

# Studi Komparasi Perilaku Dinamis *Tension Leg Platform* Kolom Tunggal Bertelapak Kaki Bintang Tiga dan Bintang Empat dengan Pendekatan Pembebanan Berdasar Teori Morison dan Difraksi

Cendrawani, Eko B. Djatmiko, dan Jusuf Sutomo

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

*E-mail:* ebdjatismiko@oe.its.ac.id

**Abstrak**—*Tension leg platform (TLP)* adalah salah satu *compliant offshore structures* yang efektif untuk perairan dalam, dengan ciri khasnya tendon yang bertegangan tarik. Salah satu penilaian kelayakan struktur TLP adalah perilaku dinamisnya terhadap beban lingkungan, terutama beban gelombang. Tugas Akhir ini membandingkan antara dua TLP dengan konfigurasi telapak kaki yang berbeda, telapak kaki bintang tiga (TLP Seastar) dan yang lainnya adalah bertelapak kaki bintang empat (TLP Fourstar) dengan *displacement* dan kapasitas geladak yang sama. Karena berada pada aliran transisi, antara gaya drag dan gaya inersia, maka digunakan dengan dua pendekatan teori gelombang yang berbeda, yakni teori gelombang morison dan teori gelombang difraksi. Teori gelombang morison digunakan untuk perhitungan analitikal sedangkan teori gelombang difraksi digunakan untuk pemodelan numerik. Hasil perbandingan respon dan beban gelombang dengan menggunakan dua metode tersebut memiliki hasil yang mendekati, yakni dibawah 5%, sehingga bisa digunakan pada tugas akhir ini. Selain itu juga dilakukan pemodelan struktur TLP bertelapak kaki bintang empat dengan *displacement* dan sarat desain yang mengacu kepada TLP bertelapak kaki bintang tiga. Hasil perbandingan respon pada kedua TLP pada kondisi *free floating* menimbulkan perbedaan yang signifikan pada gerakan *sway, roll, pitch* dan *yaw*.

**Kata Kunci**— analitik, numerik, RAO motion, TLP Fourstar, TLP Seastar

## I. PENDAHULUAN

**T**ENSION Leg Platform (TLP) merupakan salah satu jenis *compliant structure* yang menggunakan tambatan *tether/tendon* yang diikatkan ke dasar laut. Keistimewaan yang membedakan struktur TLP dengan bangunan laut yang lain adalah pada *buoyancy* cadangannya. Dengan daya apung yang melebihi berat struktur TLP dan *mooring vertical* yang disebut tendon akan mempertahankan TLP secara vertical tetap stabil dan mengendalikan gerakan *heave* [1]. Sifat alami TLP adalah kurang sensitif terhadap bertambahnya kedalaman perairan dan dengan demikian mengurangi biaya instalasi dilapangan [2]. Komponen utama struktur TLP terdiri dari bangunan atas, geladak, badan struktur (*hull*) dan tergantung jenis telapak kakinya. Telapak kaki tersebut dapat mempunyai konfigurasi bintang tiga atau bintang empat tergantung kondisi dasar laut

[3]. Dalam perumusan persamaan gerak bangunan apung diperlukan perhitungan beban lingkungan. Beban lingkungan yang ditinjau dalam penelitian ini adalah beban yang secara umum merupakan beban dominan, yaitu beban gelombang. Tergantung pada jenis struktur laut dalam dan asumsi-asumsi yang mendasari desain, perhitungan gaya gelombang non linear dapat dilakukan dengan menggunakan teori gelombang difraksi. Namun, ketika rasio panjang gelombang dengan diameter silinder besar, maka persamaan morison akurat dalam menghitung beban gelombang pada silinder [4]. Beberapa studi dalam menghitung kekuatan drag juga menggunakan persamaan morison [5].

Objek penelitian ini adalah *Monohulled* TLP dengan konfigurasi telapak kaki bintang tiga dan bintang empat. Dari model yang dipilih terlihat bahwa struktur ini termasuk kedalam kategori berada d idaerah aliran transisi antara aliran drag dan aliran inersia, sehingga perlu diadakan kajian penentuan pembebanan gelombang dengan menggunakan dua teori tersebut. Penelitian ini akan membandingkan hasil respon dinamis yang terjadi pada dua konfigurasi TLP dengan pendekatan dua teori gelombang yang berbeda.



