

Analisis Kehandalan Anjungan Lepas Pantai Tipe Jacket Berdasarkan Kapasitas *Fatigue* pada Sambungan

Ricky L. Tawekal¹⁾Rony Heriana²⁾

Abstrak

Konsep dasar dari analisis kehandalan menyatakan bahwa kapasitas dan faktor beban adalah suatu besaran statistik dengan nilai rata-rata, standar deviasi, dan memiliki bentuk probabilitas tertentu (misalnya bentuk probabilitas normal, log normal, dan lain-lain). Ketika kapasitas dan beban tersebut diekspresikan dalam bentuk fungsi performansi, maka terdapat suatu probabilitas dimana beban melebihi kapasitas struktur; probabilitas ini adalah probabilitas kegagalan (P_f) dan kehandalan dinyatakan dengan $(1 - P_f)$.

Dalam makalah ini diuraikan konsep dasar dan aplikasi analisis kehandalan berdasarkan kapasitas *fatigue* (kelelahan) pada sambungan, dengan mengambil studi kasus anjungan lepas pantai tipe jacket. Pembahasan difokuskan pada evaluasi persamaan fungsi performansi akhir dengan pendekatan semi probabilitas.

Kata-kata Kunci : Struktur jacket, analisis kehandalan, kelelahan.

Abstract

The fundamental concept for reliability analysis is that resistance and load factors are statistical quantities with mean value, variance and some form of distribution (probability density function, e.g. Normal, Log Normal, etc). When combined together via an expression to describe the limit state, there will be a finite probability that the load will exceed the resistance; this defines the probability of failure (P_f) and since reliability is equal to $(1 - P_f)$.

This paper will discuss the basic consideration involved in a reliability based on joint's fatigue capacity approach for the design and analysis of jacket offshore structure. Emphasis will be placed on a systematic semi-probabilistic approach in evaluation of fatigue limit state function.

Keyword : Jacket offshore structure, reliability analysis, fatigue.

1. Pendahuluan

Tujuan utama dari seluruh desain struktur adalah untuk mendapatkan struktur yang memenuhi persyaratan fungsional, keamanan, dan faktor ekonomi. Ketiga aspek tersebut saling berhubungan satu sama lain dan dibutuhkan suatu proses iterasi untuk mendapatkan desain yang optimum. Desain yang ada pada saat ini adalah berdasarkan penggunaan angka keamanan parsial dan kontrol terhadap beberapa batasan. Suatu struktur atau komponen struktur dinyatakan tidak memenuhi persyaratan desain jika salah satu batasan (*limit states*) terlampaui. Berdasarkan regulasi NPD 1996 terdapat empat kategori batasan (*limit states*), yaitu *Ultimate Limit State* (ULS), *Fatigue Limit State* (FLS), *Progressive Collapse Limit State* (PLS), dan *Serviceability Limit State* (SLS).

Perlu ditekankan bahwa persamaan desain dalam standar yang ada saat ini didasarkan pada nilai karakteristik yang didefinisikan dari beberapa nilai *fracture* atau nilai batas bawah. Dalam analisis kehandalan, batasan-batasan (*limit states*) tersebut akan didasarkan pada nilai sebenarnya yang memperhitungkan faktor ketidakpastian dimana faktor keamanan beban dan material tidak dimasukkan pada persamaan fungsi batas (*limit state function*).

Lingkup aplikasi analisis kehandalan untuk struktur jacket adalah untuk verifikasi detail desain dan juga kebutuhan inspeksi di lapangan. Berdasarkan komponen penting dari struktur jacket, terdapat beberapa pola keruntuhan yang mungkin, yaitu:

- Komponen jacket (*legs* dan *braces*) (ULS):
✓ *Buckling* pada elemen batang;

1. Ketua Kelompok Keahlian Teknik Kelautan - ITB.
2. Alumni Program Magister Teknik Kelautan - ITB.

Catatan : Usulan makalah dikirimkan pada 30 Oktober 2006 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 30 Oktober 2006 - 28 Nopember 2006. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 29 Nopember 2007 hingga 14 Juli 2007.

- Lokal *buckling*
- Global *buckling*
- *Buckling* yang terjadi akibat tekanan luar
- ✓ Keruntuhan struktur secara keseluruhan yang diakibatkan beban lingkungan (misal beban gelombang, arus, dan angin)
- Keruntuhan sambungan elemen tubular (ULS)
- *Fatigue* pada sambungan las elemen tubular (FLS)

Anjungan lepas pantai yang ada saat ini umumnya relatif aman berkaitan dengan faktor keamanan pada beban lingkungan. Kurangnya data struktur anjungan lepas pantai (gambar, tipe material, prosedur pengelasan, hasil inspeksi, data perbaikan, dll) akan memberikan ketidakpastian pada kapasitas struktur terhadap beban lingkungan. Permasalahan faktor ketidakpastian akan semakin meningkat jika dihadapkan dengan fenomena alam yang bersifat acak.

2. Kehandalan Struktur Berdasarkan Kapasitas *Fatigue* pada Sambungan

Perencanaan anjungan lepas pantai sering dihadapkan pada faktor-faktor ketidakpastian dalam analisis struktur, ketidakpastian tersebut berkaitan dengan beban, material, geometri, dll. Parameter ketidakpastian ini harus diperhitungkan dalam perencanaan untuk menghindari kegagalan struktur. Suatu cara lama yang digunakan untuk mengakomodir parameter ketidakpastian ini adalah dengan penggunaan "faktor keamanan" yang mengambil batas konservatif untuk suatu angka desain.

Analisis kehandalan struktur digunakan untuk mengevaluasi kegagalan struktur berkaitan probabilitas sistem kekuatan-beban. Analisis ini menggunakan informasi nilai rata-rata dan distribusi variabel ketidakpastian dalam menentukan probabilitas kegagalan struktur.

Model desain kehandalan struktur dapat mendefinisikan beban dan tahanan sebagai probabilitas variabel acak. **Gambar 1** menunjukkan bahwa formulasi kehandalan struktur bergantung pada tingkat *overlap* (beririsan) fungsi kerapatan probabilitas antara beban dan tahanan. Dari **Gambar 1**, juga diketahui bahwa tidak ada daerah yang bebas resiko.

