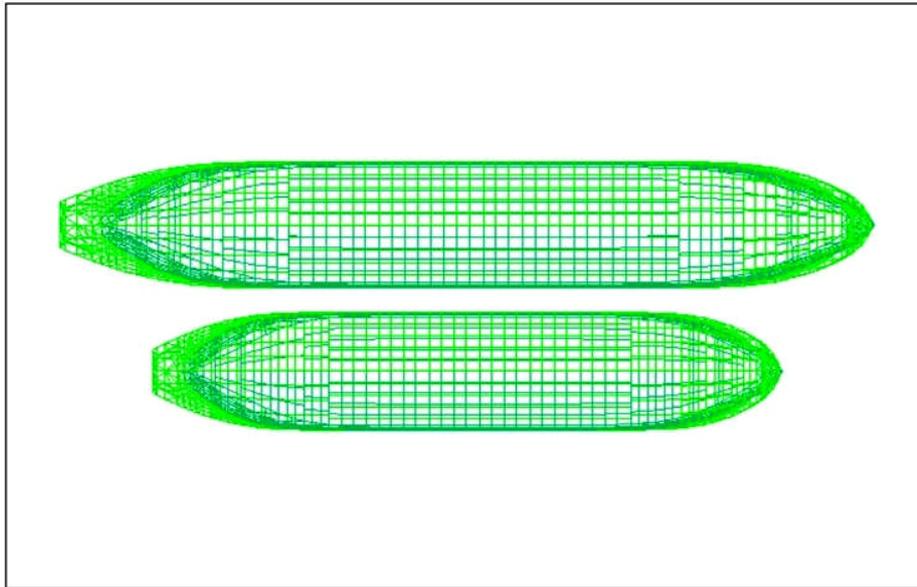


Gambar 2. Pemodelan 3D surface FSRU dan LNGC pada pemrograman komputasi difraksi.

Konfigurasi Side-by-side

FSRU dan LNGC dikonfigurasi secara *side-by-side* (Gambar 3) dengan variasi jarak 2, 4, 6 dan 8 m untuk

melihat pengaruh *multibody* pada gerakan struktur apung akibat perbedaan jarak. Simulasi dilakukan dengan 4 model berdasarkan jarak antara FSRU dengan LNGC (Tabel 2).



Gambar 3. Konfigurasi *side-by-side* FSRU dengan LNGC (Atas : FSRU; dan Bawah : LNGC).

Tabel 2. Skenario pemodelan konfigurasi *side-by-side* berdasarkan jarak antara FSRU dan LNGC

Konfigurasi <i>Side-by-side</i>	Variasi Jarak antara FSRU dan LNGC (dalam m)
Model A	2
Model B	4
Model C	6
Model D	8

Persamaan Gerak Struktur Apung

Komponen hidrodinamika yang berperan penting dalam analisis ini mencakup komponen internal dan eksternal. Komponen internal merupakan komponen radiasi yang berasal dari struktur apung, terdiri atas massa struktur apung, massa tambah bagian yang tercelup air (*wetted surface*), redaman (*damping*) dan kekakuan (*stiffness*). Sedangkan komponen eksternal merupakan komponen difraksi dari gaya gelombang linier. Jika komponen tersebut disatukan, maka akan terbentuk persamaan gerak satu derajat kebebasan/*Single Degree of Freedom* (SDOF) yang dapat dituliskan sebagai persamaan berikut :

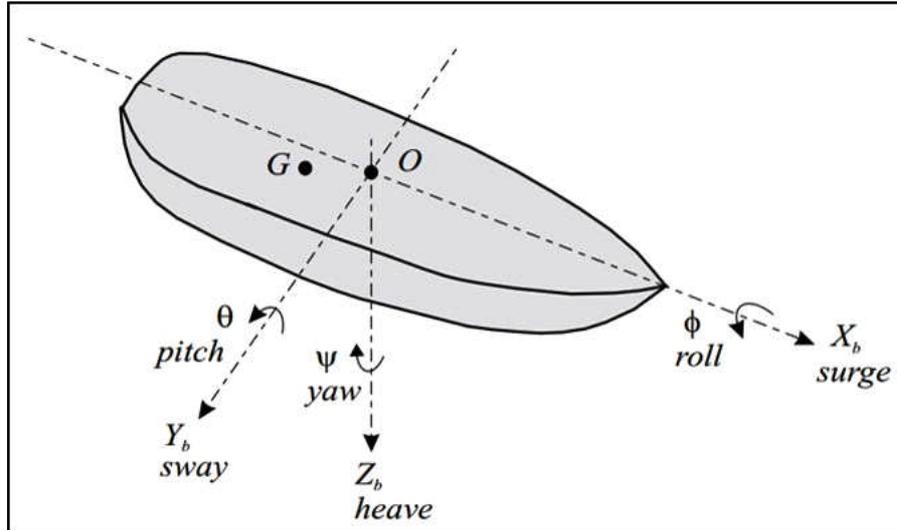
$$[(m + m_a)\ddot{\zeta} + c\dot{\zeta} + k\zeta] = Fe^{-i\omega t} \dots\dots\dots(1)$$

dimana;

- m : massa struktur apung
- m_a : massa tambah bagian yang tercelup dari struktur apung
- c : redaman
- k : kekakuan
- $Fe^{-i\omega t}$: komponen gaya gelombang linier

Struktur apung memiliki enam derajat kebebasan/*Multi Degree of Freedom* (MDOF) yang terdiri dari 3 gerakan translasional dan 3 rotasional seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Sehingga persamaan (1) dapat dituliskan seperti persamaan (2), untuk *singlebody*.

$$\sum_{k=1}^6 [(m + m_a)\ddot{\zeta} + c\dot{\zeta} + k\zeta] = Fe^{-i\omega t} \dots\dots\dots(2)$$



Gambar 4. Enam derajat kebebasan (6DOF) struktur apung.

