



Studi Sloshing pada Independent Tank Type C secara Memanjang Akibat Gerakan Kapal LNG dengan Metode Computational Fluid Dynamic (CFD)

Aries Sulisetyono dan Mochamad Ridhlo Nurfadhi

Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Jl. Arif Rahman Hakim, Sukolilo, Surabaya Indonesia

sulisea@na.its.ac.id

Abstrak

Sloshing merupakan fenomena yang terjadi pada tangki muatan cair akibat permukaan bebas yang bergerak. Paper ini membahas tentang pengaruh terjadinya *sloshing* pada tangki yang memuat LNG (*Liquid Natural Gas*) akibat gerakan kapal LNG selama beroperasi di laut. Tangki LNG ini berjenis *Iso Tank* berbentuk *bilobe* yang merupakan tipe *C Independent Self Supporting Tank* dengan ukuran yang dirancang untuk kapal pengangkut LNG dari Simenggaris menuju Tanjung Batu di Provinsi Kalimantan Timur. *Sloshing* disimulasikan secara numerik dalam dua dimensi tangki secara memanjang dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Gerakan tangki mengikuti gerakan kapal yang timbul akibat gaya gelombang selama beroperasi di laut, dan gerakan kapal yang dipertimbangkan dalam simulasi *sloshing* tangki secara memanjang adalah surge, heave, dan pitch. Dalam simulasi ini, tiga variasi muatan LNG dalam tangki yang meliputi: kondisi muatan kosong yaitu muatan LNG 10% dari ketinggian tangki (h), kondisi muatan setengah penuh, (50%h), dan kondisi muatan penuh, (90%h) yang diujikan selama beberapa kali gerakan berulang (*oscillation*) tangki dengan tujuan mendapatkan nilai tekanan maksimum yang terjadi pada dinding dalam tangki LNG. Hasil simulasi menjelaskan bahwa besarnya tekanan maksimum statis pada kondisi muatan penuh adalah paling besar 31235.92 Pa dibandingkan dengan kondisi muatan setengah penuh sebesar 17345.54 Pa dan muatan kosong sebesar 3473.65 Pa. Peningkatan tekanan yang terjadi akibat *sloshing* adalah sebesar 9.4% pada kondisi muatan penuh, 4.9% pada kondisi muatan setengah penuh, dan 9.1% pada kondisi muatan kosong. Hasil perhitungan *probability exceed* diperoleh bahwa peluang terjadinya tekanan maksimum pada semua daerah dinding dalam tangki LNG pada semua kondisi pengisian muatan LNG nilainya tidak melebihi 6%.

Kata kunci: sloshing, iso tank, LNG vessel, computational fluid dynamics

1 PENDAHULUAN

Wilayah Indonesia yang luas terdiri dari pulau-pulau yang dipisahkan dengan lautan merupakan tantangan yang tidak mudah bagi pemerintah dalam mendistribusi gas ke seluruh pembangkit listrik. Transportasi laut melalui kapal merupakan pilihan tepat untuk kondisi Indonesia yang terdiri dari pulau-pulau kecil yang tersebar disekitar pulau besar dengan jumlah penduduk yang masih relatif sedikit. Salah satu kapal LNG telah dirancang oleh LPPM ITS (Jusuf and Sulisetyono, 2013) untuk melayani pengangkutan LNG dari Simenggaris menuju Tanjung Batu di Provinsi Kalimantan Timur. Jalur operasional kapal yang melalui dua kondisi perairan yang berbeda yaitu Selat Makasar dan Sungai Mahakam mengakibatkan kapal memiliki sarat yang rendah. Pengaruh sarat (*draft*) kapal yang rendah terhadap gerakan kapal (*seakeeping*) ketika beroperasi di perairan dalam yang bergelombang telah dibahas oleh [1].