Gambar 1. TLP Seastar dan Fourstar (<http://www.offshoremoorings.org>) [6]

Paulling dan Webster (1986) telah melakukan studi terhadap perilaku dinamis dari Tension Leg Platform (TLP) [4]. Salah satu yang diselidiki pada TLP adalah pengaruh gerak *surge*

akibat gelombang maupun arus. Lee et al (1999) mempelajari pengaruh sifat material dari tether bertegangan elastic untuk arah gerak *surge* pada TLP. Jain (1997) mempresentasikan sebuah metode gerak analisis non linear TLP yang digabungkan dengan gaya pengembali dalam matriks enam derajat kebebasan [7]. Sebagai studi kasus, akan digunakan model TLP *Seastar* dengan dimensi struktur yang mengacu kepada TLP *Seastar Matterhorn* Milik SBM Atlantia Inc [8]. TLP tersebut sudah dilakukan oleh peneliti lain sebelumnya dan hasilnya akan dibandingkan dengan bagian ini yang mensimularisasikan TLP tersebut bertelapak kaki segi bintang empat. *Similarity parameter* yang digunakan mengacu ke TLP *A West Seno* [9] berdasarkan kebutuhan operasional dan fungsional yang sama. Parameter *displacement* dan *air gap clearance* pada TLP *Fourstar* juga akan disimularisasikan dengan TLP *Seastar* yang telah dianalisa pada penelitian sebelumnya.

II. METODE PENELITIAN

Pada dasarnya, penelitian ini adalah membandingkan hasil *RAO motion* antara perhitungan analitikal yang mengacu kepada teori gelombang morison dan pemodelan numerik yang menggunakan teori gelombang difraksi untuk struktur TLP *Seastar*. Jika hasil *respon* yang ditimbulkan dari perhitungan analitikal tidak memiliki perbedaan yang signifikan, maka untuk *respon* struktur TLP *Fourstar* akan dianalisa menggunakan pemodelan numerik.

Persamaan gerakan struktur diatas gelombang regular adalah :  $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$  [10] (1)

Dalam konteks bangunan apung, komponen massa terbagi menjadi dua, yaitu massa struktur ( $m_s$ ) dan massa tambah ( $m_a$ ).

Massa untuk gerakan *heave* adalah :

$M_s = \rho \pi R^2 H$  (2)

$M_a = 1/3 \rho R^3$  (3)

Kekakuan struktur pada gerakan *heave* adalah :

$K_{33} = \rho g \pi R^2$  (4)

Sehingga, frekuensi natural struktur dapat diketahui :

$\omega_n = \sqrt{(k/m)}$  (5)

Untuk perhitungan redaman struktur dilakukan dengan pendekatan *Equivalent energy dissipation linearization*, yaitu :

$B = 10\% B \text{ Kritis}$  (6)

$B_{crit} = 2 \nu(k/m)$  (7)

Gaya gelombang untuk gerakan *heave* adalah :

$F_{heave} = F_p + F_A$  (8)

$F_p = \rho g \zeta_0 e^{kz} A \cos(kwx - \omega t)$  (9)

$F_A = -m a \zeta_0 \omega^2 e^{-kz} \cos(kx - \omega t)$  (10)

Amplitudo Gerakan *Heave* Struktur

$X_p = x_0 / [(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]^{1/2} \cos(\Omega t - \alpha)$  (11)

dimana :

$x_0 = F_0 / k$   
 $r = \omega / \omega_n$   
 $\tan \alpha = 2\zeta r / (1-r^2)$

Pemodelan struktur TLP *Fourstar* yaitu pemodelan struktur dan pemodelan beban dinamis yang bekerja pada *hull*.

Tahapan pemodelan numerik adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan *hull* TLP tanpa tendon.
2. Memberikan *draft* (sarat air).
3. Memodelkan tendon, kemudian menghubungkannya dengan *hull* TLP.
4. Memberikan *properties* pada tendon, yaitu *yield strength*, kekakuan dan *pre-tension*.
5. Memasukkan kondisi lingkungan perairan selat makassar untuk kondisi 10 dan 100 tahunan dan arah pembebanan sesuai yang ditinjau. (Tabel 1 dan 2)
6. Melakukan analisa dalam *frequency domain*, sehingga diperoleh *Motion Response Operator (RAO Motion)*.

