

Analisis Umur Lelah Akibat Retak pada Struktur Alas Kapal

Angga Ramadhani Saputra dan Septia Hardy Sujiatanti

Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

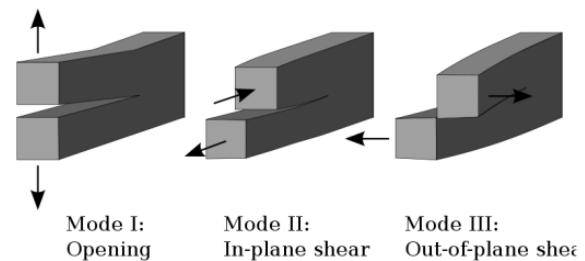
e-mail: septia@its.ac.id

Abstrak—Kecelakaan kapal yang terjadi akibat adanya retakan pada konstruksi kapal sering terjadi. Diperkirakan 50%-90% kecelakaan kapal yang diakibatkan kegagalan mekanis disebabkan oleh kelelahan. Untuk menghindari hal tersebut maka, harus dilakukan perhitungan terhadap umur kelelahan struktur agar dapat mengetahui waktu yang dibutuhkan retak untuk menjalar dari retakan awal (*Initial crack*) sampai retak tersebut sudah dapat dikatakan membahayakan atau akan terjadi kegagalan. Kelelahan terjadi karena tiga faktor dasar, yaitu tegangan tarik maksimum yang tinggi, variasi atau fluktuasi tegangan yang cukup besar, dan siklus tegangan yang besar. Pada penelitian ini perhitungan umur kelelahan dilakukan pada bagian struktur alas kapal yaitu *center girder* dan konstruksi melintang alas dengan pendekatan *fracture mechanics*. Pembebanan yang dilakukan berdasarkan pada beban hidrodinamis kapal yaitu beban ekstrim kondisi *hogging* dan *sagging*. Dilakukan analisis tegangan global yang terjadi dengan memodelkan kapal utuh untuk mendapatkan nilai tegangan tarik maksimal. Selanjutnya, dilakukan analisis tegangan lokal dan perambatan retak pada struktur alas kapal yang ditinjau dengan menggunakan retak awal 5 mm. Metode *fracture mechanics* digunakan dalam menganalisis kekuatan struktur alas kapal dan memperkirakan umur lelah struktur. Didapat nilai faktor intensitas tegangan pada model lokal sebesar $168,51 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Untuk variasi kapal menggunakan material KI-A didapatkan faktor intensitas tegangan sebesar $459,31 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Umur lelah dari struktur alas kapal menggunakan material *aluminium alloy 5083* didapat selama 271,18 hari. Untuk variasi kapal menggunakan material KI-A didapatkan umur lelah selama 3,06 hari.

Kata Kunci—Fracture Mechanics, Hidrodinamis, Konstruksi Kapal, Tegangan, Umur Lelah.

I. PENDAHULUAN

KECELAKAAN kapal yang terjadi akibat adanya retakan pada konstruksi kapal sering terjadi. Beberapa kasus kecelakaan kapal yang diakibatkan oleh retakan adalah sebagai berikut kapal MV Derbyshire yang mengalami kecelakaan pada Bulan September 1980 di Okinawa, Jepang [1]. Kapal KM Dumay Express di Bulan November 2009 yang terjadi akibat keretakan pada lambung kapal sehingga menewaskan 42 orang. Untuk menghindari hal tersebut maka, harus dilakukan perhitungan terhadap umur kelelahan struktur agar dapat mengetahui waktu yang dibutuhkan retak untuk menjalar dari retakan awal (*Initial crack*) sampai retak tersebut sudah dapat dikatakan membahayakan atau akan terjadi kegagalan. Pada penelitian ini perhitungan umur kelelahan dilakukan menggunakan metode numerik. Pengkajian dilakukan pada sambungan profil T memanjang *bottom* dan profil T melintang *bottom* kapal dengan mencari tegangan pada kondisi *hogging* atau *sagging*. Analisis retak dilakukan dengan memvariasikan kedalaman retakan awal pada material aluminium. Pada penelitian ini hasil yang



Gambar 1. Mode retak.

diharapkan adalah dapat mengetahui umur lelah pada material aluminium.

