

Analisis Kelelahan Menggunakan Pendekatan Mekanika Kepecahan Berbasis Resiko pada Struktur BL Platform untuk Perpanjangan Umur Operasi dan Penentuan Interval Waktu Inspeksi

Ahmad Azhar Fanany⁽¹⁾, Daniel M. Rosyid⁽²⁾, Rudi Walujo P⁽³⁾

⁽¹⁾Mahasiswa Teknik Kelautan ITS, ^{(2),(3)}Staf Pengajar Teknik Kelautan ITS

Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: dmrosyid@oe.its.ac.id

Abstrak—Sekarang ini banyak *platform* di Indonesia tetap dipertahankan untuk melanjutkan eksploitasi hidrokarbon yang tersedia meskipun umurnya sudah lebih dari design lifenya ± 20 tahun, dimana di mana umur suatu *platform* pada umumnya antara 20 s/d 25 tahun. Seperti pada struktur BL *wellplatform* milik Total E&P Indonesia yang direncanakan diperpanjang umur operasinya 10 tahun kedepan. Analisis dilakukan dalam penelitian ini adalah menganalisis umur kelelahan dengan pendekatan mekanika kepecahan dan menentukan interval inspeksi dari resiko kegagalan dalam penerapan *Risk Based Inspection* berdasarkan NORSOK N-006 pada BL *wellplatform*. Dari hasil analisa tersebut didapatkan umur kelelahan terkecil struktur adalah 23,16 tahun pada sambungan 401 dengan retak awal 0,5 mm yang melebihi rencana umur perpanjangannya. Selanjutnya dilakukan perhitungan *Probability of Failure* dengan metode monte carlo untuk moda kegagalan kelelahan karena perambatan retak sambungan yaitu sebesar 0,037. Dengan menggunakan besar Pof ini didapatkan resiko kegagalan struktur berdasarkan tiap-tiap kategori konsekuensi yang dapat terjadi yaitu resiko rendah untuk kategori keselamatan, muatan, lingkungan, dan produksi. Sedangkan resiko untuk kategori biaya adalah medium. Dengan demikian didapatkan interval inspeksi dalam penerapan *Risk Based Inspection* pada struktur BL *platform* adalah 3 tahun untuk *good water* dan 2,3 tahun untuk *underwater* dengan menggunakan metode *Eddy Current* (EC) dan *Magnetic Penetration Inspection* (MPI).

Kata Kunci—*Inspeksi Sambungan, Mekanika Kepecahan, Perpanjangan Umur Operasi, Risk Based Inspection (RBI), Structural Integrity Management (SIM)*.

I. PENDAHULUAN

Banyak anjungan lepas pantai di Indonesia sekarang ini umurnya sudah lebih dari design lifenya ± 20 tahun, dimana umur suatu *platform* pada umumnya antara 20 s/d 25 tahun. Tetapi Beberapa anjungan lepas pantai yang melebihi umur operasinya masih dipertahankan untuk tetap melanjutkan operasinya dalam mengeksploitasi hidrokarbon yang masih tersedia. Dalam memastikan dan menjamin keamanan operasi secara keseluruhan saat perencanaan perpanjangan umur operasi, maka dibutuhkan studi penilaian ulang yang seksama dan teliti Penilaian struktur (assesment) digunakan untuk melihat kelayakan dari struktur yang akan digunakan lagi setelah adanya modifikasi atau rencana dioperasikan kembali lebih dari masa pelayanannya (*expand life*).

Kegagalan karena kelelahan disebabkan oleh tahapan-tahapan dari retak atau *crack*, apabila retak tersebut tidak diketahui akan dapat menyebabkan pecah catastrophic. Saat pembebanan terjadi terlalu besar akan mampu memproduksi *crack* akibat kelelahan, retak diawali pada titik dari tekanan maksimum. Kelelahan terjadi karena akumulasi dari beban

siklik yang terjadi saat struktur sedang beroperasi dilokasinya. Oleh karena itu pembebanan lingkungan harusnya sangat diperhitungkan. Apabila penetrasi retak melebihi ketebalan dari turbular jacket, air laut akan masuk pada bagian dalam turbular yang akan menyebabkan massa struktur bertambah kemudian akan mempengaruhi stabilitas dari struktur dan mempercepat laju keretakan. Oleh karena itu struktur yang telah melewati masa desain operasinya perlu untuk dianalisis besarnya resiko yang mungkin bisa terjadi. Terutama yang perlu dipertimbangkan adalah kelelahan dan kepecahan pada sambungan las-lasan.

