

Analisis Crack Propagation pada Sambungan Las di Padeye Menggunakan Finite Element Method (FEM)

Ridwan Gazali^{*1}, Hendra Butar Butar, dan Hendra Saputra

*** Politeknik Negeri Batam**

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: gazaliridwan2@gmail.com

Abstrak

Padeye berfungsi sebagai titik pengangkatan (*lifting point*) yang integritas sambungan lasnya menentukan keselamatan proses pengangkatan. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh insiden terlepasnya padeye akibat retak las, dan bertujuan menganalisis perambatan retak (*crack propagation*) pada sambungan las padeye akibat beban statis aktual 136 kN menggunakan pendekatan *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM) dan *Finite Element Method* (FEM). Retak awal berbentuk *semi-elliptical surface crack* dimodelkan pada *weld* metal dengan tiga variasi kedalaman: 5, 10, dan 20 mm. Hasil simulasi menunjukkan nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) maksimum berturut-turut 79,997 MPa $\sqrt{\text{mm}}$, 123,36 MPa $\sqrt{\text{mm}}$, dan 152,32 MPa $\sqrt{\text{mm}}$, jauh di bawah *fracture toughness* (K_{IC}) sebesar 948,68 MPa $\sqrt{\text{mm}}$, sehingga retak tidak merambat pada kondisi aktual. Sebagai validasi, K_{IC} diturunkan menjadi 1 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ dan menghasilkan perambatan sepanjang 0,17528 mm, 0,51459 mm, dan 0,70779 mm untuk tiap variasi, membuktikan model bekerja sesuai kriteria $SIF > K_{IC}$. Semakin besar panjang retak awal, semakin besar pula SIF dan perambatan yang dihasilkan. Struktur padeye pada beban 136 kN dinyatakan aman terhadap kegagalan akibat perambatan retak.

Kata kunci: Perambatan retak, *padeye*, fraktur mekanik, metode elemen hingga

Abstract

Padeye functions as a lifting point whose weld joint integrity determines the safety of the lifting process. This research is motivated by a padeye detachment incident caused by a weld crack, and aims to analyze crack propagation in the padeye weld joint under an actual static load of 136 kN using the Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) approach and the Finite Element Method (FEM). The initial crack, modeled as a semi-elliptical surface crack, was introduced in the weld metal at three depth variations: 5, 10, and 20 mm. Simulation results show maximum Stress Intensity Factor (SIF) values of 79.997, 123.36, and 152.32 MPa $\sqrt{\text{mm}}$, respectively, well below the fracture toughness (K_{IC}) of 948.68 MPa $\sqrt{\text{mm}}$, indicating no crack propagation under actual loading. As validation, K_{IC} was reduced to 1 MPa $\sqrt{\text{mm}}$, resulting in propagation of 0.17528 mm, 0.51459 mm, and 0.70779 mm for each variation, confirming the model behaves according to the $SIF > K_{IC}$ criterion. Larger initial crack lengths result in higher SIF and greater propagation. The padeye structure under 136 kN loading is considered safe against crack propagation failure.

Keyword: Crack propagation, *padeye*, fracture mechanics, finite element method

1 Pendahuluan

Dalam industri konstruksi lepas pantai (*offshore*) dan perkapalan (*shipbuilding*), proses pengangkatan (*lifting*) memegang peranan penting pada tahap instalasi maupun fabrikasi struktur. Proses *Lifting* dalam konstruksi dilakukan untuk pemindahan struktur, penggabungan struktur, dan instalasi struktur. Salah satu komponen utama yang digunakan dalam proses ini adalah *padeye* atau biasa disebut *lifting lug* yang berfungsi sebagai titik penghubung antara struktur dengan *lifting equipment*. *Padeye* banyak digunakan dalam industri *offshore* dan *shipbuilding*, serta memerlukan tingkat keandalan yang tinggi karena berperan langsung dalam keselamatan proses pengangkatan [1].

Pada struktur *offshore*, *padeye* dirancang untuk menahan beban besar selama proses *lifting*, sehingga analisis kekuatan dan distribusi tegangan menjadi sangat penting untuk mencegah kegagalan struktur. Pemasangan *padeye* dilakukan melalui proses pengelasan pada bagian struktur yang akan diangkat. Perancangan dan pemasangan *padeye* harus dilakukan dengan perhitungan yang tepat dan sesuai agar dapat menjamin keamanan serta keberhasilan selama proses pengangkatan [2]. Ketidaktepatan dalam proses perancangan maupun pemasangan *padeye* dapat mengakibatkan masalah yang fatal, seperti kegagalan proses pengangkatan, kerusakan struktur, hingga kecelakaan kerja yang berpotensi menimbulkan korban jiwa. Kegagalan dalam proses pengangkatan dapat berasal dari pemilihan dan perancangan *padeye* yang tidak sesuai dengan beban struktur yang akan diangkat, pemasangan *padeye* yang tidak tepat terhadap distribusi titik berat, hingga proses pengelasan yang tidak mengikuti standar dan prosedur [3].

Proses pengelasan pada *padeye* yang tidak sesuai dapat menimbulkan cacat pada sambungan, salah satunya adalah retak (*crack*) yang dapat muncul baik selama proses pendinginan maupun saat *padeye* menerima beban pengangkatan [4]. Dibandingkan dengan material induk, material hasil pengelasan cenderung lebih lemah sehingga lebih mudah mengalami *failure*. Kondisi ini disebabkan oleh keberadaan *welding defect*, tegangan sisa tarik (*residual tensile stress*) yang tinggi, serta konsentrasi tegangan lokal pada geometri sambungan las, yang secara bersama-sama memicu inisiasi dan perambatan retak pada struktur yang dilas [5]. Retak yang tidak terdeteksi pada tahap awal dapat menyebabkan kegagalan saat *padeye* menerima beban maksimal, sehingga menimbulkan risiko kegagalan pengangkatan, kerusakan pada blok yang diangkat, maupun potensi kecelakaan kerja [6].

Mekanika Fraktur (*Fracture Mechanics*) adalah salah satu dasar penting dalam analisis integritas struktur, karena memberikan cara ilmiah untuk memahami bagaimana retak mulai muncul, berkembang, dan pada akhirnya menyebabkan kegagalan material saat diberi beban berulang maupun beban statis [7]. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menganalisis pertumbuhan retak adalah melalui simulasi numerik menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. FEM merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan persoalan teknik yang kompleks melalui diskretisasi domain struktur menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung, sehingga distribusi tegangan, regangan, dan deformasi dapat dihitung secara komputasi dengan akurasi tinggi berdasarkan kondisi batas dan pembebanan yang diberikan [8].

Sejumlah penelitian telah dilakukan terkait analisis *padeye*, sambungan las, dan perambatan retak. Pada Penelitian A. Mursid *et al.* [1], berfokus terhadap efek dari ukuran dimensi lubang pada *padeye*. Penelitian M. Ali dan M. Fadillah [2] menganalisis kekuatan tarik pada *padeye* saat proses *lifting subsea structure*. Sementara penelitian yang membahas tentang perambatan retak, seperti penelitian A. M. Alshoaibi and Y. A. Fageehi [9], yang melakukan simulasi perambatan retak pada plat yang diberikan lubang untuk mengetahui pengaruh pemberian lubang terhadap arah perambatan retak.

Berdasarkan uraian di atas, terdapat beberapa *research gap* yang masih belum terisi. Pertama, literatur tentang *padeye* dan *lifting* yang masih didominasi oleh analisis kekuatan struktur *padeye*, belum mengkaji kegagalan *lifting* akibat perilaku perambatan retak. Kedua, berbagai penelitian mengenai perambatan retak lebih sering dilakukan pada geometri sederhana seperti pelat dan pipa, belum ada yang spesifik menggunakan geometri yang khas seperti *padeye*. Ketiga, belum ada penelitian yang mengintegrasikan aspek mekanika perpatahan dengan pembebanan aktual pada *padeye* saat proses pengangkatan.

Dari identifikasi gap tersebut, terdapat kebaruan (*novelty*) yang ditawarkan pada penelitian ini. (1) Objek penelitian menggunakan geometri spesifik (*padeye*); (2) Pendekatan integratif antara *fracture mechanics* dan *Finite Element Method* (FEM), yang menggabungkan teori *Stress Intensity Factor* dengan simulasi numerik FEM untuk memprediksi perambatan retak pada sambungan las di *padeye*, sebuah penelitian yang masih jarang ditemukan dalam lingkup analisis *padeye*; (3) Prediksi perambatan retak dengan variasi ukuran retak pada tiga variasi (5 mm, 10 mm, dan 20 mm); (4) Pembebanan statis aktual, karena simulasi dilakukan menggunakan data beban aktual (27,7 Metric Ton) dari proses pengangkatan yang sudah terjadi di lapangan.