II. DASAR TEORI

A. Konstruksi Kapal

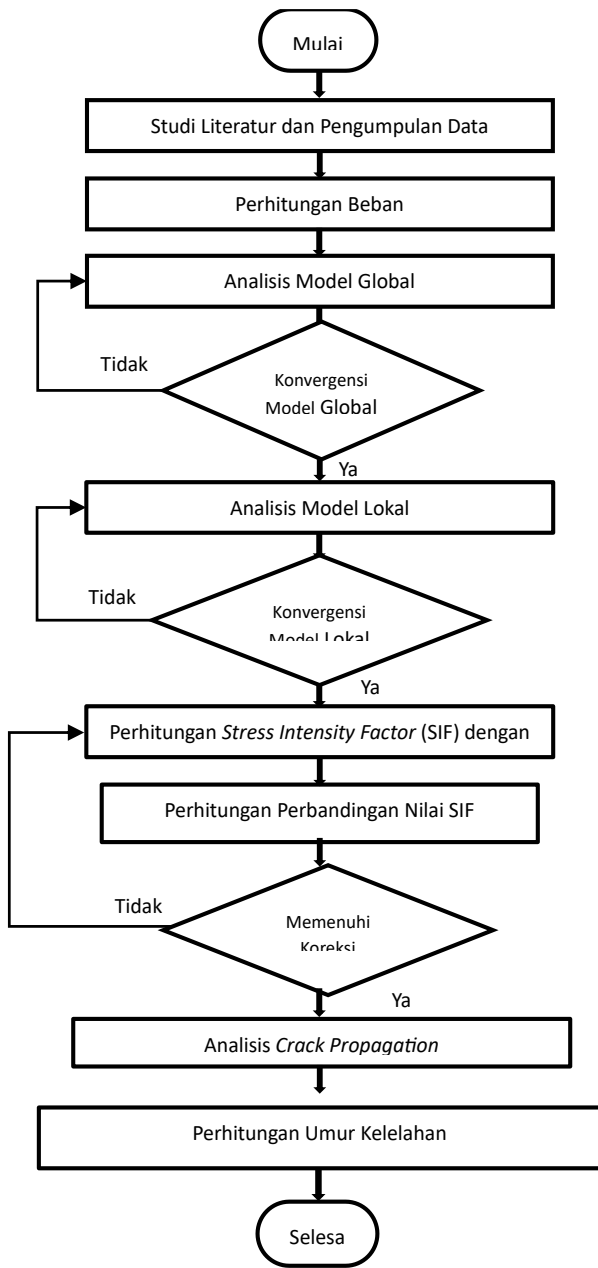
Secara umum, proses pembangunan kapal dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama: konstruksi melintang, konstruksi memanjang, dan konstruksi gabungan. Konstruksi melintang melibatkan penggunaan penguatan utama berupa elemen-elemen seperti gading (*frame*), gading besar (*web frame*), balok geladak (*deck beam*), dan balok besar (*strong beam*). Sedangkan konstruksi gabungan menggabungkan elemen-elemen berdasarkan orientasi memanjang di bagian lambung dengan elemen-elemen berdasarkan orientasi melintang di bagian dasar dan geladak kapal. Konstruksi memanjang adalah konstruksi yang menggunakan penguat memanjang pada seluruh bagian kapal (kecuali kamar mesin) dimana konstruksi jenis ini digunakan pada kapal dengan panjang lebih dari 100 meter.

B. Fracture Mechanics

Fracture Mechanics (Mekanika kepecahan), juga dikenal sebagai ilmu kepecahan, adalah cabang dari mekanika yang mempelajari analisis tegangan dan regangan pada struktur yang mengandung retak. Pendekatan ini dikembangkan sebagai respon terhadap keterbatasan konsep desain konvensional yang hanya bergantung pada sifat-sifat umum material seperti kekuatan tarik, batas elastis (*yield strength*), dan tegangan *buckling*. Konsep-konsep ini paling tepat digunakan pada struktur yang tidak memiliki cacat. Teori kepecahan ini dibagi menjadi dua cabang utama: *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM) dan *Elastic Fracture Mechanics* (EPFM).

C. Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)

Linear elastic fracture mechanic didasarkan pada metode analitik yang menghubungkan luas area tegangan dan distribusi tegangan elastis di sekitar ujung retak dengan tegangan nominal yang terjadi pada area retakan, serta bentuk retak dan sifat-sifat material yang bersangkutan [2]. LEFM dapat digunakan ketika zona plastis sangat terbatas, di mana



Gambar 5. Diagram alir pengerjaan tugas akhir.

tegangan berada di bawah batas elastis material ($\sigma < \sigma_{ys}$) [3]. Biasanya, LEFM diterapkan pada material yang bersifat *brittle* seperti keramik, kaca, atau baja yang memiliki kekuatan tinggi, sehingga zona plastisnya sangat terbatas karena tegangan berada di bawah batas kerja material. Terdapat tiga mode retak seperti ilustrasi Gambar 1.

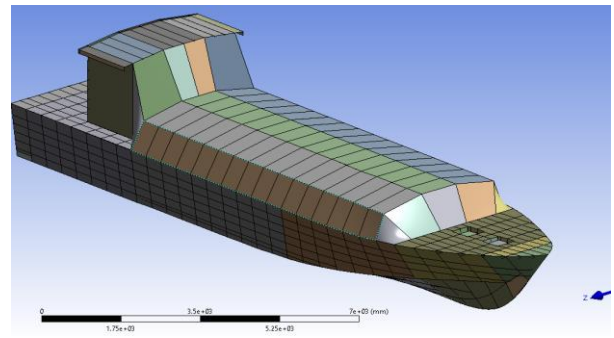
D. *Stress Intensity Facor (SIF)*

Faktor Intensitas Tegangan (*Stress Intensity Factor*) adalah salah satu parameter yang paling mendasar dan berguna dalam mekanika retak. SIF number menggambarkan keadaan tegangan di ujung retak dan terkait dengan laju pertumbuhan retak serta digunakan untuk menetapkan kriteria kegagalan akibat retak. Persamaan untuk Rentang Faktor Intensitas Tegangan (SIF) pada jenis retak *edge crack* ditunjukkan oleh persamaan berikut [2]:

