

# Analisis Umur Lelah Kapal Akibat Perambatan Retak pada *Bracket* Ruang Muat

Fardhan Jaya Putera dan Septia Hardy Sujiatanti  
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
e-mail: septia@its.ac.id

**Abstrak**—Kegagalan struktural seperti kelelahan (*fatigue*) dapat menyebabkan keretakan pada kapal. Ketika suatu struktur mencapai batas umur kelelahannya, struktur akan mengalami *initial crack* hingga akhirnya struktur mengalami *fracture*. Pada kapal tanker, kelelahan struktural sering terjadi pada area-area kritis seperti pada sambungan *bracket inner bottom* dengan *hopper sloping plate (end bracket)*. Analisis umur lelah kapal dilakukan dengan bantuan *software finite element*. Di mana perhitungan pembebanan dan pemodelan mengacu pada *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers (CSR-T)*. Untuk pembebanan pada model global menggunakan beban *sloshing* muatan tangki (beban internal). Sedangkan pemodelan global pada *software finite element* menggunakan tiga kompartemen ruang muat dengan *end bracket* sebagai model lokal. Dari hasil analisis model global dengan metode elemen hingga, diperoleh nilai tegangan normal maksimum pada area *end bracket*. Selanjutnya nilai tegangan dari hasil analisis model global digunakan untuk analisis model lokal. Hasil analisis model lokal berupa nilai *Stress Intensity Factor (SIF)* yang digunakan untuk perhitungan umur lelah dengan metode *fracture mechanics*. Nilai SIF dengan *initial crack 10 mm* pada model lokal *end bracket existing* sebesar  $528,84 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ . *End bracket model existing* menunjukkan umur lelah dengan  $519.206,809 \text{ cycles}$  yang dikonversi dalam bentuk hari sebesar  $631,942 \text{ hari}$ .

**Kata Kunci**—*Bracket Ruang Muat, Fracture Mechanics, Perambatan Retak, Stress Intensity Factor (SIF), Umur Lelah.*

## I. PENDAHULUAN

KERETAKAN struktur menyebabkan tingginya insiden kecelakaan kapal. Beberapa di antaranya adalah kecelakaan kapal MV Derbyshire pada September 1980 di Okinawa, Jepang, kecelakaan Kapal KM Dumay Express yang menewaskan 42 orang akibat keretakan lambung pada November 2009, Kapal MV. Marina Baru pada Desember 2015 yang menewaskan 66 orang akibat bocor kamar mesinnya, dan Kapal MT. Prestige yang terjadi *fast fracture* sehingga menyebabkan patah badan.

Kegagalan struktural seperti kelelahan struktural (*fatigue*) dapat menyebabkan kerusakan, keretakan, kebocoran, atau patah pada kapal. Kelelahan struktur dapat disebabkan oleh beban gelombang, *sloshing*, muatan, serta angin. Ketika suatu struktur mencapai batas umur kelelahannya, struktur akan mengalami keretakan yang dimulai dengan retak awal, penjarangan retak yang stabil, retakan yang cepat (*fast fracture*), dan akhirnya patah (*fracture*). Pada kapal, kelelahan struktural sering terjadi di area penting misalnya area *deck, hatch coaming, bracket*, penegar *longitudinal* dan *transversal*, sisi *shell*, dan *bulkhead*. *Bracket* merupakan struktur penyangga yang esensial pada kapal sehingga penelitian ini berfokus pada konstruksi *bracket*.

Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan analisis umur lelah kapal akibat perambatan retak pada *bracket* ruang muat. Perhitungan perambatan retak pada material *bracket* dapat



Gambar 1. Kapal tanker.

mengatasi kelelahan struktural pada kapal. Analisis umur lelah konstruksi kapal dilakukan dengan bantuan *software finite element*. Dimana perhitungan pembebanan dan pemodelan mengacu pada *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers (CSR-T)*. Dari hasil analisis dengan metode elemen hingga, diperoleh nilai tegangan normal maksimum pada *bracket*. Selanjutnya, nilai tegangan ini digunakan untuk menghitung umur *fatigue life* kapal dengan metode *fracture mechanics*. Dengan mengetahui *fatigue life* suatu kapal dapat dilakukannya perawatan dan perbaikan yang tepat waktu untuk memastikan integritas struktural dan keselamatan kapal. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan keandalan dan keamanan operasional kapal serta mengurangi risiko kecelakaan akibat keretakan struktural.

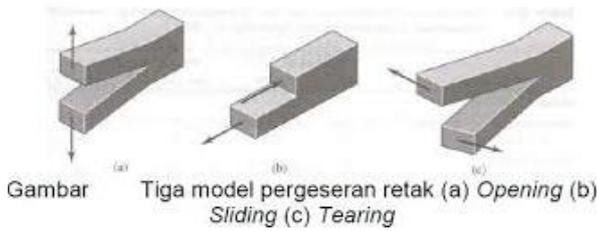
## II. URAIAN PENELITIAN

### A. Kapal Tanker

Kapal tanker adalah kapal yang dirancang khusus untuk mengangkut minyak atau produk turunannya dalam jumlah besar. Seperti dijelaskan oleh Annex II Marpol 73/78, kapal tanker mengangkut muatan atau bagian dari muatan minyak secara curah yang membutuhkan perhatian khusus dalam desain dan konstruksinya. Jenis-jenis kapal tanker beragam termasuk *chemical tanker, oil tanker*, dan lain sebagainya. Sifat muatan yang berbahaya dan mudah terbakar membuat kapal tanker memerlukan perhatian khusus dalam proses konstruksi. Konstruksi kapal tanker harus memenuhi standar keselamatan yang sangat tinggi untuk memastikan keamanan muatan, awak kapal, dan lingkungan sekitar. Adapun contoh dari gambar kapal tanker dapat dilihat pada Gambar 1.