Gerakan kapal yang berlebih secara umum dapat menyebabkan ketidaknyamanan penumpang, bertambahnya nilai hambatan kapal akibat gelombang (*added wave resistance*), dan terjadinya fenomena *sloshing* akibat permukaan bebas cairan LNG dalam tangki. *Sloshing* dapat diartikan sebagai gerakan *fluida* cair dalam suatu wadah akibat adanya permukaan bebas dan gaya eksternal yang dapat menimbulkan beban tiba-tiba dari *fluida*. Masalah utama dalam kajian *sloshing* adalah bagaimana mengestimasi distribusi tekanan, gaya, dan momen hidrodinamika dari permukaan bebas LNG terhadap dinding dalam tangki. Besarnya tekanan permukaan bebas cairan LNG ini bisa berdampak langsung terhadap kerusakan dinding tangki tersebut [2]. Akibat lain dari *sloshing* adalah meningkatkan suhu LNG yang berdampak pada kenaikan tekanan dalam tangki, dan apabila tekanan dalam tangki melebihi batas maksimum tekanan desain tangki, maka dapat menimbulkan kerusakan.

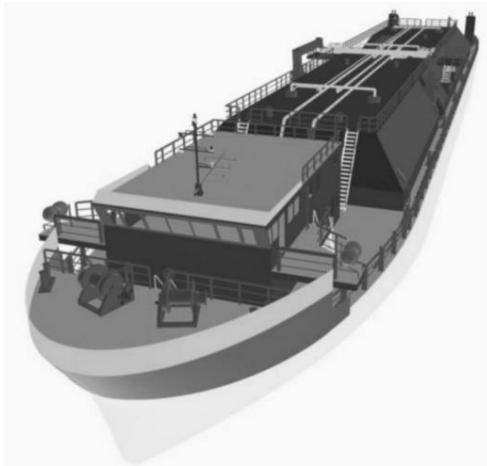
Paper ini membahas tentang fenomena *sloshing* yang terjadi pada 'Kapal LNG Simenggaris' akibat gerakan kapal ketika beroperasi di laut Makasar sebagaimana telah dipaparkan oleh [1]. Kapal tersebut dirancang memiliki LNG tank berbentuk *bilobe tanks* yang merupakan tipe *Iso tank* berkapasitas total 3800 m³. Simulasi *sloshing* dilakukan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dengan pendekatan *volume of fluid* (VOF) seperti pernah dilakukan oleh [3] dan [4]. Model simulasi tangki LNG dilakukan dalam 2 (dua) dimensi secara memanjang dengan menggunakan aplikasi

GAMBIT. Dalam simulasi itu variasi volume fluida di dalam tanki dilakukan pada kondisi muatan kosong yaitu muatan LNG 10% dari ketinggian tanki (h), kondisi muatan setengah penuh, 50% h, dan kondisi muatan penuh, 90% h. Tanki LNG disimulasikan berguncang (*oscillation*) mengikuti respon gerakan kapal yang meliputi surge, heave, dan pitch di gelombang irregular pada rentang frekuensi gelombang 0.8 – 1.2 rad/sec. Program *UDF* gerakan kapal dikembangkan dalam aplikasi FLUENT sehingga guncangan/gerakan tanki pada rentang frekuensi gelombang dapat mewakili gerakan kapal. Adapun pengaruh *sloshing* terhadap gerakan kapal atau kebalikannya dalam studi ini tidak diperhitungkan.

2 METODOLOGI

Desain Rencana umum kapal LNG dalam 3 dimensi dinyatakan pada Gambar 1, dengan ukuran utama sebagaimana diterangkan dalam Tabel 1. Response gerakan kapal LNG di gelombang irregular telah dihitung dan dipublikasikan oleh [1], dan dalam studi sloshing tanki LNG secara memanjang ini gerakan kapal yang diperhitungkan adalah *surge*, *heave* dan *pitch* yang saling berinteraksi pada kondisi *head sea* yaitu gelombang datang berlawanan dengan arah kapal. Spektrum gelombang menggunakan formula JONSWAP dengan input sesuai kondisi perairan Selat Makasar.

