

Analisa Umur Kelelahan Sambungan Kaki *Jack-Up* Dengan *Mudmat* Pada Maleo MOPU Dengan Pendekatan *Fracture Mechanics*

Abi L. Hakim, Eko B. Djatmiko, dan Murdjito

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: ebdjtmiko@oe.its.ac.id

Abstrak— *Jack-Up* adalah suatu struktur bangunan lepas pantai yang terdiri dari lambung (*hull*), kaki (*legs*), dan suatu sistem *jacking* sehingga memungkinkan untuk dipindahkan dari satu lokasi ke lokasi yang lain. Pada penelitian ini akan dilakukan studi kasus struktur Maleo MOPU (*Mobile Offshore Production Unit*) yang dioperasikan oleh SANTOS (Madura) Pty.Ltd. yang beroperasi di Selat Madura blok Maleo dengan kedalaman perairan di lokasi ini adalah 57 m terhadap MSL (*Mean Sea Level*). Studi kasus ini dilakukan karena ditemukan indikator retak lelah pada sambungan antara kaki *jack-up* dan *mudmat*. Analisa kelelahan dengan pendekatan metode kepecahan (*fracture mechanics*) akan dilakukan untuk menganalisa retak lelah yang terjadi. Variasi kedalaman retak akan dianalisa untuk menentukan umur kelelahan struktur yang tersisa berdasarkan kriteria kegagalan. Keretakan yang terjadi akan mengalami perambatan retak akibat beban siklis yang diterima, dan terus merambat hingga menembus ketebalan dari kaki *Jack-Up* atau yang disebut dengan *through-thickness crack*. Analisa dilakukan dengan bantuan pemodelan elemen hingga secara global dan pemodelan elemen hingga secara lokal. DNV OS C101 menyebutkan bahwa definisi kegagalan kelelahan terjadi ketika retak merambat hingga mencapai ketebalan. Dari pemodelan metode elemen hingga didapatkan besarnya nilai tegangan di sekitar ujung retakan. Dengan menggunakan persamaan Paris-Erdogan didapatkan sisa umur sambungan tersebut sebesar 5.2 tahun.

Kata Kunci—*fracture mechanics, mudmat, retak (crack)*,

I. PENDAHULUAN

JACK-UP platform adalah suatu struktur kompleks yang digunakan sebagai bangunan lepas pantai dalam berbagai mode operasi. *Jack-Up* telah menjadi salah satu bangunan eksplorasi industri minyak lepas pantai sejak tahun 1950-an. *Jack-Up* digunakan dalam berbagai fungsi diantaranya yaitu sebagai eksplorasi pengeboran, produksi, akomodasi, dan sebagai platform perawatan (*maintenance platform*). Seperti halnya dengan setiap teknologi inovatif, *Jack-Up* telah digunakan dengan keterbatasan operasional dan desainnya. Keterbatasan ini meliputi batasan beban dek ketika mengapung, kemampuan membawa beban ketika proses *lifting*, batasan lingkungan, batasan pengeboran, dan batasan tanah khususnya pondasi. Alasan untuk mendorong batas-batas ini dikarenakan keinginan untuk menjelajahi perairan yang lebih dalam, reservoir yang lebih dalam di lingkungan yang lebih keras, dan

di daerah dimana tanah dan pondasi mungkin sulit stabil atau bahkan tidak stabil [1].

Salah satu perusahaan yang menggunakan *jack-up* adalah SANTOS (Madura) Pty.Ltd. *Jack-Up* milik perusahaan ini bernama Maleo MOPU (*Mobile Offshore Production Unit*) yang terletak di Maleo field, 40 km dari tenggara Pulau Madura, 25 km dari selatan Pulau Puteran. Struktur ini beroperasi di Selat Madura dengan kedalaman kira-kira 57 m dari *Mean Sea Level* (MSL). Gambar dari Maleo MOPU ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar. 1. Maleo MOPU [2].

Maleo MOPU ini dibangun semenjak tahun 1978 di Bethlehem Steel, Beaumont Texas yard. Pada saat dilakukan inspeksi tahunan di bulan Agustus 2010, ditemukan retakan pada sambungan antara *mudmat* dengan kaki *jack-up*, terutama pada *gusset plate* di setiap kaki *jack-up*. Retakan ini tentunya berpengaruh terhadap respon *inplace* struktur secara global. Gambar 2 menunjukkan *gusset plate* dan contoh retakan yang ditemukan serta lokasi dari setiap retakan di kaki *jack-up*.