Fungsi kegagalan didefinisikan sebagai:

$$M = g(R, S) = R - S \quad (1)$$

dimana: $M = g(R, S)$ = fungsi performansi

R = fungsi resistansi

S = fungsi beban

Probabilitas kegagalan didefinisikan sebagai:

$$p_f = P(R < S) \quad (2)$$

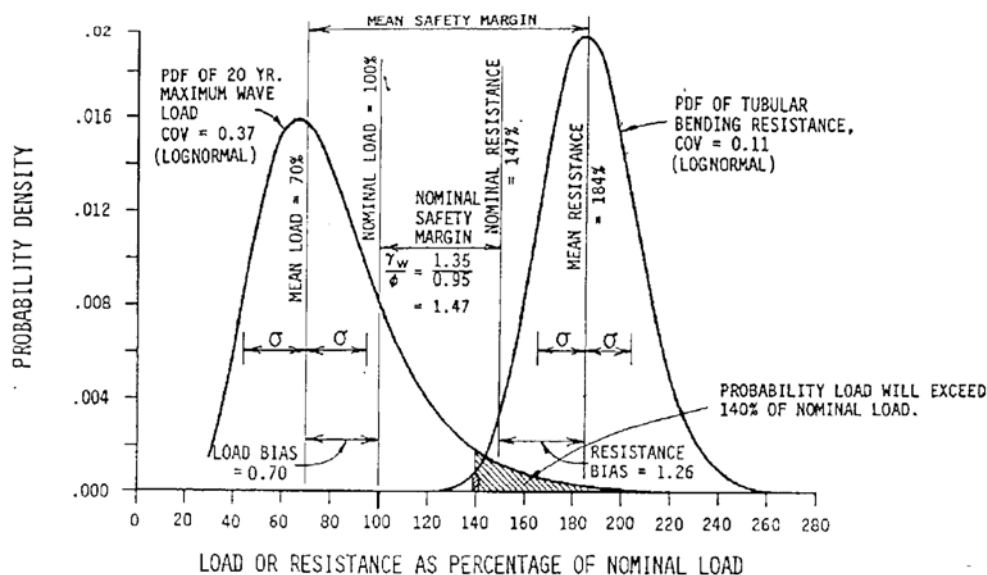
Definisi indeks kehandalan, β , sebagai

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (3)$$

dimana:

μ_M = nilai rata-rata M (*safety margin*)

σ_M = standard deviasi M (*safety margin*)



Gambar 1. Grafik fungsi kerapatan probabilitas terhadap tahanan dan beban (Sumber : API RP2A – LRFD)

Analisis *fatigue* akibat gelombang pada anjungan lepas pantai secara umum merupakan suatu prosedur perhitungan, yaitu dimulai dengan analisis gaya gelombang yang menimbulkan range tegangan pada wilayah *hot-spot* dan diakhiri dengan estimasi kerusakan akibat *fatigue*. Hubungan antara gelombang dan kerusakan *fatigue* dibentuk oleh model matematis dari gaya gelombang, perilaku struktur, dan perilaku material. Analisis *fatigue* probabilitas dapat dibagi kedalam empat tahapan, yaitu:

1. Penentuan model probabilitas lingkungan *sea states* (jangka pendek dan jangka panjang)
2. Penentuan model probabilitas gaya gelombang
3. Analisis respon struktur (lokal dan global)
4. Penentuan model stokastik dari akumulasi kerusakan *fatigue*

Pada analisis kehandalan *fatigue* dibutuhkan evaluasi model probabilitas variabel acak yang membentuk sistem kapasitas-kerusakan *fatigue* pada suatu sambungan. Hasil dari analisis ini berupa indeks kehandalan atau probabilitas kegagalan yang dapat dijadikan acuan dalam meninjau kapasitas sambungan selama masa layanan struktur atau alternatif penggunaan kembali suatu anjungan.

Sejauh ini, ada dua metoda pendekatan umum yang telah dicoba digunakan untuk memformulasikan model kehandalan-*fatigue*, (dalam hal ini pada sambungan las *jacket offshore structure*). Pendekatan pertama adalah pendekatan kurva S-N yang didasarkan pada prinsip *cumulative damage palmgren-miner rule*, sedangkan pendekatan yang kedua adalah pendekatan *fracture mechanics*.

Diagram kurva S-N digunakan untuk menyatakan kapasitas *fatigue* dari suatu sambungan yang dikenai beban uniaksial dengan amplitudo konstan. Untuk sambungan yang di las, kurva S-N tidak tergantung pada tegangan leleh material. Hal ini disebabkan sambungan las memiliki cacat retak dan umur *fatigue* akibat pertumbuhan *crack* yang hanya tergantung pada tegangan siklus lokal yang terjadi pada ujung retakan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa fenomena *fatigue* sangat dipengaruhi oleh perubahan geometri yang menyebabkan adanya konsentrasi tegangan pada daerah sambungan.

Desain *fatigue* berdasarkan pendekatan kurva S-N mengasumsikan bahwa kegagalan *fatigue* terjadi ketika retakan halus (*crack*) telah mencapai ketebalan dari elemen batang. Pendekatan ini umumnya digunakan pada tahap awal desain dimana belum terdeteksi adanya *crack* pada sambungan dan digunakan sebagai inisiasi pertumbuhan *crack*. Setelah dilakukan inisiasi *crack* dengan pendekatan kurva S-N, pertumbuhan *crack* dapat diprediksikan dengan menggunakan pendekatan mekanika fraktur.

2.1 Akumulasi kerusakan *palmgren- miner*

Untuk perhitungan akumulasi kerusakan *fatigue* dilakukan berdasarkan distribusi tegangan dan model kapasitas kurva S-N. Besarnya kerusakan ini tergantung pada jumlah dan besar tegangan yang bekerja dan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$d = \frac{N}{N_{SN}} \quad (4)$$

Dimana d adalah kerusakan (*damage*), N adalah jumlah aktual siklus tegangan, dan N_{SN} adalah jumlah siklus tegangan yang menyebabkan kegagalan (didapatkan dari kurva S-N). Formula diatas merupakan akumulasi kerusakan *fatigue* berdasarkan pendekatan *Miner-Palmgren*. Pendekatan ini mendefinisikan bahwa kriteria kegagalan *fatigue* dinyatakan sebagai derajat akumulasi kerusakan *fatigue*. Untuk variasi amplitudo tegangan yang konstan, kegagalan akan terjadi jika $d \geq 1.0$. Sedangkan untuk amplitudo beban yang bervariasi, nilai akumulasi kerusakan d akan bernilai acak.

Berdasarkan akumulasi kerusakan *Miner* untuk beberapa *sea-states*, total kerusakan dihitung dengan persamaan berikut:

$$d_{Tot} = \sum_i \frac{N_i}{N_{SN}(S_{eq,i})} \quad (5)$$

Notasi i menunjukkan untuk semua *sea-state*.

Pada struktur lepas pantai umumnya jumlah siklus tegangan yang menyebabkan *fatigue* akan besar, sedangkan variabel ketidakpastian pada perhitungan akumulasi kerusakan akan mendekati nol. Untuk variabel ketidakpastian kapasitas *fatigue* dapat diperhitungkan dengan memodelkan kegagalan *fatigue* ketika kerusakan total d melebihi Δ , dimana Δ didefinisikan sebagai variabel stokastik dengan distribusi normal. Berikut ini merupakan parameter statistik untuk kapasitas *fatigue*, Δ , yang direkomendasikan oleh DNV (*Guideline for Offshore Structural Reliability Analysis-Application to Jacket Platform*, DNV Report 95-3203)

$$E[\Delta] = 1.0 \quad CoV[\Delta] = 0.2 \quad (6)$$

2.2 Probabilitas *fatigue* spektral

Beban gelombang dalam analisis spektral *fatigue* dimodelkan sebagai gelombang acak yang direpresentasikan oleh spektrum energi gelombang. Berdasarkan persamaan respon stokastik linier dapat ditentukan respon berupa spektrum energi tegangan hot spot pada sambungan. Spektrum energi tegangan

hot spot ini akan merepresentasikan beban stokastik *fatigue* pada sambungan yang sekaligus akan menentukan usia dari sambungan tersebut.