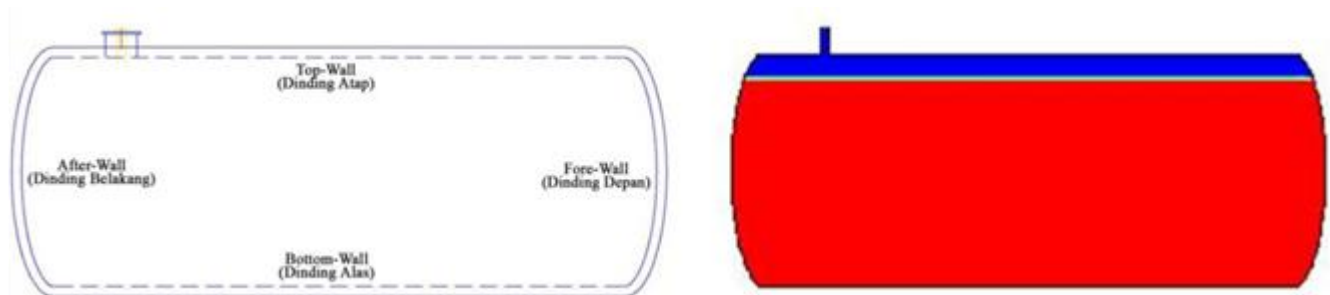
Tabel 1. Ukuran utama kapal LNG (sulisetyono, 2015)



UKURAN	NILAI	SATUAN
Panjang, Lwl	103.259	[m]
Lebar, B	16.8	[m]
Sarat, T	3.4	[m]
Tinggi, H	5.05	[m]
Cb	0.871	
Cm	0.992	
Cp	0.878	
Cwp	0.943	
LCB	50.601	[m]
Displacement,	5257.62	[ton]
Kecepatan, Vs	11	[knot]

Gambar 1. Rencana Umum Kapal LNG (sulisetyono, 2015)

Dalam kapal ini terdapat tiga tanki berjenis *iso tank* berkapasitas sebesar 1270 m³ per tanki yang dalam studi ini dilakukan pada salah satu tanki yang berada di daerah tengah kapal, dimana titik berat tanki diasumsikan sama dengan titik berat kapal. Secara spesifik desain tanki LNG ini secara memanjang ditunjukkan pada Gambar 2a, dimana panjangnya 17.2 m, tinggi 6.9 m, luas area melintang 73.84 m², dan tanki dilengkapi dengan insulasi yang memiliki ketebalan 300 mm. Daerah tanki dibagi empat bagian yang dianalisa meliputi bagian dinding depan, belakang, atas, dan alas tanki.



Gambar 2. Iso tank secara memanjang (a) desain tanki, (b) model numerik dengan muatan LNG 90% h

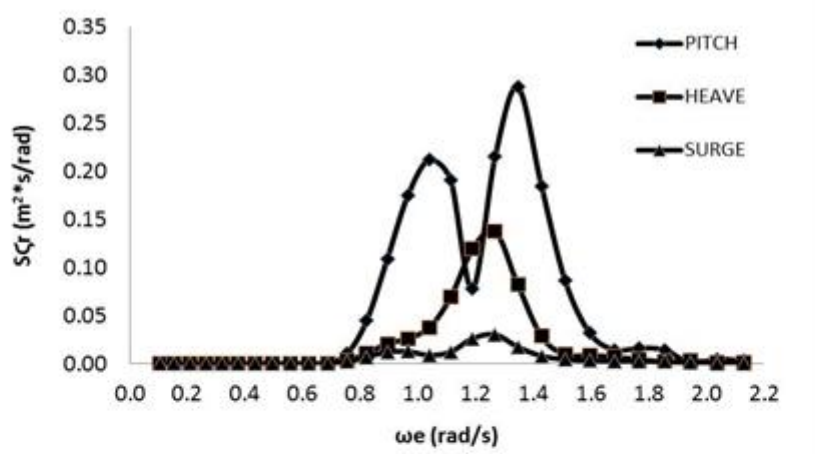
Tanki LNG ini dimodelkan secara numerik dengan menggunakan GAMBIT dalam meshing berbentuk segitiga, dan jumlah meshingnya ditentukan berdasarkan kajian grid independence yang diketahui jumlah optimumnya untuk simulasi adalah 19.756 panel. Jumlah panel ini memenuhi kriteria minimum kesalahan (minimum error) dan mempertimbangkan waktu simulasi yang secepat mungkin. Ukuran meshing atau panel ini dimodelkan secara merata dan sama pada seluruh bagian fluida dan gas dalam tanki tersebut. Gambar 2b menjelaskan model simulasi muatan LNG dalam tanki pada kondisi muatan penuh 90% dari tinggi tanki (h). Dua variasi muatan lainnya yaitu kondisi muatan kosong yang berisikan LNG dengan tinggi permukaannya 10% h, dan kondisi muatan setengah penuh 50% h.

