

DESAIN DAN ANALISIS KEHANDALAN STRUKTUR *PLATFORM* DELAPAN KAKI DI LAUT NATUNA

Larasati Devi Adani¹ dan Ricky Lukman Tawekal²

Program Studi Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

¹laras.devi01@gmail.com dan ²ricky@ocean.itb.ac.id

ABSTRAK

Proses kegiatan eksplorasi dan eksploitasi untuk menjangkau ladang migas membutuhkan suatu infrastruktur penunjang berupa anjungan lepas pantai. Struktur anjungan lepas pantai perlu didesain secara optimum agar dapat menahan beban-beban lingkungan serta peralatan saat beroperasi nantinya. Salah satu dari prinsip desain yang digunakan adalah LRFD (*Load Resistance Factor Design*). Pada API RP-2A LRFD, faktor beban memiliki ketidakcocokan untuk penerapan di wilayah perairan Indonesia karena diterbitkan dari wilayah Gulf of Mexico. Oleh karena itu, perlu studi yang mengkaji penerapan faktor beban tersebut di wilayah Indonesia.

Kajian awal terkait penggunaan nilai faktor beban lingkungan berupa faktor beban gelombang dari API RP-2A LRFD 1993 pada perairan Laut Natuna akan dilakukan melalui analisis kehandalan untuk menghitung indeks kehandalan struktur (β). Analisis kehandalan dilakukan menggunakan metode-metode probabilistik dan statistik melalui metode Monte Carlo. Dilakukan 50 simulasi menggunakan 50 pasang kombinasi variabel acak kapasitas dan beban terhadap *member* kritis dari struktur yang telah didesain optimum melalui analisis *inplace*. Dari hasil simulasi diperoleh indeks kehandalan (β) sebesar 38.472 untuk kondisi dengan faktor beban dan faktor reduksi, serta sebesar 29.246 untuk kondisi dengan faktor beban dan faktor reduksi. Sebagai kajian awal, nilai ini jauh lebih besar dari nilai yang disarankan oleh Yong Bai yakni sebesar 3.72 untuk tingkat keamanan tinggi. Dapat disimpulkan bahwa penerapan faktor beban gelombang API RP-2A LRFD 1993 pada tugas akhir ini menghasilkan struktur yang konservatif.

Kata kunci: *offshore platform, reliability, structural design, structural analysis, design factor, statistics, probability*

PENDAHULUAN

Kegiatan eksplorasi dan eksploitasi untuk menjangkau ladang migas membutuhkan infrastruktur penunjang berupa anjungan lepas pantai. Struktur perlu didesain secara optimum serta ekonomis untuk menahan berat sendiri struktur, beban peralatan, dan lingkungan seperti angin, gelombang, dan arus.

Umumnya pada perencanaan anjungan lepas pantai, desain dilakukan berdasarkan suatu prinsip desain tertentu. Salah satunya, prinsip *Load Resistance Factor Design* (LRFD) yang menggunakan faktor beban dan juga faktor reduksi kekuatan sehingga kuat nominal yang direduksi harus mencukupi kombinasi pembebanan yang menggunakan faktor beban.

Standar yang umum digunakan dalam perancangan anjungan lepas pantai ialah API RP-2A (*American Petroleum Institute – Recommended Practice 2A*). Pada API RP-2A LRFD, faktor beban lingkungan diturunkan berdasarkan kondisi lingkungan Perairan Amerika, khususnya Gulf of Mexico. Hal ini memungkinkan adanya ketidakcocokan untuk penerapan di wilayah perairan Indonesia. Oleh karena itu, perlu studi yang mengkaji penerapan faktor beban tersebut di wilayah Indonesia.

Kajian awal terkait penggunaan nilai faktor beban lingkungan berupa faktor beban gelombang dari API RP-2A LRFD 1993 akan dilakukan melalui analisis kehandalan menggunakan metode Monte Carlo untuk menghitung indeks kehandalan struktur (β).

Suatu analisis kehandalan harus dilakukan terhadap satu kondisi kegagalan tertentu atau terhadap performansi tertentu. Sebelum melakukan analisis kehandalan, dilakukan terlebih dahulu desain optimum untuk memperoleh struktur anjungan yang efisien terhadap besaran desain sesuai API RP-2A LRFD 1993. Optimasi dilakukan melalui analisis *inplace*. Pemeriksaan juga dilakukan untuk memperoleh member kritis yang akan dijadikan fokus kajian dalam analisis kehandalan.

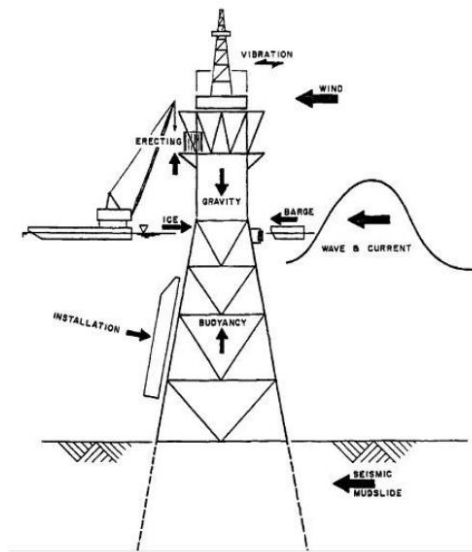
Diharapkan akan diperoleh informasi awal mengenai kesesuaian penerapan faktor beban, terutama gelombang yang ada pada API RP-2A LRFD 1993 untuk wilayah perairan Laut Natuna.

TEORI DAN METODOLOGI

Desain Anjungan Lepas Pantai

Anjungan lepas pantai dibangun untuk keperluan eksplorasi dan produksi minyak dan gas yang terletak di bawah laut, baik pada laut dangkal maupun laut dalam (Nallayarasu, tanpa tahun: 10).