Salah satu anjungan lepas pantai yang memperpanjang umur operasinya dan menjadi obyek studi dalam penelitian ini adalah 'BL' *Well Platform* yang di operasikan oleh Total E&P Indonesia, di "Bekapai Field" selat Makassar. *Platform* yang berjenis *tetrapod* (empat kaki) ini berfungsi sebagai *well platform*. 'BL' *platform* di desain untuk umur operasi selama 20 tahun. Untuk memenuhi permintaan eksplorasi dan eksploitasi maka Total E&P Indonesia memperpanjang umur operasi (*service life extension*) 'BL' *platform* untuk 10 tahun mendatang.

Dalam penelitian ini penulis akan melakukan analisa kelelahan dengan pendekatan mekanika kepecahan untuk menghitung *crack propagation* dan *fatigue life* yang terjadi pada sambungan turbular struktur karena beban siklik kemudian dilanjutkan dengan analisa resiko kegagalan menggunakan matriks resiko dari BL *platform* berdasarkan *Structural Integrity Management* Norsok Standard N-006 untuk mendapatkan interval inspeksi berdasarkan resiko yang dialami struktur.

II. URAIAN PENELITIAN

Alur pengerjaan penelitian ini dilakukan dengan tahap-tahap sebagai berikut :

A. Studi Literatur

Studi dan pengumpulan literatur sebagai bahan – bahan referensi dan sumber teori – teori yang berkaitan dan diperlukan dalam penyelesaian penelitian ini.

B. Pengumpulan Data

Data-data yang diperlukan adalah data struktur, data gambar, pembebanan dan data lingkungan pada struktur BL *platform*. Data lingkungan antara lain :

1. Data gelombang
2. Data kecepatan angin
3. Data kecepatan arus
4. Data *wave kinematic* dan *current blockage*
5. Data Distribusi gelombang

C. Pemodelan Struktur

Pemodelan BL platform dengan bantuan *Software Finite element* dengan menggunakan data drawing, data pembebanan dan lingkungan yang ada.

D. Validasi Struktur

Pembuktian dengan membandingkan berat struktur BL Platform yang dimodelkan dengan berat struktur sesungguhnya. Validasi selalu dibutuhkan dalam tahap pemodelan. Hal ini bertujuan untuk membuktikan bahwa struktur yang dimodelkan sudah dapat mewakili struktur sesungguhnya.

E. Analisa Inplace Punching Shear

Analisa *Inplace punching shear* merupakan suatu analisa yang dilakukan untuk memastikan dan menentukan kondisi dari setiap *joint* pada setiap pembebanan yang diterima dilokasi struktur tersebut diinstal. Kemudian dilakukan lis hasil analisa ini untuk mendapatkan sambungan kritis berdasarkan *Unity Check*.

F. Pemodelan Sambungan Kritis dan intial crack

Pemodelan sambungan dilakukan dan diberikan input pembebanan dengan *software local finite element analysis*. Selanjutnya akan didapatkan lokasi kritis dari distribusi tegangan von mises pada sambungan akibat input pembebanan. Kemudian dimodelkan *Initial Crack* pada lokasi kritis sambungan dengan mengasumsikan retak menggunakan code DNV RP C203 sebesar 0.5 mm.

G. Menghitung Stress Intensity Factor

Melakukan perhitungan faktor intensitas tegangan (SIF) dengan *software* dan manual untuk mengetahui nilai intensitas tegangan pada daerah yang mengalami *initial crack*. Kemudian dilakukan validasi kedua nilai tersebut.

H. Menghitung Crack Propagation

Menghitung besarnya perambatan retak pada sambungan dengan menggunakan diagram Paris (Hukum Paris-Erdogan) untuk mengetahui kecepatan perambatan setiap siklusnya.

I. Umur Kelelahan Sambungan

Melakukan perhitungan umur kelelahan pada sambungan turbular sebagai akibat adanya retak dengan laju perambatan sehingga dapat dibandingkan dengan umur rencana.

J. Moda Kegagalan

Menentukan Moda kegagalan yang menyebabkan struktur ini dikatakan gagal dalam suatu obyek yang diamati.

