

MODEL ANALITIK SLOSHING TANGKI MUAT PADA OLAH GERAK KAPAL FLOATING LIQUEFIED NATURAL GAS (FLNG)

ANALITICAL MODEL OF SLOSHING IN STORAGE TANK ON FLOATING LIQUEFIED NATURAL GAS (FLNG) SHIP MOTION

Luhut Tumpal Parulian Sinaga

Laboratorium Hidrodinamika Indonesia, UPT BPPH
Komplek ITS, Telp.0315947849 Surabaya, Indonesia
email :luhuttps@yahoo.com.sg

Abstrak

Kajian pengaruh dari *sloshing* terhadap gerakan kopel *heave* dan *pitch* setelah menerima gaya external berupa energi gelombang yang bervariasi dan variasi sudut heading. Kajian ini akan melakukan kajian pengujian model fisik dengan konfigurasi tambat yang dan program matematik MAT-LAB dari model matematika *free floating barge mechanism* serta melalui simulasi numerik *computational fluid dynamic (CFD)*. Penelitian bertujuan mengamati dan menjelaskan pengaruh *sloshing* terhadap gerakan kapal dan interaksi tersebut secara sistimatis dengan metodologi penelitian yang dilakukan melalui perhitungan/simulasi numerik (*mathematics laboratory* dan *computational fluid dynamics*), dan pengujian model skala fisik (di *maneuvering and ocean engineering basin*). Konfigurasi geometri model yang disimulasikan dan diuji adalah tipe FLNG dengan tangki berisi muatan cair yang memungkinkan terdapat permukaan bebas. Hasil kajian melalui eksperimen dan numerik menunjukkan bahwa efek fenomena *sloshing* terhadap pengaruh gerakan kapal dapat diketahui dengan baik. Pada sudut *heading* 90° terdapat gerakan yang tidak jelas sehingga perlu adanya investigasi lebih lanjut. Persamaan nonlinier aliran *sloshing* sangat diperlukan untuk dapat menghitung besaran gerakan kapal. Tekanan akibat gelombang pada sudut *heading* 90° memberikan dampak tekanan yang lebih tinggi. Gaya *sloshing* tidak berbanding lurus dengan amplitudo eksitasi. Oleh karena itu, gerakan kapal ditambah dengan *sloshing* tidak bervariasi secara linier terhadap amplitudo gelombang.

Kata Kunci : *sloshing*, eksperimen, numerik, FPSO-FLNG, gerakan

Abstract

Studies on the effect of sloshing motion and heave coupling pitch after receiving an external force wave varying wave energy and angular variation headings. This study will conduct a study of physical model testing with mooring configuration and MAT-LAB program of mathematical models free floating barge matika mechanism through numerical simulations and computational fluid dynamic (CFD). This riset aims to observe and explain the effect of sloshing on ship motions and the interaction with the research methodology systematically carried through the calculation/numerical simulations (Mathematics and Computational Fluid Dynamics Laboratory), and the physical scale model testing (at Maneuvering and Ocean Engineering Basin). The results of the study through experiments and numerical phenomenon suggests that the effect of sloshing on the effect of ship motion can be well understood. Pressure due to the wave heading angle of 90 degrees gives a higher impact pressure. Style sloshing is not directly proportional to the amplitude of excitation.

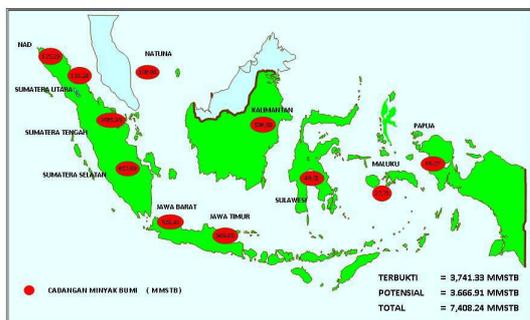
Keywords: *sloshing, experiment, numerical, FPSO-FLNG, motion*

Diterima (*received*) : 6 Januari 2015, Direvisi (*reviewed*) : 30 Januari 2015,
Disetujui (*accepted*) : 21 Februari 2015

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia. Luas wilayah laut mencapai 5,8 juta km², panjang garis pantai 81.290 km merupakan kedua terpanjang di dunia setelah Kanada. Jumlah pulau besar dan kecil, sebanyak 17.504 buah¹⁾. Letak Negara Indonesia berada di antara dua samudera yaitu Samudera Hindia dan Samudera Pasifik serta berada di daerah katulistiwa menjadikan Negara Indonesia sebagai negara yang sangat kaya sumber daya alam dengan keanekaragaman hayati yang luar bisa.

Satuan Kerja Khusus Pelaksana Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi (SKK Migas) menyatakan bahwa kegiatan eksplorasi merupakan solusi untuk meningkatkan produksi minyak bumi yang saat ini menurun. Dalam Anggaran dan Pendapatan Belanja Negara (APBN) 2014 ditetapkan target produksi minyak sebesar 870 ribu barel oil per day (bopd). Dikatakan pula bahwa Indonesia memiliki cadangan migas sebesar 4,4 miliar barel²⁾. Daerah potensi penghasil migas Indonesia ditunjukkan pada Gambar 1.



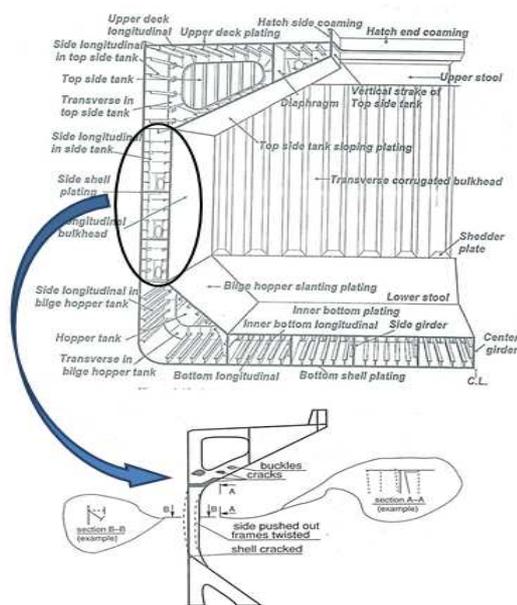
Gambar 1
Cadangan Minyak Bumi Indonesia³⁾

Proses rancang bangun fasilitas kapal dan fasilitas pengeboran minyak lepas pantai (FPSO-FLNG) telah dirancang konstruksi dan volume fluida dalam tangki sehingga aman dalam pelayaran walaupun mendapat energi gelombang besar dengan iklim dan cuaca yang terjadi. Dengan cuaca dan perubahan iklim dan gelombang laut besar seperti saat ini yang diakibatkan oleh pengaruh efek global dan rumah kaca maka akhir-akhir ini dipandang perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh *sloshing* terhadap gerakan kapal atau FPSO-FLNG sebagai antisipasi bagi operator dalam menjalankan sarana angkut di fasilitas FPSO.