Dalam mendesain suatu struktur anjungan, perlu diketahui apa saja beban yang nantinya akan mempengaruhi struktur saat beroperasi. Ilustrasi pembebanan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Ilustrasi Pembebanan Struktur Anjungan

Pembebanan yang akan diterima oleh struktur berdasarkan API RP-2A LRFD 1993 adalah sebagai berikut:

- Beban sendiri struktur (*selfweight*), merupakan berat sendiri struktur.
- Beban Mati (*Dead Load*) merupakan beban pada anjungan akibat peralatan dan objek lain.
- Beban Hidup (*Live Load*) Beban hidup adalah beban yang bekerja pada anjungan ketika sedang digunakan.
- Beban lingkungan adalah jenis beban alami yang terjadi di struktur akibat fenomena alam seperti gelombang laut, arus laut, angin, pasang surut, dan gempa bumi.

Pembebanan yang telah diketahui diaplikasikan pada struktur saat melakukan proses desain, kemudian diperiksa kekuatan strukturnya menggunakan berbagai analisis struktur. Analisis yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

- 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.

Pada analisis *in-place* ditinjau dua kondisi yaitu:

- Kondisi *Operating* dengan beban lingkungan dengan periode ulang 1 tahunan. Pada kondisi ini, anjungan beroperasi secara normal sehingga struktur menerima seluruh beban kerja yang

ada. Beban lingkungan yang terjadi pada struktur seperti beban gelombang, angin dan arus diambil harga ekstrim untuk periode ulang 1 tahun.

2. Kondisi *Storm* dengan beban lingkungan dengan periode ulang 100 tahunan. Kondisi ini merupakan kondisi yang terjadi pada saat badai di lokasi struktur. Pada kondisi ini tidak ada beban *work over rig live* atau beban hidup struktur.

Kombinasi pembebanan untuk kondisi *operating* dapat dilihat pada Persamaan 1 sedangkan kombinasi pembebanan untuk kondisi *storm* dapat dilihat pada Persamaan 2.

$$Q = 1.3 D_1 + 1.3 D_2 + 1.5 L_1 + 1.5 L_2 + 1.2 W_0 \quad (\text{Persamaan 1})$$

$$Q = 1.1 D_1 + 1.1 D_2 + 1.1 L_1 + 1.35 W_e \quad (\text{Persamaan 2})$$

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 termasuk berat struktur di udara, berat perlengkapan dan objek lain yang terpasang permanen pada anjungan, gaya hidrostatik, dan berat air seperti *ballast* dan lain-lain

D_2 = beban akibat berat peralatan dan objek lain yang dapat berubah seperti berat peralatan *drilling* dan *production* yang dapat ditambah atau dilepaskan dari anjungan serta berat *living quarter, heliport*, dan keperluan lainnya yang bisa ditambah atau dilepaskan

L_1 = beban hidup yang termasuk fluida dan persediaan yang dapat dikonsumsi pada perpipaan dan tangka

L_2 = beban hidup yang merupakan gaya jangka pendek pada struktur akibat kegiatan operasional seperti *lifting drill string, crane*, operasi mesin, *vessel mooring*, beban helicopter

W_0 = beban angin, gelombang, dan arus *operating* yang biasanya ditentukan *owner*, dalam tugas akhir ini periode ulang 1 tahun

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

- b. **Analisis seismik** diperlukan untuk mengetahui ketahanan struktur terhadap adanya efek beban akibat aktivitas gempa. Analisis seismik dilakukan dengan menerapkan gerakan tanah (*ground motion*) terhadap struktur.

- c. **Analisis *fatigue*** dilakukan untuk memperkirakan usia layan struktur pada sambungan *member-member* tubular terhadap beban siklik yang terjadi.

Analisis Statistik dan Probabilitas

Analisis ini diperlukan untuk mengolah suatu kejadian acak, seperti gelombang. Suatu kejadian acak memiliki parameter statistik seperti nilai rata-rata, nilai tengah, nilai standar deviasi, dan lain-lain. Parameter statistik ini penting dalam mengolah kejadian acak karena mewakili kejadian-kejadian tersebut.

Parameter statistik yang akan digunakan dalam tugas akhir ini adalah nilai rata-rata atau *mean*, varian, dan standar deviasi. Persamaan dapat dilihat dari Persamaan 3 hingga 6.

$$Mean = E(X) = \mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

(Persamaan 3)

$$Varian = Var(X) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2$$

(Persamaan 4)

$$Standar deviasi = \sigma_x = \sqrt{Var(X)}$$

(Persamaan 5)

$$Koefisien variasi = COV = \delta_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x}$$

(Persamaan 6)

Untuk tugas akhir ini, distribusi gelombang yang digunakan adalah distribusi normal, normal, dan *Rayleigh* untuk uji kecocokan.

Analisis Kehandalan

Analisis kehandalan dilakukan dengan metode-metode probabilistik dan statistik. Statistik ialah kuantifikasi matematis dari suatu ketidakpastian, misalnya mean dan standar deviasi. Perencanaan struktur bertujuan untuk memenuhi suatu kriteria performansi yaitu kapasitas yang lebih besar dari beban selama usia layan struktur. Ketidakpastian dalam beban dan kapasitas menyebabkan performansi ini tidak dapat dipastikan pemenuhannya. Kehandalan atau reliabilitas dapat dikatakan sebagai probabilitas kesuksesan memenuhi suatu kriteria performansi.

Pada suatu analisis kehandalan perlu ditentukan fungsi performansi. Fungsi performansi ini dapat dituliskan sebagai pada Persamaan 7.