Tabel 1.

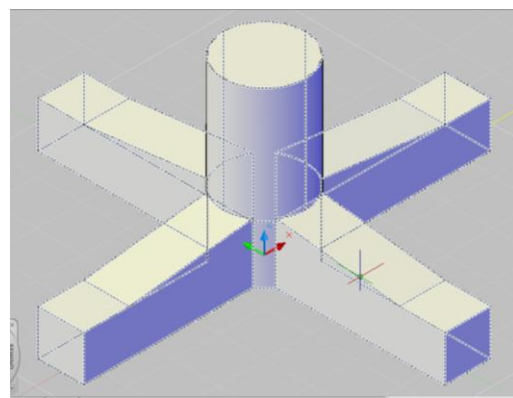
Data angin dan gelombang di Selat Makassar [9]

Item	0 <sup>o</sup>	45 <sup>o</sup>
10-Tahunan		
Kecepatan angin (m/s)	17.4	15.3
HS (m)	2.2	1.8
Tp (s)	7.1	6.5
Hmax (m)	4.1	3.4
Thmax (s)	6.8	6.2
100-Tahunan		
Kecepatan angin (m/s)	21.2	18.7
HS (m)	3	2.5
Tp (s)	8.3	7.6
Hmax (m)	5.5	4.6
Thmax (s)	7.8	7.2

Tabel 2.

Data arus di Selat Makassar [9]

Kecepatan Arus	100-Tahun (m/s)	50-Tahun (m/s)	10-Tahun (m/s)	5-Tahun (m/s)	1-Tahun (m/s)
Permukaan Laut	1.31	1.21	1.11	1	0.94
Dasar Laut	0.6	0.58	0.55	0.52	0.5



Gambar 2. Model TLP *Fourstar* tanpa tendon

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Perbandingan Perhitungan Analitikal TLP *Seastar* terhadap Pemodelan Numerik

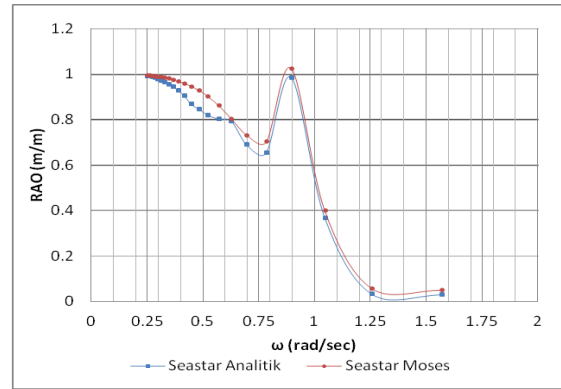
Pada penelitian ini, akan dilakukan perhitungan respon secara analitikal menggunakan teori beban gelombang Morison sebagai perbandingan hasil respon yang dikeluarkan oleh pemodelan numerik dengan menggunakan teori Difraksi. Perhitungan yang akan diuji adalah perhitungan RAO *motion* pada arah *heave*. Perhitungan untuk masing-masing komponen persamaan gerak dapat dilihat pada tabel 3:

Tabel 3. Data perhitungan respon analitik

No	Perhitungan	Hasil
1	Massa struktur	1694,54 ton
2	Massa tambah	249,075 ton
3	Kekakuan	2393,212 kN/m
4	Frekuensi Alami	1,109 rad/s
5	Periode Alami	5,662 detik
6	Gaya Morison (Analitik)	2458,0818 N
7	Gaya Difraksi (Numerik)	2368,24 N

Gaya gelombang yang dihasilkan pada perhitungan secara analitikal menggunakan teori morison adalah 2458,0818 N, sedangkan hasil *exciting force* menggunakan teori difraksi adalah 2368,24 N. Hasil gaya gelombang antara kedua perhitungan tersebut memiliki perbedaan sebesar 1,04%, sehingga hasilnya valid dan bisa digunakan pada penelitian ini.

