



PENGARUH KONFIGURASI SUDUT SEBAR DAN PANJANG TALI TERHADAP KINERJA SISTEM TAMBAT KAPAL ISAP PRODUKSI TIMAH

The Effect of Spread Angle Configuration and Wire Rope Length on The Performance of The Mooring System of Tin Production and Suction Vessel

Arief Syarifuddin^{1,a}, Erdina Arianti², Rosi Dwi Yulfani², Fariz Maulana Noor², Anauta Lungiding Angga Risdianto¹, dan M. Mustain¹

¹Politeknik Negeri Madura, Jalan Raya Camplong Km. 4, Taddan, Camplong, Sampang, Jawa Timur, Indonesia

²Balai Teknologi Hidrodinamika, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, Jl. Hidrodinamika BPPT, Surabaya, Indonesia

e-mail: ^aariefsyarifuddin05@gmail.com

Diterima: 28 Oktober 2021; Direvisi: 30 November 2021; Disetujui: 06 Desember 2021

Abstrak

Kinerja sistem tambat Kapal Isap Produksi (KIP) timah sangat dipengaruhi oleh *tension* dari tali tambat dan *offset* yang dialami oleh struktur. Analisis pada sistem tambat untuk penelitian ini dilakukan dengan variasi sudut sebar tali tambat (30°, 45°, dan 60°) dan variasi panjang tali yaitu dengan diperpendek 0,2 m dan diperpanjang 0,2 m. Hasil yang diperoleh dari analisis yang dilakukan adalah respons gerak dari KIP timah dalam gerakan vertikal dan horizontal sudah cukup bagus. Variasi sudut sebar tali 30° menghasilkan *tension* maksimum paling baik, dengan *tension* maksimum sebesar 451,35 kN akibat arah pembebanan 90° di *fairlead*. Pada variasi panjang tali, adanya penambahan panjang 0,2 m, sudut sebar 30°, arah pembebanan 90° di *fairlead* merupakan yang terbaik dengan *tension* maksimum sebesar 449,30 kN. *Tension* maksimum yang dihasilkan masih dalam batas yang diizinkan API RP 2SK. *Offset* maksimum yang dihasilkan juga masih dalam batas aman yang diizinkan oleh API RP 16Q, dengan *offset* sumbu x terbesar 0,228 m akibat arah pembebanan 135° dan sumbu y sebesar 0,566 m akibat arah pembebanan 90°.

Kata kunci: kapal isap produksi timah; sistem tambat; *tension*; *offset*

Abstract

The performance of mooring system in the tin production and suction vessel is greatly influenced by the tension of mooring and offset by the structure. Analysis of the mooring system for this study was carried out with variations in the angle of spread mooring (30°, 45°, and 60°) and variations in the length of the rope, which is shortened by 0,2 m and extended by 0,2 m. The results obtained from the analysis carried out are that the motion response of the tin production and suction vessel in vertical and horizontal movements is quite good. The variation of the 30° rope spread angle produces the best maximum tension, with a maximum tension of 451,35 kN due to the heading 90° on the fairlead. The variation of the length of the rope, the addition of 0,2 m in length, the spread angle of 30°, is the best with a maximum tension of 449,30 kN due to heading 90° on the fairlead. The maximum tension generated is still within the allowable limits of API RP 2SK. The maximum offset produced is also still within the safe limits allowed by API RP 16Q, with the largest x axis offset of 0,228 m due to heading 135° and the y axis offset of 0,566 m due to heading 90°.

Keywords: *The tin production and suction vessel; mooring system; tension; offset*

PENDAHULUAN

Timah merupakan Sumber Daya Alam (SDA) yang ketersediannya begitu melimpah di Indonesia. Data yang ada kandungan timah di Indonesia menempati urutan kedua setelah China. Potensi timah di Indonesia sekitar 99% berada di Kepulauan Bangka Belitung, dan sisanya tersebar di wilayah Riau, Kepulauan Riau dan Kalimantan Barat. Total sumber daya timah Indonesia dalam bentuk bijih sebesar 483.785.508 ton dan logam 1.062.903 ton, sedangkan cadangan timah Indonesia dalam bentuk bijih sebesar 1.592.208.743 ton dan logam 572.349 ton (Supriadi, et al., 2016).



Gambar 1. Kapal Isap Produksi (KIP) timah yang beroperasi di perairan Bangka (Agustinus, 2018)

Kegiatan usaha eksplorasi timah di Indonesia dilakukan oleh Badan Usaha Milik Negara (BUMN) PT. Timah, Tbk. PT. Timah, Tbk. telah memegang area izin pertambangan sebesar 331.580 ha di daratan dan 184.400 ha di laut (Yulianti, et al., 2020). Area eksplorasi timah di lautan yang cukup luas, mendorong PT. Timah, Tbk. membuat sarana penunjang eksplorasi timah di lautan yang dengan membangun 11 unit Kapal Keruk (KK) dan 10 unit Kapal Isap Produksi (KIP). KIP merupakan salah satu unit peralatan tambang yang pengambilan bahan galiannya menggunakan *cutter* dan pipa isap yang akan menghisap lapisan timah dari dasar lautan serta dilengkapi dengan instalasi pencucian (Widhaputra, et al., 2014), seperti yang terlihat pada Gambar 1. KIP timah dalam proses penggunaannya dilengkapi dengan sistem tambat. Peranan sistem tambat adalah untuk mengatasi gerakan yang terjadi pada saat struktur terapung mengalami eksitasi beban

lingkungan, sehingga proses operasinya akan dapat terus dilakukan dengan aman (Arianti, 2018). Oleh karena itu sistem tambat inilah yang berfungsi untuk membatasi pergerakan dari KIP sehingga alat hisap yang digunakan (*bore hole mining*) tidak mengalami patah.

Pentingnya analisis untuk sistem tambat struktur apung juga didukung dengan beberapa fakta yang ada di lapangan, seperti warta berita berikut ini: tongkang bermuatan batu bara di kabupaten Tanah Laut menabrak kapal nelayan dikarenakan tali tambat putus ketika cuaca buruk (Rahman, 2017); *pontoon* di Nunukan, Kalimantan Utara, menghantam *tug boat* dikarenakan tali tambat putus (Sukoco, 2016); Sebelum KIP 10 tenggelam, kapal itu tengah melakukan upaya menarik KIP 18 yang *ladder*-nya tersangkut di laut. Namun saat melakukan penarikan, tali penarik putus sehingga mengakibatkan KIP 10 kehilangan keseimbangan lalu terbalik dan tenggelam. Hal itu diperburuk oleh cuaca yang sedang tidak bersahabat pada saat itu. Arus laut saat itu diketahui cukup deras (Maulana, 2019). Beberapa kejadian tersebut menunjukkan bahwa tali tambat untuk struktur apung merupakan komponen yang penting, sehingga dalam penentuan dimensi utama, konfigurasi, dan kekuatan tali tambat harus memenuhi standar/aturan yang ada.