Fungsi performansi yang diperoleh pada akhirnya menunjukkan bahwa bentuk akhir beban *fatigue* stokastik merupakan fungsi ekspektasi momen m^{th} dari distribusi probabilitas range tegangan. Disamping itu akan dibuktikan bahwa ekspektasi momen m^{th} dari distribusi probabilitas range tegangan dapat dinyatakan dalam *parameter root mean square* dari range tegangannya (σ_{rms}).

Tegangan RMS untuk suatu spektrum kerapatan gelombang *fatigue* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\sigma_{RMS,i} = \sqrt{\int_0^\infty H^2(f) \times S_i(f) df} \quad (7)$$

dimana:

$S_i(f)$ = spektrum kerapatan gelombang

$H(f)$ = fungsi transfer pada sea-state tertentu

Untuk tiap tegangan RMS yang diperoleh terdapat satu perioda rata-rata, T_z , yang biasa disebut *Zero Crossing Period* dan dihitung dengan persamaan berikut:

$$T_z = \frac{\sigma_{RMS,i}}{\sqrt{\int_0^\infty f^2 \times H^2(f) \times S_i(f) df}} \quad (8)$$

Untuk proses *narrow band*, *zero crossing period* merupakan perioda rata-rata atau kebalikan dari frekuensi rata-rata dari proses. Ekspektasi dari jumlah siklus, N , berdasarkan suatu spektrum selama masa layan tertentu dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$N = \frac{aT}{T_z} \quad (9)$$

Dimana

T = umur desain struktur

a = fraksi umur desain dari spektrum tertentu

Untuk suatu range tegangan yang diberikan S , jumlah siklus tegangan yang menyebabkan keruntuhan, $N_F(s)$, dapat ditentukan dari kurva S-N yang akan digunakan. Sehingga persamaan kerusakan dD , untuk range tegangan antara S dan $S+dS$ dapat dituliskan sebagai berikut:

$$dD = \frac{N}{N_F(s)} p(s) ds \quad (10)$$

Dimana $P(S)$ adalah probabilitas dari range tegangan antara S dan $S+dS$

Berdasarkan asumsi awal, bahwa proses acak elevasi muka air adalah *Gaussian* dan *narrow band*, maka bentuk spektrum respon tegangan pun akan mengikuti *Gaussian* serta *narrow band* juga. Berdasarkan kondisi ini dapat disimpulkan bahwa range tegangan merupakan variabel acak dengan berdistribusi *Rayleigh*. Fungsi kerapatan probabilitas *Rayleigh* untuk range tegangan diberikan oleh persamaan berikut ini:

$$p(s) = \frac{s}{\sigma_{RMS}^2} \exp \left[-\frac{s^2}{2 \times \sigma_{RMS}^2} \right] \quad (11)$$

Dimana:

S = range tegangan

σ_{RMS} = harga RMS untuk range tegangan

Dengan mensubstitusikan **Persamaan (11)** kedalam **Persamaan (10)**, maka persamaan ekspektasi kerusakan untuk suatu spektrum dapat dituliskan sebagai berikut:

$$D = \frac{N}{\sigma_{RMS}^2} \int_0^\infty \frac{s}{N_F(s)} \exp \left\{ -\frac{s^2}{2 \times \sigma_{RMS}^2} \right\} ds \quad (12)$$

Total ekspektasi kerusakan untuk seluruh *sea state* dalam rentang waktu umur rencana merupakan jumlah kerusakan yang diakibatkan oleh masing-masing *sea state*. Ekspektasi umur *fatigue* ditentukan dengan membagi umur rencana dengan total ekspektasi kerusakan.

3. Formulasi Fungsi Performansi

Formulasi fungsi performansi untuk analisis kehandalan *fatigue* kurva S-N dapat dituliskan sebagai berikut:

$$g(\Delta, D) = \Delta - D \quad (13)$$

Dengan menggunakan persamaan kurva S-N dan mengasumsikan range tegangan untuk tiap seastate j , adalah berdistribusi *Rayleigh*, maka ekspektasi kerusakan untuk suatu spektrum pada seastate j dapat dituliskan sebagai berikut:

$$D_j = \frac{a_j T}{A \cdot T_{z,j} \cdot \sigma_{RMS,j}^2} \int_0^\infty \frac{s_j}{s_j^{-m}} \exp \left\{ -\frac{s_j^2}{2 \times \sigma_{RMS,j}^2} \right\} ds \quad (14)$$

atau

$$D_j = \frac{a_j T}{A \cdot T_{z,j} \cdot \sigma_{RMS,j}^2} \int_0^\infty s_j^{m+1} \exp \left\{ -\frac{s_j^2}{2 \times \sigma_{RMS,j}^2} \right\} ds \quad (15)$$

$$\text{Suku} \int_0^\infty s_j^{m+1} \exp\left\{-\frac{s_j^2}{2 \times \sigma_{RMS,j}^2}\right\} ds$$

dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$\int_0^\infty s_j^{m+1} \exp\left\{-\frac{s_j^2}{2 \times \sigma_{RMS,j}^2}\right\} ds = \frac{\Gamma\left(\frac{m+1+1}{2}-1\right)}{2 \cdot \left(\frac{1}{2 \times \sigma_{RMS,j}^2}\right)^{\left(\frac{m+1+1}{2}\right)}} \quad (16)$$

Dengan mensubstitusikan **Persamaan (16)** pada **Persamaan (15)**, diperoleh persamaan ekspektasi kerusakan yang baru sebagai berikut:

$$D_j = \frac{a_j T}{A \cdot T_{z,j}} \left(2 \cdot St_j(\sigma) \sqrt{2}\right)^m \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \quad (17)$$

Dimana:

$St_j(\sigma)$ = standar deviasi proses ke j atau besaran $\sigma_{RMS,j}$

Γ = Fungsi gamma

Persamaan fungsi perfomansi yang baru untuk analisis kehandalan *fatigue* dengan pendekatan kurva S-N didapatkan dengan mensubstitusikan **Persamaan (17)** kedalam **Persamaan (13)**, yaitu:

$$g(\Delta, D) = \Delta - \sum_{j=1}^n \frac{a_j T}{A \cdot T_{z,j}} \left(2 \cdot St_j(\sigma) \sqrt{2}\right)^m \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \quad (18)$$

