

Pengaruh Perambatan Retak Pada Bracket Kantilever Terhadap Umur Lelah Konstruksi Kapal

Andika Wahyu Ganesha, Achmad Zubaydi, dan Septia Hardy Sujiatanti
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: zubaydi@na.its.ac.id

Abstrak—Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perambatan retak pada bracket kantilever terhadap umur lelah konstruksi kapal. Kelelahan struktural adalah salah satu penyebab utama kerusakan pada kapal, yang diakibatkan oleh beban dinamis dari gelombang laut dan aktivitas operasional sehari-hari. Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis*) untuk memodelkan dan mensimulasikan perambatan retak pada *bracket* kantilever. Data kapal yang digunakan adalah dari kapal *General Cargo 8800 DWT*. Analisis dilakukan dengan memodelkan kantilever dan melakukan perhitungan *stress intensity factor* (SIF) serta laju perambatan retak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai SIF meningkat seiring bertambahnya panjang retak dan telah melebihi nilai *fracture toughness* pada panjang retak 40 mm dengan nilai SIF 1693,00 MPa $\sqrt{\text{mm}}$, yang mengindikasikan kegagalan struktur. Umur lelah dari perambatan retak pada bracket kantilever adalah 102,545 hari ketika mencapai panjang retak 40 mm, di mana perambatan retak setelah *initial crack* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap umur lelah struktur, yaitu selama 64,114 hari.

Kata Kunci— Perambatan retak, Bracket kantilever, Umur lelah, Konstruksi kapal, *Finite Element Analysis* (FEA), *Stress Intensity Factor* (SIF)

I. PENDAHULUAN

STRUKTUR kapal merupakan komponen vital dalam memastikan kelayakan operasional dan keselamatan navigasi kapal. Kerusakan pada struktur kapal dapat berdampak signifikan terhadap performa dan keamanan operasional kapal. Faktor-faktor yang menyebabkan kerusakan ini bervariasi, mulai dari kelelahan struktural, benturan, korosi, hingga cacat produksi. Kelelahan struktural merupakan salah satu penyebab utama kerusakan struktur kapal, terutama pada kapal-kapal yang beroperasi di lingkungan laut. Beban dinamis yang terus-menerus dari gelombang laut dan aktivitas kapal sehari-hari menyebabkan kelelahan material, yang mengakibatkan terbentuknya retakan kecil yang lama kelamaan dapat berkembang menjadi kerusakan besar. Penanganan kelelahan struktural yang tidak memadai dapat mengakibatkan kegagalan struktural yang serius.

Ketika suatu struktur mencapai batas umur kelelahan, keretakan mulai terjadi melalui beberapa tahapan. Proses ini dimulai dengan inisiasi retak, di mana tegangan berulang menyebabkan deformasi permanen pada mikrostruktur material dan munculnya retakan kecil di permukaan atau di sekitar cacat material seperti inklusi atau goresan. Tahap berikutnya adalah penjalaran retak stabil, di mana retakan tersebut mulai memanjang dengan kecepatan yang relatif lambat dan teratur. Setelah itu, terjadi *fast fracture*, yaitu fase di mana retakan menyebar dengan sangat cepat akibat peningkatan tegangan lokal, yang akhirnya menyebabkan patahnya struktur. Kegagalan struktural pada kapal sering

terjadi di area-area kritis seperti hatch coaming, deck, bracket, penegar longitudinal dan transversal, side shell, serta bulkhead. Area-area ini lebih rentan terhadap kerusakan karena menerima beban dinamis dan tegangan tinggi selama operasi kapal.

Kantilever adalah salah satu struktur yang sering menerima beban terus-menerus, sehingga rentan mengalami keretakan. Keberadaan retak pada satu kantilever dapat menyebabkan kegagalan struktur yang signifikan, oleh karena itu perlu dilakukan penanganan khusus untuk mengatasi masalah keretakan ini. Salah satu pendekatannya adalah dengan menghitung laju penjalaran retak material kapal guna menentukan umur strukturnya, sesuai dengan peraturan yang telah ditetapkan oleh biro klasifikasi. Dalam penelitian ini, fokusnya adalah menganalisa laju perambatan retak pada bracket kantilever, karena bracket kantilever dianggap sebagai salah satu penopang yang esensial. Penelitian ini dilakukan untuk memahami bagaimana retakan berkembang pada bracket kantilever dan bagaimana proses ini mempengaruhi kekuatan keseluruhan struktur, sehingga dapat diterapkan langkah-langkah pencegahan dan perawatan yang tepat.

