

ANALISIS CFD PLAT AISI 4340 TERHADAP PERAMBATAN RETAK DAN UMUR FATIGUE DENGAN METODE SMART CRACK GROWTH

¹Silvia Casmadi, ^{2*}Mohamad Yamin, ³Sri Poernomo Sari

^{1,2,3}Fakultas Teknologi Industri Universitas Gunadarma

Jl. Margonda Raya No. 100, Depok 16424, Jawa Barat

¹silviacasmadi96@gmail.com, ^{2*}mohay@staff.gunadarma.ac.id, ³sri_ps@staff.gunadarma.ac.id

Abstrak

Mekanisme perambatan retak penting untuk dikaji lebih dalam terutama pada material yang diterapkan untuk pesawat komersial dan militer karena menyangkut keselamatan manusia. Penelitian ini membahas tentang analisis Crack Propagation dari parameter Stress Intensity Factor (SIF) akibat posisi lubang dan variasi geometri bentuk. Tiga spesimen material AISI 4340 dengan posisi dan bentuk lubang yang berbeda dianalisis menggunakan metode Smart Crack Growth pada software ANSYS Computational Fluid Dynamics. Hasil penelitian menunjukkan bahwa posisi lubang dan geometri bentuk sangat mempengaruhi kekuatan benda uji terhadap nilai SIF (K). Hasilnya sesuai dibandingkan dengan hasil eksperimen dan numerik dalam literatur.

Kata Kunci: AISI 4340 Steel; ANSYS; CFD; Smart Crack Growth; Stress Intensity Factor

Abstract

Mechanism of crack propagation is important to be studied. Especially for material that are applied for commercial and military because it involve human safety. This study discussed the crack propagation analysis of the Stress Intensity Factor (SIF) as a parameter due to hole and geometry position. There are three specimen used material AISI 4340 with variety of hole and geometry. This material analysed by Smart Crack Growth method in ANSYS Computational Fluid Dynamics software. The result showed that position of the hole and geometry greatly affect the strength of the SIF (K) value. This results is also agreed with experimental and numerical result in previous research.

Keywords: : AISI 4340 Steel Plate; ANSYS; CFD; Smart Crack Growth; Stress Intensity Factor

PENDAHULUAN

Fenomena kecelakaan pesawat terbang yang terjadi di 20 tahun terakhir telah merenggut banyak korban jiwa. Salah satu penyebabnya ialah terjadi retakan pada struktur material komponen pendukung pada pesawat terbang. Dengan adanya fenomena tersebut, penelitian tentang analisis kegagalan struktur kekuatan material dan prediksi umur lelah mulai banyak dibahas [1][2]. Kegagalan yang disebabkan oleh struktur material yang

tidak mampu menahan batas beban mengakibatkan retakan yang merambat dan akhirnya menjadi patah. Selain itu, pada bagian pesawat seperti badan, sayap dan ekor pesawat terbang menggunakan sambungan. Penggabungan tersebut menggunakan rivet, bolts, pins yang mengakibatkan pengurangan luasan permukaan karena adanya lubang sambungan [3]. Perancangan toleransi kerusakan digunakan pada industri penerbangan, militer dan kelautan demi keselamatan dan pendapatan ekonomi. Keadaan komponen

teknik dan kondisi pembebanan yang cukup rumit, karenanya banyak dilakukan pendekatan umum maupun spesifik untuk memprediksi pertumbuhan retakan. Analisis metode elemen hingga dan prinsip mekanika fraktur telah banyak digunakan [4]. Metode elemen hingga telah diimplementasikan untuk analisis perambatan retak akibat fatik berdasarkan teori *linear elastic fracture mechanics* (LEFM). Pertumbuhan retak dengan simulasi secara numerik dengan berbagai perangkat lunak bahasa pemrograman (MATLAB, Visual FORTRAN), 2D (FRANC2D) maupun 3D ANSYS APDL 19.2 dapat menentukan parameter penting untuk prediksi umur fatik dan jalur retakan yang terjadi [5][6].

Stress Intensity Factor (SIF) merupakan parameter penting untuk prediksi umur fatik. Jarak SIF dapat memprediksi jalur perambatan retak dan estimasi jumlah siklus (*number of cycle*) [7]. Material akan gagal ketika SIF melewati batas nilai ketangguhan material. Kemudian retakan akan berkembang dan merambat dengan tidak stabil yang mengakibatkan terjadinya patahan total. Perhitungan SIF dapat dilakukan dengan teknik teoritis, eksperimen dan numerik [8]. Penelitian tentang pertumbuhan retak hanya berfokus pada retakan mode I. Pada kenyataannya banyak kasus kegagalan dari retakan pada mode I-II (campuran) retakan dimulai karena adanya regangan plastik yang disebabkan tegangan siklik sedangkan langkah perambatan retakan hasil dari tegangan tarik [9] [10].

Penyelidikan efek dari adanya beberapa

cutouts dengan berbagai bentuk dan posisi, dapat menganalisis jalur dari *fatigue crack growth* (FCG) yang akan terjadi. Selain penelitian eksperimen, dilakukan studi numerik dengan metode elemen hingga. Studi tersebut dapat menjelaskan bahwa bentuk dan posisi cutouts dapat mengubah jalur FCG dan umur fatik [11].

