

DESAIN DAN ANALISIS KEHANDALAN STRUKTUR *WELLHEAD PLATFORM* DI LAUT NATUNA

Auly Rakhman¹ dan Ricky Lukman Tawekal²

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10 Bandung 40132

¹aulry.rl@gmail.com dan ²ricky.ocean@itb.ac.id

ABSTRAK

Struktur lepas pantai bertujuan untuk eksploitasi minyak dan gas bumi. Pada tugas akhir ini, digunakan jenis anjungan bertipe tetap (*fixed platform*) berbentuk jacket berkaki empat. Lokasi struktur tipe jacket empat kaki pada tugas akhir ini terletak di wilayah Laut Natuna Selatan. Pada umumnya, perencanaan anjungan lepas pantai mengacu pada dua prinsip desain, yaitu WSD (*Working Stress Design*) dan LRFD (*Load Resistance Factor Design*). Prinsip WSD ialah mereduksi kekuatan nominal dengan faktor keamanan. Prinsip LRFD ialah menggunakan faktor beban dan faktor reduksi kekuatan. Prinsip LRFD dinilai lebih realistis karena didalamnya terdapat faktor beban yang nilainya ditentukan oleh kajian khusus. Tetapi, faktor beban lingkungan diturunkan berdasarkan kondisi lingkungan perairan sekitar Amerika, khususnya *Gulf of Mexico*. Hal ini kemungkinan adanya ketidakcocokan dalam penerapan di wilayah perairan Indonesia. Dilakukan kajian awal terhadap beban gelombang berupa analisis kehandalan pada struktur yang sudah berdiri dengan fungsi performansi tegangan member berdasarkan analisis *in-place*. Analisis kehandalan menggunakan metode simulasi Monte Carlo dimana memanfaatkan parameter statistik dan variabel acak. Indeks kehandalan diperoleh berdasarkan pengolahan UC member kritis. Indeks kehandalan untuk member kritis tiang pancang berdasarkan *code* API RP-2A LRFD 1993 didapat sebesar 10.78 (tanpa faktor beban dan faktor reduksi) dan 6.10 (dengan faktor beban dan faktor reduksi), artinya kehandalan struktur sangat besar sehingga penerapan faktor beban lingkungan, yaitu gelombang konservatif untuk Perairan Laut Natuna.

Kata Kunci: *fixed platform, simulasi Monte Carlo, analisis in-place, analisis kehandalan.*

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara maritim yang memiliki luas wilayah perairan sebesar $\frac{2}{3}$ dari luas wilayah total Indonesia. Seiring berkembangnya zaman, kebutuhan akan minyak dan gas bumi semakin besar terutama di Indonesia. Oleh sebab itu, pemerintah semakin giat melakukan eksplorasi minyak dan gas bumi, terutama di area laut.

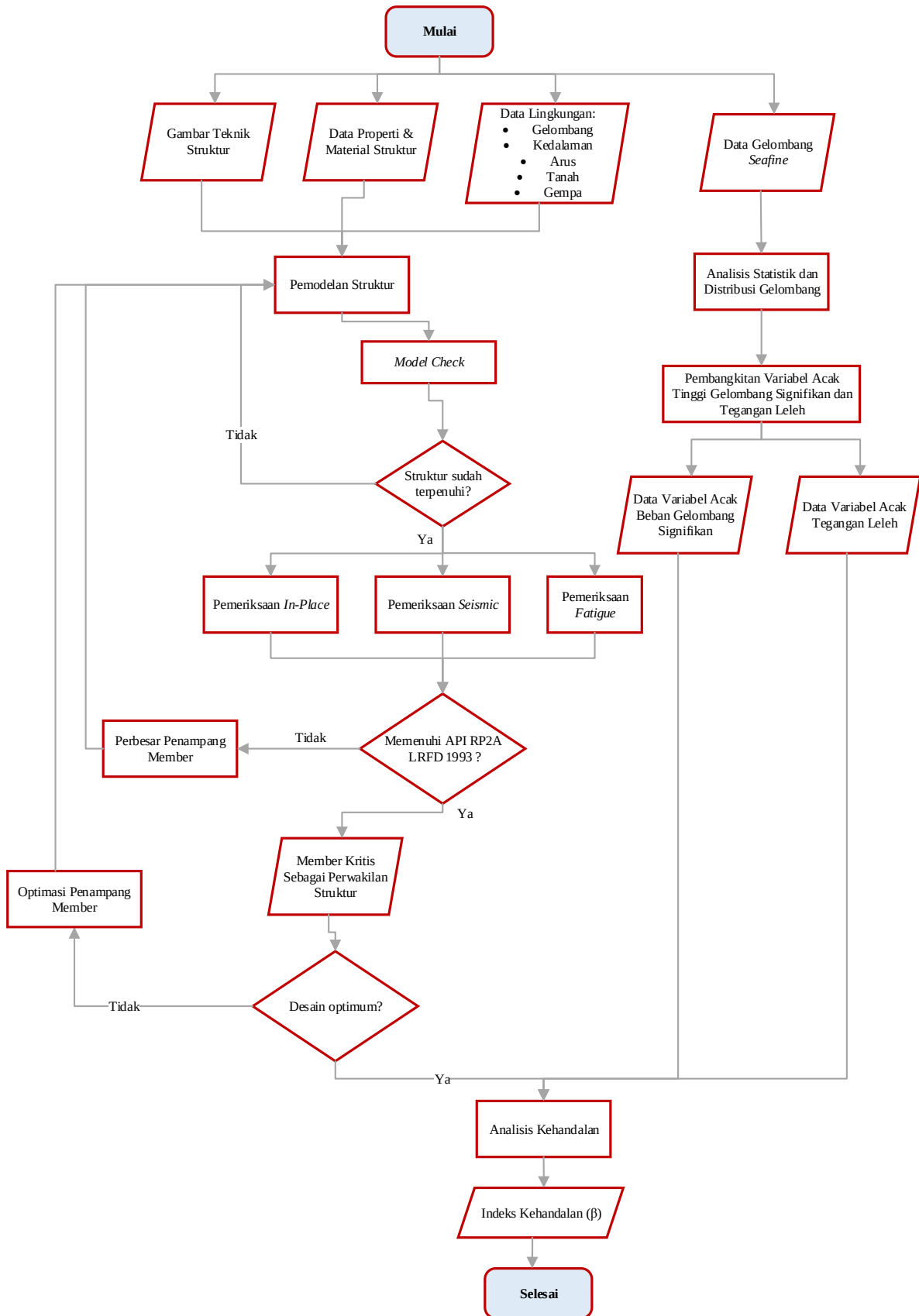
Anjungan lepas pantai merupakan struktur lepas pantai yang digunakan untuk proses eksploitasi minyak dan gas bumi. Jenis, ukuran, dan fungsi dari anjungan lepas pantai berbeda-beda. Pada tugas akhir ini, digunakan jenis anjungan bertipe tetap (*fixed platform*) berbentuk *jacket* berkaki empat. Pada umumnya, perencanaan anjungan lepas pantai mengacu pada dua prinsip desain, yaitu WSD (*Working Stress Design*) dan LRFD (*Load Resistance Factor Design*). Prinsip WSD ialah mereduksi kekuatan nominal dengan faktor keamanan. Prinsip LRFD ialah menggunakan faktor beban dan faktor reduksi kekuatan. Prinsip LRFD dinilai lebih realistis karena didalamnya terdapat faktor beban yang nilainya ditentukan oleh kajian khusus.