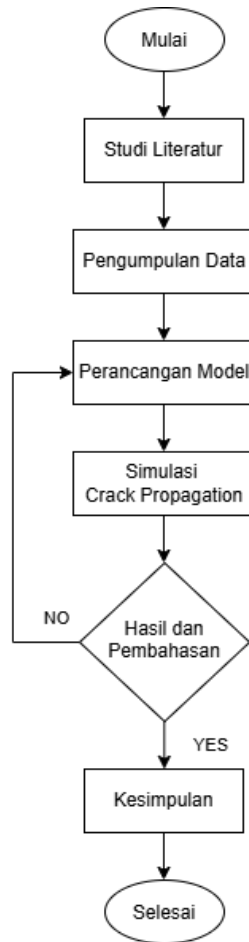
Berdasarkan latar belakang dan identifikasi gap di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah: (1) Bagaimana pengaruh pembebanan statis terhadap perambatan retak pada sambungan las di *padeye*? (2) Bagaimana pengaruh variasi panjang geometri *initial crack* (5 mm, 10 mm, dan 20 mm) terhadap perambatan retak? (3) Bagaimana pengaruh variasi *initial crack* terhadap nilai *Stress Intensity Factor* pada sambungan las *padeye*? Setelah rumusan masalah didapatkan, maka tujuan dari penelitian ini adalah: (1) Mengetahui seberapa besar perambatan retak yang terjadi pada sambungan las di *padeye* akibat pembebanan statis menggunakan *Finite Element Method*; (2) Menganalisis pengaruh variasi panjang retak awal terhadap perilaku perambatan retak; (3) Menganalisis pengaruh variasi *initial crack* terhadap nilai *Stress Intensity Factor*.

Agar penelitian terfokus, batasan masalah ditetapkan sebagai berikut: retak diasumsikan sudah terjadi pada sambungan las antara *padeye* dengan struktur, dengan variasi ukuran 5 mm, 10 mm, dan 20 mm. Penelitian tidak membahas bagaimana retak bisa muncul, tetapi bagaimana sifat perambatan retak terhadap pembebanan statis tanpa memperhitungkan beban dinamis. Simulasi juga dibatasi pada pengangkatan secara vertikal, tanpa mempertimbangkan proses *roll up* maupun *up ending*.

Hasil Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis. Secara teoritis, penelitian ini berkontribusi dalam memperkaya kajian mekanika fraktur pada struktur *padeye*, khususnya terkait karakterisasi *stress intensity factor* terhadap variasi ukuran retak awal pada sambungan las, mengingat pendekatan ini belum banyak dikaji dalam literatur *padeye* sebelumnya yang umumnya berfokus pada analisis tegangan konvensional tanpa mempertimbangkan aspek perambatan retak. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi dasar atau acuan bagi penelitian selanjutnya yang ingin mengembangkan analisis lebih lanjut, seperti kajian perambatan retak akibat beban siklik (*fatigue crack propagation*) menggunakan pendekatan *Paris Law*, sehingga cakupan analisis integritas struktur *padeye* dapat menjadi lebih komprehensif.

2 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh insiden kegagalan *lifting* pada proses *assembly* panel, yang diasumsikan terjadi akibat adanya retak pada sambungan las antara *padeye* dengan struktur panel. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, diagram alir penelitian ini terdiri atas beberapa tahapan. Tahap awal berupa studi literatur untuk memperoleh dasar teori dan aspek praktikal yang relevan, dilanjutkan dengan pengumpulan data yang diperlukan. Selanjutnya dilakukan perancangan model sebagai persiapan simulasi, kemudian simulasi dilakukan menggunakan *Finite Element Method* untuk memperoleh hasil. Tahap selanjutnya berupa analisis terhadap hasil simulasi apabila hasil gagal maka dapat dilakukan pengecekan kembali dari tahap perancangan model, jika tetap mengalami kegagalan maka akan dilakukan tindakan dalam simulasi. Jika analisis sudah dianggap berhasil maka akan diambil kesimpulan terhadap penelitian.



Gambar 1. Diagram Alir

2.1 Identifikasi Masalah

Tahap awal pada penelitian ini adalah identifikasi masalah. Permasalahan yang ditemukan dalam proses *lifting* adalah terjadinya insiden *padeye* yang terlepas dari struktur yang diangkat. Hal tersebut terjadi pada sambungan pengelasan antara *padeye* dan struktur yang diangkat.

Struktur yang diangkat merupakan panel dinding pada konstruksi lepas pantai dengan berat total 27.7 *metric ton*. Pengangkatan dilakukan menggunakan dua *padeye* yang dilas menggunakan proses FCAW (*Flux Cored Arc Welding*). Kegagalan terjadi saat panel sedang diangkat, dan salah satu *padeye* terlepas dari struktur panel. Penyebab dari insiden tersebut diasumsikan terjadi karena terdapat retakan pada sambungan pengelasan.

2.2 Studi Literatur

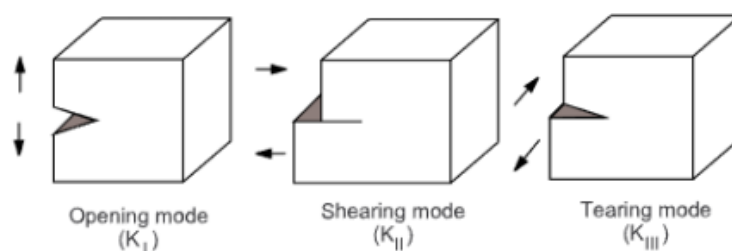
Pada tahap ini dilakukan pencarian, pengkajian, dan pendalaman terkait materi dan metode yang akan diteliti. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah analisis numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM) untuk memprediksi pertumbuhan retak pada sambungan las pada *padeye* terhadap beban statis saat proses pengangkatan.

Pada proses pengangkatan, *padeye* akan menerima pembebanan statis maupun pembebanan dinamis. Beban statis merupakan beban yang tidak berubah fungsinya terhadap waktu. Beban tersebut merupakan beban yang mencakup berat total struktur itu sendiri. Karena beban yang digunakan pada penelitian ini merupakan beban total struktur panel saja tanpa memperhitungkan beban dinamis, maka analisis dilakukan secara statis struktural. Analisis statis struktural menghitung pengaruh kondisi pembebanan tetap (statis) dengan mengabaikan beban yang berubah terhadap waktu seperti percepatan pengangkatan, ayunan beban, dorongan angin, dan efek kejut [10]. Analisis statis struktural ini yang nantinya akan dipakai dalam simulasi *crack propagation*.

Secara teoritis, perilaku retak pada material logam, termasuk pada sambungan las, dapat dijelaskan melalui teori *linear elastic fracture mechanics* (LEFM). Retak akan mengalami perambatan apabila energi regangan yang terlepas selama pertumbuhan retak telah mencukupi untuk memenuhi kebutuhan energi permukaan yang timbul akibat pertambahan luas retak. Besaran ini dikenal sebagai energi Griffith, atau laju pelepasan energi regangan kritis, yaitu suatu parameter material yang menunjukkan jumlah energi yang dilepaskan untuk setiap satuan pertambahan panjang retak. LEFM mengaitkan propagasi retak dengan konsentrasi tegangan di ujung retak, yang dikuantifikasi melalui faktor intensitas tegangan (*Stress Intensity Factor*, SIF). Besarnya SIF, yang dipengaruhi oleh geometri komponen, ukuran retak, dan pola pembebanan, menjadi penentu utama retak dapat merambat [11]. Untuk rumus dasar SIF, $K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a}$. Di mana σ merupakan tegangan yang bekerja, a merupakan dimensi dari *crack*, dan Y merupakan faktor pengkoreksi dimensi [12].

Untuk simulasi perambatan retak statis, terdapat dua kriteria fraktur yang umum digunakan, yaitu *J-integral* dan *Stress Intensity Factor*. Dalam penelitian ini digunakan kriteria *Stress Intensity Factor*, yang menyatakan bahwa retak akan merambat ketika *Stress Intensity Factor* melampaui nilai *fracture toughness* material ($SIF > K_{IC}$) [9]. Dimana, *fracture toughness* merupakan kemampuan material untuk menahan perambatan retak [12].

Dalam mekanika retak, perambatan retak dibedakan berdasarkan pergerakan relatif kedua bidang permukaan retak akibat beban yang bekerja. Terdapat tiga mode dasar perambatan retak dalam mekanika retak seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Skema *Fracture Mode* [13], yaitu Mode I – *opening* atau *tensile mode* (K_I), merupakan mode dimana beban bekerja secara tegak lurus terhadap bidang retak, Mode II – *shearing* atau *sliding mode* (K_{II}), terjadi saat beban bekerja secara sejajar pada bidang retak dan tegak lurus terhadap ujung retak, dan Mode III – *tearing* atau *out-of-plane mode* (K_{III}), terjadi saat beban bekerja sejajar dengan bidang retak dan ujung retak [12].



