

Studi Gerakan Sloshing terhadap Tangki Kotak (*Rectangular Tank*) Dengan dan Tanpa Pelat Memanjang (*Baffle*) Akibat Gerakan Rolling Kapal Dengan Metode Computational Fluid Dynamics (CFD)

Ashar Khoirul Arsad, Aries Sulisetyono, ST., MA.Sc., Ph.D.

Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail : sulisea@na.its.ac.id

Abstrak—Sloshing dapat diartikan sebagai gerakan bebas dari fluida cair di dalam sebuah wadah. Masalah sloshing menjadi fenomena penting dalam tangki muatan cair, karena dapat menyebabkan kerusakan pada struktur dalam tangki. Paper ini menjelaskan pengaruh besarnya *pressure* pada tangki kotak dengan dan tanpa penambahan pelat memanjang (*baffle*) ketika terjadi sloshing yang diakibatkan gerakan rolling yang terjadi pada kapal. Pemodelan tangki dilakukan 2D berbentuk tangki kotak (*rectangular tank*) dengan ukuran panjang 46.92 m dan tinggi 32.23 m menggunakan software *gambit*. Variasi model tangki ada 2 yaitu tanpa dan dengan penambahan 1 buah *baffle* dengan ukuran tebal 1 m dan tinggi 6 m dengan ketinggian cairan 15%, 45%, dan 75%. Proses simulasi dilakukan dengan metode Computational Fluid Dynamic (CFD) menggunakan software *Fluent*. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa *baffle* berhasil berfungsi sebagai peredam *pressure* ketika volume muatan lebih rendah dari tinggi *baffle* yaitu dalam hal ini volume 15%, namun ketika pada volume muatan 45% dan 75% *baffle* tidak dapat berfungsi sebagai peredam *pressure* karena adanya *baffle* dapat menimbulkan gaya permukaan cairan ketika cairan lng menghantam *baffle* yang menyebabkan tinggi cairan lng menjadi lebih tinggi sehingga ketika terjadi gerakan tangki maka dapat menambah besar *pressure* untuk menghantam dinding-dinding tangki.

Kata Kunci—FPSO, LNG, Sloshing, Rolling, *Fluent* CFD, Rectangular Tank, 2D

I. PENDAHULUAN

Pemakaian kapal FPSO sebagai sarana pengolahan, penyimpanan dan *offloading* minyak merupakan sarana alternatif yang menguntungkan dan efisien. Tantangan yang harus dipecahkan dalam perancangan kapal FPSO masih banyak, mulai dari life time konstruksi tangki terhadap beban gelombang hingga isu-isu seperti

manajemen safety pada pengolahan, penyimpanan dan *offloading* minyak. Dalam analisa gerak kapal, efek permukaan bebas dan sloshing di dalam ruang muat biasanya diabaikan. Beberapa waktu yang lalu banyak eksperimen dan studi numerik menunjukkan bahwa efek paduan sloshing dan gerak kapal sangatlah besar terhadap kapal. Ini adalah sebuah perhatian besar bagi operasi kapal FPSO LNG di tempat produksi dan pembongkaran muatan kapal LNG dekat dengan terminal LNG, yang khususnya terjadi ketika meningkatnya permintaan LNG yang lebih besar. Baru-baru ini problem sloshing menjadi isu penting dalam desain FPSO dan kapal LNG. Beberapa studi dilakukan untuk menganalisa sloshing seperti yang dilakukan oleh beberapa ahli antara lain Molin, dkk. (2002), Malenica, dkk. (2003), Kimet, dkk. (2003) dan Newman (2005) serta Lee, S.J., dkk. (2005). Salah satu yang menjadi perhatian utama dalam analisa sloshing adalah akurasi prediksi beban impuls pada struktur internal. Selama terjadi sloshing hebat, pengaruh sloshing berupa beban impact dapat menyebabkan kerusakan struktur tangki. Seperti kasus kerusakan yang dilaporkan oil tanker dan LNG. Baru-baru ini problem ini menjadi isu penting dalam desain FPSO. [1] Beban sloshing menjadi parameter penting dalam desain tangki kapal FPSO. Beban sloshing yang bekerja terhadap struktur bisa menyebabkan struktur tangki mengalami kerusakan untuk penyimpanan, pada kapal FPSO LNG untuk setiap kapasitas berbeda misalnya 15% - 75% memberikan efek sloshing berupa tegangan, deformasi, tekanan, yang diterima tangki berbeda pula. Dalam perancangan FPSO, hal utama untuk menentukan kekuatan struktur harus dipertimbangan berbagai beban yang disangga. Beban tersebut antara lain beban gelombang dan beban statis berupa beban