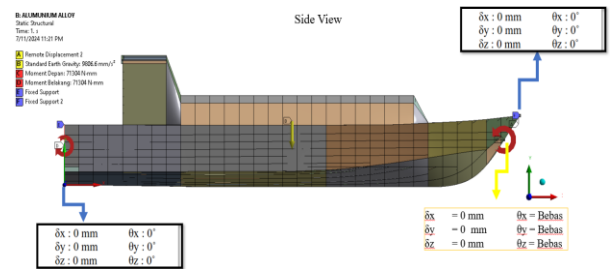
$$\Delta K = 1,12\sigma\sqrt{\pi a} \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}\text{)}$$

Dimana:

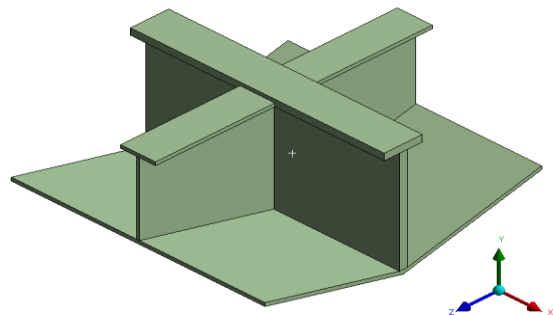
σ : Tegangan Nominal (MPa)



Gambar 2. Model global.



Gambar 3. Kondisi batas dan beban model global.



Gambar 4. Model global.

a : Panjang Retak (m)

E. *Metode Elemen Hingga*

Metode elemen hingga adalah salah satu pendekatan numerik yang menggunakan operasi matriks untuk menyelesaikan masalah-masalah fisik. Metode elemen hingga digunakan untuk mencari solusi dalam masalah bidang rekayasa, terutama ketika perhitungan konvensional sulit dilakukan karena bentuk geometri yang rumit. Prinsip penggunaan metode elemen hingga adalah membagi objek benda menjadi beberapa substruktur yang berhingga dengan proses yang disebut *meshing*. Substruktur tersebut disebut dengan elemen. Elemen-elemen tersebut dihubungkan oleh *nodal* [4].

F. *Fatigue Life*

Kelelahan (*fatigue*) adalah salah satu jenis kegagalan struktur pada komponen akibat beban siklik (berulang-ulang). Struktur harus bisa bertahan dari tegangan yang menyimpannya selama masa operasi, contoh dari beban pada *marine structure* adalah tegangan yang berhubungan dengan beban siklik diakibatkan gelombang [5]. Umur lelah dari suatu material dapat diketahui melalui perhitungan perambatan retak dari persamaan Paris Erdogan. Dengan menguraikannya, dan memasukkan besar retak awal dan retak akhir akan diketahui jumlah batas siklus yang masih

Tabel 1. Momen Bending Kapal pada Kondisi *Hogging* dan *Sagging*

Sagging		Hogging	
Station	Moment (Ton.m)	Station	Moment (Ton.m)
1	0,906	1	1,135
2	2,010	2	1,646
3	2,669	3	2,688
4	3,355	4	3,613
5	4,031	5	4,326
6	4,678	6	4,742
7	5,284	7	4,846
8	5,839	8	4,601
9	6,392	9	3,976
10	6,948	10	3,043
11	7,271	11	2,058
12	6,567	12	1,883
13	5,761	13	1,646
14	4,860	14	1,428
15	3,978	15	1,177
16	3,131	16	0,916
17	2,340	17	0,655
18	1,657	18	0,394
19	1,110	19	0,132
20	0,612	20	0,001
21	0,204	21	0,001
22	0,012	22	0,001

Tabel 2. Hasil Konvergensi Model Global

Ukuran Mesh (mm)	Jumlah Elemen	Normal Stress (MPa)	Difference
75	77407	1,37	
70	87861	1,42	3,0%
65	97949	1,46	3,2%
60	107667	1,23	18,6%
40	237542	1,12	10,0%
35	314467	1,13	0,6%

aman pada suatu struktur yang memiliki retak. Uraian perhitungannya dapat dilihat pada persamaan berikut:

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

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

G. Periode *Ecountered*

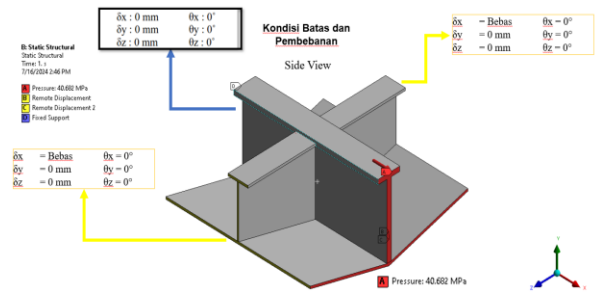
Periode *encountered* dapat didefinisikan sebagai fungsi dari gelombang (T), kecepatan kapal (v) dan sudut *encountered* (μ). Periode *encountered* adalah waktu yang diperlukan suatu kapal untuk bergerak dari satu puncak gelombang ke puncak gelombang lainnya [6]. Periode ini menggambarkan bagaimana kapal berinteraksi dengan gelombang dan dampak yang ditimbulkan oleh interaksi tersebut. Sudut *encountered* (μ) adalah sudut antara arah gelombang dengan lintasan kapal, yang diukur searah jarum jam dari arah gelombang. Perhitungan untuk periode *encountered* dinyatakan pada persamaan berikut:

$$T_e = \frac{Lw}{Vw - V \cos \mu}$$

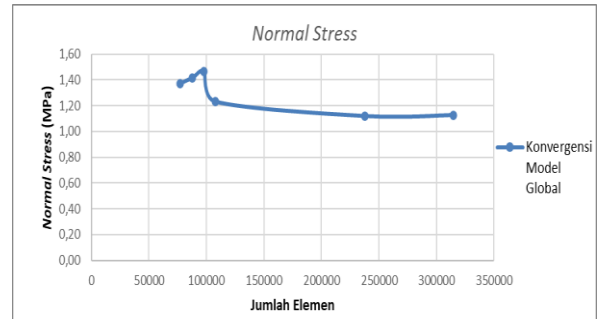
III. METODOLOGI

A. Bagan Alir

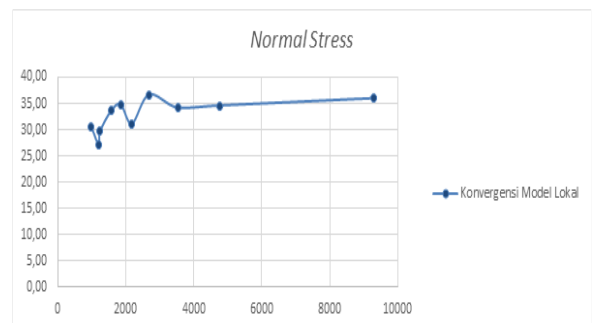
Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis umur lelah pada kapal patroli menggunakan metode elemen hingga. Pemodelan dilakukan menggunakan *software* perhitungan



Gambar 6. Kondisi batas dan pembebanan model lokal.



Gambar 7. Grafik hasil konvergensi model global.



Gambar 8. Grafik hasil konvergensi model lokal.

elemen hingga Secara garis besar dijelaskan pada diagram alir pada Gambar 2.

B. Tahap Pengerjaan

Adapun tahapan-tahapan yang dilalui dalam penelitian ini, yaitu:

1) *Studi Literatur dan Pengumpulan Data*

Pada tahap ini dilakukan studi literatur yang berkaitan dengan teori-teori yang digunakan dalam penulisan penelitian ini, yaitu literatur yang berkaitan dengan kepecahan dan kelelahan yang telah dijabarkan pada Bab 2. Dan juga dilakukan pengumpulan data primer maupun data sekunder penunjang penelitian.

2) *Perhitungan Beban*

Pada penelitian ini analisis kelelahan menggunakan beban hidrodinamis *hogging* dan *sagging* secara siklik atau berulang-ulang. Dan pada penelitian ini difokuskan pada analisis *crack* pada bagian alas kapal. Sehingga, diperlukan perhitungan kekuatan memanjang kapal, untuk mendapatkan momen *bending* kapal saat kondisi *sagging* dan *hogging*. Yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Dan pada penelitian ini digunakan beban siklik gelombang sinusoidal. Maka, untuk mengetahui siklik pada gelombang perlu dihitung periode *encountered*. periode *encountered* merupakan periode yang dibutuhkan oleh gelombang air hingga menyentuh kapal, sehingga beban atau tegangan yang

Tabel 3.

Hasil Konvergensi Model Lokal

Ukuran Mesh (mm)	Jumlah Elemen	Normal Stress (MPa)	Difference
100	991	30,47	
90	1205	27,07	12,6%
80	1246	29,68	-8,8%
70	1569	33,60	-11,7%
60	1850	34,79	-3,4%
50	2178	31,13	11,8%
40	2685	36,70	-15,2%
30	3529	34,18	7,4%
20	4777	34,61	-1,2%
10	9294	36,01	-3,9%

Tabel 4.

Hasil Nilai SIF retak awal 5 mm Material Al 5083

Crack Length (mm)	SIF (MPa√mm)
5	167,23
15	305,32
25	416,68
35	522,91
45	631,18
55	745,91
65	870,96
75	1.010,41
85	1.169,20
95	1.360,05

Tabel 5.

Hasil Nilai SIF retak awal 5 mm Material KI-A

Crack Length (mm)	SIF (MPa√mm)
5	465,49
15	849,84
25	1.159,83
35	1.455,50

bekerja pada kapal didasarkan pada periode *encountered*. Berdasarkan buku Bhattacharya.