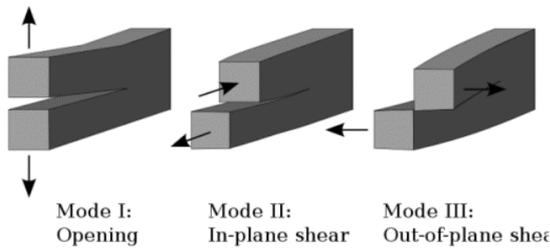
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Konstruksi Kapal

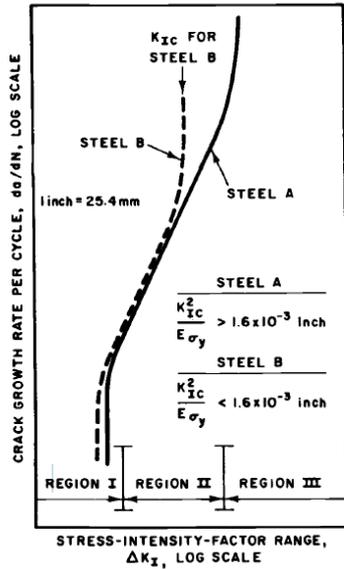
Dalam industri perkapalan, konstruksi kapal terdiri dari badan kapal dan bangunan atas, yang diklasifikasikan menjadi konstruksi melintang, memanjang, dan kombinasi [1]. Pada konstruksi melintang, frame dipasang vertikal dengan geladak didukung oleh deck beam, serta wrang dipasang pada alas dengan jarak yang sama dengan frame. Dalam konstruksi memanjang, web frame dipasang membujur pada sisi kapal, dengan bottom dan inner bottom longitudinal pada alas, serta deck longitudinal pada geladak. Konstruksi kombinasi menggabungkan elemen melintang dan memanjang: geladak dan alas mengikuti prinsip memanjang, sementara sisi kapal mengikuti prinsip melintang. Kombinasi ini memperkuat sisi badan kapal dengan prinsip melintang dan alas serta geladak dengan prinsip memanjang, menciptakan struktur kapal yang lebih kokoh dan efisien.

B. Kantilever

Kantilever adalah elemen struktur kaku yang memanjang secara horizontal dengan satu ujung tidak ditopang, biasanya dilekatkan pada permukaan vertikal seperti dinding [2]. Dalam konstruksi kapal, kantilever digunakan untuk menggantikan penopang (*pillar*) dalam ruangan, menciptakan ruang yang lebih luas dan ergonomis. Kantilever, dengan satu ujung terkunci dan satu ujung bebas, mendukung geladak, muatan, atau ruang kapal, dan dapat terbuat dari baja, baja



Gambar 1. Mode perambatan retak.

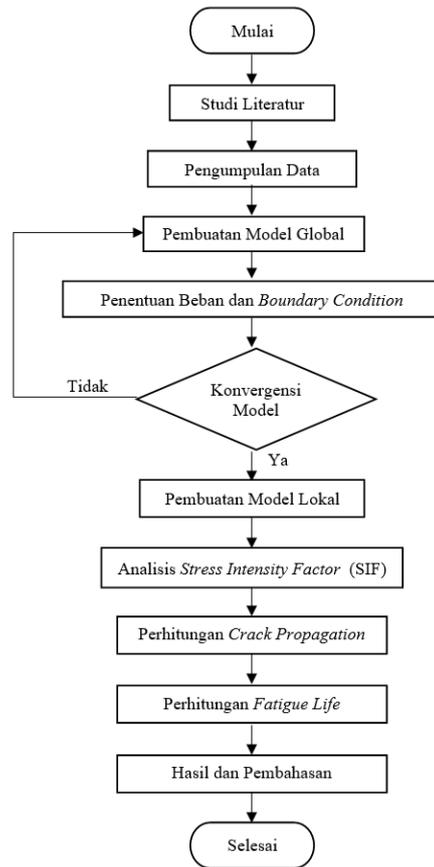


Gambar 2. Kurva karakteristik crack growth rate.

alloy, atau baja karbon. Penggantian pillar dengan kantilever dapat diterapkan pada berbagai bagian kapal seperti bagian atas kapal, ruang palka, casing mesin, dan ruangan lain dengan lubang bukaan. Konstruksi kantilever berfungsi serupa dengan pelintang balok pada kapal, tetapi berbeda dalam perencanaan dan bentuk konstruksinya. Kantilever menahan momen lentur dari beban pada kapal, mendukung pemasangan girder, hatchway coaming, dan engine casing, tetapi tidak mendukung bagian deck yang terhubung pada balok geladak, gading utama, gading besar, dan kulit kapal.