K. Resiko Struktur

Besar resiko didapatkan melalui perkalian antara *probability of failure* (PoF) yang diperoleh dari merandom variable acak moda kegagalan dan Konsekuensi kegagalan (CoF), kemudian dimasukkan ke dalam matriks resiko NORSOK N-006.

L. Interval Inspeksi

Menentukan interval inspeksi dengan menerapkan konsep *Risk Based Inspection* mengacu pada NORSOK N-006.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemodelan Struktur BL platform.

Pemodelan BL platform menggunakan perangkat lunak yang berbasis FEM (*Finite Element Method*) dengan menggunakan data pembebanan, lingkungan dan drawing. Berikut adalah tampak isometric pada pemodelan struktur BL platform.



Gambar 1. Pemodelan BL Platform

B. Verifikasi Model

Verifikasi model struktur dilakukan untuk memeriksa kesesuaian dan kecocokan pemodelan struktur yang telah dilakukan dengan model asli yang ada di lapangan. Berikut ini perbandingan *Selfweight* untuk validasi antara model dengan struktur asli.

Tabel 1. Hasil Verifikasi Model

Selfweight (kN)		Selisih (%)
SW model	SW report	
1627.13	1637.61	0.64

Persentase selisih *Selfweight* yang ditampilkan pada tabel diatas memiliki selisih yang kecil dan dapat ditoleransi.

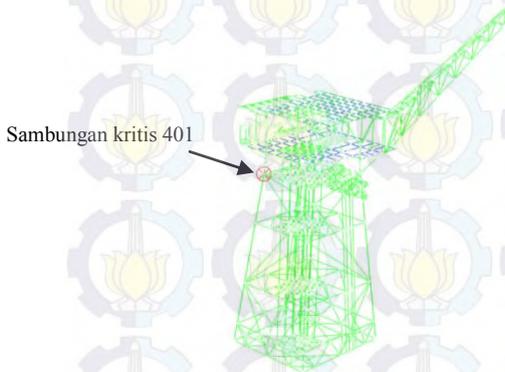
C. Analisa Inplace Punching Shear

Analisa *Inplace Punching Shear* dilakukan untuk memastikan dan menentukan kondisi setiap sambungan (chord dan brace) dari pembebanan yang diterima dilokasi struktur tersebut diinstal. Berikut adalah hasil analisa *punching shear* yang dilakukan pada struktur BL Platform dan diberikan ringkasan *Joint Punching Shear Unity Checks* dari *Software Finite Element Output*.

Tabel 2. Joint Punching Shear Unity Checks

JOINT	DIAMETER (CM)	THICKNESS (CM)	UC
401	88.9	2.54	1.169
420	40.64	1.27	1.120
421	40.64	1.27	1.107
219	40.64	1.27	1.060
319	40.005	1.00	1.048
405	88.9	2.54	0.987
407	88.9	2.54	0.964
410	40.64	1.27	0.954
313	40.64	1.27	0.894

Berdasarkan tabel diatas didapatkan posisi sambungan kritis adalah joint 401 berada pada daerah splash zone dengan Unity check 1,169. Menurut API RP 2A dalam reassessment existing platform, nilai tersebut ditoleransi melebihi UC>1 tetapi perlu dilakukan analisa lokal yang dilakukan pada analisis selanjutnya untuk memberikan detail perhitungan yang lebih akurat dan mengindikasi sambungan tersebut tidak overload atau melebihi yield strength materialnya.



Gambar 2. Posisi Sambungan Kritis 401 pada BL Platform

Selain itu didapatkan pembebanan force dan moment pada joint ini. Berikut adalah hasil pembebanan maksimum dan minimum pada member-member dalam turbular joint 401.