lokal untuk menyangga peralatan. Namun pada FPSO ada satu jenis beban yang sangat spesifik yang ditimbulkan oleh perilaku dinamika fluida dalam tangki, yang dikenal dengan beban sloshing. Masalah sloshing menjadi isu utama dalam desain tangki FPSO. Meskipun telah dilakukan penelitian pihak operator, owner dan pakar namun fenomena sloshing kaitannya dengan lifetime dan kekuatan struktur tangki[2]. Dalam kasus sloshing pada kapal berjenis FPSO, juga amat mempengaruhi distribusi beban terutama pada sisi samping kapal. Untuk menganalisa gerakan sloshing, biasanya yang dilakukan adalah dengan memberikan gerakan pada wadah sehingga cairan dapat bergerak secara alami sesuai dengan pergerakan cairan dalam wadah tersebut. Gerakan pada cairan selain dapat menyebabkan kerusakan pada suatu struktur juga mempunyai kemampuan dalam mengganggu stabilitas kapal. Untuk alasan tersebut, maka analisa gerakan sloshing dilakukan, dan untuk mengurangi maupun menghindari terjadinya kerusakan struktur pada lambung kapal dilakukan penelitian dengan cara memberikan suatu peredam gerakan sloshing tersebut[3].

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Floating Production, Storage and offloading (FPSO)

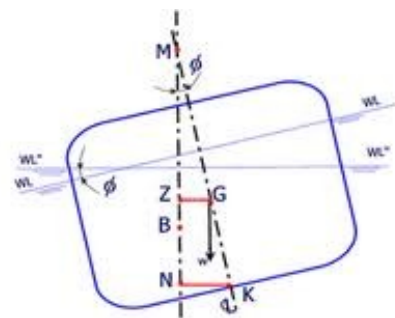
Floating, Production, Storage, and Offloading (FPSO) adalah kapal yang digunakan oleh industri minyak dan gas lepas pantai untuk pengolahan hidrokarbon dan untuk penyimpanan minyak. Sebuah kapal FPSO dirancang untuk menerima hidrokarbon yang dihasilkan dari dekat platform atau subsea template, mengolahnya, dan menyimpan minyak sampai dapat diturunkan ke kapal tanker atau tidak jarang diangkat melalui pipa. FPSO lebih sering digunakan di daerah perbatasan lepas pantai karena mudah untuk penggunaan dan tidak memerlukan infrastruktur pipa lokal untuk memindahkan minyak. FPSO dapat dibangun dari konversi tanker minyak atau bisa dari kapal yang dibangun khusus untuk FPSO itu sendiri [4].



Gambar 1. Kapal FPSO

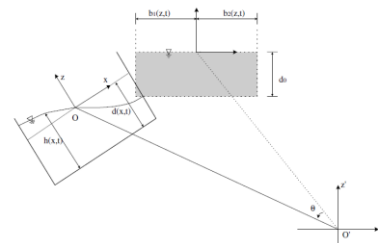
2.2 Gerakan Rolling

Prediksi gerakan linier rolling kapal cukup bagus untuk sudut roll yang kecil <math><5^\circ</math>. Untuk sudut besar gerakan linier rolling tidak akurat lagi, sehingga harus menggunakan gerakan *non linier rolling* meskipun penyelesaian agak rumit. Berdasarkan prinsip gerakan *linier rolling*, setelah kapal mengalami gaya eksitasi maka kapal akan mendapatkan amplitude sesaat, setelah itu karena adanya efek damping kapal akan mengalami osilasi menuju frekuensi gelombang. Sedangkan untuk gerakan non linier rolling dengan adanya variasi kecil eksitasi pada titik restoring dapat menyebabkan kapal *capsizing* dengan kata lain *capsizing* terjadi pada gerakan *non linier rolling*, gerakan ini terdiri dari dua komponen non linier yaitu non linier damping dan restoring [5].