C. Fracture Mechanics

Fracture Mechanics, atau Mekanika Kepecahan, adalah cabang mekanika yang berfokus pada analisis tegangan dan regangan pada struktur yang memiliki retakan. Ilmu ini muncul sebagai tanggapan terhadap keterbatasan pendekatan desain konvensional, yang umumnya hanya mempertimbangkan sifat-sifat material seperti kekuatan 78sotr, batas elastis, dan tegangan buckling. Pendekatan tradisional ini lebih cocok untuk struktur yang tidak memiliki cacat atau keretakan. Dalam mekanika kepecahan, terdapat dua cabang utama: Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) dan Elastic-Plastic Fracture Mechanics (EPFM). LEFM mengkaji perilaku retakan dalam bahan yang berperilaku elastis linier di bawah tegangan, sementara EPFM mengkaji perilaku retakan dalam bahan yang mengalami deformasi plastis selain elastisitas. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih akurat dan relevan pada struktur yang memiliki keretakan atau cacat, sehingga dapat digunakan untuk merancang struktur yang lebih aman dan andal.



Gambar 3. Diagram alir.

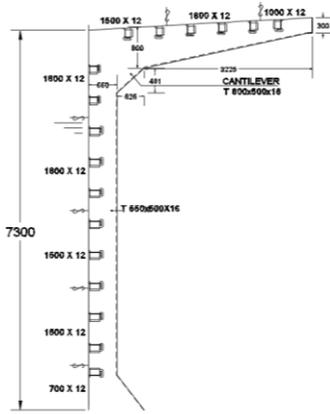
D. Linear Elastic Fracture Mechanic (LEFM)

Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) biasanya diterapkan pada material yang rapuh seperti keramik, kaca, atau baja berkekuatan tinggi. Material-material ini memiliki zona plastis yang sangat kecil karena tegangan yang diterapkan berada di bawah batas elastisitas material. Pendekatan ini, yang dikenal sebagai pendekatan elastis-linier, sangat sesuai untuk material 78sotropic. Material 78sotropic adalah material yang menunjukkan sifat yang sama di semua arah ketika dikenakan beban. Terdapat tiga tipe pembebanan dimana biasa terjadi retak yang dapat dilihat pada Gambar 1. Tiga mode retak tersebut yaitu:

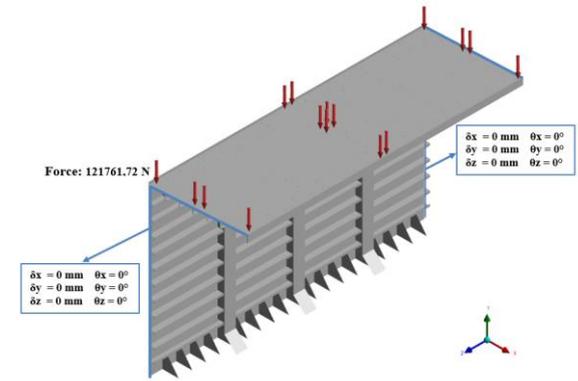
1. Mode 1 (opening crack)
2. Mode 2 (sliding crack)
3. Mode 3 (tearing crack)

E. Stress Intensity Factor (SIF)

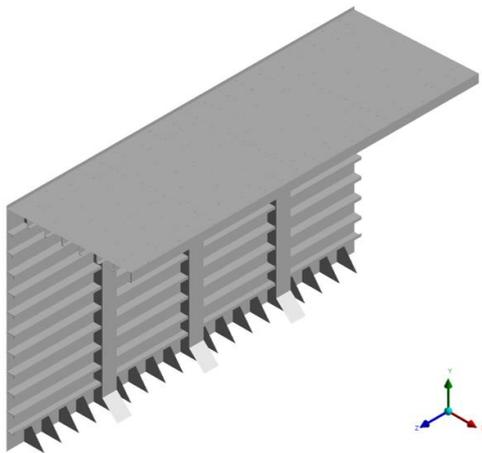
Stress Intensity Factor (SIF) adalah konsep fundamental dalam mekanika patahan yang digunakan untuk memprediksi keadaan tegangan di dekat ujung retak atau celah akibat beban atau tegangan sisa. SIF merupakan parameter penting yang membantu dalam mengkarakterisasi distribusi tegangan di sekitar ujung retak, yang mempengaruhi pertumbuhan retak dan kegagalan material. Konsep ini diterapkan pada material homogen dan elastis linier, yang berarti material tersebut diasumsikan memiliki sifat seragam dan mengikuti hukum elastisitas Hooke. Dalam material rapuh, seperti kaca atau keramik, SIF sangat berguna untuk menentukan kriteria kegagalan, memungkinkan insinyur memprediksi kapan dan di mana material akan patah berdasarkan ukuran dan bentuk retak serta beban yang diterapkan. [3]. SIF menggambarkan



