

Analisa Faktor Intensitas Tegangan dan Usia Siklus pada Simulasi Perambatan Retak Komponen Poros Menggunakan Metode *Smart Crack Growth*

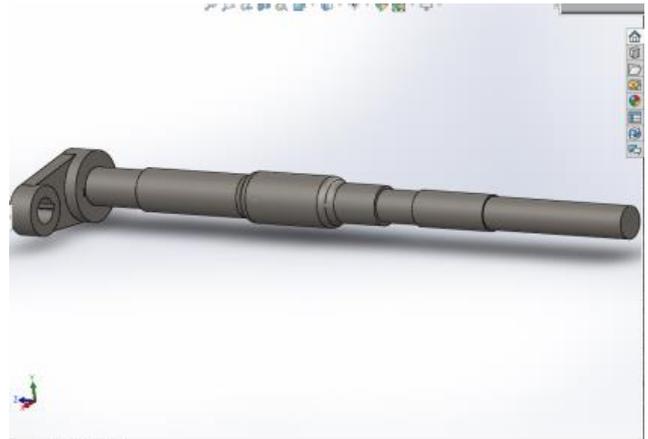
Anky Fitriyan Wibowo, Mas Irfan Purbawanto Hidayat dan Rochman Rochiem
Departemen Teknik Material, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
e-mail: masirfan.ph@gmail.com

Abstrak— Poros berfungsi untuk meneruskan tenaga baik berupa puntiran, torsi maupun bending dari suatu bagian ke bagian yang lain. Akibatnya suatu poros sering mengalami kegagalan dalam operasinya. Tugas akhir ini bertujuan untuk mengestimasi usia siklus dari poros dengan mempertimbangkan perhitungan faktor intensitas tegangan untuk retak semi elliptical yang diaplikasikan displacement. Analisa metode elemen hingga dengan opsi smart crack growth ANSYS 19.1 untuk melakukan simulasi perambatan retak yang kemudian didapatkan nilai faktor intensitas tegangan dengan variasi panjang retak dan jenis material. Range dari faktor intensitas tegangan digunakan untuk memprediksi laju perambatan retak dan estimasi usia siklus dengan menggunakan hukum Paris. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa semakin kecil inisial crack maka energi yang dibutuhkan semakin besar sehingga siklus yang dibutuhkan untuk menyelesaikan patahan lebih lama kemudian untuk penambahan unsur paduan yang bersifat sebagai pembentuk karbida dan penstabil karbida maka semakin mudah membentuk karbida yang mampu menghambat pertumbuhan butir dan meningkatkan ketangguhan.

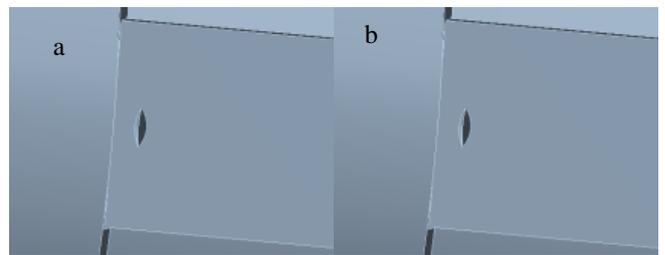
Kata Kunci—Intensitas, Siklus, SMART, Perambatan Retak, Poros

I. PENDAHULUAN

Poros adalah komponen mekanis untuk mentransmisikan torsi dan rotasi yang biasanya digunakan untuk mengkoneksikan antar komponen. Khususnya pada mesin uap, poros digunakan untuk menghubungkan dan mengkonversi gerakan translasi piston menjadi gerakan putar yang memutar *flywheel* dan roda gigi. Dimana terdapat keyways sebagai tempat pengunci roda gigi sehingga sering kali terjadi retakan pada daerah tersebut. Pembebanan sebenarnya yang terjadi pada mesin uap ada beban statis dan beban siklik. Dalam kasus sebenarnya sering terjadi beban kejut oleh suatu sebab dan terjadi dalam *single application of load* yang melebihi kapasitas kekuatan material poros tersebut. Pada simulasi ini menggunakan jenis pembebanan statis dan diasumsikan sebagai quasi-dinamis (pembebanan statis namun seolah olah dinamis). Fraktur terjadi pada struktur dengan adanya perambatan retak dan memecahnya menjadi lebih dari satu bagian. Fraktur diklasifikasikan antara lain *opening*, *sliding*, atau *tearing* berdasarkan perpindahan retaknya. Pada penelitian ini, menggunakan metode SMART Crack Growth ANSYS 19.1 dengan mengevaluasi faktor intensitas tegangan sepanjang crack front. Kemudian dilakukan perhitungan menggunakan hukum Paris untuk mendapatkan laju perambatan retak dan usia siklus dengan variasi jenis material AISI 1040, 4140, 4340 dan panjang inisiasi retak 10 mm dan 20 mm