Gambar. 2. Lokasi retakan pada kaki *jack-up* [2].

Menurut [3], pada era 1968-1989 diperkirakan terdapat 11 *jack-up* yang dikonversi menjadi unit produksi. Merubah fungsi dari *jack-up* tentu akan membawa dampak yang cukup berarti terhadap umur dari struktur tersebut. Suatu struktur yang telah retak, jika dikenai beban yang berulang-ulang atau dikenai

beban kombinasi lingkungan maka keretakan tersebut akan terus membesar seiring dengan waktu. Semakin panjang retakan, semakin besar konsentrasi tegangan yang terjadi. Hal ini berarti bahwa laju perambatan retak akan meningkat seiring dengan waktu [4].

II. URAIAN PENELITIAN

A. Studi Literatur

Dalam tugas akhir ini, literatur-literatur yang dipelajari adalah tugas akhir yang pernah dilakukan sebelumnya dan jurnal yang berkaitan langsung dengan penelitian ini serta buku-buku sebagai tambahan referensi dalam penyelesaian masalah.

B. Pengumpulan Data

Data-data yang digunakan adalah data-data yang didapatkan dari laporan analisa global milik SANTOS (Madura) Pty.Ltd. Data-data tersebut diantaranya adalah:

1. Data geometri struktur

i. Mudmat

Mudmat jack-up ini seperti barge berbentuk huruf “A” dengan ukuran 64 m × 51.82 m × 3 m dengan ketebalan 9.53 mm hingga 31.75 mm.

ii. Kaki jack-up

- Berbentuk kolom silinder dengan OD 3.6 m.
- Panjang kaki dari dasar mudmat 95.1 m (sebelum dikonversi) dan 86 m (setelah dikonversi)
- Ketebalan bervariasi antara 28.58 mm hingga 76.2 mm.
- Sambungan antara kaki dengan mudmat berupa gusset plate.

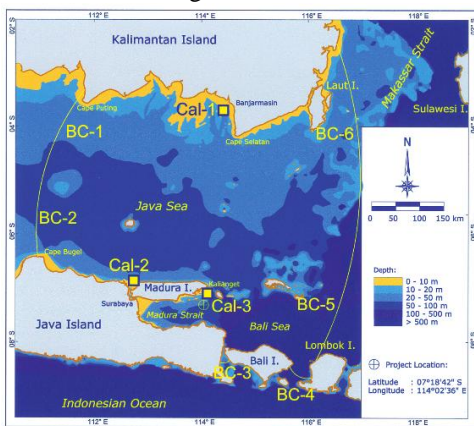
iii. Deck Jack-Up

Deck berbentuk menyerupai barge dengan ukuran panjang 53.6 m, lebar 40.23 dan tinggi 6.1 m.

2. Data Lingkungan

Data Lingkungan yang dipakai adalah data lingkungan Selat Madura untuk 100 tahunan.

i. Kondisi Geografis



Gambar 3. Kondisi geografis perairan sekitar lokasi jack-up Maleo beroperasi [2].

ii. Kedalaman Laut dan Kondisi Pasang Surut

Kedalaman laut di lokasi yaitu 57 m dari MSL.

iii. Gelombang

Data gelombang yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah data gelombang pada Laporan Metocean Maleo Field dengan periode ulang 100 tahun.

3. Data Material

Material yang dipakai adalah material baja yang memiliki properti sebagai berikut (Tabel 1.):

Tabel 1. Properti material

| | |
|---|---------|
| Yield Strength (σ_y), Mpa | 248 |
| Modulus Young E, Mpa | 2.06E+5 |
| Poison's Ratio, (ν) | 0.3 |
| Fracture Toughness (K_{IC}), ksi\sqrt{in} | 85 |

4. Data Retakan

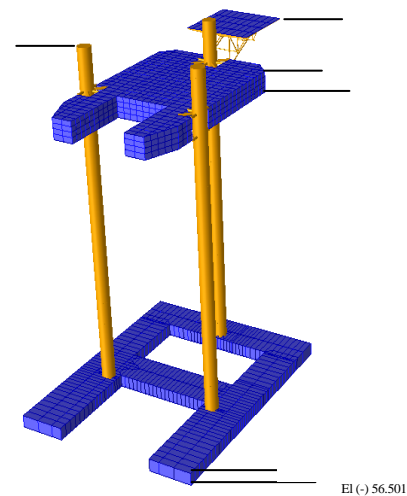
Data retakan yang digunakan dalam Tugas Akhir ini yaitu data retakan yang didapatkan dari Laporan inspeksi tahunan tahun 2010 (Tabel 2.)