### B. Beban Sloshing

Beban *sloshing* diakibatkan oleh pergerakan bebas cairan tangki akibat gerakan kapal searah memanjang maupun melintang. Mengacu pada CSR, beban *sloshing* yang



Gambar 2. Mode perambatan retak.

Tabel 1.

| Material Properties Structural Steel ASTM A-36 |                           |                  |
|--|---------------------------|------------------|
| ASTM A36 - Structural Steel                    |                           |                  |
| Material Properties                            | Ultimate tensile strength | 400-550 MPa      |
|  | Yield strength            | 250 MPa          |
|  | Elongation                | 0,2              |
|  | Young's modulus           | 200 Gpa          |
|  | Poisson's ratio           | 0,29             |
| Chemistry                                      | Fracture toughness        | 1413.7154 MPa√mm |
|  | Iron (Fe)                 | 99%              |
|  | Carbon                    | 0,26%            |
|  | Manganese (Mn)            | 0,75%            |
|  | Copper (Cu)               | 0,20%            |
|  | Phosphorus (P)            | 0,04%            |
|  | Sulfur (S)                | 0,05%            |

disebabkan oleh pergerakan kapal searah melintang untuk tinggi pengisian muatan tertentu dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_{slh-t} = 7 P_{slh} f_{slh} \left( \frac{b_{slh}}{B} - 0,3 \right) GM^{0,75} \text{ kN/m}^2$$

Beban *sloshing* yang disebabkan oleh gerakan muatan searah melintang adalah nilai yang konsisten pada setiap tingkat pengisian muatan. Nilai ini berkisar dari 0.05 *hmax* hingga 0.95 *hmax*, dengan kenaikan setiap 0.05 *hmax*.

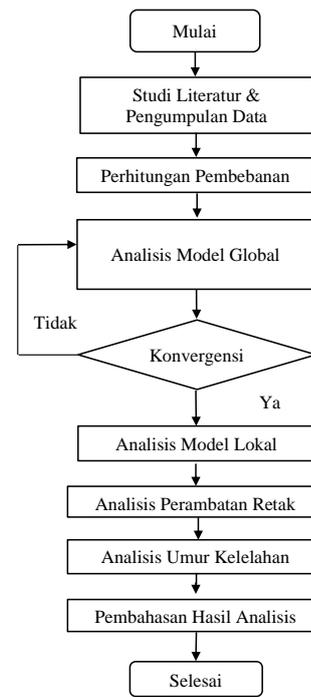
C. Critical Location

Ada empat area yang disebut sebagai area kritis atau area *hot spot*. Area-area tersebut adalah sambungan antara *inner bottom* dengan *hopper tank* dengan *bracket* dan tanpa *bracket*, sambungan antara *inner bottom* dengan *hopper tank* dengan pelat dibengkokkan, serta sambungan antara *inner hull* dengan horizontal *girder*. Pada penelitian ini area kritis yang digunakan pada analisis model adalah sambungan *bracket inner bottom* dengan *hopper sloping plate (end bracket)* yang berada pada ruang muat kapal.

D. Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga juga dikenal sebagai *Finite Element Method - FEM* adalah teknik metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan masalah dan menemukan solusi di bidang rekayasa. Metode ini dapat digunakan untuk menganalisis berbagai permasalahan seperti analisis tegangan, perpindahan panas, elektromagnetisme, dan aliran fluida [1].

Metode elemen hingga membagi geometri menjadi bagian-bagian kecil yang disebut elemen hingga. Proses pembagian kontinu menjadi elemen hingga juga disebut proses diskretisasi. Metode elemen hingga menggunakan pendekatan bagian demi bagian dengan menggunakan polinomial, di mana masing-masing didefinisikan pada area atau elemen yang kecil dan ditunjukkan dalam harga-harga titik nodal dari fungsi tersebut [2].



Gambar 3. Bagan alir.

E. Analisis Kelelahan (Fatigue)

Kelelahan (*fatigue*) adalah akumulasi kerusakan pada material yang disebabkan oleh beban siklik. Struktur pada kapal harus mampu bertahan terhadap tegangan yang terjadi selama masa operasinya [3]. Kegagalan disebabkan oleh tegangan yang lebih rendah dari kekuatan material (*Ultimate/Yield Stress*).