Tabel 3. Beban Minimum pada joint 401

Joint 401	Axial (N)	IPB (Nm)	OPB (Nm)
Brace 492-401	250461.6	-78.3269	14.2177
Brace 303-401	323867.7	9.0871	-13.1396
Brace 494-401	420956.6	-171.285	54.6476
Brace 307-401	203831	3.2965	-39.3479

Tabel 4. Beban maksimum pada joint 401

Joint 401	Axial (N)	IPB (Nm)	OPB (Nm)
Brace 492-401	264102.1	-78.3269	16.9199
Brace 303-401	323868.1	9.0871	-13.1396
Brace 494-401	438711.6	-235.842	52.0878
Brace 307-401	246751.6	-53.6063	-21.5664

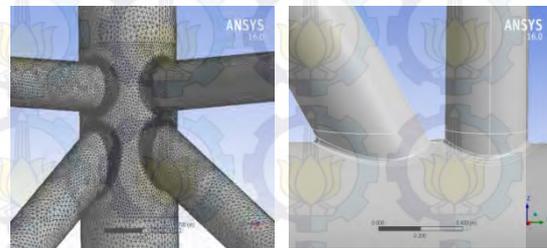
D. Pemodelan Sambungan 401

Multiplanar Tubular Joint ini dimodelkan dalam solid element secara menyeluruh menggunakan software lokal FE Analisis. Pemodelan menggunakan data material dan Geometri yang sesuai dengan pemodelan global sebelumnya. Untuk batas tumpuan yang digunakan pada ujung-ujung chord menggunakan pinned-end sedangkan tumpuan ujung-ujung brace menggunakan free.



Gambar 3. Pemodelan Multiplanar Joint 401

Sambungan tubular disambung dengan jenis sambungan fillet joint berbentuk toe fillet dengan ukuran 0.625 inch berdasarkan code AWS D1.1 D1.1M-2010 pada setiap sisi sambungan tubularnya. Kemudian dilakukan meshing bentuk tetrahedrons dengan ukuran yang berbeda bergradasi terutama pada bagian las-lasan dilakukan agar hasilnya lebih mendekati bentuk sesungguhnya.



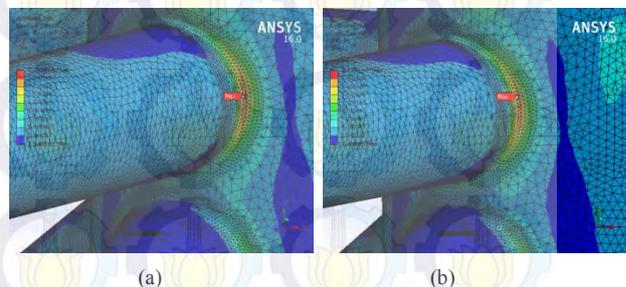
Gambar 4. Pemodelan Las dan Meshing Multiplanar Joint 401

E. Analisa Tegangan Von Mises

Pembebanan yang diinputkan adalah beban aksial, beban in-plane bending dan juga beban out-of plane bending pada keempat brace sesuai dengan pembebanan data global struktur pada Table 3 dan 4 diatas. Berikut adalah hasil analisa tegangan von mises beserta distribusi tegangan yang diterima.

Tabel 5. Tegangan Von Mises Multiplanar joint 401

	Von mises (Mpa)	Deformasi (m)
σemin	213.91	0.0032
σemax	229.58	0.0034



Gambar 5. (a) Tegangan Von mises Maksimum ; (b) Tegangan Von mises Minimum.

F. Pemodelan Crack pada Sambungan Turbular joint 401

Posisi retak sambungan turbular ini berada pada lokasi dimana tegangan terkonsentrasi tertinggi yang dihasilkan pada tegangan von mises sebelumnya. Geometri kedalaman initial crack(a) pada multiplanar joint 401 ini didapatkan

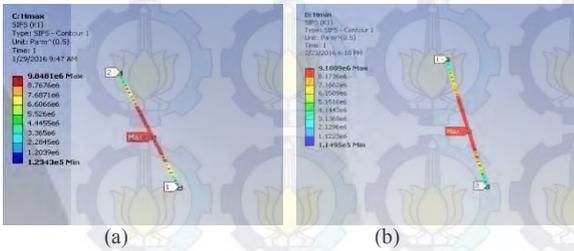
dari code DNV RP C203 yaitu sebesar 0,5 mm sedangkan lebar retak (2c) adalah sebesar 1 cm.



Gambar 6.. Pemodelan Initial Crack pada Daerah Kritis

G. Analisa Stress Intensity Factor

Setelah dilakukan pemodelan retak, akan bisa didapatkan Stress Intensity Factor dari perilaku tegangan yang diterima terhadap retak menggunakan SIF Mode 1 opening mode yang mempertimbangkan beban tarik axial. Berikut adalah SIF yang didapatkan melalui hasil running menggunakan Software lokal FE analisis :



(a) SIF Maksimum ; (b) SIF Minimum.