Gambar 1. Dimensi desain poros menggunakan Solidwork



Gambar 2. Dimensi inisiasi retak pada poros: (a) 10 mm dan (b) 20 mm

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Preparasi Spesimen

Spesimen yang digunakan pada simulasi ini yaitu poros dengan dimensi panjang 4 meter dan diameter rata-rata 220 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Spesimen didesain menggunakan software Solidworks 2018. Material yang digunakan yaitu bervariasi AISI 1040, AISI 4140 dan AISI 4340. Kemudian mendesain inisiasi retak dengan bentuk semi elliptical yang mempunyai panjang 10 mm dan 20 mm dengan 22 degree sebagai singularitasnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

B. Aspek yang Dibandingkan

Pada simulasi ini menggunakan enam variasi yang disajikan dalam Tabel 1 berikut:

Kemudian untuk membandingkan jenis material, maka ditentukan beberapa parameter pada Tabel 2 untuk dimasukkan kedalam *engineering data* pada ANSYS 19.1

Tabel 1
Tabel Variasi pada Simulasi Perambatan Retak

| Variabel Bebas | Variabel Tetap | Variabel Kontrol |
|----------------|----------------|--|
| Jenis Baja | Inisiasi Retak | Boundary Condition, Jumlah Meshing, arah dan beban |
| AISI 1040 | 10 mm | Retak dan Jumlah Siklus |
| AISI 4140 | 20 mm | (Number of Cycles) |
| AISI 4340 | 10 mm | |
| | 20 mm | |

Tabel 2
Aspek yang Dibandingkan pada Engineering Data

| Material (AISI) | Kuat Tarik (MPa) | Kuat Luluh (MPa) | Modulus Elastisitas (GPa) | Fracture Toughness (Ksi in ^{0.5}) |
|-----------------|------------------|------------------|---------------------------|---|
| 1040 | 595 | 370 | 200 | 48,6 |
| 4140 | 1020 | 655 | 205 | 54 |
| 4340 | 1282 | 862 | 205 | 60 |

| Component Elements Properties | Metric |
|-------------------------------|---------------|
| Carbon, C | 0.37 - 0.44 % |
| Iron, Fe | 98.6 - 99 % |
| Manganese, Mn | 0.60 - 0.90 % |
| Phosphorous, P | <= 0.040 % |
| Sulfur, S | <= 0.050 % |

Tabel 3. Komposisi AISI 1040 (Plain Carbon Steel)

| Component Elements Properties | Metric |
|-------------------------------|------------------|
| Carbon, C | 0.38 - 0.43 % |
| Chromium, Cr | 0.80 - 1.1 % |
| Iron, Fe | 96.785 - 97.77 % |
| Manganese, Mn | 0.75 - 1.0 % |
| Molybdenum, Mo | 0.15 - 0.25 % |
| Phosphorous, P | <= 0.035 % |
| Silicon, Si | 0.15 - 0.30 % |
| Sulfur, S | <= 0.040 % |

Tabel 4. Komposisi AISI 4140 (Cr-Mo Steel)

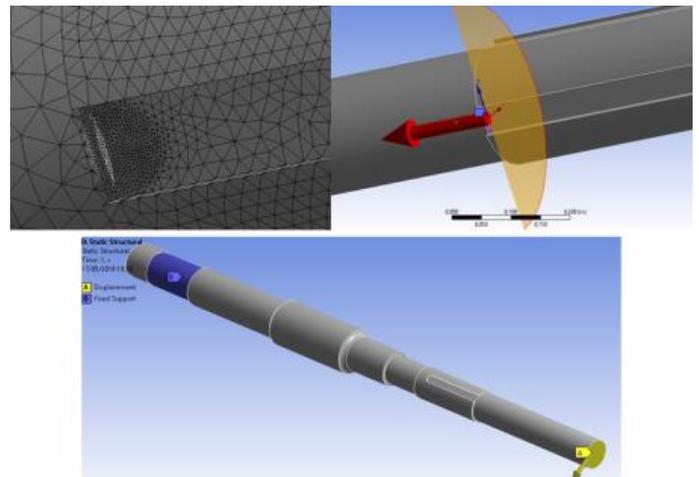
| Component Elements Properties | Metric |
|-------------------------------|------------------|
| Carbon, C | 0.37 - 0.43 % |
| Chromium, Cr | 0.70 - 0.90 % |
| Iron, Fe | 95.195 - 96.33 % |
| Manganese, Mn | 0.60 - 0.80 % |
| Molybdenum, Mo | 0.20 - 0.30 % |
| Nickel, Ni | 1.65 - 2.0 % |
| Phosphorous, P | <= 0.035 % |
| Silicon, Si | 0.15 - 0.30 % |
| Sulfur, S | <= 0.040 % |