Jika struktur apung lebih dari satu (*multibody*) dan saling berpengaruh satu sama lain, maka persamaan gerak (2) dapat dituliskan seperti persamaan (3).

$$\sum_{k=1}^6 \left[(m^N + m_a^N) \ddot{\zeta} + (c^N) \dot{\zeta} + k^N \zeta \right] = F^N e^{-i\omega t} \dots (3)$$

Komponen “N” menunjukkan efek multibody, yang terdiri dari matriks 6 x 6 dari derajat kebebasan. Persamaan tersebut diselesaikan menjadi, Djatmiko, (2012):

$$\zeta = \frac{F^N e^{-i\omega t}}{\sqrt{\left[\left\{ k - (m + m_a)\omega^2 \right\}^2 + (c\omega)^2 \right]}} \dots (4)$$

dan

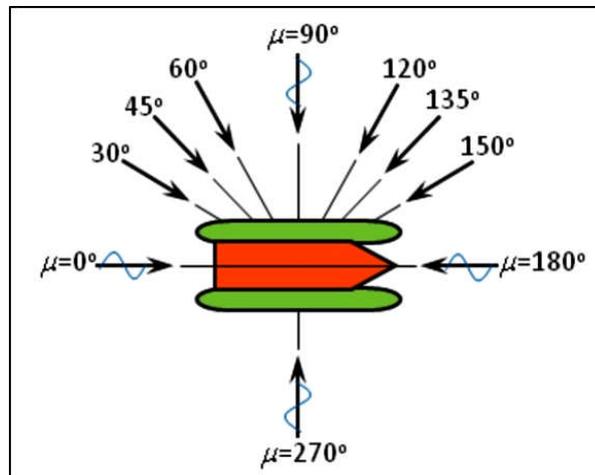
$$\tan \varepsilon = \frac{c\omega}{k - (m + m_a)\omega^2} \dots (5)$$

Persamaan (4) jika dibandingkan dengan amplitudo gelombang reguler maka akan menghasilkan *Response*

Amplitude Operator (RAO), yaitu perbandingan antara amplitudo gerakan dengan amplitudo gelombang, sebuah instrumen yang menyatakan karakteristik gerakan pada gelombang reguler. RAO inilah yang ditinjau dalam penelitian ini, akibat adanya efek *multibody* antara FSRU dan LNGC dengan variasi jarak antar keduanya. Persamaan RAO tersebut merupakan bentuk dari *frequency domain*, dimana harganya bergantung pada frekuensi gelombang yang menjadi inputan Djatmiko, (2012). Persamaan (5) menyatakan sudut fase yang terjadi antara gerakan struktur apung dengan gerakan gelombang.

Skenario Pembebanan Gelombang

Pembebanan gelombang pada struktur apung disimulasikan berpropagasi dari arah *headseas* (180 deg), *quartering seas* (135 deg) dan *beam seas* (90 deg), ditunjukkan pada Gambar 5. Ketiga arah propagasi gelombang ini ditinjau untuk mengetahui efek *multibody* pada arah pembebanan gelombang. Frekuensi gelombang reguler (ω) yang diuji berkisar antara 0.2 – 2.3 rad/s.



Gambar 5. Konvensi arah propagasi gelombang pada struktur apung (Sumber : [9]).

HASIL DAN BAHASAN

Hasil

RAO yang dihasilkan dari simulasi numerik dengan pemrograman komputasi difraksi diklasifikasikan ke dalam 2 bagian, untuk meninjau efek *multibody* yang terbentuk akibat jarak antara FSRU dan LNGC : a) gerakan vertikal dan b) gerakan horizontal. Gerakan vertikal struktur apung terdiri dari gerakan *heave*, *roll* dan *pitch*, sedangkan gerakan horizontal terdiri dari *surge*, *sway* dan *yaw*.

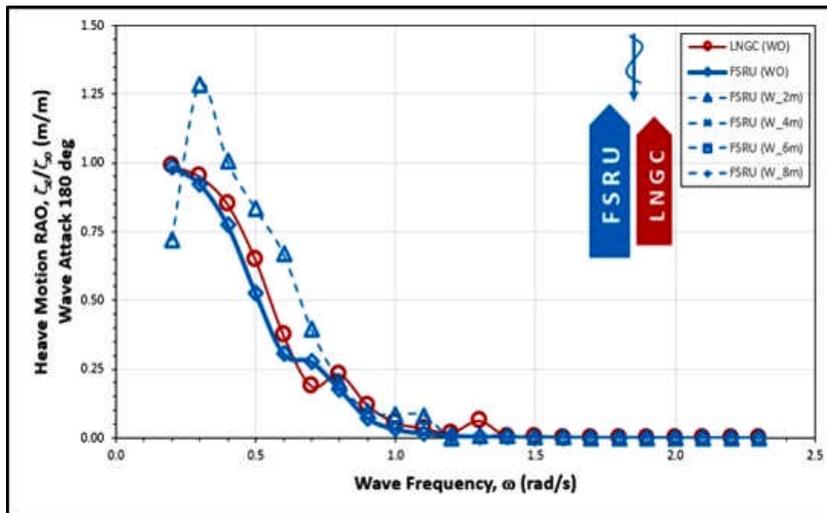
Efek *Multibody* pada Gerakan Vertikal Struktur Apung

Kondisi *Head Seas* ($\mu = 180^\circ$)