Perbandingan hasil perhitungan untuk RAO analitikal dan pemodelan numerik direpresentasikan pada gambar 3:



Gambar 3. Perbandingan RAO *Heave* hasil perhitungan analitik dengan RAO *Heave* pemodelan numerik

Hasil yang diperoleh diatas menunjukkan bahwa perbedaan antara perhitungan RAO *motion* analitik dengan output pemodelan numerik sangat kecil, yakni 3,68%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa input yang diberikan pada pemodelan numerik (Khususnya RAO *Motion*) adalah valid, sehingga bisa digunakan pada penelitian ini dan untuk struktur TLP *Fourstar* akan dianalisa langsung dengan pemodelan numerik yang menggunakan teori difraksi. Pada umumnya, didalam melakukan pemodelan secara numerik, analisa dilakukan secara per bagian struktur sehingga pada saat analisa dinamisnya tidak mencakup semua bagian struktur yang semestinya dianalisa sehingga menyebabkan perbedaan hasil yang ditimbulkan dari perhitungan analitikal dan pemodelan numerik.

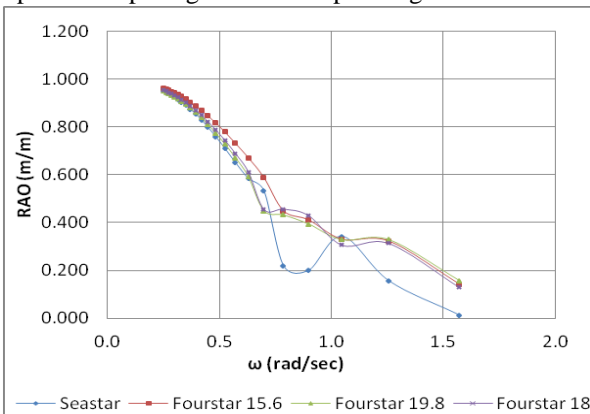
B. Pemodelan Struktur dan Analisa Hidrodinamis TLP *Fourstar*

Untuk pemodelan struktur TLP *Fourstar*, parameter yang disamakan dari TLP *A West Seno* adalah sarat desain, *hull displacement*, dan properti material. Data yang digunakan (tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang signifikan) menggunakan data lingkungan Selat Makassar. Perubahan desain telapak kaki TLP *Seastar* menjadi TLP *Fourstar* dengan berbagai macam variasi kolom mengacu kepada *displacement* dari TLP *A West Seno* yakni sebesar 23059 ton. Perubahan ini mensyaratkan hasil *displacement*nya memiliki hasil sedekat mungkin dan mempunyai error kurang dari 1%. Hasil perubahan desain struktur TLP *Seastar* menjadi TLP *Fourstar* memiliki perbedaan paling besar di TLP *Fourstar* diameter 19,8 meter yakni 0,98%. Secara lengkap, perubahan desain nya dapat dilihat pada tabel 4:

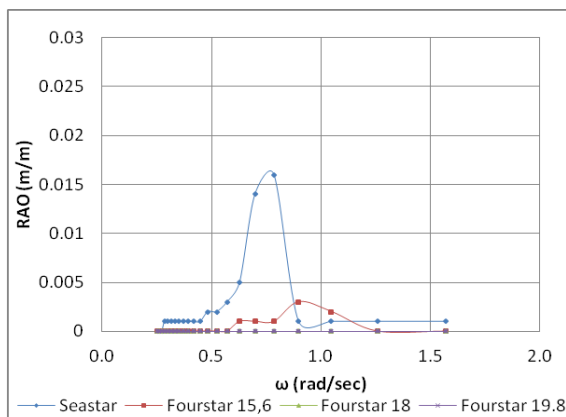
Tabel 4. Validasi Displacement

Item	Operasional Draft		Error (%)
	West Seno (ton)	Numerik (ton)	
<b>Seastar</b>			
Displacement (ton)	23059	22849	-0.9
<b>Fourstar 15,6 m</b>			
Displacement (ton)	23059	23090	0.13
<b>Fourstar 18 m</b>			
Displacement (ton)	23059	23260	0.87
<b>Fourstar 19,8 m</b>			
Displacement (ton)	23059	22833	-0.98