Dalam API RP-2A LRFD, faktor beban lingkungan diturunkan berdasarkan kondisi lingkungan perairan sekitar Amerika, khususnya *Gulf of Mexico*. Hal ini kemungkinan adanya ketidakcocokan dalam penerapan di wilayah perairan Indonesia. Oleh karena itu, perlu studi lebih lanjut yang mengkaji penerapan faktor beban API RP-2A LRFD di wilayah Indonesia. Studi yang akan dilakukan dalam tugas akhir ini terkait penerapan faktor beban API RP-2A LRFD di wilayah Indonesia akan dilakukan melalui analisis kehandalan dengan menghitung indeks kehandalan struktur. Tujuan dari tugas akhir ini ialah mendapatkan hasil analisis struktur berdasarkan analisis *in-place*, *seismic*, dan *fatigue* serta mendapatkan nilai indeks kehandalan berdasarkan perfomansi tegangan dari analisis *in-place*. Lokasi struktur tipe *jacket* empat kaki pada tugas akhir ini terletak di wilayah Laut Natuna dengan kedalaman sekitar 96.2 meter.

2. METODOLOGI & TEORI

2.1 Metodologi

Metodologi dari pengerjaan tugas akhir dapat dilihat pada diagram alir Gambar 1 berikut.



Gambar 1 Diagram Alir Metodologi Penulisan Tugas Akhir.

2.2 Konsep Load Resistance and Factor Design (LRFD)

Konsep *Load Resistance and Factor Design* (LRFD) merupakan prinsip desain yang dituangkan di API RP-2A LRFD “*Recommended Practice for Planning, Designing and Contracting Fixed Offshore Platforms*”. Prinsip desain *Load Resistance and Factor Design* (LRFD) yang menggunakan nilai faktor beban dan faktor reduksi kekuatan dituliskan dalam Persamaan 1.

$$R_u = Q \leq \phi R_n \quad (1)$$

Dimana :

R_u : kekuatan ultimate yang dibutuhkan dan ditentukan dari kombinasi pembebanan LRFD [N],

Q : efek beban terfaktor yang bekerja pada struktur dimana $Q = \sum \gamma_i F_i$ [N],

γ_i : faktor beban,

F_i : beban layan yang bekerja pada struktur (beban mati, beban hidup, beban lingkungan dan lain-lain) [N],

ϕ : faktor reduksi kekuatan (*component resistance factor*), tercantum pada Tabel 1,

R_n : kekuatan nominal struktur [N].