Beberapa penelitian terkait dengan KIP timah telah dibuat dengan topik pembahasan terkait dengan stabilitas KIP. Berikut ini adalah beberapa penelitian yang membahas terkait KIP timah:

1. Hasil kajian studi kelayakan terhadap *conceptual design* kapal hisap tambang pada analisa stabilitas didapatkan hasil bahwa desain kapal isap tambang tidak memenuhi kriteria yang dipersyaratkan oleh IMO, yaitu pada klausul 3.1.2.3 dengan nilai hasil perhitungan masih dibawah batas minimum yang dipersyaratkan sebesar 25° pada berbagai *loading conditions* (Mujahid & Priohutomo, 2018);
2. Hasil kajian yang dilakukan pada variasi titik berat vertikal (VCG) terhadap ketentuan stabilitas kapal menurut kriteria dari IMO maka dapat disimpulkan bahwa VCG maksimum Kapal *Barge* Penambang

Timah dalam rancangan desain ini adalah 3,75 m dengan margin faktor keamanan 1,82% untuk klausul IMO A.749 (18) Ch.3. 3.123. Namun rekomendasi yang diberikan untuk nilai VCG maksimum atau titik berat vertikal kapal saat *displacement full load* 3025 ton dengan margin faktor keamanan 3,64% untuk klausul IMO A 749 (18) Ch.3. 3.123 adalah maksimal pada VCG 3,5 m (Mujahid, 2019).

Berdasarkan pada kedua penelitian di atas diketahui bahwa kajian ilmiah untuk KIP masih dalam konteks stabilitas kapal, belum memasuki analisis untuk sistem tambat. Analisis untuk sistem tambat didasarkan kepada standar API RP 2SK dan API RP 16Q. Analisis untuk sistem tambat pada KIP dilakukan secara numeris dengan bantuan perangkat lunak berbasis domain frekuensi dan waktu.

METODE

Data Kapal Isap Produksi (KIP) Timah

Tabel 1. Dimensi utama KIP Timah

Item	Satuan	Nilai
<i>Displacement</i>	ton	1.780
LoA	m	69,4
LWL	m	68,4
B	m	20,0
H	m	5,0
T	m	2,1
<i>Volume</i>	m ³	1.779,716
WSA	m ²	1.410,930
<i>Water density</i>	ton/m ³	1.025

Tabel 2. Data lingkungan perairan Bangka

Item	Satuan	Nilai
Tinggi gelombang (H_s)	m	1,5
Kecepatan angin	knot	7,0
Kecepatan arus	knot	1,5
Kedalaman	m	11,0

Data KIP Timah yang digunakan diperoleh dari jurnal yang ditulis oleh (Mujahid & Priohutomo, 2018), seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Data lingkungan yang meliputi tinggi gelombang, kecepatan angin, dan kecepatan arus diperoleh dari jurnal yang ditulis oleh (Sachoemar & Kristijono, 2005), seperti yang tersaji pada Tabel 2.

Response Amplitude Operators (RAO)

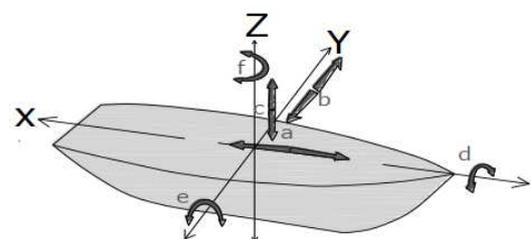
RAO adalah fungsi respons yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur. Hal ini dikarenakan RAO adalah alat untuk mentransfer beban gelombang dalam bentuk respons pada suatu struktur (Fajar, et al., 2017). Menurut Djatmiko (2012), respons gerakan RAO terbagi menjadi dua yaitu:

1. Pada mode gerakan translasi yaitu *surge*, *sway*, dan *heave*, respons gerakan RAO-nya merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan struktur dan amplitudo gelombang yang dituliskan dalam persamaan (1).

$$RAO = \frac{\zeta_{ko}}{\zeta_0} (m/m) \quad (1)$$

2. Pada mode gerak rotasi yaitu *roll*, *pitch*, dan *yaw*, respons gerakan RAO-nya merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan struktur dan kemiringan gelombang (perkalian antara angka gelombang dan amplitudo gelombang insiden) yang dituliskan dalam persamaan (2).

$$RAO = \frac{\zeta_{ko}}{k_w \zeta_0} = \frac{\zeta_{ko}}{(\omega^2/g)\zeta_0} (rad/rad) \quad (2)$$



Gambar 2. Mode gerakan yang dialami struktur terapung (Romadhoni, 2016)

Gerakan translasi dan rotasi kapal dapat dilihat pada Gambar 2 dengan keterangan sebagai berikut:

- (a) *Surge*, gerakan transversal arah sumbu x;

- (b) *Sway*, gerakan transversal arah sumbu y;
- (c) *Heave*, gerakan transversal arah sumbu z;
- (d) *Roll*, gerakan rotasional arah sumbu x;
- (e) *Pitch*, gerakan rotasional arah sumbu y;
- (f) *Yaw*, gerakan rotasional arah sumbu z.

Beban arus lateral

$$F_{Yc} = \frac{1}{2} C_{Yc} \rho_c V_c^2 L_{BP} T \quad (N) \quad (8)$$

Momen *yaw* arus

$$M_{XYc} = \frac{1}{2} C_{XYc} \rho_c V_c^2 L_{BP}^2 T \quad (N.m) \quad (9)$$

Spektrum Gelombang

Spektrum gelombang yang digunakan didasarkan kepada kondisi *real* laut Indonesia, dalam penelitian ini disesuaikan dengan kondisi perairan Bangka. Perairan Bangka merupakan perairan yang dibatasi oleh pulau, sehingga pendekatan spektrum energi gelombang yang sesuai adalah spektrum JONSWAP. Persamaan spektrum JONSWAP dapat ditulis sesuai dengan Persamaan 3.

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\tau\omega_0^2} \right] \quad (3)$$

Formulasi spektrum JONSWAP dianggap sangat sesuai dengan perairan di Indonesia, karena perairan Indonesia merupakan perairan tertutup yang dibatasi kepulauan, dari sejumlah kajian, untuk perairan Indonesia disarankan memakai parameter γ yang lebih kecil, sekitar 2,0 sampai 2,5 (Djarmiko, 2012).