Menghitung umur leleh suatu bahan dapat menggunakan persamaan Paris Erdogan. Uraian persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\int_{a_0}^{af} dN = \int_{a_0}^{af} \frac{da}{C(\Delta K)^n}$$

$$N = \int_{a_0}^{af} \frac{da}{C(\Delta K)^n}$$

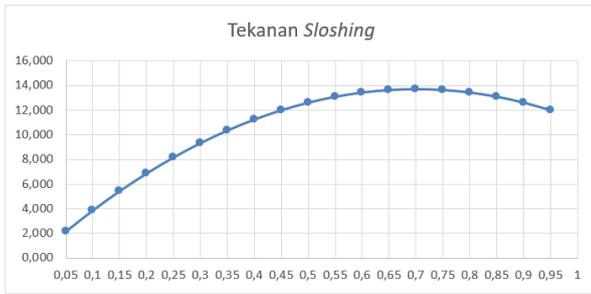
Penjumlahan jumlah siklus yang diperlukan untuk munculnya retak awal (*crack initiation*) disebut  $N_i$ . Jumlah siklus yang diperlukan hingga retak menjalar menjadi retak kritis atau  $N_p$ . Sedangkan  $N_t$  adalah total umur kelelahan. Secara matematis ditulis dalam persamaan berikut:

$$N_t = N_i + N_p$$

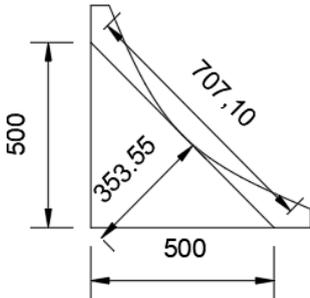
Dalam praktiknya, ada dua pendekatan untuk analisis kelelahan yaitu pendekatan kurva S-N dan mekanika kepecahan. Pendekatan kurva S-N adalah yang paling banyak digunakan dalam tujuan desain karena praktis. Metode ini dapat digunakan untuk menganalisis perambatan retak dengan pembebanan siklis tertentu sampai ke titik kritis [4].

F. Metode Fracture Mechanics

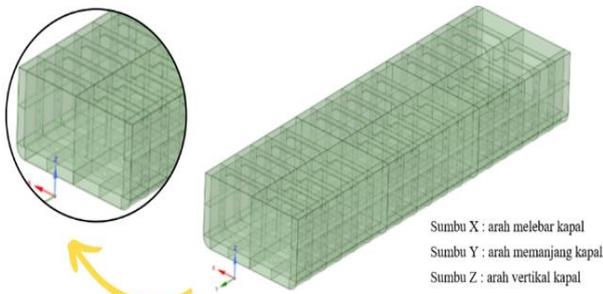
Analisis penyelesaian kepecahan menggunakan analisis tegangan di daerah sekitar retakan dikenal sebagai *fracture mechanics*. Dua jenis metode ini adalah *linear-elastic (LEFM)* dan *elastic-plastic (EPFM)*. Gambar 2 menunjukkan mode perambatan retak. Dalam metode *linear elastic fracture*



Gambar 4. Grafik tekanan sloshing tangki.



Gambar 5. Desain model lokal end bracket.



Gambar 6. Hasil pemodelan global.

mechanics, mode deformasi retak dikategorikan menjadi tiga jenis, yaitu:

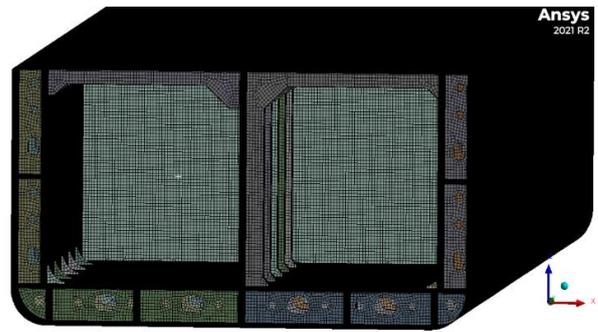
1. Mode 1 (*opening mode*) adalah kondisi dimana retak terjadi karena adanya tegangan tarik yang tegak lurus terhadap bidang atau arah penyebaran retak, menyebabkan retak cenderung membuka.
2. Mode 2 (*sliding mode*) terjadi ketika retak disebabkan oleh tegangan geser yang searah dengan arah penyebaran retak.
3. Mode 3 (*tearing mode*) merujuk pada retak yang disebabkan oleh tegangan geser yang bekerja pada arah melintang dan membentuk sudut dengan arah penyebaran retak.

G. Stress Intensity Factor

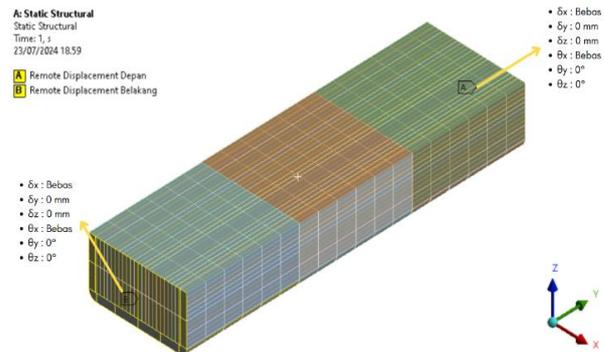
Stress Intensity Factor atau biasa yang disebut faktor intensitas tegangan menunjukkan distribusi tegangan pada ujung retak. Beban eksternal, bentuk geometri, serta bentuk dan ukuran retak yang terjadi mempengaruhi distribusi tegangan. Hal ini adalah salah satu parameter yang paling signifikan dan mendasar dalam *fracture mechanics*. Persamaan untuk Rentang Faktor Intensitas Tegangan (SIF) pada jenis retak *edge crack* sebagai berikut [4]:

$$\Delta K = 1,12\sigma\sqrt{\pi a}$$

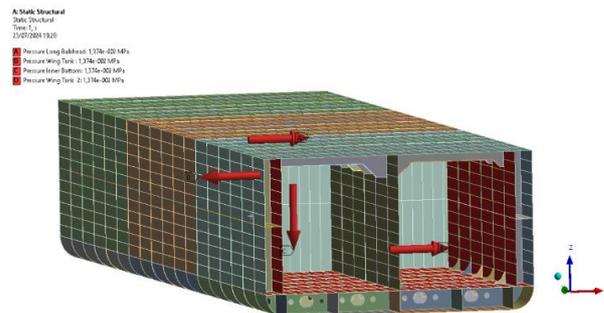
Beberapa faktor yang memengaruhi nilai SIF meliputi panjang retak (a), faktor geometri retak, tegangan yang



Gambar 7. Detail mesh bagian dalam model global.