3) Analisis Model Global

Pemodelan global yang dilakukan pada analisis model global berupa model kapal utuh yang dapat dilihat pada Gambar 3. Pada penelitian ini, pendefinisian kondisi batas diaplikasikan pada ujung depan dan belakang model. Pada ujung depan dan belakang diberikan kondisi batas *fixed support*. Dan pemberian beban momen *bending* diletakkan pada belakang dan pada ujungb depan diletakkan pada garis air (*forward perpendicular*). Kondisi batas dan pembebanan ditunjukkan pada Gambar 4.

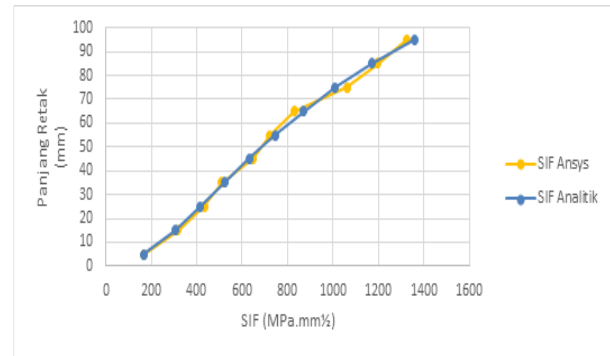
4) Analisis Model Lokal

Pemodelan lokal yang dilakukan pada analisis model lokal berupa model struktur alas kapal yang dapat dilihat pada Gambar 5. Pada model lokal ini kondisi batas yang digunakan ialah *pressure*, *remote displacement*, dan *fixed support*. *Pressure* diberikan pada area ujung depan model atau sumbu-X positif, dengan menggunakan tegangan maksimal yang telah diketahui pada simulasi model global. Kondisi batas *remote displacement* diberikan pada ujung-ujung area kontruksi melintang alas dan plat alas yang terpotong sebagai kondisi yang mendefinisikan bagian lain yang tidak dimodelkan. Kondisi batas *fixed support* diberikan pada area belakang model atau sumbu-X negatif. Berikut kondisi batas dan pembebanan model lokal yang ditunjukkan pada Gambar 6.

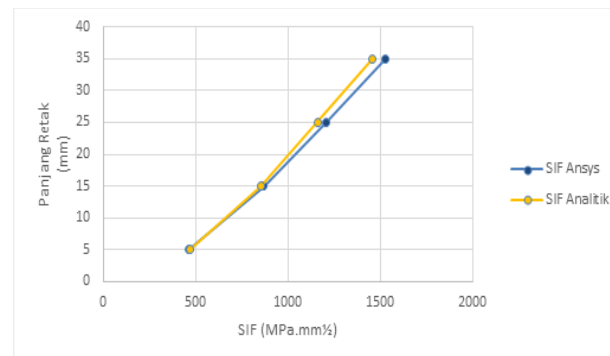
5) Analisis Stress Intensity Factor

Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan nilai intensitas

tegangan (SIF) dengan menggunakan persamaan **Error!**



Gambar 9. Grafik hasil perbandingan nilai sif material Al 5083.



Gambar 10. Grafik hasil perbandingan nilai SIF material KI-A.

Reference source not found.. pada tahap ini juga dilakukan simulasi model lokal dengan retak, yang sudah dibuat pada sub-bab sebelumnya.

6) Verifikasi Nilai SIF Perhitungan dan Simulasi

Pada tahap ini dilakukan verifikasi nilai SIF antara perhitungan menggunakan rumus empiris dan nilai SIF pada simulasi menggunakan *software* elemen hingga

7) Analisis Crack Propagation

Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan laju rambat retak dengan konsep *fracture mechanics*.

8) Perhitungan Umur Kelelahan

Pada tahap akhir ini dilakukan perhitungan umur kelelahan. Umur kelelahan struktur adalah waktu yang dibutuhkan untuk struktur mengalami kegagalan.

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Model Global

Tujuan dari analisis model global adalah mencari tegangan yang terjadi pada kapal saat terjadi *sagging*. Tegangan yang dianalisis adalah tegangan normal maksimum yang terjadi pada sumbu-X atau searah memanjang kapal. Pada analisis ini kapal menggunakan material *aluminium alloy 5083* (Al 5083). Berikut hasil simulasi dan konvergensi model global yang ditunjukkan pada

Tabel 2 dan Gambar 7.