Simulasi sloshing menggunakan software FLUENT dengan terlebih dahulu mengimport model dari GAMBIT. Software FLUENT ini merupakan program aplikasi CFD yang populer dengan pendekatan metode volume hingga (finite volume method) Simulasi ini menggunakan model penyelesaian solver based pressure dengan formula implicit, unsteady, dan non-iterative time advancement. Aliran dimodelkan dalam dua fase dengan metode Volume of fluid dimana parameternya ditentukan secara explicit dan dipilih formulanya implicit body force. Jenis aliran diasumsikan turbulent dengan k-epsilon, dan model standard dengan standar wall function. Material dua fase ini ditetapkan nilai densitynya yaitu fluida LNG dan udara. Kondisi operasional yang meliputi tekanan, percepatan gravitasi, massa jenis, dan temperatur ditentukan sesuai dengan karakteristik fluida. Kondisi batas fluida yaitu dinding tangki ditentukan zero velocity condition. User defined ditentukan dengan mengupload file libudf (library user defined function) ke dalam UDF library yang merupakan program gerakan kapal, dan meng-compilanya. Meshing dimodelkan dalam dynamic mesh dengan menggunakan metode layering, dan ditetapkan dynamic mesh zone dalam rigid body dinding tangki.

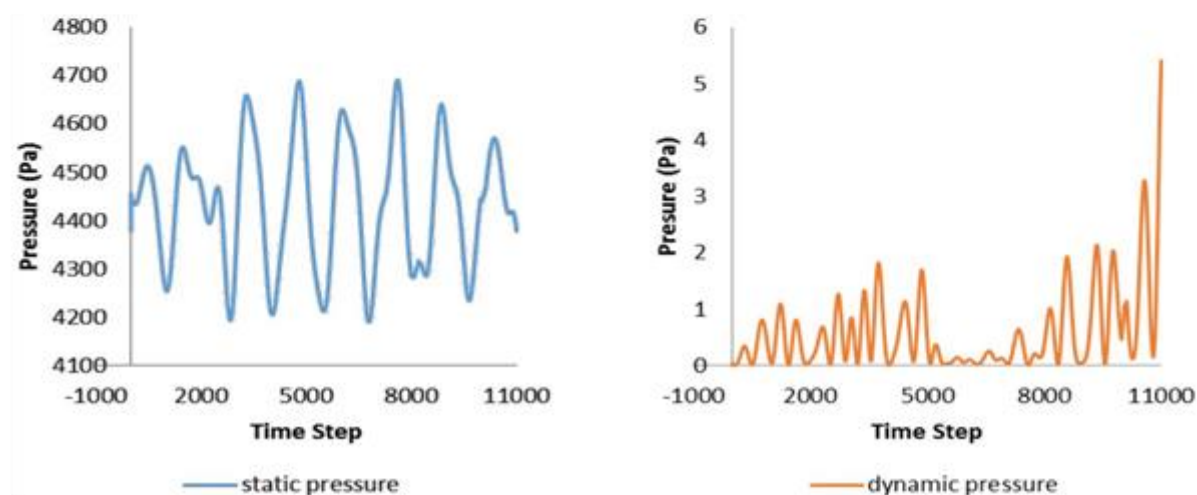
Hasil akhir simulasi adalah sebuah nilai tekanan pada dinding tangki yang bisa dilihat nilainya per satuan waktu simulasi. Besarnya nilai tekanan maksimum dengan lokasinya pada dinding tangki dapat diprediksi dengan tepat. Peluang terjadinya tekanan maksimum ini selanjutnya dihitung dengan metode probability exceed yang menggunakan distribusi 3-parameter Weibull dengan tingkat kepercayaan 95%.