Gambar 2. stabilitas kapal ketika terjadi gerakan rolling

2.3 Sloshing Motion



Gambar 3. Sloshing motion

Dengan menggunakan pendekatan gaya yang terjadi pada badan (dinding) tangki, jauh lebih sederhana digunakan meskipun tidak intuitif sebagai grid bergerak. Displasemen tangki digambarkan dalam sebuah inersia (X, Z) sistem koordinat dengan asal O diberikan oleh persamaan sebagai berikut:

$$\xi_{X,Z} = \sin(\omega t) \dots (1)$$

dengan asumsi displasemen tangki adalah sinusoidal dengan sumbu x dan sumbu (x, z). Oleh karena itu percepatan tangki di relatif terhadap (X, Z) diberikan sebagai:

$$\ddot{\xi}_{X,Z} = -\omega^2 \sin(\omega t) \dots (2)$$

Dengan mempertahankan notasi yang sama, displasemen dari tangki diamati pada relatif O ke o

adalah seperti dalam persamaan 3:

$$X_{x,z} = -\sin(\omega t) \dots\dots(3)$$

Atau sama dengan persamaan 4 :

$$\ddot{X}_{x,z} = \omega^2 \sin(\omega t) \dots\dots(4)$$

Oleh karena itu, gerakan yang sama, tangki berosilasi secara periodik, dapat dijelaskan baik di dalam masalah seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (3), serta menggunakan sistem referensi eksternal. Ini adalah inti dari pendekatan kekuatan tubuh. Dengan menerapkan percepatan tambahan untuk domain adalah mungkin untuk mensimulasikan gerakan sloshing tanpa harus memindahkan grid relatif terhadap sistem referensi inersial. Persamaan 4 menggunakan gerakan sinusoidal, tetapi setiap gerak tak beraturan dapat disimulasikan dengan memecah menjadi komponen-komponen percepatan Cartesian mereka dan menggunakan deret Fourier. Penggunaan persamaan momentum Navier Stokes incompressible untuk lebih sederhana adalah sebagai berikut ;

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + b_i \dots\dots(5)$$

b_i vektor terakhir berisi komponen kekuatan tubuh, misalnya gravitasi $g = (0, 0, 9,81)$ diterapkan pada sistem diatur oleh persamaan 5. Untuk kasus ini, persamaan momentum akan kemudian dimodelkan sebagai dengan hasil turunan dari persamaan 6.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + (\ddot{X}_{x,z}, 0, 9,81) \dots\dots(6)$$

Dengan demikian, pendekatan yang dilakukan dalam menghitung gaya yang terjadi pada dinding tangki dapat dilakukan dengan lebih sederhana, khususnya ketika mempertimbangkan meshing yang digunakan untuk memodelkan tangki. Lebih lanjut lagi, pendekatan gaya pada dinding tangki adalah diperolehnya data seputar kecepatan/percepatan, volume/displasemen yang digunakan sebagai input .[6]

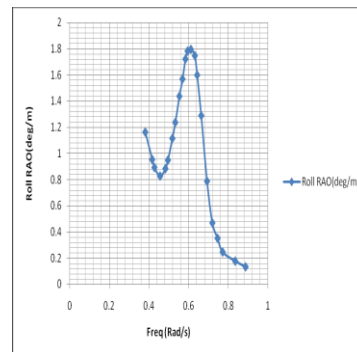
III. METODOLOGI

Paper ini dibagi dalam beberapa tahap yaitu Studi Literatur ,Pengumpulan data , Pengolahan data ,Pemodelan *rectangular tank* tanpa dan dengan *baffle* ,Grid Independence,Proses Simulasi Menggunakan Software Fluent ,Variasi Pengisian 15% , 45%, 75%, Hasil perhitungan dan Diskusi

