

Kehandalan Struktur Anjungan Lepas Pantai Terpancang Empat Kaki di Perairan Natuna

Mochammad Fathurridho Hermanto^{1*}, Nafisa Nandalianadhira¹

¹Program Studi Teknik Kelautan Institut Teknologi Sumatera

Jl. Terusan Ryacudu Way Huwi Jati Agung Kabupaten Lampung Selatan Provinsi Lampung 35365

*mochammad.hermanto@kl.itera.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v15i3.16663>

ABSTRACT

The design of offshore platforms in Indonesia generally uses Working Stress Design (WSD) method rather than Load and Resistance Factor Design (LRFD) method. Whereas the LRFD method produces designs that better describe real conditions with load and capacity factors. The load and capacity factors are obtained from consideration of the uncertainty or randomness of their values. One of the load factors used is the environmental load factor. The environmental load factor of LRFD method is obtained based on environmental characteristics not in Indonesian waters. There are differences in the environmental characteristics of each water. Uncertainty of environmental loads in the offshore platforms design is wave height, current velocities, and wind speed. To get a structure designed according to the characteristics of the waters in Indonesia, an environmental load factor is needed in accordance with the characteristics of Indonesian water. To achieve that, structural reliability analysis is needed. Structures reliability represents the possibility of the structure's performance criteria being met which is expressed by the reliability index. The reliability index of structures designed using the WSD method used as a reference for LRFD method. In this study, reliability analysis was carried out using the reserve strength ratio value from the pushover analysis on WSD method. The reliability index of the structure model is 4.10. This value is categorized as high reliability. This results can be used as a reference to determine the environmental load factor of Indonesian water in the future.

Key words : reliability analysis, offshore platform, environmental load, wave, pushover analysis

PENDAHULUAN

Minyak dan gas masih mendominasi sumber energi Indonesia pada tahun 2021. Minyak dan gas mendominasi dengan 50.5% dari seluruh sumber energi di Indonesia (Kementerian ESDM, 2022). Namun, dominasi tersebut menurun setiap tahunnya. Sejak tahun 2015, rerata penurunannya adalah 1.3% pertahun (Kementerian ESDM, 2022). Penurunan tersebut dikarenakan energi terbarukan yang sedang ditingkatkan belakangan ini, termasuk di Indonesia. Oleh karena itu, desain anjungan lepas pantai harus lebih efisien agar minyak dan gas dapat tetap bersaing dengan alternatif sumber energi lainnya yang sedang berkembang, namun tetap harus memenuhi standar desain.

Desain atau rancangan anjungan lepas pantai dapat menggunakan 2 metode yaitu *Working Stress Design* (WSD) dan *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) (Paramashanti & Tawekal,

2018). Standar desain yang umumnya dipakai adalah API RP-2A (*American Petroleum Institute Recommended Practice*), baik WSD maupun LRFD. Metode WSD mempertimbangkan faktor keamanan tanpa mempertimbangkan ketidakpastian (Nizamani et al., 2014). Sedangkan metode LRFD mempertimbangkan ketidakpastian pada material dan beban dalam bentuk faktor beban dan faktor tahanan (Nizamani et al., 2014).

Metode WSD lebih mudah digunakan dibandingkan metode LRFD sehingga lebih sering digunakan untuk mendesain anjungan lepas pantai di Indonesia (Paramashanti & Tawekal, 2018). Namun dengan menggunakan metode LRFD, struktur akan memiliki kehandalan yang lebih tinggi tanpa membutuhkan biaya yang lebih besar (Efthymiou et al., 1997). Dengan kata lain, struktur yang didesain menggunakan metode LRFD akan lebih efisien.

Cite this as:

Hermanto, M.F & Nandalianadhira, N. (2022). *Kehandalan Struktur Anjungan Lepas Pantai Terpancang Empat Kaki di Perairan Natuna*. *Rekayasa* 15 (3). 283-291.

doi: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v15i3.16663>.

Article History:

Received: August, 26th 2022; **Accepted:** December, 4th 2022

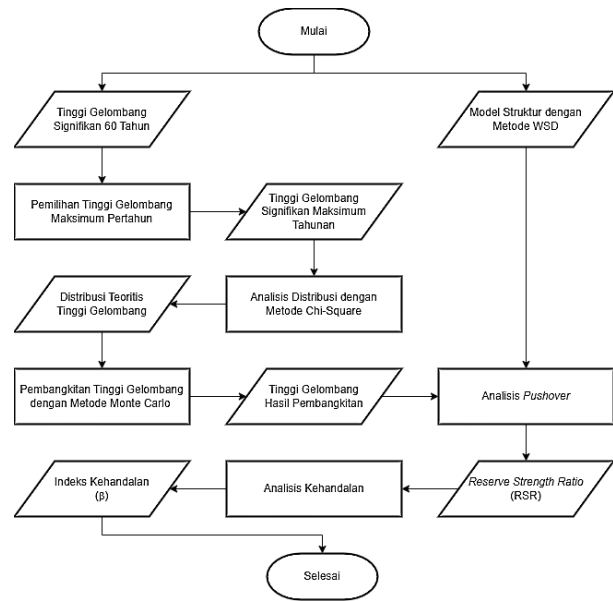
Rekayasa ISSN: 2502-5325 has been Accredited by Ristekdikti (Arjuna) Decree: No. 23/E/KPT/2019 August 8th, 2019 effective until 2023