Tabel 2. Data retakan hasil inspeksi 2010

| Gusset ID | Original MPI Length (mm) | MPI Length After Grinding (mm) | ACFM length (mm) | ACFM Depth (mm) | Width (mm) | Comments |
|-----------------|--------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------|------------|----------------|
| 2A leg toe | 150 | 147 | 157 | 23.7 | < 0.2 | |
| 2A cap | - | 67 | 71 | 7.6 | < 0.2 | |
| 2D leg toe | 57 | 51 | 57 | 14.4 | < 0.2 | |
| 2D cap | 27 | - | - | - | < 0.2 | Outside of SOW |
| 2G cap | 80 | 89 | 97 | 21.7 | < 0.2 | |
| 2G vertical cap | 85 | - | - | - | hairline | Outside of SOW |
| 1A leg toe | 100 | 45 | 51 | 6.1 | hairline | |
| 1A cap | 30 | - | - | - | hairline | Outside of SOW |
| 1H horiz | 267 | 255 | 267 | 28.3 | > 2.0 | |
| 1H leg toe | 110 | 886 | 93 | 20.5 | hairline | |
| 3A leg toe | 120 | 130 | 140 | 26.7 | hairline | |
| 3A cap | 41 | 35 | 40 | 10.8 | hairline | |
| 3G leg toe | 129 | 150 | 160 | 22.6 | < 0.2 | |

C. Pembuatan model global

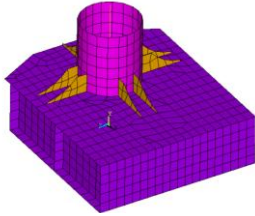
Pemodelan pada tahap ini menggunakan pemodelan elemen hingga secara global. Tujuan dari pemodelan ini adalah untuk mendapatkan besarnya tegangan nominal yang terjadi di kaki jack-up. Tegangan nominal ini selanjutnya akan digunakan dalam pemodelan lokal.



Gambar 4. Model global struktur jack-up MALEO MOPU.

D. Pembuatan model lokal

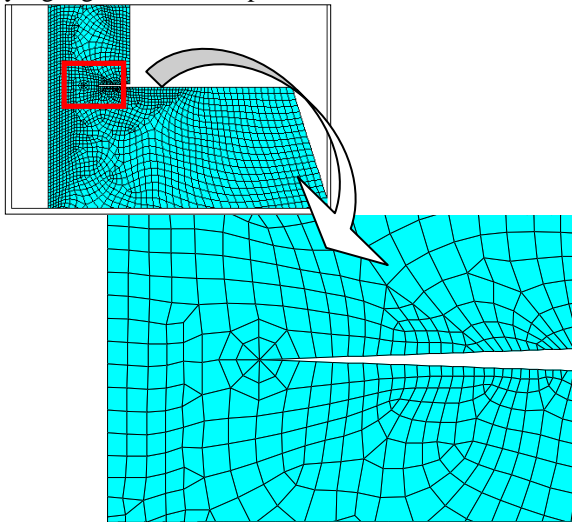
Pemodelan dalam tahap selanjutnya yaitu menggunakan metode elemen hingga secara lokal. Pemodelan ini bertujuan untuk mengetahui letak konsentrasi tegangan sehingga menyebabkan terjadinya retakan. Berdasarkan hasil inspeksi diketahui bahwa retak terbesar terjadi pada leg 1, maka untuk pemodelan lokal ini hanya dibatasi pada leg 1.



Gambar. 5. Model lokal kaki Jack-up pada leg 1.

E. Pembuatan model sub-lokal

Pemodelan tahap selanjutnya yaitu menggunakan pemodelan elemen hingga sub-lokal. Pemodelan ini dikhususkan untuk memodelkan retakan pada sambungan antara *gusset* dengan kaki *jack-up* dengan tujuan mendapatkan tegangan di sekitar ujung retakan yang akan digunakan untuk perhitungan selanjutnya. Dikarenakan keterbatasan kemampuan komputer yang digunakan, maka pemodelan dibatasi 2D.



Gambar. 6. Model lokal sambungan *gusset* dengan kaki *jack-up* MALEO.