Gambar 2. Skema *Fracture Mode*

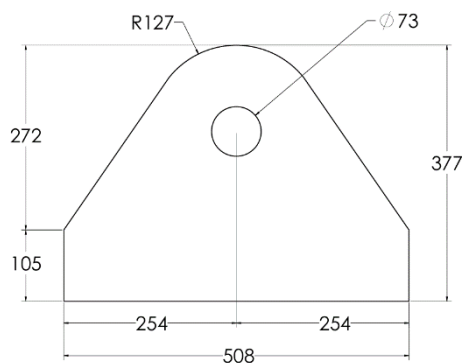
Pada penelitian ini, mode retak yang digunakan adalah Mode I (*opening mode*), mengingat beban yang bekerja pada struktur *padeye* berupa beban aksial tegak lurus terhadap bidang retak akibat proses pengangkatan, sehingga mekanisme pembukaan retak yang dominan terjadi sesuai dengan karakteristik Mode I. Pemilihan Mode I juga didasarkan pada lokasi retak yang berada pada *weld metal*, di mana konsentrasi tegangan tarik akibat pembebanan aksial lebih dominan dibandingkan komponen geser, sehingga Mode I merepresentasikan kondisi kritis pada struktur yang dianalisis.

2.3 Pengumpulan Data

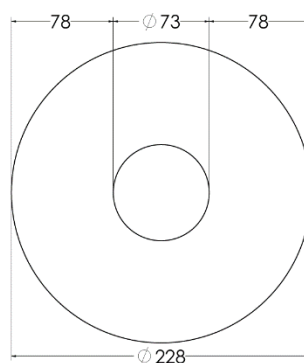
Pengumpulan Data ini digunakan untuk mendapatkan data mengenai penelitian yang akan dilakukan. Data yang dikumpulkan meliputi dimensi *padeye*, spesifikasi material *padeye*, desain sambungan pengelasan, beban struktur yang akan diangkat, dan nilai *fracture toughness* las-lasan.

2.3.1 Dimensi *Padeye*

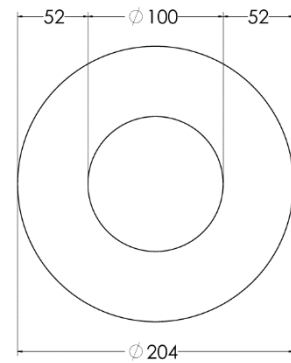
Dimensi pada *padeye* dibutuhkan dalam pemodelan *padeye*. Dimensi *padeye* meliputi panjang, tinggi, ketebalan, diameter lubang pengait, *cheek plate*, dan *spacer plate*.



Gambar 3. Dimensi *Padeye*



Gambar 4. Dimensi *Cheek Plate*



Gambar 5. Dimensi *Spacer Plate*

Gambar 3. Dimensi *Padeye*, menampilkan dimensi *padeye* dengan panjang 508 mm, tinggi 377 mm, ketebalan *base plate padeye* 40 mm, dan diameter *pinhole* 73 mm. Gambar 4. Dimensi *Cheek Plate*, menampilkan *cheek plate* dengan ketebalan 20 mm, diameter luar 223 mm, dan diameter dalam 73 mm. Pada Gambar 5. Dimensi *Spacer Plate*, menunjukkan ukuran *spacer plate* dengan ketebalan 10 mm, diameter luar 204 mm, dan diameter dalam 100 mm.

2.3.2 Spesifikasi Material *Padeye*

Material *padeye* yang digunakan adalah baja karbon (*carbon steel*) dengan grade S355, yang memiliki kekuatan luluh (*yield strength*) minimum yang bervariasi tergantung ketebalan. Spesifikasi material didasarkan pada hasil *mechanical testing* yang tercantum dalam *mill certificate* yang disesuaikan dengan standar EN 10025-2.

Tabel 1. Spesifikasi Material

Material	Thickness	SMYS	Tensile Strength
S355	40 mm	335 MPa	470-630 MPa

Pada Tabel 1. Spesifikasi Material, menampilkan material *padeye* menggunakan baja *structural steel* dengan standar EN 10025-2, dengan nilai *Specified Minimum Yield Strength* (SMYS) pada ketebalan 40 mm sebesar 335 MPa dan nilai *tensile strength* berkisar dari 470 MPa hingga 630 MPa [14].

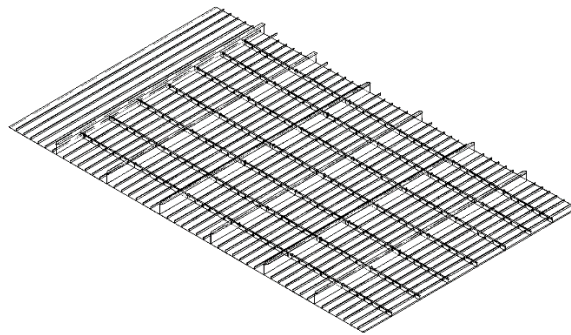
2.3.3 Beban Struktur Yang Akan Diangkat

Struktur yang akan diangkat pada proses *lifting* adalah struktur panel yang akan dilakukan instalasi sebagai dinding dari bangunan lepas pantai. Pada Tabel 2. Dimensi Struktur, menunjukkan dimensi dari struktur yang akan diangkat, dengan panjang 32.351 mm dan lebar 19.602 mm. Berat dari struktur panel ini sebesar 27.7 Metric Ton.

Tabel 2. Dimensi Struktur

Panjang	Lebar	Berat
32.351 mm	19.602 mm	27,7 Metric Ton

Struktur panel yang akan diangkat terdiri dari plat dasar dengan ketebalan 16 mm, *T-Beam*, dan *bulb plate* yang telah melalui proses pengelasan secara lengkap hingga ke tahap inspeksi. Struktur panel ditunjukkan pada Gambar 6.



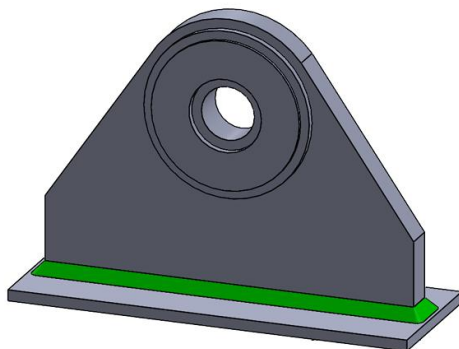
Gambar 6. Struktur Panel

2.3.4 Sambungan Pengelasan

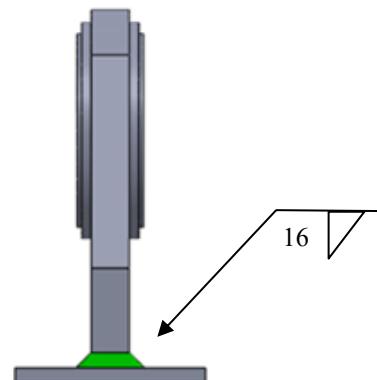
Padeye akan dilas pada struktur panel dengan proses pengelasan FCAW. Jenis pengelasan yang digunakan untuk menyambung antara *padeye* dan panel adalah *fillet weld* yang dilas secara *all around*, yaitu pengelasan dilakukan mengelilingi seluruh *padeye*. Desain sambungan berisi *leg size* dari pengelasan antara struktur panel dan *padeye*, dengan desain *leg size* sebesar 16 mm.

2.4 Perancangan Model

Sebelum melakukan simulasi, terlebih dahulu dilakukan pemodelan *padeye*. Pemodelan dilakukan berdasarkan data yang didapatkan dari *lifting method*. Komponen yang dirancang meliputi *padeye*, geometri las, dan *base plate*.



Gambar 7. Model Padeye



Gambar 8. Desain Sambungan Pengelasan

Pada Gambar 7. Model *Padeye*, menampilkan model *padeye* yang terdiri dari *main plate padeye*, *cheek plate*, dan *spacer plate*. Selain itu, ada sambungan las yang ditunjukkan dengan warna hijau.

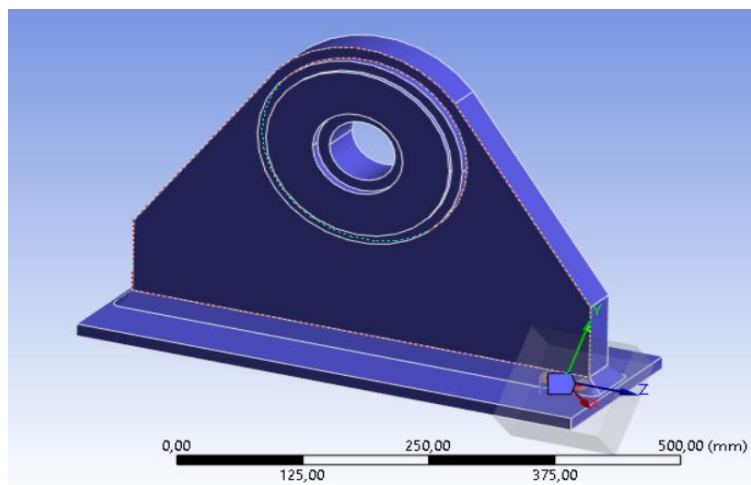
Pada Gambar 8. Desain Sambungan Pengelasan, menunjukkan detail sambungan las dengan *leg size* sebesar 16 mm.