Faktor beban pada standar desain API RP-2A LRFD, yang dipakai secara umum, diturunkan berdasarkan karakteristik lingkungan perairan Teluk Meksiko. Hal tersebut tentu menghasilkan struktur yang boros (van de Graaf *et al.*, 1994). Tentunya karakteristik perairan Teluk Meksiko berbeda dengan perairan Indonesia. Sebagai contoh, perairan Teluk Meksiko memiliki gelombang yang lebih ekstrim dan tinggi gelombang signifikannya (H_s) mencapai 12.05 m (Korobkin & D'Sa, n.d.). Pada penelitian lain, Wen & Banon (1991) menyatakan bahwa tinggi gelombang 100 tahunan (H_{100}) di Teluk Meksiko mencapai 21.5 m. Dengan menggunakan API RP-2A LRFD, tentu struktur anjungan lepas pantai di Indonesia yang dihasilkan akan lebih konservatif. Dengan mengetahui faktor beban yang diturunkan berdasarkan kondisi lingkungan perairan Indonesia maka desain dari anjungan lepas pantai tentunya akan lebih efisien dibandingkan menggunakan faktor beban pada standar desain API RP-2A LRFD. Faktor pada metode LRFD dapat diperoleh dari perhitungan kehandalan dari komponen struktur yang sama dengan yang diperhitungkan pada metode WSD (Efthymiou *et al.*, 1997). Kehandalan struktur diwakilkan dengan indeks kehandalan. Perhitungan indeks kehandalan struktur dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan, diantaranya adalah analisis *fatigue* (R. L. Tawekal & Heriana, 2007) dan analisis *pushover*.

Pada penelitian ini, analisis *pushover* pada struktur anjungan lepas pantai di perairan Natuna akan dilakukan untuk mendapatkan nilai indeks kehandalan. Analisis *pushover* dilakukan dengan menggunakan beban lingkungan. Diharapkan kedepannya, nilai indeks kehandalan tersebut dapat dijadikan acuan untuk menentukan faktor beban lingkungan pada metode LRFD untuk desain anjungan lepas pantai di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini hanya mempertimbangkan beban lingkungan berupa beban gelombang di Laut Natuna. Parameter beban lingkungan lain, seperti arus dan angin hanya memberikan kontribusi 10% dari total beban lingkungan (Wen & Banon, 1991). *Flowchart* penelitian ini secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pengolahan Data Gelombang

Penelitian ini hanya mempertimbangkan beban lingkungan berupa beban gelombang. Pengolahan data gelombang dilakukan untuk menentukan nilai acak dari tinggi gelombang signifikan sebagai masukan analisis *pushover*. Tinggi gelombang yang diolah adalah tinggi gelombang signifikan perjam. Analisis diawali dengan mengidentifikasi gelombang ekstrim maksimum pertahun, *annual maxima* (J. R. Tawekal & Tawekal, 2018). Parameter statistik diperlukan untuk membantu pengolahan data selanjutnya. Parameter statistik yang perlu diketahui antara lain rerata (μ_x), varian (var_x), standar deviasi (σ_x) dan koefisien varian (δ_x). Berturut turut persamaan parameter tersebut ditunjukkan pada persamaan 1 sampai persamaan 4.

$$\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots (1)$$

$$var_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_x = \sqrt{var_x} \dots\dots\dots (3)$$

$$\delta_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \dots\dots\dots (4)$$

Distribusi data tinggi gelombang acak terlebih dahulu dicari distribusinya untuk mendapatkan jenis distribusi yang paling sesuai (*goodness of fit test*). Distribusi yang akan diuji terhadap data tinggi gelombang pada penelitian ini adalah Normal dan Log-Normal. Distribusi Normal merepresentasikan pendekatan yang konservatif terhadap sebaran data. Sedangkan distribusi Log-

Normal memberikan pendekatan yang lebih realistis terhadap sebaran data (Holický *et al.*, 2016). Distribusi tersebut dinyatakan dengan probabilitas kejadian suatu nilai, *probability density function* (PDF). Distribusi Normal dan Log-Normal ditunjukkan pada persamaan 5 dan 6.

$$DF_N(x) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (5)$$

$$DF_{LN}(x) = \frac{1}{x \sqrt{2\pi \ln(1 + \delta_x^2)}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \left(\ln \mu_x - \frac{1}{2} \ln(1 + \delta_x^2) \right)}{\sqrt{\ln(1 + \delta_x^2)}} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (6)$$