F. Retak Awal (Crack Initiation)

Cacat (*defect*) pada struktur dapat bertindak sebagai awal keretakan. Cacat pada struktur berdasarkan asal terbentuknya dapat dikategorikan menjadi dua kelompok:

1. Cacat yang terbentuk selama masa fabrikasi, disebabkan oleh :
 - Cacat lateral yang terjadi pada material (*material defect*).
 - Proses pengerjaan material (*manufacturing defect*).
 - Pemilihan material yang salah atau proses perlakuan panas material /*poor choice of material or heat treatment*.
 - Teknik produksi dari material yang salah (*poor choice of production technique*).
 - Desain material yang salah (*poor detail design*).

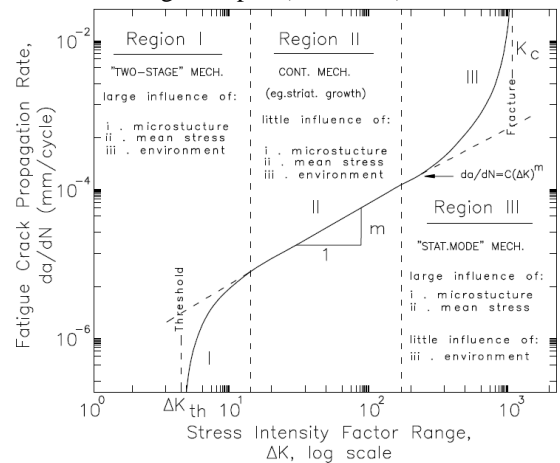
2. Cacat yang terbentuk selama service struktur, diantaranya disebabkan oleh:

- Kelelahan struktur, terjadi saat struktur mencapai umur kelelahannya.
- Fluktuasi tegangan pada permukaan yang telah mengalami korosi.

Mengacu pada [5], jika data retak awal tidak ada dalam hasil inspeksi atau tidak diketahui maka retak awal dapat diasumsikan sebesar 0.5 mm.

G. Perambatan Retak (Crack Propagation)

Proses kepecahan memperlihatkan 3 fase yaitu pertumbuhan retak tanpa pembebanan, pertumbuhan retak stabil, dan pertumbuhan retak tidak stabil [6]. Pertumbuhan retak lelah ditentukan oleh 2 (dua) parameter mekanika kepecahan, yaitu ΔK dan K_{max} [7]. Pada awalnya, retak awal terjadi setelah adanya kondisi kritis [8]. Perambatan retak terjadi dalam waktu yang lama dalam kondisi operasi normal. Perambatan retak akibat medan tegangan dan regangan di sekitar ujung retak, ditunjukkan dengan parameter *stress intensity factor* (K), yang merupakan fungsi dari tegangan, geometri dan dimensi retak. Dari konsep *fracture mechanics*, laju perambatan retak dinyatakan dengan da/dN yang merupakan fungsi dari sifat material, panjang retak, dan tegangan operasi. Perambatan retak terdiri atas tiga tahapan (Gambar 7).



Gambar. 7. Tahapan perambatan retak.

Region I : perambatan retak pada region ini menunjukkan karakteristik “*fatigue threshold*” yang merupakan fluktuasi kenaikan nilai *stress intensity factor* dengan parameter ΔK_{th} . Nilai ΔK harus lebih besar dari nilai ΔK_{th} untuk memungkinkan terjadinya perambatan retak.

Nilai da/dN antara region I dan region II adalah :

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \dots \dots \dots (1)$$

Region II : perambatan-perambatan retak mulai terjadi. Kecepatan perambatan retak dapat dihitung menggunakan hukum Paris-Erdogan:

$$da/dN = C (\Delta K)^m \dots \dots \dots (2)$$

Nilai da/dN antara region II dan region III (bila efek R diperhitungkan) adalah:

$$\frac{da}{dN} = \frac{c\Delta K^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \dots \dots \dots (3)$$

Region III : perambatan retak yang terjadi lebih cepat daripada region II, merupakan awal terjadinya kepecahan.

Nilai da/dN antara region I, II dan region III (bila efek R diperhitungkan) adalah:

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta K^2}{4\pi\sigma_y E} \left\{ \frac{(\Delta K - \Delta K_c + h)(1-R)}{(1-R)K_c - \Delta K} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(4)$$

da/dN : kecepatan perambatan retak

ΔK : range faktor intensitas tegangan

K : harga kritis K

R : rasio tegangan = $\sigma_{min}/\sigma_{max}$

C dan m : parameter pertumbuhan retak

H. Fracture Mechanics

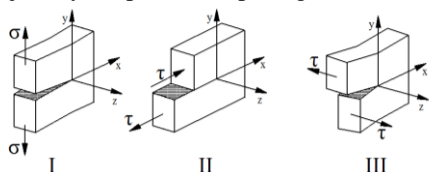
Fracture mechanics adalah suatu analisis penyelesaian dengan cara mendefinisikan kondisi lokal dari tegangan dan regangan di sekitar retakan yang dikorelasikan dengan parameter-parameter globalnya (beban-beban, geometri dan sebagainya) dimana retakan akan merambat [9].

