

Studi Pengaruh Variasi Pengelasan *Bracket* terhadap *Fatigue Life* Struktur Kapal Patroli Cepat 40M Akibat Beban Gelombang

Saniyyah Devi Pitaloka, Muhammad Nurul Misbah
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: mnmisbah@na.its.ac.id

Abstrak—*Bracket* merupakan salah satu struktur kapal yang berfungsi untuk menambah kekuatan sambungan antar konstruksi kapal. Pada struktur *bracket* terjadi *stress raiser* ketika terdapat penyimpangan dalam geometri yang menyebabkan gangguan pada aliran tegangan. Terdapat beban yang bekerja secara berulang-ulang pada struktur *bracket* yang disebabkan oleh beban gelombang yang mengenai badan kapal dan memengaruhi kekuatan dari struktur hingga membuat kegagalan pada. Pada penelitian ini dilakukan perhitungan dan perbandingan umur kelelahan sambungan *bracket* pada Kapal Patroli Cepat 40M yang saling menumpu dan yang tidak saling menumpu dengan menggunakan metode *fracture mechanics* akibat beban gelombang. Beban gelombang yang ditinjau yaitu pada *vertical bending moment* dan *vertical shear force*. Pemodelan struktur dilakukan dengan pemodelan elemen hingga pada model global dan model lokal. Hasil dari analisis model global yaitu didapatkan tegangan terbesar pada sambungan *bracket* B5 sebesar 0,36 MPa. Setelah itu dilakukan analisis model lokal dengan tegangan yang berasal dari model global tersebut untuk mendapatkan nilai *stress intensity factor* (SIF), laju perambatan retak, jumlah siklus dan umur kelelahan *bracket*. Hasil dari analisis tersebut didapatkan nilai SIF retak awal pada *bracket* yang menumpu dan tidak menumpu masing-masing adalah $0,16 \text{ MPa}\sqrt{m}$ dan $0,10 \text{ MPa}\sqrt{m}$. Jumlah siklus yang bekerja pada masing-masing *bracket* menumpu dan tidak menumpu hingga mencapai kegagalan yaitu $1,48 \times 10^7$ siklus dan $1,84 \times 10^7$ siklus. Umur lelah pada *bracket* yang saling menumpu adalah 3,78 tahun dan umur kelelahan pada *bracket* yang tidak saling menumpu adalah 4,71 tahun. Sehingga umur kelelahan pada sambungan *bracket* saling menumpu lebih cepat dibandingkan dengan *bracket* yang dipasang tidak saling menumpu.

Kata Kunci—*Bracket*, *Fracture Mechanics*, Umur Kelelahan.

I. PENDAHULUAN

KEKUATAN konstruksi merupakan suatu hal yang sangat penting pada pembangunan kapal. Hal ini dikarenakan kekuatan konstruksi kapal memengaruhi tingkat keselamatan kapal pada saat kapal dioperasikan. Beban yang bekerja pada saat kapal beroperasi terdiri dari beban statis dan dinamis dimana beban gelombang adalah salah satu jenis beban dinamis. Beban gelombang terjadi karena adanya interaksi antara permukaan kapal dengan gelombang air laut.

Bracket merupakan salah satu komponen struktur kapal yang memiliki fungsi penting yaitu menopang dan menambah kekuatan pada sambungan antar konstruksi kapal. *Bracket* dipasang dengan cara di las pada konstruksi kapal yang membutuhkan penguatan lebih. Letak pengelasan pada *bracket* di konstruksi kapal yang kurang tepat dapat menimbulkan *fatigue crack*. Selain itu, timbulnya *fatigue crack* ini juga karena adanya beban gelombang yang terjadi secara berulang-ulang pada permukaan kapal. Meskipun

tegangan yang ditimbulkan oleh beban gelombang tersebut tidak melebihi tegangan ijin, tetapi jika beban gelombang ini terjadi berulang-ulang maka hal ini akan menambah kemungkinan terjadinya *fatigue crack*. Pada akhirnya, *fatigue crack* ini akan menyebabkan kegagalan pada struktur konstruksi kapal.

Oleh karena itu diperlukan analisis *fatigue life* pada *bracket* Kapal Patroli Cepat 40M akibat beban gelombang dengan variasi pengelasan *bracket*. Analisis *fatigue life* ini selanjutnya akan dikembangkan menjadi perkiraan *fatigue life* struktur *bracket* kapal. Selain itu, akan dilakukan dua variasi pengelasan *bracket* Kapal Patroli Cepat 40M. Variasi pertama yaitu pengelasan dilakukan secara menumpu antar dua *bracket* dan variasi yang kedua yaitu pada sambungan dua *bracket* tersebut tidak dilakukan pengelasan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Beban Gelombang

Beban gelombang (*Wave Load*) merupakan beban dari suatu gelombang dimana paling umum diterapkan pada benda atau struktur. Pada saat kapal terkena gelombang laut, kapal mengalami gerakan osilasi dalam enam derajat kebebasan atau yang biasa disebut *six degree of freedom*. *Six degree of freedom* pada kapal yaitu meliputi tiga gerakan translasi *surge*, *sway*, dan *heave*. Serta tiga gerakan rotasi *roll*, *pitch* dan *yaw*. Beban gelombang yang digunakan pada analisis ini merupakan *response* dari bentuk lambung kapal terhadap gelombang (Gambar 1).