Berdasarkan studi mengenai *grid convergence test* dikatakan bahwa suatu analisis dinilai konvergen apabila hasil analisis memiliki perbedaan 5%. Pada analisis ini, perbedaan antara hasil kedua harus kurang dari 5% dari hasil pertama agar hasil dianggap konvergen [7]. Berdasarkan

Tabel 2 konvergensi didapat pada ukuran 30 mm dengan

Tabel 6.
Hasil Simulasi Nilai SIF Material Al 5083

Crack Length (mm)	SIF ($MPa\sqrt{mm}$)
5	168,51
15	317,93
25	432,95
35	510,6
45	648,01
55	722,07
65	828,12
75	1.060,3
85	1.197,8
95	1.326,3

Tabel 7.
Hasil Simulasi Nilai SIF Material KI-A

Crack Length (mm)	SIF ($MPa\sqrt{mm}$)
5	459,31
15	867,51
25	1.207,9
35	1.527,3

Tabel 8.
Perbandingan Nilai SIF Material Al 5083

Panjang Retak (mm)	SIF Analitik ($MPa\sqrt{mm}$)	SiF Software ($MPa\sqrt{mm}$)	Difference
5	167,23	168,51	-0,76%
15	305,32	317,93	-4,13%
25	416,68	432,95	-3,90%
35	522,91	510,6	2,35%
45	631,18	648,01	-2,67%
55	745,91	722,07	3,20%
65	870,96	828,12	4,92%
75	1.010,41	1.060,3	-4,94%
85	1.169,20	1.197,8	-2,45%
95	1.360,05	1.326,3	2,48%

Tabel 9.
Perbandingan Nilai SIF Material KI-A

Panjang Retak (mm)	SIF Analitik ($MPa\sqrt{mm}$)	SiF Software ($MPa\sqrt{mm}$)	Difference
5	465,49	459,31	1,33%
15	849,84	867,51	-2,08%
25	1.159,83	1.207,9	-4,14%
35	1.455,50	1.527,3	-4,93%

perbedaan terkecil yaitu 0.6%. Tegangan normal maksimum yang didapat sebesar 36.742 MPa. Tegangan tersebut menjadi beban pada model lokal. Dan pada model kapal berbahan BKI Grade A (KI-A) dilakukan simulasi yang sama dengan ukuran mesh 30 mm. Tegangan normal maksimum yang didapat sebesar 102.27 MPa.

B. Analisis Model Lokal

Analisis model lokal dilakukan untuk mendapatkan ukuran mesh yang akan digunakan pada analisis model retak. Maka, pada analisis model lokal dilakukan konvergensi dengan kondisi batas dan pembebanan yang sama dengan Sub-Bab sebelumnya. Konvergensi dilakukan pada model lokal dengan material *aluminium alloy* 5083. Berikut hasil konvergensi model lokal yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 8. Dari hasil simulasi konvergensi model lokal didapatkan pada Tabel 3 ukuran mesh konvergen pada ukuran 20 mm, karena pada ukuran tersebut didapat perbedaan mesh terkecil yaitu 1,2%

Tabel 10.
Hasil Perhitungan Perambatan Retak pada Material Al 5083

a_0 (in)	a_f (in)	ΔK avg ($MPa\sqrt{m}$)	ΔK avg ($Ksi\sqrt{in}$)	da/dN (in/cycles)
0,197	0,591	7,691	6,999	4,306E-08
0,591	0,984	11,872	10,805	1,098E-07
0,984	1,378	14,919	13,577	1,796E-07
1,378	1,772	18,319	16,671	2,796E-07
1,772	2,165	21,663	19,714	4,014E-07
2,165	2,559	24,511	22,306	5,238E-07
2,559	2,953	29,859	27,173	8,016E-07
2,953	3,346	35,704	32,492	1,179E-06
3,346	3,740	39,910	36,320	1,498E-06

Tabel 11.
Hasil Perhitungan Perambatan Retak pada Material KI-A

a_0 (in)	a_f (in)	ΔK avg ($MPa\sqrt{m}$)	ΔK avg ($Ksi\sqrt{in}$)	da/dN (in/cycles)
0,197	0,591	20,979	19,092	2,5052E-06
0,591	0,984	32,815	29,863	9,5878E-06
0,984	1,378	43,247	39,357	2,1947E-05

Tabel 12.
Hasil Perhitungan Cycles pada Material Al 5083

a_0 (in)	a_f (in)	ΔK avg ($Ksi\sqrt{in}$)	da/dN (in/cycles)	ΔN (Cycles)
0,197	0,591	6,999	4,306E-08	9,143,948
0,591	0,984	10,805	1,098E-07	3,586,547
0,984	1,378	13,577	1,796E-07	2,191,963
1,378	1,772	16,671	2,796E-07	1,407,977
1,772	2,165	19,714	4,014E-07	980,922
2,165	2,559	22,306	5,238E-07	751,622
2,559	2,953	27,173	8,016E-07	491,154
2,953	3,346	32,492	1,179E-06	334,066
3,346	3,740	36,320	1,498E-06	262,767
ΣN				19,150,966

C. Analisis Stress Intensity Factor

1) *Perhitungan Stress Intensity Factor Analitik*

Perhitungan nilai SIF teori dilakukan dengan menggunakan persamaan empiris berdasarkan buku milik Barsom dan Rolfe yang berjudul *Fracture and Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*. Perhitungan SIF dilakukan dengan Panjang retak awal 5 mm dan akan memanjang 10mm setiap penambahan retak. Berikut hasil perhitungan Nilai SIF yang ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5. Berdasarkan hasil perhitungan nilai SIF dengan menggunakan rumus empiris yang didapat pada Tabel 4, didapatkan nilai SIF pada material *aluminium alloy* 5083 terbesar adalah 1.360,05 $MPa\sqrt{mm}$. Pada perhitungan nilai SIF menggunakan rumus empiris material KI-A yang dapat dilihat pada Tabel 5, nilai SIF terbesar adalah 1.455,50 $MPa\sqrt{mm}$.