Tabel 1 Nilai Faktor Reduksi Kekuatan.
(Sumber: API RP-2A LRFD)

<i>Limit State</i>	<i>Resistance Factor</i>
<i>Shear</i>	1.0 or 0.9
<i>Flexure</i>	0.9
<i>Compression</i>	0.9
<i>Tension (Yielding)</i>	0.9
<i>Tension (Rupture)</i>	0.75

2.3 Analisis In-Place

Analisis *in-place* adalah analisis struktur yang bertujuan untuk mengetahui kondisi struktur ketika sudah berada di tempat yang sudah direncanakan dan beroperasi sesuai dengan fungsinya. Kombinasi pembebanan untuk analisis in-place kondisi *operating* dan *storm* disesuaikan menurut API RP-2A LRFD 1993 – *Section C*. Kondisi *operating*, kombinasi dapat dilihat pada Persamaan 2 sedangkan kondisi *storm* kombinasi pembebanan dapat dilihat pada Persamaan 3.

$$Q = 1.3D_1 + 1.3D_2 + 1.5L_1 + 1.5L_2 + 1.2W_0 \quad (2)$$

$$Q = 1.1D_1 + 1.1D_2 + 1.1L_1 + 1.35W_0 \quad (3)$$

Dimana:

Q = gaya dalam yang terjadi pada member, joint, dan pondasi akibat beban-beban yang bekerja pada struktur,

D_1 = beban akibat berat sendiri struktur,

D_2 = beban akibat berat peralatan dan objek lain yang dapat berubah,

L_1 = beban hidup yang termasuk fluida dan persediaan yang dapat dikonsumsi,

L_2 = beban hidup yang merupakan gaya jangka pendek pada struktur,

W_0 = beban angin, gelombang, dan arus operating (periode ulang 1 tahun),

W_e = angin, gelombang, dan arus ekstrem (periode ulang 100 tahun).

2.4 Analisis Seismic

Analisis *seismic* merupakan analisis struktur yang diperlukan untuk mengetahui ketahanan struktur terhadap beban dinamik dari gempa bumi. Terdapat dua jenis tingkat *seismic* yang harus dipertimbangkan. Jenis tersebut didasarkan dari kekuatan gempa bumi, yaitu:

1. SLE (*Strength Level Earthquake*) memastikan struktur tahan terhadap gempa yang relatif sedang (*moderate*) tanpa mengalami kerusakan struktur yang signifikan..
2. DLE (*Ductility Level Earthquake*) memastikan struktur masih memiliki kapasitas sisa yang cukup saat menerima gempa bumi yang jarang dan bersifat *intense*.

Menurut API RP-2A LRFD menyatakan bahwa pemeriksaan struktur terhadap beban gempa dilakukan dengan kombinasi pembebanan berdasarkan Persamaan 4.

$$Q = 1.1D_1 + 1.1D_2 + 1.1L_1 + 0.9E \quad (4)$$

Q = gaya dalam yang terjadi pada member, joint, dan pondasi akibat beban-beban yang bekerja pada struktur,

D_1 = beban akibat berat sendiri struktur,

D_2 = beban akibat berat peralatan dan objek lain yang dapat berubah,

L_1 = beban hidup yang termasuk fluida dan persediaan yang dapat dikonsumsi,

E = beban akibat pergerakan tanah.

2.5 Analisis Fatigue

Kegagalan *fatigue* terjadi ketika celah yang sangat kecil berkembang menjadi retak. Sambungan las sangat rentan terhadap kegagalan *fatigue*. Analisis *fatigue* dilakukan untuk mengetahui ketahanan *joint* pada struktur *jacket* akibat beban siklik dari gelombang. Keluaran dari analisis *fatigue* berupa *fatigue life* dalam bentuk tahun. Menurut *code* API RP-2A LRFD 1993 nilai koefisien hidrodinamika untuk analisis *fatigue* berbeda, yaitu $C_m = 2.0$, $C_d = 0.8$ untuk *rough members*, dan $C_d = 0.5$ untuk *smooth members*. Metode yang digunakan dalam analisis *fatigue* di tugas akhir ini menggunakan metode *deterministik*. Persamaan kerusakan (*damage*) Palmgren-Miner dapat dilihat di Persamaan 5.

$$Damage = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

Dimana:

n = jumlah beban siklik yang terjadi,

N = jumlah beban siklik yang dibutuhkan untuk mencapai kegagalan.

Fatigue life didapatkan dari perbandingan antara *design life platform* dengan *cummulative damage* seperti Persamaan 6.

$$Fatigue\ Life = \frac{Design\ Life\ Platform\ (include\ life\ safety\ factor)}{Cummulative\ damage} \quad (6)$$

2.6 Analisis Kehandalan

Perencanaan struktur bertujuan memenuhi suatu kriteria performansi yang dapat dilihat pada Persamaan 7. Kehandalan dapat dikatakan sebagai probabilitas kesuksesan (p_s) yang memenuhi kriteria performansi, didefinisikan sebagai indeks kehandalan β seperti pada Persamaan 8 dan 9.