Tabel 5. Komposisi AISI 4340 (Ni-Cr-Mo Steel)

Selain perbandingan diatas, pada simulasi ini menggunakan 3 jenis material dengan komposisi masing masing material sebagai berikut pada Gambar 3, 4, dan 5

C. Metode Smart Crack Growth

Simulasi perambatan retak menggunakan metode Smart Crack Growth pada software ANSYS 19.1. Berikut adalah langkah-langkah untuk melakukan simulasi. Pertama, mengimpor desain file .igs, menggunakan modul static structural dan melakukan pengaturan pada engineering data menyesuaikan dengan property dari jenis material. Kemudian mensetting global coordinate system dan crack tip coordinate system. Setelah itu melakukan meshing dengan opus body sizing, face sizing, edge sizing dan tetrahedrons patch conforming method. Selanjutnya memberikan named selection pada bagian face dan nodal selection pada inisiasi retak. Menggunakan menu fracture kemudian mensetting bagian premeshed crack yang selanjutnya diproses dengan menu Smart Crack Growth. Memberikan pengaturan analisa dengan memasukkan time steps, support dan displacement. Kemudian Langkah



Gambar 6. Poros Setelah Dilakukan Proses (a) Meshing ; (b) Premeshed Crack dan (c) Displacement and Fix Support

terakhir dengan mensolusikan dengan opsi Total Deformation, Von Mises Stress dan Fracture SIFs [1].

D. Metode Paris Law

Setelah melakukan simulasi, maka langkah selanjutnya yaitu mengevaluasi stress intensity factor pada hasil simulasi. Pada hasil simulasi didapatkan pola grafik dan tabel stress intensity factor dan penambahan panjang retak. Dari informasi ini maka langkah selanjutnya yaitu menghitung dan memprediksi usia siklus dan laju perambatan retak menggunakan formula Paris

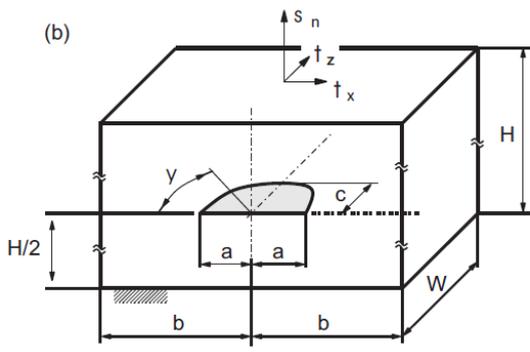
$$da/dN = C \cdot \Delta K^m$$

Dimana da/dN adalah crack growth rate per cycle atau laju perambatan retak per siklus akibat pembebanan yang diberikan dengan satuan in/cycle. ΔK adalah range dari stress intensity factor dengan ksi√in. Kemudian untuk nilai konstanta material (C) dan nilai eksponen material (m) berdasarkan material AISI 4340 yang termasuk dalam kategori ferrite-pearlite steels yaitu 3,6.10⁻¹⁰ untuk C dan 3 untuk m [2].

Langkah pertama yaitu Menentukan konstanta geometri (C) dan eksponen material (m) yang terdapat pada spesifikasi material. Membuat tabel pada excel yang terdiri dari crack length (a) , Stress Intensity Factor (ΔK) , jumlah siklus (N) , penambahan panjang (Δa) dan laju perambatan retak (da/dN) dengan metode hukum Paris. Kemudian menentukan critical crack length sesuai dengan ketangguhan material dan pembebanan, kemudian melakukan plotting antara penambahan panjang dengan penambahan jumlah siklus untuk mengetahui usia siklus hingga retak mencapai critical crack length selain itu juga membuat grafik antara laju perambatan (da/dN) dengan faktor intensitas tegangan (K) untuk mengetahui laju perambatan berdasarkan pola faktor intensitas tegangan.