Berdasarkan studi pustaka yang telah dilakukan, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh posisi dan bentuk lubang (*hole*) terhadap kekuatan material AISI 4340 dengan parameter faktor intensitas tegangan (SIF). Penelitian sebelumnya menggunakan bentuk lingkaran yang merepresentasikan bentuk lubang, sedangkan pada penelitian ini menggunakan 3 (tiga) macam bentuk lubang, antara lain: lingkaran, heksagonal, dan elips. Pembahasan ini sangat menarik karena ada variasi bentuk lubang yang belum pernah diteliti sebelumnya, terlebih material yang digunakan AISI 4340 yang implementasinya untuk pesawat terbang komersial dan militer, otomotif dan juga struktur bangunan. Penerapan dari material tersebut cukup penting untuk ditinjau lebih jauh karena sangat berhubungan dengan fasilitas umum dan juga dari segi keselamatannya.

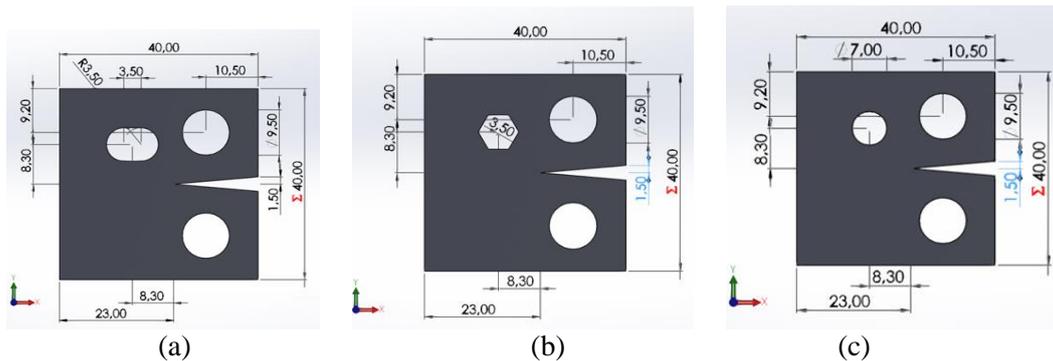
METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan spesimen modifikasi (SM) dengan dimensi panjang, lebar dan tebal masing-masing 40 mm, 40 mm dan 8 mm. terdapat tiga jenis Spesimen

modifikasi antara lain, SM01 (bulat), SM02 (heksagonal), SM03 (elips). Pada spesimen ini digunakan material AISI 4340 didesain dengan perangkat lunak SolidWorks 2018. Adapun spesifikasi lengkapnya ada pada Gambar 1 dan Tabel 1.

Pada penelitian ini, simulasi meng-

gunakan 3 jenis spesimen modifikasi yang masing-masing divariasikan jarak C, yaitu jarak vertikal pusat lubang terhadap ujung inisiasi retak dan jarak K, yaitu jarak horizontal pusat lubang terhadap ujung inisiasi retak dengan variabel tetap dan terkontrol. Variasi jarak yang dimaksud dapat dilihat pada gambar 2.

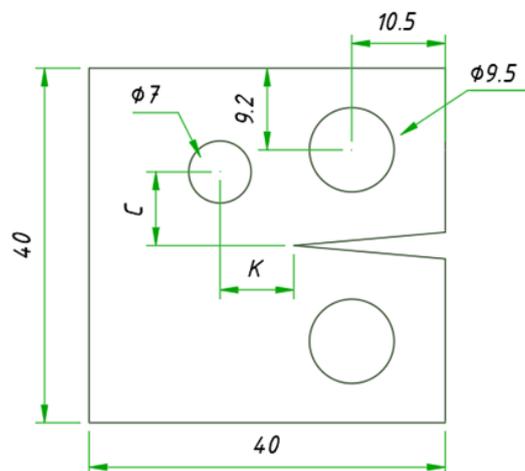


Gambar 1. Spesimen Variasi Bentuk Lubang (a) Lingkaran, (b) Heksagonal, (c) Elips

Tabel 1. Properties Material AISI 4340

No	Properties	Satuan
1.	Modulus elastisitas (E)	205 GPa
2.	Rasio Poisson (ν)	0.29
3.	Kekuatan tekanan maksimum ($\sigma_u \sigma_u$)	1110 MPa
4.	Kekuatan luluh tarik ($\sigma_y \sigma_y$)	710 MPa
5.	Koefisien hukum Paris (C)	3.6E-10
6.	Eksponen hukum Paris (m)	0.29