Gambar 8. Kondisi batas model global.



Gambar 9. Pembebanan model global.

diberikan ( $\sigma$ ), serta rasio antara panjang retak dan lebar material [5].

H. Perambatan Retak

Umur kelelahan struktur yang dianalisis biasanya didefinisikan sebagai waktu perambatan retak dari retak awal sampai retak kritis. Dengan menyediakan data mengenai retak awal dan retak akhir, persamaan laju keretakan berikut dapat digunakan untuk menghitung jumlah batas siklus yang masih ada sebagai berikut:

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{\Delta K^m}$$

Dengan mensubstitusi persamaan hukum Paris-Erdogan sebagai berikut:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Persamaan baru yang didapatkan, yaitu:

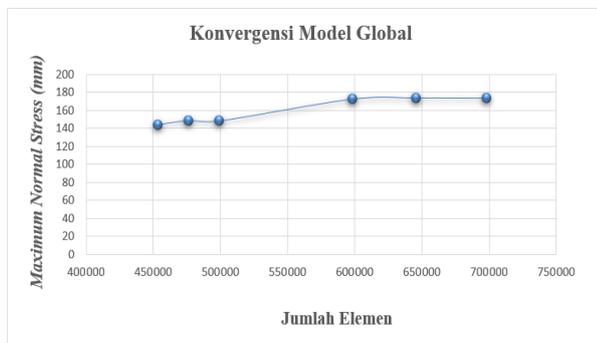
$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m}$$

Tabel 2.  
Konvergensi Model Global

| No | Ukuran Mesh (mm) | Jumlah Elemen | Max. Normal Stress (mm) | Error   |
|----|------------------|---------------|-------------------------|---------|
| 1  | 130              | 453.088       | 144,550                 | -       |
| 2  | 125              | 476.249       | 149,131                 | 3,168%  |
| 3  | 120              | 498.922       | 148,662                 | -0,314% |
| 4  | 115              | 597.937       | 172,585                 | 16,091% |
| 5  | 110              | 645.744       | 173,959                 | 0,796%  |
| 6  | 100              | 698.167       | 173,761                 | -0,113% |

Tabel 3.  
Nilai SIF Model Lokal End Bracket Existing

| Panjang Retak (mm) | SIF (MPa√mm) |
|--------------------|--------------|
| 10                 | 528,84       |
| 20                 | 624,42       |
| 30                 | 872,42       |
| 40                 | 1.030,6      |
| 50                 | 1.107,1      |
| 60                 | 1.237,5      |
| 70                 | 1.367,0      |
| 80                 | 1.439,5      |
| 90                 | 1.550,9      |



Gambar 10. Konvergensi model global.

III. METODOLOGI

A. Bagan Alir

Pada penelitian ini proses pembuatan model dan analisis akan dilakukan dengan bantuan *software* analisa elemen hingga. Gambar 3 adalah prosedur pelaksanaan penelitian yang diuraikan melalui bagan alir.

B. Tahap Pengerjaan

Secara garis besar, pengerjaan penelitian ini disusun melalui beberapa tahapan seperti yang telah disajikan pada bagan alir pada Gambar 3. Berikut penjelasan pada setiap tahap pengerjaan:

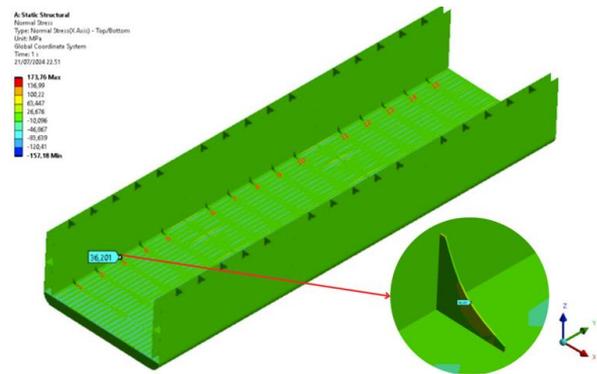
1) Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Pada tahap ini, dilakukan kajian literatur mengenai teori-teori yang akan diterapkan dalam penelitian ini, khususnya yang berkaitan dengan kepecahan dan kelelahan seperti yang telah dipaparkan dalam Bab 2. Tahap pengumpulan data bertujuan untuk mengumpulkan data primer dan sekunder yang relevan dengan kasus yang dianalisis dalam penelitian ini. Data yang dipakai berasal dari kapal tanker 5500 DWT.