Beban Lingkungan

Beban lingkungan yang mengenai struktur terapung tertambat menurut OCIMF (1994) dan OCIMF (2010) terbagi menjadi:

Beban Angin

Beban angin longitudinal

$$F_{Xw} = \frac{1}{2} C_{Xw} \rho_w V_w^2 A_T \quad (N) \quad (4)$$

Beban angin lateral

$$F_{Yw} = \frac{1}{2} C_{Yw} \rho_w V_w^2 A_L \quad (N) \quad (5)$$

Momen *yaw* angin

$$M_{XYw} = \frac{1}{2} C_{XYw} \rho_w V_w^2 A_L L_{BP} \quad (N.m) \quad (6)$$

Beban Arus

Beban arus longitudinal

$$F_{Xc} = \frac{1}{2} C_{Xc} \rho_c V_c^2 L_{BP} T \quad (N) \quad (7)$$

Beban Gelombang

Beban gelombang *time series* dapat dibangkitkan dari spektrum gelombang sebagai *first order* dan *second order*. Perhitungan gaya gelombang *first order* menggunakan persamaan (10).

$$F_{WV}^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^N F_{WV}^{(1)}(\omega_i) \cos[\omega_i t + \varepsilon_i] a_i \quad (10)$$

Second order adalah gelombang dengan periode tinggi yang daerah pembangkitannya tidak di daerah itu (jauh dari lokasi gelombang terjadi) dan berpengaruh dominan pada kekuatan sistem tambat. Persamaan untuk gaya gelombang *second order* dapat dilihat pada persamaan (11).

$$F_{WV}^{(2)}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j D_{ij} \cos[(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \quad (11)$$

Tension dan Offset

Tabel 3. Faktor keamanan (API, 2005)

Kondisi	Safety Factor
ULS	1,67
ALS	1,25

Tension dan *offset* merupakan kriteria kinerja yang akan dijadikan acuan. Kriteria *tension* maksimum merujuk kepada API RP 2 SK, sedangkan untuk kriteria *offset* digunakan pendekatan kepada kapal pengeboran, sehingga berpedoman kepada API RP 16Q. Faktor keamanan pada kondisi ULS (*Ultimate Limit State*) dan ALS (*Accidental Limit State*) dapat dilihat pada Tabel 3.

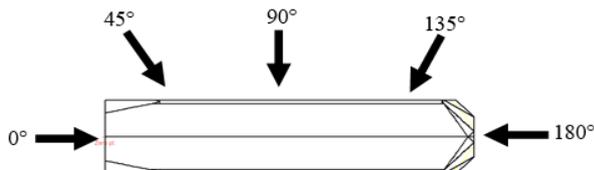
Kriteria *offset* berdasarkan API (1993) adalah tidak boleh melebihi $\tan(4^\circ) \times$ jarak vertikal *flex joint* ke titik berat struktur selama kondisi ULS (pada KIP timah adalah 12,4 m), sehingga diperoleh *offset* untuk KIP timah tidak boleh melebihi 0,867 m.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis KIP timah dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak *Orcawave* dan *Orcaflex 11* dengan lisensi yang dimiliki oleh Pusat Teknologi Rekayasa Industri Maritim (PTRIM) yang berlokasi di kantor Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) Surabaya. Pada perangkat lunak *Orcawave* akan dapat diketahui RAO dari KIP timah, sedangkan pada *Orcaflex 11* akan dapat diketahui *tension* dari tali tambat dan *offset* dari KIP timah pada kondisi tertambat. Analisis dilakukan dengan batasan yaitu bahwa jangkar pada KIP timah diasumsikan pada kondisi *fixed* di *seabed*, serta konfigurasi dasar yang digunakan sesuai dengan pengujian yang telah dilakukan di kolam uji Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH).

Respons Gerak Kapal Kondisi Terapung Bebas

Grafik RAO yang dihasilkan oleh perangkat lunak *Orcawave* yang terbagi ke dalam 5 (lima) arah pembebanan yaitu 0° , 45° , 90° , 135° , dan 180° dapat dilihat pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 9. Penerapan arah pembebanan pada KIP timah dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Arah pembebanan untuk analisis RAO

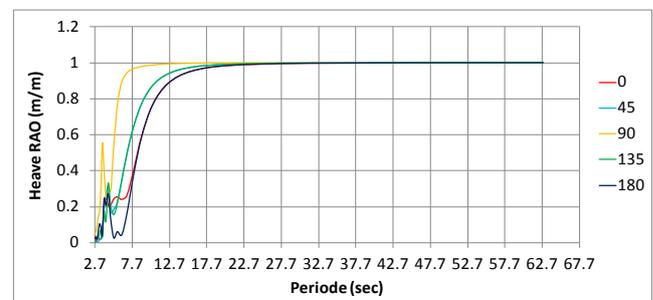
Arah pembebanan (*heading*) yang mengenai KIP timah terbagi ke dalam lima sudut pembebanan yaitu 0° (*stern*), 45° (*stern quartering*), 90° (*beam*), 135° (*bow quartering*), dan 180° (*head*). Pada Gambar 3 dapat diketahui bahwa arah 0° menunjukkan bahwa beban yang mengenai KIP timah datang dari arah belakang KIP timah, sedangkan arah 180° datang dari arah depan KIP timah. Grafik RAO ini dibutuhkan sebagai data untuk analisis sistem tambat di *Orcaflex 11*.

RAO KIP timah akan dibagi ke dalam RAO gerakan vertikal (*heave*, *roll*, dan *pitch*) dan

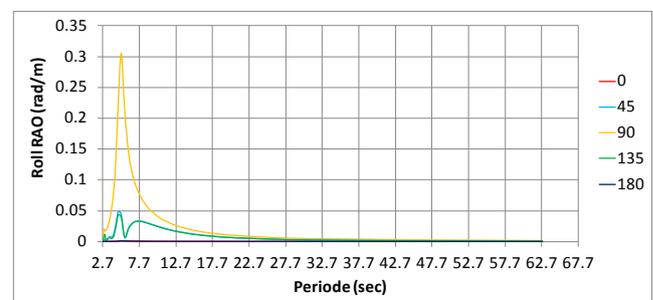
horizontal (*surge*, *sway*, dan *yaw*). RAO gerakan vertikal akan memberi pengaruh lebih dominan kepada stabilitas kapal serta kelaiklautan kapal (*seaworthiness*) jika dibandingkan RAO gerakan horizontal.

RAO Gerakan Vertikal

Gerakan *heave* pada Gambar 4 menunjukkan bahwa pada periode 31,4 dan 62,83 s gerakan *heave* KIP timah mencapai resonansi utamanya yaitu 0,99 m/m untuk semua arah pembebanan. Sebelum terjadi resonansi utama KIP timah mengalami beberapa kali resonansi di periode rendah antara 2,7 – 7,7 s.



Gambar 4. RAO gerakan *heave*

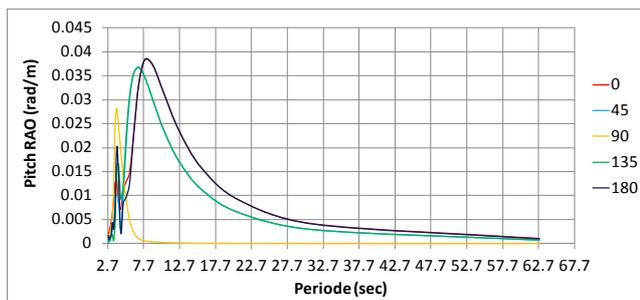


Gambar 5. RAO gerakan *roll*

Gerakan rotasional *roll* terbesar pada KIP timah terjadi akibat *heading* 90° , dengan resonansi puncak sebesar 0,305 rad/m pada periode 5,236 s, seperti yang terlihat pada Gambar 5. Resonansi utama pada gerakan *roll* untuk seluruh arah pembebanan terjadi pada periode rendah yaitu antara 4,189 – 5,712 s.