Karena kerusakan *fatigue* merupakan hasil dari analisis tegangan lokal maupun global, *JCSS (Joint Committee for Structural Safety) probabilistic model code* (2004) merekomendasikan untuk mengikutsertakan faktor ketidakpastian analisis tersebut pada perhitungan kerusakan akibat beban *fatigue*.

$$g = \Delta - \sum_{j=1}^n \frac{a_j T}{A \cdot T_{z,j}} \left(2 \cdot St_j(\sigma) \sqrt{2}\right)^m \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \cdot B_{scf}^m \cdot B_{glob}^m \quad (19)$$

atau

$$g = \Delta - B_{scf}^m \cdot B_{glob}^m \cdot T \cdot \frac{1}{A} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{a_j}{T_{z,j}} \left(2 \cdot St_j(\sigma) \sqrt{2}\right)^m \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \quad (20)$$

Berdasarkan rekomendasi yang tertera pada *JCSS*, variabel ketidakpastian analisis tegangan lokal dan global keduanya didefinisikan sebagai variabel

stokastik berdistribusi log normal dengan parameter statistik sebagai berikut:

$$E[B_{scf}] = 1.0 \quad CoV[B_{scf}] = 0.2 \quad (21)$$

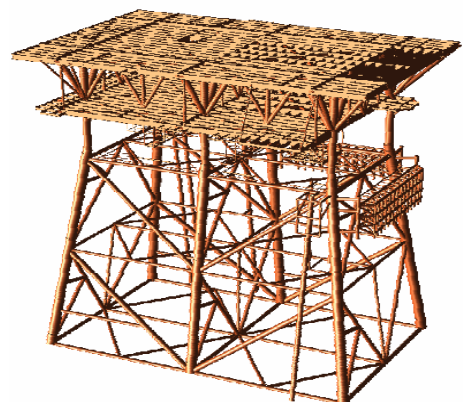
$$E[B_{glob}] = 1.0 \quad CoV[B_{glob}] = 0.1 \quad (22)$$

4. Studi Kasus

Dalam studi kasus ini akan dilakukan perhitungan indeks kehandalan berdasarkan kapasitas *fatigue* pada sambungan. Struktur yang menjadi objek studi adalah anjungan lepas pantai tipe *jacket* enam kaki dengan *double batter* untuk keempat kaki di tepi sebesar 1:8/1:8 dan *single batter* untuk dua kaki ditengah sebesar 1:8. *Bracing* horizontal ditempatkan pada elevasi +10.0 ft, -30.0 ft, dan -74.0 dari MLW. Struktur *deck* mempunyai tiga level, yaitu *main deck* pada elevasi +55.0 ft, *cellar deck* pada elevasi +35.0 ft, dan *sub-cellar deck* pada elevasi +24.5 ft. Anjungan berada di perairan dengan kedalaman 74.0 ft dan diasumsikan telah berdiri selama 30 tahun. Anjungan direncanakan akan digunakan kembali untuk masa layan 10 tahun kedepan.

Untuk analisis *fatigue*, beban lingkungan yang diperhitungkan hanya akibat gelombang saja. Data gelombang yang ada berupa *scatter diagram* sebanyak 8 arah yang dikarakterisasikan oleh tiga parameter yaitu tinggi gelombang signifikan, periode puncak dan arah datangnya.

Pada studi kasus ini, struktur dimodelkan secara tiga dimensi dengan bantuan modul interaktif *precede* pada perangkat lunak SACS. Komponen utama struktur yang dimodelkan meliputi *topside*, *jacket*, *boatlanding*, dan *riser*. Komponen *boatlanding* dan *riser* sebenarnya tidak memberikan kontribusi kekakuan pada struktur, sehingga tujuan utama pemodelan ini adalah untuk menangkap gaya hidrodinamik yang selanjutnya akan disalurkan pada struktur *jacket*. Model struktur studi kasus ini dapat dilihat pada **Gambar 3** di bawah ini



Gambar 3. Model struktur anjungan tipe jacket 6 kaki

Beberapa kriteria dan parameter penting yang digunakan dalam analisis kerusakan *fatigue* pada studi kasus ini meliputi:

- Struktur telah berdiri selama 30 tahun dan direncanakan akan digunakan kembali untuk masa layan 10 tahun mendatang. Berdasarkan persyaratan API RP2A, maka umur *fatigue* minimum setiap sambungan adalah 50 tahun.
- Perhitungan kerusakan *fatigue* berdasarkan kurva S-N API X Prime Curve with Thickness Correction.
- Faktor konsentrasi tegangan pada sambungan akan dihitung berdasarkan persamaan empiris *Efthymiou*.
- Spektrum energi gelombang yang digunakan adalah spektrum gelombang *Jonswap* dengan parameter gamma, $\gamma = 1.0$, dan parameter $C = 1.525$.

Untuk analisis kerusakan *fatigue* ini dilakukan dengan modul *fatigue damage* pada software SACS. Pada analisis *fatigue* spektral, hubungan antara range tegangan dengan tinggi gelombang sebagai fungsi dari frekuensi dinyatakan oleh suatu fungsi transfer. Range tegangan yang dimaksud adalah range tegangan akibat beban gelombang siklis yang dipilih pada analisis *wave response*, yaitu untuk tiap arah telah dibangkitkan 75 gelombang Airy dengan *steepness* konstan.

Berdasarkan persamaan SCF yang dipilih, maka range tegangan *hot spot* di lokasi tertentu pada suatu komponen sambungan dapat ditentukan berdasarkan range tegangan nominal. Sedangkan penentuan *transfer function range tegangan hot spot* di lokasi tersebut diperoleh dengan membagi range tegangan *hot spot* oleh tinggi gelombang yang menyebabkannya. Untuk setiap komponen sambungan, *transfer function* ditentukan di delapan titik dengan interval antar titik sebesar 45 deg.

4.1 Pemilihan komponen sambungan

Berdasarkan hasil analisis *fatigue* spektral, terdapat satu join dengan umur *fatigue* yang tidak memenuhi umur rencana (dibawah 50 tahun), yaitu join 270 dengan umur *fatigue* 17.62 tahun. Posisi komponen sambungan tersebut pada struktur jacket dapat dilihat pada **Gambar 4**.