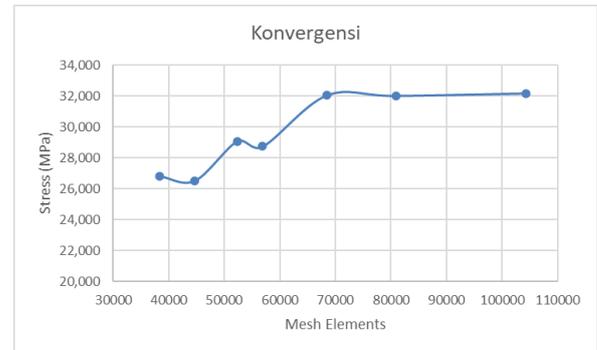
Gambar 4. Desain kantilever.



Gambar 6. Pengaplikasian beban dan kondisi batas.



Gambar 5. Desain 3D model katilever.



Gambar 7. Grafik hasil konvergensi.

keadaan tegangan di ujung retak, terkait dengan laju pertumbuhan retak, dan digunakan untuk menetapkan kriteria kegagalan akibat retak. *Stress Intensity Factor* (SIF) dapat dihitung dengan Persamaan (1).

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

Dimana:

σ : Tegangan Nominal (MPa)

a : Panjang Retak (m)

F. Crack Propagation

Crack propagation, atau penyebaran retak, adalah proses di mana retakan dalam material memanjang sebagai respons terhadap tegangan atau beban yang diterimanya. Proses ini merupakan bidang utama dalam mekanika patahan, yang bertujuan untuk memahami bagaimana dan mengapa material mengalami patahan serta bagaimana retakan berkembang dari waktu ke waktu. Mekanika patahan melibatkan penggunaan metode analitis dan eksperimental untuk menghitung gaya pendorong pada retak dan mengkarakterisasi resistensi material terhadap patahan. Metode analitis melibatkan penggunaan persamaan matematis dan model untuk memprediksi perilaku retakan, sementara metode eksperimental melibatkan pengujian material secara langsung untuk mengamati bagaimana retakan berkembang di bawah kondisi tertentu [4].Pembebanan siklik menghasilkan intensitas tegangan siklik (ΔK) yang dapat memulai dan menyebarkan retak. Kurva laju pertumbuhan retak (da/dn) terhadap ΔK menggambarkan tiga zona perambatan retak:

Zona I (pertumbuhan retak lambat di dekat ambang batas; di bawah nilai ambang ΔK_{th} , tidak ada pertumbuhan retak), Zona II (pertumbuhan retak linear dengan laju tetap), dan Zona III (pertumbuhan retak tidak stabil hingga retak akhir) [5]. Kurva karakteristik *crack* tertera pada Gambar 2.

G. Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan masalah matematika fisik dan rekayasa, termasuk analisis struktur, transfer panas, aliran fluida, perpindahan massa, dan potensial elektromagnetik. Metode ini bekerja dengan membagi sistem struktural menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung melalui hubungan nodal [6]. Fungsi polinomial digunakan untuk menentukan variasi perpindahan dalam setiap elemen. Metode elemen hingga dapat digunakan untuk analisis struktural, seperti analisis tegangan, analisis frame, konsentrasi tegangan, buckling, dan analisis getaran, serta analisis non-struktural, seperti perpindahan panas, aliran fluida, dan distribusi medan magnetik dan listrik [7].

H. Fatigue Life

Kelelahan (*fatigue*) adalah bentuk kegagalan struktural pada komponen yang disebabkan oleh beban siklik yang berulang [8]. Diperkirakan bahwa sekitar 50% hingga 90% dari kegagalan mekanis disebabkan oleh kelelahan. Kelelahan terjadi karena tiga faktor pokok, yaitu: tegangan tarik maksimum yang signifikan, variasi atau fluktuasi tegangan yang cukup besar, dan siklus penerapan tegangan yang cukup berulang [9].Jika kelelahan terjadi secara terus menerus, maka struktur dapat mengalami patah (*fracture*). Kepatahan (*fracture*) adalah pemisahan atau pemecahan suatu benda padat menjadi dua bagian atau lebih [1]. Proses terjadinya kepatahan terdiri dari tiga tahap, yaitu pertama timbulnya retak awal (*initial crack*), penjalaran retak (*crack*