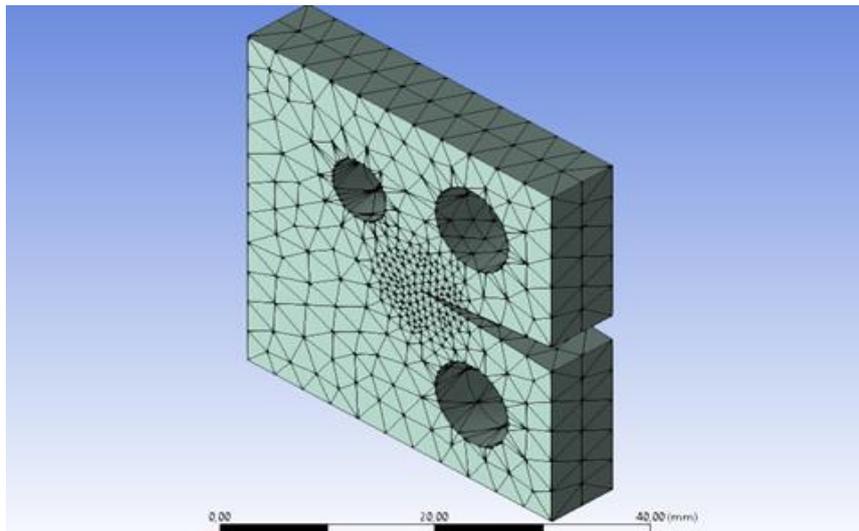
Keterangan sumber: Penelitian sebelumnya [12]



Gambar 2. Geometri Spesimen

Tabel 1. Variabel Simulasi Perambatan Retak

No.	Spesimen	C (mm)	K (mm)	Variabel Tetap
1	SM01	8.3	8.3	<i>Element size, edge mesh, radius sphere, boundary condition, arah gaya</i>
		8.5	8.5	
		8.7	8.7	
2	SM02	8.3	8.3	
		8.5	8.5	
		8.7	8.7	
3	SM03	8.3	8.3	
		8.5	8.5	
		8.7	8.7	



Gambar 3. Meshing Geometri

A. Metode *Smart Crack Growth*

Simulasi analisis perambatan retak menggunakan metode *smart crack growth* yang merupakan fitur terbaru ANSYS 19.1. Langkah awal untuk melakukan simulasi adalah menyiapkan spesimen yang dirancang pada SolidWorks 2018 dengan format file IGES atau STEP yang nantinya akan diinput ke menu geometri pada modul *static structural* lalu dilakukan editing pada engineering data untuk disesuaikan dengan propertis material yang telah ditentukan. Kemudian masuk ke *workspace* modul, mengatur *global coordinate system* dan *coordinate system* untuk *crack tip*. Lakukan

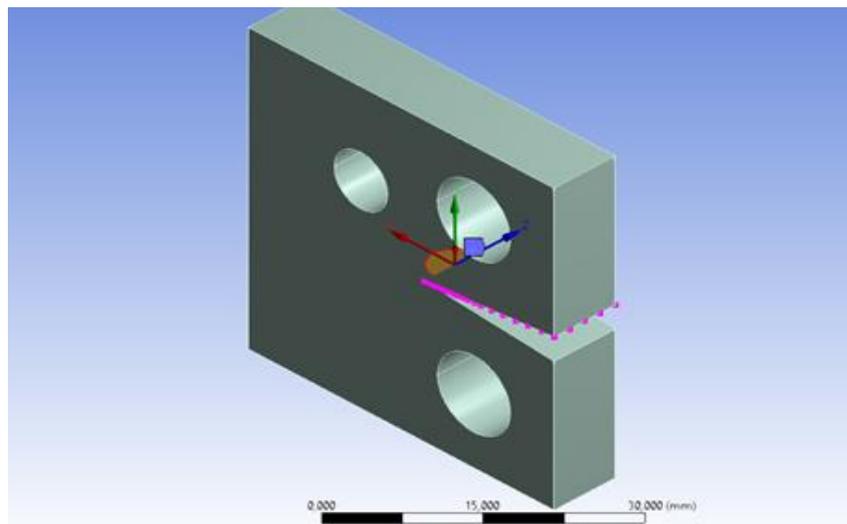
meshing dengan *setting* metode *mesh* menjadi *tetrahedron patch performing* dan *edge sizing* pada *crack tip*. Selanjutnya definisikan inisiasi retak lalu gunakan menu *factrue* untuk mendefinisikan *crack* menjadi *premeshed crack* dilanjutkan dengan menu *smart crack growth*. Pengaturan analisis dengan mengatur *time step*, *displacement* (konstan), *force* yang berlawanan pada sumbu koordinat y. Hasil yang akan diperoleh ialah *total deformation*, *equivalent stress*, SIF mode I dan II dan *equivalent SIF range* dan *number of cycle*.

Gambar 3 merupakan visualisasi spesimen dengan bentuk *tetrahedral element mesh*, ukuran elemen pada seluruh geometri