B. Analisis Kelelahan (*Fatigue*)

Kelelahan atau *fatigue* adalah akumulasi kerusakan material yang disebabkan oleh beban siklik atau beban berulang. Selama masa operasional, banyak bagian dari struktur yang harus bertahan dari tegangan yang menyimpannya. Umumnya, amplitudo beban setiap siklus tidak cukup besar untuk menyebabkan kegagalan struktural sendiri. Tetapi kegagalan dapat terjadi ketika akumulasi kerusakan yang dialami oleh struktur mencapai tingkat kritis. Kelelahan dapat dibagi menjadi dua berdasarkan siklusnya yaitu :

1) *High-Cycle (Low Stress) Fatigue*

High-cycle (low stress) fatigue yaitu suatu kegagalan kelelahan (*fatigue failure*) yang terjadi apabila jumlah siklus untuk menuju ke kegagalan struktur kurang dari 10^4 .

2) *Low-Cycle (High-Stress) Fatigue*

Low-cycle (high-stress) fatigue yaitu kegagalan yang terjadi pada struktur ketika jumlah siklus mencapai jutaan kali kejadian.

Secara umum, terdapat dua metode untuk analisis kelelahan yaitu menggunakan pendekatan S-N curve dan pendekatan fracture mechanics. Pada tahap desain struktur, metode dengan pendekatan S-N curve adalah yang paling sering digunakan untuk menentukan umur kelelahan. Sedangkan metode dengan pendekatan fracture mechanics adalah metode dengan pendekatan kriteria ukuran cacat pada material beserta perambatan retak. Metode fracture mechanics digunakan untuk menentukan ukuran keberterimaan cacat, merencanakan inspeksi dan strategi perbaikan. Kedua pendekatan analisis umur kelelahan ini dijabarkan dengan mengklasifikasikan beberapa metode dasar yaitu [1]:

1) Metode Deterministik

Metode ini biasa digunakan oleh Lloyd's Register. Pada metode ini *fatigue damage* dihitung dengan menggunakan *wave exceedance diagram*.

2) Metode Distribusi Gelombang

Metode ini mengasumsikan bahwa tegangan yang terjadi proporsional terhadap tinggi gelombang. Gelombang ditentukan dengan distribusi log normal, weibull dan lain-lain.

3) Metode Distribusi Rentang Tegangan

Metode ini secara teoritis memodelkan rentang tegangan sebagai distribusi weibull yang biasanya diperoleh dari metode spektral, metode distribusi gelombang dan lain-lain.

4) Metode Spektral Gelombang

Metode ini biasa disebut dengan metode probabilistik. Pada metode ini *fatigue damage* diperhitungkan dari setiap *sea state* dalam *scatter diagram* dan tegangan dianggap sebagai suatu proses acak yang stationer (*stationery random process*).

5) Metode Equivalent Weibull

Metode ini biasa digunakan oleh DNV yang menggunakan analisis *spectral* untuk mendapatkan distribusi rentang tegangan kurun waktu panjang yang ekuivalen dengan distribusi weibull.

C. Mekanisme Kepecahan

Mekanisme kepecahan memperlihatkan tiga fase yaitu pertumbuhan retak tanpa pembebanan, pertumbuhan retak stabil, dan pertumbuhan retak tidak stabil [2]. Mekanisme kepecahan tersebut yaitu :

1) Retak Awal (*Crack Initiation*)

Retak awal yang terjadi pada struktur yaitu dimulai dari adanya cacat (*defect*).

2) Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak merupakan tahap selanjutnya setelah terjadinya retak awal (*crack initiation*). Retak tumbuh menjalar hingga mencapai batas kritis (*critical size*). Data perambatan retak suatu struktur dapat digunakan untuk memprediksi umur lelah (*fatigue life*) suatu struktur. Pertumbuhan retak lelah ditentukan oleh dua parameter mekanika kepecahan yaitu ΔK dan K_{max} [3]. Pada kondisi operasi normal, perambatan retak dapat terjadi dalam kurun waktu yang lama. Perambatan retak akibat medan tegangan dan regangan pada sekitar ujung retak dapat ditunjukkan dengan parameter *stress intensity factor* (K), yang merupakan

fungsi dari tegangan, geometri dan dimensi retak. Konsep *fracture mechanics*, laju perambatan retak dinyatakan dengan da/dN yang merupakan fungsi dari sifat material, panjang retak dan tegangan operasi.