3 HASIL DAN DISKUSI

Hasil perhitungan respon spektrum untuk gerakan kapal surge, heave dan pitch di gelombang irregular dinyatakan dalam Gambar 4. Response gerakan ini telah ditransformasikan menjadi gerakan tangki LNG dalam simulasi sloshing, dan contoh hasilnya sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 yaitu nilai tekanan statis dan dinamis pada kondisi muatan 50% h yang diambil pada daerah dinding belakang (after-wall).



Gambar 2. Response gerakan kapal LNG pada sudut heading 1800



Gambar 3. Pressure pada dinding belakang tangki LNG pada muatan 50% h

Dari Gambar 3 dapat dilihat nilai static pressure dan dynamic pressure dari simulasi sloshing ini yang dilakukan dalam 55 detik dengan time step 0.005. Dalam range waktu tersebut terjadi tekanan maksimum pada detik ke 37.99 dengan besarnya nilai static pressure adalah 4690.73 Pa; dan besarnya nilai dynamic pressure adalah 5.40 Pa yang terjadi pada detik ke 55. Demikian seterusnya besarnya tekanan static dan dynamic didapatkan pada dinding sisi depan, belakang dan bawah tangki dengan variasi volume muatan dalam tangki. Hasil simulasi secara keseluruhan di rekapitulasikan dan dijelaskan pada Tabel

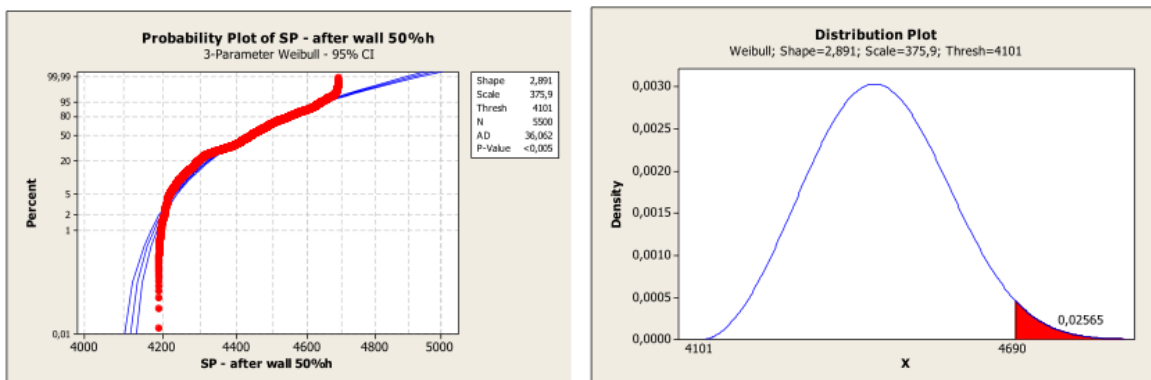
2, dimana besarnya nilai tekanan maksimum pada setiap bagian dinding tangki untuk tiap kondisi muatan LNG akibat beban cairan static dan dynamic telah diuraikan dalam tabel tersebut dalam satuan pascal.

Tabel 2. Rekapitulasi tekanan maksimum akibat Sloshing

MUATAN	TEKANAN MAKSIMUM					
	After-Wall		Bottom-Wall		Fore-Wall	
	Static	Dynamic	Static	Dynamic	Static	Dynamic
	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)
Muatan 10%h	280.44	1.21	3473.65	9.21	286.72	2.29
Muatan 50%h	4690.73	5.40	17345.54	9.20	4745.06	9.63
Muatan 90%h	14923.12	15.46	31235.92	9.34	14908.51	20.76