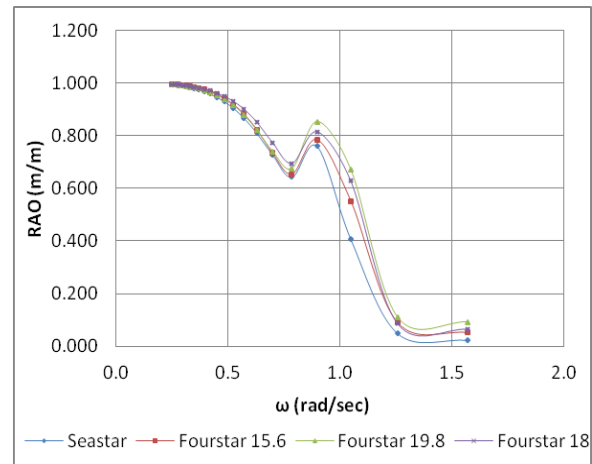
Dari hasil pemodelan numerik diperoleh bahwa TLP *Seastar* dan TLP *Fourstar* dengan variasi diameter *hull* memberikan respon yang berbeda. Analisa respon dinamis untuk TLP *Seastar* dan TLP *Fourstar* keadaan *free floating* dilakukan pada arah gelombang yang paling signifikan, yakni  $0^0$ , mengingat respon yang terjadi pada arah ini cenderung lebih besar dibandingkan pada arah gerakan yang lain. Perbandingan respon dinamis antara dua TLP tersebut untuk arah gelombang  $0^0$  dapat dilihat pada gambar 4 sampai dengan 9 :



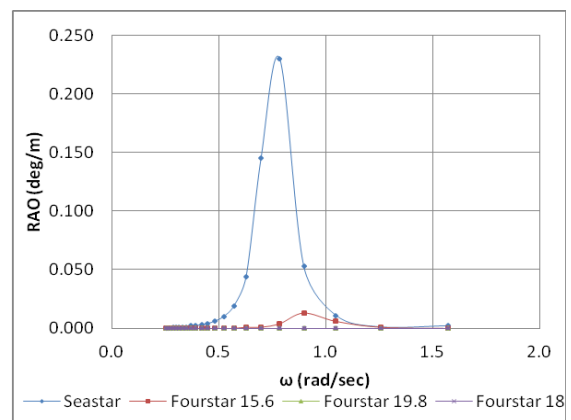
Gambar 4. Perbandingan RAO Surge TLP *Seastar* dan TLP *Fourstar* pada arah gelombang  $0^0$



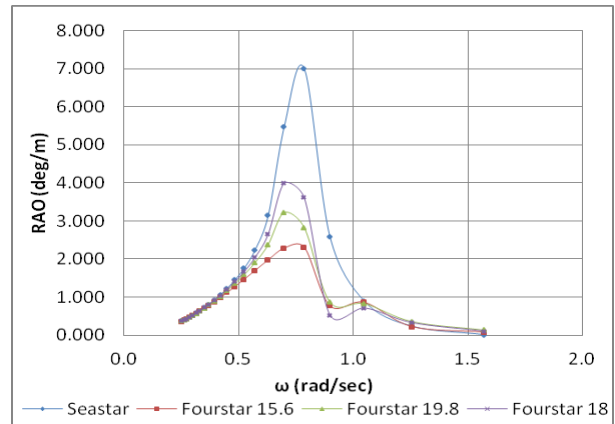
Gambar 5. Perbandingan RAO Sway TLP *Seastar* dan TLP *Fourstar* pada arah gelombang  $0^0$



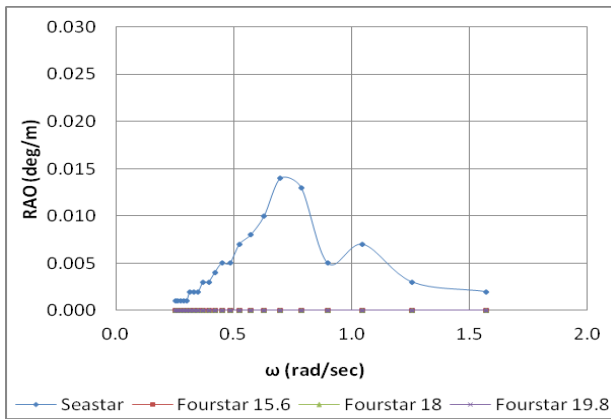
Gambar 6. Perbandingan RAO Heave TLP *Seastar* dan TLP *Fourstar* arah gelombang  $0^0$