3) Kepecahan (*Fracture*)

Kepecahan dapat terjadi apabila terdapat retak pada suatu struktur yang mengalami perambatan retak tidak stabil dan sangat cepat. Kepecahan dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu (1) Terbelah (*Cleavage*) yaitu keretakan yang terjadi tanpa didahului deformasi plastis atau disebut juga *brittle fracture*. (2) Runtuh (*Rupture*) yaitu keretakan yang didahului deformasi plastis pada material.

D. Fracture Mechanics

Fracture mechanics adalah suatu analisis penyelesaian dengan cara mendefinisikan kondisi lokal dari tegangan dan regangan disekitar retakan yang dikorelasikan dengan parameter-parameter globalnya (beban-beban, geometri dan sebagainya) dimana retakan akan merambat. *Fracture mechanics* dibagi menjadi dua kategori yaitu *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM) dan *Elastic-Plastic Fracture Mechanics* (EPFM). LEFM adalah metode yang menunjukkan hubungan antara medan tegangan dan distribusinya didaerah sekitar ujung retak dengan ukuran, bentuk, orientasi retak dan material properti akibat tegangan nominal yang dikenakan pada struktur. Metode ini menggunakan parameter *Stress Intensity Factor* atau yang disimbolkan dengan K untuk menunjukkan karakteristik dari medan tegangan yang terjadi. EPFM merupakan metode pengembangan dari LEFM dengan penambahan analisis yang dapat menunjukkan deformasi plastis dari material. EPFM umumnya digunakan pada material yang bersifat *ductile*, dimana terjadi perilaku *elastic-plastic* pada material akibat pembebanan yang terjadi. Mode deformasi retak digolongkan dalam 3 mode deformasi, yaitu:

1. Mode I (*opening mode*)
2. Mode II (*sliding mode*)
3. Mode III (*tearing mode*)

E. Stress Intensity Factor

Faktor intensitas tegangan (*Stress Intensity Factor*) merupakan salah satu parameter yang paling mendasar dan berguna dalam *fracture mechanics*. Faktor intensitas tegangan menggambarkan keadaan tegangan pada ujung retak. Hal ini berhubungan dengan laju pertumbuhan retak dan digunakan untuk menetapkan kriteria kegagalan yang disebabkan oleh *fracture*. Persamaan *range* SIF adalah sebagai berikut [4] :

$$\Delta K = \sigma_{nom} \sqrt{\pi a f(g)}$$

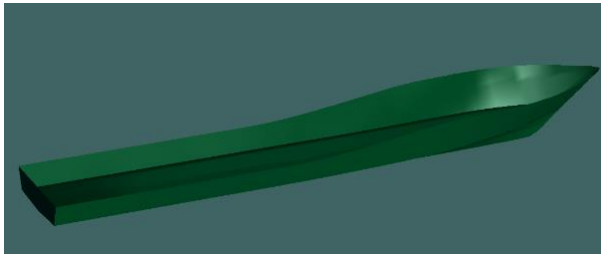
Besarnya SIF dipengaruhi oleh panjang retak a , tegangan yang diberikan (σ), serta faktor korelasi tanpa dimensi $f(g)$ yang dipengaruhi oleh bentuk pembebanan yakni dari beban tarik dan tekan, posisi retak yang berada di tengah atau di tepi, geometri retak dan perbandingan panjang retak terhadap lebar material.

F. Kedalaman Kritis

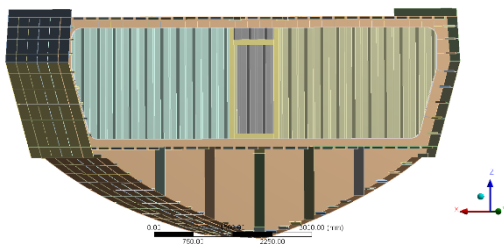
Kedalaman retak kritis terjadi jika *stress intensity factor* yang dihasilkan telah mencapai *fracture toughness* dari

Tabel 1.
Ukuran utama KPC 40M

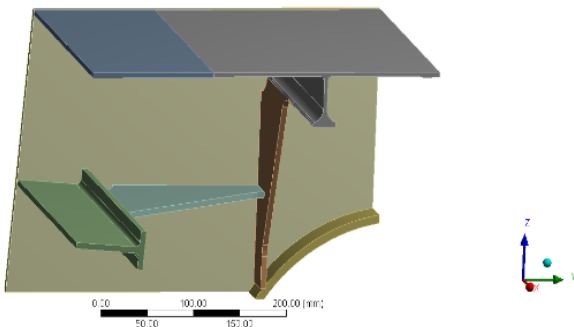
Item	Dimensi
<i>Length Overall</i>	45,50 m
<i>Length Between Perpendicular</i>	40,46 m
<i>Breadth</i>	7,90 m
<i>Depth</i>	1,89 m
<i>Height</i>	4,25 m
<i>Displacement</i>	220 ton



Gambar 1. Lambung kapal patroli cepat 40M.