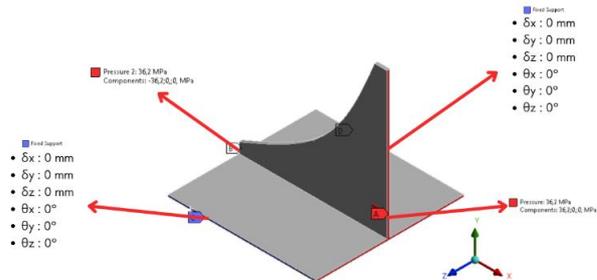
2) Perhitungan Pembebanan

a. Perhitungan Beban *Sloshing*

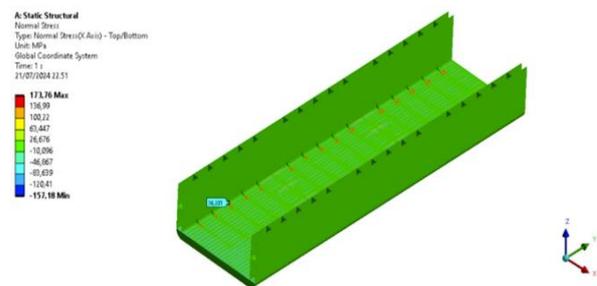
Dalam penelitian ini, model yang digunakan untuk analisis beban *sloshing* dalam tangki tidak mencakup beban dinamis



Gambar 11. Bagian pemodelan model lokal.



Gambar 12. Kondisi batas dan pembebanan pada model lokal.



Gambar 13. Tegangan Normal Maksimum ke Arah Sumbu X pada Model End Bracket Existing.

gelombang atau beban hidrostatis yang disebabkan oleh gelombang. Sebaliknya, beban *sloshing* yang diterapkan pada model hanya melibatkan gerakan fluida dalam tangki yang disebabkan oleh perubahan volume. Tekanan *sloshing* yang dihasilkan dalam tangki telah dihitung menggunakan rumus CSR dan hasil perhitungan nilai tekanan *sloshing* pada tangki yang disajikan pada Gambar 4.

Nilai tekanan *sloshing* tertinggi yang bernilai 13,74 kN/m<sup>2</sup> pada grafik tekanan *sloshing* tangki digunakan sebagai nilai pembebanan pada model global kapal.

b. Perhitungan Periode *Rolling*

Periode *rolling* dari kapal dihitung menggunakan pendekatan yang ditulis oleh IACS. Menurut (IACS, 2014) pada *part I chapter 4 section 3* dalam *rules* nya mengatakan bahwa pergerakan kapal dan percepatan yang terjadi diasumsikan sebagai fungsi sinusoidal. Pergerakan dari kapal didefinisikan memiliki amplitudo tunggal dengan menggunakan persamaan berikut:

$$T\theta = \frac{2.3 \pi k_r}{\sqrt{g \cdot GM}}$$

3) Pemodelan Global

Pemodelan global dilakukan menggunakan *software* analisa elemen hingga yang berbasis pada data *midship section* dan *construction profile* yang tersedia. Menurut CSR,

Tabel 4.  
Perhitungan Perambatan Retak pada Model *End Bracket Existing*

| a0 (m) | af (m) | a0 (in) | af (in) | ΔK avg (Mpa.√mm) | ΔK avg (Ksi.√in) | da/dn (in/cycles) |
|--------|--------|---------|---------|------------------|------------------|-------------------|
| 0,01   | 0,02   | 0,394   | 0,787   | 576,630          | 16,594           | 1,65E-06          |
| 0,02   | 0,03   | 0,787   | 1,181   | 748,420          | 21,538           | 3,6E-06           |
| 0,03   | 0,04   | 1,181   | 1,575   | 951,510          | 27,383           | 7,39E-06          |
| 0,04   | 0,05   | 1,575   | 1,969   | 1068,850         | 30,760           | 1,05E-05          |
| 0,05   | 0,06   | 1,969   | 2,362   | 1172,300         | 33,737           | 1,38E-05          |
| 0,06   | 0,07   | 2,362   | 2,756   | 1302,250         | 37,476           | 1,89E-05          |
| 0,07   | 0,08   | 2,756   | 3,150   | 1403,250         | 40,383           | 2,37E-05          |
| 0,08   | 0,09   | 3,150   | 3,543   | 1495,200         | 43,029           | 2,87E-05          |

Tabel 5.  
Hasil Perhitungan *Cycles* pada Model *End Bracket Existing*

| a0 (m)                                  | af (m) | a0 (in) | af (in) | ΔK avg (Ksi.√in) | da/dn (in/cycles) | ΔN (Cycles) |
|---|--------|---------|---------|------------------|-------------------|-------------|
| 0,01                                    | 0,02   | 0,394   | 0,787   | 16,594           | 1,645E-06         | 239320,234  |
| 0,02                                    | 0,03   | 0,787   | 1,181   | 21,538           | 3,597E-06         | 109454,839  |
| 0,03                                    | 0,04   | 1,181   | 1,575   | 27,383           | 7,392E-06         | 53263,665   |
| 0,04                                    | 0,05   | 1,575   | 1,969   | 30,760           | 1,048E-05         | 37576,890   |
| 0,05                                    | 0,06   | 1,969   | 2,362   | 33,737           | 1,382E-05         | 28480,973   |
| 0,06                                    | 0,07   | 2,362   | 2,756   | 37,476           | 1,895E-05         | 20777,248   |
| 0,07                                    | 0,08   | 2,756   | 3,150   | 40,383           | 2,371E-05         | 16606,036   |
| 0,08                                    | 0,09   | 3,150   | 3,543   | 43,029           | 2,868E-05         | 13726,925   |
| ΣN untuk a0 = 0,01 m sampai af = 0,09 m |        |         |         |                  |                   | 519206,809  |