$$Z = R - S \geq 0 \quad (7)$$

$$P(success) = p_s = 1 - p_f \quad (8)$$

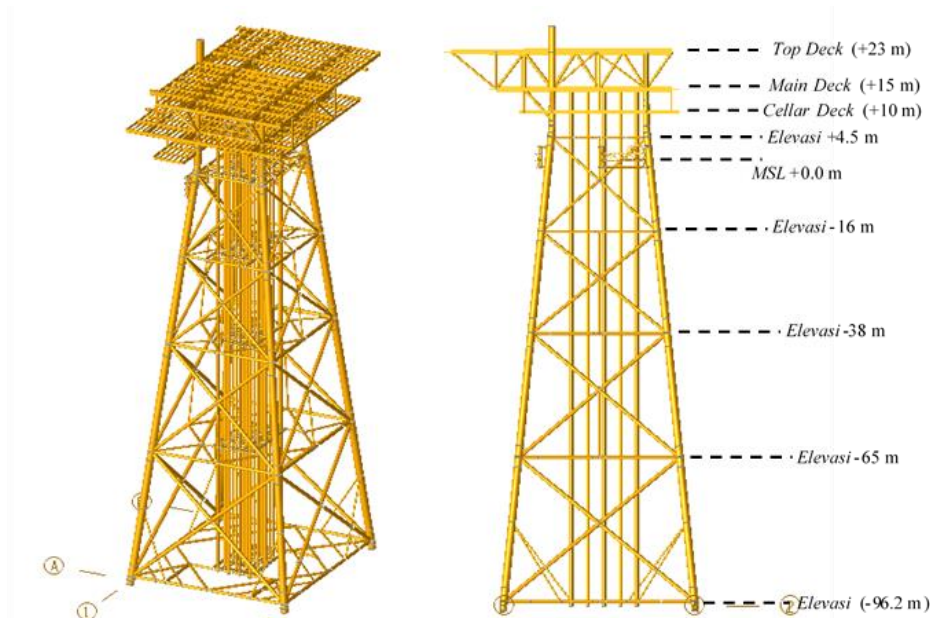
$$P(success) = p_s = \Phi(\beta) \quad (9)$$

Daerah diarsir merupakan daerah kemungkinan kegagalan terjadi akibat kemungkinan kapasitas memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan bebannya. Analisis kehandalan akan dilakukan dengan metode simulasi Monte Carlo. Simulasi Monte Carlo memanfaatkan parameter statistik dan

probabilitas. Kriteria performansi yang akan ditinjau ialah tegangan member pada kondisi *in-place* berdasarkan *code* desain API RP-2A LRFD 1993.

3. HASIL & ANALISIS

Hasil berupa *unity check* (UC), *joint punching shear*, kapasitas tiang pancang dan *fatigue life* dengan bantuan perangkat lunak SACS. Pembangkitan variabel acak tinggi gelombang dan tegangan leleh menggunakan bantuan perangkat lunak MATLAB yang kemudian diolah untuk mendapatkan indeks kehandalan (β) member kritis. Struktur dalam studi kasus ini memiliki 3 komponen utama, yaitu *topside*, *jacket* dan pondasi. Struktur *topside* terdiri dari empat *deck*, yaitu *top deck*, *main deck*, dan *cellar deck*. Struktur ini juga dilengkapi oleh 20 *conductor*, 2 *boatlanding*, *helideck* dan *riser*.



Gambar 2 Model Struktur Wellhead Platform.

3.1 Pemeriksaan UC Member, Joint Punching Shear, dan Kapasitas Tiang Pancang untuk Analisis In-Place.

Analisis *in-place* dilakukan terhadap dua kondisi, yaitu kondisi *operating* dan *storm*. Kondisi *operating* menggunakan kondisi lingkungan dengan periode ulang 1 tahun sedangkan kondisi *storm* menggunakan periode ulang 100 tahun.

Berikut hasil pemeriksaan UC *member* setiap kondisi pada Tabel 2 dan hasil pemeriksaan UC maksimum untuk *joint punching shear* ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2 Hasil Rasio UC Terbesar pada Member Struktur Kondisi *Operating* dan *Storm*.

Bagian	Sub-Bagian	Member	Property (mm)	Operating		Storm	
				UC	LC	UC	LC
Deck	Top Deck	T475-T078	PG160A	0.937	124	0.625	216
	Main Deck	M261-M031	PG120A	0.956	105	0.433	202
	Cellar Deck	C149-C018	UB 914 x 305 x 201	0.885	105	0.776	225
	Deck Leg	C208-M031	1200Ø x 50 WT	0.623	135	0.483	227
	Deck Brace	M022-T083	508Ø x 20 WT	0.74	106	0.571	239
Jacket	Leg	08LG-04LG	1650Ø x 25 WT	0.383	140	0.54	232
	Brace	603L-X030	610Ø x 20 WT	0.656	133	0.775	232
Pile	Pile	203P-303P	1524Ø x 40 WT	0.583	136	0.743	228

Keterangan: UC = *Unity Check Ratio*LC = *Load Combination*Tabel 3 Hasil Rasio UC Terbesar pada *Joint Punching Shear* di Kondisi *Operating* dan *Storm*.

Operating			Storm		
Joint	Unity Check (UC)	Elevation (m)	Joint	Unity Check (UC)	Elevation(m)
602L	0.233	(+) 4.5	203L	0.249	(-) 96.2
601L	0.213	(+) 4.5	204L	0.244	(-) 96.2
603L	0.181	(+) 4.5	603L	0.224	(+) 4.5
604L	0.116	(+) 4.5	602L	0.193	(+) 4.5

Hasil pemeriksaan kapasitas tiang pancang ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4 Hasil Perbandingan antara Kapasitas *Pile* dengan Beban Maksimum saat Kondisi *Operating*.

Kondisi Operating				
Joint	Group Member	Capacity (0.7 Q _D) (KN)	Maximum Load (KN)	Pemeriksaan
001P	PA1	26623.8	17678	OK
002P	PB1	32759.58	16347.8	OK
003P	PA2	26623.8	24472.1	OK
004P	PB2	32759.58	22082.5	OK

Tabel 5 Hasil Perbandingan antara Kapasitas *Pile* dengan Beban Maksimum saat Kondisi *Storm*.

Kondisi Storm				
Joint	Group Member	Capacity (0.7 Q _D) (KN)	Maximum Load (KN)	Pemeriksaan
001P	PA1	30427.2	23437.3	OK
002P	PB1	37439.52	22260.4	OK
003P	PA2	30427.2	29115	OK
004P	PB2	37439.52	27231.3	OK

Dari hasil diatas dapat dilihat untuk kondisi *operating* dan *storm*, UC member, *joint punching shear*, dan kapasitas *pile* tergolong aman dan telah memenuhi kriteria *code* API RP-2A LRFD 1993.

3.2 Pemeriksaan UC Member, *Joint Punching Shear*, dan Kapasitas Tiang Pancang untuk Analisis *Seismic*.

Analisis *seismic* dilakukan terhadap dua kondisi, yaitu kondisi SLE dan DLE. Berdasarkan data PGA dan PSV, didapat hasil UC member sebagai berikut.

Tabel 6 Hasil Rasio UC Terbesar Pada Member Saat Kondisi Tingkat Gempa SLE dan DLE.

Bagian	Sub-Bagian	Member	Property (mm)	SLE		DLE	
				UC	LC	UC	LC
Deck	Top Deck	T270-T027	UB 762x267x147	0.752	1	0.797	1
	Main Deck	M117-M033	PG120A	0.75	2	0.921	2
	Cellar Deck	C069-C074	UB 762x267x147	0.746	2	0.91	2
	Deck Leg	C208-M031	1200Ø x 50 WT	0.493	2	0.596	2
	Deck Brace	M022-T083	508Ø x 20 WT	0.584	2	0.609	2
Jacket	Leg	08LG-04LG	1650Ø x 25 WT	0.33	2	0.459	2
	Brace	603L-X030	610Ø x 20 WT	0.509	2	0.687	2
Pile	Pile	304P-404P	1524Ø x 40 WT	0.329	2	0.492	2

Keterangan: UC= *Unity Check Ratio*
LC = *Load Combination*

Kemudian hasil pemeriksaan UC maksimum untuk *joint punching shear* ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7 Hasil Rasio UC Terbesar Pada *Joint* Saat Kondisi Tingkat Gempa SLE dan DLE.

Tingkat SLE			Tingkat DLE		
Joint	Unity Check (UC)	Elevation(m)	Joint	Unity Check (UC)	Elevation(m)
601L	0.174	(+) 4.5	601L	0.208	(+) 4.5
602L	0.163	(+) 4.5	603L	0.195	(+) 4.5
603L	0.153	(+) 4.5	203L	0.192	(-) 96.2
604L	0.09	(+) 4.5	602L	0.19	(+) 4.5

Hasil pemeriksaan kapasitas tiang pancang ditunjukkan padaa Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8 Hasil Perbandingan antara Kapasitas Pile dengan Beban Maksimum saat Kondisi Tingkat Gempa SLE.

Tingkat SLE				
Joint	Group Member	Capacity (KN)	Maximum Load (KN)	Pemeriksaan
001P	PA1	38034	13873.9	OK
002P	PB1	46799.4	12214.7	OK
003P	PA2	38034	18312	OK
004P	PB2	46799.4	15554.6	OK

Tabel 9 Hasil Perbandingan antara Kapasitas Pile dengan Beban Maksimum saat Kondisi Tingkat Gempa DLE

Tingkat DLE				
<i>Joint</i>	<i>Group Member</i>	<i>Capacity (KN)</i>	<i>Maximum Load (KN)</i>	<i>Pemeriksaan</i>
001P	PA1	38034	17248.4	OK
002P	PB1	46799.4	14773	OK
003P	PA2	38034	21352.4	OK
004P	PB2	46799.4	18394.9	OK

Dari hasil diatas dapat dilihat untuk kondisi SLE dan DLE, UC member, *joint punching shear*, dan kapasitas *pile* tergolong aman dan telah memenuhi kriteria *code API RP-2A LRFD 1993*.

3.3 Pemeriksaan *Fatigue Life* Struktur

Hasil pemeriksaan *fatigue life* terendah pada *joint* struktur ditunjukkan pada Tabel 10. Pada analisis *fatigue* ini, semua *joint* telah memenuhi syarat analisis *fatigue* untuk *design life* 58 tahun dengan perioda terjadinya gelombang selama 100 tahun. Dapat disimpulkan *joint-joint* pada struktur tergolong aman berdasarkan analisis *fatigue*.

Tabel 10 Hasil *Fatigue Life* Terkecil Pada Bagian *Jacket*.

<i>Joint</i>	<i>Location (m)</i>	<i>Member</i>	<i>Member Size (OD x WT) (mm)</i>	<i>Damage</i>	<i>Fatigue Life (tahun)</i>
3A1X	EL (-) 25.10	402L-3A1X	850 x 20	0.795	72.94
5A1X	EL (-) 4.55	501L-5A1X	610 x 20	0.174	333.70
P504	EL (-) 96.2	P271-P504	610 x 31	0.044	1326.58

3.4 Pembangkitan Variabel Acak

Variabel acak yang dibangkitkan ialah variabel tinggi gelombang dan tegangan leleh. Data yang digunakan untuk membangkitkan variabel acak tersebut ialah data tinggi gelombang signifikan dengan rata-rata 1.066 meter dan standar deviasi 0.677 sedangkan data tegangan leleh dengan rata-rata 388.68 Mpa dan standar deviasi 22.23. Distribusi teoritis yang dijadikan acuan dalam uji kecocokan ini ialah distribusi log-normal, distribusi normal, dan distribusi Rayleigh. Distribusi yang paling cocok kedua data tinggi gelombang dan tegangan leleh ialah distribusi log-normal berdasarkan uji kecocokan Kolmogorov-Smirnov.

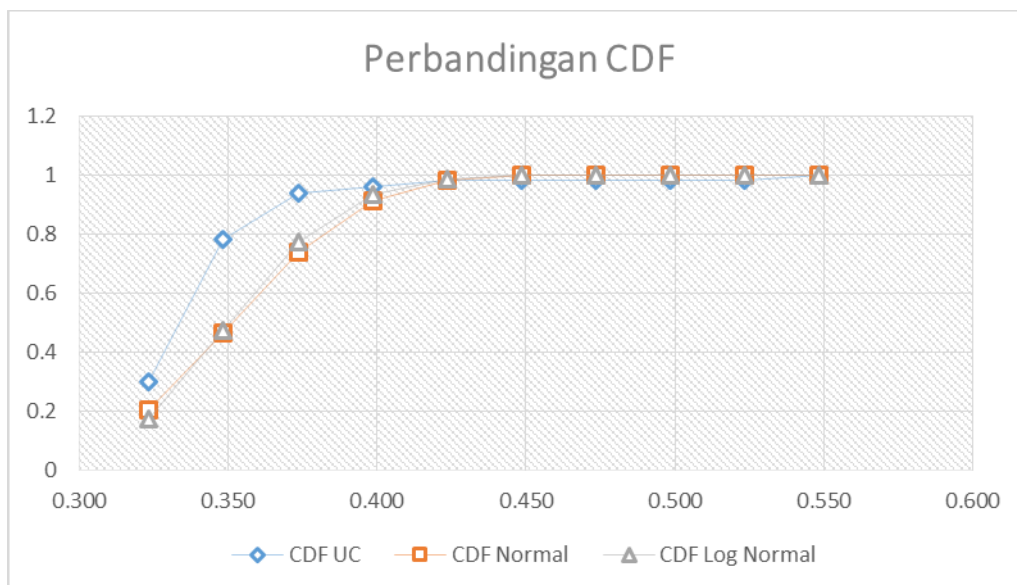
3.5 UC Member Kritis

Dalam proses simulasi kehandalan menggunakan dua tipe *code criteria* yaitu API RP-2A LRFD (tanpa faktor beban dan faktor reduksi) dan API RP-2A LRFD (dengan faktor beban dan faktor reduksi). Dari hasil *running* simulasi dengan bantuan perangkat lunak SACS didapatkan 50 data UC *member* kritis untuk masing-masing *code criteria*.

Berdasarkan hasil simulasi berdasarkan API RP-2A LRFD (tanpa faktor beban dan faktor reduksi), disimpulkan nilai UC maksimum yang didapat sebesar 0.545 saat. Nilai rata-rata UC tersebut ialah 0.352 dengan varians sebesar 0.0012. Berdasarkan uji kecocokan Kolmogorov-Smirnov (K-S) didapat nilai Dn maksimum terkecil terdapat di distribusi log-normal, artinya distribusi log-normal merupakan distribusi yang paling cocok untuk data UC Tabel 11.

Tabel 11 Hasil Dn CDF UC terhadap CDF Teoritis berdasarkan API RP-2A LRFD (tanpa faktor beban dan faktor reduksi).

Uji Kolmogorov-Smirnov				
CDF UC	CDF Normal	Dn Normal	CDF Log Normal	Dn Log Normal
0.300	0.206	0.094	0.173	0.127
0.780	0.463	0.317	0.475	0.305
0.940	0.737	0.203	0.775	0.165
0.960	0.914	0.046	0.936	0.024
0.980	0.982	0.002	0.987	0.007
0.980	0.998	0.018	0.998	0.018
0.980	1.000	0.020	1.000	0.020
0.980	1.000	0.020	1.000	0.020
0.980	1.000	0.020	1.000	0.020
1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
	Dn Maks	0.317	Dn Maks	0.305

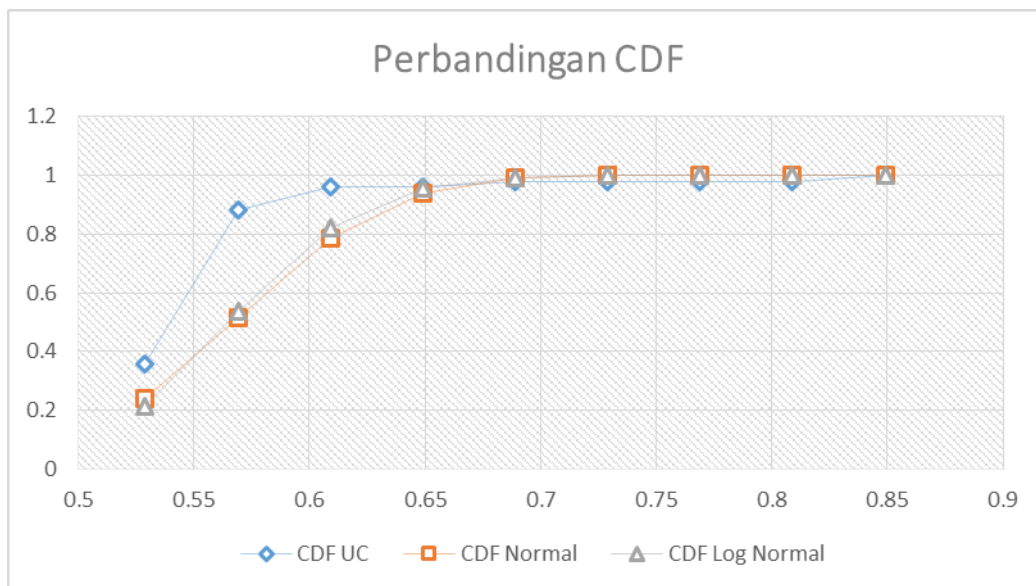


Gambar 3 Perbandingan CDF UC dengan CDF Teoritis berdasarkan API RP-2A LRFD (tanpa faktor beban dan faktor reduksi)..

Berdasarkan hasil simulasi berdasarkan API RP-2A LRFD (dengan faktor beban dan faktor reduksi), disimpulkan nilai UC maksimum yang didapat sebesar 0.859. Nilai rata-rata UC tersebut ialah 0.567 dengan varians sebesar 0.0028. Berdasarkan uji kecocokan Kolmogorov-Smirnov (K-S) didapat nilai Dn maksimum terkecil terdapat di distribusi log-normal, artinya distribusi log-normal merupakan distribusi yang paling cocok untuk data UC Tabel 12.

Tabel 12 Hasil Dn CDF UC terhadap CDF Teoritis berdasarkan API RP-2A LRFD (dengan faktor beban dan faktor reduksi).

Uji Kolmogorov-Smirnov				
CDF UC	CDF Normal	Dn Normal	CDF Log Normal	Dn Log Normal
0.360	0.239	0.121	0.214	0.146
0.880	0.517	0.363	0.537	0.343
0.960	0.786	0.174	0.820	0.140
0.960	0.939	0.021	0.954	0.006
0.980	0.989	0.009	0.992	0.012
0.980	0.999	0.019	0.999	0.019
0.980	1.000	0.020	1.000	0.020
0.980	1.000	0.020	1.000	0.020
1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
	Dn Maks	0.363	Dn Maks	0.343



Gambar 4 Perbandingan CDF UC dengan CDF Teoritis berdasarkan API RP-2A LRFD (dengan faktor beban dan faktor reduksi).

3.6 Hasil Analisis Kehandalan

Berikut perhitungan *probability of failure* (p_f) untuk mendapatkan nilai indeks kehandalan berdasarkan API RP-2A LRFD (tanpa faktor beban dan faktor reduksi) sebagai berikut.

$$p_f = P(UC \geq 1) = 1 - \left[\Phi \left(\frac{\ln(1) - \lambda_{UC}}{\zeta_{UC}} \right) - \Phi \left(\frac{\ln(0) - \lambda_{UC}}{\zeta_{UC}} \right) \right]$$

Dimana, nilai $\lambda_{UC} = -1.048$ dan $\zeta_{UC} = 0.097$

$$p_f = P(UC \geq 1) = 1 - \left[\Phi \left(\frac{\ln(1) - \lambda_{UC}}{\zeta_{UC}} \right) - \Phi(-\infty) \right]$$

$$p_f = 1 - \left[\Phi \left(\frac{0 - (-1.048)}{0.097} \right) - 0 \right]$$

$$p_f = 1 - [\Phi(10.78)]$$

$$p_f = 1 - p_s$$

$$p_s = \Phi(\beta)$$

$$\Phi(\beta) = 10.78$$

Sedangkan. Perhitungan nilai indeks kehandalan berdasarkan API RP-2A LRFD (dengan faktor beban dan faktor reduksi) sebagai berikut.

$$p_f = P(UC \geq 1) = 1 - \left[\Phi \left(\frac{\ln(1) - \lambda_{UC}}{\zeta_{UC}} \right) - \Phi \left(\frac{\ln(0) - \lambda_{UC}}{\zeta_{UC}} \right) \right]$$