Tabel 1.
Ukuran Profil Kantilever

Kantilever	
x = 0.25	T = 500 x 300 x 16
x = 0.5	T = 500 x 500 x 16
x = 0.75	T = 500 x 800 x 16
x = 1	T = 500 x 1250 x 20

Tabel 2.
Berat Kontainer

Berat Kontainer		
Berat Kosong =	2200	kg
Kapasitas Muatan =	28280	kg
80% Muatan =	22624	kg
Berat Total =	24824	kg
=	243523	N

Tabel 3.
Hasil Konvergensi

Mesh Size	Mesh Nodes	Mesh Elements	Stress(MPa)	Margin
45	105130	104376	32,174	
50	81578	80874	32,011	0,5%
55	69093	68431	32,043	0,1%
60	57458	56895	28,745	10,3%
65	52722	52309	29,087	1,2%
70	45129	44677	26,539	8,8%
75	38788	38383	26,827	1,1%

Tabel 4.
Hasil Nilai SIF

Panjang Crack (mm)	SIF (Mpa.mm ^{0.5})
10	190,61
20	561,34
30	1068,80
40	1693,00
50	2373,80

propagation), dan final fracture.

$$\int_{a_0}^{af} dN = \int_{a_0}^{af} \frac{da}{C(\Delta K)^n} \quad (cycles) \quad (2)$$

$$N = \int_{a_0}^{af} \frac{da}{C(\Delta K)^n} \quad (cycles) \quad (3)$$

III. METODOLOGI

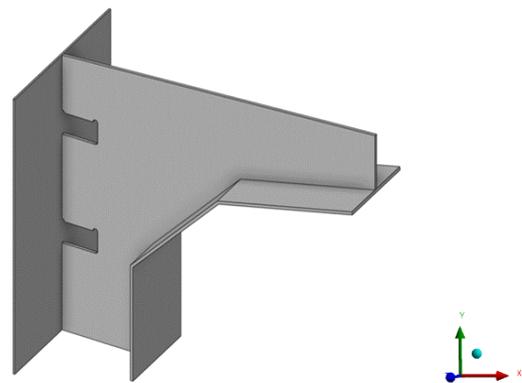
Penelitian ini akan menganalisis crack propagation pada kantilever kapal dan membandingkan radius sudut kantilever menggunakan metode elemen hingga. Model dan simulasi akan dibuat menggunakan perangkat lunak analisis elemen hingga. Proses penelitian secara umum dijelaskan dalam diagram alir pada Gambar 3.

A. Studi Literatur

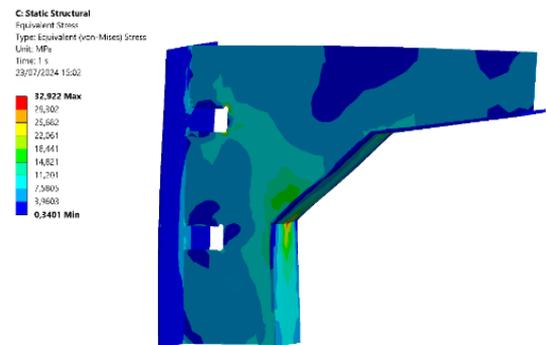
Tahap studi literatur merupakan tahap awal dalam pengerjaan penelitian ini dimana di tahap ini dilakukan pencarian literatur yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur yang akan digunakan bersumber dari jurnal lokal serta internasional, dan juga bersumber dari penelitian yang pernah dikaji sebelumnya. Literatur ini digunakan sebagai acuan serta referensi dalam pengerjaan penelitian ini, serta guna lebih memahami analisa permasalahan dalam pengerjaan penelitian ini.

B. Pengumpulan Data

Pada tahap pengumpulan data dilakukan pencarian data untuk memperoleh informasi yang diperlukan selama tahap pengerjaan penelitian ini. Data kapal yang digunakan dalam penelitian ini adalah data kapal General Cargo 8800 DWT



Gambar 8. Model lokal.



Gambar 9. Tegangan model lokal.

yang sudah terdapat gambar desain konstruksinya. Data kapal yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini meliputi.

C. Pemodelan FEA

Model yang akan digunakan dalam analisis ini adalah model kantilever yang pada kapal General Cargo 8800 DWT yang akan dimodifikasi sesuai dengan model yang ingin dianalisis dengan menghilangkan tween deck pada model dan dilakukan perhitungan untuk mendapatkan ukuran kantilever yang sesuai.