Tabel 6.  
Hasil Perhitungan Umur Lelah Model *End Bracket Existing*

| a0 (in)  | af (in) | ΔK avg (Ksi.√in) | da/dn (in/cycles) | ΔN (Cycles) | Tθ (s) | Umur                            |
|--|---------|------------------|-------------------|-------------|--------|---------------------------------|
| 0,394  | 0,787   | 16,594           | 1,645E-06         | 239320,234  | 10,516 | 291,284 (Hari)                  |
| 0,787  | 1,181   | 21,538           | 3,597E-06         | 109454,839  | 10,516 | 133,221 (Hari)                  |
| 1,181  | 1,575   | 27,383           | 7,392E-06         | 53263,665   | 10,516 | 64,829 (Hari)                   |
| 1,575  | 1,969   | 30,760           | 1,048E-05         | 37576,890   | 10,516 | 45,736 (Hari)                   |
| 1,969  | 2,362   | 33,737           | 1,382E-05         | 28480,973   | 10,516 | 34,665 (Hari)                   |
| 2,362  | 2,756   | 37,476           | 1,895E-05         | 20777,248   | 10,516 | 25,289 (Hari)                   |
| 2,756  | 3,150   | 40,383           | 2,371E-05         | 16606,036   | 10,516 | 20,212 (Hari)                   |
| 3,150  | 3,543   | 43,029           | 2,868E-05         | 13726,925   | 10,516 | 16,707 (Hari)                   |
| ΣUmur untuk a0 = 0,394 in sampai af = 3,543 in |         |                  |                   |             |        | 631,942 (Hari)<br>1,730 (Tahun) |

pemodelan dilakukan pada tiga ruang muat di tengah kapal, termasuk *web frame*, sekat melintang, dan seluruh konstruksi yang berada pada area tersebut. Dalam proses pemodelan, *surface element* digunakan untuk memodelkan lambung dan *transverse girder* sementara *beam element* digunakan pada bagian *profile* untuk memperingan model dan memungkinkan analisis yang lebih cepat. Selain itu, model global juga dilengkapi dengan model lokal yang akan dianalisis, yaitu *end bracket* yang menjadi *critical location*. Perhitungan *end bracket* mengikuti perhitungan CSR 2023, CH.8, SEC.2. [5.2] dengan rumus sebagai berikut:

$$t_b = \frac{d_b}{C} \sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

Dari perhitungan didapatkan ukuran model *existing end bracket* dengan tebal *bracket* 12 mm dan panjang kaki *bracket* 500 mm seperti pada Gambar 5.

4) Analisis Model Global

Analisis model global dilakukan menggunakan metode elemen hingga yang efektif dengan bantuan *software* analisa elemen hingga untuk memperoleh hasil tegangan normal searah pada beban yang diberikan. Kemudian hasil tegangan ini digunakan sebagai *input* dalam analisis model lokal. Analisis tegangan global dilakukan dengan menggunakan beban dari tekanan *sloshing* terbesar pada tangki. Hasil pemodelan global tertera pada Gambar 6. Berikut adalah tahapan yang dilakukan dalam analisis model global:

a. Pemodelan geometri dan sistem koordinat

Geometri yang akan digunakan pada analisis tegangan global ini adalah model tiga ruang muat kapal yang telah dibuat pada Bab 3 Sub Bab Pemodelan Global. Sistem koordinat yang digunakan pada analisis ini adalah koordinat kartesian dengan arah sebagai berikut:

1. Sumbu X : arah melebar kapal
2. Sumbu Y : arah memanjang kapal
3. Sumbu Z : arah vertikal kapal

b. Pendefinisian material

Material yang digunakan dalam analisis ini adalah baja struktural ASTM A-36, yang diketahui memiliki sifat-sifat material yang spesifik dan tercantum dalam Tabel 1.

c. Meshing

Langkah selanjutnya adalah pengaturan *mesh*. Pengaturan *mesh* model global menggunakan *adaptive sizing* dan ditambahkan kontrol *mesh* dengan metode *face sizing* kepada seluruh bagian model kapal dengan ukuran 100 mm dan ukuran *meshing* yang sudah konvergen. Selanjutnya, dilakukan *mesh connection* untuk *surface* atau *shell* pada model kapal yang bersinggungan agar dapat didefinisikan tergabung atau terkoneksi antara satu dengan yang lainnya. Berikut hasil *meshing* yang ditunjukkan oleh Gambar 7.

d. Pembebanan dan kondisi batas

Kondisi batas diberikan pada area *after end* dan *fore end* model ruang muat. Pada area tersebut, dibuat *remote point* yang menggambarkan bahwa semua tepi (*edge*) penampang

melintang struktur dihubungkan ke suatu titik independen yang terletak pada sumbu netral (*neutral axis*). Kondisi batas ini diberikan dengan tujuan untuk membatasi gerakan model yang tidak diinginkan dan memastikan bahwa model dapat bergerak secara stabil dan akurat. Kondisi batas yang berupa *remote displacement* didefinisikan sebagai berikut:

- $\delta x$  : Bebas -  $\theta x$  : Bebas
- $\delta y$  : 0 mm -  $\theta y$  :  $0^\circ$
- $\delta z$  : 0 mm -  $\theta z$  :  $0^\circ$

Dengan adanya kondisi batas ini, akan efektif untuk membatasi pola gerak model sehingga beban model dapat diterapkan. Berikut adalah kondisi batas pada model global yang ditunjukkan oleh Gambar 8.

