

ANALISIS SISTEM *MOORING* PADA PIPELAY BARGE DALAM KEGIATAN INSTALASI PIPA BAWAH LAUT

Anggraeni Eka Putri¹ dan Krisnaldi Idris²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,

Jl. Ganeca 10 Bandung 40132

¹anggraeni.eka@hotmail.com dan ²krisnaldi@ocean.itb.ac.id

Abstrak

Sebuah struktur terapung perlu diketahui kestabilannya saat dilakukan kegiatan di laut. Struktur akan secara berkala dihantam oleh gaya-gaya lingkungan yaitu gaya gelombang, arus, dan angin, sehingga dapat terjadi pergerakan struktur dari tempatnya. Stabilitas struktur terapung dapat dipertahankan dengan memasang sistem penyangga, Sistem penyangga yang umum digunakan adalah sistem *mooring*. Sistem *mooring* yang digunakan perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk dapat menjaga stabilitas struktur terapung. Analisis yang dilakukan adalah mengenai respon pergerakan kapal, yaitu *Response Amplitude Operator* (RAO), nilai gaya tarik efektif pada tiap-tiap tali *mooring*, serta perpindahan kapal setelah dipasang tali *mooring* yang dipengaruhi oleh beban lingkungan. Nilai dari gaya tarik efektif dan perpindahan kapal kemudian dibandingkan dengan kriteria desain yang mengacu pada kode API RP 2SK dan DNV OS E301. Dari hasil pemodelan yang telah dilakukan dengan menggunakan beban lingkungan gelombang reguler dan irregular didapatkan perpindahan struktur dan nilai tegangan efektif pada tiap-tiap tali *mooring* tidak ada yang melebihi kriteria desain sehingga dapat disimpulkan bahwa konfigurasi *mooring* yang dilakukan sudah baik.

Kata kunci: *mooring, response amplitude operator, effective tension, vessel excursion*

PENDAHULUAN

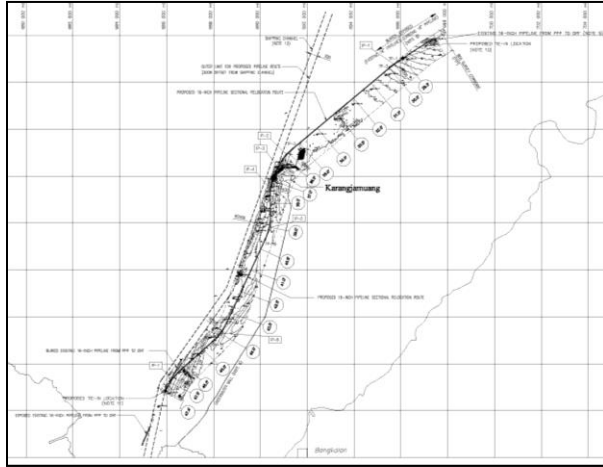
Sebuah struktur terapung perlu diketahui kestabilannya saat dilakukan kegiatan di laut. Struktur akan secara berkala dihantam oleh gaya-gaya lingkungan yaitu gaya gelombang, arus, dan angin, sehingga dapat terjadi pergerakan struktur dari tempatnya. Kestabilan struktur terapung dapat dipertahankan dengan memasang sistem penyangga, sehingga diperlukan analisis tersendiri pada sistem penyangga tersebut.

Dalam penelitian tugas akhir ini, dilakukan analisis pada sistem *mooring* sebagai sistem penyangga pada kapal tongkang (*Pipelay Barge*) yang digunakan dalam kegiatan

relokasi pipa bawah laut di daerah Selat Madura, Jawa Timur. Relokasi pipa dilakukan karena letak pipa *existing* mengganggu alur pelayaran APBS (Alur Pelayaran Barat Surabaya). Pipa bawah laut ini digunakan sebagai pipa penyalur dari lapangan produksi lepas pantai (*Process Platform*) menuju fasilitas penyimpanan di darat (*Onshore Receiving Facility*).

Analisis dilakukan pada empat kasus, yakni saat kegiatan inisiasi pipa (*Initiation Stage*), saat kegiatan pemasangan normal (*Normal Lay*) di dua kedalaman perairan yang berbeda, serta saat kegiatan terminasi (*Laydown/Termination*) pipa. Analisis tersebut dilakukan untuk mengetahui nilai dari gaya

tarik efektif pada tiap-tiap tali *mooring* yang terpasang pada kapal serta mengetahui besar perpindahan dari kapal.



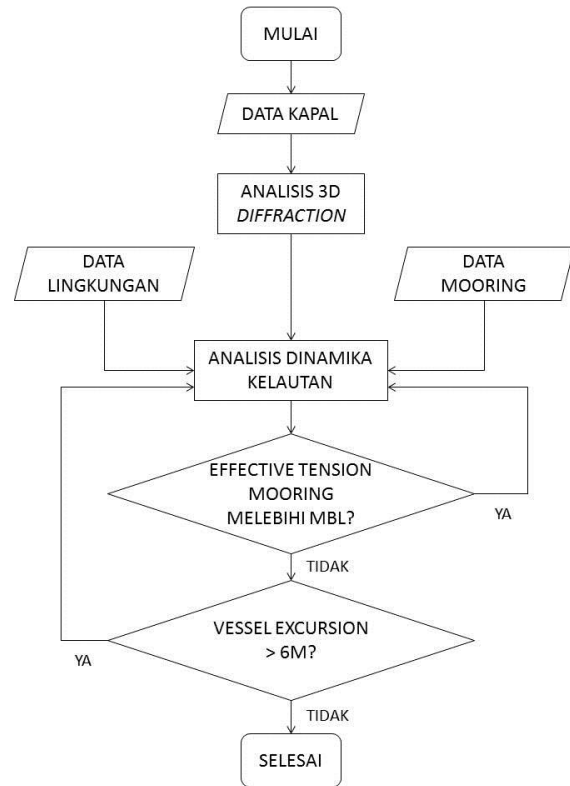
Gambar 1 Lokasi pekerjaan relokasi pipa yang ditinjau

Tujuan dilakukannya penelitian Tugas Akhir ini adalah untuk:

1. Mengetahui kestabilan *pipelay barge*
2. Menganalisis respon gerak *pipelay barge* akibat gaya lingkungan
3. Menganalisis sistem *mooring* yang ditambatkan pada *pipelay barge*
4. Menganalisis pergerakan *pipelay barge* setelah dipasang sistem *mooring*

TEORI DAN METODOLOGI

Secara umum, metodologi analisis yang dilakukan dapat dilihat dalam flowchart (**Gambar 2**).



Gambar 2 Flowchart analisis sistem *mooring* yang dilakukan pada penelitian

Setiap struktur yang terdapat di laut akan dipengaruhi oleh gelombang. Respon dari struktur tersebut akibat adanya gelombang dapat ditentukan dengan menganalisa struktur berdasarkan sudut pandang hidrodinamika.

Menurut Faltinsen³, respon struktur terapung terdiri dari resultan gaya-gaya yang bekerja pada struktur, yaitu gaya apung dan gaya luar. Gaya luar terdiri dari gaya eksitasi dan gaya radiasi. Sehingga persamaan gerak struktur terapung dapat ditulis:

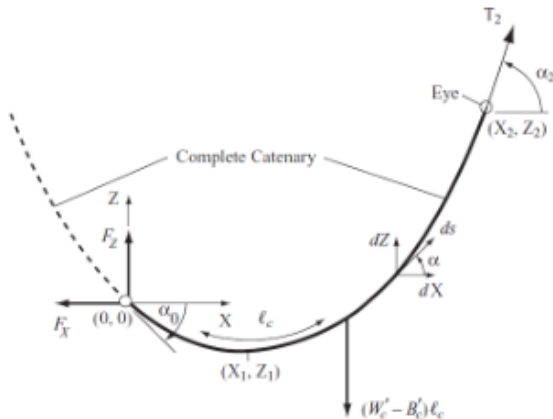
$$F_{Wj} + F_{Rj} + F_{Hsj} = M\ddot{X} \quad ..(1)$$

$$\int \rho \frac{\partial \phi_I}{\partial t} X_j ds + \int \rho \frac{\partial \phi_D}{\partial t} X_j ds + \int \rho \frac{\partial \phi_R}{\partial t} X_j ds - CX = M\ddot{X} \quad ..(2)$$

Dengan menjabarkan gaya radiasi yang terdiri dari koefisien massa tambah (*added mass*) dan koefisien redaman (*damping*), maka persamaan 2 dapat ditulis menjadi:

$$\sum_{k=1}^{\theta} \{ (M_{jk} + A_{jk}) \ddot{X}_k + B_{jk} \dot{X}_k + C_{jk} X_k \} = F_j e^{i\omega t} \quad ..(3)$$

Sedangkan perhitungan sistem *mooring* dilakukan dengan menggunakan persamaan *catenary*, karena dalam kasus ini adalah *slack/catenary mooring*. Menurut McCormick⁴, *slack mooring* adalah sistem mooring dimana gaya tarik yang terjadi pada tali mooring dipengaruhi oleh berat terendam dari tali mooring. Pada sistem *slack mooring* ini, berat terendam dari garis mooring tidak sama dengan nol sehingga mooring tidak memiliki garis lurus melainkan berbentuk garis melengkung (*catenary*). Bentuk *catenary* mengikuti bentuk dari kurva cosinus hyperbolic. Ilustrasi gaya tarik yang terjadi pada garis mooring dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Ilustrasi gaya tarik yang terjadi pada tali untuk sistem *slack mooring* (McCormick, 2010)

Pada **Gambar 4** dapat ditentukan bahwa nilai kekakuan efektif horizontal dari *slack mooring* dapat dituliskan dalam persamaan:

$$K_{sX} = \frac{dF_x}{dX_2} = \frac{F_x^2 \sinh\left(\frac{W_c}{F_x} X_2\right)}{F_x X_2 \sinh\left(\frac{W_c}{F_x} X_2\right) - W_c (l_c^2 - Z_2^2)} \quad ..(4)$$

Sehingga nilai dari gaya tarik pada tiap titik tinjau adalah:

$$T = F_x \frac{dS}{dX} = \frac{F_x}{\cos(\alpha)} = F_x \cosh\left[\frac{W_c}{F_x} (X - X_1)\right] \quad ..(5)$$

DASAR DESAIN DAN PEMODELAN

Struktur terapung yang digunakan adalah jenis *Pipelay Barge* dengan nama “Ombak Biru Satu”. Data dimensi dan peralatan teknis yang berada diatas *barge* dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Data *Pipelay Barge* Ombak Biru Satu

	NILAI	UNIT
Panjang Barge	76.81	m
Lebar Barge (LoA)	24.38	m
Tinggi Barge	4.88	m
Draft	3.00	m
Trim	0.00	deg
Jumlah Tensioner	1	-
Kapasitas Tensioner	60.00	MT

Sedangkan karakteristik dari sistem mooring yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Data Sistem Mooring

Tipe Mooring	6x37 Wire (IWRC)
Nominal Diameter Tali Mooring	0.032 m
Minimum Breaking Load (MBL)	66 MT
Tipe jangkar	4 MT Flipper Delta

Mooring akan dipasang dengan metode *Spread Mooring* dengan tipe *Catenary* pada tiap-tiap tali *mooring*. Ada 8 tali *mooring* yang dipasang dengan 4 pola pemasangan jangkar (*anchor pattern*) yang berbeda pada tiap kedalaman.

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan dua beban lingkungan yang berbeda, yaitu menggunakan gelombang reguler dengan teori gelombang Stoke's 5th dan gelombang acak dengan spektrum JONSWAP. Beban gelombang yang digunakan memiliki nilai tinggi gelombang signifikan (H_s) 2.62 m dan perioda gelombang (T_p) 7.7 s.

Sedangkan untuk arus yang digunakan memiliki faktor kecepatan seperti pada **Tabel 3**. Kondisi arah arus dan gelombang yang dimodelkan adalah kolinier.

Tabel 3 Faktor kecepatan arus

Kecepatan Arus		
Kedalaman Perairan 0%	m/s	1.07
Kedalaman Perairan 10%		1.01
Kedalaman Perairan 20%		0.96
Kedalaman Perairan 30%		0.91
Kedalaman Perairan 40%		0.88
Kedalaman Perairan 50%		0.82
Kedalaman Perairan 60%		0.76
Kedalaman Perairan 70%		0.73
Kedalaman Perairan 80%		0.67
Kedalaman Perairan 90%		0.64
Kedalaman Perairan 100%		0.58

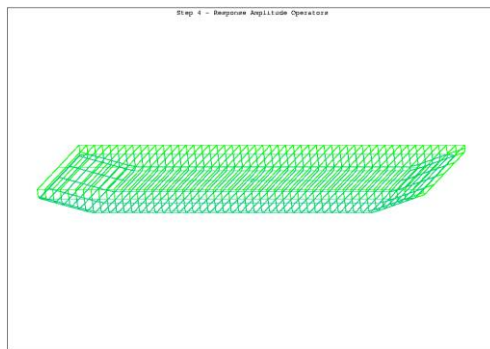
Terdapat 4 kondisi dalam analisis yang dilakukan, yaitu pada tahap instalasi (KP 47.4'), pada tahap *normal lay* (KP 32' dan KP 37'), dan pada tahap *laydown* (KP 29.0'). Perbedaan dari masing-masing kondisi adalah kedalaman perairannya. Kedalaman perairan dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4 Data Kedalaman Perairan

TAHAP	UNIT	NILAI
Inisiasi (KP 47.4')	M	12.9
<i>Normal Lay</i> (KP 32 – Karang Jamuang)	M	5.5

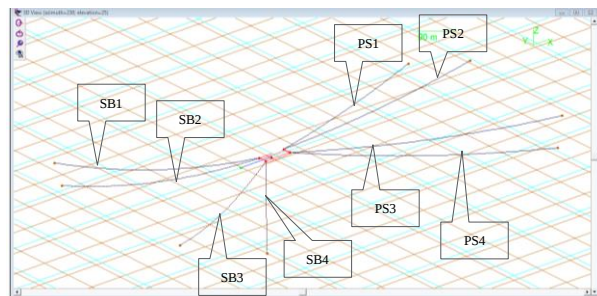
<i>Normal Lay</i> (KP 37)	M	6.0
<i>Laydown</i> (KP 29.0°)	M	13.1

Analisis sistem mooring dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah melakukan analisis 3D *Diffraction* untuk mendapatkan respon gerak kapal/*barge*. Pemodelan struktur terapung yang dilakukan dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5 Hasil pemodelan struktur terapung pada model *meshing*

Tahap kedua adalah melakukan analisis domain waktu menggunakan perangkat lunak dinamika kelautan untuk mendapatkan nilai tegangan efektif pada masing-masing tali mooring dan perpindahan kapal/*barge*. Pemodelan struktur terapung dan sistem *mooring* yang dimodelkan dapat dilihat pada **Gambar 6**.



Gambar 6 Pemodelan *mooring* untuk analisis hidrodinamika

Nilai tegangan efektif dan perpindahan struktur yang didapat kemudian dibandingkan dengan kriteria desain yang mengacu pada API RP 2SK dan DNV RP E301 (**Tabel 5**)

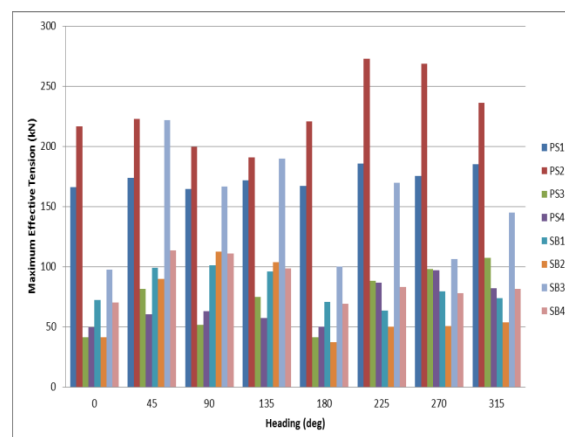
Tabel 5 Kriteria desain yang digunakan

KRITERIA	SAFETY FACTOR	NILAI YANG DIIZINKAN	KETERANGAN
Kriteria 1 <u>Minimum Breaking Load</u> Wire rope Ø 32 mm	1.67	39.6 MT	Mengacu kepada API RP 2SK, dimana pada kondisi “All Line Intact”
Kriteria 2 <u>Maximum Vessel Excursion</u>	-	6 m	

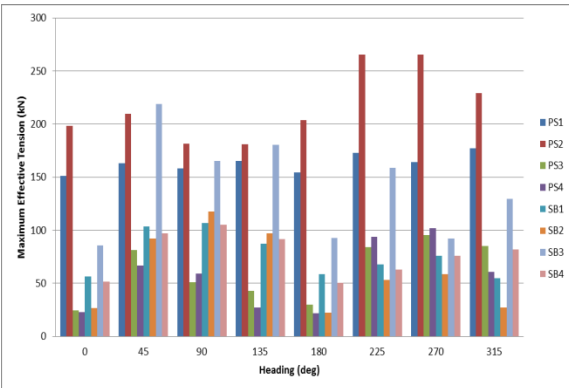
HASIL DAN ANALISIS

Simulasi dengan Gelombang Reguler

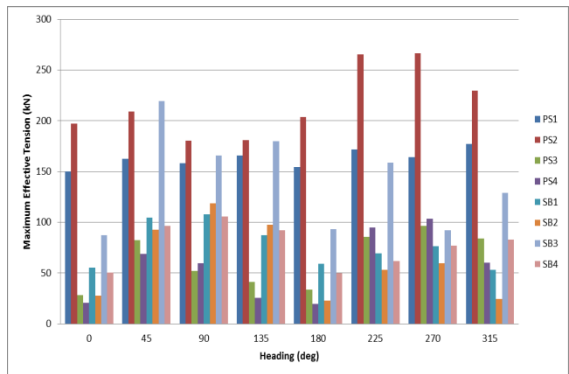
Pada **Gambar 6** sampai **Gambar 9** ditampilkan grafik nilai tegangan efektif yang didapat dari hasil pemodelan menggunakan gelombang reguler (Stoke’s 5th) untuk tiap tali mooring dan dari 8 arah datang gelombang yang berbeda.



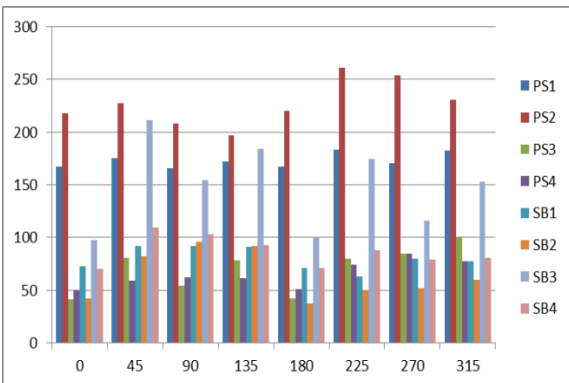
Gambar 6 Grafik tegangan efektif *mooring* pada KP 49.4'



Gambar 7 Grafik tegangan efektif *mooring* pada KP 37'



Gambar 8 Grafik tegangan efektif *mooring* pada KP 32'



Gambar 9 Grafik tegangan efektif *mooring* pada KP 29'

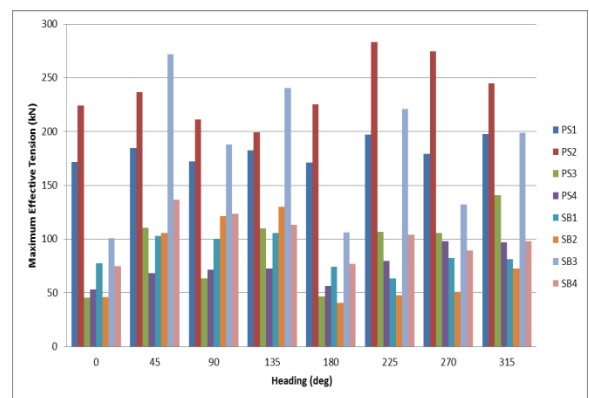
Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan efektif pada tali *mooring* untuk seluruh kondisi kedalaman, dengan menggunakan simulasi gelombang reguler,

memiliki nilai maksimum pada *mooring* PS2 dengan nilai 272.54 kN. Dengan mengikuti acuan API RP 2SK untuk keadaan *mooring intact*, nilai *allowable* dari gaya tarik efektif adalah sebesar 60% MBL, atau sebesar 389.14 kN, maka *mooring* masih berada dalam kriteria aman.

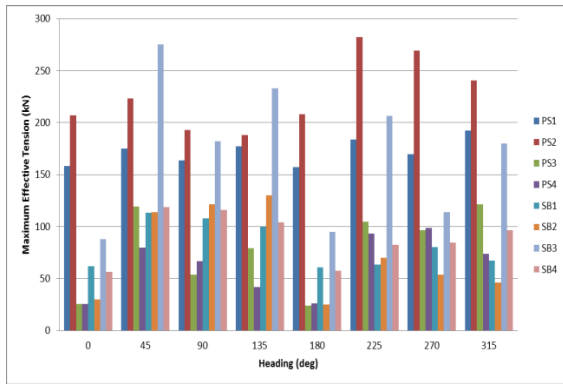
Hasil pemodelan menunjukkan bahwa perpindahan maksimum yang terjadi pada struktur terapung adalah sebesar 1.267 m pada arah sumbu-x (*surge*) dan sebesar 3.818 m pada arah sumbu-y (*sway*). Perpindahan tersebut masih dibawah nilai kriteria desain, yaitu 6 m, sehingga dengan konfigurasi *mooring* yang digunakan perpindahan kapal masih berada dalam batas aman.

Simulasi dengan Gelombang Irregular

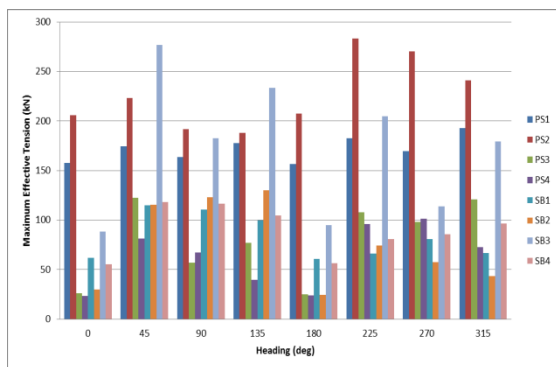
Pada **Gambar 10** sampai **Gambar 13** ditampilkan grafik nilai tegangan efektif yang didapat dari hasil pemodelan menggunakan gelombang reguler (JONSWAP) untuk tiap tali *mooring* dan dari 8 arah datang gelombang yang berbeda.



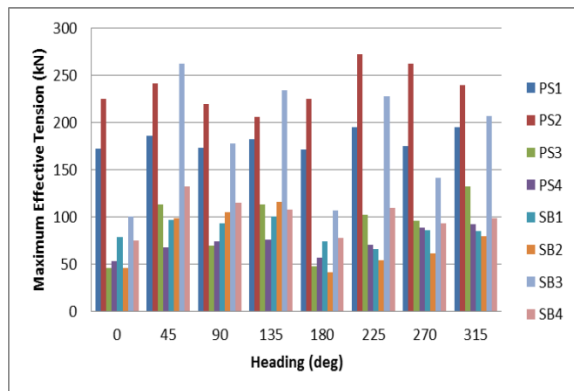
Gambar 10 Grafik tegangan efektif *mooring* pada KP 49.4'



Gambar 11 Grafik tegangan efektif *mooring* pada KP 37'



Gambar 12 Grafik tegangan efektif *mooring* pada KP 32'



Gambar 13 Grafik tegangan efektif *mooring* pada KP 29'

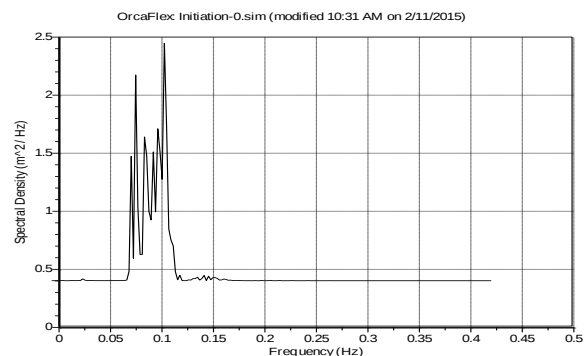
Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan efektif pada tali *mooring* untuk seluruh kondisi kedalaman, dengan menggunakan simulasi gelombang reguler, memiliki nilai maksimum pada *mooring* PS2

dengan nilai 283.51 kN. Dengan mengikuti acuan API RP 2SK untuk keadaan *mooring intact*, nilai *allowable* dari gaya tarik efektif adalah sebesar 60% MBL, atau sebesar 389.14 kN, maka *mooring* masih berada dalam kriteria aman.

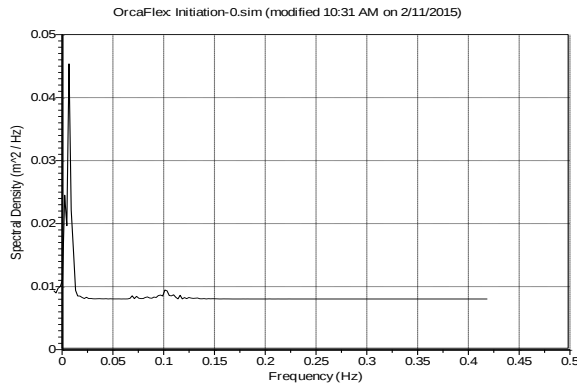
Hasil pemodelan menunjukkan bahwa perpindahan maksimum yang terjadi pada struktur terapung adalah sebesar 1.5 m pada arah sumbu-x (*surge*) dan sebesar 3.694 m pada arah sumbu-y (*sway*). Perpindahan tersebut masih dibawah nilai kriteria desain, yaitu 6 m, sehingga dengan konfigurasi *mooring* yang digunakan perpindahan kapal masih berada dalam batas aman.

Analisis Domain Frekuensi

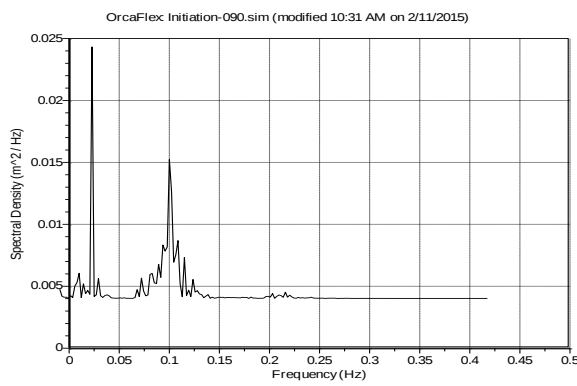
Pada **Gambar 14** sampai **Gambar 17** ditampilkan spektrum kerapatan perpindahan struktur terapung arah X dan Y untuk arah datang gelombang 0^0 dan 90^0 .



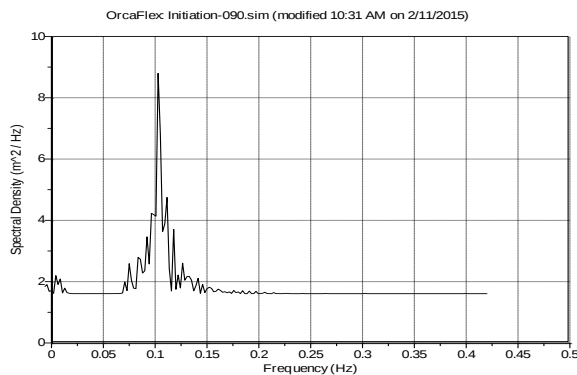
Gambar 14 Spektrum kerapatan perpindahan struktur arah X dengan arah datang gelombang 0^0



Gambar 15 Spektrum kerapatan perpindahan struktur arah Y dengan arah datang gelombang 0^0



Gambar 16 Spektrum kerapatan perpindahan struktur arah X dengan arah datang gelombang 90^0



Gambar 17 Spektrum kerapatan perpindahan struktur arah Y dengan arah datang gelombang 90^0

Untuk gelombang dengan arah datang 0^0 , perpindahan struktur arah X menunjukkan adanya puncak pada spektrum kerapatan. Puncak ini memiliki nilai frekuensi 0.13 Hz. Nilai ini memiliki nilai yang sama dengan nilai frekuensi gelombang yang digunakan

($T_p=7.7$ s). Sehingga dapat disimpulkan bahwa perpindahan struktur arah X dengan arah datang gelombang 0^0 dipengaruhi oleh beban gelombang.

Untuk perpindahan struktur arah Y dengan arah datang gelombang 0^0 , terdapat dua puncak pada spektrum kerapatan. Nilai frekuensi pada puncak yang pertama sama dengan nilai frekuensi natural struktur, dimana nilai puncak kedua meski lebih kecil berada pada frekuensi yang sama dengan frekuensi gelombang. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pergerakan struktur dipengaruhi lebih besar oleh frekuensi natural struktur dibanding oleh beban lingkungan.

Pada perpindahan struktur arah X dengan arah datang gelombang 90^0 , terdapat dua puncak pada spektrum kerapatan. Nilai frekuensi pada puncak yang pertama sama dengan nilai frekuensi natural struktur, dimana nilai puncak kedua meski lebih kecil berada pada frekuensi yang sama dengan frekuensi gelombang. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pergerakan struktur dipengaruhi lebih besar oleh frekuensi natural struktur dibanding oleh beban lingkungan.

Untuk perpindahan struktur arah Y dengan arah datang gelombang 90^0 , menunjukkan adanya dua puncak pada spektrum kerapatan. Dua puncak memiliki dua buah frekuensi yang berbeda. Puncak yang pertama meski lebih kecil memiliki nilai frekuensi sebesar 0.0384 Hz. Frekuensi ini memiliki nilai yang serupa dengan nilai frekuensi natural struktur.. Untuk puncak yang kedua memiliki nilai frekuensi 0.13 Hz. Nilai ini memiliki nilai yang sama dengan nilai frekuensi gelombang yang digunakan ($T_p=7.7$ s). Sehingga dapat

disimpulkan bahwa nilai frekuensi yang diperoleh dari puncak yang kedua adalah frekuensi beban gelombang. Maka pergerakan struktur arah Y dengan arah datang gelombang 90^0 lebih besar dipengaruhi oleh beban akibat gelombang.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dapat disimpulkan bahwa pemodelan pada kondisi statik dan dinamik dengan gelombang reguler dan irregular menunjukkan bahwa perpindahan struktur terbesar terjadi di perairan yang lebih dangkal. Sedangkan nilai gaya tarik efektif yang terjadi pada *mooring* memiliki nilai terbesar pada kondisi perairan yang lebih dalam.

Pemodelan dengan kondisi gelombang irregular menghasilkan nilai perpindahan dan gaya tarik efektif pada tali *mooring* lebih besar dibandingkan dengan kondisi gelombang reguler. Maka untuk mendapatkan hasil yang lebih ideal (mendekati kenyataan di lapangan) sebaiknya digunakan pemodelan dengan kondisi gelombang irregular saja.

Nilai perpindahan struktur dan gaya tarik efektif maksimal yang terjadi pada struktur setelah pemodelan dinamik masih berada

dalam kriteria desain, sehingga konfigurasi *mooring* yang digunakan dianggap sudah sesuai.

Hal-hal yang dapat diteliti lebih lanjut untuk penelitian berikutnya adalah:

1. Menganalisis sistem *mooring* untuk kondisi *damaged* (satu *mooring* putus)
2. Menganalisis sistem *mooring* untuk kondisi arus dengan dua arah datang yang berbeda
3. Menganalisis sistem *mooring* dengan kondisi lingkungan yang tidak kolinear

DAFTAR PUSTAKA

³ Faltinsen, O.M. 1990. *Sea Loads On Ships and Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press

⁴McCormick, Michael E. 2010. *Ocean Engineering Mechanics with Applications*. Cambridge: Cambridge University Press