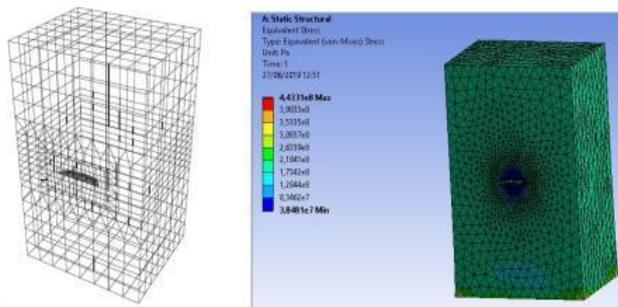
III. BENCHMARK PROBLEM

Dengan tujuan untuk memvalidasi solusi kriteria factor intensitas tegangan (stress intensity factor), benchmark dengan hasil pada literatur. Analisa pada geometri retak menggunakan software ANSYS 19.1 dan benchmark model

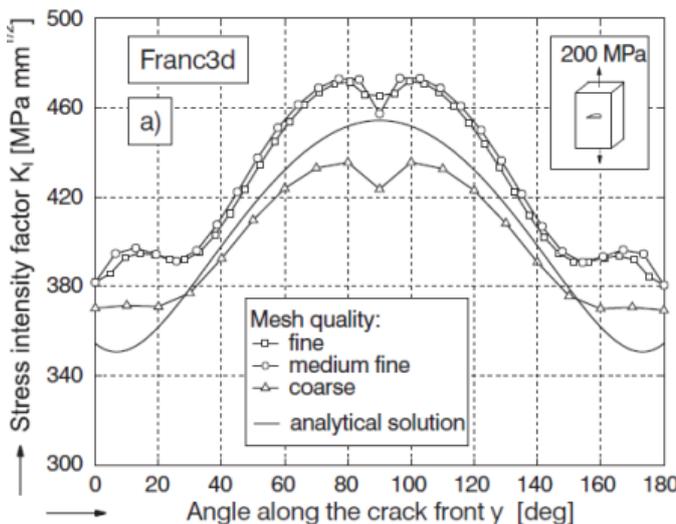
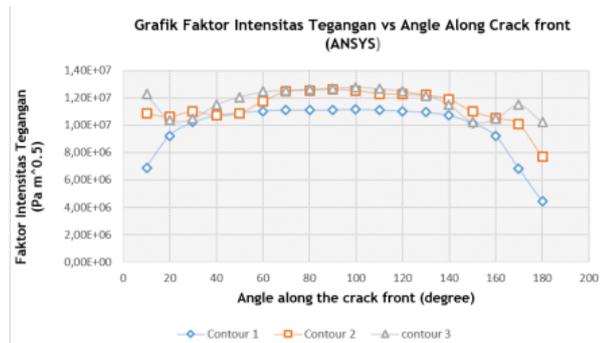


$H = 40$ $a = 4$ $E = 210000 \text{ MPa}$
 $H/2 = 20$ $c = 2$ $n = 0.3$
 $b = 12.566$ $W = 20$

Gambar 7. Dimensi Geometri untuk Benchmark



Gambar 8. Finit Element Benchmark a) Model Franc 3D ; b) ANSYS 19



Gambar 9. Hasil Pola Faktor Intensitas Tegangan Menggunakan (a) ANSYS dan Verifikasi Menggunakan (b) Franc3D [3]

University menggunakan software *Franc3D* dengan geometri yang ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8 berikut

Franc3D menunjukkan hasil yang dapat disetujui. Reliabilitas dan *function range* harus dikembangkan. Program multipurpose *Franc3D* dan ANSYS menunjukkan tingkat reliabilitas yang baik dan pemrograman untuk mengadaptasi penyelesaian masalah mekanika patahan yang praktis untuk *engineer*. Ini menunjukkan bahwa kredibilitas dari software dapat digunakan pada penelitian ini yaitu analisa faktor intensitas tegangan dan usia siklus pada simulasi perambatan retak komponen poros mesin uap menggunakan metode *SMART Crack Growth* [3].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi perambatan retak yang telah dilakukan menggunakan ANSYS 19.1 dengan metode *Smart Crack Growth* adalah pola faktor intensitas tegangan sebagai berikut :