3.1 Data spesifikasi kapal dan karakteristik Tanki

Table 1. Dimensi kapal , Tangki

Data Kapal		
LPP	285	m
Breadth	63	m
Draught	13	m
Displacement volume	220,017.6	m ³
Displacement	225.518	ton
Speed	0	knots
DATA Gelombang		
Significant Height of wave	5	m
Heading	90	deg
Peak Periode	12	s
AFT TANK no.4 (inner dimensions given)		
Tank aft from AP	61.08	m
Tank bottom from keel line	3.3	m
Tank length	49.68	m
Tank breadth	46.92	m
Tank height	32.23	m



Gambar 4. (RAO)

3.2 Pengolahan Data

Dari data – data tabel 1 dan gambar 4 maka untuk mendapatkan persamaan gerakan respon tangki yang harus dihitung adalah Frekuensi Encountering dan Amplitudo kapal , untuk itu perlu dilakukan olah data dari data amplitudo gelombang , panjang gelombang , frekuensi gelombang , serta frekuensi encountering . Setelah perhitungan dilakukan didapatkan nilai amplitudo gelombang (ζ_w) 2.5 m , Panjang gelombang (L_w) 224.94 m , Frekuensi gelombang (ω_w) 0.523 rad/sec, dan Frekuensi encountering (ω_e) 0.523 rad/sec.

Setelah nilai frekuensi encountering didapatkan maka nilai RAO dicari dengan memotongkan garis vertical dari nilai frekuensi pada grafik RAO , sehingga diketahui nilai RAO = 1.199 deg/m.

Setelah diketahui nilai RAO maka akan dicari nilai amplitude kapal (ζ_z) dengan formula:

$$RAO = \zeta_z^2 / \zeta_w^2$$

Sehingga didapatkan nilai amplitude (ζ_z) kapal sebesar 2.738 deg atau sama dengan 0.048 rad

Dari perhitungan di atas didapatkan nilai Frekuensi Encountering dan Amplitudo kapal yang mana akan digunakan sebagai data input pada persamaan respon gerakan kapal akibat gelombang ,sehingga di dapatkan persamaan dibawah ini :

$$y(t) = \zeta_z * \text{Cos}(\omega_e t)$$

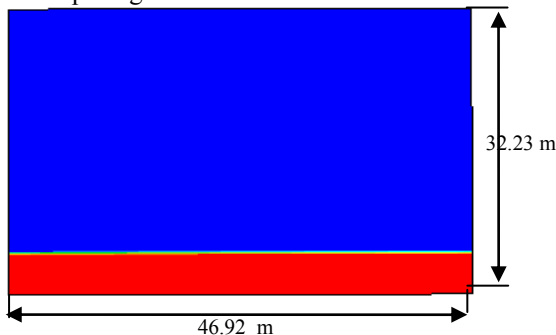
$$y(t) = 0.048 * \text{cos}(0.523 * \text{time});$$

3.3 Pemodelan Model

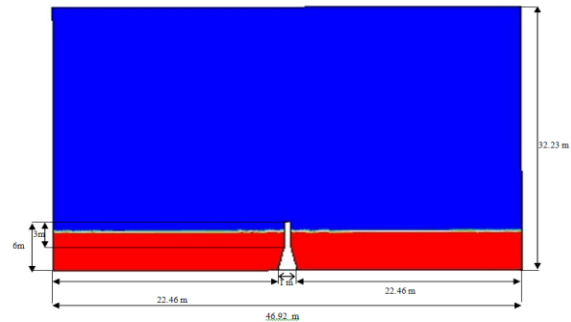
Pemodelan model pada studi sloshing ini dimodelkan secara 2D dengan ukuran tangki yang telah di dapat dari data FPSO pada tabel 1 yaitu lebar 46.92 m dan tinggi 32.23 m , data yang diambil hanya lebar dan tinggi dikarenakan gerakan yang dianalisa adalah gerakan sloshing karena rolling kapal sehingga penampang yang diambil adalah penampang secara melintang saja , model dimodelkan 2 buah yaitu tangki kotak tanpa baffle dan tangki kotak dengan baffle. Jumlah dan ukuran baffle adalah sebagai berikut :

- Jumlah baffle : 1 buah
- Tinggi baffle : 6 m
- Lebar dasar baffle : 1 m
- Lebar tengah dan atas baffle : 0.5 m

Model tangki tanpa baffle dan dengan baffle ditunjukkan pada gambar 4 dan 5.