2) *Perhitungan Stress Intensity Factor software*

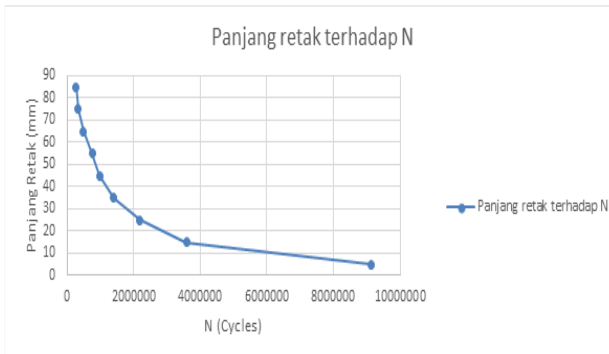
Selanjutnya, adalah simulasi menggunakan *software* elemen hingga pada model lokal dengan retak. Dari simulasi tersebut diperoleh hasil yang ditunjukkan pada Tabel 6 dan

Tabel 7. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software* nilai SIF yang didapat pada Tabel 6, didapatkan nilai SIF pada model lokal retak menggunakan material *aluminium alloy* 5083 terbesar adalah 1.326,3 $MPa\sqrt{mm}$. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software* nilai SIF model lokal dengan retak material KI-A yang dapat dilihat pada Tabel 7 nilai SIF terbesar adalah 1.527,3 $MPa\sqrt{mm}$.

D. Verifikasi Nilai SIF Perhitungan dan Simulasi

Pada penelitian ini dilakukan verifikasi nilai SIF dengan

membandingkan hasil perhitungan SIF analitik dengan hasil perhitungan nilai SIF menggunakan *software* yang sudah didapat. Berikut hasil perbandingan nilai SIF Analitik dengan nilai SIF menggunakan *software* menggunakan material Al 5083 yang ditunjukkan pada Tabel 8 dan Gambar 9.



Gambar 11. Grafik *cycles* pada material Al 5083.



Gambar 12. Grafik umur lelah pada material Al 5083.

Tabel 13. Hasil Perhitungan *Cycles* pada Material KI-A

a_0 (in)	a_f (in)	ΔK_{avg} (Ksi \sqrt{in})	da/dn (in/cycles)	ΔN (Cycles)
0,197	0,591	19,092	2,5052E-06	157.154
0,591	0,984	29,863	9,5878E-06	41.063
0,984	1,378	39,357	2,1947E-05	17.939
ΣN				216.155,57

Perhitungan dengan rumus empiris dan menggunakan elemen hingga memiliki nilai perbandingan sebesar kurang lebih 5% [8]. Berdasarkan hasil perbandingan nilai faktor intensitas tegangan pada model lokal dengan retak menggunakan material *aluminium alloy* 5083 yang ditunjukkan oleh

Tabel 8. Didapatkan selisih terendah sebesar 0,76% dan selisih terbesar 4,92%. Selanjutnya dilakukan perbandingan nilai SIF Analitik dan nilai SIF *software* pada material KI-A yang ditunjukkan pada

Tabel 9 dan Gambar 10.

Berdasarkan

Tabel 9 hasil perbandingan nilai faktor intensitas tegangan pada model lokal dengan retak menggunakan material KI-A yang ditunjukkan oleh. Didapatkan selisih terendah sebesar 1,33% dan selisih terbesar 4,93%.

E. Analisis Crack Propagation

Pada perhitungan laju perambatan retak terlebih dahulu dihitung ΔK_{avg} sebagai nilai SIF rata-rata dari pertambahan panjang retak. Berikut hasil perhitungan laju perambatan retak pada material *aluminium alloy* 5083 yang ditunjukkan

pada Tabel 10.

Berdasarkan hasil perhitungan perambatan retak yang didapat pada Tabel 10, diketahui bahwa semakin panjang retak yang terjadi, maka laju perambatan retak akan semakin besar atau cepat. Selanjutnya dilakukan perhitungan perambatan retak pada material KI-A yang ditunjukkan pada

Tabel 14. Hasil Perhitungan Umur Lelah Struktur pada Al 5083

a_0 (in)	a_f (in)	ΔK_{avg} (Ksi \sqrt{in})	da/dN (in/cycles)	ΔN (Cycles)	T_e	Umur (Hari)
0,197	0,591	6,999	4,306E-08	9.143.948	1,223	129,48
0,591	0,984	10,805	1,098E-07	3.586.547	1,223	50,79
0,984	1,378	13,577	1,796E-07	2.191.963	1,223	31,04
1,378	1,772	16,671	2,796E-07	1.407.977	1,223	19,94
1,772	2,165	19,714	4,014E-07	980.922	1,223	13,89
2,165	2,559	22,306	5,238E-07	751.622	1,223	10,64
2,559	2,953	27,173	8,016E-07	491.154	1,223	6,95
2,953	3,346	32,492	1,179E-06	334.066	1,223	4,73
3,346	3,740	36,320	1,498E-06	262.767	1,223	3,72
Σ Umur (Hari)						271,18