Rujukan [9] juga menjelaskan bahwa Fracture mechanics terbagi menjadi dua kategori, yakni linear-elastic (LEFM) dan elastic-plastic (EPFM). LEFM adalah metode yang menunjukkan hubungan antara medan tegangan dan distribusinya di sekitar ujung retak dengan ukuran, bentuk, orientasi retak dan material properti akibat tegangan nominal yang dikenakan pada struktur. Metode ini menggunakan parameter K, atau SIF untuk menunjukkan karakteristik dari medan tegangan yang terjadi. EPFM lebih sering digunakan pada material yang bersifat ductil, dimana terjadi perilaku elastic-plastic pada material akibat pembebanan yang terjadi. Metode ini merupakan pengembangan dari LEFM, dengan penambahan analisa yang dapat menunjukkan deformasi plastis dari material.

I. Linear Elastic Fracture Mechanics

Mode deformasi retak dapat digolongkan dalam tiga mode deformasi:

1. Moda I (opening mode) adalah retak yang diakibatkan oleh adanya tegangan tarik yang tegak lurus terhadap arah/bidang penjaran retak. Jadi displasemen permukaan tegak lurus bidang retak.
 2. Moda II (sliding mode) adalah retak yang diakibatkan oleh tegangan geser yang searah dengan penjaran retak. Displasemen permukaan retak adalah dalam bidang retak dan tegak lurus leading edge dari retak.
 3. Moda III (tearing mode) adalah retak yang diakibatkan karena tegangan geser yang bekerja pada arah melintang dan membentuk sudut dengan arah penjaran retak.
- Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar. 8. Tiga mode deformasi retak.

Berdasarkan rujukan [9], tegangan dan displasemen pada setiap titik dekat dengan retakan dapat diturunkan berdasar teori elastisitas dan fungsi kompleks tegangan. Tegangan elastis dekat titik retakan ($r/a \ll 1$) untuk moda I adalah:

$$\sigma_y = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \dots\dots\dots(5)$$

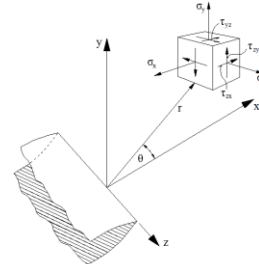
$$\alpha_x = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \dots\dots\dots(6)$$

$$\tau_{xy} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \dots\dots\dots(7)$$

$$\sigma_Z = \tau_{XZ} = \tau_{YZ} = 0 \text{ untuk plane stress} \dots\dots\dots(8)$$

$$\sigma_Z = \nu (\sigma_X + \sigma_Y) \dots\dots\dots(9)$$

$$\tau_{XZ} = \tau_{YZ} = 0 \text{ untuk plane strain} \dots\dots\dots(10)$$



Gambar. 9. Koordinat sistem dan komponen tegangan di sekitar ujung retak.

J. Kedalaman Retak Kritis

Kedalaman retak kritis dihitung dengan menggunakan rumus :

$$a_{cr} = \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{max} \sqrt{\pi}} \right)^2 \dots\dots\dots(11)$$

K. Analisa Umur Kelelahan Struktur

Hasil perhitungan perambatan retak ini umumnya ditunjukkan sebagai umur kelelahan dari struktur yang ditinjau. Dengan memberikan masukan berupa besar retak awal dan retak akhir akan diketahui jumlah batas siklus yang masih aman dengan mengintegrasikan persamaan laju keretakan berikut [8]:

$$N = \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{da/dN} \dots\dots\dots(12)$$

dengan mensubstitusi Persamaan 2 didapatkan persamaan baru yaitu:

$$N = \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{C \Delta K^m} \dots\dots\dots(13)$$

dimana :

- da : pertambahan panjang retak
- dN : pertambahan jumlah siklus dari beban
- a_f : panjang retak setelah pembebanan
- a_o : panjang retak pada waktu permulaan

Nilai ΔK didapat dari selisih nilai Stress Intensity Factor (K) yaitu $K_{maks} - K_{min}$. Sedangkan nilai K_{maks} dan K_{min} didapatkan dengan menggunakan Persamaan 5.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Analisa Pemodelan Global