Gerakan *roll* akibat arah pembebanan 0° dan 180° , bernilai sangat kecil untuk semua rentang periode. Arah pembebanan 45° , 90° , dan 135° berangsur mengecil pada periode sedang sampai tinggi (6,981 – 62,832 s). Sedangkan untuk gerakan

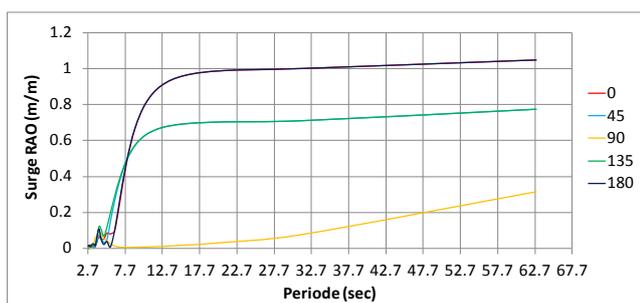
pitching menghasilkan gerakan terbesar akibat arah pembebanan 0° dan 180° , resonansi utama terjadi pada periode 7,854 s dengan nilai gerakan *pitch* sebesar 0,038 rad/m, seperti yang tampak pada Gambar 6. Arah pembebanan 45° dan 135° juga menghasilkan gerakan *pitch* cukup besar yaitu 0,037 rad/m.



Gambar 6. RAO gerakan *pitch*

RAO Gerakan Horizontal

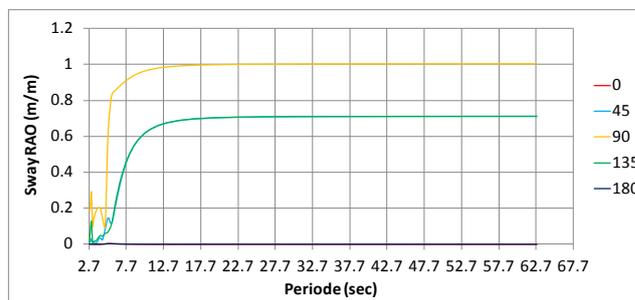
RAO gerakan *surge* menunjukkan bahwa nilai gerakan *surge* terbesar terjadi akibat arah pembebanan 0° dan 180° yaitu 1,047 m/m pada periode tinggi 62,83 s. Nilai terbesar berikutnya adalah akibat arah pembebanan 45° dan 135° yaitu sebesar 0,773 m/m pada periode yang sama. Sebelum terjadi resonansi puncak pada setiap arah pembebanan, telah terjadi beberapa resonansi pada periode rendah antara 2,7 – 7,7 s, seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. RAO gerakan *surge*

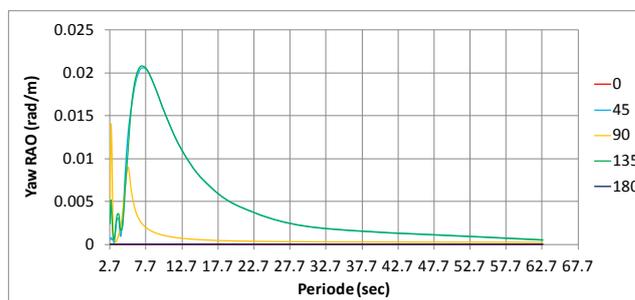
Gerakan *sway* yang terlihat pada Gambar 8 menunjukkan bahwa RAO gerakan *sway* terbesar terjadi akibat arah pembebanan 90° . Resonansi puncak terjadi pada periode 62,832 s. dengan besaran 1,004 m/m. Sebelum terjadi resonansi puncak pada periode rendah antara 2,992 dan 3,927 s. Arah pembebanan 45° dan 135° memiliki nilai gerakan *sway* yang hampir sama, sedangkan untuk 0° dan

180° gerakan *sway* yang dihasilkan hampir tidak ada atau bernilai sangat kecil.



Gambar 8. RAO gerakan *sway*

Gerakan *yaw* pada Gambar 9 menunjukkan bahwa arah pembebanan 45° dan 135° memiliki nilai gerakan *yaw* terbesar. Gerakan *yaw* yang dihasilkan mengalami resonansi puncak pada periode 6,981 s dengan gerakan *yaw* sebesar 0,021 rad/m. Sebelum mengalami resonansi puncak pada periode rendah (2,7 – 7,7 s) mengalami beberapa kali resonansi. Arah pembebanan 0° dan 180° nilai gerakan *yaw* sangat kecil, mendekati 0 rad/m.



Gambar 9. RAO gerakan *yaw*

Gerakan vertikal dan horizontal yang dialami oleh KIP timah bernilai cukup kecil pada setiap arah pembebanan. Gerakan dengan nilai terbesar adalah gerakan *surge* yaitu 1,047 m/m. Gerakan vertikal yang berpengaruh terhadap stabilitas KIP timah gerakan terbesar terjadi pada gerakan *heave*, sedangkan *roll* dan *pitch* bernilai sangat kecil. Sehingga dapat diketahui bahwa stabilitas dan kelaiklautan kapal sudah cukup bagus.

Tension Tali Tambat KIP Timah

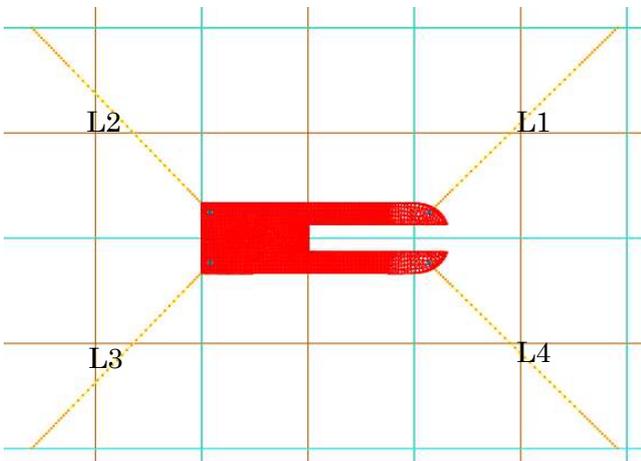
KIP timah memiliki sistem tambat sebanyak 4 (empat) buah tali tambat, dengan konfigurasi seperti yang terlihat pada Gambar 10. Bahan tali tambat yang

digunakan pada KIP timah adalah 6x19 *wire with wire core*, dengan *properties* dari tali tambat seperti yang tersaji pada Tabel 4.