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

(Persamaan 7)

dengan X_i sebagai variabel acak yang berhubungan dengan parameter beban dan kapasitas

Untuk suatu probabilitas kegagalan, probabilitas sukses ($P(success)$) dapat dinyatakan pada Persamaan 8.

$$P(success) = p_s = 1 - p_f$$

(Persamaan 8)

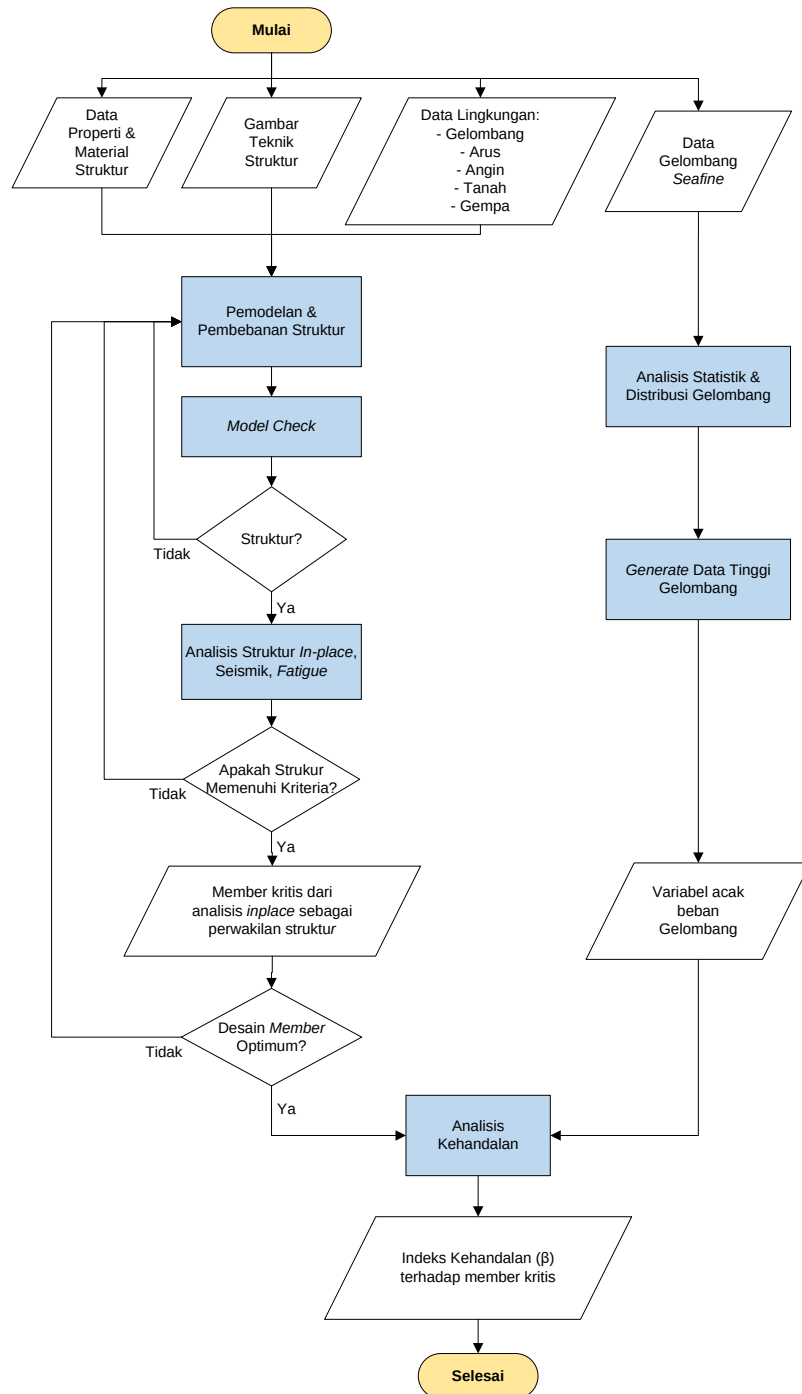
Dengan p_s yang diperoleh dari suatu kurva PDF indeks kehandalan β dapat diasumsikan mengikuti distribusi normal standar sehingga mengikuti Persamaan 2.9.

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

(Persamaan 9)

Pada tugas akhir ini, metode ini akan digunakan sebagai metode analisis kehandalan. Metode Monte Carlo memungkinkan perhitungan probabilitas kegagalan untuk kedua limit state, baik implisit maupun eksplisit, tanpa melalui pendekatan analitis.

Secara garis besar, untuk analisis kehandalan ini terdapat tiga tahapan utama yaitu desain struktur secara optimum, pengolahan data statistik gelombang, dan analisis kehandalan. Tahapan keseluruhan dapat dilihat dalam diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram Alir Metodologi Analisis Kehandalan

Dalam penulisan tugas akhir, pembahasan terbagi menjadi 3 tahapan utama, yaitu pemodelan dan pembebanan struktur, pemeriksaan dan desain optimum struktur, serta analisis kehandalan struktur.