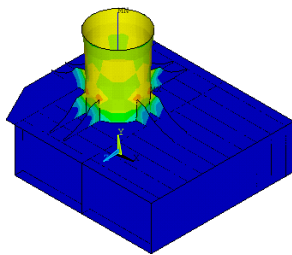
Beban-beban yang diinputkan dalam pemodelan global ini yaitu beban-beban yang bekerja pada struktur jack-up baik itu beban mati, beban hidup, maupun beban lingkungan. Analisa pada setiap element menggunakan standard [10] dan [11]. Dalam pembebanan model global ini digunakan 39 beban kombinasi disesuaikan dengan tinggi gelombang yang terjadi

dengan interval beban gelombang 0.25 m.

Dari masing-masing beban kombinasi akan didapatkan gaya dan momen di setiap kaki jack-up. Berdasarkan hasil laporan inspeksi diketahui bahwa keretakan terbesar terjadi pada leg 1, oleh karena itu untuk analisa selanjutnya yang ditinjau hanyalah leg 1. Hasil running pemodelan global yang akan digunakan sebagai data input dalam analisa selanjutnya (analisa lokal) yaitu *member forces*. *Member forces* minimum sebesar 13584.06 kN dan maksimum sebesar 13430.31 kN.

B. Analisa Pemodelan Lokal

Dengan memasukkan hasil output pemodelan elemen hingga secara global sebagai input pemodelan lokal ini, didapatkan besarnya tegangan yang terjadi dan konsentrasi tegangan tersebut pada model.

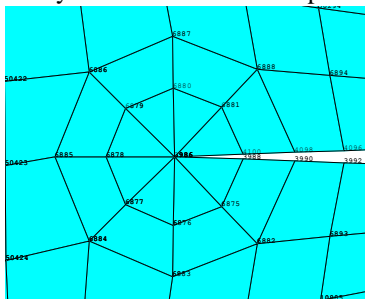


Gambar. 10. Hasil pemodelan lokal tampak isometris

Berdasarkan hasil pemodelan lokal, diketahui bahwa tegangan maksimum yang terjadi terdapat di sambungan antara gusset dengan kaki. Hal ini sesuai dengan laporan inspeksi yang menyebutkan bahwa retakan terjadi pada gusset 1H.

C. Analisa Pemodelan Sub-lokal

Pemodelan sub-lokal ini menggunakan prinsip pemodelan elemen hingga seperti Gambar 6 yang tampak di bawah ini. Pemodelan sub-lokal ini memodelkan retakan dengan meshing sensitivity 0.002 m dan 0.001 m pada daerah sekitar retakan.

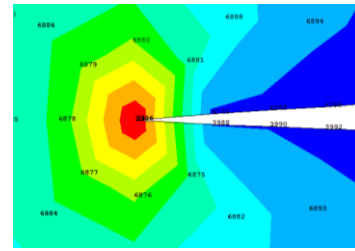


Gambar. 11. Hasil meshing sub-lokal dengan pembesaran pada daerah ujung retakan.

Untuk menghitung nilai Stress Intensity Factor (SIF) diperlukan data geometri setiap node di sekitar ujung retakan (*crack tip*).

Dengan memasukkan hasil output pemodelan global yang didapatkan dari pemodelan elemen hingga secara global sebagai input pemodelan retakan ini, didapatkan besarnya tegangan yang terjadi di setiap node di sekitar ujung retakan.

Semakin mendekati ujung retakan maka tegangan yang terjadi semakin besar. Secara visualisasi tampak seperti Gambar 13 dibawah ini.



Gambar. 13. Distribusi tegangan ujung retak (*load case 139*).

D. Perhitungan Stress Intensity Factor (SIF atau K)

Perhitungan K menggunakan persamaan 5 hingga 10 dengan menggunakan tegangan hasil output dari pemodelan sub-lokal. Sehingga didapatkan K_{min} sebesar 7177.71 MPa. \sqrt{m} dan K_{maks} sebesar 10220.83 MPa. \sqrt{m} . K_{min} terjadi saat gelombang 0.25 m (*load case 101*) sedangkan K_{maks} terjadi saat gelombang 9.5 m (*load case 139*).