Dalam Tabel 2 terlihat bahwa nilai maksimum pada daerah dasar tangki (bottom wall) akibat beban statik pada kondisi muatan 90% h adalah sebesar 31235.92 Pa. Hal ini bisa dipahami karena beban akibat berat muatan yang paling besar terjadi pada kondisi ini. Berbeda dengan hasil nilai tekanan maksimum akibat beban dinamis, dimana terlihat nilai terbesarnya terjadi di dinding depan tangki (fore-wall) yaitu sebesar 20.76 Pa dibandingkan dengan yang terjadi di dinding bawah (bottom-wall) sebesar 9.34 Pa, dan dinding belakang (after-wall), 15.46 Pa, pada kondisi muatan yang sama 90% h. Fenomena ini menjelaskan bahwa pengaruh sloshing terbesar itu adalah pada sisi-sisi dinding tangki akibat benturan permukaan cairan pada permukaan dinding tersebut. Besarnya tekanan maksimum akibat beban dinamis pada dinding depan dan belakang memiliki nilai semakin besar dengan bertambahnya jumlah muatan pada tangki, seperti tekanan maksimum pada muatan 90% h pada dinding depan memiliki nilai 20.76 Pa lebih besar dari muatan 50% h dan 10% h yang secara berturut-turut nilainya 9.63 Pa dan 2.29 Pa. Kejadian ini menerangkan bahwa besarnya sloshing pada tangki dengan luas permukaan yang sama, namun volume muatan cairnya berbeda akan menghasilkan nilai tekanan yang berbeda pula, dan semakin besar volume muatan akan semakin besar pula energi sloshing yang terjadi.

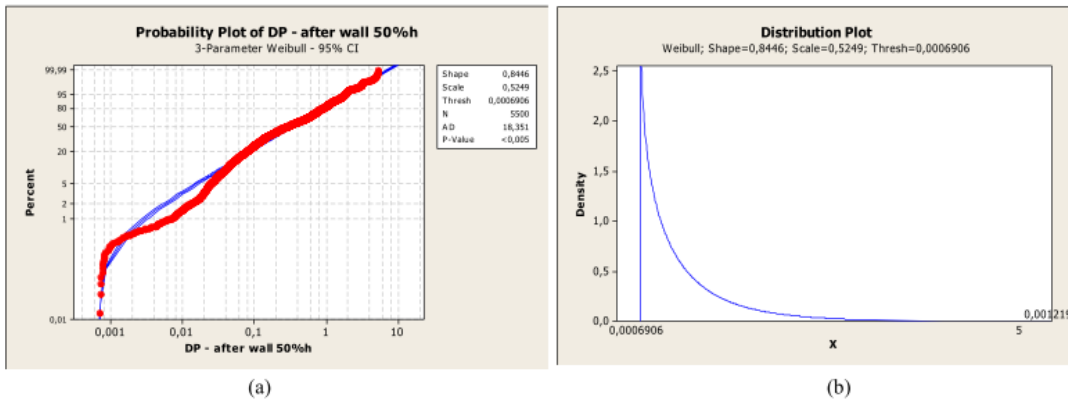
Gambar 4a memperlihatkan plot peluang terjadinya static pressure yang mengenai dinding belakang (after-wall) tangki, yang diperoleh dengan 3-parameter Weibull yaitu nilai shape = 2.891, scale = 375.9, dan thresh = 4101. Ketiga nilai tersebut selanjutnya dijadikan input untuk mendapatkan distribution density function seperti ditunjukkan pada Gambar 4b yang menjelaskan bahwa peluang terjadinya maximum pressure pada dinding belakang sebesar 2.565%.



Gambar 4. (a) Peluang static pressure, (b) Distribusi static pressure, pada dinding belakang tangki (50%h)

Adapun plot peluang terjadinya dynamic pressure yang mengenai dinding belakang (after-wall) tangki ditunjukkan pada Gambar 5a, dimana nilainya dihitung dengan 3-parameter Weibull yaitu nilai shape = 0.8446, scale = 0.5249, dan thresh = 0.0006906. Ketiga parameter itu digunakan untuk mendapatkan distribution density function seperti pada Gambar 5b yang menjelaskan peluang terjadinya maximum pressure sebesar 0.122%. Dari Gambar 3 dan 4 dapat diketahui bahwa peluang terjadinya tekanan maksimum pada dinding belakang tangki ketika muatan LNG 50% h adalah relatif kecil yang nilainya kurang dari 3%.

Cara yang sama juga dilakukan pada dinding depan dan dinding bawah dari tangki LNG, dimana static dan dynamic pressure dihitung dengan bervariasi muatan LNG sebesar 10% h, 50% h, dan 90% h. Rekapitulasi dari hasil perhitungan probability exceed dari hasil simulasi sloshing yang berupa nilai tekanan maksimum dinyatakan pada Tabel 3.