4.2 Formulasi fungsi performansi

Persamaan (20) sebagai fungsi performansi akhir analisis keandalan spektral *fatigue* untuk suatu komponen sambungan dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

$$g = \Delta \cdot B_{scf}^m \cdot B_{glob}^m \cdot T \cdot \frac{1}{A} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{a_j}{T_{z,j}} \left(2 \cdot St_j(\sigma) \sqrt{2} \right)^m \Gamma \left(\frac{m}{2} + 1 \right)$$

Dimana:

Δ = variabel ketidakpastian kapasitas *fatigue*

B_{scf} = variabel ketidakpastian analisis tegangan local pada sambungan

B_{glob} = variabel ketidakpastian analisis tegangan global pada struktur

T = umur desain sambungan

m, A = parameter kurva S-N

a_j = fraksi umur desain dari spektrum j

$T_{z,j}$ = zero crossing period

$St_j(\sigma)$ = Standard deviasi dari proses $j = \sigma_{RMS,j}$

Parameter m dan A pada persamaan diatas adalah parameter untuk kurva S-N standar yang diekspresikan dengan persamaan berikut ini:

$$N_{SN} = \frac{A}{(S)^m} = A \cdot S^{-m}$$

Pada studi kasus ini, kurva S-N yang digunakan untuk perhitungan jumlah siklus tegangan yang menyebabkan kegagalan adalah kurva S-N API X'. Sehingga untuk menyelesaikan persamaan fungsi performansi diatas, kurva S-N API X' akan diubah kedalam bentuk fungsi kurva S-N standar. Dalam bentuk persamaan, kurva S-N API dapat dituliskan sebagai berikut:

$$N = 2 \times 10^6 \left(\frac{\Delta \sigma}{\Delta \sigma_{ref}} \right)^{-m}$$

Dimana:

N = Jumlah siklus tegangan yang diijinkan

$\Delta \sigma$ = Range tegangan *hot-spot* (Ksi)

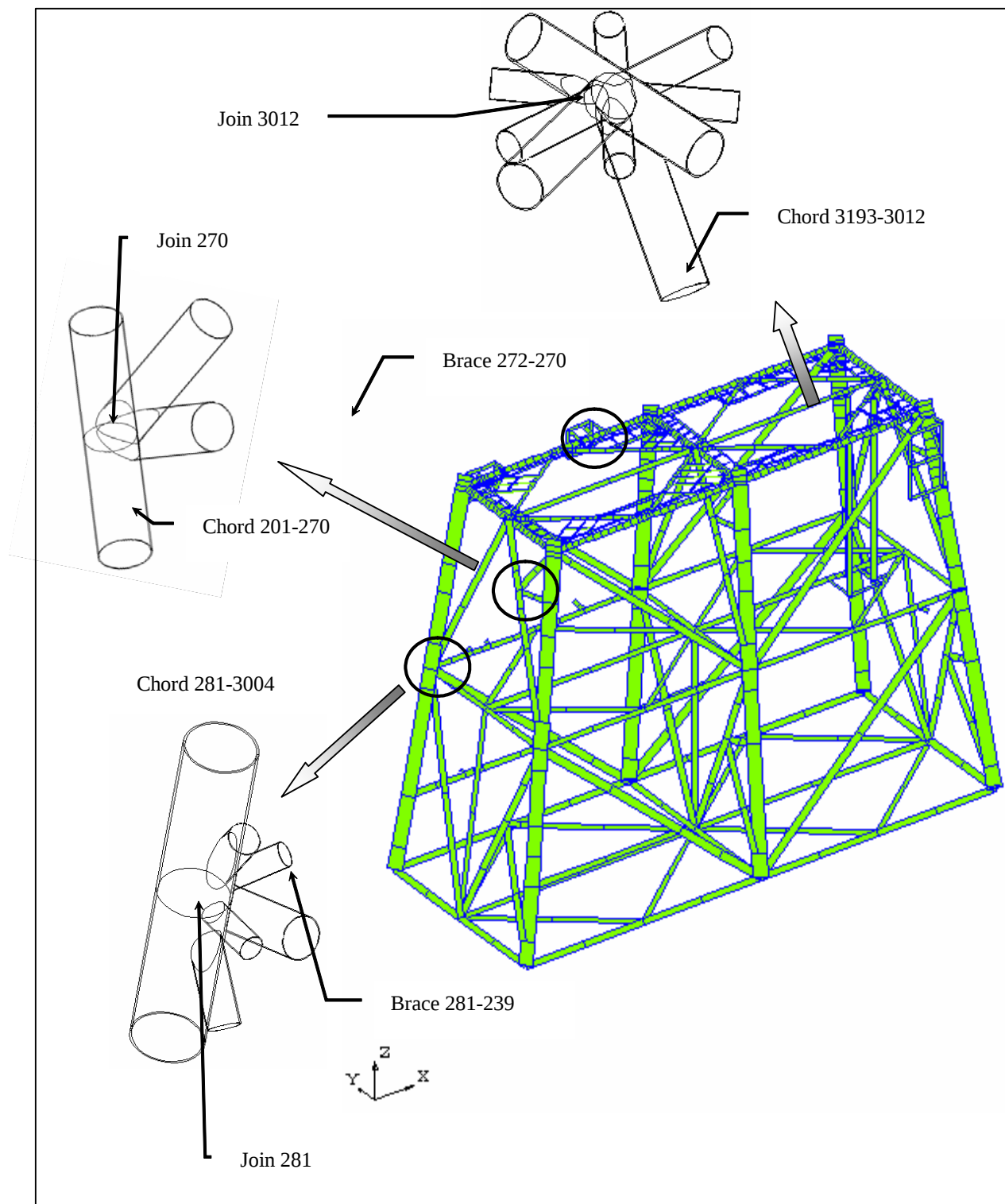
Besaran parameter m pada kurva S-N API X' adalah 3.74, sedangkan besar range tegangan pada 2×10^6 siklus ($\Delta \sigma_{ref}$) adalah 11.4 Ksi. Dengan mensubstitusikan harga m dan $\Delta \sigma_{ref}$ tersebut kedalam persamaan umum kurva S-N API, maka akan didapatkan persamaan baru untuk kurva S-N API X' sebagai berikut:

$$N = 1.794 \times 10^{10} \cdot \Delta \sigma^{-m}$$

atau

$$N = A \cdot \Delta \sigma^{-m}$$

Pada studi kasus ini, parameter A pada kurva S-N API X' yang semula bernilai konstan akan diubah menjadi variabel acak. Parameter material kurva S-N (A) umumnya akan memiliki distribusi log normal (*Wirsching*, 1984) dengan nilai koefisien variasi antara 0.3-0.6.



Gambar 4. Lokasi komponen sambungan untuk analisis kehandalan

$$\text{Suku} \quad T \cdot \frac{1}{A} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{a_j}{T_{z,j}} \left(2 \cdot St_j(\sigma) \sqrt{2} \right)^m \Gamma \left(\frac{m}{2} + 1 \right)$$

pada persamaan fungsi performansi diatas sebenarnya merupakan ekspektasi kerusakan akibat seastate j selama umur layan T . Berdasarkan informasi ini dan hasil modifikasi dari kurva S-N API X', maka fungsi performansi baru untuk analisis kehandalan *fatigue* adalah sebagai berikut:

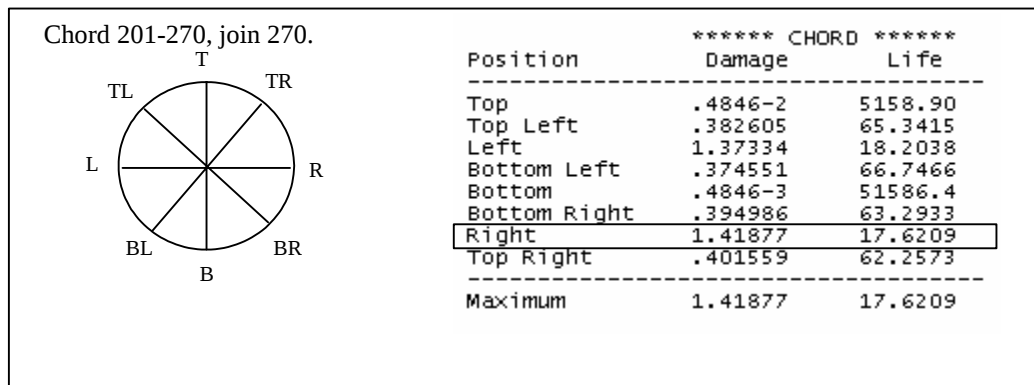
$$g = \Delta - B_{scf}^m \cdot B_{glob}^m \cdot T \cdot \frac{1.794 \times 10^{10}}{A} \cdot \sum_{j=1}^n d_j$$

Besarnya ekspektasi kerusakan (d_j) untuk setiap titik pada komponen sambungan dapat ditentukan dari hasil analisis *fatigue* spektral.

4.3 Penentuan besaran ekspektasi kerusakan

Dari hasil analisis *fatigue* spektral dapat diperoleh besarnya total kerusakan untuk setiap 8 (delapan) titik pada penampang komponen sambungan. Total kerusakan tersebut merupakan akumulasi atau penjumlahan dari kerusakan akibat seastate j selama masa layan T . Dari kedelapan total kerusakan hanya diambil satu yang maksimum untuk menentukan umur *fatigue* komponen sambungan, yaitu dengan membagi umur layan dengan total kerusakan maksimum.

Gambar berikut ini merupakan hasil perhitungan total kerusakan pada penampang *chord* 201-270, join 270.



Gambar 5. Posisi kerusakan *fatigue* komponen *chord* 201-270, join 270

Tabel 3. Besaran ekspektasi kerusakan sambungan studi kasus

No	Join	Member	Tipe Member	Maks kerusakan (25 tahun)	Maks kerusakan (1 tahun)	Umur <i>Fatigue</i> (Tahun)	Lokasi
1	270	201- 270	Chord	1.41877	5.6758×10^{-2}	17.62	R
2	270	272- 270	Brace	0.29806	1.1922×10^{-2}	83.87	R
3	281	281-3004	Chord	0.01546	6.1840×10^{-4}	1617.29	R
4	281	281- 239	Brace	0.04879	1.9516×10^{-3}	512.37	R
5	3012	3193-3012	Chord	0.02574	1.0296×10^{-3}	971.29	R

Keterangan : R = right (kanan)

Dari **Gambar 5** terlihat bahwa total kerusakan maksimum terjadi pada titik sebelah kanan penampang *chord* 201-270 dengan total kerusakan 1.41877. Umur *fatigue* komponen *chord* join 270 diperoleh dengan membagi umur layan struktur dengan total kerusakan maksimum tersebut. Pada studi kasus ini, struktur diasumsikan telah berdiri selama 30 tahun dan direncanakan akan digunakan kembali untuk masa layan 10 tahun mendatang, sehingga umur *fatigue* minimum setiap sambungan berdasarkan persyaratan API RP2A adalah 50 tahun. Jika pada analisis *fatigue* spektral digunakan masa layan 25 tahun dengan angka keamanan 2 (dua), diperoleh umur komponen sambungan *chord* join 270 adalah 17.621 tahun.

Total kerusakan dan umur *fatigue* komponen sambungan yang telah dipilih untuk perhitungan indeks kehandalan *fatigue* dapat dilihat pada **Tabel 3**.

4.4 Properti variabel acak analisis kehandalan *fatigue*

Pada persamaan akhir fungsi performansi kehandalan *fatigue* terdapat 6 (enam) variabel dalam sistem kapasitas dan kerusakan *fatigue* untuk suatu komponen sambungan. Dari keenam variabel tersebut terdapat 4 (empat) variabel yang diasumsikan sebagai variabel acak, yaitu Δ , B_{scf} , B_{glob} , dan A . Sedangkan 2 (dua) variabel lainnya dikategorikan sebagai konstanta, yaitu variabel T dan d_j . Pada tabel berikut ini akan disajikan secara lengkap tipe variabel, jenis distribusi, dan dasar pengambilan seluruh variabel pada analisis reliabilitas *fatigue*.

Tabel 4. Properti parameter model stokastik kehandalan *fatigue*

Parameter	Deskripsi	Besaran dan Distribusi	Keterangan
Δ	Kapasitas <i>fatigue</i> komponen sambungan	Distribusi Normal Mean = 1.0 Standar deviasi = 0.2	Δ berdistribusi normal berdasarkan rekomendasi DNV (<i>Guideline for Offshore Structural Reliability Analysis-Application to Jacket Platform</i> , DNV Report 95-3203)
B_{scf}	Ketidakpastian pada analisis tegangan lokal sambungan	Distribusi Log Normal Mean = 1.0 Standar deviasi = 0.2	B_{scf} berdistribusi log normal berdasarkan rekomendasi JCSS (<i>Joint Committee for Structural Safety</i>) <i>probabilistic model code</i> (2004)
B_{glob}	Ketidakpastian pada analisis tegangan global struktur	Distribusi Log Normal Mean = 1.0 Standar deviasi = 0.1	B_{glob} berdistribusi log normal berdasarkan rekomendasi JCSS (<i>Joint Committee for Structural Safety</i>) <i>probabilistic model code</i> (2004)
A	Parameter material kurva S-N API X'	Distribusi Log Normal Mean = 1.794×10^{10} CoV = 0.3	A berdistribusi log normal berdasarkan rekomendasi Wirsching, 1984
T	Umur layan struktur	Konstan	Indeks kehandalan akan dihitung berdasarkan umur layan komponen sambungan tersebut.
d_j	Ekspektasi kerusakan	Konstan	Ditentukan berdasarkan hasil analisis <i>fatigue</i> spektral untuk setiap komponen sambungan

4.5 Perhitungan kurva indeks kehandalan

Tahap selanjutnya adalah perhitungan nilai indeks kehandalan β tiap komponen sambungan yang dipilih berdasarkan fungsi performansi akhir kehandalan *fatigue* dan parameter stokastik yang telah diketahui. Fungsi performansi akhir kehandalan *fatigue* menunjukkan fungsi tersebut non-linier maka evaluasi indeks kehandalan dapat dilakukan dengan metoda aproksimasi linier melalui ekspansi deret Taylor orde pertama, prosedur tersebut dikenal dengan istilah FOSM (*First Order Second Moment*).

Berikut ini contoh input perhitungan indeks kehandalan sambungan 207 dengan menggunakan software *mathcad*.