Gambar 2. Model global kapal patroli cepat 40M.



Gambar 3. Model lokal *bracket* menumpu.

material. Kedalaman retak kritis dihitung dengan menggunakan rumus:

$$a_f = \left(\frac{K_{Ic}}{\alpha \sigma_{max}} \right)^2 \frac{1}{\pi}$$

G. Perambatan Retak

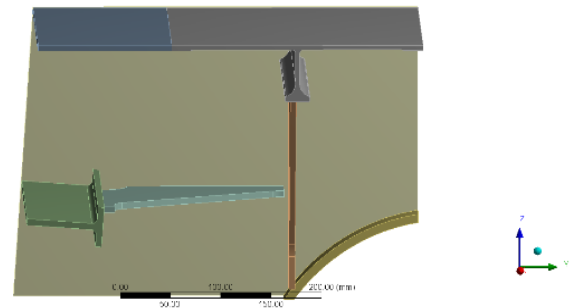
Hasil perhitungan perambatan retak ini umumnya sebagai umur kelelahan dari struktur yang ditinjau. Dengan memberikan masukan berupa besar retak awal dan retak akhir akan diketahui jumlah batas siklus yang masih aman dengan mengintegrasikan persamaan laju keretakan berikut:

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{da/dN}$$

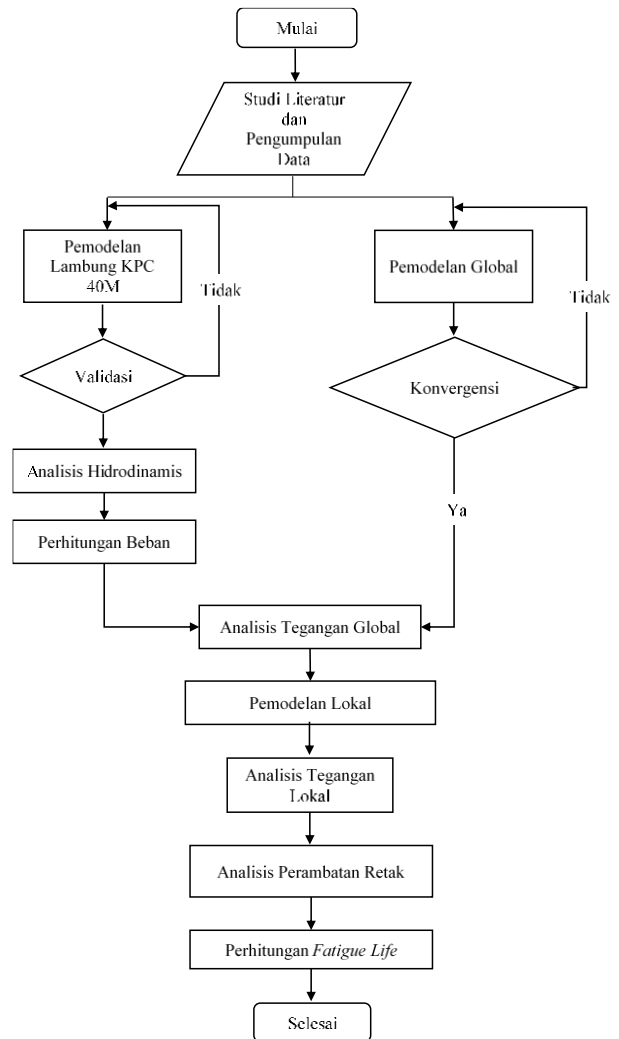
dengan mensubstitusi persamaan hukum Paris-Erdogan sebagai berikut :

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

didapatkan persamaan baru yaitu:



Gambar 4. Model lokal *bracket* tidak menumpu.



Gambar 5. Bagan alir.

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

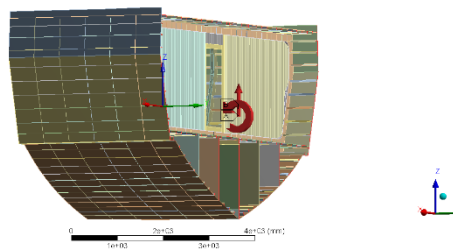
III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Pengumpulan Data

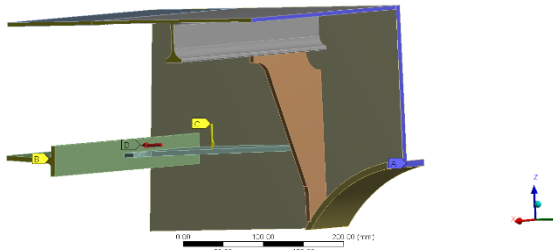
Dalam penelitian ini, objek yang digunakan adalah Kapal Patroli Cepat 40M. Ukuran utama KPC 40M ditunjukkan pada Tabel 1.