Goodness of fit test pada data gelombang signifikan perjam maksimum pertahun dilakukan menggunakan metode *chi-square*. Metode ini menggunakan selisih nilai frekuensi data pada setiap interval dengan frekuensi teoritis suatu distribusi (Haldar & Mahadevan, 2000). Distribusi yang paling sesuai adalah distribusi yang memiliki nilai *error* terkecil terhadap data tinggi gelombang. Oleh karena itu, nilai *error* dapat ditulis seperti pada persamaan 7.

$$Error = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \dots \dots \dots (7)$$

Distribusi teoritis tinggi gelombang kemudian digunakan membangkitkan data tinggi gelombang acak. Pembangkitan tersebut menggunakan simulasi Monte Carlo. Pembangkitan data dengan metode ini akan memberikan sejumlah N data gelombang acak sesuai dengan jenis distribusi, rerata dan standar deviasi yang diberikan. Nilai acak tinggi gelombang hasil pembangkitan (H_p) digunakan untuk analisis *pushover* model struktur.

Analisis Pushover

Analisis *pushover* dilakukan pada model struktur anjungan lepas pantai terpancang 4 kaki. Analisis tersebut dilakukan dengan memberikan beban gravitasi bersamaan dengan menaikkan beban lateral secara bertahap dengan nilai yang kecil sampai struktur mengalami keruntuhan (*collapse*) (Kadid & Boumrkik, 2008). Pada penelitian ini, beban lateral yang digunakan adalah beban lingkungan berupa gelombang. Luaran dari analisis *pushover* ini adalah nilai *reserve strength ratio* (RSR). RSR adalah rasio antara beban lateral pada struktur saat mengalami *collapse* ($F_{collapse}$) dengan beban lateral desain struktur ($F_{initial}$) (Bai & Jin, 2016). RSR dapat ditentukan berdasarkan

persamaan 8. Nilai minimum RSR untuk struktur yang didesain dengan standar desain API RP-2A WSD ditunjukkan pada Tabel 1. Pada penelitian lain, nilai RSR sebesar 2.0 bisa dijadikan syarat minimum (Ersdal *et al.*, 2003). Nilai tersebut akan menjadi masukan untuk analisis kehandalan.

$$RSR = \frac{F_{collapse}}{F_{initial}} \dots \dots \dots (8)$$

Tabel 1. Nilai Minimum RSR Berdasarkan *Exposure Category* (American Petroleum Institute, 2002)

Level	Exposure Category	Ultimate Strength Analysis
L-1	High Consequence	RSR ≥ 1.6
L-3	Low Consequence	RSR ≥ 0.8

Analisis Kehandalan

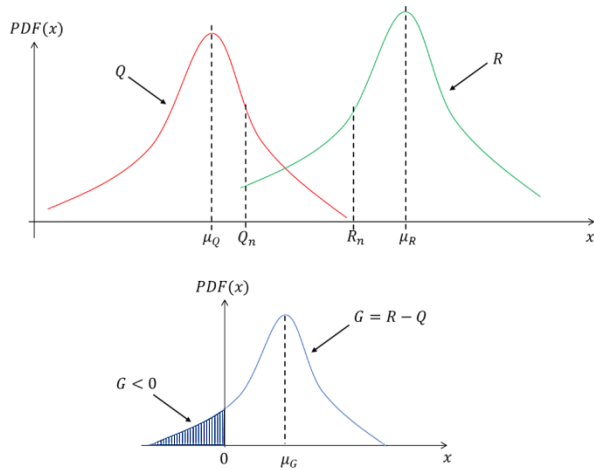
Analisis kehandalan bertujuan untuk menentukan probabilitas struktur dapat memenuhi fungsi performansi desain dengan segala ketidakpastian mungkin terjadi. Ketidakpastian yang dimaksud adalah ketidakpastian kapasitas atau tahanan struktur dan atau ketidakpastian beban yang mengenai struktur. Dengan kata lain, parameter tahanan dan beban yang digunakan bersifat acak. Secara umum fungsi performansi untuk mengakomodasi ketidakpastian tersebut dapat dinyatakan seperti pada persamaan 9.

$$G(R, Q) = R - Q \dots \dots \dots (9)$$

Dimana R menyatakan distribusi tahanan struktur dan Q menyatakan distribusi beban yang bekerja pada struktur. Suatu struktur dinyatakan gagal jika G bernilai kurang dari 0. Dengan begitu, probabilitas kegagalan suatu struktur dapat dinyatakan dengan persamaan 10.

$$P_f = P(R - Q < 0) \dots \dots \dots (10)$$

Sketsa distribusi parameter tahanan (R) dan beban (Q) ditunjukkan pada Gambar 1. Suatu struktur dinyatakan berhasil jika G bernilai lebih dari 0. Dengan begitu, probabilitas keberhasilan suatu struktur memenuhi fungsi performansi dapat dinyatakan dengan persamaan 11. Dengan total probabilitas kegagalan dan keberhasilan adalah 1, maka probabilitas keberhasilan suatu struktur memenuhi fungsi performansi dapat dinyatakan juga dengan persamaan 12.