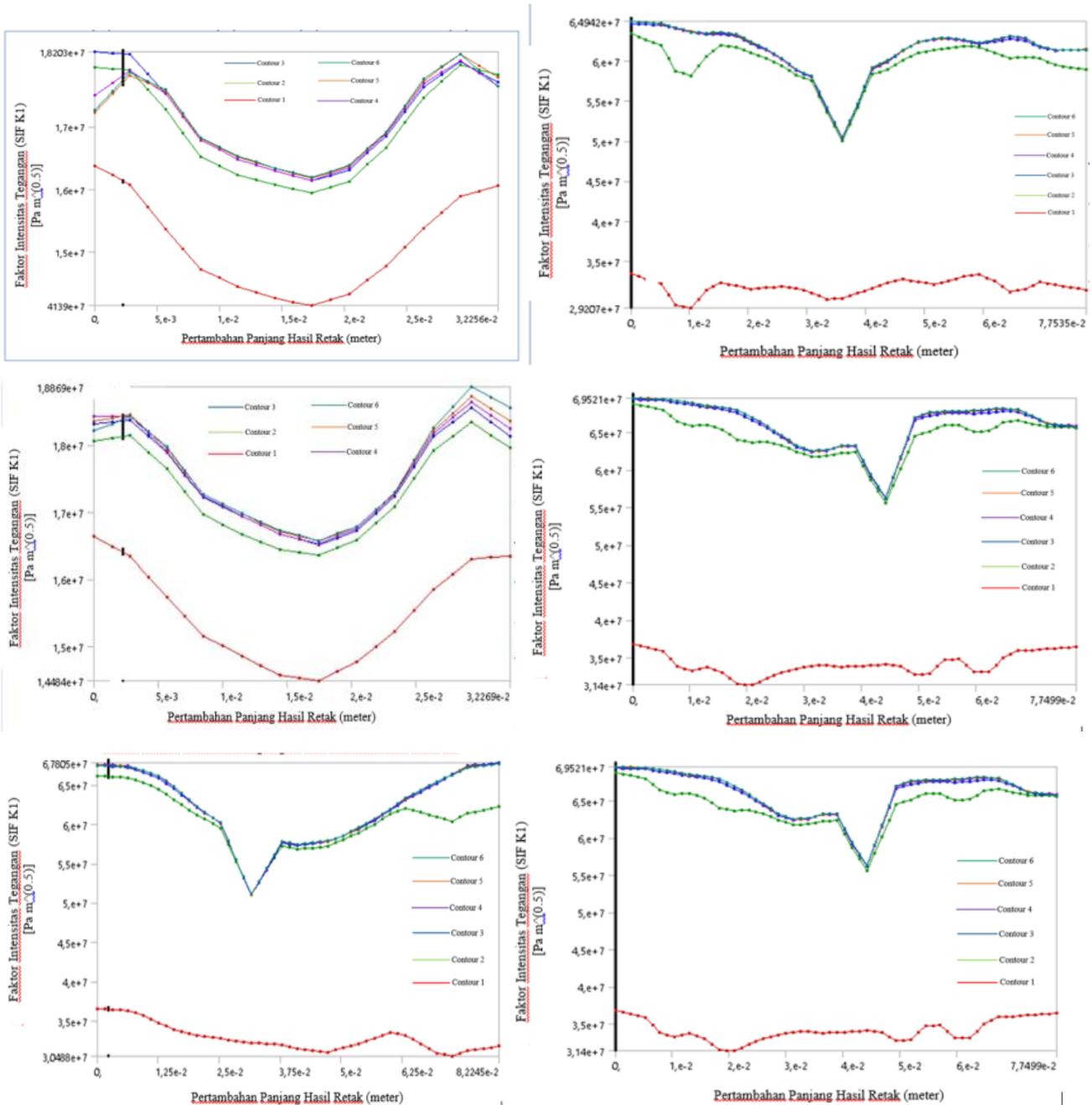
A. Hasil Simulasi Perambatan Retak

Pada baja AISI 4340 didapatkan faktor intensitas tegangan maksimal sebesar $1,816 \cdot 10^7$ Pa dan nilai minimal sebesar $1,6189 \cdot 10^7$ Pa untuk inisiasi retak 10 mm sedangkan untuk inisiasi retak 20 mm didapatkan factor intensitas tegangan maksimal sebesar $6,942 \cdot 10^7$ Pa dan nilai minimal sebesar $2,9356 \cdot 10^7$ Pa. Kemudian untuk baja AISI 4140 didapatkan faktor intensitas tegangan maksimal sebesar $1,8869 \cdot 10^7$ Pa dan nilai minimal sebesar $1,6573 \cdot 10^7$ Pa untuk inisiasi retak 10 mm sedangkan untuk inisiasi retak 20 mm didapatkan faktor intensitas tegangan maksimal sebesar $6,9521 \cdot 10^7$ Pa dan nilai minimal sebesar $3,14 \cdot 10^7$ Pa. Selanjutnya untuk baja AISI 1040 didapatkan faktor intensitas tegangan maksimal sebesar $6,706 \cdot 10^7$ Pa dan nilai minimal sebesar $3,0488 \cdot 10^7$ Pa untuk inisiasi retak 10 mm sedangkan untuk inisiasi retak 20 mm didapatkan faktor intensitas tegangan maksimal sebesar $6,7054 \cdot 10^7$ Pa dan nilai minimal sebesar $2,8594 \cdot 10^7$ Pa. Dapat dilihat bahwa pada inisiasi retak 20 mm mempunyai faktor intensitas tegangan yang lebih tinggi, sehingga retak semakin dapat terakselerasi seiring peningkatan SIF [4]. Setelah mendapatkan data dari hasil simulasi maka langkah selanjutnya adalah melakukan input lata menggunakan Microsoft Excel yaitu panjang retak awal lan panjang retak akhir yang ada pada *report review* ANSYS 19.1. Kemudian mendapatkan delta panjang retak. Hal yang sama dilakukan pada faktor intensitas tegangan setelah mendapatkan faktor intensitas tegangan maksimal lan minimal dan mendapatkan delta faktor intensitas egangan (ΔK) sebagai bahan kalkulasi untuk mendapatkan aju perambatan retak dan jumlah siklus, dengan menggunakan Hukum Paris