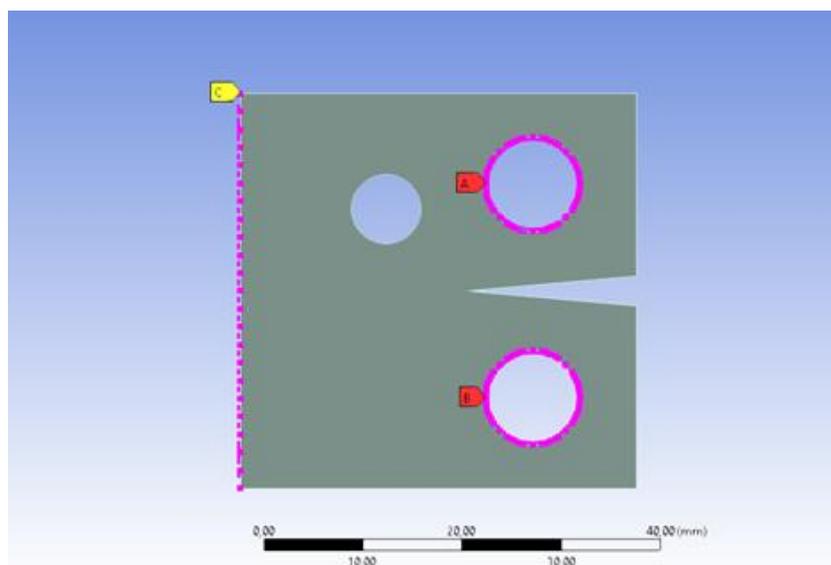
sebesar 3.5 mm, sedangkan untuk *edge crack tip* terlihat ukuran elemen jauh lebih kecil dibandingkan geometri bagian disekitarnya, yaitu sebesar 1 mm dengan radius 6 mm. Perbedaan penentuan ini agar dapat memudahkan visualisasi retakan spesimen pada saat simulasi.

Pada gambar 4 terlihat sistem koordinat

diujung inisiasi retakan (*premeshed crack*) untuk mengatur tiga daerah geometris, antara lain: permukaan atas retakan, permukaan bawah retakan dan tepi retak. Sistem koordinat tersebut untuk mendefinisikan ujung retak, panah koordinat sumbu x menunjukkan arah perambatan retak. Sedangkan panah sumbu y menunjukkan arah bukaan retak.



Gambar 4. Premeshed Crack Terdefinisi



Gambar 5. Premeshed Crack Terdefinisi

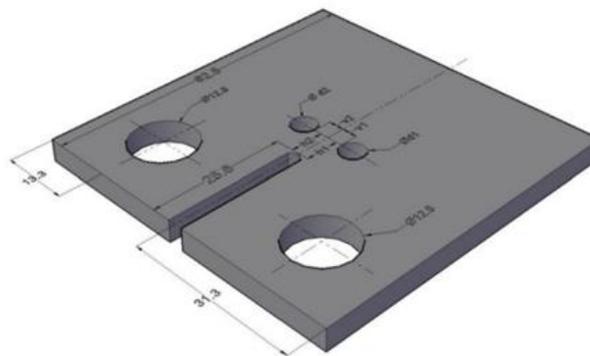
Gambar 5 merupakan *Boundary condition* yang diterapkan, antara lain: dua buah gaya pada keterangan gambar di atas, Notasi A menunjukkan daerah yang diberi gaya sebesar 5000 N arah sumbu y yang sesuai dengan global koordinat. Notasi B menunjukkan daerah yang diberi gaya sebesar -5000 N atau berlawanan dengan arah sumbu y. Adapun notasi C menunjukkan geometri yang dijadikan *fix support* atau *displacement* konstan.

B. Benchmark Problem

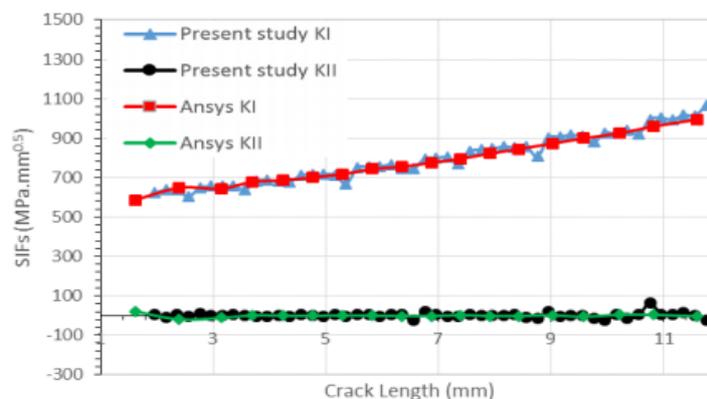
Benchmark problem pada penelitian ini bertujuan untuk validasi hasil simulasi yang telah dilakukan dengan penelitian terdahulu agar dipastikan bahwa simulasi yang dilakukan ialah benar. Benchmarking

dilakukan dengan geometri yang telah dilakukan oleh M. Abdunaser dari Jazan University menggunakan perbandingan studi dengan *developed source code* 2D dan 3D FEM oleh ANSYS Mechanical yang telah divalidasi dengan hasil eksperimental. *Developed source code* 2D dan 3D FEM oleh ANSYS Mechanical menunjukkan hasil yang bersesuaian dengan penelitian saat ini.