Pada rancang bangun fasilitas pengeboran lepas pantai FLNG yang

beroperasi di laut akan mendapat gaya-gaya hidro dan aerodinamika. Fasilitas akan mengadakan reaksi terhadap gaya luar (*external forces*) agar fasilitas tersebut stabil. Untuk menyederhanakan keadaan mendekati kondisi sesungguhnya yang terjadi dapat dilakukan simulasi menggunakan fasilitas pengujian antara lain fasilitas pengujian model. Khususnya untuk FLNG saat ini sudah harus dilakukan kajian pengaruh dari permukaan fluida bebas di dalam tangki ruang muat terhadap gerakan kapal FLNG.

Hansen⁴⁾ melaporkan ada 3 jenis kerusakan yg diakibatkan oleh *sloshing*. Salah satu kapal yang pernah mengalaminya adalah OBO 9000 DWT dengan membawa muatan cair yang terisi 50% tangki. Kapal ini mengalami gerakan rolling yang ekstrim ketika melakukan pelayaran. Gambar 2 menunjukkan efek yg disebabkan hal tersebut terhadap kapal. Frame sebelah sisi kapal mengalami deformasi yang permanen ke arah luar, sangat bengkok dan sebagian hilang.



Gambar 2
Kerusakan konstruksi akibat *sloshing*⁴⁾

Permasalahan *sloshing* pada sarana FLNG memiliki fenomena yang lebih kompleks dibandingkan dengan kapal barang, sebab ada pengaruh interferensi frekuensi natural gerakan fluida dalam tangki muat dengan frekuensi natural kapal FLNG itu sendiri. Pengaruh interferensi dan interaksi tersebut perlu dikaji secara seksama baik melalui eksperimen maupun melalui model matematis/CFD, agar nantinya hasil ini dapat memberikan

kontribusi negatif dalam memprediksi gerakan kopel *heave* dan *pitch*.

BAHAN DAN METODE

Umum

Metode penelitian yang digunakan untuk memecahkan masalah pengaruh efek *sloshing* pada sistem *FPSO-FLNG* tersebut dibagi 3 yaitu pengujian model fisik, numerik/CFD (*computational fluid dynamics*) dan model analitik (MATLAB)⁵⁾. Metode uji model fisik, numerik/CFD, dan model analitik (MATLAB)⁵⁾ diuraikan sebagai berikut:

1. Uji model fisik di Kolam MOB (*Physical model test*)
 - Uji model dengan sistim tambat *beam seas*(90⁰)dan *quartering seas* (135⁰).
 - Uji model Variasi (tinggi gelombang, periode)
2. Uji numerik/CFD, ANSYS AQWA 14.5⁶⁾
3. Uji Analitik dengan *Free floating Body Mechanism* (MATLAB)⁵⁾

Konfigurasi geometri model adalah *FLNG-FPSO* ditambah dengan *free floatingbody* yang dilengkapi dengan pegas pada pole, kemudian dilakukan model fisik dengan variasi sudut *heading* dan variasi tinggi gelombang, periode.

Hasil perhitungan uji model fisik pengaruh efek *sloshing* pada sistem *floating body* khususnya pada gerakan *heave* dan *pitching* akan dibandingkan dengan persamaan gerakan kopel *heave*, *pitch* hasil program model matematik MATLAB⁵⁾. Adapun faktor yang digunakan pada persamaan tersebut seperti *initial force*, *damping force* dan *restoring force* menggunakan besaran yang didapat dari uji model fisik.

Output hasil uji model fisik di kolam dan model matematik dapat dijelaskan sebagai berikut:

Hasil model fisik (*physical model test*)

1. Uji model Kolam MOB kondisi *headingbeam seas* dan *quartering seas* dengan variasi *waveamplitude* dan periode gelombang diperoleh berbagai data RAO *heaving* dan *pitching*.
2. Hasil model di kolam MOB dengan kondisi gelombang *beam seas* dan

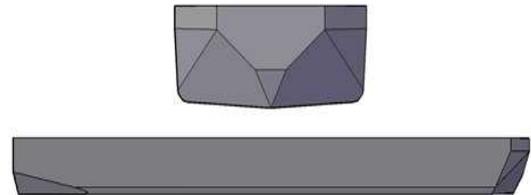
quartering seas yang signifikan terjadi periode *heave* dan *pitch* maksimum.

3. Hasil model numerik dengan program MATLAB⁵⁾ dan menggunakan parameter yang sama dengan uji model fisik memberikan hasil yang diperoleh adalah:
 - a. Besarnya RAO *heave* dan *pitch*
 - b. Maksimum kopel *heave* dan *pitch*.

Selanjutnya kedua hasil tersebut akan divalidasi dengan hasil eksperimen.

Metode Uji Model Fisik (*Physical Model Test*)

Pengujian model fisik series kapal *FLNG* dilaksanakan di laboratorium hidrodinamka UPT-BPPH. Adapun tujuan dari pengujian ini untuk mengambil data yang dibutuhkan dalam verifikasi desain sebelum dilakukan pembangunan fasilitas kapal *FPSO-FLNG* seperti pada Gambar 3.



Gambar 3
Model Kapal *FLNG*

Program pengujian dibagi dengan 2 bagian:

- a. *Decay test*
- b. *Wave (regular) test*

Sebelum dilakukan pengukuran dilaksanakan pengukuran terhadap model yaitu ; masa dan inersia. Adapun hasil dari *harmonic analysis* pada pengukuran *signals* pada *regular beam seas* and *quartering seas waves*. Fungsi respon diambil dari pengujian regular secara random di MOB. Pada pengujian model di MOB perlu disampaikan tahapan persiapan; Model, Instrumentasi, *Set-up* gelombang, Analisa foto video, Analisa dan diskusi hasil pengujian.

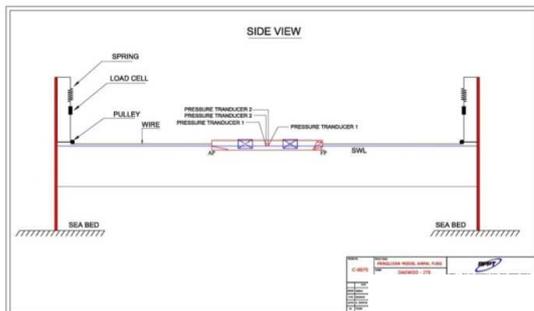
Berdasarkan gambar dari pihak pemberi pekerjaan, model kapal terbuat dari kayu laminasi seperti halnya *lines plan*, *cargo tanks*, *bilge keel* (normal bilga) dan telah diproduksi oleh UPT BPPH. Ukuran utama model dapat dilihat pada Tabel 1, dengan skala model adalah 1:70.