Setelah dilakukan perhitungan didapat ukuran konstruksi kantilever seperti pada Tabel 1 dan juga gambar teknik untuk model kantilever yang dapat dilihat pada Gambar 4. Setelah menentukan ukuran desain yang akan digunakan sesuai, kemudian dilakukan pembuatan model 3D yang nantinya akan digunakan sebagai model yang akan dianalisa. Pembuatan model 3D dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak analisis elemen hingga yang nantinya juga akan digunakan sebagai software untuk analisa model. Untuk model 3D dapat dilihat pada Gambar 5.

D. Penentuan Beban dan Kondisi Batas

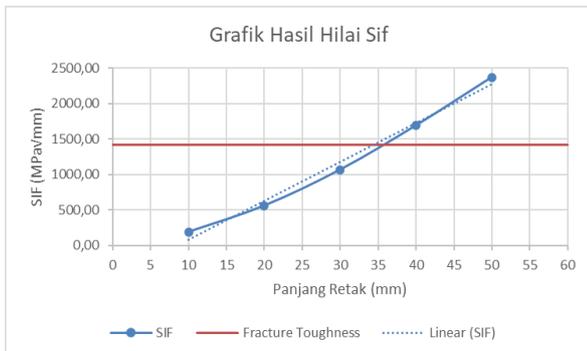
Pada tahap ini, dilakukan penentuan kondisi batas untuk setiap model, termasuk pendefinisian beban yang diterima oleh model tersebut Pada simulasi yang akan dilakukan ini, beban yang akan digunakan adalah kontainer 20ft dengan dimensi dan juga berat yang tertera pada Tabel 2. Kondisi batas yang akan digunakan pada adalah pressure, dan fixed support. Pressure diberikan pada main deck model atau sumbu-Y negatif, dengan menggunakan pressure dari beban yang digunakan. Kondisi batas fixed support diberikan pada area depan dan belakang model. Berikut kondisi batas dan pembebanan model yang ditunjukkan oleh Gambar 6.

Tabel 5.
Hasil Perhitungan Perambatan Retak

a0 (m)	af (m)	a0 (in)	af (in)	ΔK (Ksi. $\sqrt{\text{in}}$)
0,01	0,02	0,394	0,787	370,730
0,02	0,03	0,787	1,181	507,460
0,03	0,04	1,181	1,575	624,200

Tabel 6.
Hasil Perhitungan Cycles Model Tanpa Radius

a0 (m)	af (m)	ΔK (Ksi. $\sqrt{\text{in}}$)	da/dn (in/cycles)	ΔN (Cycles)
0,01	0,02	10,669	4,372E-07	900533,647
0,02	0,03	14,604	1,121E-06	351129,803
0,03	0,04	17,963	2,087E-06	188669,564
a0=0,01 sampai af=0,04				1440333,013



Gambar 10. Grafik hasil nilai SIF.

E. Konvergensi

Metode elemen hingga adalah teknik perhitungan numeris yang memberikan nilai pendekatan dari hasil yang sebenarnya. Semakin kecil ukuran elemen, hasil yang diperoleh akan bervariasi secara bertahap. Pendekatan perhitungan ini akan menghasilkan nilai yang mendekati hasil sebenarnya ketika kualitas mesh meningkat dan jumlah elemen yang dibentuk semakin banyak dengan ukuran yang lebih kecil [2]. Berdasarkan hasil analisis konvergensi, ditemukan bahwa elemen dengan ukuran 50 mm telah mencapai kondisi konvergensi dengan jumlah elemen sebanyak 80874 dan nilai tegangan *equivalent* (*von-mises*) yang dihasilkan adalah sebesar 32,011 Mpa dengan margin sebesar 0,5%. Dengan demikian, ukuran elemen 50 mm dapat dianggap sebagai ukuran yang optimal untuk digunakan dalam analisis lebih lanjut. Untuk Hasil yang lebih detail dapat dilihat pada Gambar 7. Tabel 3 menunjukkan hasil konvergensi.

F. Model Lokal

Model lokal dalam perangkat lunak analisis elemen hingga dibuat untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi komputasi dalam analisis struktur. Dengan teknik ini, model global yang besar dapat disederhanakan dengan membuat model lebih rinci di area tertentu yang memerlukan perhatian khusus, seperti area dengan konsentrasi tegangan atau deformasi tinggi. Model lokal yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 8.

G. Analisis Stress Intensity Factor

Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan nilai intensitas tegangan (SIF) dengan menggunakan persamaan (2). pada tahap ini juga dilakukan simulasi model lokal dengan retak, yang sudah dibuat pada sub-bab sebelumnya Pada tahap ini juga dilakukan simulasi model retak dengan pembuatan



Gambar 11. Grafik umur lelah.