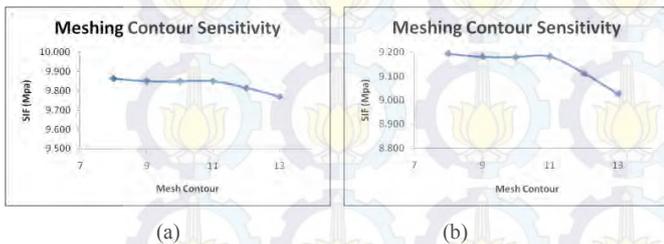
Gambar 7. (a) SIF Maksimum ; (b) SIF Minimum.

Besar Output Stress Intensity Factor :

$$K_{max} = 9.85 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$$

$$K_{min} = 9.18 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$$

SIF tersebut perlu dilakukan meshing contour sensitivity untuk mengukur keakuratan dan kestabilan output dari pemodelan FE akibat dari jumlah elemen yang digunakan. Sehingga Elemen divariasikan dengan jumlah contour berbeda dimulai dari 8-13 contour.



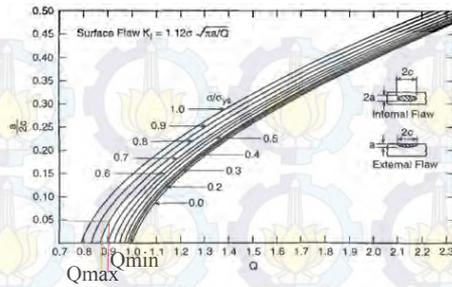
(a) (b)

Gambar 8. (a) Grafik perubahan meshing contour sensitivity Kmax ;

(b) Grafik perubahan meshing contour sensitivity Kmin.

Berdasarkan Grafik diatas bisa diambil kesimpulan bahwa Stress intensity factor pada meshing contour 9-11 sudah stabil, maka SIF yang dipakai adalah 9.84 MPa·√m dan 9.18 MPa·√m pada mesh contour 10.

Selanjutnya akan dilakukan validasi dengan perhitungan manual agar diketahui SIF menggunakan software benar secara analitik. Melalui tegangan von mises, geometri retak dan jenis material a36 yang memiliki yield strength 250 Mpa didapatkan flaw shape parameter (Q) melalui grafik dibawah ini adalah 0.88 untuk Qσmax dan 0.92 untuk Qσmin.



Gambar 9.. Grafik Parameter bentuk cacat

kemudian menghitung besar SIF menggunakan rumus tipe surface crack sebagai berikut :

$$K = 1.12 \sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}}$$

Didapatkan besar Kmax adalah 10,3 MPa·√m dan Kmin adalah 9.72 MPa·√m. Selanjutnya akan divalidasi berikut adalah validasinya :

Tabel 6. Validasi nilai Stress Intensity Factor

Validasi	Kmax (MPa·√m)	Kmin (MPa·√m)
Ansys	9.85	9.18
Manual	10.30	9.72
Error (%)	4.39	5.55

Berdasarkan table diatas disimpulkan bahwa SIF yang dihasilkan melalui software tidak berbeda signifikan dengan analitik sehingga dapat digunakan.

H. Menghitung Kedalaman Retak Kritis.

Kedalaman rerak kritis (acr) didapatkan dengan menggunakan persamaan untuk menghitung SIF dan membandingkan dengan Fracture Toughness (KIC) atau sama dengan K = KIC, dimana Fracture Toughness untuk material ASTM A36 besarnya adalah 69,19 MPa·√m.

$$a_{cr} = \left(\frac{K_{IC}}{1,12 \sigma_{max} \sqrt{\frac{\pi}{Q}}} \right)^2$$

Melalui rumus diatas didapatkan acr adalah sebesar 0,0212 m menembus kedalam chord. Jika dibandingkan dengan ketebalan chord 0,0254 m maka bedanya sangat tipis sebelum mengalami kegagalan fracture.

I. Menghitung Kecepatan Perambatan Retak

Jenis material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ASTM A36 ferrite-pearlite dengan σ_{ys} = 36 ksi yang memiliki C dan m adalah 3.6 x 10⁻¹⁰ dan 3.0. Maka rumus yang digunakan dalam perhitungan kecepatan perambatan yaitu :

$$\frac{da}{dN} = 3,6 \times 10^{-10} (\Delta K_I)^{3,0}$$

Sehingga dengan menggunakan range SIF (ΔK_I) sebesar 0.67 MPa·√m dari SIF maksimum dan minimum yang telah didapatkan sebelumnya maka diperoleh kecepatan perambatannya (da/dn) adalah 1.07E-10 m/cycle .