Tabel 1
Ukuran Utama model FPSO-FLNG

OverallDescription	Symbol	Full Scale	Model Scale
Length Overall	LOA =	350.000 m	500.00 cm
Length between perpendiculars	LPP =	310.000 m	442.86 cm
Breadth mid ship section	B =	65.000 m	92.86 cm
Depth	D =	27.300 m	39.00 cm
Draft	T =	13.800 m	19.71 cm
Displacement	Disp =	271260000.000 kg	771.56 kg
Long. Center of Grafity from AP	LCG =	150.583 m	215.12 cm
Center of Grafity from keel	KG =	21.800 m	31.14 cm
Long. Center of Bouyancy from AP	LCB =	150.585 m	215.12 cm
Vertical Center of Bouyancy	KB =	6.999 m	10.00 cm
BM melintang	BMt =	25.745 m	36.78 cm
BM memanjang	BMI =	571.173 m	815.96 cm
Roll Radius of Gyration	Kxx =	24.050 m	34.36 cm
Pitch Radius of Gyration	Kyy =	74.400 m	106.29 cm
Keel to Metacentric	KMt =	32.745 m	46.78 cm
Transverse GM	GMt =	10.945 m	15.64 cm
Calculated Roll Natural Period	Troll =	17.300 sec	2.07 sec

Catatan : Berat jenis air laut = 1.025 ton/m³.
Percepatan gravitasi = 9.81 m/det²

Skala model *FLNG* mengacu pada perbandingan kedalaman perairan sesungguhnya dengan kedalaman tangki uji di fasilitas MOB. Sistem tambat pada eksperimen dibagi dengan beberapa kelompok, masing-masing kelompok diikat dengan *bearing swivel* pada model *FLNG* seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Kelompok pengikatan lainnya yaitu berupa *lines* dengan *springs* diatur sedemikian rupa sehingga kekakuan horisontal secara keseluruhan sesuai dengan besaran nilai yang ditentukan agar tidak terjadi gangguan gerakan pada sistem *mooring*.



Gambar 4
Sistem Tambat Model

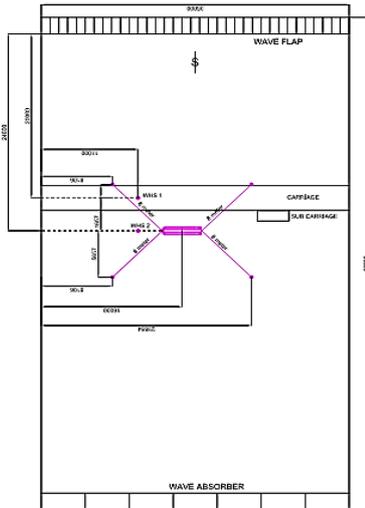
Model pengujian dilakukan pada gelombang reguler dan acak. Gelombang acak disesuaikan untuk mewakili spektrum gelombang Pierson-Moskowitz. Ombak di kolam uji MOB yang dihasilkan dengan menggunakan generator pembangkit gelombang. Seluruh pengukuran dan

rekaman data termasuk notasi, penandaan dan alat pengukur dapat ditunjukkan secara grafik dan numerik. Komponen gerakannya adalah *surge sway, heave, roll, pitch* dan *yaw*. Pengukuran gerakan ini terkoordinasi dengan sistem axis pada model. Akan tetapi, yang digunakan pada penelitian adalah hasil pengukuran untuk gerakan kopel *heave* dan *pitch* termasuk pengaruh *gayasloshing*.

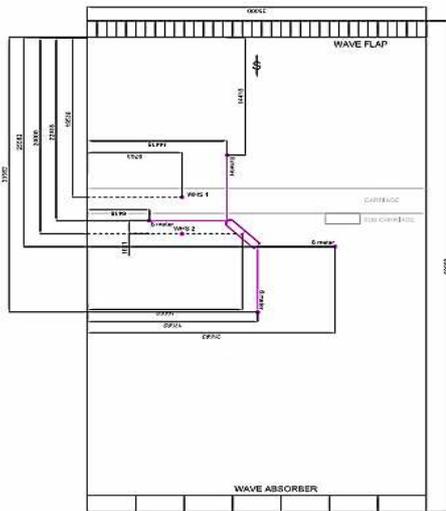
Perhitungan model eksperimen yang dilakukan di MOB dilakukan dengan muatan fluida 30%. Pengujian model dengan sistem tambat *beam seas (90°)* dan *quartering seas (135°)*. Konfigurasi model pengujian ditunjukkan Gambar 5 sampai dengan 7.

Metode Simulasi CFD: ANSYS-AQWA⁶⁾

Penggunaan Program ANSYS-AQWA model matematis sedang dalam proses serta hasil dari running program akan disajikan kemudian pada tahapan progress berikutnya. *Computasional fluid dynamic (CFD)* merupakan penyelesaian numerik dinamika fluida^{7,8,9,10)}. Pada kasus *sloshing LNG carriers* dan *LNG platforms*, CFD sangat membantu dalam mengekspresikan fenomena aliran fluida pada ruang palka yang salah satunya dapat mempengaruhi gerakan kapal berupa gaya translasi *heave* dan momen *pitch*. Gerakan aliran fluida dalam tangki merupakan gerakan reaksi akibat mendapat gaya external dari lambung kapal akibat gelombang¹¹⁾.