Gambar 1. Sketsa distribusi parameter tahanan (*R*) dan beban (*Q*)

Suatu struktur dinyatakan berhasil jika *G* bernilai lebih dari 0. Dengan begitu, probabilitas keberhasilan suatu struktur memenuhi fungsi performansi dapat dinyatakan dengan persamaan 11. Dengan total probabilitas kegagalan dan keberhasilan adalah 1, probabilitas keberhasilan suatu struktur memenuhi fungsi performansi dapat dinyatakan juga dengan persamaan 12.

$$P_s = P(R - Q > 0) \dots \dots \dots (11)$$

$$P_s = 1 - P_f \dots \dots \dots (12)$$

Untuk struktur praktis, sulit untuk menghitung probabilitas kegagalan struktur secara akurat (Haldar & Mahadevan, 2000). Estimasi probabilitas kegagalan struktur dapat dihitung dengan metode statistik *First Order Second Moment* (FOSM). FOSM memungkinkan peninjauan terhadap variabel acak dengan beragam fungsi distribusi (R. L. Tawekal, 2004; R. L. Tawekal *et al.*, 2010). Perhitungan indeks kehandalan dengan metode FOSM ditunjukkan pada persamaan 13.

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \dots \dots \dots (13)$$

Batasan nilai indeks kehandalan tidak diatur dalam API RP-2A WSD. Bai & Jin (2016) mengatur klasifikasi indeks kehandalan yang ditampilkan pada Tabel 2. Struktur memiliki kehandalan yang tinggi jika nilai indeks kehandalan diatas 3.72.

Tabel 2. Klasifikasi nilai indeks kehandalan

Safety Classes	Target (P_f)	Reliability Index (β)
Low	10^{-2}	2.32
Normal	10^{-3}	3.09
High	10^{-4}	3.72

HASIL PEMBAHASAN

Studi Kasus

Struktur yang ditinjau pada penelitian ini adalah struktur anjungan lepas pantai jenis *well head fixed platform* dengan 4 kaki. Model struktur tersebut didesain untuk beroperasi di perairan Natuna, Kepulauan Riau seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Kedalaman perairan di lokasi struktur adalah 94.90 meter dari LAT dengan tunggang pasang 2.60 meter. Parameter beban lingkungan lainnya ditunjukkan pada Tabel 3.



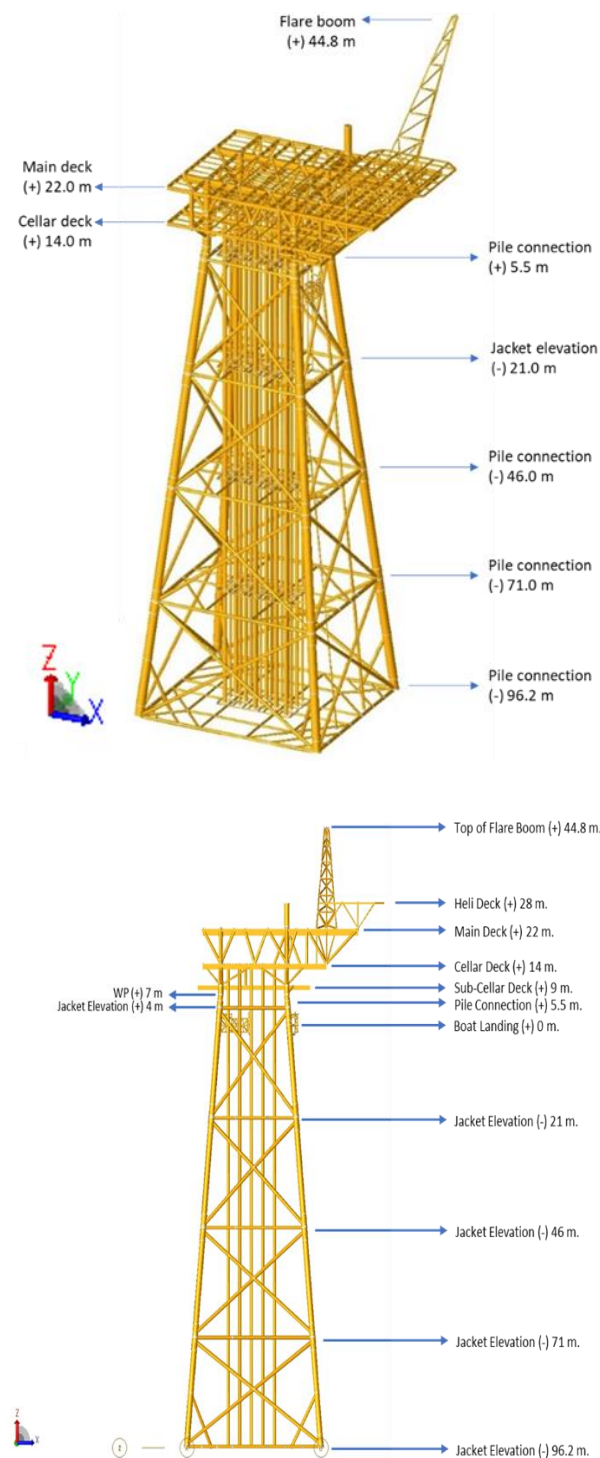
Gambar 2. Lokasi Struktur Ditunjukkan Dengan Penunjuk Berwarna Kuning