2.5 Simulasi FEM

Setelah proses pemodelan *padeye*, tahap selanjutnya adalah simulasi menggunakan *Finite Element Method*. Tahapan simulasi ini diawali dengan pemilihan material, dilanjutkan dengan pemberian *initial crack* yang meliputi penentuan lokasi dan ukuran retak, serta pemberian nilai *fracture toughness*. Selanjutnya, dilakukan proses *meshing* untuk memunculkan retak beserta *node* dan *element*. Tahap berikutnya adalah pemberian *fixed support* dan nilai beban, dilanjutkan dengan proses *solving*. Simulasi *crack propagation* ini menghasilkan dua hasil utama, yaitu nilai *Stress Intensity Factor* dan *crack extension*.

2.5.1 Pemberian Initial Crack

Geometri retak pada penelitian ini diasumsikan terjadi di daerah *weld metal*, yakni material hasil pengelasan yang menghubungkan pelat *padeye* dengan struktur utama, dan diposisikan di bagian ujung sepanjang jalur las-lasan. Posisi ini didasarkan tingkat konsentrasi tegangan yang semakin besar nilainya di ujung sambungan la karena bentuk *all around weld*. Terdapat tiga jenis retak yang bisa dimodelkan menggunakan metode FEM: *arbitrary*, *semi-elliptical*, dan *pre-meshed crack* [9]. Tipe geometri retak yang digunakan dalam simulasi ini adalah *semi-elliptical surface crack* yang merupakan bentuk yang merepresentasikan *initial crack* di tengah material [15].



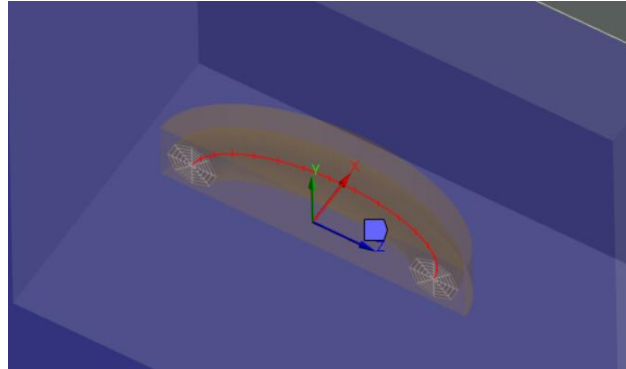
Gambar 9. Lokasi *Initial Crack*

Gambar 9. Lokasi *Initial Crack*, menunjukkan lokasi *initial crack* yang diletakkan pada ujung sambungan las antara struktur panel dan *padeye*. *Initial crack* ini diletakkan pada *weld surface* yang ditunjukkan dengan kotak transparan dan koordinat *initial crack* tersebut.

Dalam rangka mengkaji pengaruh ukuran retak terhadap distribusi tegangan dan perilaku *crack propagation*, ukuran retak divariasikan menjadi tiga ukuran panjang retak (*crack length*) masing-masing sebesar 5 mm, 10 mm, dan 20 mm. Ketiga variasi ukuran retak tersebut dipilih untuk merepresentasikan kondisi retak awal, sehingga dapat diamati bagaimana pengaruh pembebanan statis terhadap pertambahan ukuran retak dan perbedaan perambatan retak dengan ukuran retak awal yang berbeda.

Pemilihan variasi ukuran tersebut didukung oleh penelitian yang menemukan cacat pengelasan dari hasil pengujian *Non Destructive Test* (NDT) melalui metode *ultrasonic test* dan *penetrant test*, dengan ukuran

cacat ditemukan pada rentang 3 mm hingga 25 mm [16]. Dengan demikian, variasi ukuran retak 5 mm, 10 mm, dan 20 mm yang digunakan dalam penelitian ini merepresentasikan rentang ukuran cacat las yang secara realistis ditemukan pada hasil pengelasan aktual, sehingga dapat dijadikan acuan untuk ukuran retak awal dalam simulasi *crack propagation*.



Gambar 10. Bentuk Geometri Semi-elliptical Surface Crack

Gambar 10. Bentuk Geometri *Semi-elliptical Surface Crack*, menampilkan pemberian *initial crack* pada sambungan las antara struktur dengan *padeye* dengan bentuk *semi-elliptical*. Koordinat X menunjukkan kedalaman retak, koordinat Z menunjukkan panjang retak yang nantinya akan diberikan variasi ukuran, dan koordinat Y sebagai kedudukan *initial crack* terhadap bidang. Sementara itu, bentuk silinder dengan jaring berwarna putih pada ujung *crack* menunjukkan *largest contour radius* sebagai parameter perhitungan SIF di ujung retak.

2.5.2 Pemberian Nilai *Fracture Toughness*

Penentuan nilai *fracture toughness* (K_{IC}) diberikan sebagai kriteria kegagalan, yaitu retak akan merambat apabila nilai *stress intensity factor* yang dihasilkan melebihi nilai *fracture toughness* material. Nilai *fracture toughness* yang digunakan pada penelitian ini sebesar $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, yang diperoleh dari hasil pengujian *Crack Tip Opening Displacement* (CTOD). Nilai tersebut kemudian dikonversi menjadi $948,68 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, yang selanjutnya diinput sebagai nilai *critical rate* untuk digunakan dalam simulasi.

2.5.3 Pemilihan Material

Tahap awal simulasi dimulai dengan menentukan *mechanical properties* material. Pemilihan material sangat penting dilakukan karena akan menentukan perilaku dan kekuatan material saat disimulasikan. Pemilihan *material properties* disesuaikan dengan spesifikasi material yang sudah dibahas pada 2.3.2 Spesifikasi Material *Padeye*.

Tabel 3. Material Properties

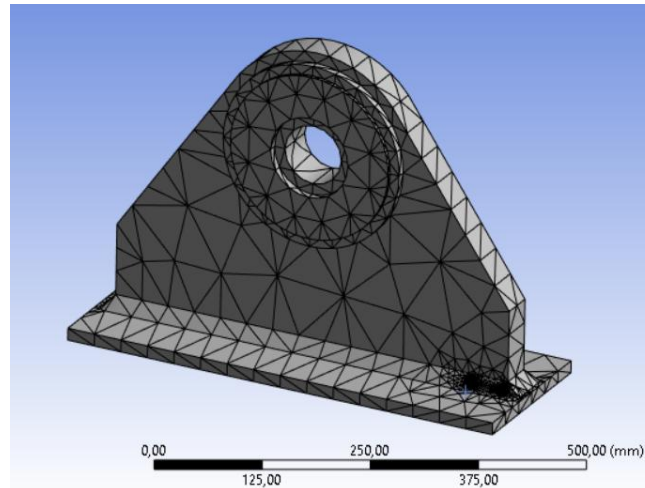
<i>Property</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
<i>Density</i>	7850	Kg/m^3
<i>Tensile Yield Strength</i>	355	MPa
<i>Tensile Ultimate Strength</i>	470	MPa

Pada Tabel 3. *Material Properties*, menunjukkan properti material untuk model yang akan dilakukan simulasi dengan nilai *density* 7850 Kg/m^3 , *Tensile Yield Strength* sebesar 355 MPa, dan *Tensile Ultimate Strength* 470 MPa.

2.5.4 Proses *Meshing*

Metode *meshing* dilakukan menggunakan tambahan *meshing method*. Tipe elemen menggunakan *meshing*

tetrahedrous (4 sisi segitiga) untuk mempermudah *meshing* yang kompleks dan sebagai syarat untuk model simulasi dengan *semi-elliptical surface crack* [17]. *Element order* pada *meshing* menggunakan *quadratic* agar tegangan bisa bervariasi dalam satu elemen sehingga menghasilkan data yang lebih akurat [15]. *Element order* yang digunakan pada proses *meshing* menggunakan *program controlled* agar sistem yang mengatur kemampuan *meshing* untuk menghindari kemungkinan *error* ketika *running* program.

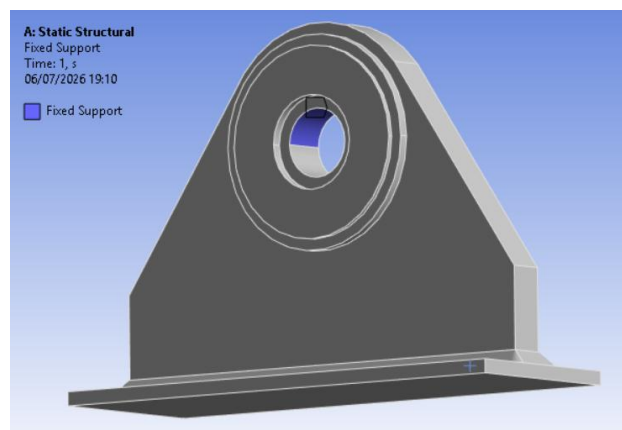


Gambar 11. *Meshing Method*

Pada Gambar 11. *Meshing Model*, menampilkan hasil *meshing* dengan tipe elemen *tetrahedrous* yang ditunjukkan dengan bentuk segitiga. Pada bagian ujung las menunjukkan *meshing* kompleks berwarna hitam yang merupakan *meshing model* untuk *initial crack*.