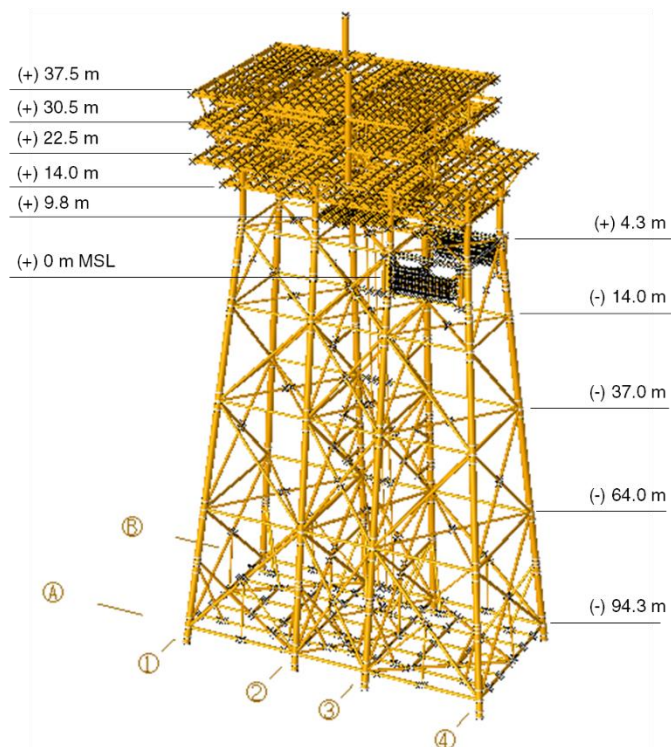
Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak *Structural Analysis Computer System* (SACS) sesuai dengan kriteria serta gambar teknis yang ada. Selanjutnya struktur diberi pembebanan seperti beban peralatan, beban perlengkapan, serta beban lingkungan.

Setelah pemodelan dan pembebanan sudah sesuai, dilakukan pemeriksaan struktur. Pemeriksaan struktur dilakukan menggunakan analisis *inplace*, seismik, dan *fatigue*. Optimasi dilakukan melalui analisis *inplace* dan seismik, baik tegangan member maupun *joint punching shear*, serta pemeriksaan kekuatan tanah melalui *pile safety factor*. Model dari struktur harus memenuhi besaran desain dari kedua analisis tersebut menurut standar API RP-2A LRFD 1993.

Dari proses pemeriksaan, akan dipilih *member* yang kritis dari hasil analisis *inplace*. Analisis kehandalan akan dilakukan pada member ini untuk memperoleh indeks kehandalan (β) dengan kondisi performansi tegangan member pada analisis *inplace* sesuai API RP-2A LRFD 1993. Variabel beban acak yang dikaji pada analisis kehandalan ialah beban gelombang. Sedangkan variabel kekuatan yang dikaji ialah kekuatan leleh baja. Analisis kehandalan dilakukan dengan metode simulasi Monte Carlo. Diharapkan dari analisis kehandalan yang dilakukan akan didapatkan nilai indeks kehandalan member yang mewakili struktur.

HASIL DAN ANALISA

Model struktur *platform* delapan kaki yang diperiksa pada Tugas Akhir ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2 Model struktur *platform* 8 kaki

A. Analisis *Inplace*

Analisis *Inplace* dilakukan dengan mengaplikasikan mati, hidup, lingkungan dan peralatan pada struktur. Hasil analisis ditunjukkan dalam parameter *Unity Check* (UC) tegangan elemen pada Tabel 1 dan 2, serta *joint punching shear* seperti pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 1 Hasil UC tegangan elemen analisis *inplace* (Kondisi Operating)

Komponen	Bagian	Member	Properti Member	UC	Load Combination
Deck	Main Deck	M071-M070	W40×211	0.67	A107
	Intermediate Deck	I054-I056	W33×152	0.59	A102
	Lower Deck	L040-L023	PG19A Web Thickness: 3.5 cm Flange thickness: 4cm Depth: 190 cm Width: 75 cm	0.52	A107
	Cellar	C032-C009	W33×152	0.47	A104
	Subcellar	0197-S013	W40×211	0.20	A108
	Deck Leg	708P-C004	OD: 152.4 cm WT: 7.5 cm	0.20	A107
Jacket	Jacket Leg	X044-X020	OD: 166 cm WT: 3 cm	0.17	A107
	Horizontal Bracing	J102-508L	OD: 50.8 cm WT: 1.905 cm	0.33	A106
	Diagonal Bracing	407L-308L	OD: 71.12 cm WT: 1.27 cm	0.71	A108
Pile		106P-206P	OD: 152.4 cm WT: 5 cm	0.42	A107
		206P-306P	OD: 152.4 cm WT: 5 cm	0.38	A106
		306P-406P	OD: 152.4 cm WT: 5 cm	0.35	A106

Tabel 2 Hasil UC tegangan elemen analisis *inplace* (Kondisi Storm)

Komponen	Bagian	Member	Properti Member	UC	Load Combination
Deck	Main Deck	M071-M070	W40×211	0.95	A207
	Intermediate Deck	I054-I056	W33×152	0.50	A206
	Lower Deck	L040-L023	PG19A Web Thickness: 3.5 cm Flange thickness: 4cm Depth: 190 cm Width: 75 cm	0.40	A207
	Cellar	C032-C009	W33×152	0.39	A204

Komponen	Bagian	Member	Properti Member	UC	Load Combination
	<i>Subcellar</i>	0197-S013	W40×211	0.18	A208
	<i>Deck Leg</i>	708P-C004	OD: 152.4 cm WT: 7.5 cm	0.17	A207
<i>Jacket</i>	<i>Jacket Leg</i>	X044-X020	OD: 166 cm WT: 3 cm	0.18	A207
	<i>Horizontal Bracing</i>	J102-508L	OD: 50.8 cm WT: 1.905 cm	0.29	A207
	<i>Diagonal Bracing</i>	407L-308L	OD: 71.12 cm WT: 1.27 cm	0.63	A201
<i>Pile</i>		106P-206P	OD: 152.4 cm WT: 5 cm	0.39	A202
		206P-306P	OD: 152.4 cm WT: 5 cm	0.33	A206
		306P-406P	OD: 152.4 cm WT: 5 cm	0.30	A206