Gambar 4. (a) Peluang dynamic pressure, (b) Distribusi dynamic pressure, pada dinding belakang Tangki (50%h)

Tabel 3 menjelaskan tentang nilai peluang terjadinya tekanan maksimum pada dinding tangki akibat sloshing. Peluang terjadinya tekanan maksimum ini bisa diprediksi dengan menggunakan simulasi CFD. Dari Tabel 3 diketahui bahwa peluang kejadian tekanan maksimum (probability exceed) dengan nilai terbesar 5.78% yang terjadi di dinding bawah tangki akibat beban fluida dinamis pada kondisi muatan 90% h. Selanjutnya peluang kejadian tekanan maksimum pada dinding depan adalah 2.8% akibat beban statis pada kondisi muatan 90% h, dan nilai peluang ini berkurang menjadi 2.75% pada kondisi muatan 50% h, dan 0.93% pada kondisi muatan 10% h. Secara keseluruhan nilai probability exceed pada Tabel 3 nilainya tidak melebihi 6%.

Tabel 3. Rekapitulasi Probability Exceed dari nilai tekanan maksimum

VARIASI MUATAN	PROBABILITY EXCEED					
	After-Wall		Bottom-Wall		Fore-Wall	
	Static (Pa)	Dynamic (Pa)	Static (Pa)	Dynamic (Pa)	Static (Pa)	Dynamic (Pa)
Muatan 10% h	1.39%	0.21%	0.06%	0.44%	0.93%	0.20%
Muatan 50% h	2565%	0.122%	0.203%	0.331%	2.75%	0.226%
Muatan 90% h	1.03%	2.15%	0.05%	5.78%	2.80%	0.53%

4. KESIMPULAN

Pengaruh sloshing pada tangki bermuatan LNG akibat gerakan kapal LNG di laut, telah disimulasikan dalam tiga kondisi muatan LNG yang meliputi kondisi muatan kosong atau 10% h, muatan separuh atau 50% h, dan muatan penuh atau 90% h. Tekanan statik maksimum pada kondisi muatan 10% h dan 50%h pada dinding bawah secara berurutan sekitar 10% dan 50% dari muatan penuh, 90%h. Sedangkan tekanan dinamik yang ditimbulkan pada muatan 10%h dan 50%h nilainya secara berurutan pada dinding depan adalah 11% dan 46% dari muatan penuh, dan dinding belakang sekitar 7% dan 35%. Peningkatan tekanan yang terjadi akibat sloshing adalah sebesar 9.4% pada kondisi muatan penuh, 4.9% pada kondisi muatan setengah penuh, dan 9.1% pada kondisi muatan kosong. Hasil simulasi sloshing ini menerangkan bahwa pada luas permukaan bebas tangki yang sama, maka semakin besar volume muatan akan memberikan efek sloshing atau pressure yang semakin besar pula. Dan besarnya efek dinamik pada dinding depan nilainya lebih besar daripada tekanan di dinding belakang dan bawah tangki pada semua kondisi muatan. Hasil analisa probability exceed menjelaskan bahwa peluang terjadinya tekanan maksimum pada tiap sisi dalam dari dinding tangki LNG pada semua kondisi muatan nilainya tidak melebihi 6%. Hal ini menandakan bahwa peluang terjadinya tekanan maksimum relatif sangat kecil, atau bisa dikatakan tidak kritis.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. SULISETYONO, "Analisa Seakeeping Kapal LNG Ber-Sarat (Draft) Rendah di Perairan Dalam Selat Makasar," in *Seminar Nasional Inovasi di Bidang Rekayasa Teknologi serta Aplikasi Industri dan Management*, 2015.
- [2] K. B. SOEGIONO & ARTANA, *Transportasi LNG Indonesia*. Surabaya: Airlangga University Press, 2006.
- [3] S. De JOUETTE, C., Le GOUEZ, J. M., PUT, O., AND RIGAUD, "Volume of Fluid Method (VOF) Applied to Non Linear Wave Problems on Body Fitted Grids," in *International Workshop and Water Waves and Floating Body*, 1996.
- [4] B. R. SEPTIANSYAH, "Analisa Sloshing Secara Memanjang Pada Tangki FLNG Dengan Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic (CFD)," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2012.