B. Pemodelan Hidrodinamis

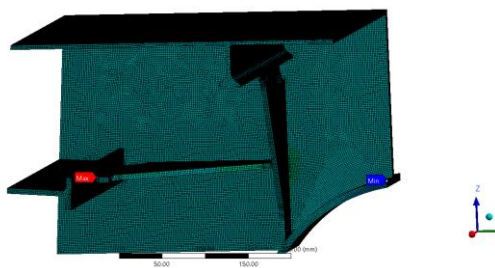
Analisis hidrodinamis dilakukan pada model lambung KPC 40M untuk mendapatkan *output* olah gerak kapal berupa



Gambar 6. Beban pada model global.



Gambar 7. Kondisi batas model lokal.



Gambar 8. Hotspot stress.

Tabel 2.
Significant bending moment/shear force amplitude

Posisi 4,43 m di belakang midship	Significant Amplitude
Bending Moment (N.m)	437877,57
Shear Force (N)	51488,74

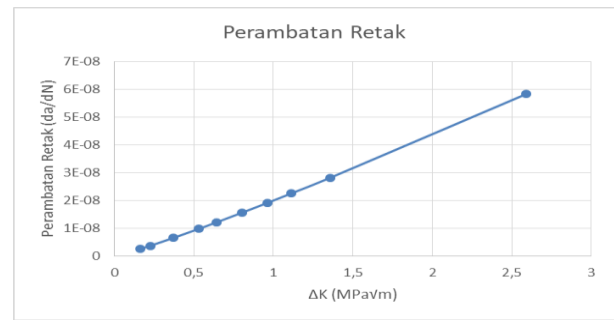
Tabel 3.
Hasil analisis tegangan global

Lokasi Struktur	σ_{max} (MPa)
B1	0,05
B2	0,04
B3	0,10
B4	0,07
B5	0,36
B6	0,12
B7	0,12
B8	0,09

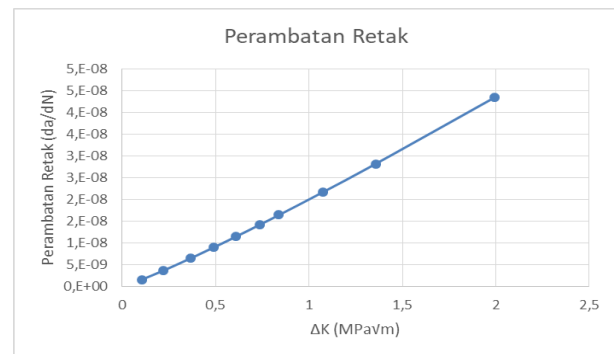
Response Amplitude Operator (RAO) yang digunakan sebagai parameter pada perhitungan beban.

C. Perhitungan Beban

Beban gelombang yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu Vertical Bending Moment dan Vertical Shear Force. Beban tersebut berasal dari RAO Bending Moment/Shear Force dengan metode 3D Diffraction Panel Method yaitu metode mendiskritkan struktur menjadi elemen-elemen kecil yang kemudian dianalisis secara numerik untuk tiap elemen. Setelah didapatkan RAO Bending Moment/Shear Force hasil tersebut dikuadrat dan dikalikan dengan spektrum gelombang sehingga menjadi spektrum respon. Kemudian data tersebut diolah dan diambil rata-rata dari 1/3 data tertinggi [5].



Gambar 9. Laju perambatan retak *bracket* menumpu



Gambar 10. Laju perambatan retak *bracket* tidak menumpu.

Tabel 4.
Nilai SIF *bracket* menumpu

No.	a_0 (mm)	a_{cr} (mm)	a_{avg} (mm)	SIF (MPa√m)
1	0,5	12,78	6,64	0,16
2	12,78	25,06	18,92	0,23
3	25,06	37,34	31,20	0,37
4	37,34	49,62	43,48	0,53
5	49,62	61,9	55,76	0,64
6	61,9	74,18	68,04	0,80
7	74,18	86,46	80,32	0,96
8	86,46	98,74	92,60	1,11
9	98,74	111,02	104,88	1,36
10	111,02	123,3	117,16	2,59