Tabel 7.
Hasil Perhitungan Umur Lelah

a0 (m)	af (m)	ΔK (Ksi. $\sqrt{\text{in}}$)	ΔN (Cycles)	Te	Umur (Detik)	Umur (Hari)
0,01	0,02	10,669	900533,647	6,15	5,5E+06	64,114
0,02	0,03	14,604	351129,803	6,15	2,1E+06	24,999
0,03	0,04	17,963	188669,564	6,15	1,1E+06	13,432
a0=0,01 sampai af=0,04					8,86E+06	102,545

initial crack awalnya. *Initial crack* pada analisis ini akan dibuat pada lokasi tegangan paling tinggi dengan panjang *initial crack* 10mm, yang akan dimodelkan pada model lokal.

H. Analisis Crack Propagation

Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan lanjutan setelah memperoleh nilai stress intensity factor. Setelah menentukan nilai SIF, maka dilaksanakan perhitungan laju rambat retak dengan konsep fracture mechanics, laju rambat retak dinyatakan dengan variabel da/dN yang merupakan fungsi dari sifat material, Panjang retak, faktor geometri, dan tegangan. Mode retak yang digunakan adalah mode II yaitu sliding mode.

I. Perhitungan Umur Kelelahan

Pada tahap akhir ini dilakukan perhitungan umur kelelahan. Umur kelelahan struktur adalah waktu yang dibutuhkan untuk struktur mengalami kegagalan. Faktor yang mengindikasikan struktur mencapai umur lelah adalah Ketika K2 sudah melewati fracture toughness (KIc) material.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Model Lokal

Model lokal dibuat untuk menyederhanakan model global dengan membuat model lebih rinci di area tertentu yang memerlukan perhatian khusus, seperti area dengan konsentrasi tegangan atau deformasi tinggi. Analisis model lokal dilakukan untuk membandingkan nilai tegangan dari model global dan juga Model lokal untuk melihat nilai dari tegangan yang dapat dilihat pada Gambar 9. Model lokal menunjukkan nilai tegangan 32,922 MPa, sedangkan model utama 32,011 MPa, dengan selisih 0,911 MPa atau margin 3%. Ini menunjukkan bahwa model lokal akurat dan dapat diandalkan untuk analisis lanjutan.

B. Analisis Stress Intensity Factor

Selanjutnya, adalah simulasi menggunakan software elemen hingga pada model dengan retak. Dari simulasi tersebut diperoleh hasil yang ditunjukkan oleh Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 4, analisis simulasi model tanpa radius

menunjukkan bahwa nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) melebihi nilai *fracture toughness* pada panjang retak 40 mm. Ini menunjukkan bahwa struktur model tersebut telah mencapai kelelahan dan mengalami kegagalan saat panjang retak mencapai 40 mm.

Dalam grafik pada Gambar 10 dapat dilihat perambatan retak pada model tanpa radius yang lebih detail. Dengan nilai SIF cenderung meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya panjang retakan, dan telah mencapai nilai *fracture toughness* diantara panjang 30 mm dan 40 mm, yang mengindikasikan struktur kantilever telah mencapai umur kelelahan pada panjang penjarangan retak tersebut.

C. Analisis Crack Propagation

Pada perhitungan laju perambatan retak terlebih dahulu dihitung ΔK_{avg} sebagai nilai SIF rata-rata dari penambahan panjang retak. Kemudian pada perhitungan penjarangan retak diperlukan juga konversi satuan dari panjang retak (a) menjadi "in" serta satuan dari Stress Intensity Factor (SIF) menjadi "Ksi/in". Berikut hasil perhitungan laju perambatan retak. Berdasarkan perhitungan perambatan retak pada Tabel 5, diketahui bahwa semakin panjang retak yang terjadi, maka laju perambatan retak akan semakin besar atau cepat pada setiap penambahan retaknya. Hasil ini membuktikan bahwa hasil yang didapatkan sesuai dengan pernyataan Paris-Erdogan.

D. Perhitungan Umur Lelah Konstruksi

Perhitungan umur kelelahan konstruksi pertama-tama dilakukan dengan menghitung *cycles*. Perhitungan *cycles* dilakukan dengan menggunakan rumus yang diturunkan dari persamaan Paris-Erdogan,

Berdasarkan Tabel 6, perhitungan *cycles* pada model tanpa radius sesuai dengan hukum Paris-Erdogan, yang menyatakan bahwa semakin panjang retak, laju perambatan retak meningkat dan *cycles* yang diperlukan berkurang. Model tanpa radius membutuhkan 1440333,013 *cycles* untuk mencapai *fracture*.