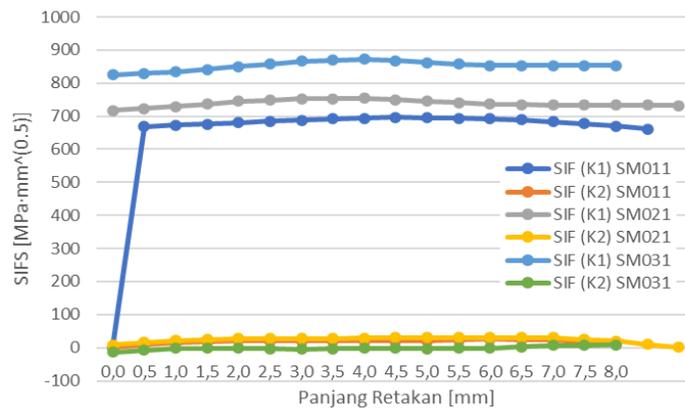
Gambar 7 merupakan grafik nilai SIF pada penelitian serupa yang dilakukan pada tahun 2019. Pada grafik tersebut terlihat grafik nilai SIF untuk tren K1 berada pada bagian atas dan berada pada nilai SIF lebih dari 500 MPa·mm^{0.5}. Sedangkan tren K2 berada pada bagian bawah dengan nilai rata-rata 0.



Gambar 6. Geometri Spesimen



Gambar 7. Grafik Nilai SIF K1 dan K2 Penelitian Terdahulu



Gambar 8. Grafik Nilai SIF K1 dan K2 Penelitian Sekarang

Hal yang serupa terjadi pula pada gambar 8 yang merupakan grafik nilai SIF pada penelitian yang dilakukan saat ini. Pada grafik tersebut terlihat grafik nilai SIF untuk tren K1 berada pada bagian atas dan berada pada nilai SIF lebih dari 500 MPa·mm^(0.5). Sedangkan tren K2 berada pada bagian bawah dengan nilai rata-rata 0.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi perambatan retak dengan spesimen yang divariasikan bentuk lubangnya telah dilakukan dengan metode *Smart Crack Growth* pada ANSYS 19.1 dengan hasil sebagai berikut:

A. Pengaruh Variasi Bentuk Lubang terhadap nilai *Stress Intensity Factor*

Analisis pengaruh posisi dan variasi bentuk lubang dapat dilihat dari nilai faktor intensitas tegangannya atau *stress intensity factor* (SIF). Semakin besar nilai SIF, maka akan semakin mudah terjadi perambatan retak pada spesimen. Besarnya nilai SIF terhadap spesimen mengindikasikan bahwa

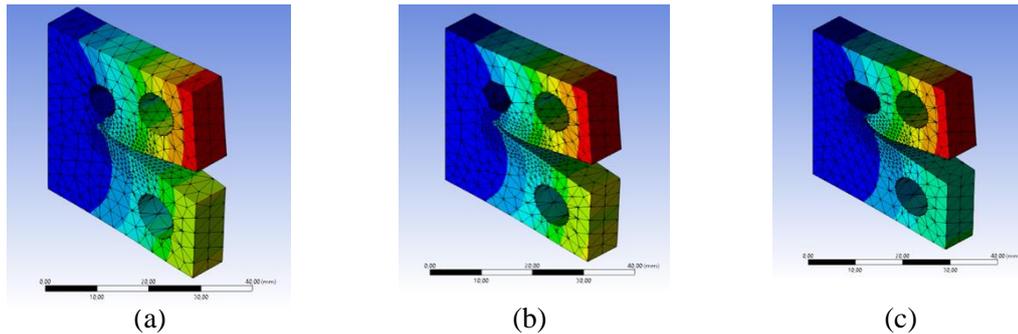
kekuatan material pada spesimen tersebut tidak cukup kuat untuk menghambat perambatan retak, hal tersebut dipengaruhi oleh nilai SIF, posisi dan bentuk lubang pada spesimen.

Gambar 9 merupakan variasi bentuk lubang pada spesimen yang disimulasikan oleh ANSYS dengan metode *Smart Crack Growth*. Spesimen a dinamakan SM01 dengan bentuk lubang lingkaran, spesimen b dinamakan SM02 dengan bentuk lubang heksagonal, dan spesimen c dinamakan SM03 dengan bentuk lubang elips. Spesimen tersebut akan dibandingkan satu sama lainnya. Dari simulasi yang dilakukan akan terlihat bagaimana perbedaan nilai SIF pada masing-masing spesimen.

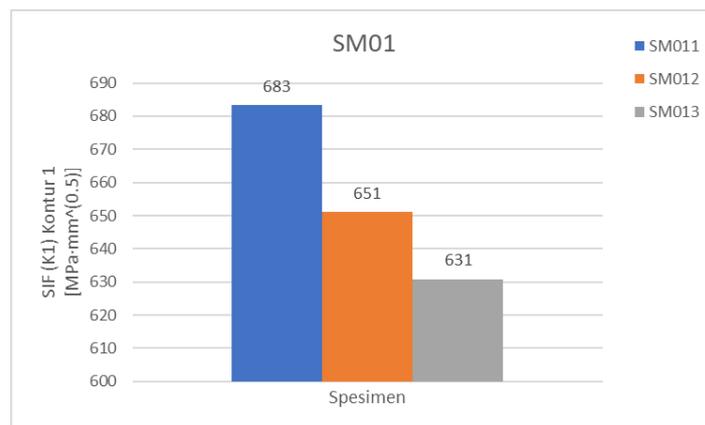
Gambar 10 adalah diagram batang hasil simulasi perbandingan SM01, yaitu spesimen dengan bentuk lubang lingkaran dan dengan variasi jarak retakan berdasarkan variabel C dan K yang sesuai pada tabel 1. Spesimen SM011 dengan jarak variabel C dan K terdekat dari ujung retak, yaitu 8.3 cm, spesimen SM012 dengan jarak variabel C dan K, yaitu 8.5 cm, dan spesimen SM013 dengan

jarak variabel C dan K, yaitu 8.7 cm dari ujung retak. Dari diagram tersebut dapat terlihat perbedaan nilai SIF masing-masing spesimen yang divariasikan jarak lubangnya terhadap ujung retaknya. Spesimen SM011 memiliki nilai SIF sebesar 683 MPa·mm^(0.5), Spesimen SM012 memiliki

