

OPTIMASI DESAIN *TRUNCATED MOORING SYSTEM* UNTUK PENGUJIAN MODEL PERAIRAN DALAM (*DEEPWATER*)

Design Optimization of Truncated Mooring System for Deepwater Model Testing

Totok Triputrasyo M

UPT-Balai Pengkajian dan Penelitian Hidrodinamika, BPPT
TotokTriP@gmail.com

Diterima: 18 Mei 2015; Direvisi: 25 Mei 2015; Disetujui: 18 Juni 2015

Abstrak

Keterbatasan kedalaman fasilitas pengujian model yang ada mengharuskan adanya rekayasa sehingga bisa dilakukan simulasi pada tangki uji, yaitu dengan melakukan optimasi desain sistem tambat yang ada menjadi seolah-olah lebih pendek (perairan yang lebih dangkal) sehingga bisa dilakukan simulasi model fisik. Filosofinya adalah bahwa sistem tambat (*mooring*) yang telah direncanakan diperpendek sesuai dengan yang diharapkan kemudian hasil simulasi numerik sistem tambat yang lebih pendek divalidasi dengan hasil simulasi numerik kondisi sistem tambat kedalaman penuh. Jenis tali tambat yang digunakan, besarnya *pre-tension*, sudut *pre-tension*, ukuran dan jenis kapal (*floater*) merupakan aspek yang memainkan peran utama. Validasi hasil simulasi meliputi validasi statis yaitu untuk mengetahui karakteristik statis dari material sistem tambat, kemudian validasi dinamis yaitu untuk mengetahui sifat dinamis dari material sistem tambat. Hasil prediksi yang dilakukan dengan simulasi numerik diterapkan pada set-up pengujian model hingga ditemukan model sistem tambat yang mempunyai sifat dinamis dan statis yang mendekati sistem tambat kedalaman penuh.

Kata kunci : Uji Model, Metode Pemotongan, Sistem Tambat, Optimasi Desain

Abstract

The depth limitations of the existing model testing facility required an engineering solution to simulate deeper mooring system. This is optimized to the acomodated depth of the existing tank in which the numerical behavior are as close as to full depth mooring system condition. Type of mooring lines are used, the amount of pre-tensioned, pre-tension angle, size and type of vessel (floater) is an important aspect. Validation of simulation results include static validation is to determine the static properties of the mooring system material, then the dynamic validation is to determine the dynamic properties of the mooring system material. The prediction results were performed by numerical simulations applied to the set-up testing of the model to be found mooring system models that have dynamic and static properties approach the full depth mooring system.

Keywords : Model Test, Truncation Method, Mooring System, Design Optimization

PENDAHULUAN

Perkembangan eksplorasi minyak dan gas mengarah ke pelaksanaan di perairan dalam. Berbagai kesulitan dan kendala yang ada berbeda dengan perairan yang lain. Karena keterbatasan kedalaman dan ukuran fasilitas uji model yang tersedia sehingga

kedalaman penuh dari sistem tambat tidak dapat dimodelkan untuk skala yang diterima. Sebuah alternatif untuk tetap bisa melakukan uji model adalah memodelkan sistem kedalaman penuh dengan perilaku semirip mungkin dengan sistem kedalaman penuh yang sebenarnya dengan cara memotong sistem

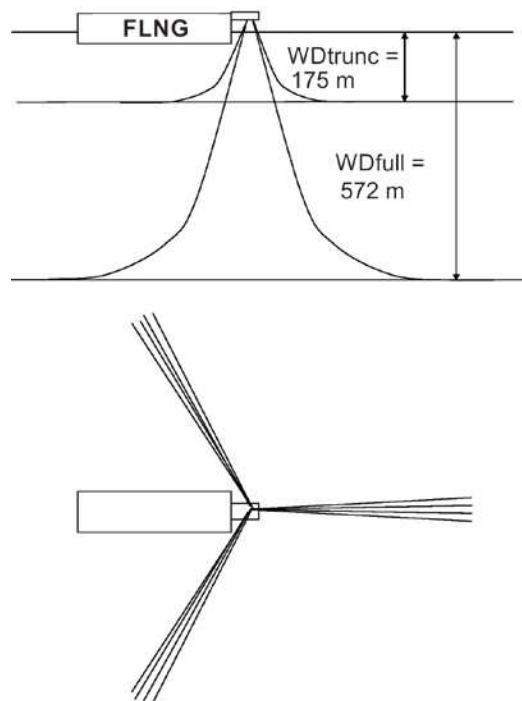
kedalam. Tujuan utama dari pemotongan adalah untuk merancang suatu sistem tambat yang menghasilkan perilaku gerakan yang sama dengan sistem kedalaman penuh. Pada paper ini difokuskan pada perencanaan ulang sistem tambat potong dengan bentuk *catenary* dengan kapal FLNG. Dalam perhitungan numerik sistem tali tambat (mooring) FLNG ini menggunakan program komputer aNySIMPro-MARIN. Dan melakukan optimasi dilakukan dengan program komputer yang lain.

Dari studi literasi telah dilakukan riset tentang penggunaan metode *truncation* (pemotongan) dengan memvariasikan faktor pemotongan (*truncation factor*) menjadi beberapa dan dalam paper disebutkan bahwa pada perbandingan pemotongan hingga 4 menunjukkan hasil yang masih cukup konvergen (Waals Olaf J., van Dijk Radboud R.T., 2004). Secara teknis pelaksanaan desain sistem mooring terpotong (*truncated*) seperti juga telah dijelas oleh penulis. dalam papernya (Wang Hong-wei, et.al.,2010, Argyros A, at.al.,2012). Menurut Chunyan Ji dalam papernya bahwa untuk mendapatkan hasil eksperimen yang bagus maka faktor truncation harus kurang dari 5. Namun dalam eksperimennya dilakukan percobaan uji model untuk melakukan verifikasi hasil numerik untuk faktor *truncation* 7,5 dan 5 (Chunyan Ji,Xu Sheng, 2014). Secara umum skala untuk pengujian model antara 1:40 hingga 80, juga dijelaskan metode verifikasi hasil optimasi desain *truncation* sistem tambat (ITTC 7.5-02-07-03.5, 2008). Didalam riset ini dilakukan untuk percobaan model FLNG pada kedalaman 572 m. Dan dengan skala 1:70. Untuk bisa dilakukan uji model pada kedalaman kolam 2,5 meter maka akan dilakukan pemotongan dengan perbandingan 1 : 3,27. Berdasarkan referensi diatas bahwa dengan pemotongan sperti ini masih cukup bagus konvergensinya.

METODOLOGI

Di bawah ini, diberikan gambaran umum tentang strategi pemotongan yang digunakan dalam perencanaan ulang ini. Sebuah tinjauan umum dari metode ini bahwa sistem tambat yang sudah didesain dilakukan desain ulang dengan dimensi sistem tambat yang beda, namun keduanya memiliki karakteristik hidrodinamika yang hampir sama, secara sederhana desain ulang yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1. Dengan perubahan dari kedalaman 572 meter menjadi 175 meter, dimensi sistem tambat yang lain menyesuaikan dan untuk dimensi dari FLNG

adalah tetap.



Gambar 1. Sistem Tali Tambat Eksternal Turret FLNG

Metode pemotongan

Sistem tambat terpotong dioptimalkan dalam dua proses iteratif :

1. Optimasi beban statis dengan menyesuaikan:
 - Panjang tali tambat terpotong (L_{trunc})
 - Berat terendam dari garis tambat terpotong ($W_{subtrunc}$)
 - Kekakuan aksial dari tali tambat terpotong ($E A_{trunc}$)
2. Optimasi beban dinamis dengan menyesuaikan:
 - Massa (M_{trunc}) dan diameter (D_{trunc}) dari tali tambat terpotong

Pemotongan awal dibuat berdasarkan rasio kedalaman air. Ini sebagai masukan pada desain awal untuk langkah iterasi pertama untuk mengoptimalkan beban statis dari sistem tambat terpotong. Dalam proses ini kurva beban statis diperoleh dari langkah iterasi sebelumnya dibandingkan dengan kurva kedalaman penuh.

Dalam proses iterasi kedua pemotongan yang dihasilkan dapat lebih dioptimalkan untuk perilaku dinamis. Hal ini dilakukan dengan menerapkan input berupa simulasi osilasi pada berbagai frekuensi

gerakan pelampung tersebut. Respon linier untuk sistem yang dipotong dibandingkan dengan sistem pada kedalaman penuh. Untuk mendapatkan hasil optimal dilakukan penyesuaian pada masa tali tambat (M_{trunc}) dan diameter tali tambat (D_{trunc}).

Desain ulang sistem yang dipotong harus mendapatkan respon gerak sedekat mungkin respon gerak pada sistem kedalaman penuh.

Desain awal

Desain awal didasarkan pada konsep skala geometris dari bentuk tali tambat dan tetap menjaga bentuk *catenary* rantai bawah. Langkah-langkah berikut dilakukan pada desain awal :

1. Total panjang masing-masing tali tambat terpotong dibandingkan dengan total panjang tali tambat sebenarnya dihitung berdasarkan rasio antara kedalaman air terpotong dan kedalaman air kolam penuh. Sedangkan untuk pengujian di kolam uji maka harus disesuaikan dengan skala model (λ) yang merupakan rasio antara kedalaman air terpotong (WD_{total_trunc}) dan kedalaman kolam (WD_{basin})

$$\gamma = \frac{L_{total_trunc}}{L_{total_full}} = \frac{WD_{total_trunc}}{WD_{total_full}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{WD_{total_trunc}}{WD_{basin}} \quad (2)$$

Dimana :

L_{total_trunc} : panjang total tali tambat setelah dipendekkan

L_{total_full} : panjang total tali tambat sebelum dipendekkan

WD_{total_trunc} : kedalaman air yang dipendekkan

WD_{basin} : kedalaman air kolam pengujian

γ : faktor pemotongan/truncation

2. Pengurangan panjang tali tambat dilakukan pada masing-masing tali dan semua segmen, yaitu pada awalnya merupakan perkalian dengan faktor truncation.

$$L_{trunc} = \gamma \cdot L_{full} \quad (3)$$

Dimana :

L_{trunc} : panjang masing-masing tali tambat yang dipendekkan

L_{full} : panjang masing-masing tali tambat sebelum dipendekkan

3. Nilai EA tali tambat masing-masing segmen dihitung seperti seperti pada nomor 2, dengan pengertian bahwa ($k = EA / L$) diperoleh sebagai untuk panjang total tali tambat. Sehingga untuk perhitungan EA dengan faktor pengali yang sama,

$$EA_{trunc} = \gamma \cdot EA_{full} \quad (4)$$

Dimana :

E : modulus elastisitas bahan tali tambat

A : luas penampang tali tambat

4. Berat terendam dari tali tambat (W_{sub}) ekuivalen dihitung mengikuti pendekatan yang sama seperti untuk EA . Karena L panjang dikalikan oleh γ faktor, W_{sub} nilai dibagi dengan faktor yang sama.

$$W_{sub-trunc} = \frac{W_{sub-full}}{\gamma} \quad (5)$$

Dimana :

W_{sub} : berat terendam tali tambat

5. Parameter massa dan diameter tali tambat memiliki pengaruh pada perilaku dinamis dari tali tambat.

Optimasi beban statis

Pada bagian ini diberikan deskripsi dari optimasi beban statis untuk sistem dipotong. Optimasi beban statis dilakukan dengan cara memberikan *offset* linier dari pergerakan FLNG dalam hal ini sebagai pelampung, kemudian dilakukan perhitungan terhadap *pre-tension* yang terjadi. Hal ini dilakukan pada beberapa variasi besaran offset linier dan iterasi berdasarkan perubahan-perubahan pada parameter diatas sehingga diperoleh konvergensi yang signifikan. Berat terendam (W_{sub}) tali tambat menentukan bentuk tali tambat dalam kesetimbangan posisi. Berat terendam lebih besar menyebabkan efek yang lebih *catenary* dan kekakuan lebih tinggi.

Elastisitas tali tambat (EA) adalah penting ketika tali tambat sudah benar-benar tegang. Kekakuan yang lebih besar dari tali tambat menyebabkan kekakuan yang lebih besar pada bidang horizontal pergeseran yang lebih besar.

Parameter di atas dapat disesuaikan dalam suatu proses iteratif. Pertama, beban statis sistem tambat kedalaman penuh dan iterasi pertama beban statis sistem tambat terpotong dihitung. Hasil perhitungan beban statis dianalisis untuk kekakuan mereka dan faktor-faktor berikut diperoleh.

$$F_{wsub} = \frac{K_{l-trunc}}{K_{l-full}} \quad (5)$$

$$F_{AE} = \frac{K_{2-trunc}}{K_{2-full}} \quad (6)$$

Faktor untuk panjang rantai bawah diperoleh dari rata-rata offset untuk kedalaman penuh dan sistem terpotong sesuai dengan,

$$F_{L-bottom} = \frac{offset_{full}}{offset_{trunc}} \quad (7)$$

Dimana : F : faktor perbandingan masing-masing untuk berat terendam, elastisitas dan panjang tali tambat.

Akhirnya untuk melakukan langkah optimasi berikutnya (i +1) secara umum dapat rumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} W_{sub-i+1} &= F_{wsub} \cdot W_{sub-i} \\ M_{i+1} &= F_{wsub} \cdot M_i \\ EA_{i+1} &= F_{EA} \cdot EA_i \\ L_{bottom-i+1} &= F_{L-bottom} \cdot L_{bottom-i} \end{aligned} \quad (8)$$

Tabel 1. Ukuran Utama Tali Tambat

Water depth	[m]	572
Anchor radius	[m]	1572
Pretension	[kN]	1373.4
Pretension angle	[deg]	51
Length :		
Segmen 1	[m]	85
Segmen 2	[m]	785
Segmen 3	[m]	100
Segmen 4	[m]	120
Segmen 5	[m]	680
Wsub :		
Segmen 1	[kN/m]	2874.4
Segmen 2	[kN/m]	399.7
Segmen 3	[kN/m]	2249.4
Segmen 4	[kN/m]	11772
Segmen 5	[kN/m]	2249.4
Mass :		
Segmen 1	[kg/m]	336.8
Segmen 2	[kg/m]	51.4
Segmen 3	[kg/m]	263.6
Segmen 4	[kg/m]	1379.3
Segmen 5	[kg/m]	263.6
EA :		
Segmen 1	[kN]	1239600
Segmen 2	[kN]	829726
Segmen 3	[kN]	970044
Segmen 4	[kN]	1542170
Segmen 5	[kN]	970044

Tabel 2. Jenis Tali Tambat

Segmen 1	Rantai Atas
Segmen 2	Tali Baja
Segmen 3	Rantai Bawah
Segmen 4	Rantai Pemberat
Segmen 5	Rantai Pengikat

Optimasi beban dinamis

Pada optimasi beban dinamis untuk memudahkan dalam analisis digunakan beban dinamis berupa semacam gelombang reguler dengan tinggi dan frekuensi tertentu. Respon kekuatan tali tambat dapat dibandingkan untuk sistem kedalaman penuh dan dipotong. Untuk mendapatkan hasil optimum dari gerakan sistem tambat sesuai dengan sistem pada kedalaman penuh dapat dilakukan dengan penyesuaian pada berat ($W_{subtrunc}$) dan diameter (D_{trunc}) masing-masing tali tambat. Penyesuaian diameter dalam waktu yang bersamaan juga mempengaruhi berat tali tambat, sehingga perlu diperhatikan hubungan ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut hasil pemotongan disajikan untuk kasus tambat FLNG dengan *eksternal turret*. Sistem tambat terdiri dari 3 kelompok tali tambat masing-masing ada 4 tali tambat dan masing-masing kelompok terdistribusi dengan sudut 120 derajat dan masing-masing tali tambat pada kelompoknya 2 derajat, seperti terlihat pada gambar 1. Berdasarkan hasil desain untuk kedalaman penuh, data dapat dilihat pada Tabel 1. Tali tambat terdiri dari 5 segmen dengan material yang berbeda (lihat Tabel 2).

Penomoran tiap kelompok tali tambat berdasarkan arah sumbu positif x searah dengan FLNG dan sumbu y tegak lurus sumbu x, sumbu x membelah kelompok tali tambat ke 1 sehingga kelompok 1 memiliki nomor tali tambat 1,2,11 dan 12, kelompok 2 memiliki nomor tali tambat 3,4,5 dan 6, kelompok 3 memiliki nomor tali tambat 7,8,9 dan 10 (lihat gambar 1).

Jika telah ditetapkan skala model uji dengan besaran 1:70, sedangkan kedalaman air kolam uji 2,5 meter, maka berdasarkan persamaan (2) kedalaman *truncation* (WD_{trunc}) menjadi 175 meter. Dan menurut persamaan (1) faktor *truncation*/pemotongan menjadi 0,306. Iterasi telah dilakukan hingga 7 kali iterasi dengan beberapa trik penyesuaian pada besaran-besaran parameter yang sudah dijelaskan diatas.

Tabel 3. Ukuran Tali Tambat Truncation 05,06 dan 07

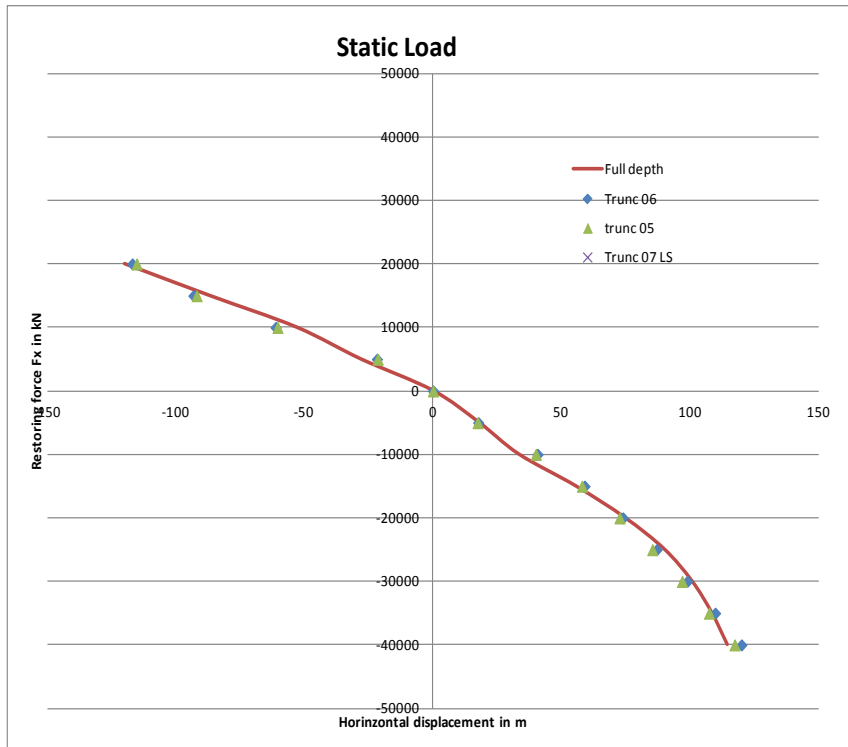
		Full depth	Truncation 05	Truncation 06	Truncation 7
Water depth	[m]	572	175	175	175
Anchor radius	[m]	1572	945,13	945,13	945,13
Pretension	[kN]	1373,4	1412,256	1417,287	1414,939
Pretension angle	[deg]	51	49,2	49,2	49,2
Length :					
Segmen 1	[m]	85	26	26	26
Segmen 2	[m]	785	240	240	240
Segmen 3	[m]	100	30,6	30,6	30,6
Segmen 4	[m]	120	36,7	36,7	36,7
Segmen 5	[m]	680	680	680	610
Segmen 6	[m]	0	0	0	70
Wsub :					
Segmen 1	[N/m]	2874,4	9393,5	9393,5	9393,5
Segmen 2	[N/m]	399,7	1306	1306	1306
Segmen 3	[N/m]	2249,4	7351	7351	7351
Segmen 4	[N/m]	11772	20000	20000	20000
Segmen 5	[N/m]	2249,4	2249,4	2249,4	2249,4
Segmen 6	[m]	0	0	0	2249
Mass :					
Segmen 1	[kg/m]	336,8	1103,5	1103,5	1103,5
Segmen 2	[kg/m]	51,4	153,4	153,4	153,4
Segmen 3	[kg/m]	263,6	863,6	863,6	863,6
Segmen 4	[kg/m]	1379,3	2349,6	2349,6	2349,6
Segmen 5	[kg/m]	263,6	264,3	264,3	264,3
Segmen 6	[m]	0	0	0,0	264,2
EA :					
Segmen 1	[kN]	1239600	1500000	90000000	1500000
Segmen 2	[kN]	829726	1500000	90000000	1500000
Segmen 3	[kN]	970044	1500000	90000000	1500000
Segmen 4	[kN]	1542170	1500000	90000000	1500000
Segmen 5	[kN]	970044	102110	95000	1500000
Segmen 6	[m]	0	0	0	10211