*) keterangan: A1XX = Kombinasi pembebanan *operating, minimum water depth*

A2XX = Kombinasi pembebanan *storm, minimum water depth*

Tabel 3 Hasil UC *joint punching shear* analisis *inplace* (Kondisi *Operating*)

<i>Joint</i>	Diameter <i>Joint</i> (cm)	Tebal <i>Joint</i> (cm)	Elevasi <i>Joint</i>	UC
506L	170	5	(+) 4.5 m	0.188
406L	170	5	(-) 14 m	0.108
508L	170	5	(+) 4.5 m	0.103

Tabel 4 Hasil UC *joint punching shear* analisis *inplace* (Kondisi *Storm*)

<i>Joint</i>	Diameter <i>Joint</i> (cm)	Tebal <i>Joint</i> (cm)	Elevasi <i>Joint</i>	UC
406L	170	5	(-) 14 m	0.181
506L	170	5	(+) 4.5 m	0.152
407L	170	5	(-) 14 m	0.117

B. Analisis Seismik

Analisis dilakukan dengan mengaplikasikan spektrum gempa. Hasil analisis ditunjukkan dalam parameter *Unity Check* (UC) untuk tegangan elemen seperti pada Tabel 5 dan *joint punching shear* seperti pada Tabel 6.

Tabel 5 Hasil UC tegangan elemen analisis seismic

Komponen	Bagian	Member	Properti Member	UC (SLE)	UC (DLE)
Deck	Main Deck	M015-M078	W40×211	0.44	0.45
	Intermediate Deck	I054-I055	W33×152	0.59	0.59
	Lower Deck	L040-L023	PG19A Web Thickness: 3.5 cm Flange thickness: 4cm Depth: 190 cm Width: 75 cm	0.39	0.43
	Cellar	C032-C009	W33×152	0.40	0.40
	Subcellar	0197-S013	W40×211	0.19	0.21
	Deck Leg	705P-C007	OD: 152.4 cm WT: 7.5 cm	0.15	0.16
Jacket	Jacket Leg	X044-X020	OD: 166 cm WT: 3 cm	0.10	0.15
	Horizontal Bracing	J102-508L	OD: 50.8 cm WT: 1.905 cm	0.25	0.28
	Diagonal Bracing	407L-308L	OD: 71.12 cm WT: 1.27 cm	0.65	0.83
Pile		106P-206P	OD: 152.4 cm WT: 5 cm	0.35	0.44
		206P-306P	OD: 152.4 cm WT: 5 cm	0.30	0.34
		306P-406P	OD: 152.4 cm WT: 5 cm	0.27	0.30

Tabel 6 Hasil UC joint punching shear analisis seismic

Joint	Diameter Joint (cm)	Tebal Joint (cm)	Elevasi Joint	UC (SLE)	UC (DLE)
4B2X	170	5	(-) 4.75 m	0.705	0.950
3B2X	170	5	(-) 25.5 m	0.357	0.683
2B2X	170	5	(-) 50.5 m	0.139	0.343

C. Analisis Fatigue

Analisis *fatigue* menggunakan data gelombang 100 tahun untuk setiap 8 arah dengan nilai DAF yang berbeda-beda untuk setiap arah. Nilai *life safety factor* yang digunakan sebesar 2, dan *service life* 50 tahun. Hasil analisis *fatigue* dapat dilihat pada Tabel 7.

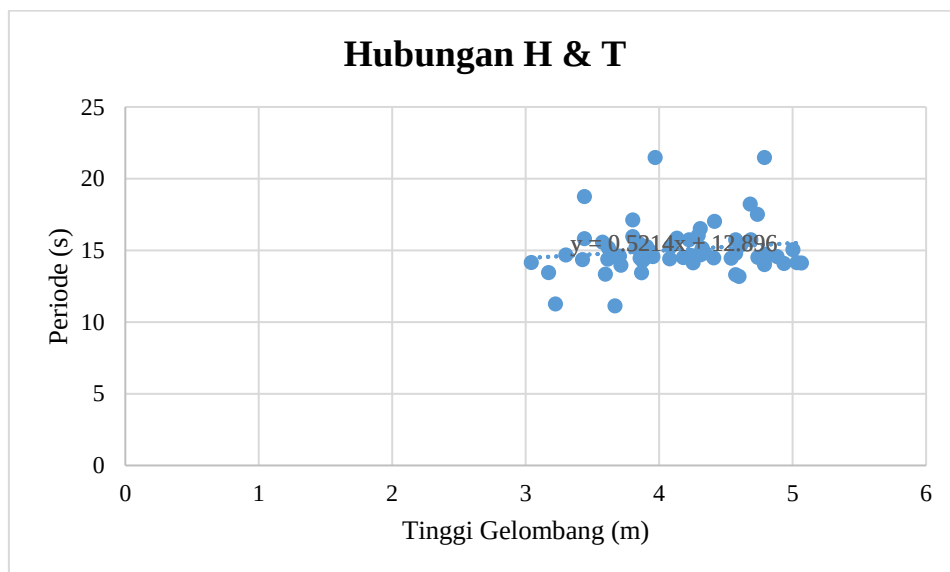
Tabel 7 Hasil Analisis *Fatigue*

<i>Joint</i>	<i>Member</i>	Kerusakan	Masa Layan (Tahun)	Elevasi <i>Joint</i>
4B2X	507L-4B2X	0.93	53.73	(-) 4.75 m
4B2X	406L-X253	0.71	70.20	(-) 4.75 m
X652	X654-X652	0.08	633.06	(-) 4.6 m

D. Analisis Keandalan

Untuk analisis keandalan ini dilakukan menggunakan metode Monte Carlo terhadap *member* kritis dari hasil analisis *inplace*. Dipilih *member* kritis 106P-206P dari tiang pancang dengan UC optimum sebesar 0.95. Pada analisis ini akan dilakukan 50 simulasi menggunakan 50 pasang variabel acak beban dan variabel acak kapasitas yang dibangkitkan dari suatu parameter distribusi. Variabel acak beban berupa data gelombang signifikan (H_s) beserta periodenya, adapun variabel acak kapasitas berupa tegangan leleh (F_y). Data gelombang yang digunakan berupa data gelombang dari *seafine* selama 60 tahun.