Dimana, nilai $\lambda_{UC} = -0.572$ dan $\zeta_{UC} = 0.094$

$$p_f = P(UC \geq 1) = 1 - \left[\Phi \left(\frac{\ln(1) - \lambda_{UC}}{\zeta_{UC}} \right) - \Phi(-\infty) \right]$$

$$p_f = 1 - \left[\Phi \left(\frac{0 - (-0.572)}{0.094} \right) - 0 \right]$$

$$p_f = 1 - [\Phi(6.10)]$$

$$p_f = 1 - p_s$$

$$p_s = \Phi(\beta)$$

$$\Phi(\beta) = 6.10$$

Disimpulkan, nilai indeks kehandalan (β) untuk member kritis 203P-303P berdasarkan API RP-2A LRFD (tanpa faktor beban dan faktor reduksi) (β) = 10.78 dan berdasarkan API RP-2A LRFD (dengan faktor beban dan faktor reduksi) (β) = 6.10. Seperti yang diketahui, member kritis yang menjadi fokus untuk analisis kehandalan ini ialah bagian tiang pancang sehingga indeks kehandalan yang direkomendasikan ialah 3.72. Artinya nilai indeks kehandalan keduanya masih jauh dari kisaran nilai rekomendasi menurut Bai (2003). Dapat juga diamati bahwa besar indeks kehandalan

berdasarkan API RP-2A LRFD (dengan faktor beban dan faktor reduksi) memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan berdasarkan API RP-2A LRFD (tanpa faktor beban dan faktor reduksi). Hal tersebut akibat penggunaan faktor beban dan faktor reduksi kekuatan.

Dengan data gelombang pengamatan dan asumsi data tegangan leleh terhadap member kritis tiang pancang struktur, dapat disimpulkan bahwa penerapan faktor beban gelombang API RP-2A LRFD 1993 pada tugas akhir ini menghasilkan struktur yang konservatif di Perairan Laut Natuna.

4. KESIMPULAN & SARAN

Berdasarkan pembahasan yang dilakukan pada tugas akhir ini, disimpulkan bahwa struktur *wellhead platform* berkaki empat tersebut telah memenuhi syarat terhadap analisis *in-place*, *seismic*, *fatigue*. Data gelombang yang digunakan dalam analisis kehandalan merupakan data tinggi gelombang signifikan (H_s). Pembangkitan variabel acak untuk tinggi gelombang dan tegangan leleh berdasarkan parameter statistik distribusi log-normal yang telah dilakukan uji Kolmogorov-Smirnov sebelumnya. Indeks kehandalan (β) diperoleh melalui metode simulasi Monte-Carlo berdasarkan API RP-2A LRFD. Diperoleh β sebesar 10.78 (tanpa faktor beban dan faktor reduksi) dan 6.10 (dengan faktor beban dan faktor reduksi) pada desain struktur untuk kriteria performansi tegangan member berdasarkan analisis *in-place* dengan jumlah simulasi 50 kali. Penggunaan faktor beban API RP-2A LRFD 1993, khususnya faktor beban gelombang konservatif untuk Perairan Laut Natuna terhadap struktur *jacket* empat ini.

Beberapa hal yang bisa dilanjutkan dari tugas akhir ini, yaitu:

1. Simulasi Monte-Carlo dilakukan dengan jumlah simulasi minimal 1000 kali agar mendapatkan hasil simulasi yang lebih akurat.
2. Melakukan analisis kehandalan pada struktur anjungan lepas pantai di lokasi perairan Indonesia yang berbeda untuk mendapatkan kesimpulan yang lebih komprehensif mengenai kajian penerapan faktor beban lingkungan API RP-2A LRFD secara umum.

DAFTAR PUSTAKA

- American Petroleum Institute. 1993. *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform – Load Resistance and Factor Design*, API RP-2A LRFD, 1st Edition. Washington D.C: American Petroleum Institute.
- Bai, Yong. 2003. *Marine Structural Design*. Oxford: Elsevier.
- Chakrabarti, Subrata K. 2005. *Handbook of Offshore Engineering*. Planfield: Elsevier.
- Florentina, Shinta. Analisis Kehandalan Struktur Jacket Empat Kaki Di Perairan Selat Makassar. Bandung, Indonesia, 2015.
- Goda, Yoshimi. 2010. *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Singapore: World Scientific.
- Haldar. Achintya, Sankaran Mahadevan. 2000. *Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- International Organization for Standardization. ISO 19902:2007 *Petroleum and Natural Gas Industries – Fixed Offshore Structures*.
- Nallayarasu, S. tanpa tahun. *Offshore Structures: Analysis and Design*. Chennai: Indian Institute of Technology Madras.
- Tawekal, Ricky Lukman. 2011. SI 7173. *Perencanaan Bangunan Lepas Pantai*. Bandung: Penerbit ITB.
- Wiratama, Bintang. Analisis Perbandingan *Reserve Strength Ratio* Struktur Jenis *Braced Monopod* Dan *Tripod Jacket* Pada Area *West Madura Offshore*. Bandung, Indonesia, 2016
- Wurjanto, Andoyo. 2004. Analisis Statistik dan Probabilitas. Bandung: Penerbit ITB.