Tabel 5.
Nilai SIF *bracket* tidak menumpu

No.	a_0 (mm)	a_{cr} (mm)	a_{avg} (mm)	SIF (MPa√m)
1	0,5	12,78	6,64	0,10
2	12,78	25,06	18,92	0,22
3	25,06	37,34	31,20	0,37
4	37,34	49,62	43,48	0,49
5	49,62	61,9	55,76	0,61
6	61,9	74,18	68,04	0,74
7	74,18	86,46	80,32	0,84
8	86,46	98,74	92,60	1,08
9	98,74	111,02	104,88	1,36
10	111,02	123,3	117,16	1,99

D. Pemodelan Global

Model global ini dibuat dan dianalisis dengan tujuan mendapatkan nilai tegangan pada struktur yang akan ditinjau dalam analisis selanjutnya. Frame 22 hingga frame 26 pada KPC 40M dibuat sebagai model global untuk selanjutnya dianalisis. Selain itu juga dibuat 1 frame tambahan pada bagian depan dan belakang frame 22 dan 26 pada potongan kapal yang akan dianalisis. Penambahan satu frame ini dimaksudkan untuk menjadi tumpuan dalam analisis agar hasil analisis pada model global tidak terpengaruh. Gambar 2 menunjukkan model global KPC 40M yang akan dianalisis

Tabel 6.
Laju perambatan bracket menumpu

a_0 (mm)	a_{cr} (mm)	ΔK (MPa \sqrt{m})	a_{avg} (m)	da/dN (m/cycle)	ΔN (cycle)
0,5	12,78	0,16464	0,00664	2,5794E-09	4,76,E+06
12,78	25,06	0,22506	0,01892	3,74178E-09	3,28,E+06
25,06	37,34	0,36918	0,0312	6,52603E-09	1,88,E+06
37,34	49,62	0,5332	0,04348	9,86465E-09	1,24,E+06
49,62	61,9	0,64349	0,05576	1,21857E-08	1,01,E+06
61,9	74,18	0,8008	0,06804	1,55812E-08	7,88,E+05
74,18	86,46	0,96237	0,08032	1,91561E-08	6,41,E+05
86,46	98,74	1,11320	0,0926	2,25618E-08	5,44,E+05
98,74	111,02	1,35540	0,10488	2,81488E-08	4,36,E+05
111,02	123,3	2,59030	0,11716	5,829E-08	2,11,E+05

Tabel 7.
Laju perambatan bracket tidak menumpu

a_0 (mm)	a_{cr} (mm)	ΔK (MPa \sqrt{m})	a_{avg} (m)	da/dN (m/cycle)	ΔN (cycle)
0,5	12,78	0,10389	0,00664	1,56949E-09	7,82,E+06
12,78	25,06	0,21836	0,01892	3,61682E-09	3,40,E+06
25,06	37,34	0,36735	0,0312	6,48968E-09	1,89,E+06
37,34	49,62	0,49027	0,04348	8,97657E-09	1,37,E+06
49,62	61,9	0,60824	0,05576	1,1438E-08	1,07,E+06
61,9	74,18	0,73819	0,06804	1,42188E-08	8,64,E+05
74,18	86,46	0,83903	0,08032	1,64196E-08	7,48,E+05
86,46	98,74	1,0766	0,0926	2,17298E-08	5,65,E+05
98,74	111,02	1,3566	0,10488	2,81769E-08	4,36,E+05
111,02	123,3	1,9925	0,11716	4,34034E-08	2,83,E+05

E. Pemodelan Lokal

Pemodelan lokal adalah pemodelan retak pada bagian *bracket* KPC 40M dengan tujuan untuk mendapatkan *stress intensity factor*. *Stress intensity factor* (SIF) dihitung dari retak awal hingga kedalaman kritis yang selanjutnya digunakan untuk perhitungan perambatan retak. Pemilihan bagian *bracket* yang akan dilakukan pemodelan lokal yaitu *bracket* yang sesuai dengan variasi pada penelitian tugas akhir ini dengan rentang tegangan tertinggi (Gambar 3).

F. Parameter Perhitungan Umur Kelelahan

Perhitungan umur kelelahan berdasarkan pendekatan *fracture mechanics*. Metode pendekatan *fracture mechanics* dihitung setelah mendapatkan jumlah siklus dari tiap ukuran retak yang terjadi (Gambar 4). Jumlah siklus dihitung berdasarkan perbandingan rentang kedalaman retak dengan laju perambatan retak. Perlu diketahui parameter – parameter untuk perhitungan perambatan retak yaitu parameter SIF dan parameter material yakni C dan m. Nilai C dan m yang digunakan adalah berdasarkan nilai eksperimen yaitu nilai C dan m masing – masing sebesar $2,00 \times 10^{-8}$ dan 1,24 [6].

G. Bagan Alir

Adapun bagan alir dari penelitian ini ditunjukkan pada diagram Gambar 5.