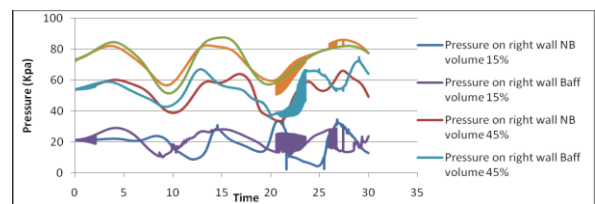
Gambar 5. Model tangki tanpa baffle



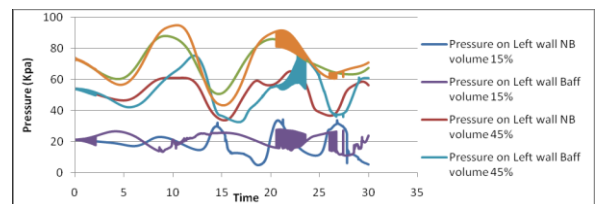
Gambar 6. Model tangki dengan baffle

IV. HASIL

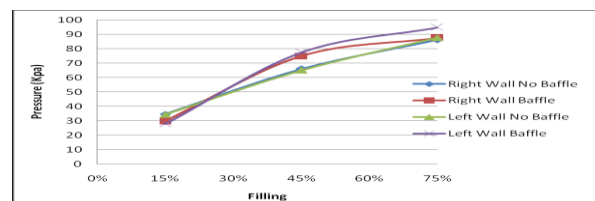
Hasil dari analisa pressure pada sloshing akibat dari gerkan rolling kapal ditunjukkan pada grafik 7, grafik 8 dan grafik 9 di bawah ini.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Pressure pada dinding kanan tangki.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Pressure pada dinding kiri tangki



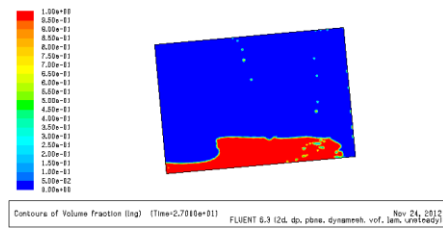
Gambar 9. Grafik Perbandingan Pressure pada dinding kanan dan kiri tangki

Tabel 2. Perbandingan pressure volume 15%

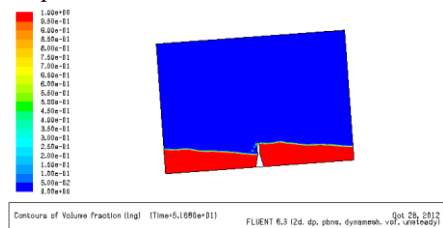
	Right wall	left wall
Non baffle volume 15%	34.624	34.428
baffle volume 15%	29.783	27.862
Selisih	-4.841	-6.566

Dari tabel 2 dan gambar 7 , gambar 8, dan gambar 9 diketahui bahwa nilai pressure pada dinding kanan tangki non baffle mendapatkan gaya yang lebih besar dibandingkan dengan pressure yang diterima oleh dinding kanan tangki dengan baffle dengan nilai maksimum pressure yaitu 34.624 Kpa pada tangki non

baffle , dan 29.783 Kpa pada tangki dengan penambahan baffle , ini berarti baffle berhasil meredam pressure sebesar 4.841 Kpa. Sedangkan pada dinding kiri tangki antara tangki non baffle dan tangki dengan penambahan baffle ternyata menunjukkan hal yang sama yaitu diketahui bahwa nilai pressure pada dinding kiri tangki non baffle mendapatkan gaya yang lebih besar dibandingkan dengan pressure yang diterima oleh dinding kiri tangki dengan baffle dengan nilai maksimum pressure 34.428 Kpa pada tangki non baffle , dan 27.862 Kpa pada tangki dengan penambahan baffle , ini berarti baffle berhasil meredam pressure sebesar 6.566 Kpa.