2.5.5 Pemberian *Fixed Support*

Fixed support di sini digunakan sebagai lawan dari arah gaya berat yang mengarah ke bawah. *Fixed support* diasumsikan sebagai *hook* dari *crane* yang sedang mengangkat *padeye*.

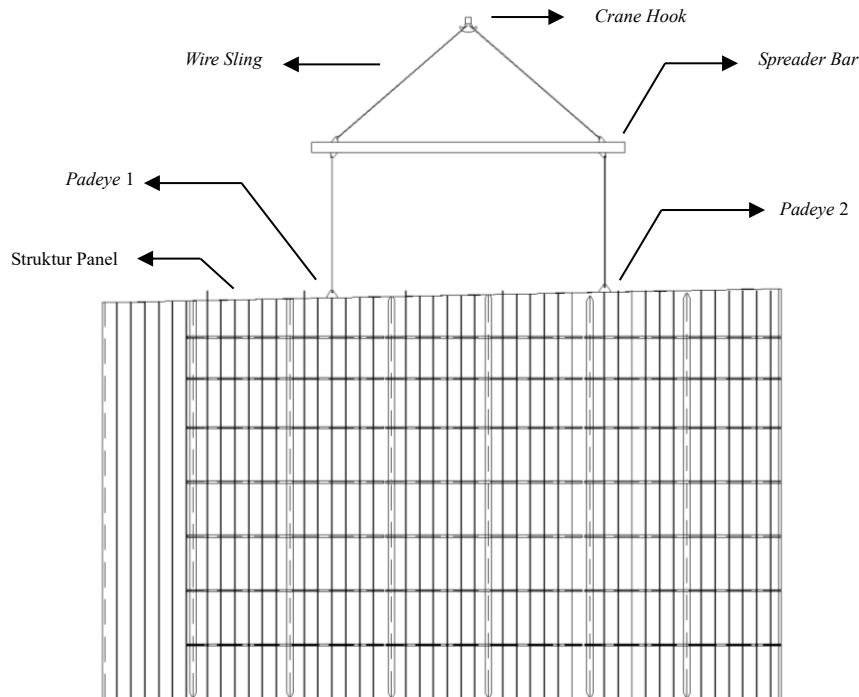


Gambar 12. *Fixed Support*

Pada Gambar 12. *Fixed Support*, menampilkan pemberian *fixed support* yang diletakkan pada bagian atas *pinhole* dengan ditandai warna ungu.

2.5.6 Pemberian Beban

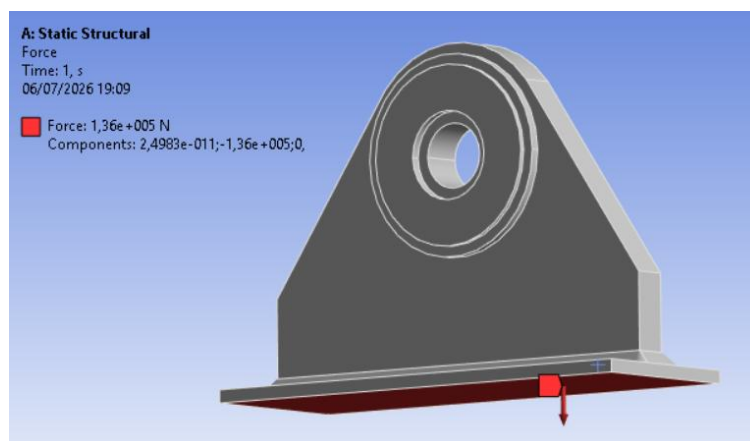
Pemberian beban dalam simulasi tidak menampilkan seluruh model struktur panel, beban hanya akan direpresentasikan dengan plat yang dilas dengan *padeye*.



Gambar 13. Ilustrasi Lifting

Pada Gambar 13. Ilustrasi *Lifting*, menampilkan ilustrasi pengangkatan dan komponen yang digunakan seperti *padeye*, *wire sling*, dan *spreader bar*. Proses pengangkatan struktur panel dengan berat total 27,7 metric ton dilakukan menggunakan dua *padeye*. Beban yang diterapkan pada simulasi merupakan beban aktual yang mengacu pada *lifting method* yang telah dilaksanakan di lapangan.

Pada simulasi FEM, pengujian hanya akan menggunakan satu *padeye* sehingga total berat dibagi dua dan mendapatkan hasil 13,85 metric ton, dengan asumsi pembagian beban merata ke kedua *padeye*. Selanjutnya beban panel dikonversikan menjadi gaya berat dengan mengalikan massa terhadap percepatan gravitasi ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), sehingga diperoleh gaya sebesar 135,8685 kN dan dibulatkan menjadi 136 kN.



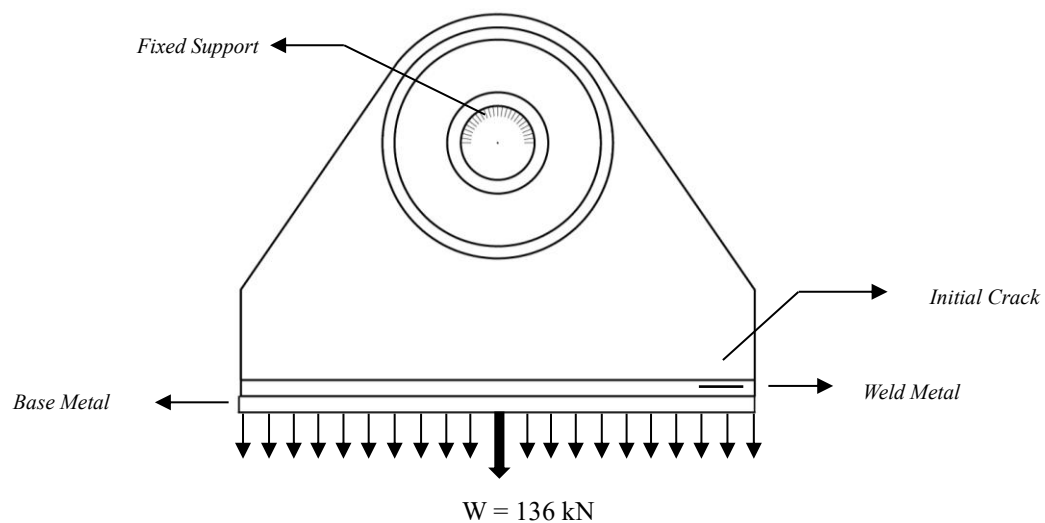
Gambar 14. Pemberian Arah Beban

Gambar 14. Pemberian Arah Beban, menampilkan gaya yang diaplikasikan pada model simulasi sebagai beban yang bekerja secara vertikal ke arah bawah (sumbu -Y) sesuai dengan arah gravitasi bumi dengan simbol panah berwarna merah.

2.5.7 Simulasi Crack Propagation

Setelah proses pemodelan geometri, penetapan kondisi batas, dan penentuan *meshing* selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah menjalankan simulasi untuk melihat perambatan *crack* dengan gaya statis yang diberikan.

Proses simulasi dilakukan dengan menyelesaikan sistem persamaan linier yang merepresentasikan hubungan antara gaya, tegangan, dan deformasi pada seluruh elemen model *padeye*. Parameter utama yang dianalisis dalam simulasi ini nilai *Stress Intensity Factor* dan perambatan retak yang dapat dilihat hasil *crack extension probe* pada daerah retak akibat gaya berat sebesar 136 kN yang diaplikasikan sebagai beban terpusat pada lubang *padeye* ke arah sumbu -Y.



Gambar 15. Ilustrasi Model

Pada Gambar 15. Ilustrasi Model, menampilkan ilustrasi model *padeye* dan keterangan komponen yang akan dilakukan simulasi. *Fixed support* diberikan pada bagian atas *pinhole* yang diasumsikan sebagai *hook* yang dikaitkan ke *padeye*. *Initial crack* terjadi di ujung *weld metal* yang akan menjadi penelitian utama perambatan retak. *Base metal* sebagai komponen yang akan mewakili struktur panel yang akan diangkat dengan pemberian beban ke arah bawah yang disimbolkan W sebagai gaya berat sebesar 136 kN.

2.5.8 Validasi Analisis Perambatan Retak

Keberhasilan atau kegagalan simulasi dapat dilihat dari indikator hasil yang ditampilkan oleh *software* berbasis *Finite Element Method*. Simulasi dinyatakan gagal apabila terjadi kesalahan (*error*) atau tidak menghasilkan *output*, yang umumnya disebabkan oleh kesalahan dalam menetapkan *boundary condition*, kesalahan dalam proses *meshing*, dan kesalahan *analysis setting*. Dalam kondisi tersebut, penelitian dikembalikan ke tahap pemodelan untuk meninjau ulang model *padeye* hingga ke parameter analisis.