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Perhitungan Beban

Analisis olah gerak kapal untuk mendapatkan *RAO Bending Moment/Shear Force* pada KPC 40M terlebih dahulu dilakukan untuk menghitung beban. *RAO Bending Moment/Shear Force* dianalisis pada arah datang gelombang 0°, 90°, 180°, 270°. Dalam analisis ini beban yang ditinjau yaitu *Vertical Bending Moment* dan *Vertical Shear Force* terbesar yang berada pada arah gelombang *following sea* atau 0°. *RAO Bending Moment/Shear Force* dihitung sesuai

potongan pada model global dimana beban tersebut akan *diinput* yaitu pada *frame* 26 atau 4,43 m di belakang *midship*.

Spektrum gelombang dihitung menggunakan teori spektrum gelombang ITTC/ISSC 1975. Spektrum gelombang menunjukkan energi yang diberikan oleh gelombang dalam fungsi frekuensi. Spektrum gelombang dihitung pada tinggi gelombang 1,875 m. Setelah itu dilakukan perhitungan spektrum respons dengan mengalikan spektrum gelombang dengan kuadrat RAO. Perhitungan beban gelombang tersebut didapatkan dari rata-rata 1/3 data tertinggi dari persebaran data yang ada disebut dengan *Significant Bending Moment/Shear Force Amplitude* (Tabel 2).

Selain didapatkan besar nilai beban gelombang, didapatkan juga nilai periode gelombang dari spektrum repons dengan menggunakan persamaan periode gelombang. Periode gelombang yang didapatkan yaitu 8,05 s.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

B. Analisis Tegangan Global

Sebelum dilakukan analisis, model global diberi kondisi batas dan komponen – komponen beban. Kondisi batas yang diberikan pada model global yaitu *fixed support* pada bagian *frame* tambahan di *frame* 22 (Gambar 6). Komponen beban diaplikasikan pada *frame* tambahan di *frame* 26. Beban yang diaplikasikan berupa *vertical bending moment* dan *vertical shear force*.

Analisis tegangan global ditinjau pada setiap *bracket* yang menumpu pada (B1-B8) untuk mengetahui tegangan yang terbesar yang selanjutnya akan digunakan untuk analisis pada model lokal.

Setelah dilakukan analisis tegangan global didapatkan nilai tegangan global yang dapat dilihat pada Tabel 3. Nilai tegangan pada sambungan *bracket* yang tertinggi yaitu terdapat pada lokasi B5 sebesar 0,36 MPa. Dengan itu lokasi

Tabel 8.
Hasil umur kelelahan

Variasi	ΣN (cycle)	F	Tahun
Bracket Menumpu	$1,48 \times 10^7$	$1,19 \times 10^8$	3,78
Bracket Tidak Menumpu	$1,84 \times 10^7$	$1,49 \times 10^8$	4,70

Tabel 9.
Umur kelelahan pada *bracket* menumpu

No.	a_0 (mm)	a_{cr} (mm)	Tahun
1	0,5	12,78	1,21
2	12,78	25,06	2,05
3	25,06	37,34	2,53
4	37,34	49,62	2,85
5	49,62	61,9	3,11
6	61,9	74,18	3,31
7	74,18	86,46	3,47
8	86,46	98,74	3,61
9	98,74	111,02	3,72
10	111,02	123,3	3,78

yang digunakan untuk analisis lokal adalah sambungan *bracket* B5.

C. Analisis Tegangan Lokal

Analisis lokal dilakukan dengan dua variasi sambungan *bracket* yaitu *bracket* yang saling menumpu dan tidak saling menumpu. Model lokal dibuat pada daerah sambungan *bracket* yang meliputi *deck transverse*, *side longitudinal*, *deck longitudinal*, dan *bracket* dengan dua variasi yaitu saling menumpu dan tidak menumpu. Kondisi batas yang digunakan pada analisis model lokal ini yaitu *fixed support* dan *displacement*. *Fixed support* diaplikasikan pada bagian potongan *deck transverse* dan pelat geladak. Sedangkan *displacement* diaplikasikan pada potongan pelat geladak dan potongan *side longitudinal*. Kondisi batas pada model lokal dapat dilihat pada Gambar 7.

Model lokal yang telah diberi kondisi batas dan beban *dirunning* untuk mendapatkan *hotspot stress* untuk selanjutnya dapat diberi retak awal (Gambar 8).

Initial crack diasumsikan *edge crack* sebesar 0,5 mm sesuai dengan *American Bureau of Shipping (ABS) "Guide for The Fatigue Assessment of Offshore Structures"* 2020. Pada perhitungan nilai kedalaman retak kritis didapatkan nilai retak kritis pada benda yaitu sebesar 3082,06 m dimana nilai tersebut lebih besar daripada dimensi kaki *bracket* tersebut. Oleh karena itu, retak kritis diasumsikan sepanjang kaki *bracket* yaitu 123,30 mm.