Gambar 10. gerakan fluida pada volume 15% tangki tanpa baffle



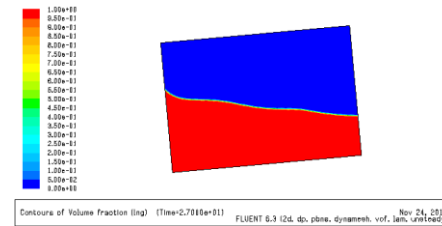
Gambar 11. gerakan fluida pada volume 15% tangki dengan baffle

Tabel 3. Perbandingan pressure volume 45%

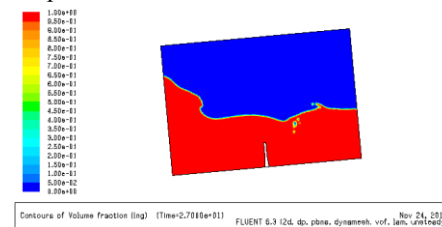
	Right wall	left wall
Non baffle volume 45%	66.094	65.149
baffle volume 45%	74.983	77.571
Selisih	8.889	12.423

Dari tabel 3. dan gambar 7 , gambar 8, dan gambar 9 diketahui bahwa nilai pressure pada dinding kanan tangki non baffle mendapatkan gaya yang lebih kecil dibandingkan dengan pressure yang diterima oleh dinding kanan tangki dengan baffle dengan nilai maksimum pressure yaitu 66.094 Kpa pada tangki non baffle , dan 74.983 Kpa pada tangki dengan penambahan baffle , ini berarti baffle tidak berhasil meredam pressure tetapi justru dengan adanya penambahan baffle menyebabkan munculnya gaya permukaan di daerah di atas baffle sehingga menyebabkan penambahan pressure sebesar 8.889 Kpa pada dinding kanan. Sedangkan pada dinding kiri tangki antara tangki non baffle dan tangki dengan penambahan baffle ternyata menunjukkan hal yang sama yaitu diketahui bahwa nilai pressure pada dinding kiri tangki non baffle mendapatkan gaya yang lebih kecil dibandingkan dengan pressure yang diterima oleh

dinding kiri tangki dengan baffle dengan nilai maksimum pressure 65.149 Kpa pada tangki non baffle , dan 77.571 Kpa pada tangki dengan penambahan baffle , ini berarti baffle tidak berhasil meredam pressure tetapi justru dengan adanya penambahan baffle menyebabkan munculnya gaya permukaan di daerah di atas baffle sehingga menyebabkan penambahan pressure sebesar 12.423 Kpa pada dinding kiri tangki .



Gambar 12. gerakan fluida pada volume 45% tangki tanpa baffle



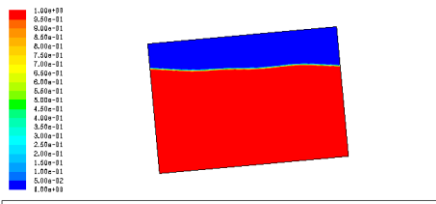
Gambar 13. gerakan fluida pada volume 45% tangki dengan baffle

Tabel 4. Perbandingan pressure volume 75%

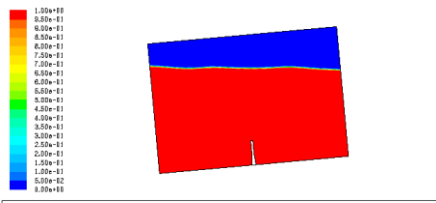
	Right wall	left wall
Non baffle volume 75%	86.208	87.789
baffle volume 75%	87.544	94.835
Selisih	1.335	7.046