Tabel 4. Data *properties* tali tambat

<i>Properties</i>	Satuan	Nilai
Diameter	m	0,038
<i>Weight in air</i>	kN/m	0,0565
<i>Displacement</i>	kN/m	0,0073
<i>Weight in water</i>	kN/m	0,0492
MBL	kN	914,569
Panjang L1=L4	m	77,0
Panjang L2=L3	m	75,1

Konfigurasi tali tambat yang tampak pada Gambar 10 disesuaikan dengan konfigurasi yang telah digunakan pada pengujian fisik di kolam uji Balai Teknologi Hidrodinamika. Sudut sebar tali tambat pada konfigurasi tersebut adalah sudut sebar 45°.

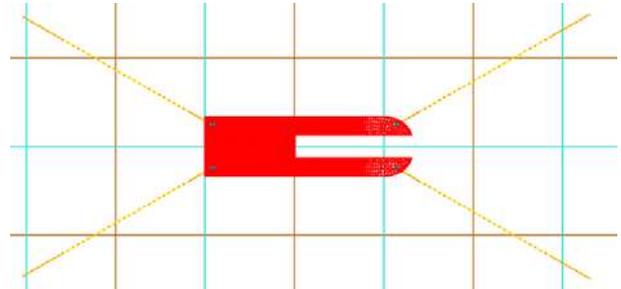


Gambar 10. Konfigurasi tali tambat KIP timah

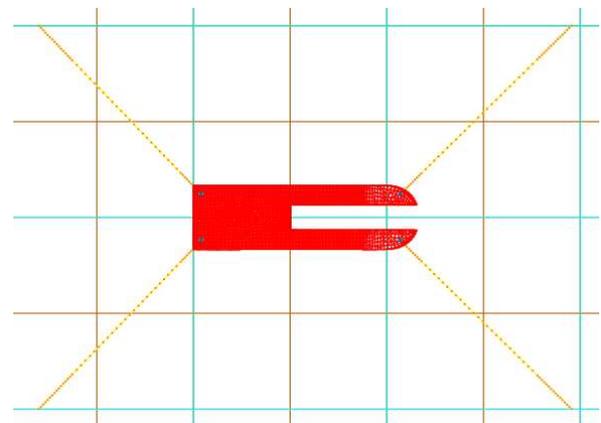
Sebagai salah satu upaya mendapatkan konfigurasi sistem tambat yang optimal dalam kinerjanya yaitu menghasilkan *tension* di bawah kriteria API RP 2SK dan *offset* di bawah kriteria API RP 16Q, maka dilakukan beberapa variasi. Variasi pertama adalah variasi sudut sebar tali tambat yang terbagi menjadi sudut sebar 30°, 45°, dan 60°, kemudian setelah diperoleh sudut sebar tali tambat yang paling optimal, variasi berikutnya adalah panjang tali tambat diperpendek atau diperpanjang.

Variasi Sudut Sebar Tali Tambat

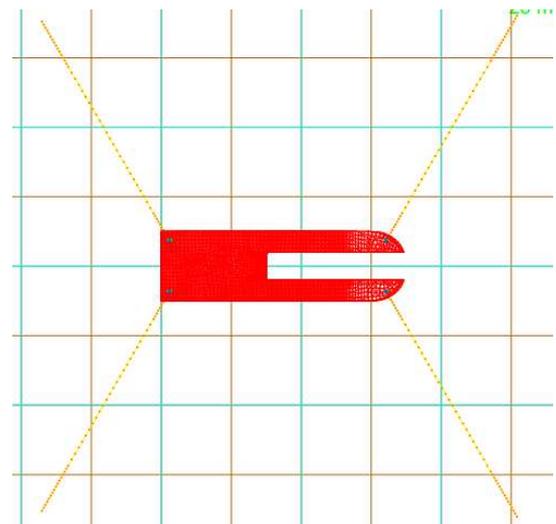
Variasi sudut sebar tali tambat pada KIP timah terbagi menjadi sudut sebar 30°, 45°, dan 60°, seperti yang terlihat pada Gambar 11-13.



Gambar 11. Konfigurasi tali tambat KIP timah dengan sudut sebar 30°



Gambar 12. Konfigurasi tali tambat KIP timah dengan sudut sebar 45°



Gambar 13. Konfigurasi tali tambat KIP timah dengan sudut sebar 60°

Pada Gambar 11 terlihat konfigurasi sudut sebar 30° memiliki jarak antar tali tambat yang lebih

kecil jika dibandingkan konfigurasi sudut sebar 45° dan 60°.

Arah pembebanan yang dianalisis pada KIP timah adalah arah pembebanan 90°, 135°, dan 180°. *Tension* maksimum yang ditinjau berada pada dua posisi yaitu di *fairlead* KIP timah dan *anchor*. Sedangkan untuk *offset* ditinjau untuk sumbu-x dan y. Hasil *tension* maksimum yang diperoleh dari analisis KIP timah dengan variasi sudut sebar pada posisi *fairlead* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. *Tension* maksimum tali tambat pada posisi *fairlead* untuk beberapa sudut sebar

Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Fairlead</i>		
	30° (<i>Heading</i> 90°)	30° (<i>Heading</i> 135°)	30° (<i>Heading</i> 180°)
L1	24,92	10,23	22,43
L2	13,21	49,42	14,28
L3	479,51	147,86	14,33
L4	451,35	302,91	25,17

Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Fairlead</i>		
	45° (<i>Heading</i> 90°)	45° (<i>Heading</i> 135°)	45° (<i>Heading</i> 180°)
L1	31,19	12,63	28,91
L2	17,14	137,11	17,46
L3	501,65	232,45	17,57
L4	505,60	358,86	30,97

Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Fairlead</i>		
	60° (<i>Heading</i> 90°)	60° (<i>Heading</i> 135°)	60° (<i>Heading</i> 180°)
L1	38,41	15,69	39,68
L2	18,85	42,10	18,93
L3	538,10	325,98	19,09
L4	552,19	414,97	41,88

Pada Tabel 5 terlihat bahwa nilai *tension* maksimum terkecil pada posisi *fairlead* yang

dihasilkan dari variasi sudut sebar dari tiga arah pembebanan adalah konfigurasi sudut sebar 30°. Nilai *tension* maksimum yang diizinkan oleh API RP 2SK adalah 547,646 kN.

Hasil yang diperoleh dari Tabel 5 menunjukkan bahwa semua *tension* maksimum pada posisi *fairlead* masih di bawah kriteria API RP 2SK, kecuali pada tali tambat L4 dengan konfigurasi sudut sebar 60° akibat arah pembebanan 90° yaitu bernilai 552,19 kN, secara lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 14.

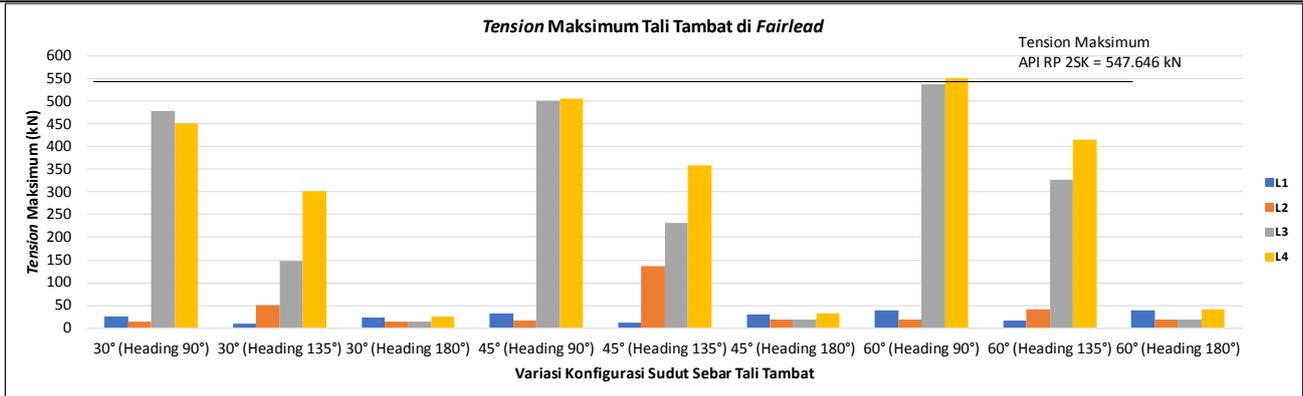
Tabel 6. *Tension* maksimum tali tambat pada posisi *anchor* untuk beberapa sudut sebar

Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Anchor</i>		
	30° (<i>Heading</i> 90°)	30° (<i>Heading</i> 135°)	30° (<i>Heading</i> 180°)
L1	15,50	2,73	13,42
L2	4,89	38,98	5,85
L3	470,06	139,59	5,99
L4	442,59	291,85	15,99

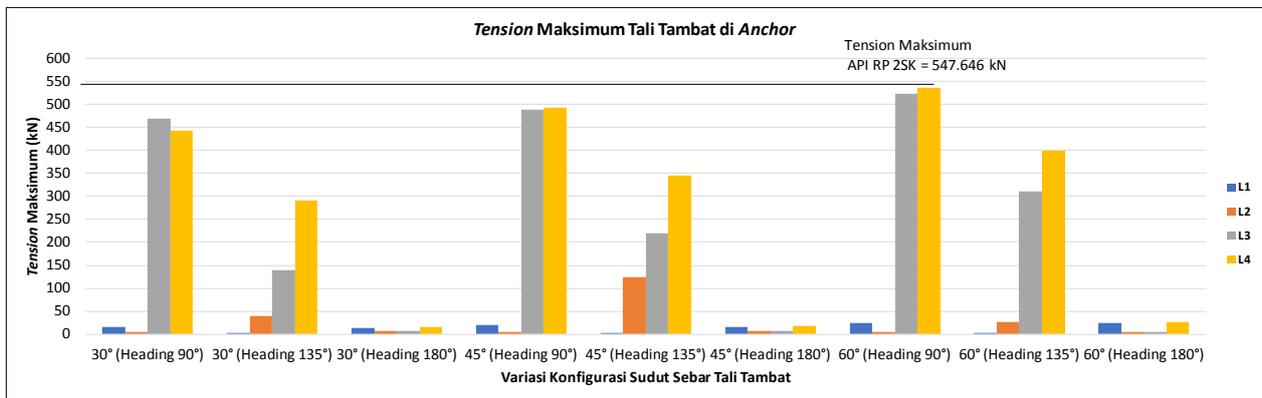
Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Anchor</i>		
	45° (<i>Heading</i> 90°)	45° (<i>Heading</i> 135°)	45° (<i>Heading</i> 180°)
L1	18,77	2,23	16,40
L2	5,21	123,47	5,73
L3	488,77	219,68	5,82
L4	493,43	345,05	18,41

Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Anchor</i>		
	60° (<i>Heading</i> 90°)	60° (<i>Heading</i> 135°)	60° (<i>Heading</i> 180°)
L1	23,93	2,79	24,42
L2	4,96	26,80	5,19
L3	522,38	310,47	5,32
L4	537,44	398,95	26,61

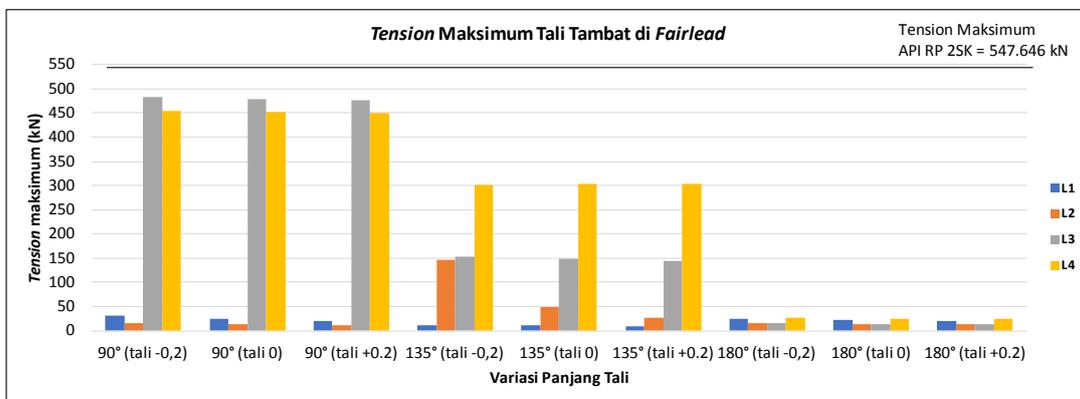
Tension maksimum untuk variasi sudut sebar pada posisi *anchor* dapat dilihat pada Tabel 6. Hasil *tension* yang dihasilkan pada posisi *anchor* untuk



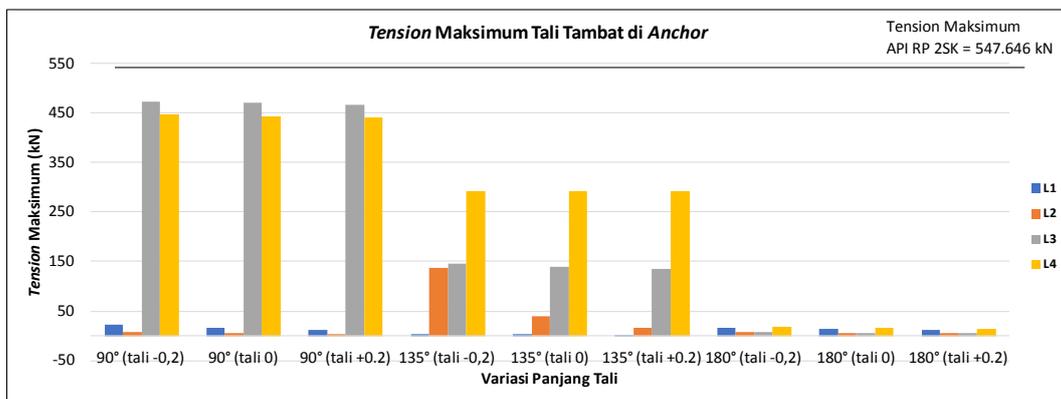
Gambar 14. Hasil *tension* maksimum pada *fairlead* untuk semua variasi sudut sebar



Gambar 15. Hasil *tension* maksimum pada *anchor* untuk semua variasi sudut sebar



Gambar 16. Hasil *tension* maksimum pada *fairlead* untuk variasi panjang tali



Gambar 17. Hasil *tension* maksimum pada *anchor* untuk variasi panjang tali

berbagai sudut sebar tali tambat pada Tabel 6 menunjukkan bahwa tali tambat dengan sudut sebar 30°, menghasilkan *tension* maksimum terkecil dibandingkan dengan sudut sebar 45° dan 60°.