Tabel 3. Parameter Lingkungan pada Model

Parameter Lingkungan	Periode Ulang (tahun)	
	1	100
Tinggi gelombang (m)	5.6	10.6
Periode gelombang (s)	8.3	10.3
Kecepatan angin 1 menit (m/s)	16.8	24.0
Kecepatan arus maksimum (m/s)	0.9	1.0

Parameter beban lingkungan tersebut digunakan sewaktu struktur didesain. Struktur didesain dengan metode WSD dengan standar API RP-2A WSD. Hasil desain struktur, yang akan ditinjau pada penelitian ini dan elevasi penting pada struktur diilustrasikan pada Gambar 3. Model struktur tersebut dimodelkan dengan bagian *pile*, *jacket* dan *deck*. *Pile* dimodelkan memiliki kemiringan jenis *double batter* dengan perbandingan 10:1 ke segala arah kemiringan. *Jacket* dimodelkan memiliki 5 tingkat *horizontal bracing* dan *diagonal bracing* jenis X. *Deck* dimodelkan memiliki 3 tingkat, *sub-cellar deck*, *cellar deck* dan *main deck*. Model struktur tersebut memiliki berat keseluruhan 4.356,5 ton. Dimensi dan spesifikasi material dari komponen struktur

yang akan ditinjau pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.



Gambar 3. Model Struktur Anjungan Lepas Pantai Terpancang 4 Kaki

Tabel 4. Member pada Model Struktur

Komponen Struktur	Diameter Luar (cm)	Tebal (cm)	Spesifikasi Material
Pile	180	5	ASTM A572 Gr.50

Komponen Struktur	Diameter Luar (cm)	Tebal (cm)	Spesifikasi Material
Jacket Leg	190	1.6	ASTM A36
Jacket Horizontal Bracing	66.04	2.54	API 5L Gr.B
	45.72	1.27	
	27.31	1.27	
Jacket Diagonal Bracing	71.12	1.27	
Flare Boom	27.31	0.64	
	71.12	2.54	
	66.04	1.91	
	35.56	0.53	
Deck Bracing	71.12	2.54	ASTM A572 Gr.50
	91.44	2.54	
	170	4.5	
Deck Leg	170	3	
	170	3	
	160	1.5	

Pengolahan Data Gelombang

Pengolahan data tinggi gelombang signifikan perjam selama 60 tahun dilakukan pada perairan Natuna. Data tersebut diseleksi untuk mendapatkan tinggi gelombang maksimum setiap tahunnya.

Tabel 5. Data Gelombang Perairan Natuna

No	Tahun	H (m)	No	Tahun	H (m)	No	Tahun	H (m)
1	1956	7.78	21	1976	9.73	41	1996	7.42
2	1957	7.54	22	1977	9.67	42	1997	8.46
3	1958	8.68	23	1978	7.26	43	1998	6.89
4	1959	9.19	24	1979	7.19	44	1999	9.99
5	1960	9.12	25	1980	6.95	45	2000	6.22
6	1961	8.99	26	1981	8.55	46	2001	7.09
7	1962	9.50	27	1982	7.98	47	2002	6.30
8	1963	9.51	28	1983	8.35	48	2003	8.78
9	1964	8.30	29	1984	7.71	49	2004	7.04
10	1965	7.89	30	1985	6.73	50	2005	8.34
11	1966	7.17	31	1986	10.01	51	2006	7.93
12	1967	9.66	32	1987	8.28	52	2007	6.47
13	1968	6.73	33	1988	8.50	53	2008	7.75
14	1969	8.60	34	1989	8.22	54	2009	9.31
15	1970	7.57	35	1990	7.60	55	2010	7.66
16	1971	9.55	36	1991	7.64	56	2011	8.51
17	1972	7.89	37	1992	8.19	57	2012	7.94
18	1973	9.40	38	1993	9.52	58	2013	7.65
19	1974	9.35	39	1994	6.31	59	2014	7.09
20	1975	10.15	40	1995	8.83	60	2015	7.51

Data gelombang tersebut memiliki parameter statistik yang dirangkum pada Tabel 6. Sebagai perbandingan, tinggi gelombang pada perairan Natuna berkisar antara 5.2 – 5.7 meter dan 6.0 – 8.0 meter (Muliati, 2019; Wurjanto *et al.*, 2021). Data tinggi gelombang yang digunakan pada penelitian tersebut sama besarnya dengan hasil penelitian kedua namun lebih besar dibandingkan penelitian pertama.