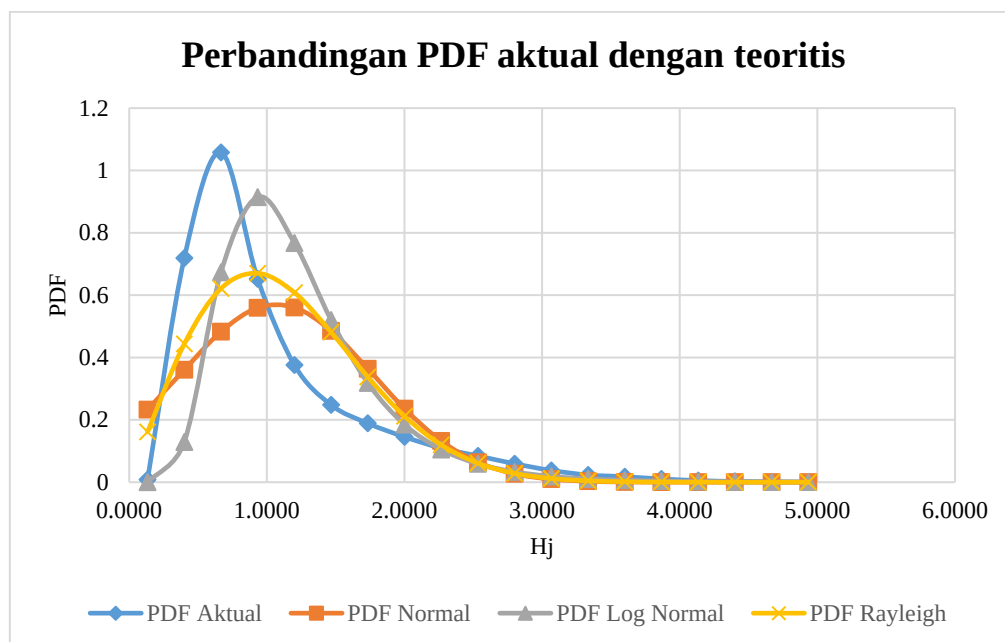
Sebelum melakukan pembangkitan variabel acak, perlu dicari jenis distribusi data gelombang melalui uji kecocokan. Setelah didapatkan jenis distribusi data, baru dilakukan pembangkitan 50 variabel acak gelombang menggunakan jenis distribusi yang telah didapatkan. Nilai periode gelombang didapatkan melalui persamaan grafik regresi hubungan tinggi gelombang (H) dengan periode (T) seperti pada Gambar 3.



Gambar 3 Hubungan Tinggi Gelombang (H) dan Periode (T) dari *Data Seafine*

Sedangkan pembangkitan variabel acak kapasitas dilakukan sesuai data statistik dan probabilitas tegangan leleh menurut ISO 19902 *Fixed Steel Offshore Structure*.

Hasil uji kecocokan data gelombang *seafine* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Perbandingan PDF aktual dengan Teoritis Data Gelombang *Seafine*

Dari hasil uji kecocokan didapatkan distribusi yang paling mendekati yaitu Lognormal. Distribusi ini sebagai distribusi yang paling cocok dengan data gelombang. Parameter λ yang didapatkan sebesar -0.11, sedangkan parameter *mean coefficient* sebesar 2.18 digunakan untuk membangkitkan 50 data acak gelombang.

Untuk membangkitkan data acak tegangan leleh (F_y), digunakan referensi data ISO 19902 *Fixed Steel Offshore Structure*. Menurut ISO, tegangan leleh material dapat dimodelkan sebagai distribusi lognormal dengan COV sebesar 0.057 dan *mean coefficient* sebesar 1.13. Dari parameter distribusi dan statistik ini, dapat dihasilkan 50 nilai tegangan leleh acak dengan asumsi *mean* sebesar 1.13 kali dari 28 MPa, yaitu 31.64 MPa.