Gambar 7. Perbandingan RAO Roll TLP *Seastar* dan TLP *Fourstar* pada arah gelombang  $0^0$



Gambar 8. Perbandingan RAO Pitch TLP *Seastar* dan TLP *Fourstar* pada arah gelombang  $0^0$

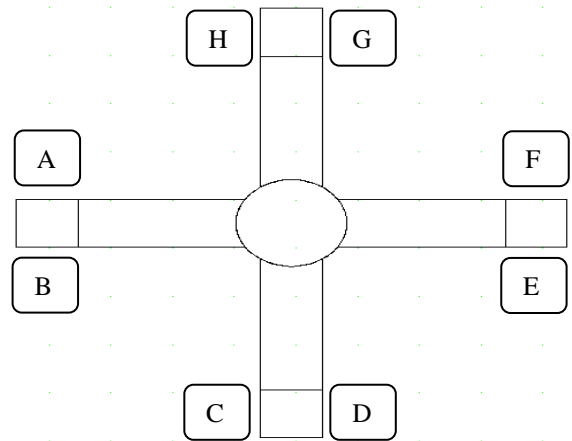


Gambar 9. Perbandingan RAO Yaw TLP Seastar dan TLP Fourstar pada arah gelombang 0°

Untuk gerak translasi surge dan heave dengan arah gelombang 0°, TLP Fourstar untuk semua variasi diameter hull maupun TLP Seastar menunjukkan respon yang cenderung sama pada rentang frekuensi yang sama. Sedangkan untuk arah sway, TLP Seastar menunjukkan respon yang lebih besar dibandingkan dengan TLP Fourstar yang mempunyai konfigurasi yang simetris. Nilai respon gerak maksimum pada TLP Seastar adalah 0,016 m/m, sedangkan untuk TLP Fourstar menunjukkan nilai respon sebesar 0,003 m/m. Sama halnya dengan gerak translasi sway, pada gerak rotasional roll, pitch maupun yaw, TLP Seastar memiliki respon yang lebih besar dibandingkan dengan TLP Fourstar. TLP Seastar yang memiliki konfigurasi 120° cenderung memiliki respon gerak rotasional yang lebih besar dibandingkan dengan TLP Fourstar yang memiliki konfigurasi lebih simetris, yakni 90° antar kaki. Namun ketika struktur ditambatkan, maka untuk gerak vertical seperti heave, roll dan pitch akan cenderung tidak mempunyai respon dikarenakan adanya pretension yang diberikan pada TLP. Secara signifikan, keberadaan tendon mampu mereduksi respon gerak TLP pada enam derajat kebebasannya, sehingga respon yang ditimbulkan akan bernilai sangat kecil.

C. Analisa Tension Pada Tendon TLP Fourstar

Selain mencari perbandingan respon pada kedua TLP, pada penelitian ini juga dilakukan analisa tension yang terjadi pada TLP Fourstar. Pemasangan tendon pada struktur TLP dapat lebih mereduksi respon gerak pada enam derajat kebebasannya. Namun demikian, reduksi pada gerak struktur ini berimplikasi pada timbulnya tension (gaya tarik) pada tendon karena tendon menahan hull TLP tetap berada pada posisi operasionalnya. Tension yang terjadi tidak boleh lebih dari tension yang diizinkan sesuai dengan tegangan yield yang diketahui, yaitu sebesar 358,60 Mpa.