J. Menghitung Umur Kelelahan

Umur kelelahan struktur dapat ditentukan jika membandingkan jumlah kejadian *cycles* kegagalan dibandingkan dengan *cycles* kejadian yang terjadi. Rumus menghitung jumlah kejadian *cycles* kegagalan :

$$N = \int_{a_0}^{acr} \frac{da}{3,6 \times 10^{-10} (\Delta K_I)^{3,0}}$$

Berdasarkan kecepatan perambatan 1.07E-10 m/cycle yang merambat mulai dari kedalaman awal 0,0005m sampai dengan kedalam kritis 0,0212m akan didapatkan jumlah *cycle failure* pada sambungan ini yaitu 1.94E+08 cycles. Kemudian *cycles* kegagalan akan dibagi dengan *cycles* kejadian gelombang pertahun yaitu 8.37E+06 siklus. Sehingga didapatkan umur kelelahan terkecil pada struktur ini adalah 23.16 tahun, yang masih lebih besar dari perpanjangan umur yang direncanakan yaitu 10 tahun kedepan. Maka struktur dinyatakan aman beroperasi selama masa perpanjangan umurnya.

K. Moda Kegagalan

Moda kegagalan pada penelitian kelelahan kali ini didasarkan pada jumlah siklus kegagalan karena cepat rambat retak yang terjadi seperti saat menghitung umur kelelahan yaitu :

$$N = \int_{a_0}^{acr} \frac{da}{3,6 \times 10^{-10} \left(1,12 \Delta \sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \right)^{3,0}}$$

Dari persamaan tersebut dapat ditentukan kegagalan akan terjadi jika umur kelelahan berdasarkan jumlah siklus kegagalan kurang dari jumlah siklus *life extension* yang diharapkan (10 tahun). Sehingga didapatkan moda kegagalan seperti persamaan berikut ini :

$$P_f = \Pr[g(X)] \leq 0, \text{ dengan } g(X) = N - N_L$$

L. Variabel Acak

Variabel acak ini berasal dari variabel-variabel persamaan moda kegagalan diatas yang memiliki ketidakpastian saat menggambarkan tingginya ketidakpastian pada keadaan sebenarnya di alam. Berikut adalah variabel acak yang digunakan dalam menghitung probabilitas kegagalan dengan metode monte carlo:

Tabel 7. Variable Acak

Variabel	Mean	S. Deviasi	COV	Jenis Distribusi
$\Delta\sigma$ (MPa)	15.7	1.57	0.1	log normal
K _{ic} (MPa√m)	69.19	6.919	0.1	log normal

M. Probabilitas Kegagalan

Dalam mendapatkan RNG dibantu dengan Microsoft Excel sesuai dengan rata-rata, standar deviasi, dan jenis distribusi masing-masing variabel acak. Pengerjaan simulasi Monte Carlo juga dilakukan dengan bantuan Microsoft Excel sebanyak 100.000 percobaan dan didapatkan hasil peluang kegagalan (PoF) seperti yang tertera pada tabel berikut ini.

Tabel 8. Hasil Simulasi Monte Carlo

Jumlah simulasi	Simulasi berhasil	Simulasi gagal
100000	96272	3728

Tabel 9. Probabilitas Kegagalan

Sambungan	Probabilitas kegagalan	PoF/Tahun
401	0.037	0.0037

Dari hasil simulasi Monte Carlo tersebut dapat disimpulkan bahwa pada sambungan 401 memiliki peluang untuk gagal adalah sebesar 0.037 dan peluang gagal per tahun adalah sebesar 0.0037 diasumsikan dibagi 10 tahun seperti rencana perpanjangan umurnya.

N. Matriks Resiko Struktur

Resiko struktur ditentukan berdasarkan perkalian antara Probabilitas kegagalan dan *consequence category* dalam matriks resiko yang tercantum pada NORSOK Z-008. Selanjutnya akan dibahas masing-masing resiko berdasarkan konsekuensi kategori pada BL platform.