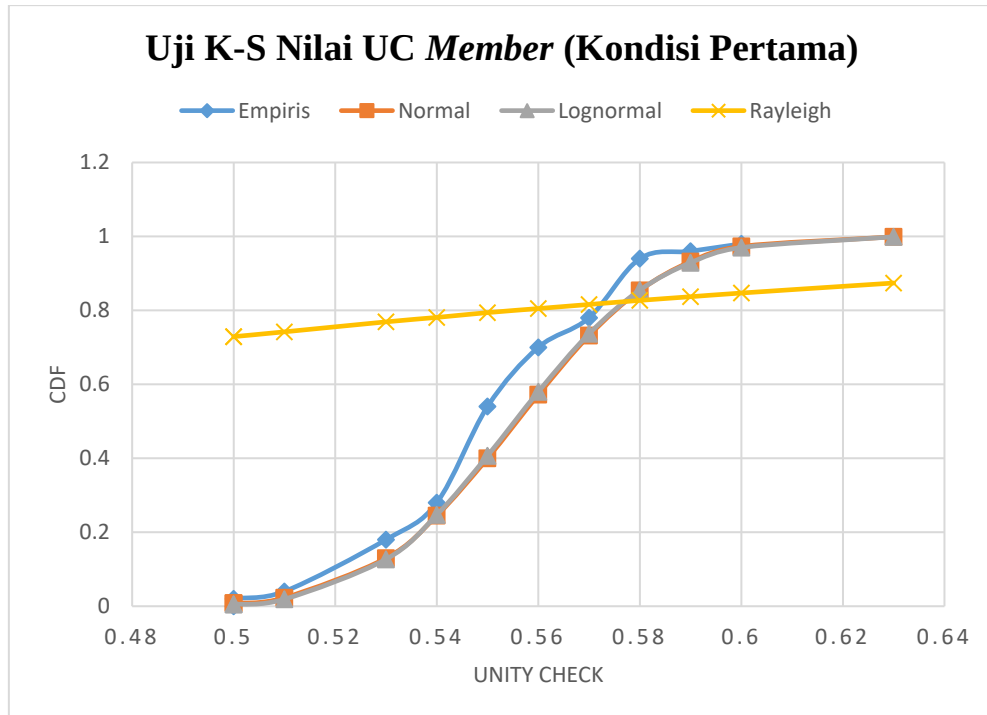
Dari hasil running simulasi sebanyak 50 kali terhadap *member* kritis 106P-206P, dilakukan uji kecocokan menggunakan metode Kolmogorov-Smirnov (K-S). Didapatkan distribusi lognormal sebagai distribusi yang dapat mewakili data UC dengan nilai D_N maksimum terkecil pada distribusi lognormal sebesar 0.133 untuk kondisi pertama, dan sebesar 0.129 untuk kondisi kedua.

Tabel 8 Nilai D_N^α menurut jumlah data N dan significance level (α) pada uji kecocokan Kolmogorov-Smirnof
(Sumber: Haldar, 2000:282)

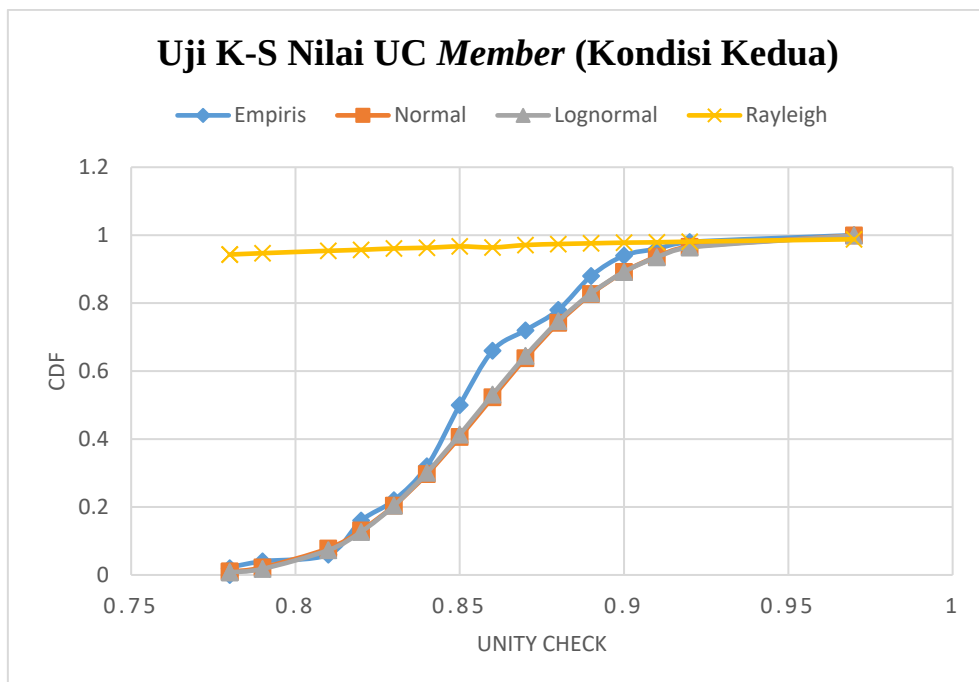
n	$D_n^{0.2}$	$D_n^{0.15}$	$D_n^{0.1}$	$D_n^{0.05}$	$D_n^{0.01}$
5	0.446	0.474	0.510	0.563	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.409	0.486
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.352
25	0.21	0.22	0.24	0.264	0.32
30	0.19	0.20	0.22	0.242	0.29
35	0.18	0.19	0.21	0.23	0.27
40	0.17	0.18	0.19	0.21	0.25
45	0.16	0.17	0.18	0.20	0.24
50	0.15	0.16	0.17	0.19	0.23
>50	$\frac{1.07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.14}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{n}}$

Nilai kritis D_N^α untuk N sebanyak 50 data dan tingkat kepercayaan $\alpha = 20\%$ berdasarkan Tabel 8 ialah sebesar 0.15. Untuk tingkat kepercayaan 20% distribusi lognormal dapat diterima untuk mewakili data UC *member* kritis karena kedua $D_N < D_N^\alpha$.

Gambar 5 menunjukkan Hasil Uji K-S dari UC tegangan *member* 106P-206P untuk kondisi tanpa faktor reduksi dan faktor beban (kondisi 1), sedangkan Gambar 6 untuk kondisi dengan faktor beban dan reduksi (kondisi 2).



Gambar 5 Hasil Uji K-S UC Member 106P-206P (Kondisi 1)



Gambar 6 Hasil Uji K-S UC Member 106P-206P (Kondisi 2)

Probabilitas kegagalan (p_f) member 106P-206P sebagai wakil struktur dapat dihitung dengan mencari besarnya luas di bawah kurva dengan batas $1 \leq UC < \infty$. Karena luas daerah tersebut terlampau kecil untuk diintegrasikan probabilitas gagal didekati dengan perhitungan. Perhitungan

probabilitas gagal dan indeks kehandalan *member* 106P-206P untuk kondisi pertama adalah sebagai berikut.