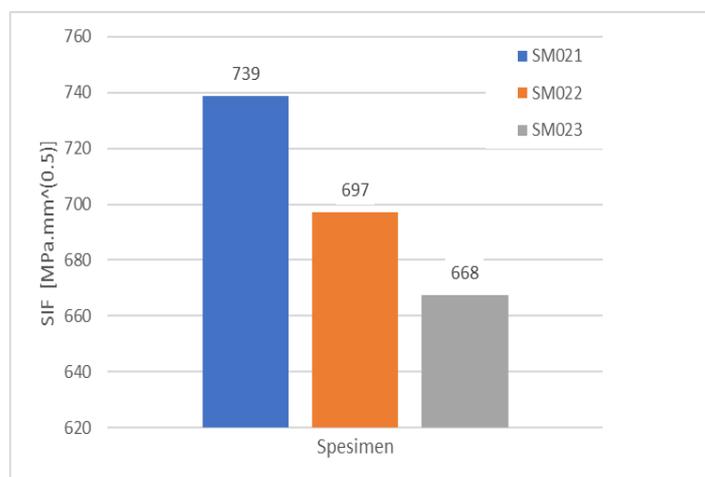
nilai SIF sebesar 651 MPa·mm^(0.5), dan Spesimen SM013 memiliki nilai SIF sebesar 631 MPa·mm^(0.5). Dengan demikian dapat terlihat spesimen dengan nilai SIF dari yaitu spesimen SM011 yang mana jarak variasi lubang terhadap ujung retak lebih jauh dibandingkan spesimen yang lainnya.



Gambar 9. Deformasi (a) MS01, (b) MS02, (c) MS03



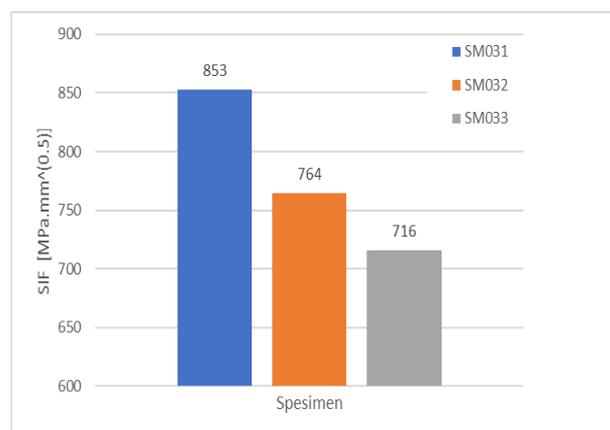
Gambar 10. Diagram Perbandingan Nilai SIF SM01



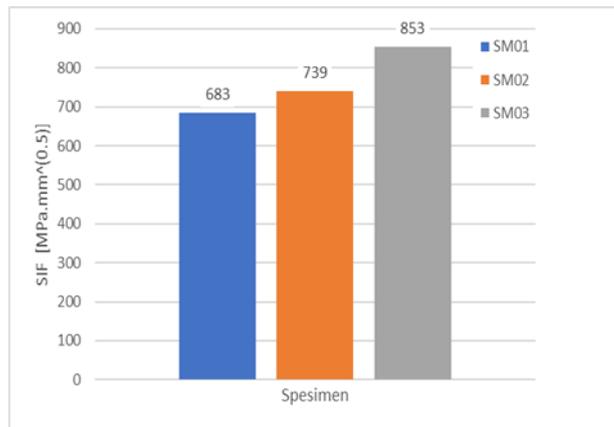
Gambar 11. Diagram Perbandingan Nilai SIF SM02

Gambar 11 adalah diagram batang hasil simulasi perbandingan SM02, yaitu spesimen dengan bentuk lubang heksagonal dan dengan variasi jarak retakan berdasarkan variabel C dan K yang sesuai pada tabel 1. Spesimen SM021 dengan jarak variabel C dan K terdekat dari ujung retak, yaitu 8.3 cm, spesimen SM022 dengan jarak variabel C dan K, yaitu 8.5 cm, dan spesimen SM023 dengan jarak variabel C dan K, yaitu 8.7 cm dari ujung retak. Dari diagram tersebut dapat terlihat perbedaan nilai SIF masing-masing spesimen yang divariasikan jarak lubangnya terhadap ujung retaknya. Spesimen SM021 memiliki nilai SIF sebesar $739 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{(0.5)}$, Spesimen SM022 memiliki nilai SIF sebesar $697 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{(0.5)}$, dan Spesimen SM023 memiliki nilai SIF sebesar $739 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{(0.5)}$. Dengan demikian dapat terlihat spesimen dengan nilai SIF dari yaitu spesimen SM021 yang mana jarak variasi lubang terhadap ujung retak lebih jauh dibandingkan spesimen yang lainnya.