Tabel 10. Matriks Resiko NORSOK Z-008

Freq. cat.	Freq. per year ("")	Mean time between failure (year)	RISK		
F4	> 1	0 to 1	M	H	H
F3	0,3 to 1	1 to 3	M	M	H
F2	0,1 to 0,3	3 to 10	M	M	H
F1	< 0,1	Long	M	M	M
Loss of function leading to:					
Consequence category	C1	C2	C3		
Consequence safety	No potential for injuries. No effect on safety systems.	Potential for injuries requiring medical treatment. Limited effect on safety systems.	Potential for serious personnel injuries. Render safety critical systems inoperable.		
Consequence containment	Non-flammable media Non toxic media Natural/normal pressure /temperature media	Flammable media below flashpoint Moderately toxic media High pressure/ temperature media (>100 bar/80 °C)	Flammable media above flashpoint Highly toxic media Extremely high pressure /temperature media		
Consequence. Environment; restitution time ("")	No potential for pollution (specify limit) < 1 month	Potential for moderate pollution. 1 month – 1 year	Potential for large pollution. > 1 year		
Consequence production	No production loss.	Delayed effect on production (no effect in x days) or reduced production	Immediate and significant loss of production		
Consequence other	No operational or cost consequences	Moderate operational or cost consequences	Significant operational or cost consequences		

1. Matriks Resiko Keselamatan

Probabilitas kegagalan sebesar 0,0037 (F1) dan konsekuensi terhadap keselamatan adalah rendah (C1) karena Wellhead platform bersifat unmanned atau tidak ditinggali kru oleh karena itu ketika ada kegagalan struktur runtuh karena kelelahan tidak akan berpengaruh terhadap keselamatan kru. Jika plotkan matriks resiko NORSOK Z-008 akan didapatkan resiko terhadap keselamatan kru adalah rendah.

2. Matriks Resiko Muatan

Probabilitas kegagalan termasuk dalam kategori F1 dan konsekuensi terhadap muatan adalah medium (C2) karena memungkinkan terjadi kebakaran tetapi tetap dibawah flash point yaitu sekitar 7%-39% volume yang termasuk *Low Flammable Limit*, sistem keamanan tersebut mencegah kebakaran semakin menyebar dan mencegah racun karsinogen menyebar. Jika plotkan dalam matriks resiko NORSOK Z-008 akan didapatkan resiko terhadap muatannya adalah rendah.

3. Matriks Resiko Lingkungan

Probabilitas kegagalan termasuk dalam kategori F1 dan konsekuensi terhadap lingkungan sekitar struktur adalah medium (C2) karena diperkirakan minyak akan mencemari daerah sekitar struktur antara 1 bulan - 1 tahun dengan

penanganan yang bagus. Jika plotkan dalam matriks resiko NORSOK Z-008 akan didapatkan resiko terhadap lingkungan sekitarnya adalah rendah.

4. Matriks Resiko Produksi

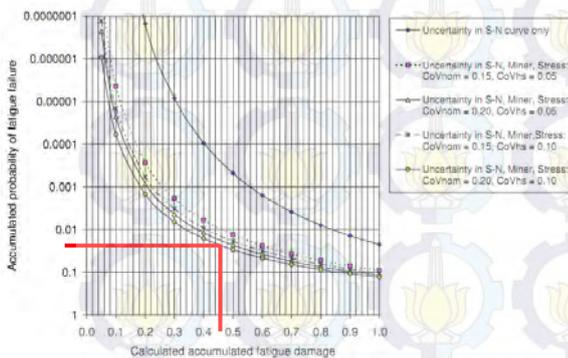
Probabilitas kegagalan termasuk F1 dan konsekuensi terhadap produksi adalah tinggi (C3) karena penyedotan minyak dan gas sebagai hasil produksi terpaksa harus berhenti yang mengakibatkan banyak kerugian. Jika plotkan dalam matriks resiko NORSOK Z-008 akan didapatkan resiko terhadap produksi adalah medium.

5. Matriks Resiko Biaya/lainnya.

Probabilitas kegagalan termasuk dalam kategori F1 dan konsekuensi terhadap biaya adalah tinggi (C3) karena akan mengalami kerugian biaya yang sangat besar baik dari harga pembuatan platform sendiri maupun dari kegiatan operasional struktur yang menghasilkan banyak keuntungan terpaksa harus berhenti. Jika plotkan dalam matriks resiko NORSOK Z-008 akan didapatkan resiko terhadap biaya adalah medium.