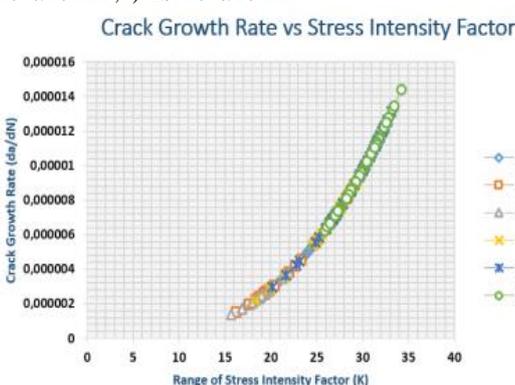
3. Laju Perambatan Retak dan Jumlah Siklus

Dengan menggunakan hukum paris maka dilakukan perhitungan sesuai hasil simulasi untuk mendapatkan laju perambatan retak dan jumlah siklus pada masing masing variasi jenis material dan panjang retak.

Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 11, dapat dilihat bahwa pergerakan laju perambatan retak dengan variasi panjang inisiasi dan jenis material mempunyai pola yang sama. Namun untuk nilai faktor intensitas tegangan dan titik akhir perambatan retak setiap variasi berbeda. Grafik



Gambar 10. Faktor Intensitas Tegangan pada baja a) AISI 4340/10 mm ; b) AISI 4340/20 mm ; c) AISI 4140/10 mm ; d) AISI 4140/20 mm ; e) AISI 1040/10 mm ; f) AISI 1040/20 mm



Gambar 11. Grafik Laju Perambatan Retak dengan Faktor Intensitas Tegangan



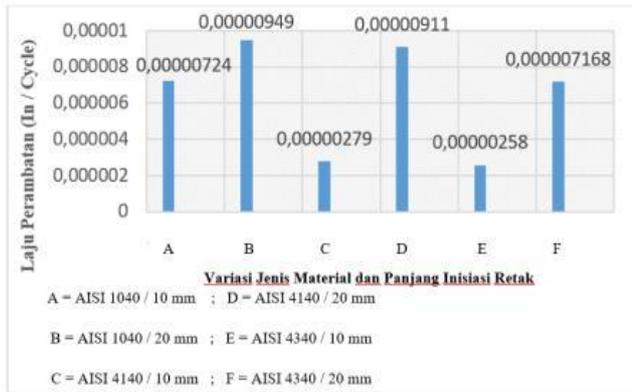
Gambar 12. Grafik Pertambahan Panjang Retak dengan Jumlah Siklus

pada Gambar 13 telah disesuaikan dengan *critical crack length* sehingga dapat diketahui secara riil jumlah siklus

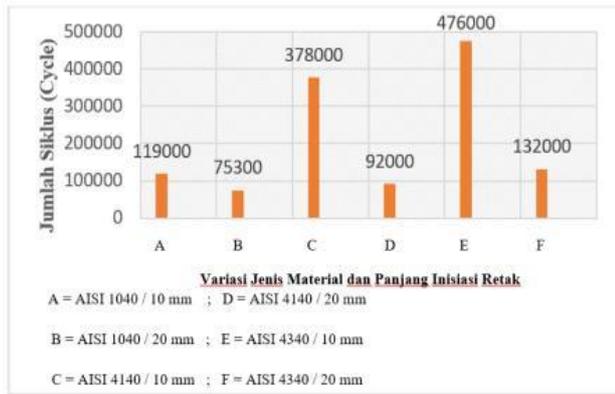
yang dibutuhkan hingga dapat dikategorikan patah. *Critical crack length* didapatkan dengan formula

Tabel 6 Critical crack length

| Material | Critical Crack Length (m) |
|-----------|---------------------------|
| AISI 1040 | 0,019117 |
| AISI 4140 | 0,0236 |
| AISI 4340 | 0,029137 |



Gambar 13. Diagram Batang Laju Perambatan Retak Rata-Rata Terhadap Variasi



Gambar 14. Diagram Batang Jumlah Siklus Terhadap Variasi

$$a_{cr} = \frac{K_{Ic}^2}{F \sigma \sqrt{\pi}}$$

Dimana ;