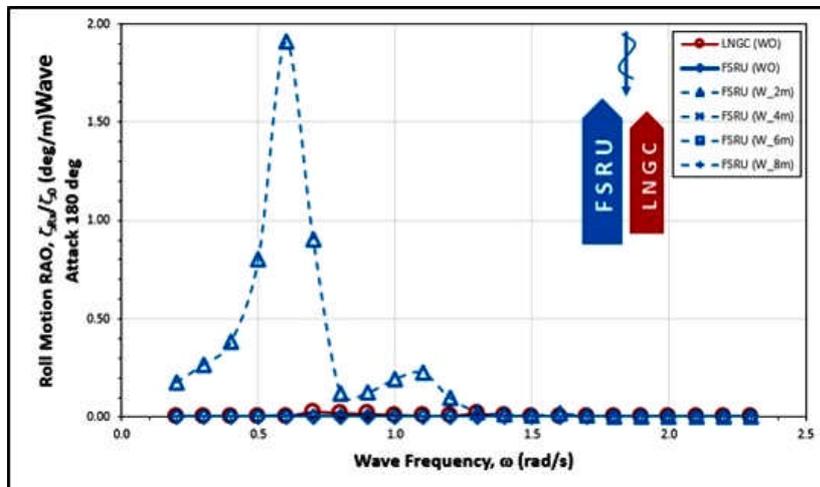
Efek *multibody* pada gerakan *heave*, *roll* dan *pitch* akibat gelombang *head seas* dapat ditinjau pada Gambar 6, 7 dan 8 secara berturut-turut. Warna merah pada grafik menunjukkan RAO LNGC, sedangkan warna biru menunjukkan FSRU. Garis biru penuh merupakan representasi gerakan FSRU free floating, tanpa adanya

LNGC yang tertambat pada FSRU. Sedangkan garis biru putus-putus menunjukkan gerakan FSRU dengan variasi jarak 2, 4, 6 dan 8 m. Terlihat pada ketiga grafik RAO tersebut bahwa propagasi gelombang dari arah *head seas* ($\mu = 180^\circ$) tidak menyebabkan dampak signifikan pada variasi jarak antara FSRU dan LNGC, kecuali pada jarak 2 m. Minimumnya efek *multibody* dikarenakan gelombang langsung melewati celah yang terbentuk antara FSRU dan LNGC, sedangkan pada jarak 2 m, gelombang yang melewati celah terpantulkan pada kedua sisi lambung kapal sehingga terbentuk *standing wave*.

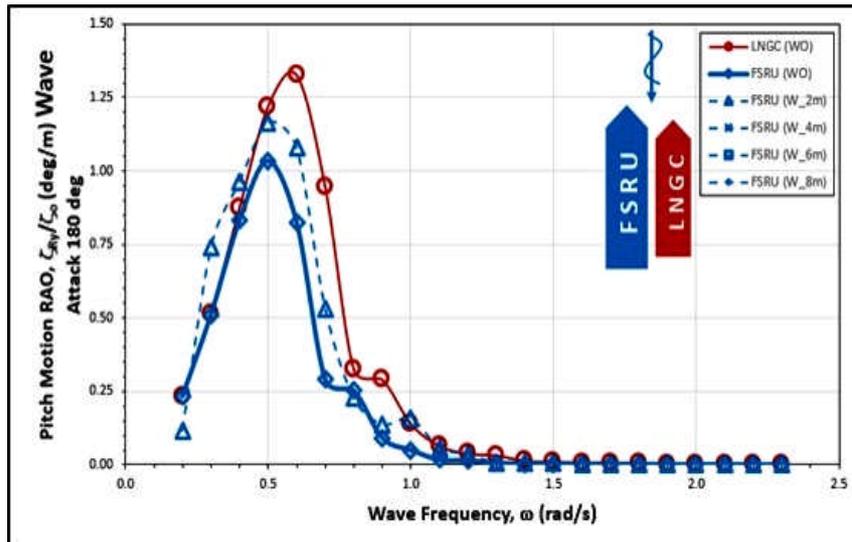
Efek *multibody* tampak jelas berdampak pada gerakan *roll* saat jarak 2 m. RAO puncaknya mencapai 1.9 deg/m dengan frekuensi naturalnya, ω_n , 0.6 s, harga ini cukup signifikan dibandingkan dengan gerakan FSRU tanpa LNGC maupun yang berjarak 4, 6 dan 8 yang memiliki harga RAO *roll* 0 deg/m. Selain itu, gerakan *roll* dengan jarak 2 m memiliki puncak kedua pada frekuensi 1.1 rad/s dengan harga 0.2 deg/m.



Gambar 6. RAO gerakan *heave* dengan arah propagasi gelombang *head seas*.



Gambar 7. RAO gerakan *roll* dengan arah propagasi gelombang *head seas*.



Gambar 8. RAO gerakan *pitch* dengan arah propagasi gelombang *head seas*.

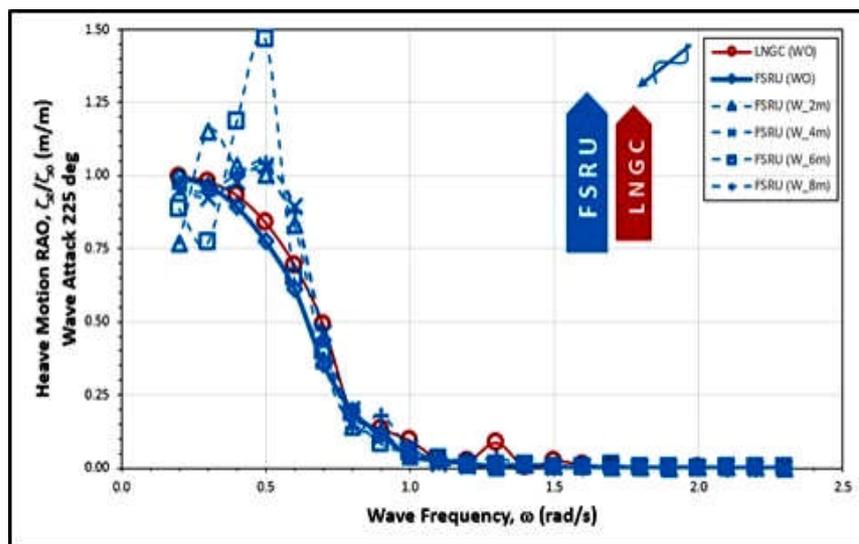
Kondisi Quartering Seas ($\mu = 225^\circ$)