Dari ketujuh iterasi diperoleh hasil pada iterasi ke lima memiliki kemiripan dalam karakteristik sistem tali tambat. Ukuran sistem tali tambat pada iterasi ke lima besaran parameter dapat dilihat pada Tabel 3.

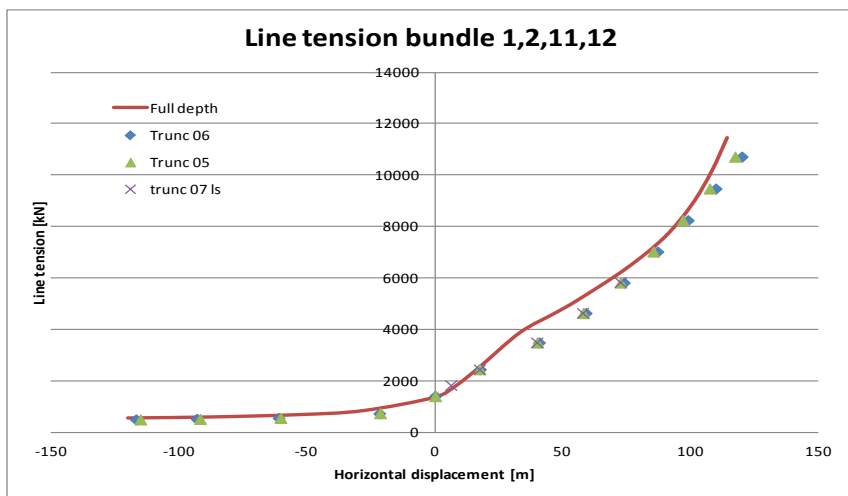
Fokus utama yang diperhatikan adalah adanya beban statis untuk tiga mode horisontal (surge, sway dan yaw). Jika diperhatikan grafik offset beban statik pada gambar 2, menunjukkan gambaran offset beban statik pada sistem tali tambat iterasi ke 5, 6 dan 7. Diantara ke tujuh iterasi yang telah dilakukan pada iterasi ke 5, 6 dan 7 mendapatkan hasil yang mendekati kondisi kedalaman penuh. Dari ketiga iterasi tersebut pada gambar 2, terlihat bahwa iterasi yang ke 5 menunjukkan harga yang paling mendekati dengan harga kondisi kedalaman penuh.