Dari tabel 4 dan gambar 7 , gambar 8, dan gambar 9 diketahui bahwa nilai pressure pada dinding kanan tangki non baffle mendapatkan gaya yang lebih kecil dibandingkan dengan pressure yang diterima oleh dinding kanan tangki dengan baffle dengan nilai maksimum pressure yaitu 86.208 Kpa pada tangki non baffle , dan 87.544 Kpa pada tangki dengan penambahan baffle , ini berarti baffle tidak berhasil meredam pressure tetapi justru dengan adanya penambahan baffle menyebabkan munculnya gaya permukaan di daerah di atas baffle sehingga menyebabkan penambahan pressure sebesar 1.335 Kpa pada dinding kanan tangki . Sedangkan pada dinding kiri tangki antara tangki non baffle dan tangki dengan penambahan baffle ternyata menunjukkan hal yang sama yaitu diketahui bahwa nilai pressure pada dinding kiri tangki non baffle mendapatkan gaya yang lebih kecil dibandingkan dengan pressure yang diterima oleh dinding kiri tangki dengan baffle dengan nilai maksimum pressure 87.789 Kpa pada tangki non baffle , dan 94.835 Kpa pada tangki dengan penambahan baffle , ini berarti baffle tidak berhasil meredam pressure tetapi justru dengan adanya penambahan baffle

menyebabkan munculnya gaya permukaan di daerah di atas baffle sehingga menyebabkan penambahan pressure sebesar 7.046 Kpa pada dinding kiri tangki



Gambar 14. gerakan fluida pada volume 75% tangki tanpa baffle



Gambar 15. gerakan fluida pada volume 75% tangki dengan baffle

V. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian model dengan berbagai variasi dan pembahasan di atas dapat disimpulkan bahwa:

1. Ketika terjadi sloshing Baffle berhasil berfungsi sebagai peredam pressure ketika ketinggian volume lng tidak melebihi ketinggian baffle , dalam hal ini adalah ketika ketinggian volume LNG 15%.
2. Ketika volume LNG lebih tinggi dari tinggi baffle maka pressure yang dihasilkan akan lebih besar , hal ini disebabkan karena dengan adanya baffle menyebabkan timbul gaya permukaan pada cairan sehingga menyebabkan gelombang lebih tinggi di atas area baffle dan ketika terjadi gerakan rolling maka akan menambah gaya hantam / pressure pada dinding – dinding tangki.
3. Fungsi baffle lebih efisien ketika ketinggian baffle lebih tinggi atau sama dengan ketinggian volume cairan LNG sehingga ketika kondisi volume cairan LNG lebih tinggi sebaiknya tangki tidak di desain dengan penambahan baffle.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada pembimbing yang telah memberikan waktu, kesabaran, dan pemikirannya dalam membimbing untuk menyelesaikan paper ini, yaitu bapak Aries Sulistoyono, S.T.,MA.Sc.,Ph.D. Tidak lupa ucapan terimakasih kepada kedua orang serta keluarga dan teman-teman yang telah membantu dalam menyelesaikan paper ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lee, S.J, dkk. (2005). *The effects of LNG-tank sloshing on The global motions of LNG carriers*. USA : Texas A&M University.
- [2] Bang-fuh, chen dan Roger, nokes.(2005).*Time Independent Finite Diffirence Analysis of Fully Non-Linierand viscousFluid Sloshing in a Rectangular Tank* .Cristchurch, NewZeland : University of Cantenbury
- [3] Rognebakke, Olav dkk. (2009). *Sloshing Impact Design Load Assessment*. International Society of Offshore and Polar Engineer.
- [4] Septiansyah, Bahtiar Rifai. (2012).Tugas Akhir. *Analisa Sloshing Secara Memanjang Pada Tangki FLNG Dengan Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic (CFD)*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [5] Bhattacharrya, Rameswar. (1978). *Dynamics Of Marine Vehicles*.New York : Wiley Publication.
- [6] Rudman, Murray dan Paul W Clearly. (2009). *Modelling Sloshing In LNG Tank*. International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries.