

DESAIN DAN ANALISIS KEHANDALAN ANJUNGAN LEPAS PANTAI TIPE JACKET EMPAT KAKI DI PERAIRAN LAUT NATUNA

Design and Reliability Analysis of Jacket Type Wellhead Platform (Four-Legged) in Natuna Sea

Boy Tulus Aprianto Simanjuntak dan Ricky Lukman Tawekal²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jl Ganesha 10 Bandung 40132

¹boy.simanjuntak95@live.com dan ²ricky@ocean.itb.ac.id

Abstrak: Proses desain struktur anjungan lepas pantai akan melibatkan beban-beban dalam bentuk variabel yang nilai kepastiannya perlu diperhitungkan. Oleh sebab itu pembebanan terhadap struktur umum dilakukan dengan menerapkan aturan pembebanan WSD (*Working Stress Design*) dan LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) yang masing-masing memberikan suatu faktor ketidakpastian terhadap nilai beban dan nilai kekuatan struktur. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa struktur akan memenuhi fungsinya dalam periode waktu yang sudah ditentukan. Aturan dan standar yang sering digunakan dalam desain anjungan lepas pantai tipe *fixed* di Indonesia adalah API RP-2A dimana pada desain struktur yang dikaji, digunakan aturan pembebanan LRFD. Penggunaan standar tersebut yang lahir dari kondisi perairan *North Sea* dan *Gulf of Mexico* yang notabene memiliki kondisi keekstreman yang lebih besar daripada kondisi perairan Indonesia khususnya Laut Natuna memungkinkan nilai faktor pembebanan dan faktor reduksi kuat material pada standar tersebut terlalu besar untuk diterapkan di Indonesia. Untuk mengetahui informasi awal penggunaan faktor beban LRFD di Indonesia, maka struktur akan didesain secara optimum dengan mengikuti aturan API RP-2A LRFD tersebut. Optimasi desain akan ditentukan berdasarkan hasil analisis *Inplace*, analisis *Seismic*, dan analisis *Fatigue* pada struktur dimana parameter batas yang tidak boleh dilampaui elemen struktur adalah ketika nilai *Unity Check* (UC) > 1. Penentuan indeks kehandalan sebagai parameter kekuatan struktur terhadap keacakan beban dan kuat material ditentukan dengan menggunakan performansi tegangan elemen struktur yang fungsi dan kondisinya kritis terhadap struktur. Penentuan elemen struktur tersebut didapatkan dari hasil analisis *inplace* serta penentuan nilai performansi juga dilakukan dengan analisis *inplace*. Analisis kehandalan dilakukan dengan menggunakan metode Monte Carlo yang umum digunakan di dunia keteknikan. Nilai indeks kehandalan yang didapatkan terbilang besar jika dibandingkan dengan nilai rekomendasi Yong Bai 2003:475 dimana nilai rekomendasi untuk level keamanan tinggi adalah 3.72 dan untuk hasil analisis nilai indeks kehandalan terkecil yang didapat adalah sebesar 3.014 pada bagian *pile*.

Kata kunci: struktur jacket, analisis *inplace*, optimasi desain, analisis kehandalan, Monte Carlo, API RP-2A LRFD, indeks kehandalan, pembebanan

PENDAHULUAN

Pada kegiatan eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi diperlukan beberapa fasilitas pendukung seperti infrastruktur. Untuk kegiatan eksplorasi dan eksploitasi daerah laut salah satu contoh infrastruktur penunjang ini adalah Anjungan Lepas Pantai berupa bangunan di tengah laut yang akan berfungsi sebagai penunjang hidup pengebor, kegiatan eksplorasi,

produksi, dan bahkan sebagai penyimpanan minyak dan gas bumi.

Proyek desain, fabrikasi, transportasi, dan instalasi Anjungan Lepas Pantai menjadi salah satu tahap yang paling membutuhkan biaya dalam kegiatan eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas sehingga dalam tahap ini desain dari anjungan lepas pantai harus dilakukan

dengan perhitungan ekonomi. Perancangan dan perencanaan anjungan lepas pantai umumnya akan mengikuti suatu standar desain tertentu. Untuk saat ini terdapat 2 jenis prinsip desain yang ada pada standar-standar desain anjungan lepas pantai yaitu WSD (*Working Stress Design*) dan LRFD (*Load and Resistance Factor Design*). Perbedaan utama dari kedua prinsip ini terletak pada kondisi batas dan *effective safety factor* pada keduanya. Prinsip WSD menggunakan kondisi batas tegangan leleh dengan tujuan menghindari deformasi permanen pada member yang terbebani, adapun *safety factor* (SF) yang digunakan adalah tunggal yaitu pada tegangan izin atau *allowable stress* dibagi dengan SF. Pada prinsip LRFD kondisi batas yang ditinjau adalah kekuatan *ultimate* dari material dimana akan dilakukan reduksi pada kekuatan *ultimate* ini dan beban yang dikombinasikan masing-masing akan dikalikan dengan faktor beban dimana faktor beban ini akan berbeda-beda untuk setiap jenis beban dan tergantung terhadap sifat-sifat beban.

Standar desain Anjungan Lepas Pantai yang umum digunakan adalah *American Petroleum Institute* (API RP 2A) dimana terdapat 2 versi yaitu LRFD 1993 dan WSD 2007. Faktor beban yang digunakan pada API RP 2A LRFD didapatkan berdasarkan kondisi perairan yang ada di Teluk Meksiko (*Gulf of Mexico*) yang notabene sangat berbeda dengan kondisi perairan di Indonesia. Kondisi

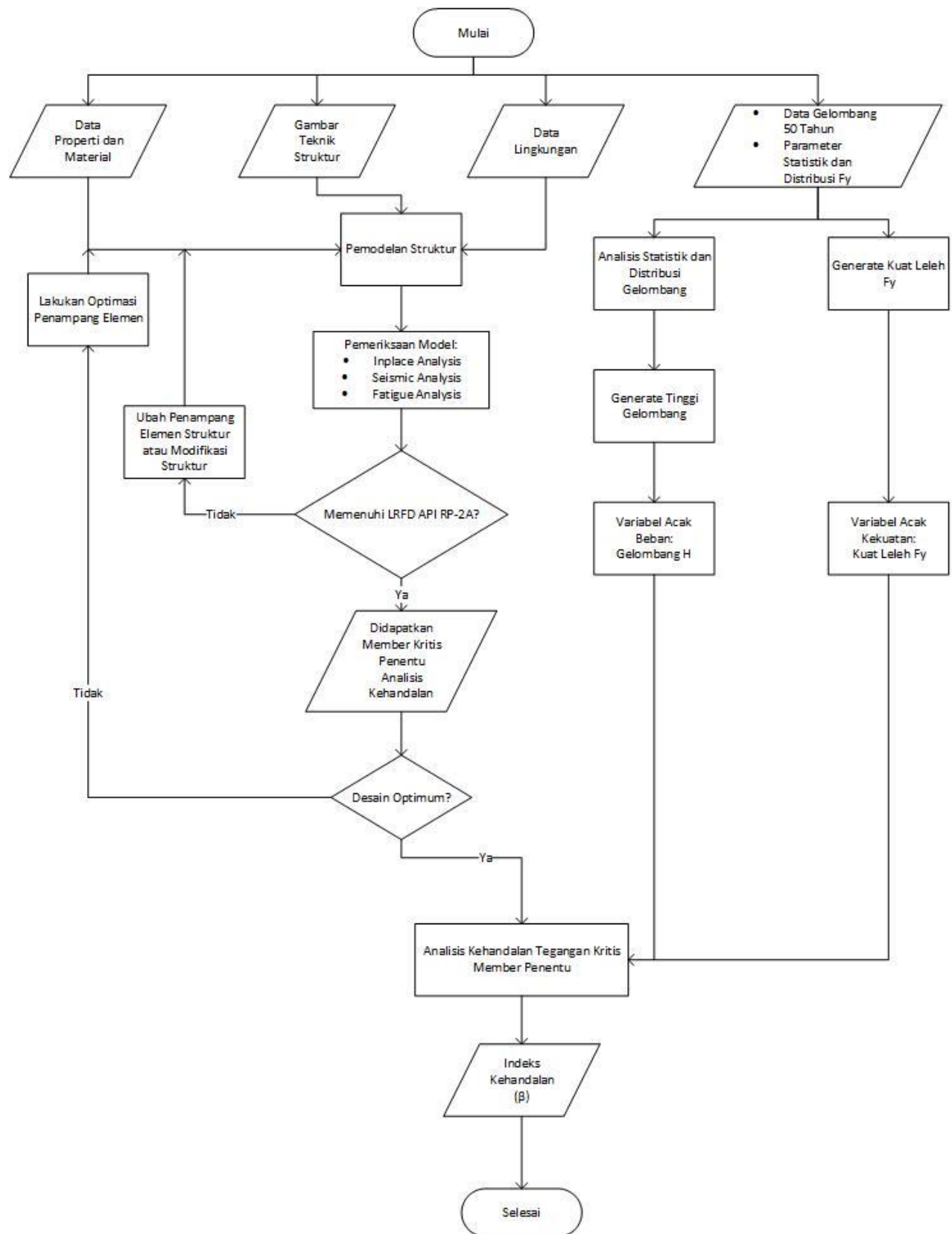
menimbulkan ketidakcocokan (*overdesign*) jika faktor beban pada standar tersebut diterapkan di Indonesia dan bahkan menimbulkan peningkatan penggunaan sumber daya hingga 60% (*French, Seetim, dan Dominish 1992*).

Untuk mengetahui apakah nilai faktor beban yang digunakan pada API RP 2A LRFD cocok atau tidak jika digunakan di Indonesia, maka akan dilakukan analisis kehandalan (*Reliability Analysis*) yang akan memberikan nilai indeks kehandalan suatu struktur anjungan lepas pantai di Indonesia. Analisis kehandalan harus dilakukan terhadap suatu kondisi kegagalan tertentu atau terhadap performansi tertentu. Pada penelitian ini kondisi performansi yang digunakan adalah kriteria performansi tegangan *member* pada analisis *Inplace*. Untuk mengetahui member yang menjadi penentu performansi struktur, akan dipilih *member* dengan nilai UC terbesar.

METODOLOGI

Analisis kehandalan dan desain anjungan lepas pantai dilakukan dengan mengikuti tahapan yang ditunjukkan pada diagram alir 1 berikut.

Proses terdiri atas optimasi desain struktur dengan analisis *inplace*, *seismic*, dan *fatigue*. Hasil dari analisis *inplace* berupa elemen penentu yang sifatnya krusial dan kritis terhadap struktur akan dijadikan sebagai penentu kriteria performansi kehandalan.



Gambar 1 Bagan Alir Tugas Akhir

Proses optimasi dan desain struktur mengikuti aturan dari API RP-2A LRFD dimana faktor beban akan bergantung daripada variabel beban yang ditinjau.

(1)

$$Q = 1.3D_1 + 1.3D_2 + 1.5L_1 + 1.5L_2 + 1.2W_o$$

(2)

$$Q = 1.1D_1 + 1.1D_2 + 1.1L_1 + 1.35W_e$$

Member dengan UC (*Unity Check*) terbesar dan berpengaruh besar pada struktur akan dipilih menjadi member penentu dalam analisis kehandalan.

$$UC = \frac{\text{Factored Load}}{\text{Factored Strength}} \dots (3)$$

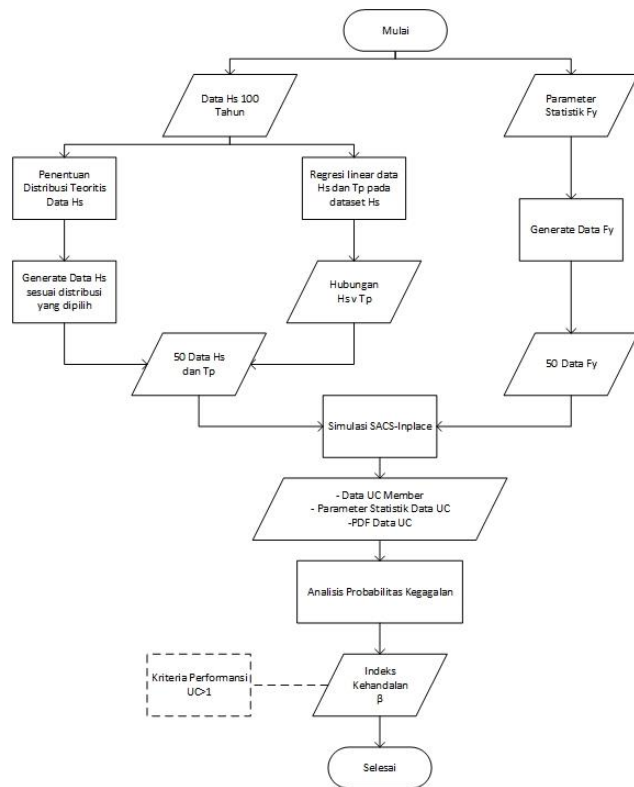
Pada analisis kehandalan, variabel acak beban akan didapatkan melalui pengolahan data gelombang per-jam dan variabel acak kekuatan struktur akan didapat dari keacakan kekuatan leleh material baja.

Analisis kehandalan ini akan dilakukan sesuai diagram alir pada gambar 2. Pada analisis ini beban yang ada pada struktur dilakukan untuk 2 kondisi dimana kondisi pertama adalah tanpa ada faktor beban dan faktor reduksi kekuatan struktur serta kondisi kedua adalah ketika pembebanan mengikuti aturan LRFD. Akan terdapat 50 simulasi dengan 50 pasang variabel acak gelombang dan kapasitas leleh material.

Untuk mendapatkan nilai variabel acak gelombang dan kapasitas leleh material maka perlu dilakukan pembangkitan variabel berdasarkan jenis distribusi dari variabel acak terkait. Untuk variabel acak gelombang, data yang diperlukan untuk pembangkitan variabel

acak ini adalah data tinggi gelombang signifikan dalam periode waktu 50 tahun.

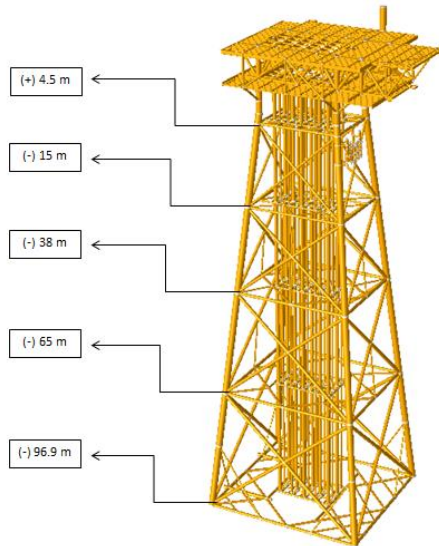
Dataset gelombang tersebut akan didekati dengan beberapa distribusi yaitu pendekatan distribusi normal, lognormal, dan Rayleigh. Untuk mengetahui distribusi yang paling cocok akan dilakukan uji dengan metoda Kolmogorov-Smirnov dimana akan dilakukan perbandingan *Cumulative Distribution Function* dari setiap distribusi. Untuk kapasitas leleh material dilakukan sesuai dengan data parameter statistik material yang sudah ada yaitu pada ISO 19902 – *Fixed Steel Offshore Structure*.



Gambar 2 Bagan Alir Analisis Kehandalan

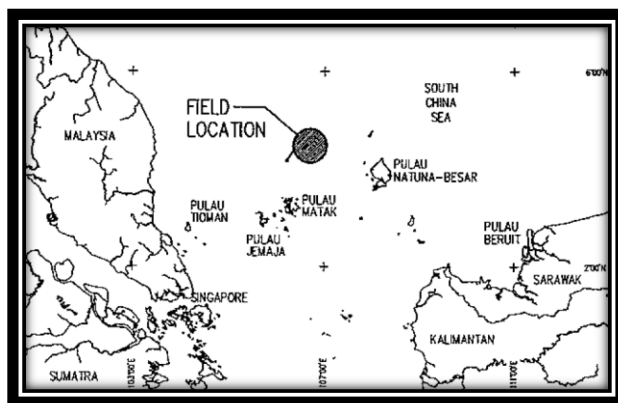
HASIL DAN PEMBAHASAN

Model struktur tipe *jacket* 4 kaki yang dikaji pada tugas akhir ini dapat dilihat pada gambar 3 berikut.



Gambar 3 Model Struktur

Struktur memiliki berat di udara sebesar >48000 kN dan berada pada kedalaman 96.9 meter. Struktur berada pada lokasi dengan koordinat 682165 E dan 487655 N atau zona 48N UTM. Seperti terlihat pada gambar 4 berikut.



Gambar 4 Lokasi Struktur

1. Analisis *Inplace*

Analisis *inplace* pada struktur dilakukan pada 2 kondisi yaitu operasi dan badai dimana masing-masing akan dianalisis pada saat muka air laut maksimum dan saat muka air laut minimum.

Faktor beban dan faktor reduksi sesuai LRFD diaplikasikan pada struktur. Hasil analisis yang didapatkan menunjukkan struktur sudah berada pada kondisi optimal untuk elemen-elemen *pile*, *jacket leg*, dan *deck leg*.

Untuk mutu material desain untuk struktur baja, digunakan baja dengan kekuatan leleh F_y 36 ksi dan nilai Modulus Young E sebesar 29000 ksi.

Nilai *member UC* maksimum yang didapat dari masing-masing kondisi analisis ditunjukkan pada tabel 1 dan 2.

Tabel 1 UC Kondisi Operasi

Location	Member	UC
Topside	1888-1739	0.93
Deck Leg	1678-1000	0.57
Jacket Leg	1008-1012	0.40
Pile	1073-1074	0.71

Tabel 2 UC Kondisi Storm

Location	Member	UC
Topside	1888-1739	0.59
Deck Leg	1678-1000	0.43
Jacket Leg	1008-1012	0.47
Pile	1073-1074	0.66

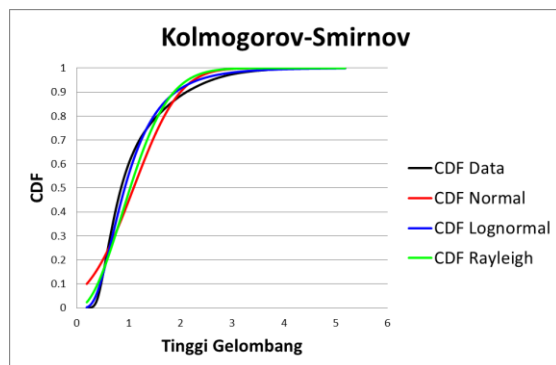
Nilai UC terbesar terletak pada bagian Selatan anjungan dimana di atasnya terdapat

bridge yang menghubungkan anjungan dengan platform disampingnya. Keempat elemen pada tabel diatas akan menjadi elemen penentu performansi pada analisis kehandalan.

2. Analisis Kehandalan

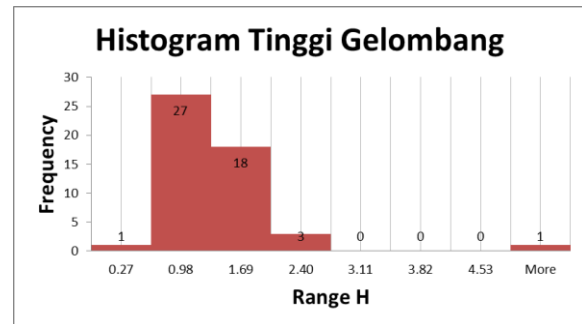
Analisis kehandalan dilakukan dengan menggunakan data gelombang 50 tahun-an dimana jenis distribusi gelombang tersebut adalah disribusi lognormal seperti ditunjukkan pada gambar 5.

Dataset gelombang tersebut memiliki nilai $H_s = 1.89$ meter dan $H_{max} = 5.18$ meter.



Gambar 5 Distribusi Teoritis Data Gelombang

Data gelombang yang digunakan pada simulasi Monte Carlo merupakan data hasil *generate* dengan parameter statistik lognormal. Proses pengambilan variabel acak ini akan membutuhkan bantuan MATLAB dengan parameter statistik *mean* lognormal (μ) = -0.0796 dan standar deviasi lognormal (σ) = 0.5650. Pada gambar 6 ditampilkan histogram data gelombang simulasi.



Gambar 6 Histogram Data 50 Gelombang

Untuk variabel acak kuat leleh material, sebanyak 50 data di-*generate* menggunakan parameter statistik distribusi lognormal dari ISO 19002 yang merupakan hasil percobaan dimana parameter statistik *mean bias* = 1.1266 dan standar deviasi = 0.0572.

Data variabel acak beban dan kekuatan material akan dibuat dalam satu dataset pasangan data tinggi gelombang dan periodanya serta kapasitas kuat leleh material.

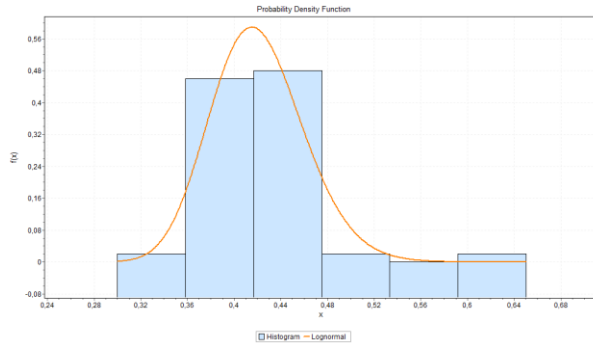
Hubungan parameter tinggi gelombang dan perioda gelombang yang didapat dari hasil analisis regresi linear ditampilkan pada persamaan (4).

$$T = 2.1131H + 4.1218 \dots (4)$$

Terdapat dua dataset nilai UC yang masing-masing merupakan hasil analisis kehandalan dengan *inplace* tanpa faktor beban dan faktor reduksi kuat material serta hasil analisis kehandalan dengan *inplace* dengan faktor beban LRFD.

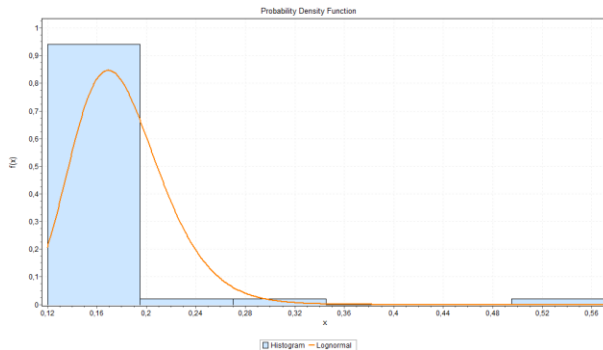
Kedua dataset tersebut setelah dilakukan analisis jenis distribusi didapatkan bahwa jenis distribusi yang cocok digunakan adalah lognormal. Pada gambar 7 dan 8

ditunjukkan grafik *Probability Density Function* (PDF) dari *member* 1888-1739 dan 1008-1012.



Gambar 7 PDF Member 1888-1379 (0.42, 0.04)

PDF diatas merupakan PDF *member* 1888-1379 dengan parameter statistik *mean* 0.42 dan standar deviasi 0.04.



PDF diatas merupakan PDF *member* 1008-1012 dengan parameter statistik *mean* 0.18 dan standar deviasi 0.06

Dari hasil pengolahan data UC didapatkan bentuk distribusi yang cocok untuk keempat elemen penentu parameter adalah lognormal seperti ditampilkan pada tabel 3 dan 4.

Tabel 3 Selisih Dn Terbesar untuk Setiap Distribusi (Non-Faktor)

Member	D		
	Normal	Rayleigh	Lognormal
1888-1739	0.2169	0.4130	0.1916
1678-1000	0.2760	0.4173	0.2458
1008-1012	0.4064	0.3609	0.3539
1073-1074	0.2512	0.3789	0.2188

Tabel 4 Selisih Dn Terbesar untuk Setiap Distribusi (LRFD)

Member	D		
	Normal	Rayleigh	Lognormal
1888-1739	0.113	0.493	0.106
1678-1000	0.135	0.437	0.131
1008-1012	0.248	0.4823	0.2337
1073-1074	0.1412	0.482	0.1365

Dengan distribusi Lognormal, akan ditentukan nilai indeks kehandalan menggunakan persamaan performansi yang sudah ditentukan. Persamaan performansi tersebut akan digunakan untuk menentukan besar dari probabilitas kegagalan member p_f .

$$p_s = 1 - p_f = P[UC \geq 1] \dots (5)$$

$$p_f = P(UC \geq 1) = 1 - \left[\Phi \left(\frac{1 - \lambda_{UC}}{V_{UC}} \right) \right] \dots (6)$$

$$p_f p_f = 1 - p_s \dots (7)$$

$$p_s = [\Phi(\beta)] \dots (8)$$

$$\beta = \frac{(1 - \lambda_{UC})}{V_{UC}} \dots (9)$$

Dengan parameter statistik yang sudah didapat untuk masing-masing elemen penentu, didapatkan nilai indeks kehandalan untuk struktur seperti pada tabel 5 dan tabel 6.

Tabel 5 Nilai Indeks Kehandalan Elemen yang Ditinjau (Non-Faktor)

Member	Beta
1888-1739	5.541
1678-1000	5.501
1008-1012	3.823
1073-1074	5.261

Tabel 6 Nilai Indeks Kehandalan Elemen yang Ditinjau (LRFD)

Member	Beta
1888-1739	5.077
1678-1000	5.230
1008-1012	3.014
1073-1074	4.713

Nilai indeks kehandalan yang didapatkan dari hasil perhitungan menunjukkan tingkat kehandalan yang tinggi dimana menurut Yong Bai(2003:475), nilai *Target Level* untuk kehandalan struktur anjungan lepas pantai itu dapat dikelompokkan kedalam tiga kelompok.

Tabel 7 Target Level Indeks Kehandalan (Yong Bai 2003:475)

Safety Classes	Target	Reliability Index
Low	$p_F = 10^{-2}$	$\beta = 2.32$
Normal	$p_F = 10^{-3}$	$\beta = 3.09$
High	$p_F = 10^{-4}$	$\beta = 3.72$

Dari hasil analisis dapat ditemukan bahwa struktur *jacket* empat kaki di perairan Laut Natuna yang dikaji pada tugas akhir ini memiliki nilai indeks kehandalan yang sangat besar dimana struktur didesain dengan menggunakan kode API RP-2A LRFD. Perlu diketahui juga bahwa data

gelombang yang digunakan untuk analisis kehandalan ini merupakan data gelombang selama 50 tahun dan data tinggi gelombang desain maksimum 100 tahun-an tidak terlampaui ketika proses *generate* data gelombang dilakukan.

Pada hasil analisis kehandalan dengan membangkitkan kembali faktor beban dan faktor reduksi yang digunakan pada analisis *inplace*, didapatkan nilai kehandalan yang lebih kecil namun tidak terlalu besar jika dimasukkan ke dalam *target level* indeks kehandalan menurut Yong Bai 2003:475. Pada *member* kritis *pile* didapat nilai indeks kehandalan sebesar 3.014 yang artinya tingkat keamanannya *medium*. Mengingat fungsi dan lokasinya sebagai *pile* yang tentu sangat kritis bagi struktur keseluruhan maka nilai indeks kehandalan 3.014 sudah cukup tinggi untuk *pile*. Nilai yang direkomendasikan adalah sebesar 3.72.

KESIMPULAN

1. Hasil analisis *inplace* kondisi *operating*, *member* yang memiliki nilai UC terbesar ada pada dek dimana nilai UC-nya adalah sebesar 0.96 sedangkan untuk kondisi *storm* nilai UC terbesar ada pada konduktor bagian *splash-zone* dengan nilai UC sebesar 0.975. Untuk hasil analisis *inplace* untuk *joint punching shear* didapatkan nilai UC terbesarnya ada pada daerah pertemuan *brace* dan *chord* di *jacket*. Hasil analisis seismik menunjukkan nilai UC *member* struktur cukup terpengaruh pada struktur dimana nilai UC *member* terbesarnya berubah menjadi 0.996 untuk kondisi DLE. Desain struktur sudah memenuhi ketentuan dari API RP-2A LRFD menurut hasil

analisis *inplace*, dan *seismic* namun belum memenuhi untuk analisis *fatigue*.

2. Indeks kehandalan struktur (β) terbesar yang didapat untuk kondisi tanpa faktor beban dan faktor reduksi material adalah sebesar 5.541 sedangkan untuk kondisi pembebanan LRFD adalah sebesar 5.230. Hasil analisis dengan menggunakan data tinggi gelombang signifikan H_s yang menunjukkan nilai indeks kehandalan yang cukup besar tersebut menunjukkan bahwa faktor beban yang digunakan pada struktur yang dikaji adalah terlalu besar.

DAFTAR PUSTAKA

American Petroleum Institute. 1993. *API Recommended Practice 2A-LRFD: Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platform – Load and Resistance Factor Design*. Houston: Handling Services

Bai, Yong. 2003. *Marine Structural Design*. Oxford: Elsevier.

Chakrabarti, Subrata K. 2005. *Handbook of Offshore Engineering*. Oxford: Elsevier.

Goda, Yoshimi. 2010. *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Singapore: World Scientific.

Halдар. Achintyam 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*.

Wurjanto, Andoyo. 2004. *Analisis Statistik dan Probabilitas*. Bandung: Penerbit ITB.