Tension terbesar pada posisi *anchor* dihasilkan akibat arah pembebanan 90° yaitu sebesar 537,44 kN dengan sudut sebar tali tambat 60°. Meski demikian nilai *tension* tersebut masih dalam batas yang diizinkan oleh API RP 2SK yaitu 547,646 kN. Arah pembebanan 180° pada berbagai variasi sudut sebar menghasilkan *tension* maksimum paling kecil, jika dibandingkan arah pembebanan lainnya. Hal tersebut dikarenakan arah pembebanan 180°, beban lingkungan yang mengenai struktur memiliki luasan lebih kecil.

Variasi Panjang Tali Tambat

Variasi panjang tali tambat dilakukan untuk sudut sebar tali tambat 30°. Hal tersebut dikarenakan pada sudut sebar tali tambat 30° menghasilkan *tension* maksimum terkecil pada *fairlead* dan *anchor*. Variasi tali tambat dilakukan dengan mengurangi tali tambat sebanyak 0,2 m dan menambah panjang tali tambat sebanyak 0,2 m pada arah pembebanan 90°, 135°, dan 180°. Variasi panjang tali tambat dengan pengurangan 0,2 m pada posisi *fairlead* dapat dilihat pada Tabel 7.

Pada Gambar 16 menunjukkan bahwa penambahan tali akan memperkecil *tension* maksimum tali tambat, sedangkan dengan memperpendek tali tambat akan menambah *tension* maksimum. Hasil analisis memutuskan bahwa untuk KIP timah akan menambah panjang tali tambat sepanjang 0,2 m, karena menghasilkan *tension* terkecil dari semua variasi.

Pemilihan variasi panjang tali dengan mengurangi panjang tali sebanyak 0,2 m dan menambahkannya dengan jumlah yang sama didasarkan kepada banyaknya tali tambat yang *laydown* di *seabed*. Apabila panjang tali tambat dikurangi lebih dari 0,2 meter maka sudah tidak ada lagi tali tambat yang *laydown* di *seabed*. Hal ini dipertimbangkan karena jenis sistem tambat yang

dipilih adalah *catenary*.

Tabel 7. *Tension* maksimum tali tambat pada posisi *fairlead* untuk variasi panjang tali

Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Fairlead</i>		
	90° (tali -0,2)	90° (data awal)	90° (tali +0,2)
L1	31,35	24,92	20,84
L2	15,28	13,21	11,70
L3	482,80	479,51	476,32
L4	455,19	451,35	449,30

Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Fairlead</i>		
	135° (tali -0,2)	135° (data awal)	135° (tali +0,2)
L1	11,77	10,23	9,08
L2	146,73	49,42	27,22
L3	153,76	147,86	143,81
L4	302,24	302,91	303,70

Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Fairlead</i>		
	180° (tali -0,2)	180° (data awal)	180° (tali +0,2)
L1	24,50	22,43	21,07
L2	16,21	14,28	12,83
L3	16,20	14,33	12,89
L4	27,04	25,17	23,76

Hasil *tension* maksimum untuk posisi *anchor* dengan variasi panjang tali dapat dilihat pada Tabel 8. Penambahan panjang tali sebesar 0,2 m pada *anchor* juga menghasilkan *tension* maksimum paling kecil pada seluruh arah pembebanan, sama halnya pada posisi *fairlead*. Gambar 18 menunjukkan bahwa seluruh variasi panjang tali masih dalam batas aman yang diizinkan oleh API RP 2SK.

Offset KIP Timah

Pergerakan atau *offset* yang dihasilkan oleh KIP timah sangat penting untuk ditinjau. Hal tersebut

dikarenakan pada KIP timah terdapat alat isap timah yang membutuhkan pembatasan gerak kapal untuk mencegah alat tersebut patah. Kriteria *offset* maksimum yang diizinkan oleh API RP 16Q adalah sebesar 0,867 m.

Tabel 8. *Tension* maksimum tali tambat pada posisi *anchor* untuk variasi panjang tali

Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Anchor</i>		
	90° (tali -0,2)	90° (data awal)	90° (tali +0,2)
L1	21,80	15,50	11,60
L2	6,56	4,89	3,74
L3	473,59	470,06	467,01
L4	446,65	442,59	440,48

Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Anchor</i>		
	135° (tali -0,2)	135° (data awal)	135° (tali +0,2)
L1	3,69	2,73	2,15
L2	136,39	38,98	16,85
L3	145,33	139,59	135,64
L4	291,42	291,85	292,46

Tali tambat	<i>Tension</i> (kN) di <i>Anchor</i>		
	180° (tali -0,2)	180° (data awal)	180° (tali +0,2)
L1	15,43	13,42	12,13
L2	7,63	5,85	4,60
L3	7,68	5,99	4,75
L4	17,85	15,99	14,59

Offset maksimum yang dihasilkan oleh KIP timah akibat sistem tambat dengan berbagai variasi sudut sebar tali tambat (30°, 45°, dan 60°) dapat dilihat pada Tabel 9. Hasil *tension* maksimum menunjukkan bahwa seluruh variasi sudut sebar menghasilkan *offset* maksimum yang masih diizinkan oleh API RP 16Q atau lebih kecil dari 0,867 m.

Offset maksimum yang dihasilkan oleh KIP timah dengan variasi panjang tali pada arah

Tabel 9. *Offset* maksimum KIP timah dengan variasi sudut sebar

Variasi Sudut Sebar	Position (m)	
	X	Y
30° (<i>Heading</i> 90°)	0,018	0,561
30° (<i>Heading</i> 135°)	0,228	0,243
30° (<i>Heading</i> 180°)	0,200	0,002
45° (<i>Heading</i> 90°)	0,017	0,562
45° (<i>Heading</i> 135°)	0,229	0,239
45° (<i>Heading</i> 180°)	0,200	0,002
60° (<i>Heading</i> 90°)	0,017	0,560
60° (<i>Heading</i> 135°)	0,230	0,239
60° (<i>Heading</i> 180°)	0,200	0,001

Tabel 10. *Offset* maksimum KIP timah dengan variasi panjang tali

Variasi Panjang Tali	Position (m)	
	X	Y
90° (tali -0,2)	0,018	0,558
90° (tali data awal)	0,018	0,561
90° (tali +0,2)	0,018	0,566
135° (tali -0,2)	0,229	0,241
135° (tali data awal)	0,228	0,243
135° (tali +0,2)	0,228	0,244
180° (tali -0,2)	0,200	0,002
180° (tali data awal)	0,200	0,002
180° (tali +0,2)	0,200	0,002

pembebanan 30°, 45°, dan 60°, dapat dilihat pada Tabel 10. *Offset* maksimum yang tersaji pada Tabel 10 menunjukkan bahwa seluruh variasi panjang tali tambat, baik itu panjang tali dikurangi 0,2 m,

panjang tali sesuai data awal, serta panjang tali ditambah 0,2 m, *offset* maksimum yang dihasilkan masih dalam batas yang diizinkan oleh API RP 16Q atau kurang dari 0,867 m.