Tabel 6. Parameter Statistik Data Gelombang

No	Parameter Statistik	Nilai
1	Rerata (μ_H)	8.17
2	Varian (var_H)	1.09
3	Standar deviasi (σ_H)	1.04
4	Koefisien varian (δ_H)	0.13

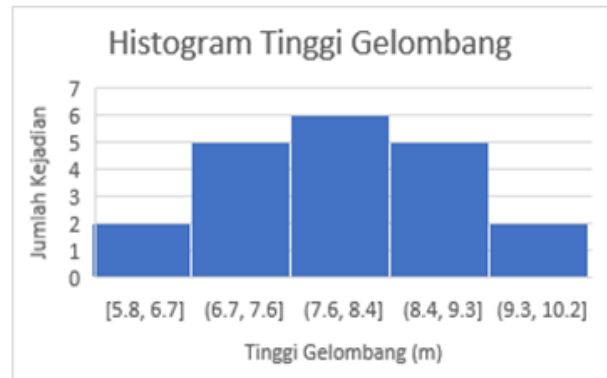
Data gelombang dan parameter statistik tersebut digunakan untuk analisis distribusi. Distribusi yang akan diuji kesesuaiannya terhadap data gelombang di atas adalah distribusi Normal dan Log Normal. Dari analisis distribusi di atas, didapatkan total nilai *error* berdasarkan metode *Chi-square* untuk metode normal 0.13191 dan Log Normal 0.14543. Berdasarkan hasil tersebut, distribusi normal menghasilkan *error* terkecil. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa data gelombang perairan Natuna paling sesuai dengan distribusi normal. Distribusi Normal kemudian digunakan sebagai dasar distribusi pembangkitan tinggi gelombang baru. Tinggi gelombang baru yang dibangkitkan ini bersifat acak. Data tinggi gelombang hasil pembangkitan dengan distribusi Normal ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Data Tinggi Gelombang Hasil Pembangkitan

No	H_p (m)
1	5.81
2	6.54
3	6.69
4	6.85
5	7.02
6	7.46
7	7.53
8	7.66
9	7.74
10	7.94
11	8.13
12	8.31
13	8.34
14	8.49
15	8.55
16	8.79
17	8.95
18	9.13
19	9.91
20	10.19

Histogram tinggi gelombang ditunjukkan pada Gambar 4. Data hasil pembangkitan tersebut memiliki parameter statistik yang sama dengan data gelombang semula. Data gelombang hasil

pembangkitan ini yang akan digunakan sebagai beban lingkungan pada analisis *pushover*.



Gambar 4. Histogram Tinggi Gelombang

Analisis Pushover

Dengan menggunakan data gelombang hasil pembangkitan (H_p), analisis *pushover* dilakukan terhadap struktur yang sudah dibahas sebelumnya. Hasil analisis *pushover* adalah nilai *base shear* pada saat struktur *collapse* ($F_{collapse}$). Nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan beban lateral desain struktur ($F_{initial}$) untuk mendapatkan RSR. Hasil analisis *pushover* struktur tinjauan dengan tinggi gelombang hasil pembangkitan ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Analisis *Pushover* pada Struktur

No	$F_{collapse}$ (kN)	$F_{initial}$ (kN)	RSR
1	16203.87	2750.62	5.891
2	16592.67	3191.8	5.199
3	18101.86	3276.53	5.525
4	19112.24	3347.27	5.710
5	19375.23	3430.33	5.648
6	19146.63	3672.49	5.214
7	19584.43	3710.3	5.278
8	20512.54	3781.35	5.425
9	20035.82	3828.64	5.233
10	19777.62	3932.69	5.029
11	18076.13	4028.22	4.487
12	19424.81	4135.14	4.697
13	18968	4149.79	4.571
14	16788.99	4245.13	3.955
15	16085.02	4274.02	3.763
16	16828.85	4415.62	3.811
17	17220.56	4513.58	3.815
18	18349.25	4586.54	4.001

No	$F_{collapse}$ (kN)	$F_{initial}$ (kN)	RSR
19	19204.56	5124.7	3.747
20	18653.53	5316.49	3.509

Seluruh RSR hasil analisis *pushover* menunjukkan nilai diatas 1.6. Rerata RSR (μ_{RSR}) adalah 4.725. Standar deviasi RSR (σ_{RSR}) adalah 0.763. Struktur di Teluk Meksiko dan Laut Utara yang didesain dengan metode LRFD dengan faktor beban 1.35 menghasilkan nilai RSR 2.2 (van de Graaf et al., 1994) dengan tinggi gelombang deain (H_{100}) sebesar 31.0 meter. Berdasarkan hasil RSR penelitian ini, yang di lakukan di Laut Natuna dengan tinggi gelombang desain 10.6 meter, dapat disimpulkan bahwa memang standar desain yang dipakai secara umum menghasilkan struktur yang boros. Standar desain yang umum dipakai secara umum menghasilkan struktur yang tidak boros untuk perairan Teluk Meksiko dan Laut Utara. Berdasarkan hasil RSR pada tabel di atas, struktur yang digunakan pada penelitan ini memenuhi syarat nilai RSR minimum berdasarkan API RP-2A WSD, 1.60. Dengan begitu, struktur dan nilai RSR tersebut dapat digunakan lebih lanjut untuk analisis kehandalan.