D. Analisis Perambatan Retak

Stress intensity factor yang dihasilkan adalah SIF mode I (*opening mode*) dimana mempertimbangkan beban tarik aksial dalam reaksi *opening mode* pada retak yang terjadi. Pada model lokal yang telah diberi retak awal, dilakukan *input* beban. Beban yang *diinput* yaitu rentang tegangan maksimum untuk mendapatkan ΔK .

Nilai SIF didapatkan dengan menggunakan metode numerik Hasil SIF untuk *bracket* menumpu dapat dilihat pada Tabel 4. Sedangkan untuk hasil nilai SIF untuk *bracket* tidak menumpu dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 10.
Umur kelelahan pada *bracket* tidak menumpu

No.	a_0 (mm)	a_{cr} (mm)	Tahun
1	0,5	12,78	1,99
2	12,78	25,06	2,86
3	25,06	37,34	3,35
4	37,34	49,62	3,70
5	49,62	61,9	3,97
6	61,9	74,18	4,19
7	74,18	86,46	4,38
8	86,46	98,74	4,53
9	98,74	111,02	4,64
10	111,02	123,3	4,71

E. Analisis Perambatan Retak

Nilai laju perambatan retak dapat dicari dengan persamaan (4), sehingga berdasarkan persamaan tersebut didapatkan nilai laju perambatan retak untuk *bracket* menumpu (Gambar 9 dan Tabel 6) dan *bracket* tidak menumpu (Gambar 10 dan Tabel 7).

Pada Tabel 8 dan Gambar 10 diatas dapat dilihat bahwa semakin besar nilai kedalaman retak, maka nilai laju perambatan retak akan semakin cepat.

F. Perhitungan Umur Kelelahan

Perhitungan umur kelelahan dilakukan menggunakan pendekatan *fracture mechanics*. Umur kelelahan berdasarkan pendekatan *fracture mechanics* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$F = Nt \times T$$

Dimana Nt adalah nilai total siklus dari dan T adalah periode gelombang dengan nilai 8,05 s. Dengan itu umur kelelahan yang dihitung adalah 3,78 tahun untuk *bracket* menumpu dan 4,7 tahun untuk *bracket* yang tidak menumpu. Hasil perhitungan umur lelah dapat dilihat pada Tabel 8.

Untuk rangkuman umur kelelahan setiap tahap pada *bracket* menumpu dan tidak menumpu dapat dilihat pada Tabel 9 dan Tabel 10.

V. KESIMPULAN

Dengan demikian, maka kesimpulan yang diambil pada penelitian ini diantaranya; (1) Umur kelelahan pada sambungan *bracket* menumpu lebih singkat dibandingkan dengan umur lelah pada sambungan *bracket* tidak menumpu. Umur lelah pada *bracket* menumpu yaitu 3,78 tahun atau $1,48 \times 10^7$ siklus dan 4,70 tahun atau $1,84 \times 10^7$ siklus pada *bracket* yang tidak menumpu. (2) Nilai *stress intensity factor* (SIF) *initial crack* pada sambungan *bracket* menumpu dan tidak menumpu masing-masing adalah $0,16 \text{ MPa}\sqrt{m}$ dan $0,10 \text{ MPa}\sqrt{m}$. (3) Lokasi pada analisis model global yang memiliki tegangan paling tinggi jika dibandingkan dengan lokasi sambungan yang lain yaitu pada sambungan B5 sebesar 0,36 MPa. Oleh karena itu, lokasi yang digunakan untuk analisis model lokal adalah sambungan B5. (4) Analisis lokal dilakukan pada dua variasi sambungan *bracket* yaitu pada *bracket* yang saling menumpu dan *bracket* yang tidak menumpu dengan tegangan yang ditentukan sesuai dengan

yang ada pada analisis model global yaitu 0,39 Mpa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. H. Wirsching, *Probabilistic Fatigue Analysis*, 1st ed. Boston: Springer, 1995.
- [2] A. Salvadori and A. Carini, "Minimum theorems in incremental linear elastic fracture mechanics," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 48, no. 9, pp. 1362–1369, 2011.
- [3] D. Kujawski and S. Stoychev, "Internal stress effects on fatigue crack initiation at notches," *Int. J. Fatigue*, vol. 29, no. 9–11, pp. 1744–1750, 2007.
- [4] Y. Bai, *Marine Structural Design*, 2nd ed. United Kingdom: Elsevier, 2003.
- [5] B. Rameswar, *Dynamic of Marine Vehicles*, 1st ed. New York: Jon Wiley and Son, Inc, 1978.
- [6] A. Zubaydi, N. Muhayat, B. Santosa, and D. Setyawan, "Effect of weld side combination on mechanical properties of double sided friction stir welded 5083 aluminum alloy," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 699, pp. 169–174, 2015.