KESIMPULAN

Kapal Isap Produksi (KIP) timah memiliki respons gerak struktur yang cukup baik. Hal tersebut ditunjukkan dari grafik RAO gerakan vertikal dan horizontal yang cukup kecil. Nilai gerakan vertikal terbesar dihasilkan oleh gerakan *heave* yaitu 0,99 m/m, sedangkan gerakan horizontal terbesar dihasilkan oleh gerakan *surge* yaitu sebesar 1,047 m/m. *Tension* maksimum paling kecil pada tali tambat akibat variasi sudut sebar adalah *tension* pada sudut sebar tali 30°, dengan *tension* maksimum sebesar 451,35 kN akibat arah pembebanan 90° di *fairlead*. Sedangkan *tension* maksimum terkecil akibat variasi panjang tali adalah dengan adanya penambahan panjang 0,2 m, sudut sebar 30°, arah pembebanan 90° di *fairlead*, dengan *tension* maksimum sebesar 449,30 kN. Konfigurasi sudut sebar tali tambat 30° dengan panjang tali tambat sebesar 79 meter untuk L1 dan L4 serta 77.1 meter untuk L2 dan L3 menghasilkan *tension* maksimum yang lebih kecil dari kriteria *tension* maksimum dari API RP 2SK. Sedangkan untuk *offset* maksimum, baik sumbu-x maupun sumbu-y memiliki nilai yang lebih kecil dari kriteria *offset* dari API RP 16Q, dengan *offset* sumbu x terbesar 0,228 m pada *heading* 135° dan sumbu y sebesar 0,566 m pada *heading* 90°.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Deputi Bidang Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi/Badan Riset dan Inovasi Nasional atas pendanaan dengan skema Penelitian Dosen Pemula. Peneliti juga mengucapkan terima kasih kepada Politkenik Negeri Madura telah memberikan izin penelitian di luar kampus, serta kepada Balai Teknologi Hidrodinamika yang telah memberikan izin penggunaan perangkat lunak

Orcawave dan *Orcaflex* 11 berlisensi, dan tenaga ahli untuk membantu menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustinus, M. (2018). *Simalakama Kilau Timah di Laut Bangka*. Diakses pada 24 Oktober 2021 dari <https://kumparan.com/kumparanbisnis/simalakama-kilau-timah-di-laut-bangka-1540612093580465875/full>.
- API. (1993). *Recommended Practice for Design, Selection, Operation, and Maintenance of Marine Drilling Riser Systems*. Washington: API Publishing Services.
- API. (2005). *Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*. Washington: API Publishing Services.
- API RP 16Q. (1993). *Design Selection, Operation and Maintenance of Marine Drilling Riser Systems*, Washington DC, American Petroleum Institute.
- API RP 2SK. (2005). *Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*, Washington DC, American Petroleum Institute.
- Arianti, E. (2018). Numerical Analysis of Multi Buoy Mooring Configuration Selection. *Journal of Subsea and Offshore*, Vol. 16(1): 1-5.
- Djarmiko, E. B. (2012). *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas*. 1st ed. Surabaya: ITS Press.
- Fajar, A. H., Chrismianto, D. & Hadi, E. S. (2017). Studi Analisa Slamming & Deck Wetness Akibat Gerakan Heaving – Pitching Coupling & Gerakan Non-Linier Rolling (Studi Kasus Kapal MT Pandan). *Jurnal Teknik Perkapalan*, Vol. V(4): 677-687.
- Maulana, H. (2019). *Kapal Milik PT Timah Tenggelam di Perairan Prayun, Riau*. Diakses pada 24 Oktober 2021 dari <https://megapolitan.kompas.com/read/2019/08/31/19365291/kapal-milik-pt-timah-tenggelam-di-perairan-prayun-riau>.
- Mujahid, A. S. (2019). Kajian Penentuan Titik Berat Vertikal pada Studi Kelayakan Desain Barge



- Penambang Timah terhadap Stabilitas Kapal. *Jurnal Inovtek Polbeng*, Vol. IX(1): 182-189.
- Mujahid, A. S. & Priohutomo, K. (2018). Studi Kelayakan Desain Kapal Hisap Tambang. *Jurnal Wave*, Vol. XII(2): 81-88.
- OCIMF. (1994). *Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs*. London: The Oil Companies International Marine Forum.
- OCIMF. (2010). *Estimating The Environmental Loads on Anchoring Systems*. London: The Oil Companies International Marine Forum.
- Rahman, I. (2017). *Tali Tambat Putus, Dua Buah Tongkang Tabrak Puluhan Kapal Nelayan*. Diakses pada 24 Oktober 2021 dari <https://banjarmasin.tribunnews.com/2017/02/08/tali-tambat-putus-dua-buah-tongkang-tabrak-puluhan-kapal-nelayan>.
- Romadhoni. (2016). Analisa olah Gerak Kapal di Gelombang Reguler. *Kapal*, Vol. XIII(2): 61-68.
- Sachoemar, S. I. & Kristijono, A. (2005). Evaluasi Kondisi Lingkungan Perairan Estuaria Teluk Klabat, Bangka pada Musim Timur. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, Vol. VI(3): 438-445.
- Sukoco. (2016). *Tali Baja Pengikat Putus, Ponton Hantam Dua Kapal di Pelabuhan Nunukan*. Diakses pada 24 Oktober 2021 pada <https://regional.kompas.com/read/2016/12/14/11004241/tali.baja.pengikat.putus.ponton.hantam.dua.kapal.di.pelabuhan.nunukan>.
- Supriadi, A., Oktaviani, K., Kencono, A. W. & Prasetyo, B. E. (2016). *Analisis Pembentukan Harga di Bursa Timah Indonesia dan Dunia*. Jakarta Pusat: Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Widhaputra, Y., Arief, A. T. & Herlina, W. (2014). Evaluasi Kinerja Jig Pada Kapal Isap Produksi Timah 12 Daerah Perairan Laut Tempilang Bangka Barat Di Unit Laut Bangka PT Timah (Persero) Tbk, Provinsi Bangka Belitung. *Jurnal Ilmu Teknik Sriwijaya*, II(5): 1-7.
- Yulianti, Burhanuddin, B. & Albana. (2020). Analisa Pertambangan Timah Di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. *Jurnal Ekonomi*, Vol. XXII(1): 54-62.

HALAMAN KOSONG