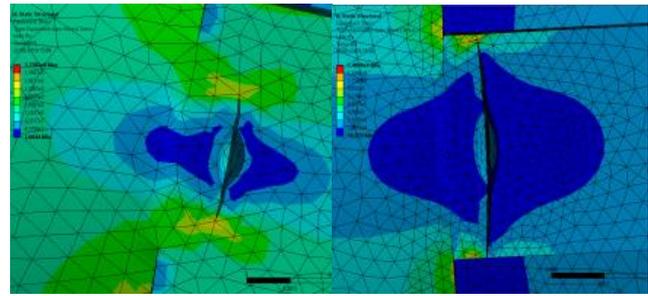
K_{Ic} = Fracture toughness yang bergantung pada jenis materialnya

σ = Tegangan principal yang terapkan pada poros

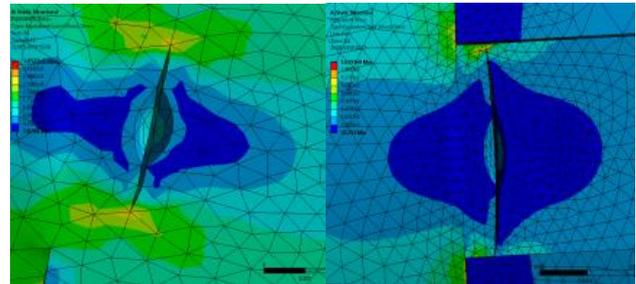
F = Koefisien pada stress intensity factor akibat bending

Hasil laju perambatan retak rata-rata dan total usia siklus dari enam variasi ini adalah sebagai berikut

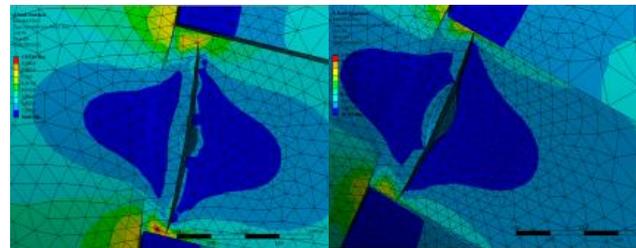
Pada Gambar 14 dan 15 didapatkan hasil untuk AISI 4340 dengan panjang retak 10 mm mempunyai jumlah siklus yang paling tinggi dengan nilai 476000 cycles dan laju perambatan retak (da/dN) yang rendah yaitu dengan nilai rata-rata $2,58 \cdot 10^{-6}$ in/cycle. Posisi kedua yaitu AISI 4140 dengan panjang retak 10 mm mempunyai jumlah siklus 378000 cycles dan laju perambatan retak yang lebih tinggi yaitu dengan nilai rata-rata $2,79 \cdot 10^{-6}$. Posisi ketiga yaitu AISI 4340 dengan panjang retak 20 mm mempunyai jumlah siklus 132000 cycles dan laju perambatan retak dengan nilai rata-rata $7,168 \cdot 10^{-6}$ in/cycle. Posisi keempat yaitu AISI 1040 dengan panjang retak 10 mm mempunyai jumlah siklus yang hampir sama yaitu 119000 cycles dan laju perambatan retak rata-rata $7,24 \cdot 10^{-6}$ in/cycle. Kemudian untuk posisi kelima



Gambar 15. Pola patahan pada AISI 4340 a) 10 mm dan b) 20 mm



Gambar 16. Pola patahan pada AISI 4140 a) 10 mm dan b) 20 mm



Gambar 17. Pola patahan pada AISI 1040 a) 10 mm dan b) 20 mm

yaitu AISI 4140 dengan panjang retak 20 mm mempunyai jumlah siklus 92000 cycles dan laju perambatan retak rata-rata $9,11 \cdot 10^{-6}$ in/cycle. Posisi terakhir yaitu AISI 1040 dengan panjang retak 20 mm mempunyai jumlah siklus 75300 cycles dan laju perambatan retak rata-rata $9,49 \cdot 10^{-6}$ in/cycle. Hal ini sesuai dengan teori Anthony C. Fischer-Cripps, yang menyebutkan bahwa semakin kecil initial crack maka energi yang dibutuhkan semakin besar sehingga siklus yang dibutuhkan untuk menyelesaikan fraktur lebih lama dan dengan inisiasi retak yang lebih besar maka akan semakin cepat untuk mencapai critical crack length. Untuk mengilustrasikan simulasi retak yang telah dilakukan, berikut adalah hasil visualisasi perambatan retak [5].