M. Penentuan Interval Inspeksi

Risk Based Inspection (RBI) berdasarkan NORSOK N-006 (*Structure Integrity for Existing Offshore Platform*) direkomendasikan menentukan layanan inspeksi untuk kelelahan karena keretakan sambungan dalam masa operasi struktur. Penentuan waktu inspeksi akan bergantung pada besar *accumulated damage* (dacc) yang menunjukkan besar kerusakan dalam sambungan turbular. Probabilitas kegagalan dari mekanika kepecahan sebesar 0,037 akan digunakan untuk menentukan besar *accumulated damage* yang terjadi melalui grafik dibawah ini.



Gambar 10. Kurva Kalibrasi Metode Kelelahan S-N ke FM dalam NORSOK N-006

Tetapi menurut DNV RP C203 grafik diatas digunakan untuk menentukan dacc dari *fatigue life* 20 tahun, sehingga dacc untuk *fatigue life* lain yaitu 10 tahun umur perpanjangan dapat ditentukan dengan melakukan skala pada absis axis kurva dengan faktor $f = L_{calc} / 20$ dimana L_{calc} adalah umur kelelahan yang diinginkan. Didapatkan faktor skalanya adalah 0,5. Dengan demikian diperoleh dacc yang terjadi adalah sebesar 0,23.

Selanjutnya menentukan interval inspeksi dimana ditemukan adanya retakan dengan rumus sebagai berikut :

$$\Delta T_{insp} = \lambda \text{ dacc } T_{detail \text{ calculated}}$$

Dengan menggunakan dacc dan menggunakan tabel pengalaman analisa RBI oleh DNV pada NORSOK N-006 didapatkan λ untuk setiap kondisi inspeksi yaitu pada *good/above water* adalah 1,3 dan *Underwater* adalah 1.

Tabel 11. Nilai variabel retakan berdasarkan (NORSOK N-006, 2009)

Consequence	Working conditions (EC and MPI)	d _{acc}	λ
High	Good	0,15	1,3
	Underwater		1,0
Medium	Good	0,30	2,0
	Underwater		1,7
Small	Good	0,50	-
	Underwater		-

Kemudian menggunakan rumus ΔT_{insp} dengan perpanjangan umur 10 tahun didapatkan interval waktu inspeksi untuk metode *Eddy Current* (EC) dan *Magnetic Particle Inspection* (MPI) pada BL platform dalam kondisi *good/above water* adalah 3 tahun dan *underwater* adalah 2.3 tahun sejak ditemukan retak awal.

IV. KESIMPULAN

Dari analisis kelelahan yang telah dilakukan terhadap Bekapai BL platform dapat diambil beberapa kesimpulan yang bisa ditarik dari jurnal tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Hasil analisis umur kelelahan terkecil struktur BL Platform dengan menggunakan pendekatan mekanika kepecahan adalah sebesar 23.16 tahun berada pada sambungan 401. Dengan demikian struktur BL platform dinyatakan aman dan mampu melakukan perpanjangan umur operasi untuk 10 tahun kedepan.
2. Besar resiko akibat kelelahan pada BL platform karena terdapat retak pada sambungan 401 adalah rendah untuk kategori keselamatan, muatan, dan lingkungan. Sedangkan resiko untuk kategori produksi dan biaya adalah medium.
3. Dalam penerapan Risk Based Inspection (RBI) untuk menilai peluang kegagalan sambungan struktur BL Platform, diperoleh interval inspeksi efektif dan efisien dengan metode *Eddy Current* (EC) dan *Magnetic Particle Inspection* (MPI) adalah 3 tahun untuk kondisi *good/above water* dan 2.3 untuk kondisi *underwater*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] API RP 2A WSD (2000). **Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design**
- [2] Barsom, J. M., dan Rolfe, S.T. 1999. **Fracture and Fatigue Control in Structures, Third Edition**. New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- [3] Det Norske Veritas, 2011, DNV-RP-C203. **Fatigue Design of Offshore Steel Structure**. DNV, Norway.
- [4] NORSOK STANDARD N-006. 2009. **Assessment of structural integrity for existing offshore load-bearing structure**
- [5] NORSOK STANDARD Z-008. 2011. **Risk based maintenance and consequence classification**