Berikutnya dilakukan pengecekan terhadap gaya yang bekerja pada masing-masing tali tambat. Terlihat pada gambar 3 bahwa pada perhitungan yang bersamaan pada offset statik load dihitung pula gaya yang bekerja pada masing-masing tali tambat.

Seperti pada sebelumnya bahwa ternyata harga yang paling mendekati untuk tali tambat no 1, 2, 11 dan 12 adalah gaya pada iterasi yang ke 5. Selanjutnya data-data yang digunakan dalam perhitungan numerik untuk beban dinamis adalah data yang digunakan pada iterasi ke 5. Untuk pembebanan dinamis diberikan gaya berupa gelombang reguler dengan tinggi (H) = 7,28 meter dan periode (T) = 10,74 detik dengan arah head sea.



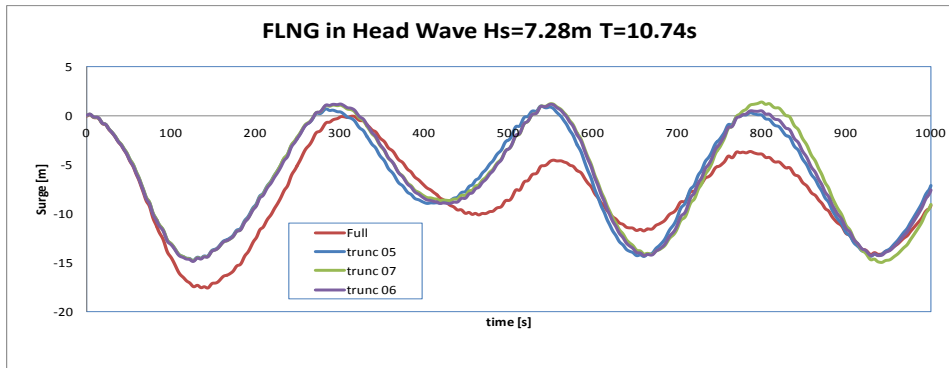
Gambar 2. Grafik Offset Static Load



Gambar 3. Grafik Gaya Statis pd Tali 1,2,11 dan 12

Hasil dari pembebanan dinamis dapat dilihat pada gambar 3 menunjukkan gerakan surge akibat gelombang head sea yang mengenai FLNG. Dari gambar 3 terlihat bahwa antara sistem tali tambat pada

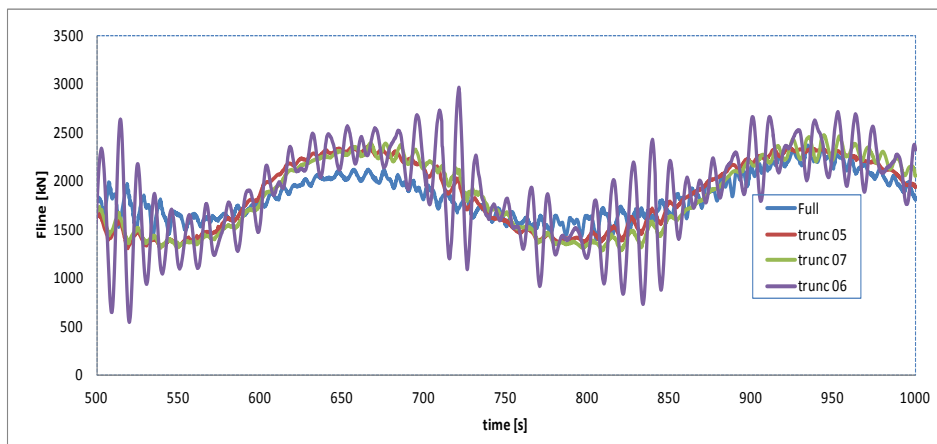
kedalaman penuh dan yang mengalami pemotongan mempunyai periode yang hampir sama dan besaran surge yang juga hampir sama.