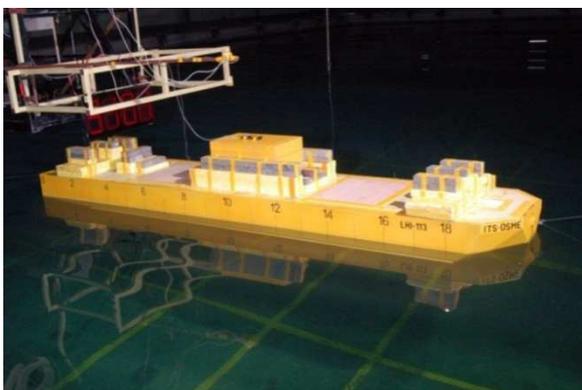
(a)



(b)

Gambar 5

Konfigurasi posisi model FLNG di Kolam Pengujian (a) sudut kemiringan 90° terhadap gelombang datang (*beam seas*), (b) sudut kemiringan model 135° gelombang datang (*quartering seas*)



Gambar 6

Weave heading angle 90°



Gambar 7

Weave heading angle 135°

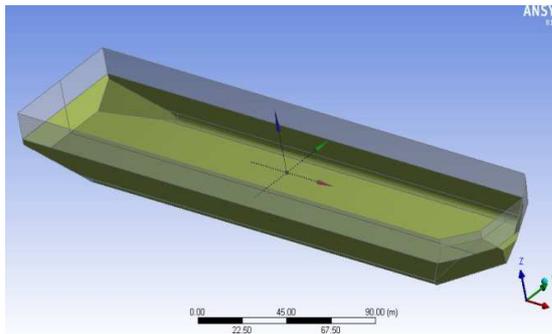
Dalam desain kerjanya, persoalan perlu dideskripsikan dengan menggambarkan model yang akan dianalisa, sifat fluida disekitar model dan penentuan geometri dan *point mass* dari model. Selanjutnya dalam penyelesaian persoalanakan digunakan pendekatan *solid surface* dan menggunakan pendekatan *hydrodynamic diffraction* pada setiap sudut *heading* dan variasi periode gelombang dan durasi gelombang. Dari hasil perhitungan tersebut akan diperoleh hasil *output* berupa RAO *heave* dan *pitch* serta *pressure motion* pada *hull* pada masing masing sudut *heading*. Pada proses pemodelan FLNG vessel, analisa CFD dilakukan dengan bantuan software *ansys aqwa 14.5*⁶⁾. Pada program CFD terdiri dari tiga tahapan yaitu: *model*, *connection (solid surface)*, *mesh*, *hydrodynamic diffraction*, dan penyelesaian.

Perhitungan model kapal FLNG dilakukan pada arah sudut datang gelombang 90° dan 135° dengan ketinggian gelombang 2 m. Kekentalan fluida yang digunakan dalam perhitungan ANSYS AQWA⁶⁾ menggunakan massa jenis air laut sebesar 1.025 kg/m^3 . Konfigurasi penentuan model ANSYS AQWA⁶⁾ ditunjukkan pada Gambar 8 sampai dengan 10, sedangkan pengaturan *meshing body* ditampilkan pada Tabel 2. Pemodelan ini menggunakan dua metode numerik yang diterapkan untuk simulasi aliran *sloshing* yaitu metode diferensial hingga (*FDM*) dan metode difraksi hidrodinamika (*HDM*) yang juga mempertimbangkan olah gerak kapal.

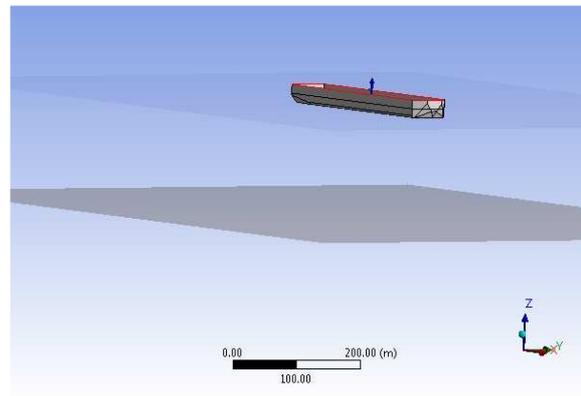
Metode Simulasi Analitik

Analitik (MATLAB)⁵⁾ adalah sebuah bahasa dengan kinerja tinggi untuk komputasi masalah teknik dengan mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam suatu model yang sangat mudah untuk digunakan dimana masalah-masalah dan penyelesaiannya

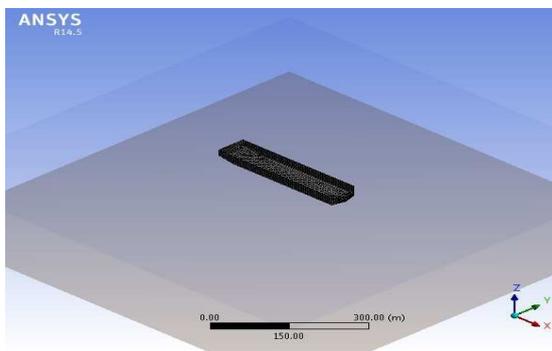
diekspresikan dalam notasi matematika yang sudah dikenal.



Gambar 8
Slice body



Gambar 10
Set-up kedalam Model FLNG in CFD



Gambar 9
Pengaturan Surface meshing model

Tabel 2
Pengaturan Meshing Body

Description	Meshing Specification
Object Name	Mesh
State	Meshed
Defeaturing Tolerance	2 m
Max Element Size	10 m
Max Allowed frequency	0.161 Hz
Meshing Type	Program Controlled
Number of Nodes	1358
Number of element	1314
Number of Nodes (Diffracting Bodies)	952
Number of Elements (Diffracting Bodies)	904

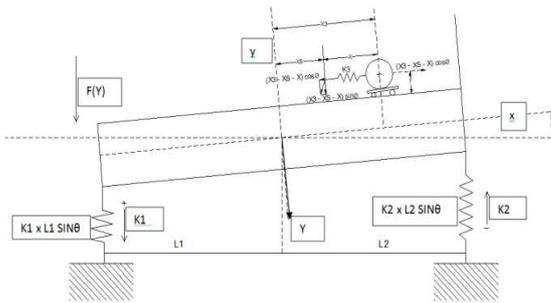
Salah satu aspek yang sangat berguna dari metode ini adalah kemampuannya untuk menggambarkan berbagai jenis grafik, sehingga bisa memvisualisasikan data dan fungsi yang kompleks. Metode perhitungan gerakan kopel *heave* dan *pitch* yang dialami *FLNG vessel* jika mendapat gaya external dari gelombang dapat dilakukan dengan penyederhanaan sistem yang terjadi dan

diolah melalui proses persamaan matematis. Adapun penyelesaian persoalan teknis pada sistem gerakan *FLNG vessel* yang di pengaruhi *sloshing* pada gerakan kapal dapat digambarkan menggunakan metode ini. Pada persamaan matematis, ada beberapa yang akan ditentukan terlebih dahulu sebagai berikut ;

- a. Penentuan panjang *beam* sebagai penyederhanaan panjang kapal.

- b. Penentuan massa air yang bergerak pada tangki ruang muat.
- c. Penentuan kordinat baik pada panjang beam dan pada massa fluida dalam tangki ruang muat.
- d. Penentuan dan penempatan *spring factor* k_1, k_2, k_3 pada model *floating body* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.

Komponen gerakan *FLNG vessel* berupa kopel *heave* dan *pitch* dapat di ketahu dengan program analitik (MATLAB)⁵⁾, khususnya untuk model persegi empat¹²⁾.



Gambar 11 Model matematis gerakan *heaving* dan *pitching*

Pada sistem model *heaving* dan *pitching* menggunakan 2 derajat kebebasan yaitu massa balok atau kapal *FLNG* di ibaratkan sebagai massa (M) kapal dan massa fluida dalam tangki diibaratkan sebagai (m) dan 2 (dua) konstanta pegas berupa k_1 dan k_2 untuk gerakan *heaving* dan *pitching*. Massa fluida di dalam tangki ruang muat di ibaratkan massa (m) dalam kereta tanpa hambatan yang bergerak translasi dan 1(satu) konstanta pegas, k_3 yang menyebabkan gerakan kopel terhadap model. Apabila model tersebut mendapat beban (F_y) karena pengaruh energi gelombang yang diterima model, maka model akan melakukan gerakan getaran vertikal dan translasi. Dengan adanya gaya dari luar, maka kordinat pegas, k_1 terhadap titik keseimbangan (titik berat) di indikasikan I_1 dan untuk pegas, k_2 terhadap titik berat di indikasikan I_2 . Dengan menjumlahkan semua gaya sebesar $\sum F = m \times a$ dan gaya kopel dapat ditulis sebagai $k_1 \times I_1 - k_2 \times I_2 = 0$, maka $k_1 \times I_1 = k_2 \times I_2$. Untuk gerakan fluida dalam tangki dimodel sebagai bandul, maka kereta tanpa hambatan mempunyai besar kekakuan yang diakibatkan oleh massa yang bergerak translasi k_3 adalah sebesar

$$(x_3 - x_s - x) \sin \theta = (x_3 - x_s - x) \cos \theta.$$

Gerakan translasi dari massa fluida (m) akan berpengaruh pada gerakan kopel *heaving* dan *pitching*. Besarnya gaya vertikal yang diterima oleh spiral pada sudut θ adalah sebesar

$$k_1 \times I_1 \times \theta = F_1 \tag{1}$$

mempunyai arah positif (tertekan). Pada tumpuan kedua bergerak tertarik ke atas (negatif) dengan sudut sebesar θ , maka gayaspiral yang dialami adalah sebesar

$$k_2 \times I_2 \times \theta = F_2 \tag{2}$$

mempunyai arah negatif (tertarik). Untuk massa yang bergerak dalam sekat tangki akan menimbulkan gaya yang arahnya vertikal dan horizontal di sebut F_3 dan F_4 dengan sudut θ , adapun besarnya adalah

$$\text{horizontal } (x_3 - x_s - x) \times \cos \theta = F_3 \tag{3}$$

$$\text{vertikal } (x_3 - x_s - x) \times \sin \theta = F_4 \tag{4}$$

Sehingga persamaan gerak balok dan momen yang ditimbulkan karena mendapat gaya dari luar sebesar (F_y) adalah sebagai berikut

$$M\ddot{Y} = k_1 \times (y - l_1 \cdot \theta) - k_2 \times (y + l_2 \cdot \theta) - k_3 \times (x_3 - x_s - x) \sin \theta \tag{5}$$

$$M\ddot{Y} = -y(k_1 + k_2) + (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) \cdot \theta - k_3 (x_3 - x_s - x) \sin \theta \tag{6}$$

sehingga persamaan (5) dan (6) dalam persamaan *free motion undamped* dapat ditulis dengan gaya reaksi dari kapal *FLNG* dan fluida dalam tangki sebagai berikut

$$M\ddot{Y} + y(k_1 + k_2) + (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) \cdot \theta - k_3 (x_3 - x_s - x) \times \sin \theta = 0 \tag{7}$$

$$m\ddot{Y} + y(k_1 + k_2) + (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) \cdot \theta - k_3 (x_3 - x_s - x) \times \cos \theta = 0 \tag{8}$$

dimana;

M = adalah displasment kapal

m = adalah massa air dalam tangki fluida

$M\ddot{Y} = F_y$ adalah gaya eksternal akibat energi gelombang

$m\ddot{Y}$ = adalah gaya akibat *sloshing*

θ = sudut kemiringan arah gelombang datang

Persamaan *free coupled moment motion* antara kapal FLNG dan fluida di dalam tangki dapat ditulis sebagai berikut

$$(J + j + A2)\ddot{\theta} = B2 \int_{-\theta}^{\theta} \left[2 \left\{ (k_1 \cdot l_1^2 + k_2 \cdot l_2^2) \cdot \theta - (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) \cdot y \right\} + K3 \{ (x_3 - x_s - x) \cdot \sin \theta \cdot d + (x_3 - x_s - x)^2 \cdot \cos \theta \} + C2 \left[2 \left\{ (k_1 \cdot l_1^2 + k_2 \cdot l_2^2) \cdot \theta - (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) \cdot y \right\} \right] + k_3 (x_3 - x_s - x) \{ (\sin \theta \cdot d) + (x_3 - x_s - x) \cdot \cos \theta \} \right] \quad (9)$$

Untuk itu, dalam persamaan matrik *free motion damping* dapat ditulis sebagai berikut

$$(M + m + A)\ddot{y} = B \int_{-x}^x y \{ (k_1 + k_2) + (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) \cdot \theta + k_3 (x_3 - x_s - x) \times \cos \theta \} - C \cdot \{ y (k_1 + k_2) + (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) \cdot \theta + k_3 (x_3 - x_s - x) \times \cos \theta \} \quad (10)$$

$$(J + j + a)\ddot{\theta} = b \int_{-\theta}^{\theta} \left[2 \left\{ (k_1 \cdot l_1^2 + k_2 \cdot l_2^2) \cdot \theta - (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) \cdot y \right\} - k_3 (x_3 - x_s - x) \sin \theta \cdot d + (x_3 - x_s - x)^2 \cdot \cos \theta \right] - c \left[2 \left\{ (k_1 \cdot l_1^2 + k_2 \cdot l_2^2) \cdot \theta - (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) \cdot y \right\} + (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) \cdot y \right] - k_3 (x_3 - x_s - x) \{ (\sin \theta \cdot d) - (x_3 - x_s - x) \cdot \cos \theta \} \quad (11)$$

Dari Persamaan (10) dan (11) dapat ditulis format matrik sebagai berikut

$$\begin{pmatrix} M & J & A \\ m & j & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C \\ c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\dot{y} & \dot{\theta} & \sin \theta \\ -\dot{y} & \dot{\theta} & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P \\ Q \\ R \end{pmatrix} \quad (12)$$

dimana

$$P = k_3 (x_3 - x_s - x), \\ Q = (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2); \text{ dan} \\ R = (k_1 + k_2)$$

Kemudian agar persamaan umum gerak kapal dan fluida dalam tangki dapat diketahui, maka inersia dalam Persamaan (12) diturunkan terhadap waktu. Dengan menggunakan persamaan getaran tersebut akan dihasilkan persamaan umum gerak sebagai berikut

$$F(y) = A\ddot{Z} + B\dot{Z} + CZ \quad (13)$$

Pada persamaan gerak akan terjadi fenomena sebagai berikut¹³⁾

1. Gaya inersia, dimana saat kapal mengalami gerakan osilasi dapat dirumuskan sebagai berikut

$$F_1(y) = -A\ddot{z} \quad (14)$$

dimana A adalah *virtual mass* atau massa kapal ditambah dengan massa yang ditambahkan dan $\ddot{z} = d^2z/d^2t$

Besarnya massa yang ditambahkan adalah $A_n = C \cdot \frac{\rho m B_n}{\rho}$

2. *Damping force* adalah gaya yang selalu jadi hambatan ke model seperti Persamaan berikut

$$F_2(y) = B\dot{z} \quad (15)$$

dimana B adalah kontanta damping, dan $\dot{z} = dz/dt$ adalah kecepatan aliran. Besarnya koefisien damping adalah

$$n = \frac{A \rho g^2}{\omega^2}$$

3. *Restoring force* atau kostanta pegas, dimana selalu membawa kapal kepada keadaan yang konstan dirumuskan sebagai berikut

$$F_2(y) = C \cdot z \quad (16)$$

dimana C adalah kontanta *restoring*, dan z adalah displamen kapal pada pusat gravitasi (CG) kapal. Besar koefisien *restoring force* adalah $C = \rho g A_{wp}$ (Adalah beban pada bidang garis air)

4. *Exciting force* atau *encountering force*, yang mana bekerja pada massa kapal sebagai berikut

$$F = F_0 \cdot \cos \omega_s \cdot t \quad (17)$$

dimana F_0 adalah amplitude gaya yang terjadi, ω_s adalah frekuensi sirkulasi gaya yang terjadi dan t adalah waktu.

Sehingga persamaan kesimbangan dari persamaan gerak kapal dapat ditulis sebagai berikut

$$F_0 \cdot \cos \omega_s \cdot t - A \cdot \ddot{z} - B \cdot \dot{z} - C \cdot z = 0 \quad (18)$$

$$A \cdot \ddot{z} + B \cdot \dot{z} + C \cdot z = F_0 \cdot \cos \omega_s \cdot t \quad (19)$$

Selanjutnya untuk persamaan 2 derajat kebebasan akan digunakan sebagai gerakan kapal dan gerakan fluida pada tangki ruang muat dari FLNG. Dengan memasukkan faktor tambahan massa, damping dan *restoring force*, maka persamaan akan menjadi sebagai berikut yaitu: mempunyai 4 persamaan terdiri dari

dua persamaan gerakan dan dua momen gerakan¹⁰. Koefisien pada Persamaan (18) dan (19) seperti A, B, C, D, E, H dapat menggunakan koefisien hasil pengujian model tes. Akan tetapi dapat juga dilakukan dengan formula atau perhitungan seperti dijelaskan di atas dan hasilnya dapat dibandingkan dengan Persamaan (20) dan (21) berikut

$$A\ddot{Z} + B\dot{Z} + CZ + d\ddot{\theta} + e\dot{\theta} + h\theta = F_0 e^{i\omega t} \text{ (heave)} \quad (20)$$

$$A\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta + D\ddot{Z} + E\dot{Z} + HZ = M_0 e^{i\omega t} \text{ (pitching)} \quad (21)$$

Maka dapat ditarik kesimpulan bahwa

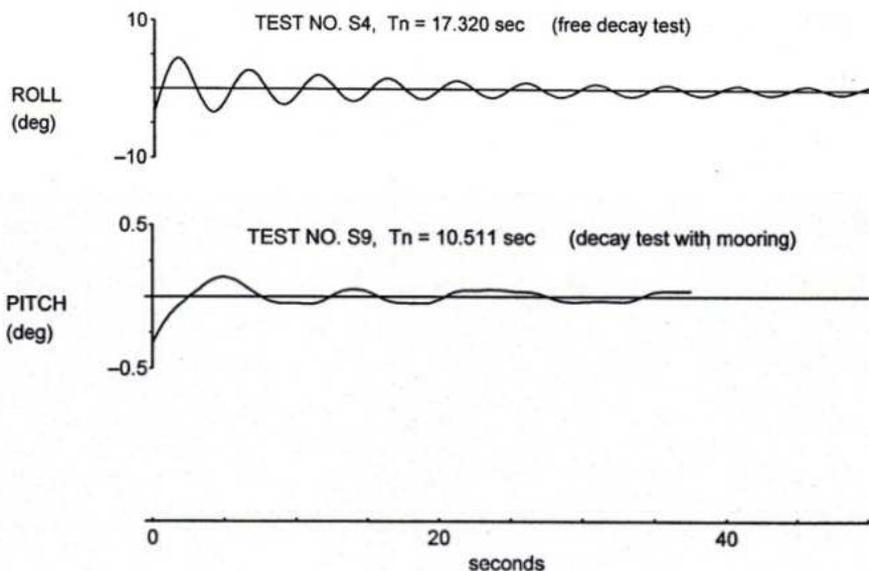
$$\text{Gerakan } M\ddot{Y} = F_0 e^{i\omega t} \quad (22)$$

$$\text{Momen } J\ddot{\theta} = M_0 e^{i\omega t} \quad (23)$$

Dari persamaan (22) dan (23) akan dibuatkan program dengan MATLAB⁵. Adapun inputan dalam program MATLAB⁵ akan menggunakan data yang digunakan pada pengujian model. Untuk massa tambahan, *damping force* dan *restoring force* dapat menggunakan perhitungan dari Persamaan-persamaan yang telah diuraikan sebelumnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian *decay test* dilakukan untuk menentukan frekuensi natural (*natural periods*) dan redaman (*damping*) daripada FLNG. Hasil *decay test* ditunjukkan pada Gambar 12.



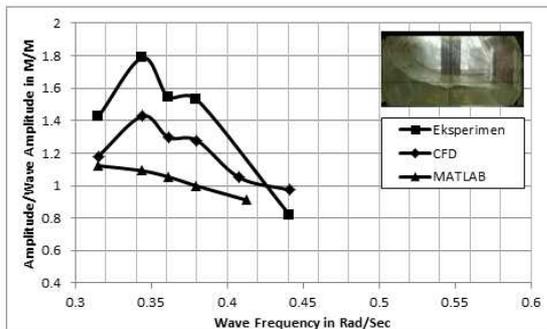
Gambar 12
Grafik *Decay test*

Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan periode natural (T_n) dan damping sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya.

Tabel 3
Data Hasil Pengujian Decay

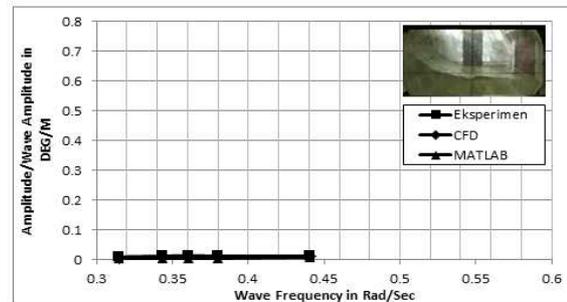
NO	ID	BILGE KEEL	DECAY	FREE	SOFT MOORING	Tn (sec)	B $\delta 2\pi$	P	Q
1	D 01	Normal	Roll	√		17.307	0.0495	0.0303	0.1267
2	D 02	Normal	Roll	√		17.357	0.0653	0.1721	0.0866
3	D 03	Normal	Pitch	√		12.094	n.d	n.d	n.d
4	D 04	LRS D	Roll	√		17.746	0.0450	0.0580	0.0877
5	D 05	LRS D	Roll	√		17.736	0.0481	0.0894	0.0734
6	D 06	LRS D	Pitch	√		11.672	n.d	n.d	n.d
7	D 07	Normal	Roll		√	17.521	0.0529	0.1794	0.0724
8	D 08	Normal	Roll		√	17.550	0.0557	0.1246	0.0971
9	D 09	Normal	Pitch		√	11.658	n.d	n.d	n.d
10	D 10	Normal	Surge		√		n.d	n.d	n.d
11	D 11	Normal	Sway		√		n.d	n.d	n.d
12	D 12	Normal	Yaw		√	135.418	n.d	n.d	n.d

Gambar 13 menunjukkan hasil perhitungan eksperimen, CFD dan analitik dimana ketiganya memiliki kecenderungan kurva RAO yang sama. Untuk hasil eksperimen memiliki harga lebih tinggi dari hasil keduanya. Sebagai mana diketahui perhitungan viskous dan damping sangat berpengaruh terhadap pola gerakan kapal¹⁴. Oleh sebab itu, nilai yang dimasukkan pada perhitungan CFD sangat mempengaruhi pola gerakan kapal.



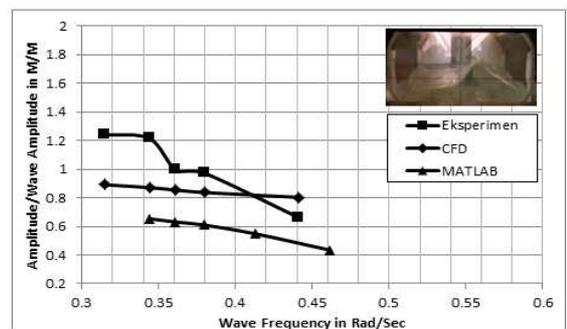
Gambar 13
Perbandingan heave pada heading angle 90°

Gambar 14 menunjukkan perbandingan gerakan pitch pada sudut kemiringan 90°. Gerakan yang tidak konsisten pada hasil eksperimen memerlukan kajian yang lebih dalam terkait pengaruh dan penyebabnya. Pengujian eksperimen memiliki harga yang lebih besar dari pada perhitungan numerik.



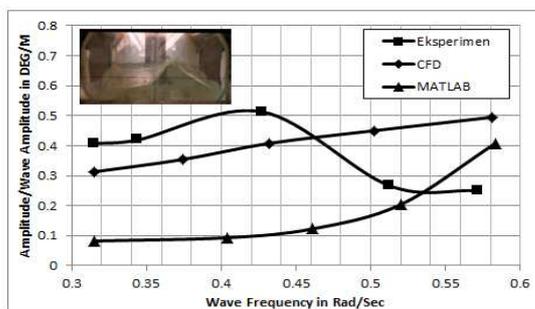
Gambar 14
Perbandingan pitch pada heading angle 90°

Konsistensi dan kecenderungan efek sloshing yang sama ditunjukkan pada Gambar 15. Hal ini menjelaskan bahwa gerakan heave pada sudut 135° memiliki persamaan kurva yang mengakibatkan pola gerakan kapal yang sama pada masing-masing perhitungan¹⁵. Dimana RAO heave hasil perhitungan eksperimen lebih besar dari RAO hasil perhitungan CFD dan hasil perhitungan analitik lebih kecil.



Gambar 15
Perbandingan heave pada heading angle 135°

Pada sudut kemiringan arah gelombang 135° menunjukkan pola yang berbeda antara pengujian dan perhitungan *CFD*, dan hasil analitik. Kecenderungan efek *sloshing* dapat ditunjukkan pada Gambar 16. Hal ini disebabkan oleh pola gelombang yang tegak lurus atau searah. Sehingga mengakibatkan pola gerakan kapal yang tidak beraturan. Pada pengujian tergantung dari pola gerakan fluida sedangkan pada perhitungan *CFD* maupun analitik tergantung dari angka-angka yang dimasukkan pada persamaan yang digunakan. Sehingga hasilnya yang ditampilkan pada Gambar 16 sedikit berbeda terutama pada gelombang frekuensi diantara 0,4 dan 0,5 kelihatan bahwa gerakan *pitching* lebih kecil berada diantara 0,2 dan 0,4 deg/m.



Gambar 16
Perbandingan *pitch* pada heading angle 135°

SIMPULAN

Hasil pengujian menunjukkan adanya pengaruh ketinggian air di dalam tanki uji yang menyebabkan terjadinya *sloshing*. Pada perbandingan $h/d = 0,383$ menunjukkan terjadinya puncak sudut elevasi permukaan bebas. Waktu ketinggian sudut elevasi maksimum terjadi pada 0,67 detik dengan beban balas 4,5 kg. Hasil simulasi dan eksperimen (MOB) menunjukkan perbedaan nilai komponen *sloshing* rata-rata 11%. Sedangkan hasil eksperimen di MOB menunjukkan konsistensi yang sangat akurat.

Perbedaan hasil komputasi numerik dan eksperimen (MOB) menunjukkan perbedaan yang signifikan yakni sekitar 28%, khususnya pada bilangan *heave* dan *pitch* dengan sudut 135° . Hasil regresi untuk nilai faktor interferensi memperlihatkan bahwa faktor validitas (koefisien determinansi) model $R^2 = 0,7922$ sampai dengan 0,874, dimana nilai faktor validitas tersebut mengindikasikan bahwa persamaan tersebut cukup akurat (*best fit*)

dalam analisa statistik. Perhitungan komputasi analitik menunjukkan perbedaan yang cukup besar, hal ini dikarenakan koefisien kekakuan pegas (k_1 dan k_2) cukup besar.

Berdasarkan penelitian ini, ada beberapa fenomena yang terjadi, antara lain:

- Hasil pemodelan eksperimen dan numerik *CFD* dan model matematik menunjukkan hasil yang serupa tapi RAO untuk percobaan lebih tinggi dari model numerik karena dampak redaman dan added mass. Uji model eksperimen dan analisis *CFD* menunjukkan kecenderungan yang sama pada sudut 90° dan 135° . Namun, pada sudut heading 90° terdapat gerakan yang tidak jelas sehingga perlu adanya investigasi lebih lanjut. Persamaan nonlinier aliran *sloshing* sangat diperlukan untuk dapat menghitung besaran olah gerak kapal.
- Tekanan gerak akibat gelombang menunjukkan bahwa pada sudut heading 90° memberikan dampak tekanan yang lebih tinggi.
- Gaya *sloshing* tidak berbanding lurus dengan amplitudo eksitasi. Oleh karena itu, gerakan kapal ditambah dengan *sloshing* tidak bervariasi secara linier terhadap amplitudo gelombang.

Penelitian tentang model analitik olah gerak kapal *heave* dan *pitch* secara umum sesuai antara pengujian model fisik, numerik *CFD* ditunjukkan dengan kurva ROA yang mempunyai kecenderungan yang sama. Adapun hasil perhitungan RAO metode analitik dibandingkan dengan model fisik yang cukup besar, fenomena ini diakibatkan adanya gaya eksitasi dari model analitik *sloshing* di tanki belum secara khusus dilakukan validasi dengan eksitasi eksperimen atau numerik.

Namun demikian, penelitian model analitik persamaan kopel *heave* dan *pitch* memerlukan penyempurnaan lebih lanjut dengan melakukan penelitian khusus pada olah gerak *sloshing* tangki. Dari hasil kajian numerik dan eksperimen ini diharapkan dapat mempermudah untuk mendapatkan prediksi awal dalam melakukan perhitungan terhadap olah gerak kapal (*heave* dan *pitch*) dan selanjutnya secara umum dapat diaplikasikan secara langsung dalam perhitungan respon kapal yang digunakan untuk penentuan pada tahapan desain (*preliminary design*).

Disarankan adanya penelitian lebih lanjut untuk penyempurnaan persamaan model analitik. Selanjutnya penelitian ini

dapat memberikan informasi mengenai gerakan kapal (*heave* dan *pitch*) pada kondisi *loading* dan *up-loading* dengan tujuan agar dapat memprediksi gerakan kapal sehingga benturan *FPSO* dan kapal pengangkut dapat dihindari. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memperkaya dan memperkuat *data base* untuk tujuan ilmiah (*scientific*) dalam mempresentasikan pengaruh dampak *sloshing* terhadap pergerakan kapal dan pada dinding tangki. Kedua hal tersebut sangat dipertimbangkan dalam perancangan kapal pengangkut cairan. Selain itu efek damping juga perlu diperhatikan sehingga dalam proses perancangan kapal seluruh data akibat pengaruh gaya eksternal dan internal perlu dijadikan pertimbangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Makalah ini merupakan bagian dari hasil penelitian program doktor ilmu perkapalan ITS. Disampaikan kepada BPPT yang telah membiayai bea siswa ini sampai diperoleh gelar doktor. Terima kasih kepada kepala BPPH yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk melakukan penelitian di laboratorium Hidrodinamika – BPPT dan memberikan kesempatan sebagai karya siswa tugas belajar sampai memperoleh gelar doktor.

DAFTAR PUSTAKA

1., <http://www.esdm.go.id>, 2012
2., <http://www.investor.co.id>, 2014
3., <http://www.migas.esdm.go.id>, 2013
4. Hansen, H., "Damage experience, potential damages, current problems involving slosh considerations." *In Seminar on Liquid Sloshing*, Det Norske Veritas, 1976.
5., MATLAB V6.5, User's Guide, 2002.
6., ANSYS AQWA, User's Manual, 2012.
7. Kim, Y., "A Numerical Study on Sloshing Flows Coupled with Ship Motion-the Anti Rolling Tank Problems," *Journal of Ship Research*, Volume 46, hal. 52-62, 2003.
8. Kim, J. W., Shin, Y. S. dan Bai, K. J., "A Finite-Element Computation for the Sloshing Motion in LNG Tank", *The Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 3, hal. 471-478, International Society of Offshore and Polar Engineers, Cupertino, CA, USA, 2002.
9. Kim, Y, Shin, Y.S, Lee, K.H., "Numerical Study on Slosh-induced Impact Pressures on Three-dimensional Prismatic Tanks," *Applied Ocean Research*, Volume 26, hal. 213-226, 2004.
10. Lee, S.J., *The effect of LNG-Tank Sloshing on Global Respon of LNG-Carrier*, Ph.D. Dissertation, Ocean Engineering Program, Department of Civil Engineering, Texas A & M University, College Station, USA, 2007.
11. Nam, BW, Kim Y, Kim, DW, dan Kim, YS., "Experimental and Numerical Studies on Ship Motion Responses Coupled with Sloshing in Waves," *Journal of Ship Research*, Volume 53, No. 2, hal. 68-82, 2009.
12. Kareem, A. "Reduction of Wind Induced Motion Utilizing a Tuned Sloshing Damper," *Proceedings of the 6th U.S. National Conference on Wind Engineering*, University of Houston, Texas, March 8-10, 1989.
13. Bhattacharya, R., *Dynamics of Marine Vehicles*, John Wiley and Sons. USA, 1978.
14. Sinaga, L.T.P., "Analisa Kopel antara Olah Gerak Kapal dan Aliran Sloshing Menggunakan Metode Persamaan Gerakan Kapal, - The Large Amplitude Motion Program" (LAMP), *Prosiding Seminar Nasional Teori Dan Aplikasi Teknologi Kelautan*, 17 Desember 2009.
15. Sinaga, L.T.P., "Interaction Analysis for Floating Body by CFD," *ICEM, Senta 2012. ITS-Indonesia*, 2012.