RAO gerakan vertikal akibat propagasi gelombang arah miring ($\mu = 225^\circ$) dapat ditunjukkan pada Gambar 9, 10 dan 11 secara berturut-turut. Gerakan *heave* dapat dilihat pada Gambar 9, berdasarkan gambar tersebut model dengan jarak 4 dan 8 m, memiliki karakteristik gerakan yang identik. Puncak harga RAO *heave* didapati pada frekuensi 0.5 rad/s dengan harga puncak mencapai 1.04 m/m. Puncak RAO pada jarak tersebut bergeser ke frekuensi lebih tinggi, yaitu sebesar 0.3 rad/s dibandingkan dengan RAO FSRU tanpa LNGC. Sedangkan pada model dengan jarak 2 dan 6 meter, memiliki harga puncak sebesar 1.15 dan 1.46 m/m, dibandingkan harga puncak FSRU tanpa LNGC yang berharga 1.00 m/m. Model dengan jarak 2 meter memiliki frekuensi natural pada 0.3 rad/s, sedangkan

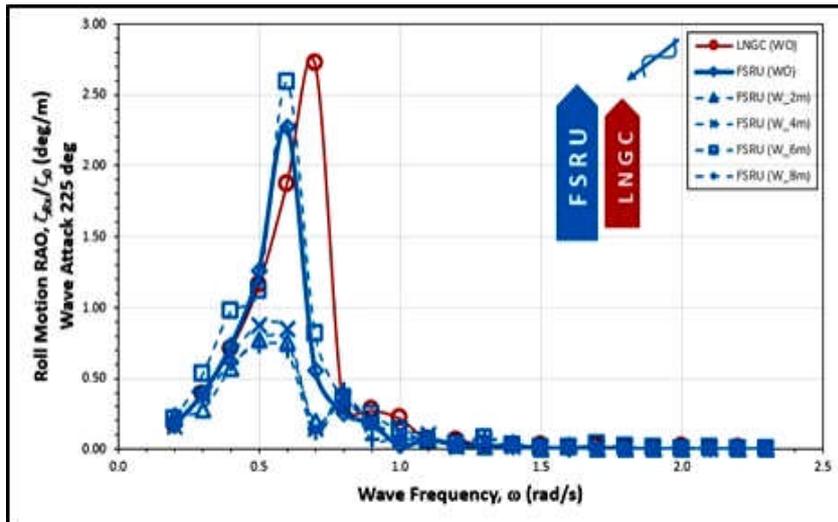
model dengan jarak 6 m memiliki frekuensi natural pada 0.5 rad/s.

Gerakan *roll* pada model dengan jarak 2, 4 dan 8 m memiliki karakter yang lebih rendah 68% jika dibandingkan dengan model FSRU tanpa LNGC. Hal ini terjadi karena gaya gelombang teredam oleh keberadaan LNGC. Namun pada model dengan jarak 6 m, puncak RAO sedikit lebih tinggi 5% dibandingkan dengan FSRU *free floating*. Frekuensi natural dari keseluruhan model didapati pada frekuensi yang sama, yaitu pada saat $\omega_n = 0.6$ rad/s.

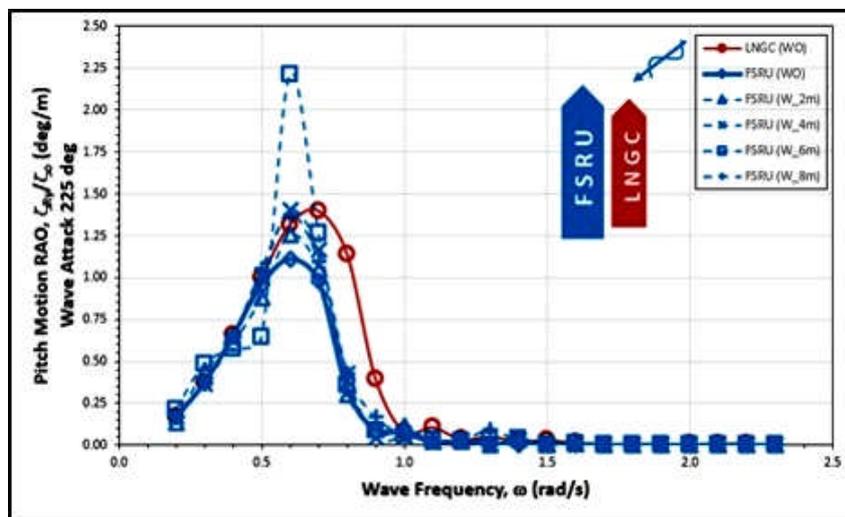
RAO gerakan *pitch* pada model dengan jarak 6 m juga terlihat memiliki puncak RAO paling tinggi sebesar 2.21 deg.m, jika dibandingkan dengan model lainnya. Efek *multibody* menaikkan puncaknya hingga sebesar 49% dari



Gambar 9. RAO gerakan *heave* dengan arah propagasi gelombang *quartering seas*.



Gambar 10. RAO gerakan *roll* dengan arah propagasi gelombang *quartering seas*.



Gambar 11. RAO gerakan *pitch* dengan arah propagasi gelombang *quartering seas*.

model FSRU tanpa LNGC.

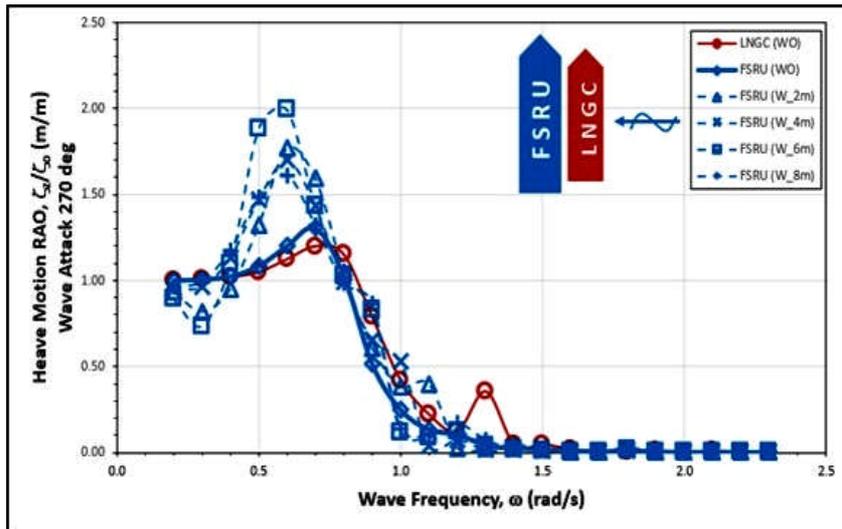
Kondisi *Beam Seas* ($\mu = 270^\circ$)

Efek *multibody* akibat propagasi gelombang arah *beam seas* ($\mu = 270^\circ$) pada gerakan *heave*, *roll* dan *pitch* disajikan dalam Gambar 12, 13 dan 14 secara berurutan. Frekuensi natural gerakan *heave* pada Gambar 12 untuk model FSRU dengan jarak 2, 4, 6 dan 8 bergeser ke frekuensi rendah dari model FSRU free floating, yaitu menjadi $\omega = 0.6$ rad/s. Harga puncak RAO tertinggi didapati pada model dengan jarak 6 m.

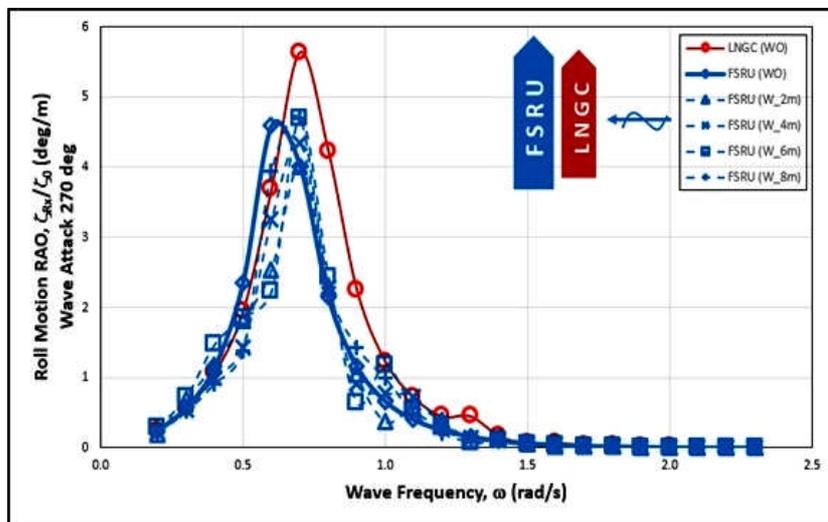
Pada gerakan *roll* frekuensi naturalnya bergeser ke frekuensi lebih tinggi, yaitu $\omega = 0.7$ rad/s. Hal ini

menunjukkan bahwa efek *multibody* berperan penting dalam menggeser frekuensi natural gerakan dari FSRU tersebut. Puncak RAO untuk tiap-tiap model yang berjarak maupun yang tidak, berkisar antara 4.0 – 4.6 deg/m.

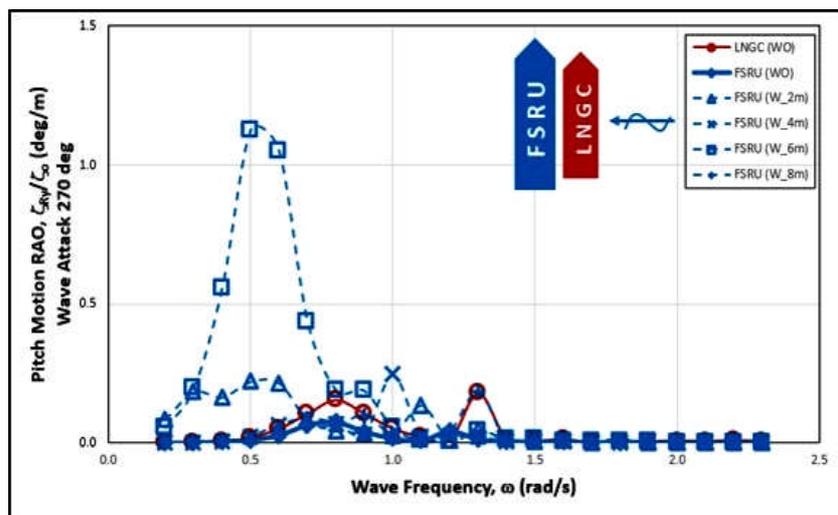
Efek *multibody* pada gerakan *pitch* cukup terlihat jelas, terutama pada model yang memiliki jarak 6 m sebagaimana yang terlihat pada Gambar 14. Puncak RAO model tersebut dapat mencapai harga 1.1 deg/m. Hal ini menunjukkan walaupun arah gelombang dari arah samping, namun dapat menggerakkan FSRU rotasional terhadap sumbu y (*pitch*) sebesar 1.1 deg per 1 m amplitudo gelombang sebagai bentuk akibat dari efek *multibody*.



Gambar 12. RAO gerakan *heave* dengan arah propagasi gelombang *beam seas*.



Gambar 13. RAO gerakan *roll* dengan arah propagasi gelombang *beam seas*.

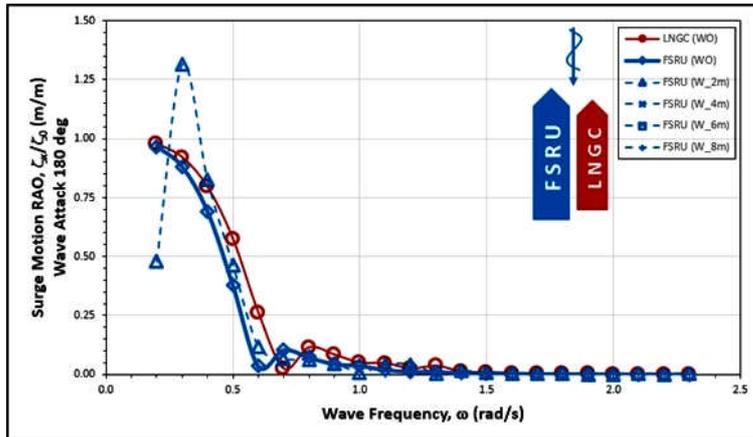


Gambar 14. RAO gerakan *pitch* dengan arah propagasi gelombang *beam seas*.

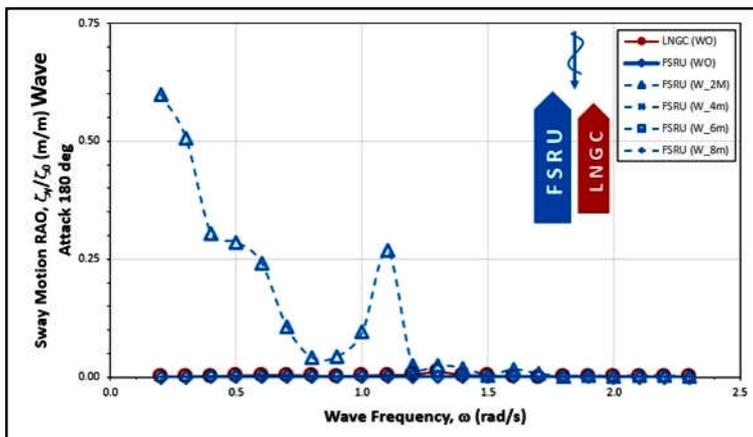
Efek *Multibody* pada Gerakan Horizontal Struktur Apung Kondisi *Head Seas* ($\mu = 180^\circ$)

Efek *multibody* pada gerakan horizontal, yang terdiri dari *surge*, *sway* dan *yaw* dapat ditunjukkan pada Gambar 15, 16 dan 17 secara berturut-turut. Jika ditinjau secara seksama, efek *multibody* hanya muncul pada model FSRU

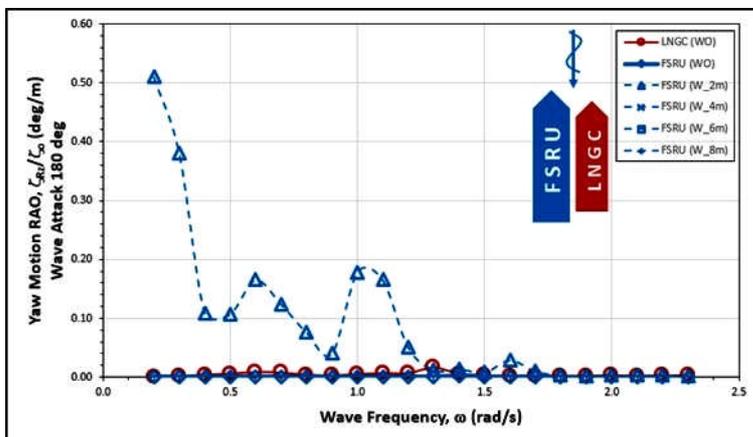
dengan jarak 2 m. Hal ini terjadi karena dengan jarak yang relatif kecil menimbulkan terjadinya fenomena *standing wave* antara lambung FSRU dan LNGC, sehingga walaupun propagasi gelombang dari arah haluan kapal, mampu menggerakkan struktur apung pada gerakan *sway* dan *yaw*. Harga puncak RAO untuk *sway* dan *yaw* mencapai 0.6 m/m dan 0.5 deg/m secara berurutan.



Gambar 15. RAO gerakan *surge* dengan arah propagasi gelombang *head seas*.



Gambar 16. RAO gerakan *sway* dengan arah propagasi gelombang *head seas*.

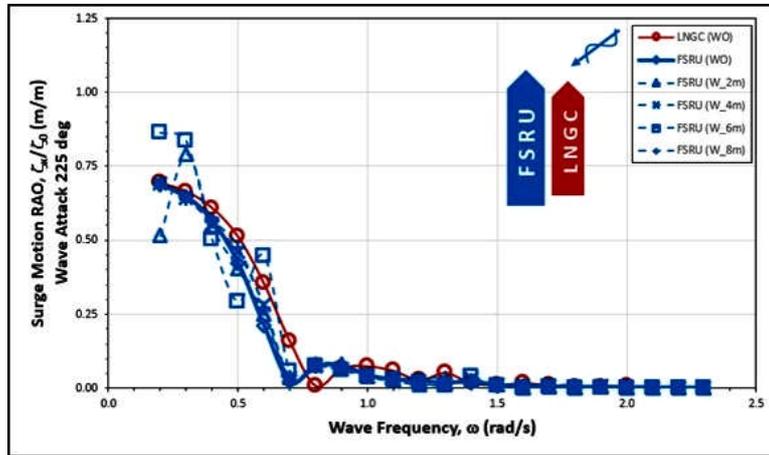


Gambar 17. RAO gerakan *yaw* dengan arah propagasi gelombang *head seas*.

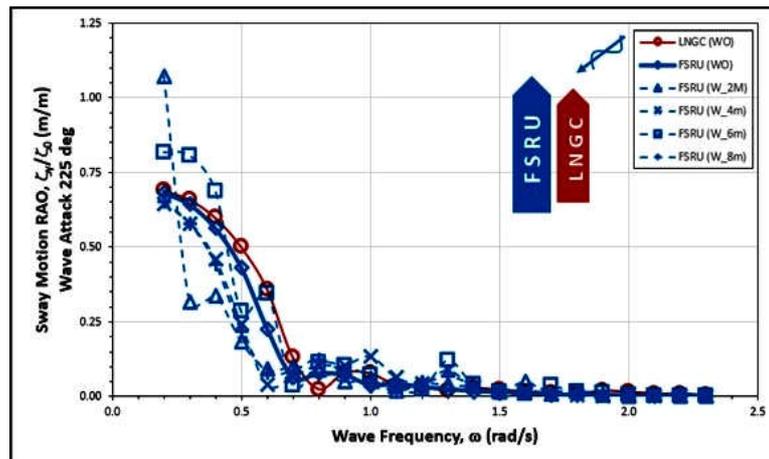
Kondisi Quartering Seas ($\mu = 225^\circ$)

Efek *multibody* pada gerakan *surge*, *sway* dan *yaw* akibat propagasi gelombang arah seperempat haluan ($\mu = 225^\circ$) dapat dilihat pada Gambar 18, 19 dan 20. Efek *multibody* pada gerakan *surge* jarak 4 dan 8 tidak terlalu

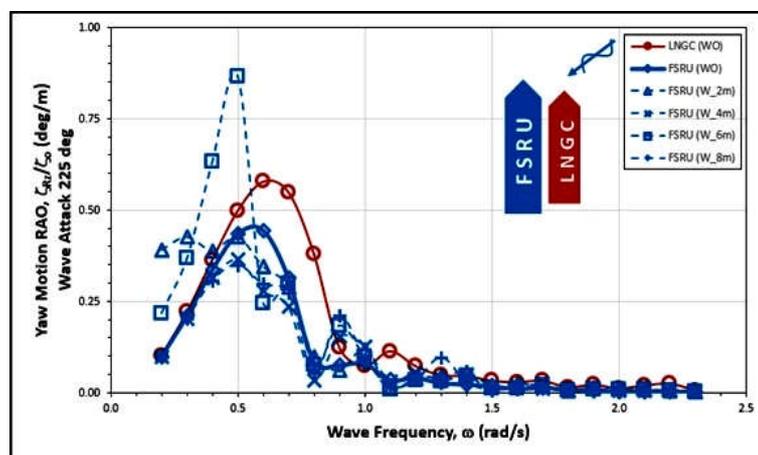
signifikan dibandingkan dengan FSRU *free floating*. Di lain sisi, efek *multibody* terlihat meredam gerakan *sway* dan *yaw* di jarak yang sama, namun pada jarak 2 dan 6 m terlihat meningkatkan gerakan horizontal pada struktur terapung hingga mencapai 95% pada gerakan *yaw*.



Gambar 18. RAO gerakan *surge* dengan arah propagasi gelombang *quartering seas*.



Gambar 19. RAO gerakan *sway* dengan arah propagasi gelombang *quartering seas*.

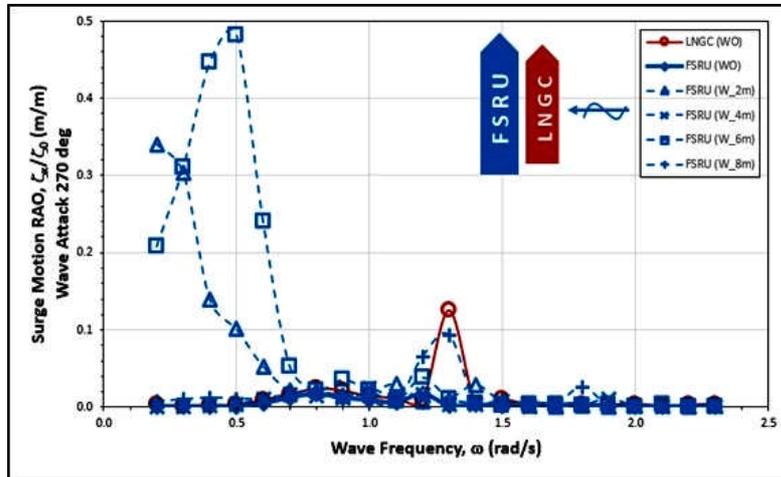


Gambar 20. RAO gerakan *yaw* dengan arah propagasi gelombang *quartering seas*.

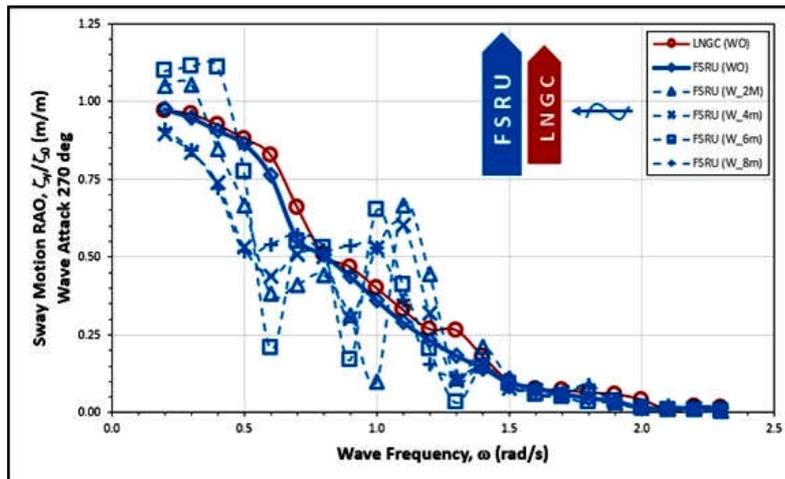
Kondisi *Beam Seas* ($\mu = 270^\circ$)

Efek *multibody* pada gerakan *surge*, *sway* dan *yaw* akibat propagasi gelombang dari arah samping ($\mu = 270^\circ$) dapat dilihat pada Gambar 21, 22 dan 23 secara