Penerapan beban tekanan *sloshing* muatan kapal yang tertera pada Bab 3 Sub Bab Perhitungan Pembebanan diterapkan pada seluruh bagian dalam tangki kapal sehingga dapat memprediksi perilaku struktur. Berikut adalah pembebanan pada model global kapal yang ditunjukkan oleh Gambar 9.

#### e. Analisis hasil simulasi global

Setelah semua pengaturan pada model global telah dilakukan, maka dilakukan simulasi atau *running* yang dilakukan pada *software* analisa elemen hingga. Nilai tegangan normal maksimum pada sumbu X yang didapatkan pada analisis model global yang berlokasi di model lokal akan digunakan sebagai nilai *pressure* pada analisis model lokal. Simulasi ini dilakukan berulang-ulang dengan menggunakan ukuran *mesh* yang berbeda untuk mendapatkan konvergensi model global sehingga dapat memastikan bahwa hasil simulasi yang didapatkan adalah yang paling akurat dan sesuai dengan kebutuhan analisis.

#### 5) Konvergensi

Konvergensi dilakukan dengan cara menjalankan beberapa analisis pada ukuran elemen yang berbeda-beda, lalu hasil-hasil tersebut dibandingkan hingga didapatkan hasil yang paling stabil setelah ukuran elemen tertentu. Uji konvergensi dilakukan dengan cara mengurangi ukuran elemen secara bertahap dari 130 mm hingga didapatkan hasil tegangan normal yang stabil dan maksimum. Hasil konvergensi dapat dilihat pada Gambar 10 dan Tabel 2.

Tabel 2 menunjukkan hasil konvergensi maksimum tegangan normal yang diperoleh dengan menggunakan beberapa ukuran elemen. Selain itu, terlihat bahwa konvergensi telah tercapai pada ukuran elemen 100 mm dengan jumlah elemen sebanyak 698.167. Hasil dari ukuran elemen yang sudah konvergen adalah nilai tegangan normal maksimum ke arah sumbu X sebesar 173,761 MPa dengan tingkat *error* sebesar -0,113%.

#### 6) Pemodelan Lokal

Pemodelan lokal berfokus pada area *end bracket* yang merupakan bagian *critical location*. Bagian yang akan dimodelkan mencakup *end bracket* pada kapal beserta *inner bottom plate* kapal. Model lokal yang akan dianalisis bisa dilihat pada Gambar 11.

Kondisi batas dan pembebanan yang digunakan pada model lokal adalah *pressure* dan *fixed support*. *Pressure* diberikan pada bagian samping model dengan sumbu X positif dan samping model dengan sumbu X negatif agar menjadi tegangan tarik mode 1 pada model retak. *Pressure*

menggunakan tegangan maksimal pada area *critical location* yang telah didapatkan pada simulasi model global. Kondisi batas *fixed support* diberikan pada area depan dan belakang model atau sumbu Z. Kondisi batas dan pembebanan model lokal ditunjukkan oleh Gambar 12.

Setelah menyelesaikan semua pengaturan pada model lokal, langkah berikutnya adalah menjalankan simulasi pada model lokal tersebut. Pada simulasi ini, akan memperoleh nilai *Stress Intensity Factor* (SIF)  $K_I$  pada ujung retak.

#### 7) Analisis Perambatan Retak

Setelah nilai SIF diketahui, perhitungan laju rambat retak dilakukan menggunakan konsep *fracture mechanics*. Laju rambat retak yang dinyatakan dengan variabel  $da/dN$  bergantung pada panjang retak, sifat material, tegangan, dan faktor geometri. Mode retak yang diterapkan merupakan mode 1, yaitu *opening mode*.

#### 8) Perhitungan Umur Kelelahan

Pada tahap akhir ini, dilakukan perhitungan untuk menentukan umur kelelahan struktur. Umur kelelahan struktur adalah waktu yang diperlukan hingga struktur mengalami kegagalan. Faktor yang menunjukkan bahwa struktur telah mencapai umur lelah adalah ketika nilai  $K_I$  telah melampaui *fracture toughness* ( $K_{Ic}$ ) material.

## IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### A. Analisis Model Global

Dilakukan pengecekan hasil tegangan yang terjadi pada analisis model global yang telah dilakukan sesuai dengan Bab 3 Sub Bab Analisis Model Global. Tegangan yang dianalisis adalah tegangan normal maksimum ke arah sumbu X pada *end bracket* yang menjadi *critical location*. Setelah itu, hasil tegangan ini akan digunakan sebagai dasar pembebanan pada analisis model lokal

Hasil tegangan normal maksimum ke arah sumbu X pada model *end bracket existing* sebesar 36,201 Mpa menggunakan *probe stress* pada area tersebut. Gambar 13 merupakan hasil dari tegangan normal maksimum ke arah sumbu X pada model *end bracket existing*:

### B. Analisis Model Lokal

Analisis model lokal dilakukan untuk mengetahui nilai *stress intensity factor* (SIF) guna menghitung nilai perambatan retaknya. Pada analisis model lokal ini menggunakan beban yang didapat dari tegangan maksimum normal ke arah sumbu X di area *end bracket* pada hasil analisis model global yang sudah didapatkan dari Sub Bab sebelumnya. Perhitungan nilai pada model lokal SIF dilakukan dengan panjang retak awal 10 mm dan akan memanjang 10 mm pada setiap modelnya.