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

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

$$p_f = 1 - \left[\Phi \left(\frac{1 - (-0.56164)}{0.09024} \right) - 0 \right]$$

$$p_f = 1 - \Phi(38.472)$$

$$p_f = 1 - p_s$$

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

$$\beta = 38.472$$

Perhitungan probabilitas gagal dan indeks kehandalan *member* 106P-206P untuk kondisi kedua adalah sebagai berikut.

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

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

$$p_f = 1 - \left[\Phi \left(\frac{1 - (-0.56164)}{0.09024} \right) - 0 \right]$$

$$p_f = 1 - \Phi(29.246)$$

$$p_f = 1 - p_s$$

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

$$\beta = 29.246$$

Bai (2003:475) merekomendasikan besaran p_f dan β untuk suatu kelas-kelas keamanan tertentu seperti pada Tabel 4.

Tabel 4 Nilai Rekomendasi Indeks Keandalan

Kelas Keamanan	Target (p_f)	Keamanan (β)
Rendah	10^{-2}	2.32
Normal	10^{-3}	3.09
Tinggi	10^{-4}	3.72

Kelas keamanan pada Tabel 4 dijelaskan sebagai berikut:

1. Kelas Keamanan Rendah: kondisi dimana kegagalan *member* atau *joint* struktur tidak berakibat terhadap keselamatan manusia dan kerusakan lingkungan. Ketika kerusakan tersebut terjadi pada kelas ini pun, kondisinya dapat dimonitor dan tidak diperlukan adanya perlakuan khusus.
2. Kelas Keamanan Normal: kondisi dimana kegagalan mengakibatkan risiko terhadap keselamatan manusia, bahaya minor terhadap bagian utama anjungan, kerusakan minor terhadap lingkungan, dan kerugian ekonomi tertentu.
3. Kelas Keamanan Tinggi: kondisi dimana kegagalan mengakibatkan risiko terhadap keselamatan seluruh anjungan, begitu juga terhadap keselamatan manusia dan kerusakan lingkungan serta kerugian ekonomi yang besar.

Nilai indeks keandalan β pada Tabel 4 hanyalah nilai rekomendasi, dan tidak digunakan digunakan dalam menurunkan faktor beban API RP-2A LRFD. Nilai keandalan *member* kritis 106P-206P yang diperoleh dari analisis sangat jauh besarnya dari kisaran nilai rekomendasi.

Dari analisis tersebut dapat dikatakan bahwa struktur *jacket* delapan kaki di Perairan Natuna memiliki indeks keandalan yang sangat besar setelah didesain dengan optimum terhadap API RP-2A LRFD menggunakan beban gelombang. Dengan asumsi variabel beban gelombang dan kapasitas tegangan leleh serta fokus kajian tegangan pada *member* kritis tiang pancang struktur saat analisis *inplace*, dapat disimpulkan bahwa penerapan faktor beban gelombang API RP-2A LRFD 1993 pada tugas akhir ini menghasilkan struktur yang konservatif.

KESIMPULAN

Struktur telah memenuhi hasil pemeriksaan analisis *inplace*, seismik, dan *fatigue*. Seluruh pemeriksaan tegangan elemen pada analisis *inplace* serta seismik telah memenuhi syarat dimana nilai

UC harus di bawah 1.00. Hasil dari pemeriksaan *joint punching shear*, *joint* juga telah memenuhi kriteria nilai UC di bawah 1.00. Selain itu, *pile* memiliki kapasitas yang mampu menahan beban luar seperti beban lingkungan dan peralatan. Nilai *safety factor* yang dimiliki *pile* sudah lebih dari 1.00. Dari analisis *fatigue*, struktur memiliki masa layan *fatigue* yang dapat mencakup masa layan struktur selama 50 tahun, yakni 53.73 tahun untuk masa minimumnya. Oleh karena itu, struktur dinyatakan aman.

Dari hasil simulasi metode Monte Carlo, UC *member* kritis mengikuti distribusi lognormal dengan tingkat kepercayaan sebesar 20 persen. Diperoleh in β sebesar 38.472 untuk kondisi tanpa faktor beban dan faktor reduksi, serta sebesar 29.246 untuk kondisi dengan faktor beban dan faktor reduksi. Bila dibandingkan dengan nilai rekomendasi Yong Bai, nilai indeks kehandalan yang diperoleh pada tugas akhir ini sangat besar. Informasi yang didapatkan dari analisis kehandalan ini ialah bahwa salah satu faktor beban API RP-2A LRFD 1993 yaitu faktor beban gelombang perlu disesuaikan lebih lanjut penerapannya di Laut Natuna.

SARAN

Untuk kajian penerapan faktor beban selanjutnya sebaiknya jumlah data diperbanyak lagi karena kebanyakan kasus dalam bidang *engineering* dijumpai kasus dimana probabilitas kegagalan mencapai 10^{-5} yang berarti dari 100,000 percobaan terdapat 1 kali kegagalan.

DAFTAR PUSTAKA

- Achintya Haldar, Sankaran Mahadeva. *Probability Reability and Statistical Methods in Engineering Design*. John Wiley&Son Inc.2000
- American Petroleum Institute, *API Recommended Practice 2A-WSD: Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design*, Information Handling Services, Houston, November 2014
- Bai, Yong. 2003. *Marine Structural Design*. Oxford: Elsevier.
- Chakrabarti, Subrata K. 2005. *Handbook of Offshore Engineering*. Oxford: Elsevier.
- Florentina, Shinta. *Analisis Kehandalan Struktur Jacket Empat Kaki Di Perairan Selat Makassar*. Bandung, Indonesia, 2015