Gambar 12 adalah diagram batang hasil simulasi perbandingan SM03, yaitu spesimen dengan bentuk lubang elips dan dengan variasi jarak retakan berdasarkan variabel C dan K yang sesuai pada tabel 1. Spesimen SM031 dengan jarak variabel C dan K terdekat dari ujung retak, yaitu 8.3 cm, spesimen SM032 dengan jarak variabel C dan K, yaitu 8.5 cm, dan spesimen SM033 dengan jarak variabel C dan K, yaitu 8.7 cm dari ujung retak. Dari diagram tersebut dapat terlihat perbedaan nilai SIF masing-masing spesimen yang divariasikan jarak lubangnya terhadap ujung retaknya. Spesimen SM031 memiliki nilai SIF sebesar $853 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{(0.5)}$, Spesimen SM032 memiliki nilai SIF sebesar $764 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{(0.5)}$, dan Spesimen SM033 memiliki nilai SIF sebesar $716 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{(0.5)}$. Dengan demikian dapat terlihat spesimen dengan nilai SIF dari yaitu spesimen SM031 yang mana jarak variasi lubang terhadap ujung retak lebih jauh dibandingkan spesimen yang lainnya.



Gambar 12. Diagram Perbandingan Nilai SIF SM03



Gambar 13. Diagram Perbandingan Nilai SIF pada Variasi Spesimen

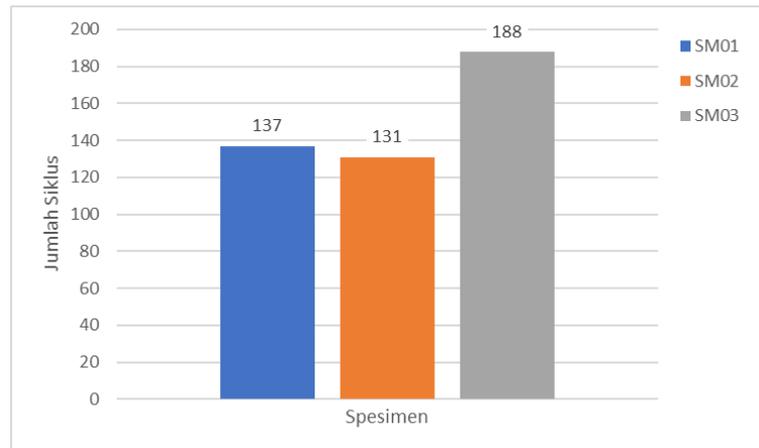
Pada gambar 13 dapat terlihat perbandingan nilai SIF pada variasi bentuk lubang berbeda dan jarak yang sama pada spesimen. Spesimen SM01 dengan bentuk lubang lingkaran memiliki nilai SIF sebesar 683 MPa·mm^(0.5), spesimen SM02 dengan bentuk lubang heksagonal memiliki nilai SIF sebesar 739 MPa·mm^(0.5), dan spesimen SM03 dengan bentuk lubang elips memiliki nilai SIF sebesar 853 MPa·mm^(0.5). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa bentuk lubang akan mempengaruhi daya tahan material untuk menghambat perambatan retak pada suatu plat. Spesimen yang memiliki nilai SIF terendah artinya dia lebih tahan terhadap intensitas tegangan dari bentuk lubang yang lainnya. Bentuk lubang yang memiliki nilai SIF terendah, yaitu lubang dengan bentuk lingkaran.

A. Pengaruh Variasi Bentuk Lubang terhadap Jumlah Siklus

Gambar 14 merupakan diagram batang yang merepresentasikan perbandingan jumlah

siklus untuk masing-masing spesimen. Adapun spesimen yang akan dibandingkan ialah spesimen dengan variasi bentuk lubang dan dengan jarak lubang yang sama, yaitu 8.3 cm terhadap ujung retak. Spesimen SM01 dengan bentuk lubang lingkaran, spesimen SM02 dengan bentuk lubang heksagonal, dan spesimen SM03 dengan bentuk lubang elips. Dari diagram batang tersebut terlihat pengaruh bentuk lubang terhadap jumlah siklus yang dialami spesimen ketika mendapat tegangan yang intens pada saat simulasi.

Dari diagram tersebut dapat dilihat pula perbedaan yang kecil dan signifikan dari jumlah siklus pada masing-masing spesimen. Spesimen SM01 memiliki jumlah siklus sebanyak 137 kali, spesimen SM02 memiliki jumlah siklus 131 kali, dan spesimen SM03 memiliki jumlah siklus sebanyak 188 kali. Spesimen yang memiliki jumlah siklus terbanyak, yaitu spesimen SM03 dengan bentuk lubang elips, sedangkan spesimen dengan jumlah siklus sedikit, yaitu spesimen SM02 dengan bentuk lubang heksagonal.