C. Aspek Metalurgi

Ketangguhan mempengaruhi hasil dari jumlah siklus dan laju perambatan retak. Perbedaan tingkat ketangguhan (K_{Ic}) disebabkan komposisi paduan yang berbeda. Berikut tabel komposisi material AISI 1040, 4140 dan 4340. Ketiga jenis baja ini termasuk sebagai baja karbon menengah (medium carbon steel) dengan kadar karbon rata-rata 0,4%. Struktur mikronya masih terdiri dari ferit dan perlit dengan komposisi perlit yang cukup banyak sehingga baja ini lebih kuat dan keras serta dapat dikeraskan dan banyak digunakan untuk konstruksi mesin seperti poros, poros engkol, batang torak, roda gigi, pegas dan lain sebagainya yang memerlukan kekuatan dan ketangguhan yang lebih tinggi. Dari unsur paduan diatas, terdapat beberapa fungsi. Untuk AISI 4140 dan 4340 terdapat kandungan Cr dan Mo sedangkan pada AISI 4340 terdapat tambahan Ni. Ketiga

unsur ini bertindak sebagai pembentuk karbida dan penstabil karbida. Adanya karbida akan menaikkan sifat tahan aus. Unsur yang dapat membentuk karbida berupa partikel halus yang terdispersi secara merata akan mencegah terjadinya pertumbuhan butir. Dalam banyak hal ini akan memberikan pengaruh baik terhadap sifat mekanik, kekuatan dan ketangguhan yang tinggi [6]. Pada kasus baja ferit-perlit, perambatan *cleavage crack* tidak memerlukan perubahan bidang untuk melewati beberapa batas ferit-perlit dan dapat menunjukkan bahwa ini bukan *high angle boundaries*. Mengingat bahwa karbida adalah fase getas dengan ikatan yang kuat dengan ferit, oleh karena itu menghambat defleksi retak, perambatan retak belahan melalui perlit. Pengamatan terakhir ini akan menunjukkan bahwa parameter mikrostruktur mengendalikan ketangguhan patah adalah wilayah ferit ditambah perlit dengan orientasi ferit yang sama [7].

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa yang telah dilakukan maka dapat ditarik dua kesimpulan dari penelitian ini.

Pertama, hasil dari simulasi perambatan retak menggunakan software ANSYS 19.1 yaitu grafik faktor intensitas tegangan disertai tabel penambahan retak dan distribusi faktor intensitas tegangan. Dimana laju perambatan retak terus meningkat seiring dengan meningkatnya *stress intensity factor*. Hal ini mengartikan bahwa *driving force* pada ujung retak semakin besar. Kemudian hasil perhitungan formula yaitu laju perambatan retak dan usia siklus. Hasil simulasi dihubungkan menggunakan hukum Paris yang melibatkan range faktor intensitas tegangan, konstanta dan eksponen material.

Kedua, panjang inisiasi retak dan jenis material memiliki pengaruh terhadap faktor intensitas tegangan, laju perambatan retak dan usia siklus. Semakin tinggi ketangguhan material yang dipengaruhi oleh unsur paduan maka akan memperlambat laju perambatan retak dan meningkatkan usia siklus. Semakin kecil inisiasi retak maka semakin panjang usia siklusnya. Pada penelitian ini baja AISI 1040 dengan inisiasi 20 mm mempunyai laju perambatan paling cepat dan usia siklus yang paling rendah. Sedangkan baja AISI 4340 dengan inisiasi 10 mm mempunyai laju perambatan paling lambat dan usia siklus yang paling tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] *Ansys Help 19.1.*, Nasdaq Ansys S&P 500 Component, Pennsylvania, United State (2019).
- [2] M. Barsom, *Fracture and Fatigue Control in Structures*, 3rd ed., Oxford, Butterworth-Heinemann (1999).
- [3] M. Vorel and E. Leidich, "Accuracy of Determining Stress Intensity Factors in Some Numerical Programs," *Acta Polytechnica*, Vol 41, No.2. (2001).
- [4] G. Sen, "Determination of Fracture and Fatigue Behaviours of 4340 Steel," M.S. Thesis, Graduate School of Mathematical and Applied Science, Ankara, Turki (2015).
- [5] A. Fischer, *Introduction to Contact Mechanics*, 2nd Edition, Springer Science & Business Media, LLC. USA (2007).
- [6] W. Suherman, "Ilmu Logam II," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia (1999)
- [7] M.A. Linaza, J.L. Romero, J.M. Rodriguez-Ibabe, and J.J. Urcola, "Influence of The Microstructure on The Fracture Toughness and Fracture Mechanism of Forging Steels Microalloyed with Titanium with Ferrite-Pearlite Structures," *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 29 (1993), 451-456