Perhitungan Angka Kehandalan Sambungan 270 (Brace 272-270, Chord 201-270)

Fatigue Life = 17.621 Yrs, Design life = 25 Yrs, Life Safety Factor = 2.0

Max Damage = 1.41877, Location = Chord Right, Connection Type = K

Data (Unit=English)

1. Design Life (Year)

$$T := 1$$

2. Ekspektasi kerusakan untuk design life 1 tahun

$$D := 0.0567508$$

3. Parameter ketidakpastian pada kapasitas *fatigue* Δ

$$\mu_1 := 1.0 \quad \text{CoV1} := 0.2 \quad \sigma_1 := \mu_1 \cdot \text{CoV1} \quad \sigma_1 = 0.2 \quad \text{Distribusi Normal}$$

4. Parameter ketidakpastian pada analisis tegangan global B_{glob}

$$\mu_2 := 1.0 \quad \text{CoV2} := 0.1 \quad \sigma_2 := \mu_2 \cdot \text{CoV2} \quad \sigma_2 = 0.1 \quad \text{Distribusi Log Normal}$$

Parameter distribusi Log Normal B_{glob}

$$\sigma \ln X_2 := (\ln(\text{CoV2}^2 + 1))^{0.5} \quad \sigma \ln X_2 = 0.1$$

$$\chi_2 := \mu_2 \cdot \exp[-0.5 \cdot (\sigma \ln X_2)^2] \quad \chi_2 = 0.995$$

5. Parameter ketidakpastian pada faktor konsentrasi tegangan B_{scf}

$$\mu_3 := 1.0 \quad \text{CoV3} := 0.2 \quad \sigma_3 := \mu_3 \cdot \text{CoV3} \quad \sigma_3 = 0.2 \quad \text{Distribusi Log Normal}$$

Parameter distribusi Log Normal B_{scf}

$$\sigma \ln X_3 := (\ln(\text{CoV3}^2 + 1))^{0.5} \quad \sigma \ln X_3 = 0.198$$

$$\chi_3 := \mu_3 \cdot \exp[-0.5 \cdot (\sigma \ln X_3)^2] \quad \chi_3 = 0.981$$

6. Parameter material kurva S-N API X' (A), $m := 3.74$

$$\mu_4 := 1.794 \cdot 10^{10} \quad \text{CoV4} := 0.3 \quad \sigma_4 := \mu_4 \cdot \text{CoV4} \quad \sigma_4 = 5.382 \times 10^9 \quad \text{Distribusi Log Normal}$$

Parameter distribusi Log Normal A

$$\sigma \ln X_4 := (\ln(\text{CoV4}^2 + 1))^{0.5} \quad \sigma \ln X_4 = 0.294$$

$$\chi_4 := \mu_4 \cdot \exp[-0.5 \cdot (\sigma \ln X_4)^2] \quad \chi_4 = 1.718 \times 10^{10}$$

Permukaan kegagalan

$$g(\Delta, B_{glob}, B_{scf}, A, T) = \Delta - (B_{glob})^m \cdot (B_{scf})^m \cdot T \cdot \frac{1 \cdot D \cdot 1.794 \cdot 10^{10}}{A}$$

Dengan mengubah variabel masa layan struktur dalam perhitungan indeks keandalan *fatigue*, maka akan didapatkan hasil akhir kurva indeks keandalan sebagai fungsi dari masa layan struktur. Pada proses penentuan indeks keandalan *fatigue* dengan metoda FOSM dibutuhkan prosedur iterasi sehingga nilai indeks keandalan yang diperoleh telah konvergen dengan nilai indeks sebelumnya. Berikut ini adalah contoh hasil iterasi yang menunjukkan nilai indeks keandalan telah konvergen dengan nilai sebelumnya.

Hasil Iterasi

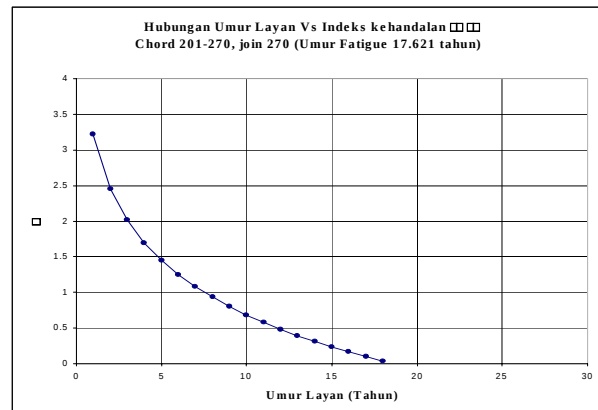
Nilai awal	Iterasi 1	Iterasi 2	Iterasi 3	Iterasi 4	Iterasi 5
$\beta_1 := 5$	$\beta_2 = 2.531$	$\beta_2 = 1.494$	$\beta_2 = 1.452$	$\beta_2 = 1.447$	$\beta_2 = 1.447$
$\alpha_1 := -0.5$	$\alpha_{n1} = -0.35$	$\alpha_{n1} = -0.225$	$\alpha_{n1} = -0.236$	$\alpha_{n1} = -0.237$	$\alpha_{n1} = -0.237$
$\alpha_2 := 0.5$	$\alpha_{n2} = 0.434$	$\alpha_{n2} = 0.394$	$\alpha_{n2} = 0.412$	$\alpha_{n2} = 0.411$	$\alpha_{n2} = 0.411$
$\alpha_3 := 0.5$	$\alpha_{n3} = 0.78$	$\alpha_{n3} = 0.848$	$\alpha_{n3} = 0.819$	$\alpha_{n3} = 0.819$	$\alpha_{n3} = 0.819$
$\alpha_4 := 0.5$	$\alpha_{n4} = -0.284$	$\alpha_{n4} = -0.275$	$\alpha_{n4} = -0.322$	$\alpha_{n4} = -0.324$	$\alpha_{n4} = -0.324$
$\mu_2' := 1.0$	$\mu_{n2}'' = 0.989$	$\mu_{n2}'' = 0.993$	$\mu_{n2}'' = 0.993$	$\mu_{n2}'' = 0.993$	$\mu_{n2}'' = 0.993$
$\sigma_2' := 0.1$	$\sigma_{n2}'' = 0.111$	$\sigma_{n2}'' = 0.105$	$\sigma_{n2}'' = 0.105$	$\sigma_{n2}'' = 0.105$	$\sigma_{n2}'' = 0.105$
$\mu_3' := 1.0$	$\mu_{n3}'' = 0.903$	$\mu_{n3}'' = 0.946$	$\mu_{n3}'' = 0.949$	$\mu_{n3}'' = 0.949$	$\mu_{n3}'' = 0.949$
$\sigma_3' := 0.2$	$\sigma_{n3}'' = 0.276$	$\sigma_{n3}'' = 0.248$	$\sigma_{n3}'' = 0.246$	$\sigma_{n3}'' = 0.246$	$\sigma_{n3}'' = 0.246$
$\mu_4' := 1.794 \cdot 10^{10}$	$\mu_{n4}'' = 1.688 \times 10^{10}$	$\mu_{n4}'' = 1.706 \times 10^{10}$	$\mu_{n4}'' = 1.703 \times 10^{10}$	$\mu_{n4}'' = 1.703 \times 10^{10}$	$\mu_{n4}'' = 1.703 \times 10^{10}$
$\sigma_4' := 5.382 \cdot 10^9$	$\sigma_{n4}'' = 4.13 \times 10^9$	$\sigma_{n4}'' = 4.458 \times 10^9$	$\sigma_{n4}'' = 4.396 \times 10^9$	$\sigma_{n4}'' = 4.394 \times 10^9$	$\sigma_{n4}'' = 4.395 \times 10^9$

Hasil perhitungan akhir disajikan pada tabel dan bentuk kurva indeks keandalan sebagai fungsi masa layan struktur. Untuk komponen sambungan chord 201-270, join 270, hasil tersebut dapat dilihat pada **Tabel 5** dan kurva pada **Gambar 6**.