Gambar 4. Grafik Gerakan Surge

Oleh karena itu iterasi ke 5 ini bisa dikatakan memiliki konvergensi positif terhadap sistem tambat kedalaman penuh. Respon gaya dinamis dari sistem tambat akibat gelombang reguler head sea dapat dilihat pada gambar 4. Gambar tersebut menunjukkan bahwa gaya dinamis

tali tambat pada iterasi ke 5 berimpit dengan gaya tali tambat pada kedalaman penuh. Hal ini menunjukkan bahwa *stiffness* (kekakuan) material yang digunakan pada tali tambat iterasi ke 5 mempunyai karakter yang serupa dengan tali tambat kedalaman penuh.



Gambar 5. Grafik Gaya Dinamis Tali Tambat

KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan diatas dapat diketahui bahwa karena skala pemotongan yang cukup besar maka memiliki kesulitan dalam mendapatkan harga optimum. Dan dari proses iterasi yang telah dilakukan bahwa iterasi ke 5 menunjukkan harga besaran sistem tali tambat terpotong yang mendekati harga besaran tali tambat kedalaman penuh. Jadi jika akan dilakukan pengujian model FLNG dengan perairan dalam skala 1:70 dapat menggunakan besaran sistem tali tambat pada iterasi ke 5. Namun sebelum dilakukan pengujian harus dilakukan validasi beban statis dan dibandingkan dengan hasil perhitungan numerik dan dilakukan

penyesuaian pada beberapa parameter, sehingga parameter gerakan seperti frekuensi pada masing gerakan akan sesuai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih saya ucapkan kepada pimpinan BPPT khususnya UPT BPPH yang telah memberi kesempatan untuk training ke MARIN, Senior Project Manager dari MARIN, Mr. Jaap de Wilde yang telah memberi bantuan dan evaluasi pada hasil perhitungan numerik. Juga kepada bagian komputasi MARIN, Mr. Arie de Wit yang telah memberikan bimbingan penggunaan program aNySIMPro.

DAFTAR PUSTAKA

- Argyros A, Langley Robin S, (2012), '*Efficient Truncation Scheme for Modeling Deepwater Mooring Lines*', Proceeding of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, China.
- C.T.Stansberg, Ormberg H, Oritsland O., (2002), '*Challenges in Deepwater Experiment : Hybrid Approach* ', MARINTEK, Norway.
- C.T.Stansberg, S.I. Carlsen, E.G Ward, J.E.W. Wichers, M.B. Irani, (2004), '*Model Testing for Ultradeep Waters*', OTC 16587, Houston.
- Fan Tianhui,Qiao Dongsheng,Jinping O,(2014), '*Dynamic Effects of Equivalent Truncated Mooring System for a Semi-Submersible Platform*, Brodgradnja Shipbuilding.
- Ferreira F.M.G, Lages E.N., Afonso S.M.B, (2015), '*Design Optimization of Equivalent mooring system on truncated depth* ', Engineering Optimization IV, Taylor and francis group, London.
- Fylling I.J.,C.T. Stanberg, (2015), '*Model Testing of Deepwater Floating Production System : Strategy of Truncation of Moorings and Risers*',MARINTEK, Norway.
- ITTC 7.5-02-07-03.5, (2008), '*Testing and Extrapolation Method Loads and Responses, OceanEngineering, Truncations of Test Models and Integration with Numerical Methode* '.
- Ji Chunyan,Xu Sheng, (2014), '*Verification of Hybrid Model Test Method for Deepwater Floating System with Large Truncation Factor*',Ocean Engineering, Elsevier.
- Waals Olaf J., van Dijk Radboud R.T., (2004), '*Truncation Methods for Deep Water Mooring Systems for a catenary moored FPSO and a Semi Taut Moored Semi Submersible*', DOT Conference, New Orleans.
- Wang Hong-wei, Luo Yong, Hu Kai-ye, Li Teng-teng (2010), '*Mooring Truncation Design of Deep Water SPAR*', Journal of Marine Science and Application., Harbin Engineering University, China.
- Wang Hong-wei,Lou Young,Xiaoming Cheng,Yumin su, (2010), '*Research on Model Test Technology of a Deepwater Internal Turret FPSO*', Proceeding of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing,China.