Gambar 14. Diagram Perbandingan Jumlah Siklus pada variasi Spesimen

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada spesimen yang divariasikan, maka pada penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan.

Pertama, hasil simulasi perambatan retak pada spesimen dengan bentuk lubang dan jarak yang bervariasi menggunakan *metode smart crack growth* pada ANSYS 19.1 menunjukkan adanya pengaruh terhadap nilai SIF. Perambatan retak pada SM01 dengan variasi jarak sesuai pada tabel 1, terlihat nilai terbesar SIF dimiliki oleh spesimen yang jarak lubangnya terdekat terhadap ujung retak, yaitu 8.3 cm. Semakin dekat jarak lubang terhadap ujung retak, maka semakin besar pula nilai SIFnya. Sehingga nilai SIF tersebut dapat mempengaruhi kecepatan perambatan retakan pada simulasi.

Kedua, telah dibandingkan pula perbedaan nilai SIF untuk spesimen SM01, SM02, dan SM03. Pada gambar 11 terlihat nilai SIF terbesar dimiliki oleh spesimen dengan bentuk lubang elips, kemudian diikuti

oleh SM02 dan SM01. Dengan demikian, bentuk lubang pada spesimen mempengaruhi besarnya nilai SIF.

Ketiga, pengaruh bentuk lubang terhadap jumlah siklus pada masing-masing spesimen. Spesimen SM03 dengan bentuk lubang elips memiliki jumlah siklus terbanyak dibanding dengan spesimen lainnya. Jumlah siklus mengindikasikan bahwa banyaknya siklus yang akan terjadi pada spesimen ketika mengalami pembebanan dengan retakan yang ada. Semakin banyak jumlah siklusnya, maka semakin lama proses perambatan retakan pada spesimen.

Penelitian selanjutnya dapat dilakukan analisis cepat rambat retakan dengan parameter utama selain SIF dengan perbandingan beberapa material atau dengan metode yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. C. Slattery and P. G. A. Cizmas, "Macro-Scale Fatigue Fracture Analysis of Multiphase Bodies, Aircraft Design, and Catastrophic Failure: Two Aircraft

- Accidents,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 199, hal. 274-279, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.05.008>.
- [2] S. Qi, L.X. Cai *et al.*, “Analytical theory for fatigue crack propagation rates of mixed-mode I–II cracks and its application,” *International Journal of Fatigue*, vol. 119, pp. 150-159, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.10.004>.
- [3] N. Zimmermann, and P. H. Wang, “A Review of Failure Modes and Fracture Analysis of Aircraft Composite Materials,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 115, edisi 104603, September, 2020. [Daring]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630720307020>. [Diakses: 7 February 2021].
- [4] A.M. Al-Mukhtar, “Aircraft Fuselage Cracking and Simulation,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 28, hal. 124-131, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.016>.
- [5] M. Aamir, K. Giasin, M. Tolouei-Rad, and A. Vafadar, “A Review: Drilling Performance and Hole Quality of Aluminium Alloys for Aerospace Applications,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, edisi 6, November–December, 2020. [Daring]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420317270>. [Diakses: 7 February 2021].
- [6] A. M. Alshoaibi, A. A. bin Ghouth, and Y. A. Fageehi, “Three- Dimensional Simulation of Crack Propagation using Finite Element Method,” *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 9, edisi 2, hal. 892-897, 2019, doi: <https://doi.org/10.35940/ijeat.A1895.129219>.
- [7] A. M. Alshoaibi, and Y. A. Fageehi, “2D Finite Element Simulation of Mixed Mode Fatigue Crack Propagation for CTS Specimen,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, edisi 4, hal. 7850-7861, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.083>.
- [8] A. M. Alshoaibi, “Finite element-based model for crack propagation in linear elastic materials,” *Engineering Solid Mechanics*, vol. 8, hal. 31-142, 2020, doi: <https://doi.org/10.5267/j.esm.2019.10.002>.
- [9] A. M. Alshoaibi, and Y. A. Fageehi, “Numerical Analysis of Fatigue Crack Growth Path and Life Predictions for Linear Elastic Material,” *Materials*, vol. 13, hal. 1-15, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13153380>.
- [10] H. Wang, G. Wu, and Y. Pang, “Theoretical and Numerical Study on Stress Intensity Factors for FRP-

- Strengthened Steel Plates with Double-Edged Cracks,” *Sensors*, vol. 18, hal. 1-19, 2018, doi:
<https://doi.org/10.3390/s18072356>.
- [11] A. Saber, M. Shariati, and R. M. Nejad, “Experimental and Numerical Investigation of Effect of Size, Position and Geometry of some Cutouts on Fatigue Life and Crack Growth Path on AISI1045 Steel Plate,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 107, June, 2020. [Daring]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016784421930285>. [Diakses: 7 February 2021].
- [12] A. F. Wibowo, M. I. P. Hidayat, and R. Rochiem, “Analisa Faktor Intensitas Tegangan dan Usia Siklus pada Simulasi Perambatan Retak Komponen Poros Menggunakan Metode Smart Crack Growth,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 8, hal. 121-126, 2019, doi:
<https://doi.org/10.12962/j23373539.v8i2.44096>.