Melalui prosedur yang sama dapat ditentukan tabel dan kurva indeks keandalan untuk komponen sambungan lainnya.

Tabel 5. Indeks keandalan *fatigue* komponen chord 201-270, join 270

No	Masa Layan T (tahun)	Indeks keandalan β	Probabilitas Kegagalan Pf
1	1	3.22	6.44E-04
2	2	2.45	7.10E-03
3	3	2.01	2.21E-02
4	4	1.69	7.40E-02
5	5	1.45	7.40E-02
6	6	1.24	1.07E-01
7	7	1.08	1.41E-01
8	8	0.93	1.76E-01
9	9	0.80	2.12E-01
10	10	0.68	2.48E-01
11	11	0.58	2.82E-01
12	12	0.48	3.15E-01
13	13	0.39	3.49E-01
14	14	0.31	3.78E-01
15	15	0.23	4.08E-01
16	16	0.16	4.36E-01
17	17	0.10	4.62E-01
18	18	0.03	4.89E-01



Gambar 6. Kurva indeks keandalan komponen

Berdasarkan kurva indeks keandalan pada **Gambar 6**, dapat disimpulkan adanya korelasi yang jelas antara umur layan struktur dengan indeks keandalan komponen sambungan. Korelasi tersebut ditandai dengan adanya penurunan nilai indeks keandalan komponen sambungan ketika umur struktur layan struktur terus meningkat sampai dengan umur fatigue komponen tersebut. Dari kurva-kurva indeks keandalan juga dapat dilihat pada saat umur layan mencapai umur fatigue sambungan, nilai indeks keandalan akan bernilai sangat kecil.

Dalam kerangka analisis keandalan fatigue dibutuhkan parameter atau indikator yang menyatakan bahwa suatu komponen sambungan telah memenuhi kriteria keamanan yang diisyaratkan. Indikator ini biasa disebut target indeks keandalan fatigue atau indeks keandalan minimum suatu komponen sambungan. Pada studi kasus ini digunakan target indeks keandalan yang direkomendasikan oleh Onoufriou (1999)

Tabel 6. Target indeks kehandalan Onoufriou (1999)

Tipe sambungan	Konsekuensi Kegagalan	Target indeks kehandalan	Probabilitas Kegagalan
Main Leg	Sangat serius	4.2	1.4×10^{-5}
Vertikal Bracing	Serius	3.7	1.1×10^{-4}
Horizontal Bracing	Tidak serius	3.1	9.7×10^{-4}

Berdasarkan pengamatan pada model struktur, dapat dilihat bahwa sambungan 270 dapat dikategorikan sebagai sambungan dengan konsekuensi tidak serius atau komponen-komponen pada sambungan tersebut merupakan komponen *secondary*. Dengan mengasumsikan target indeks kehandalan sebesar 3.1 dan berdasarkan kurva indeks kehandalan pada **Gambar 6**, maka dapat disimpulkan bahwa sambungan 270 tidak memenuhi kriteria keamanan dalam kerangka analisis kehandalan. Kesimpulan ini memperkuat hasil yang diperoleh dari analisis *fatigue* spektral yang menunjukkan umur *fatigue* sambungan 270 hanya 17.621 tahun dari umur layan rencana selama 25 tahun.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kehandalan *fatigue* spektral pada komponen sambungan struktur studi kasus dapat ditarik beberapa kesimpulan penting, yaitu:

1. Terdapat korelasi yang jelas antara umur layan struktur dengan indeks kehandalan komponen sambungan. Korelasi tersebut ditandai dengan adanya penurunan nilai indeks kehandalan komponen sambungan ketika umur layan struktur terus meningkat sampai dengan umur *fatigue* komponen tersebut. Dari kurva indeks kehandalan, dapat dilihat bahwa pada saat umur layan mencapai umur *fatigue*, nilai indeks kehandalan akan bernilai sangat kecil.
2. Terdapat dua parameter yang dijadikan indikator keamanan dalam analisis *fatigue* sambungan struktur lepas pantai, yaitu umur *fatigue* sambungan dan indeks kehandalan sambungan. Parameter umur *fatigue* adalah besaran yang diperoleh dari hasil perhitungan kerusakan pada sambungan akibat beban gelombang yang berfluktuasi pada masa layan tertentu. Pada dasarnya analisis *fatigue* spektral telah menggunakan pendekatan statistik pada perhitungan umur sambungan, tetapi masih terdapat variabel acak lainnya yang belum terakomodasi. Analisis kehandalan dengan produk indeks kehandalannya pada studi kasus ini telah memasukkan faktor ketidakpastian dan variabel acak lainnya yang membangun sistem kapasitas dan beban *fatigue*.

Daftar Pustaka

- American Petroleum Institute, 1997, "*Recommended Practise for Planning, Designing and Constructing Fixed offshore Platform – Load and Resistance Factor Design*", Washington, D.C.
- Engineering Dynamic, Inc., 2003, *SACS Release 5 Collapse and Fatigue User's Manual*, Louisiana.
- Ersdal, Gerhard, 2005, *Doctoral Thesis Assessment of Existing Offshore Structures for Life Extension*. Department of Mechanical and Structural Engineering and Material Science University of Stavanger, October.
- JCSS Probabilistic Model Code, Draft, 2004, "*Fatigue Model For Metalic Structures*", jcscfat.
- Onoufriou, Toula, 1999, "*Reliability Based Inspection Planning of Offshore Structures*", Journal of Marine Structures 12 521-539.
- Skjong, R., Gregersen, E.B., Cramer, E., Croker, A., Hagen, Ø., Korneliussen, G., Lacasse, S., Lotsberg, I., Nadim, F., Ronold, K.O., 1995, "*Guideline for Offshore Structural Reliability Analysis-General*", DNV:95-2018.
- Tawekal, R.L., Aria R., Baskara, dan Adriadi, R., 2004, "*Studi Kehandalan Struktur Anjungan Lepas Pantai Tipe Braced Monopod*", Jurnal Teknik Sipil ITB Vol. 11 No. 4, Bandung, Oktober.