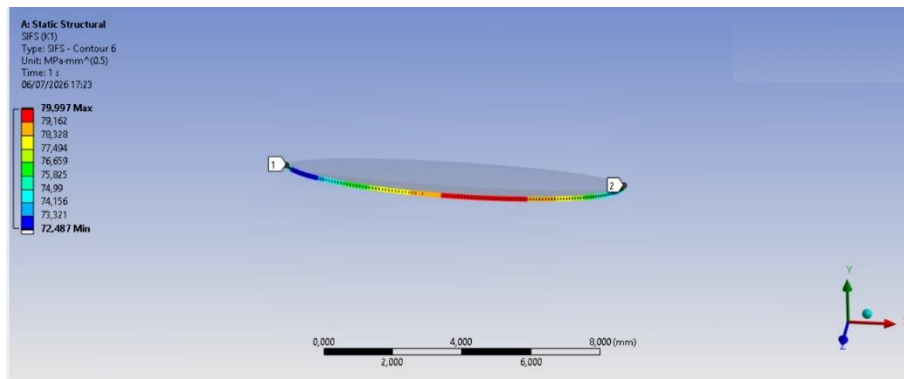
Apabila retak tidak merambat karena nilai SIF berada di bawah K_{IC} , maka akan dilakukan validasi terhadap kriteria kegagalan LEFM. Validasi dilakukan dengan menurunkan nilai K_{IC} hingga berada di bawah nilai SIF hasil simulasi. Jika retak kemudian merambat, hal ini membuktikan kesesuaian mekanisme perambatan retak dengan teori LEFM, yaitu retak dapat merambat jika nilai SIF lebih kecil dari nilai K_{IC} . Setelah simulasi dinyatakan berhasil, penelitian dilanjutkan ke tahap analisis hasil dan pembahasan untuk memperoleh kesimpulan.

3 Hasil dan Pembahasan

Simulasi perambatan retak dilakukan dengan metode *stress intensity factor* berdasarkan kriteria kegagalan *linear elastic fracture mechanics*. Analisis dilakukan terhadap tiga variasi *initial crack*, yaitu 5 mm, 10 mm, dan 20 mm dengan beban 136 kN. Hasil utama yang diperoleh dari simulasi adalah nilai SIF dan panjang perambatan retak.

3.1 Hasil Variasi Retak Awal 5 mm

Hasil SIF untuk variasi retak 5 mm, dengan nilai minimum sebesar $72,487 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ dan nilai maksimum sebesar $79,997 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Nilai SIF maksimum tersebut masih berada jauh di bawah nilai K_{IC} sebesar $948,68 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, sehingga kriteria kegagalan $\text{SIF} > K_{IC}$ tidak terpenuhi dan retak pada variasi ukuran 5 mm tidak mengalami perambatan.

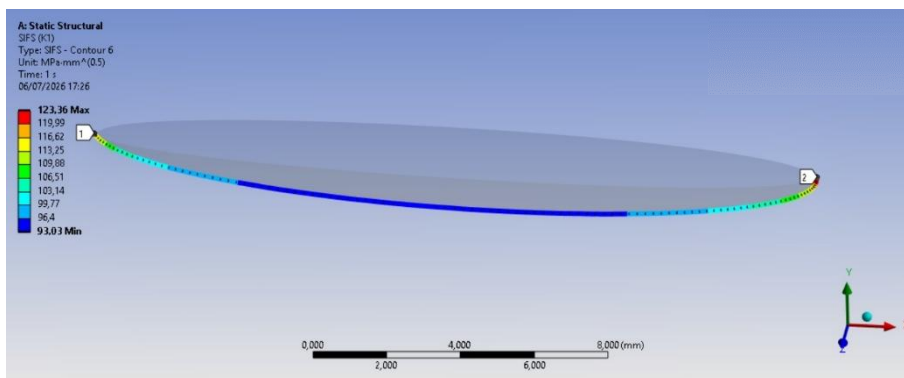


Gambar 16. Nilai SIF Variasi 5 mm

Gambar 16. Nilai SIF Variasi 5 mm, menampilkan nilai SIF dari hasil simulasi yang menunjukkan nilai SIF minimum dan maksimum pada geometri retak. Warna biru menunjukkan nilai SIF minimum dan warna merah menunjukkan nilai SIF maksimum.

3.2 Hasil Variasi Retak Awal 10 mm

Nilai SIF untuk variasi retak 10 mm dengan nilai minimum sebesar $93,03 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ dan nilai maksimum sebesar $123,36 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Sama seperti pada variasi 5 mm, nilai SIF maksimum ini masih jauh berada di bawah nilai K_{IC} sebesar $948,68 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, sehingga kriteria kegagalan $\text{SIF} > K_{IC}$ belum terpenuhi dan retak pada variasi ukuran 10 mm juga tidak mengalami perambatan.

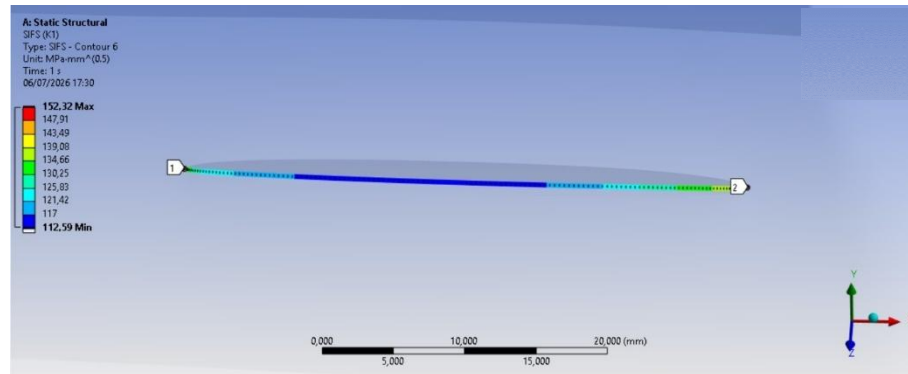


Gambar 17. Nilai SIF Variasi 10 mm

Pada Gambar 17. Nilai SIF Variasi 10 mm, menampilkan nilai SIF hasil simulasi pada geometri retak, dengan nilai minimum ditunjukkan oleh warna biru dan nilai maksimum ditunjukkan oleh warna merah.

3.3 Hasil Variasi Retak Awal 20 mm

Nilai SIF untuk variasi retak 20 mm, dengan nilai minimum sebesar $112,32 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ dan nilai maksimum sebesar $152,32 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Sama seperti pada variasi 5 mm dan 10 mm, nilai SIF maksimum ini masih jauh berada di bawah nilai K_{IC} sebesar $948,68 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, sehingga kriteria kegagalan $SIF > K_{IC}$ belum terpenuhi dan retak pada variasi ukuran 20 mm juga tidak mengalami perambatan.



Gambar 18. Nilai SIF Variasi 20 mm

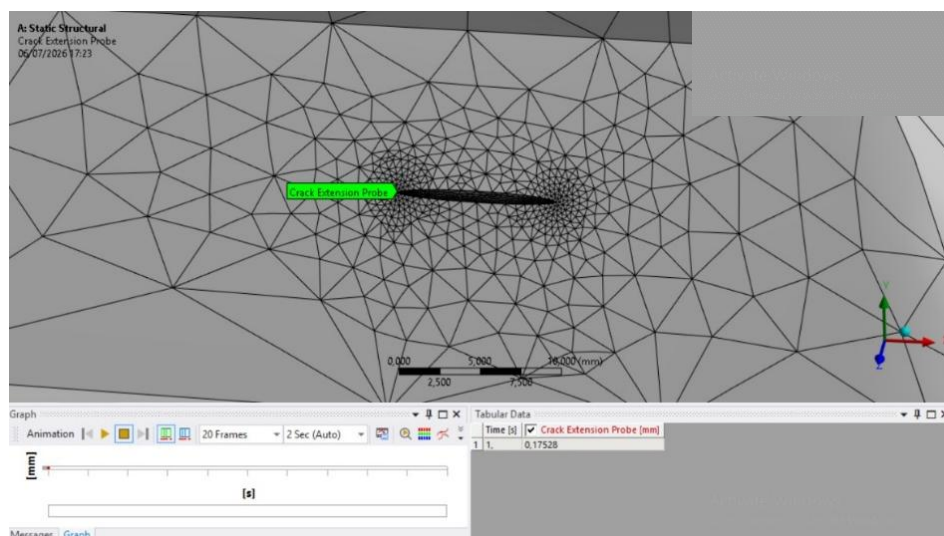
Gambar 18. Nilai SIF Variasi 20 mm, menampilkan nilai SIF hasil simulasi pada geometri retak, warna biru menunjukkan nilai SIF minimum dan warna merah menunjukkan nilai SIF maksimum.

3.4 Hasil Validasi Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Untuk memverifikasi kesesuaian hasil tersebut dengan kriteria perambatan retak dalam *linear elastic fracture mechanics*, yaitu retak akan merambat apabila nilai *stress intensity factor* melebihi nilai *fracture toughness*, maka dilakukan pengujian tambahan dengan cara menurunkan nilai K_{IC} hingga berada di bawah nilai SIF hasil simulasi. Nilai K_{IC} yang digunakan pada pengujian ini ditetapkan sebesar $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ untuk seluruh variasi ukuran retak.

3.4.1 Perambatan Retak Variasi 5 mm

Setelah dilakukan penurunan nilai *fracture toughness* menjadi $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, dengan beban yang sama 136 kN retak mengalami perambatan sepanjang 0,17528 mm.

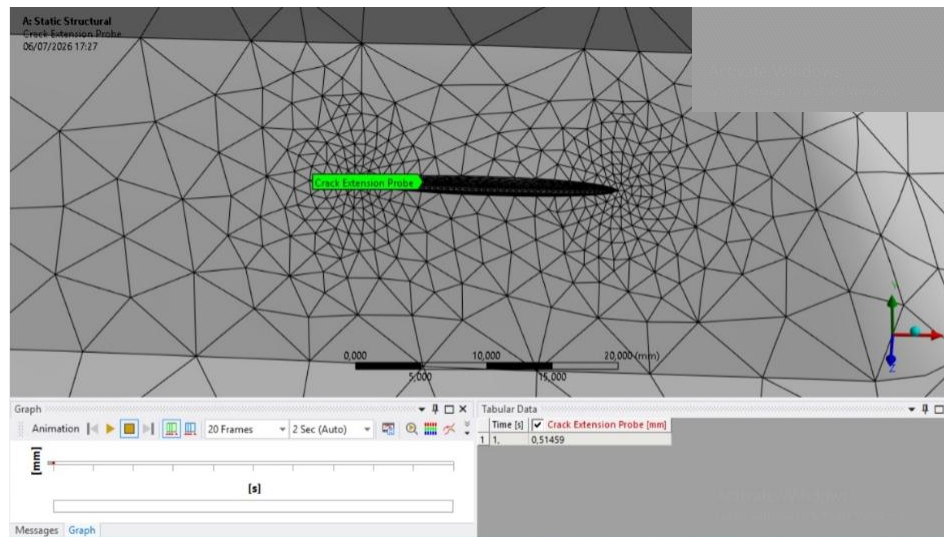


Gambar 19. Hasil Perambatan Retak Variasi 5 mm

Gambar 19. Hasil Perambatan Retak Variasi 5 mm, menampilkan *crack extension probe* sebagai fitur untuk memantau hasil perambatan retak untuk variasi *initial crack* 5 mm.

3.4.2 Perambatan Retak Variasi 10 mm

Pada variasi *initial crack* 10 mm, hasil simulasi menunjukkan retak merambat dengan perambatan sebesar 0,51459 mm. Hasil ini lebih besar dari variasi retak 5 mm yang hanya merambat sebesar 0,17528 mm.

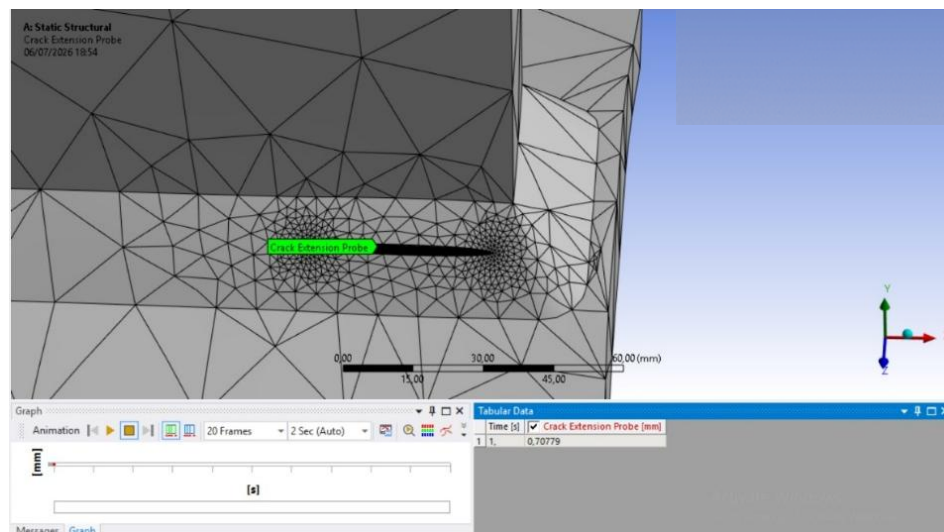


Gambar 20. Hasil Perambatan Retak Variasi 10 mm

Pada Gambar 20. Hasil Perambatan Retak Variasi 10 mm, menampilkan *crack extension probe* hasil simulasi yang menunjukkan panjang perambatan retak setelah dilakukan penurunan nilai K_{IC} menjadi di bawah nilai SIF.

3.4.3 Perambatan Retak Variasi 20 mm

Pada variasi *initial crack* 20 mm, retak merambat sepanjang 0,70779 mm seperti yang ditunjukkan pada gambar 21. Hasil perambatan retak pada variasi 20 mm ini lebih besar dari dua variasi sebelumnya, variasi 10 mm yang merambat sepanjang 0,51459 dan variasi 5 mm yang hanya merambat sepanjang 0,17528 mm.

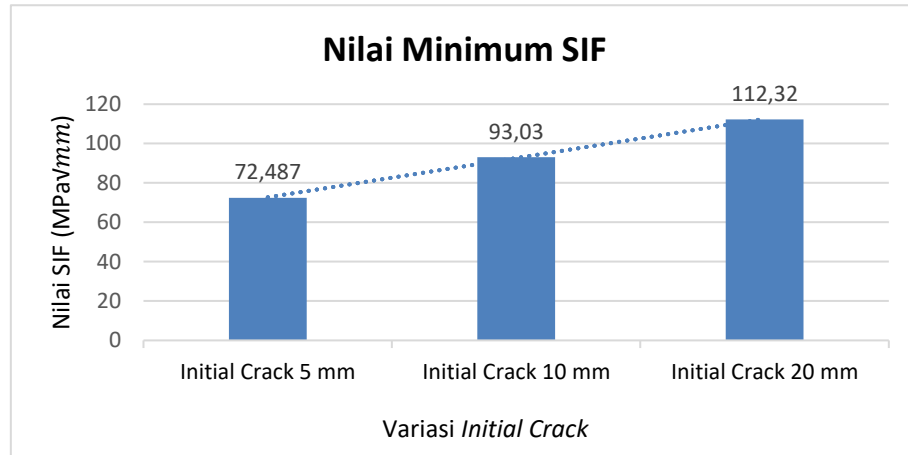


Gambar 21. Hasil Perambatan Retak Variasi 20 mm

Pada Gambar 21. Hasil Perambatan Retak Variasi 20 mm, menampilkan hasil *crack extension probe* sebagai fitur untuk memantau perambatan retak dan memberikan hasil perambatan retak.

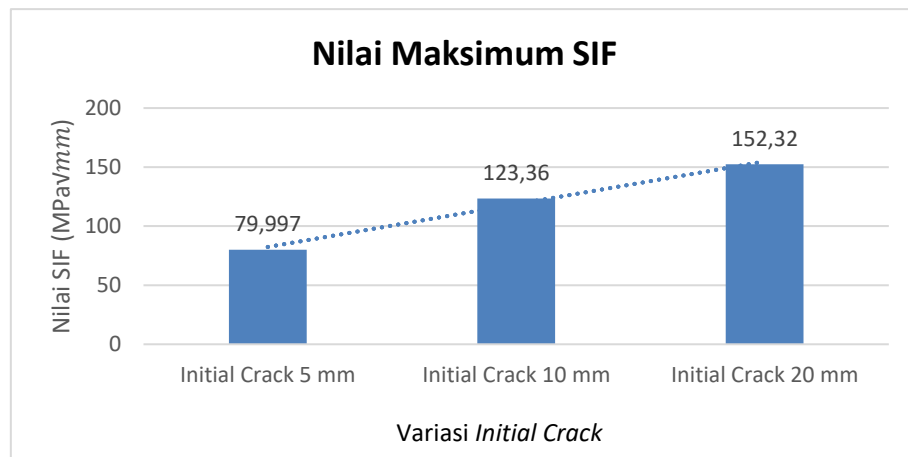
3.5 Analisis Hasil Perambatan Retak

Setelah dilakukan penurunan nilai K_{IC} menjadi $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, didapatkan hasil bahwa retak merambat untuk masing-masing variasi *initial crack*. Hasil perambatan ini didasarkan teori yang menyatakan bahwa retak akan merambat jika nilai $SIF > K_{IC}$. Hasil perambatan ini juga berkaitan dengan nilai SIF yang mempengaruhi panjang perambatan retak.



Gambar 22. Grafik Nilai Minimum SIF

Pada Gambar 22. Grafik Nilai Minimum SIF, menampilkan grafik nilai minimum *stress intensity factor* untuk masing-masing variasi retak. Pada variasi retak 5 mm nilai minimum SIF sebesar $72,487 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, untuk variasi retak 10 mm sebesar $93,03 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, dan nilai minimum SIF untuk variasi retak 20 mm sebesar $112,32 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$.