Dilakukan simulasi menggunakan *software* untuk mencari nilai SIF pada model lokal *end bracket existing*. Simulasi pada model lokal *existing* dilakukan dengan panjang retak awal 10 mm dan bertambah panjang 10 mm sampai dengan nilai SIF pada model lokal *end bracket existing* melewati nilai *fracture toughness* ( $K_{Ic}$ ) material baja A36 sebesar  $1.413,715 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  yang dianggap konstruksi telah mencapai *fatigue*. Hasil simulasi nilai SIF ditunjukkan oleh Tabel 3.

### C. Analisis Perambatan Retak

Pada perhitungan laju perambatan retak, terlebih dahulu dihitung  $\Delta K_{avg}$  sebagai nilai SIF rata-rata dari pertambahan panjang retak dari nilai SIF yang sudah didapatkan dari Sub Bab sebelumnya. Pada perhitungan perambatan retak juga diperlukan satuan dari  $a$  dan faktor intensitas tegangan diubah terlebih dahulu menjadi satuan Ksi dan in. Hasil perhitungan perambatan retak dapat dilihat pada Tabel 4.

### D. Perhitungan Umur Lelah

Perhitungan umur keletahan pertama-tama dilakukan dengan menghitung *cycles*. Perhitungan *cycles* dilakukan dengan menggunakan rumus yang diturunkan dari persamaan Paris-Erdogan yang dapat dilihat pada persamaan **Error! Reference source not found.** Persamaan tersebut digunakan untuk mencari *cycles* yang dibutuhkan untuk struktur sampai mengalami *fracture* dengan indikasi  $\Delta K$  sudah melewati  $K_{Ic}$  material pada setiap model. Perhitungan umur keletahan dilakukan pada setiap penambahan panjang retak hingga mencapai atau melewati  $K_{Ic}$ . Berikut hasil perhitungan *cycles* yang ditunjukkan oleh Tabel 5.

Setelah mendapatkan *cycles*, maka perhitungan dilanjutkan dengan menghitung periode *rolling* kapal. Didapatkan nilai periode *rolling* ( $T\theta$ ) sebesar 10,516 s. Nilai periode ini akan digunakan pada perhitungan umur keletahan setelah jumlah *cycle* lelah telah diketahui. Berikut hasil perhitungan umur keletahan yang ditunjukkan oleh Tabel 6.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Setelah melakukan analisis menggunakan perangkat lunak *finite element* dan perhitungan, kesimpulan dari penelitian ini adalah nilai SIF pada *bracket* ruang muat, tepatnya *end bracket* yang mengalami *initial crack* dapat ditentukan

menggunakan simulasi perangkat lunak seperti *software* analisa elemen hingga. *End Bracket* model *existing* memiliki nilai SIF sebesar 528,84 MPa $\sqrt{\text{mm}}$  pada *initial crack* panjang 10 mm. Pengaruh perambatan retak pada *bracket* ruang muat, tepatnya *end bracket* sangat signifikan terhadap umur lelah kapal. *End bracket* model *existing* menunjukkan umur lelah dengan 519.206,809 *cycles* yang dikonversi dalam bentuk hari sebesar 631,942 hari.

### B. Saran

Analisis umur lelah kapal dilakukan dengan menggunakan *crack* hanya menjalar pada mode 1 (*opening crack*), sehingga perlu dilakukan analisis lebih lanjut baik pada mode 2 (*sliding crack*) dan mode 3 (*tearing crack*). Dalam penelitian ini, *crack* diasumsikan retak tepi satu sisi (*single edge crack*). Akan tetapi, *crack* terdiri dari beragam jenis seperti *semi-elliptical crack* (*surface crack*), retak tengah menjalar (*through center crack*), retak tepi di dua sisi (*double – edge crack*), dan lain-lain. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisa lebih lanjut dengan mempertimbangkan variasi dari bentuk *crack*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. Gunawan, A. Zubaydi, S. H. Sujiatanti, and R. C. Ariesta, "Analisis crack pada transverse corrugated bulkhead kapal tanker menggunakan metode elemen hingga," *J. Tek. ITS*, vol. 12, no. 1, pp. G1–G6, 2023.
- [2] J. Whiteley, *Finite Element Methods - A Practical Guide*. Oxford: Springer, 2014. ISBN: 978-3-319-49970-3.
- [3] E. Setiahad, "Analisa Fatigue Life Graving Dock Gate dengan Metode Simplified," Departemen Teknik Perkapalan: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [4] J. Barsom and S. Rolfe, *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*, 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. ISBN: 978-0750673150.
- [5] S. D. Pitaloka and M. N. Misbah, "Studi pengaruh variasi pengelasan bracket terhadap fatigue life struktur kapal patroli cepat 40M akibat beban gelombang," *J. Tek. ITS*, vol. 10, no. 1, pp. G51–G57, 2021.