E. Perhitungan Range Stress Intensity Factor (ΔK)

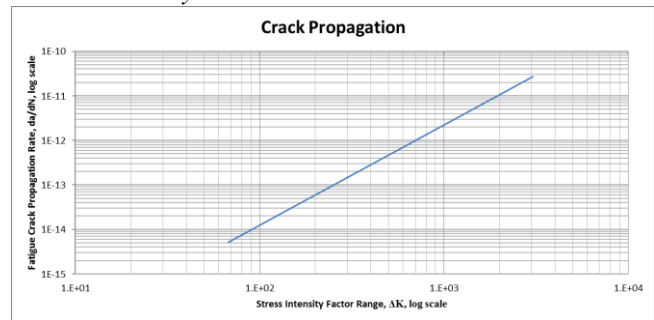
Berdasarkan hukum Paris-Erdogan, nilai ΔK didapatkan dari selisih nilai K saat pembebanan maksimum dengan nilai K saat pembebanan minimum. Sehingga nilai ΔK maksimum didapatkan dari selisih nilai K saat pembebanan maksimum (tinggi gelombang 9.5 m) dengan nilai K saat pembebanan minimum (tinggi gelombang 0.25 m).

F. Parameter Keretakan

Untuk mencari kecepatan rambat retak (*da/dN*) dibutuhkan parameter keretakan (C dan m) berdasarkan jenis material yang mengalami retak. Nilai C dan m tiap material didapatkan secara empiris menggunakan data yang didapatkan dari tes kelelahan. Jenis material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja martensitic ASTM A 514 sehingga nilai dari C dan m adalah 0.66×10^{-8} dan 2.25.

G. Kecepatan Rambat Retak

Dengan menggunakan Persamaan 2 didapatkan nilai kecepatan rambat retak dari masing – masing *load case*. Nilai ΔK maksimum terdapat pada selisih nilai K saat gelombang 9.5 m dengan gelombang 0.25 m. Nilai ΔK maksimum menghasilkan nilai kecepatan rambat retak (*da/dN*) maksimum pula. Dari tabel diketahui nilai perambatan retaknya yakni $2.70045E-11$ m/cycle.



Gambar. 14. Grafik hubungan antara nilai ΔK dengan kecepatan rambat retak dalam skala logaritma.

Berdasarkan grafik di atas dapat diketahui bahwa grafik tersebut sesuai dengan hukum Paris-Erdogan bahwa kecepatan rambat retak bergerak secara linear dalam region II.

H. Penentuan Kedalaman Retak Kritis (a_{cr})

Kedalaman retak kritis (a_{cr}) didapatkan dengan menggunakan Persamaan 2.11 dimana:

$$K_{IC} = 85 \text{ ksi}\sqrt{\text{inch}} \text{ (berdasar jenis material)}$$

$$= 3677.23 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$$

$$\sigma_{\max} = 39924.00 \text{ MPa}$$

sehingga nilai dari a_{cr} sebesar 0.16321 m. Berdasarkan nilai a_{cr} dapat diketahui bahwa material tidak akan runtuh walaupun retak telah menembus ketebalan dindingnya.

I. Perhitungan Umur Struktur

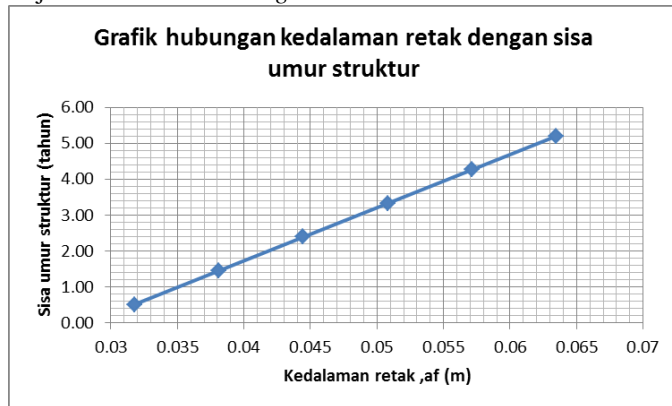
Perhitungan sisa umur struktur menggunakan Persamaan 13.

Tabel 2.