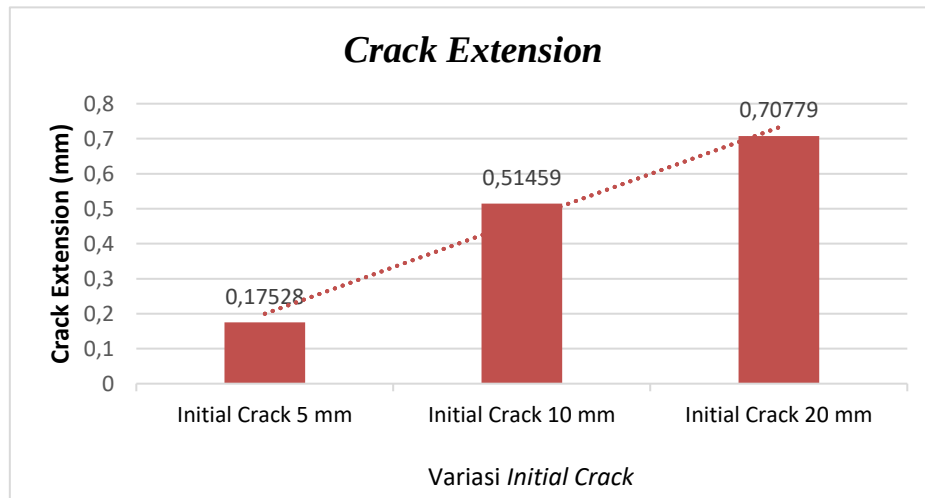


Gambar 23. Grafik Nilai Maksimum SIF

Nilai maksimum *stress intensity factor* seperti ditunjukkan pada Gambar 23. Grafik Nilai Maksimum SIF, menampilkan grafik perbedaan nilai maksimum SIF dari hasil simulasi *crack propagation*, dengan nilai maksimum SIF pada variasi 5 mm sebesar $79,997 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, nilai maksimum SIF untuk variasi 10 mm sebesar $123,36 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, dan nilai maksimum SIF pada variasi 20 mm sebesar $152,32 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$.

Berdasarkan hasil nilai minimum dan maksimum SIF pada variasi 5 mm, 10 mm, dan 20 mm, dapat dilihat bahwa semakin kecil ukuran *initial crack* maka semakin kecil nilai SIF dan semakin besar ukuran *initial crack* maka semakin besar pula nilai SIF. Hasil ini menunjukkan bahwa ukuran *initial crack* mempengaruhi nilai SIF sesuai dengan rumus SIF, $K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a}$.

Selanjutnya, ukuran perambatan retak dapat dilihat melalui hasil *crack extension* yang menampilkan penambahan panjang retak setelah model diberikan beban.



Gambar 24. Grafik *Crack Extension*

Pada Gambar 24. Grafik *Crack Extension*, menampilkan grafik pertambahan panjang retak untuk masing-masing variasi *initial crack*. Pada variasi *initial crack* 5 mm, retak merambat sepanjang 0,17528 mm; pada variasi *initial crack* 10 mm, retak merambat sepanjang 0,51459 mm; sedangkan pada variasi *initial crack* 20 mm retak, merambat sepanjang 0,70779 mm.

Hasil perambatan retak ini menunjukkan bahwa panjang pertambahan retak itu dipengaruhi oleh ukuran *initial crack*, yang berpengaruh terhadap nilai SIF. Dengan demikian, dapat dilihat bahwa semakin besar ukuran *initial crack* semakin besar pula nilai SIF, dan semakin besar nilai SIF, semakin panjang perambatan retak.

4 Kesimpulan

Berdasarkan teori LEFM, retak akan merambat apabila nilai SIF melebihi nilai K_{IC} . Pada penelitian ini, nilai SIF maksimum untuk masing-masing variasi *initial crack* (5 mm, 10 mm, dan 20 mm) adalah $79,997 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, $123,36 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, dan $152,32 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Karena seluruh nilai SIF berada jauh di bawah nilai K_{IC} yaitu sebesar $948,68 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, maka retak tetap berada dalam kondisi stabil dan tidak mengalami perambatan pada pembebanan aktual sebesar 136 kN. Dengan demikian, sambungan las antara *padeye* dan struktur panel tidak mengalami kegagalan akibat perambatan retak pada kondisi pembebanan yang dianalisis.

Untuk memvalidasi kesesuaian model simulasi terhadap teori bahwa perambatan retak hanya terjadi apabila SIF lebih besar dari K_{IC} , dilakukan simulasi tambahan dengan menurunkan nilai K_{IC} menjadi $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Hasil simulasi menunjukkan perambatan retak dapat merambat dengan panjang yang berbeda-beda sesuai variasi panjang *initial crack*, yaitu sebesar 0,17528 mm pada variasi 5 mm, 0,51459 mm pada variasi 10 mm, dan 0,70779 mm pada variasi 20 mm.

Hasil ini mengonfirmasi bahwa model simulasi yang digunakan telah bekerja sesuai dengan kaidah teori LEFM, yaitu retak akan merambat ketika nilai SIF melebihi nilai K_{IC} . Selain itu, hasil pengujian ini juga menunjukkan bahwa panjang retak awal turut memengaruhi besar perambatan retak, di mana semakin besar panjang retak awal, semakin besar pula nilai perambatan retak yang terjadi.

5 Daftar Pustaka

- [1] A. Mursid *et al.*, “Effect of Lifting Lug Hole Diameter Size on Strength Performance in Ship Block Lifting Process,” *Indones. J. Marit. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 42–49, 2025.
- [2] M. Ali and A. Fadillah, “Analysis Of Lifting Strength Of Padeye Subsea Structure Using Finite Element Method,” *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. 9, no. 1, pp. 193–199, 2024.
- [3] S. Sevda, “Study and Sizing of Components for Lifting Offshore Structures,” Politecnico di Torino, 2024.
- [4] S. Marsudi, “Analisa Cacat Pengelasan Dengan Menggunakan Teknik Pengelasan Down Hand pada Pelat Lambung (Hull) Kapal,” *J. Inov. Sains dan Teknol. Kelaut.*, vol. 2, no. 1, pp. 30–34, 2021.
- [5] M. S. Kuts, L. A. Andrienko, and S. Wang, “Prediction of Crack Propagation Rate and Stress Intensity Factor of Fatigue and Welded Specimen with a Two-Dimensional Finite Element Method Prediction of Crack Propagation Rate and Stress Intensity Factor of Fatigue and Welded Specimen with a Two- Dimensional Finite Element Method”, doi: 10.1088/1757-899X/834/1/012008.
- [6] W. Hilmansyah, D. Puspitasari, and T. Davareza, “Analisis Kekuatan Lifting Lug pada Proses Dismantling Chimney Berbasis Finite Element Analysis,” vol. 10, no. 10, pp. 662–670, 2025.
- [7] A. Kashem, M. Yahia, and M. Shahjalal, “1 st Global Research and Innovation Conference 2025 , Recent Developments And Challenges In Fracture Mechanics – Based Fatigue Life Prediction,” no. April, pp. 1202–1237, 2025, doi: 10.63125/qgtnp591.
- [8] M. R. Syahputra and I. H. Rambe, “Modelling And Numerical Analysis For Crack Propagation In Combining Concrete With 25 % Feather Shell Powder Using Finite Element Method,” vol. 19, no. 4, pp. 2419–2430, 2025.
- [9] A. M. Alshoaibi and Y. A. Fageehi, “Finite Element Simulation of a Crack Growth in the Presence of a Hole in the Vicinity of the Crack Trajectory,” 2022.
- [10] G. Belsare, T. Narkhede, and P.J. Salunke, “Static Structural Analysis and Bridge Modeling Using ANSYS,” vol. 10, no. 4, 2021, doi: 10.15680/IJRSET.2021.1004017.
- [11] J. Zhou, F. Xian, and J. Shen, “Mechanisms during Strain Rate-Dependent Crack Propagation of Copper Nanowires Containing Edge Cracks,” 2023.
- [12] R. M. Kirby and J. Hochhalter, “SIFBench : An Extensive Benchmark for Fatigue Analysis,” no. NeurIPS, 2025.
- [13] A. D. Canonsburg, “Fracture Analysis Guide,” no. January, 2025.
- [14] “European Committee for Standardization, Hot rolled products of structural steels — Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels, EN 10025-2:2019, 2019.”
- [15] D. Siebert, “Numerical Verification of Stress Intensity Factors at Semielliptical Surface Cracks at the Weld Toe of Cruciform Joints,” pp. 2443–2463, 2025, doi: 10.1111/ffe.14605.
- [16] S. Muddin and M. N. Hidayat, “Analisis Cacat Sambungan Pengelasan Smaw 3g Pada Pelat Baja St 60 Dengan Variasi Arus Menggunakan Metode Ndt (Nondestructive Test) Ultrasonic Test Dan Penetran Test,” no. 29, pp. 50–59, 2020.
- [17] H. Saeed, R. Vancoillie, F. M. Sofiani, and W. De Waele, “Mode I Stress Intensity Factor Solutions for Cracks Emanating from a Semi-Ellipsoidal Pit,” 2024.