Setelah mendapatkan *cycles*, maka perhitungan dilanjutkan dengan menghitung periode *ecountered* (T_e). Umur lelah didapatkan dengan mengalikan *cycles* dengan periode *ecountered*. Periode *ecountered* dapat dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$T_e = \frac{Lw}{Vw - V \cos \mu} \quad (4)$$

Dari persamaan (4) untuk melakukan perhitungan periode *encountered*, didapatkan hasil sebagai berikut.

$$T_w = \left(2\pi \frac{Lw}{g}\right)^{0,5} = \left(2\pi \frac{118}{9,8}\right)^{0,5} = 8,709 \text{ s}$$

$$Vw = \frac{Lw}{T_w} = \frac{118}{8,695} = 13,605 \text{ m/s}^2$$

Maka,

$$T_e = \frac{Lw}{Vw - V \cos \mu} = \frac{118}{13,605 - 5,659 \times -1} = 6,151 \text{ s}$$

Dengan mengalikan jumlah *cycles* dan T_e , diperoleh hasil umur lelah yang dinyatakan dalam satuan detik. Hasil perhitungan umur kelelahan struktur ditunjukkan dalam Tabel 7. Berdasarkan Tabel 7, perhitungan umur Lelah menunjukkan bahwa struktur kantilever akan mengalami

kelelahan dalam 102,545 hari, mulai dari *initial crack* 10 mm hingga panjang retak 40 mm.

Berdasarkan grafik perbandingan umur lelah pada Gambar 11 dapat disimpulkan bahwa perambatan retak setelah *initial crack* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap umur lelah dari sebuah struktur.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis pada model kantilever maka didapatkan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan ini adalah sebagai berikut: Nilai SIF pada bracket kantilever dengan retak awal dapat ditentukan menggunakan simulasi perangkat lunak analisis elemen hingga. Pada *initial crack* 10 mm, nilai SIF untuk model *bracket* kantilever adalah 190,61 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ dan *fracture* pada panjang 40 mm dengan nilai SIF 1693,00 MPa $\sqrt{\text{mm}}$. Umur lelah dari perambatan retak pada *bracket* kantilever adalah 102,545 hari dengan panjang retak 40 mm, dengan lama perambatan retak setelah *initial crack* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap umur lelah dari sebuah struktur yaitu selama 64,114 hari.

B. Saran

Setelah mengerjakan Tugas Akhir ini, adapun saran yang diberikan pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut: Pada penelitian ini, dalam melakukan analisis menggunakan aplikasi perangkat lunak analisis elemen hingga dengan jenis *static structural* yang tidak dapat melihat laju perambatan retak secara *real time* disarankan untuk menggunakan perangkat lunak analisis elemen hingga dengan jenis *explicit dynamic* untuk dapat melihat laju perambatan retak secara *real time*. Jenis retak yang digunakan dalam penelitian ini adalah *edge crack*. disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan dengan mempertimbangkan jenis retak lain seperti *through thickness crack* dan *surface crack*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Erdogan and P. Paris, "A critical analysis of crack propagation laws," *J. Basic Eng.*, vol. 85, no. 4, pp. 528–533, 1963.
- [2] Z. Rabbani, A. Zubaydi, and S. H. Sujiatanti, "Analisa kekuatan sekat bergelombang kapal tanker menggunakan metode elemen hingga," *J. Tek. ITS*, vol. 7, no. 2, pp. G228–G33, 2019.
- [3] S. H. Sujiatanti, S. Tanaka, S. Shinkawa, and D. Yanagihara, "Computational and experimental analysis of a cracked panel under tensile and compressive loads," in *Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers* 28, 2019, pp. 301–308.
- [4] W. K. F. Salsabila and D. Setyawan, "Optimasi kantilever kapal sesuai peraturan biro klasifikasi indonesia menggunakan bahasa pemrograman c#," *J. Tek. ITS*, vol. 10, no. 2, pp. G79–G86, 2021.
- [5] J. . den Besten and R. H. . Huijsmans, "Fatigue in high-speed ships: crack propagation in aluminum," in *11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, 2010, pp. 1375–1384.
- [6] 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.
- [7] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*. Toronto: Thomson, 2007. ISBN: 0-534-55298-6.
- [8] E. Setiahadi, "Analisa Fatigue Life Graving Dock Gate dengan Metode Simplified," Departemen Teknik Perkapalan: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [9] I. K. Djaya, *Teknik Konstruksi Kapal Baja*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008. ISBN: 978-979-060-078-2.