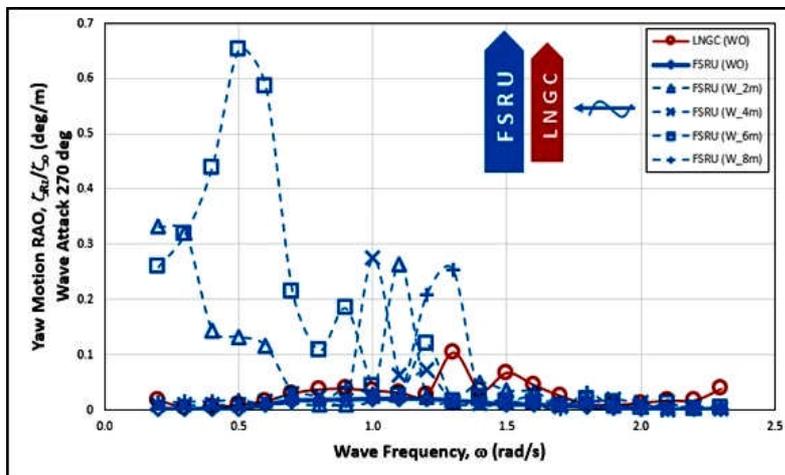
berurutan. Efek *multibody* terlihat pada semua gerakan horizontal pada semua variasi jarak. Walaupun efek *multibody* tidak terlalu signifikan pada jarak 4 dan 8 m, Sedangkan pada jarak 2 dan 6 m efek *multibody* terlihat cukup signifikan, beda gerakannya hingga mencapai 23 kali lipat pada gerakan *yaw*.



Gambar 21. RAO gerakan *surge* dengan arah propagasi gelombang *beam seas*.



Gambar 22. RAO gerakan *sway* dengan arah propagasi gelombang *beam seas*.



Gambar 23. RAO gerakan *yaw* dengan arah propagasi gelombang *beam seas*.

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan mengkaji efek *multibody* antara FSRU dan LNGC yang ditambatkan secara *side-by-side* dengan variasi jarak satu sama lain 2, 4, 6 dan 8 m. Gerakan FSRU ditinjau dalam penelitian ini dengan skenario pemodelan tanpa pengaruh dan terpengaruh keberadaan LNGC. Hal ini penting dilakukan dalam perancangan *jetty* karena FSRU ditambatkan pada *jetty*.

Analisis yang digunakan pada penelitian ini adalah analisis dinamis *frequency domain* dengan RAO 6 gerakan sebagai kriteria yang ditinjau (*surge, sway, heave, roll, pitch* dan *yaw*). Pembebanan gelombang pada struktur apung disimulasikan berpropagasi dari arah *headseas* (180 deg), *quartering seas* (135 deg) dan *beam seas* (90 deg). Ketiga arah propagasi gelombang ini ditinjau untuk menginvestigasi efek *multibody* pada arah pembebanan gelombang. Frekuensi gelombang reguler (ω) yang diidentifikasi berkisar antara 0.2 – 2.3 rad/s.

Berdasarkan simulasi numerik yang dihasilkan, didapatkan bahwa efek *multibody* terlihat pada model FSRU yang berjarak 2, 4, 6 dan 8 m. Efek *multibody* akibat propagasi gelombang dari arah head seas ($\mu = 180^\circ$) tidak menyebabkan dampak signifikan pada variasi jarak antara FSRU dan LNGC, kecuali pada jarak 2 m. Minimumnya efek *multibody* dikarenakan gelombang langsung melewati celah yang terbentuk antara FSRU dan LNGC, sedangkan pada jarak 2 m, gelombang yang melewati celah terpantulkan pada kedua sisi lambung kapal sehingga terbentuk fenomena *standing wave*.

Pada gelombang yang berpropagasi arah seperempat haluan ($\mu = 225^\circ$) dan arah samping ($\mu = 270^\circ$) juga terlihat adanya efek *multibody* pada variasi jarak antar FSRU dan LNGC. Pada model dengan jarak 4 dan 8 m, karakter RAO cenderung lebih rendah atau sama dengan RAO pada model *FSRU free floating*. Namun pada jarak 2 dan 6 m, karakter RAO lebih tinggi dari RAO FSRU *free floating*. Selain menaikkan dan menurunkan harga RAO gerakan, efek *multibody* juga menggeser frekuensi natural (ω_n) struktur bangunan apung dengan beda 0.1 – 0.3 rad/s. Hal ini penting diketahui karena posisi frekuensi natural dapat memicu magnifikasi gerakan jika terjadi resonansi.

DAFTAR PUSTAKA

- Gus. (2019). Indonesia Ternyata Masuk 5 Besar Eksportir LNG Dunia. <https://www.cnbcindonesia.com/news/20190306094058-4-59127/indonesia-ternyata-masuk-5-besar-eksportir-lng-dunia>. 28-02-2019. 09.34 WITA
- Siswanto., Djoko. (2018). *Laporan Tahunan Capaian Pembangunan 2018 : Pemanfaatan Gas Bumi untuk Energi Berkeadilan*. Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- OCIMF. (2008). *Mooring Equipment Guidelines*. United Kingdom.
- Kim, Y.B. (2003). "Dynamic Analysis Of Multiple-Body Floating Platforms coupled With Mooring Lines And Risers". *Dissertation of PhD Ocean Engineering*. Texas A&M University.
- Bunnik, T. (2009). "Hydrodynamic Analysis for Side By Side Offloading". *Proceeding of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE*, Osaka.
- Perwitasari, R.P. (2010). "Hydrodynamic Interaction and Mooring Analysis For Offloading Between FPSO and LNG Shuttle Tanker". *Master Thesis of Departement Marine Technology*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Ziyan, M. (2013). "Analisis Operabilitas FSRU Akibat Beban Lingkungan Berbasis Ranah Waktu". *Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Wibowo, Y.A. (2014). "Horizontal Distance Effect Analysis In Side by side Configuration between FSRU And LNGC due to Motion Characteristic of Multibody and Coupling Line Tension". *Undergraduate Theses of Ocean Engineering*. Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya.
- Djarmiko, E.B. (2012). *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya : ITS Press.