Analisis Kehandalan

Analisis kehandalan pada penelitian ini menggunakan keacakan tinggi gelombang sebagai parameter acak beban (Q). Batas minimum RSR berdasarkan API RP-2A WSD digunakan sebagai parameter tahanan struktur secara deterministik, tidak memiliki keacakan. Oleh karena itu, fungsi performasi dapat diatur dengan persamaan 14.

$$G(R, Q) = RSR - 1,6.....(14)$$

Probabilitas kegagalan pemenuhan fungsi performasi tersebut dapat dinyatakan seperti pada persamaan 15.

$$P_f = P(RSR - 1,6 < 0) \dots \dots \dots (15)$$

Perhitungan estimasi nilai indeks kehandalan (β) dengan menggunakan metode FOSM ditunjukkan pada perhitungan ini.

$$\beta = \frac{\mu_{RSR}-1.6}{\sqrt{\sigma_{RSR}^2+0}} = \frac{4.725-1.6}{0.763} = 4.10$$

Indeks kehandalan yang didapatkan berdasarkan nilai RSR adalah 4.10. Berdasarkan Bai & Jin (2016), struktur yang didesain dengan API RP2A-WSD ini termasuk struktur dengan indeks kehandalan yang tinggi. Di perairan Malaysia, mendapatkan nilai indeks kehandalan struktur yang didesain dengan API RP-2A WSD sebesar 3.44, 2.96 dan 3.96 (Cossa et al., 2012, 2013; Nizamani et al., 2014). Penelitian

tersebut menghasilkan nilai indeks kehandalan yang lebih kecil dibanding penelitian ini. Namun jika penelitian ini dibandingkan dengan penelitian Nizamani et al. (2014) saja, hasil penelitian ini tidak terlalu jauh. Hal tersebut dikarenakan penilaian kapasitas struktur berdasarkan *reserve strength ratio* (RSR) pada kedua penelitian.

Sedangkan Cossa et al. (2013) mendapatkan nilai indeks kehandalan berdasarkan *unity check* dari komponen struktur. Adapun Cossa et al. (2012) mendapatkan nilai indeks kehandalan berdasarkan kegagalan *axial tension* dan *bending* dari suatu member. Berdasarkan hasil indeks kehandalan struktur di Laut Natuna dan perairan Malaysia, dapat disimpulkan bahwa API RP-2A WSD menghasilkan struktur yang berlebih untuk perairan di luar Teluk Meksiko.

Berdasarkan tinjauan struktur dengan jumlah kaki lebih beragam, 4 kaki, 6 kaki dan 8 kaki, yang tersebar di 3 lokasi di perairan Malaysia mendapatkan nilai indeks kehandalan 3.76, 3.72 dan 3.32 (Nichols et al., 2014). Nilai tersebut lebih kecil dibandingkan dengan hasil penelitian ini. Hal tersebut dikarenakan penelitian tersebut juga mendapatkan nilai indeks kehandalan berdasarkan kapasitas struktur pada komponen struktur, sama dengan penelitian Cossa et al. (2013). Peninjauan kegagalan berdasarkan kapasitas komponen struktur menghasilkan nilai yang lebih konservatif atau struktur lebih cepat mengalami kegagalan.

Nilai indeks kehandalan lebih besar didapatkan untuk struktur yang didesain untuk perairan yang gelombangnya lebih rendah. Struktur di Laut Jawa dan laut tenggara Pulau Sumatera memiliki indeks kehandalan berdasarkan RSR berkisar antara⁽⁸⁾ 8.10 sampai 12.63 dan 5.49 (J. R. Tawekal & Tawekal, 2018; R. L. Tawekal et al., 2004). Indeks kehandalan sebesar itu diperoleh karena tinggi gelombang desain (H_{100}) di kedua perairan tersebut berkisar⁽⁹⁾ 2.0 – 5.0 m saja (Wurjanto et al., 2021). Nilai tersebut sangat rendah dibandingkan dengan tinggi gelombang desain dimana standar desain dikembangkan (Wen & Banon, 1991). (10)

KESIMPULAN DAN SARAN

Analisis kehandalan yang dilakukan terhadap struktur anjungan lepas pantai terpancang pada penelitian ini menghasilkan nilai indeks kehandalan 4.10. Hasil tersebut didapatkan dengan fungsi performasi berdasarkan nilai *reserve strength ratio* (RSR) pada struktur yang didesain

dengan API RP-2A WSD di Laut Natuna. Nilai tersebut selanjutnya bisa dijadikan acuan untuk penentuan faktor beban lingkungan desain anjungan lepas pantai. Untuk mendapatkan faktor beban yang lebih mengakomodir keadaan beban sesungguhnya, dibutuhkan mempertimbangkan lebih banyak variabel beban lingkungan dalam analisis kehandalan. Selain beban lingkungan sebagai parameter keacakan beban, parameter tahanan struktur juga diperlukan untuk penelitian lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- American Petroleum Institute. (2002). American Petroleum Institute, Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design, in API Recommended Practice 2A-WSD, ed.
- Bai, Y., & Jin, W.-L. (2016). *Marine structural design* (Second edition). Butterworth-Heinemann.
- Cossa, N. J., Potty, N. S., Idrus, A. B., Hamid, M. F. A., & Nizamani, Z. (2012). Reliability Analysis of Jacket Platforms in Malaysia-Environmental Load Factors. 8.
- Cossa, N. J., Potty, N. S., & Liew, M. S. (2013). Development of Partial Environmental Load Factor for Design of Tubular Joints of Offshore Jacket Platforms in Malaysia. *The Open Ocean Engineering Journal*, 6(1), 8–15. <https://doi.org/10.2174/1874835X01306010008>
- Efthymiou, M., van de Graaf, J. W., Tromans, P. S., & Hines, I. M. (1997). Reliability-Based Criteria for Fixed Steel Offshore Platforms. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 119(2), 120–124. <https://doi.org/10.1115/1.2829053>
- Ersdal, G., Sørensen, J. D., & Langen, I. (2003). Updating of Structural Failure Probability Based On Experienced Wave Loading. 9.
- Haldar, A., & Mahadevan, S. (2000). *Probability, reliability, and statistical methods in engineering design*. John Wiley.
- Holický, M., Retief, J. V., & Sýkora, M. (2016). Assessment of model uncertainties for structural resistance. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 45(2), 188–197.
- Kementerian ESDM. (2022). *Handbook Of Energy & Economic Statistics Of Indonesia 2021*.
- Muliati, Y. (2019). Wind Wave Modeling In Natuna Sea: A Comparison Among Swan, Seafine, And Era-Interim. *International Journal of GEOMATE*, 16(54). <https://doi.org/10.21660/2019.54.93272>
- Nichols, N., Khan, R., Rahman, A., Akram, M., & Chen, D. K. (2014). Load resistance factor design (LRFD) calibration of load factors for extreme storm loading in Malaysian waters. *Journal of Marine Engineering and Technology*, 13(2), 15.
- Nizamani, Z., Kurian, V. J., & Liew, M. S. (2014). Determination of environmental load factors for ISO 19902 code in offshore Malaysia using FORM structural reliability method. *Ocean Engineering*, 92, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.09.046>
- Paramashanti, & Tawekal, J. R. (2018). Environmental Load Factor Calibration For A Fixed Platform In The Java Sea. *International Journal of GEOMATE*, 49 8.
- Tawekal, J. R., & Tawekal, R. L. (2018). Risk reliability-based underwater inspection method for jacket platforms in Indonesia. *International Journal of Structural Integrity*, 9(5), 603–615. <https://doi.org/10.1108/IJSI-01-2018-0002>
- Tawekal, R. L. (2004). Perhitungan Faktor Beban Gaya Lingkungan Untuk Analisa Struktur Anjungan Lepas Pantai Dengan Metoda Lrfd. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 12(3), 16.
- Tawekal, R. L., Baskara, A. R., & Adriadi, R. (2004). Studi Kehandalan Struktur Anjungan Lepas Pantai Tipe Brace Monopod. *Jurnal Teknik Sipil*, 11(4), 179. <https://doi.org/10.5614/jts.2004.11.4.4>
- Tawekal, R. L., Baskara, A. R., & Adriadi, R. (2010). Studi Kehandalan Struktur Anjungan Lepas Pantai Tipe Brace Monopod. *Jurnal Teknik Sipil*, 11(4), 179. <https://doi.org/10.5614/jts.2004.11.4.4>
- Tawekal, R. L., & Heriana, R. (2007). Analisis Kehandalan Anjungan Lepas Pantai Tipe Jacket Berdasarkan Kapasitas Fatigue pada Sambungan. *Jurnal Teknik Sipil*, 14(2), 93. <https://doi.org/10.5614/jts.2007.14.2.3>
- van de Graaf, J. W., Tromans, P. S., & Efthymiou, M. (1994). The Reliability Of Offshore Structures And Its Dependence On Design Code And Environment. All Days, OTC-7382-MS. <https://doi.org/10.4043/7382-MS>

Wen, Y. K., & Banon, H. (1991). Development of Environmental Combination Design Criteria for Fixed Platforms in the Gulf of Mexico. All Days, OTC-6540-MS. <https://doi.org/10.4043/6540-MS>

Wurjanto, A., Mukhti, J. A., & Wirasti, H. D. (2021). Extreme Significant Wave Height Map of

Indonesia Based on SEAFINE and ERA5 Database. Journal of Engineering and Technological Sciences, 53(1), 210110. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.1.10>