Tabel 15. Hasil Perhitungan Umur Lelah Struktur pada Material KI-A

a_0 (in)	a_f (in)	ΔK_{avg} (Ksi \sqrt{in})	da/dN (in/cycles)	ΔN (Cycles)	T_e	Umur (Hari)
0,197	0,591	19,092	2,5052E-06	157.154	1,22	2,23
0,591	0,984	29,863	9,5878E-06	41.063	1,22	0,58
0,984	1,378	39,357	2,1947E-05	17.939	1,22	0,25
Σ Umur (Hari)						3,06

Tabel 11.

F. Perhitungan Umur Lelah

Perhitungan umur kelelahan 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.** Perhitungan umur kelelahan dilakukan pada setiap penambahan panjang retak hingga mencapai atau melewati K_{Ic} . Berikut hasil perhitungan *cycles* pada material *aluminium alloy* 5083 yang ditunjukkan pada Tabel 12 dan Gambar 11.

Berdasarkan Tabel 12 perhitungan *cycles* pada model lokal dengan retak menggunakan material *aluminium alloy* 5083 yang didapat sesuai dengan pernyataan Hukum Paris-Erdogan yang menyatakan bahwa semakin panjang retak, maka laju perambatan retak yang terjadi akan semakin besar, dan akan semakin sedikit *cycles* yang diperlukan agar retak bisa menjalar. didapatkan hasil *cycles* yang dibutuhkan untuk struktur mengalami *fracture* yaitu sebesar 19.150.966 *cycles*. Selanjutnya dilakukan perhitungan *cycle* pada model lokal dengan retak menggunakan material KI-A. Berikut hasil perhitungan *cycles* KI-A yang ditunjukkan pada Tabel 13. Berdasarkan Tabel 13 perhitungan *cycles* pada model lokal dengan retak menggunakan material *aluminium alloy* 5083 didapatkan hasil *cycles* yang dibutuhkan untuk struktur mengalami *fracture* yaitu sebesar 216.155,57 *cycles*.

Perhitungan umur kelelahan dilakukan dengan mengalikan *cycles* dan T_e , maka akan didapatkan hasil umur kelelahan dengan satuan detik. Berikut hasil perhitungan umur kelelahan struktur menggunakan material *aluminium alloy* 5083 yang ditunjukkan pada Tabel 14 dan Gambar 12.

Berdasarkan Tabel 14 hasil yang didapat pada diketahui umur lelah model lokal menggunakan material *aluminium alloy* 5083 pada panjang retakan awal 5 mm didapatkan umur

lelah selama 271,18 hari. Selanjutnya dilakukan perhitungan umur lelah pada model lokal menggunakan material KI-A. Berikut hasil perhitungan umur lelah yang ditunjukkan pada Tabel 15. Berdasarkan Tabel 15 didapatkan hasil umur lelah struktur menggunakan material KI-A selama 3,06 hari.

V. KESIMPULAN

Setelah dilakukan simulasi menggunakan *software* elemen hingga dan perhitungan numerik, maka, kesimpulan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut: besaran nilai faktor intensitas tegangan yang terjadi akibat retakan awal pada struktur alas kapal menggunakan material *aluminium alloy* 5083 yaitu sebesar $168,51 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Untuk variasi kapal menggunakan material KI-A didapatkan faktor intensitas tegangan sebesar $459,31 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Umur lelah dari struktur alas kapal menggunakan material *aluminium alloy* 5083 didapat selama 271,18 hari. Untuk variasi kapal menggunakan material KI-A didapatkan umur lelah selama 3,06 hari.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Faulkner, "An analytical assessment of the sinking of the M.V. Derbyshire," *J. Sh. Ocean Technol.*, vol. 6, no. 4, 2002.
- [2] J. Barsom and S. Rolfe, *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*, 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. ISBN: 978-0750673150.
- [3] D. Broek, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, 3rd ed. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 2012. ISBN: 978-94-010-8425-3.
- [4] 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.
- [5] E. Setiahadi, "Analisa Fatigue Life Graving Dock Gate dengan Metode Simplified," Departemen Teknik Perkapalan: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [6] R. Bhattacharyya, *Dynamics of Marine Vehicles*. New York: John Wiley & Sons, 1978. ISBN: 978-0471072065.
- [7] H. Schmidt, T. Alber, T. Wehner, R. Blakytyn, and H.-J. Wilke, "Discretization error when using finite element models: Analysis and evaluation of an underestimated problem," *J. Biomech.*, vol. 42, no. 12, pp. 1926--1934, 2009.
- [8] J. a Newman Jr and I. Raju, "An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 15, no. 1, 1981.