Sisa umur struktur berdasarkan panjang kedalaman retak

| a_i (m) | thickness (t) (m) | n.t | (m) | da/dN (m/cycle) | N cycle | tahun |
|--------------|----------------------|------|---------|--------------------|------------|-------|
| 0.0283 | 0.0635 | 0.5t | 0.03175 | 2.700.E-11 | 1.278.E+08 | 0.51 |
| | | 0.6t | 0.03810 | 2.700.E-11 | 3.629.E+08 | 1.45 |
| | | 0.7t | 0.04445 | 2.700.E-11 | 5.980.E+08 | 2.39 |
| | | 0.8t | 0.05080 | 2.700.E-11 | 8.332.E+08 | 3.33 |
| | | 0.9t | 0.05715 | 2.700.E-11 | 1.068.E+09 | 4.27 |
| | | t | 0.06350 | 2.700.E-11 | 1.303.E+09 | 5.20 |

Berdasarkan Tabel 2. dapat dilihat variasi nilai kedalaman retak setelah pembebanan (a_f) mulai dari 0.5t hingga t. Divariasikan kedalaman retak hingga t karena retak yang terjadi diasumsikan *through thickness crack*.



Gambar. 15. Grafik hubungan antara nilai kedalaman retak dengan sisa umur kelelahan struktur.

Material struktur ini cukup bagus karena memiliki a_{cr} lebih dari ketebalannya sehingga walaupun keretakan melampaui ketebalannya struktur tersebut tidak pecah secara menyeluruh. Dalam istilah teknik disebut *leak before break*, hal ini bisa terjadi jika a_{cr} bernilai lebih besar dari ketebalan dari material tersebut. [12] menyebutkan bahwa definisi kegagalan kelelahan terjadi ketika retak tumbuh hingga mencapai ketebalan. Berdasarkan aturan tersebut telah diketahui bahwa waktu yang diperlukan retak menjangar hingga menembus ketebalan kaki *jack-up* tersebut yakni 5.2 tahun. Jika terhitung mulai dari ditemukannya keretakan yakni inspeksi pada bulan Agustus 2010, maka secara teoritis pada bulan Oktober 2015 retak sudah menembus ketebalan kaki *jack-up*.

IV. KESIMPULAN DAN RINGKASAN

Dari analisa yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- Nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) dari kaki *Jack-Up* dengan *mudmat* minimum (K_I min) sebesar 7177.72 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ dan nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) dari kaki *Jack-Up* dengan *mudmat* maksimum (K_I max) sebesar 10220.83 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.
- Arah perambatan retak yang terjadi melampaui ketebalan dari leg karena nilai kedalaman retak kritis (a_{cr}) yang melebihi nilai ketebalan dari leg tersebut atau disebut juga *through thickness crack*.
- Sisa umur struktur ini dengan pendekatan Linear Elastic Fracture Mechanics didapatkan sebesar 5.2 tahun dengan asumsi retak menembus hingga ketebalan kaki *jack-up*. Jika terhitung mulai dari ditemukannya keretakan yakni inspeksi pada bulan Agustus 2010, maka secara teoritis pada bulan Oktober 2015 retak sudah menembus ketebalan kaki *jack-up*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam pengerjaan penelitian ini tidak terlepas dari bantuan serta dorongan moral maupun material dari banyak pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Biro Klasifikasi Indonesia yang telah membantu dalam mengumpulkan data selama pengerjaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bennet, "Jack Up Units, A Technical Primer For The Offshore Industry Professional", Keppel FELS (2005).
- [2] PT. Singgar Mulia, "Maleo MOPU Global In-Place Analysis", Doc.no. 9701-90-RPT-0002, (2011).
- [3] Kobus, L.C.S., Fogal, R.W., dan Sacchi, E., "Jack-Up Conversion for Production", *Marine Structures* 2, (1989) 193-211.
- [4] Broek, D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, USA (1987).
- [5] Det Norske Veritas, *DNV-RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structure*, DNV, Norway (2011).
- [6] Salvadori, A., dan Carini, A., "Minimum Theorems In Incremental Linear Elastic Fracture Mechanic", *International Journal of Solids and Structures* 48, (2011)1362–1369.
- [7] Stoychev, S. dan Kujawski, D., "Crack-tip stresses and their effect on stress intensity factor for crack propagation", *Engineering Fracture Mechanics* 75, (2008) 2469-2479.
- [8] Varga, T., "Crack initiation, propagation and arrest criteria for steel structure safety assessment", *Structural Safety* 12, (1993)93-98.
- [9] Naess, A., *Fatigue Handbook Offshore Steel Structure*, Trondheim, (1985).
- [10] American Institute of Steel Construction (AISC), *Manual of Steel Construction – Allowable Stress design*, 9th Ed (1989).
- [11] American Petroleum Institut, *API RP 2A Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms- Working Stress Design*, API Publishing Services, Washington D.C. , (2005).
- [12] Det Norske Veritas, *DNV-OS-C101 Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method)*, DNV, Norway (2004).