Gambar 10. Sistem penomoran tendon pada analisa tension untuk TLP Fourstar

Penomoran tendon ditujukan untuk memudahkan identifikasi letak tendon yang memiliki tension paling besar atau maksimum. Analisa tension pada TLP Fourstar dilakukan pada semua kondisi pembebanan baik kondisi operasi maupun kondisi badai. Tension paling maksimum yang terjadi pada TLP Fourstar adalah pada saat kondisi badai pembebanan 100 tahunan dengan magnitude sebesar 8119,19 kN. Tension maksimum ini terjadi pada kaki SG dan SH untuk TLP Fourstar dengan diameter hull adalah 18 m dengan tegangan yield yang terjadi adalah 23,6 Mpa. Tegangan yang terjadi pada tendon TLP Fourstar masih dikategorikan sangat aman dari tegangan yield yang diketahui, yaitu sebesar 358,6 Mpa.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- a. Hasil perhitungan beban gelombang dan respon pada TLP Seastar secara analitikal dan numerik mempunyai perbedaan yang tidak signifikan. Perhitungan yang diuji adalah perhitungan RAO motion pada arah heave. RAO yang dihasilkan melalui perhitungan secara analitikal menggunakan beban gelombang morison pada arah heave memiliki perbedaan hasil sebesar 3,68% dengan RAO yang dianalisa menggunakan pemodelan numerik pada arah yang sama.
- b. Perubahan desain telapak kaki TLP Seastar menjadi TLP Fourstar dengan berbagai macam variasi kolom mengacu kepada displacement dari TLP A West Seno yakni sebesar 23059 ton. Desain TLP Seastar memiliki displacement sebesar 22849 ton (error -0,9%) sedangkan untuk TLP Fourstar yang diameter kolom 15,6 meter memiliki displacement 23090 ton (error 0.13%), TLP Fourstar diameter 18 meter memiliki displacement 23260 ton (error 0.87%), dan TLP Fourstar diameter 19.8 meter memiliki displacement 22833 ton (error -0.98%).

- c. Pada arah gelombang  $0^0$  kondisi *free floating* untuk enam derajat kebebasan, respon yang ditimbulkan oleh TLP *Seastar* cenderung menunjukkan respon yang lebih besar dibandingkan dengan TLP *Fourstar*. Konfigurasi telapak kaki yang lebih simetris menyebabkan respon yang ditimbulkan lebih kecil. Namun ketika struktur ditambatkan untuk kedua TLP, respon pada gerak vertical menunjukkan nilai yang mendekati 0. Hal ini dikarenakan adanya *pretension* yang diberikan pada TLP, sehingga TLP tersebut mampu menjaga struktur agar berada tetap pada tempatnya. Sedangkan untuk arah gerak *surge*, *sway* dan *yaw*, kedua TLP mempunyai nilai yang hampir sama.
- d. *Tension* maksimum yang terjadi pada TLP *Fourstar* masing-masing adalah 7523,93 kN untuk *Fourstar* diameter kolom 15,6 meter, 8119,19 kN untuk *Fourstar* diameter kolom 18 meter, 5931,04 kN untuk diameter kolom 19,8 meter. Sehingga perbandingan dari *tension* maksimumnya adalah 1,268 : 1,368 : 1.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Z. Kurnia, "Analisa Tegangan Pada Tendon Porch Akibat Gerakan Tension Leg Platform (TLP)," Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya (2006).
- [2] S. Chandrasekaran, A. K. Jain, dan Anupam Gupta, "Influence of Wave Approach Angle on TLP's Response," *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 34, No 8-9 (2007) 1322-1327.
- [3] J. Sutomo, *Handout Hidrodinamika II*, Surabaya : FTK – ITS (1999).
- [4] Xiaohong Cheng, Yu Ding, Jun Zhang, Pierre Liagre, John Niedzwecki, dan Per Teigen, "Coupled Dynamic Analysis of A Mini TLP ; Comparison With Measurements," *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 33, No. 1 (2006) 93-117.
- [5] M. Yang, B. Teng, D. Ning, dan Z. Shi, "Coupled Dynamic Analysis For Wave Interaction With a Truss Span and its Mooring Line / Riser System in Time Domain," *Journal of Ocean Engineering*, No. 39 (2012, Jan.) 72-87.
- [6] Offspring International Limited. TLP *Seastar* dan *Fourstar* [Online]. Available: [www.offshoremoorings.com](http://www.offshoremoorings.com).
- [7] Muhittin Soylemez dan O. Yilmaz, "Hydrodynamic Design of a TLP Type Offloading Platform," *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 30, No. 10. (2003) 1269-1282.
- [8] SBM Atlantia (2012). *Matterhorn Seastar TLP* [Online]. Available: "<http://www.sbmatlantia.com/products/floatingsolutions/tlps/seastar/matterhorn>.
- [9] Report Re-Assesment TLP A West Seno, Australian Marine & Offshore Group (2003).
- [10] S. Chandrasekaran dan A. K. Jain, "Dynamic Behaviour of Square and Triangular TLPs Under Regular Wave Loads," *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 29, No. 3 (2002, Mar.) 279-315.