

ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN PELAT DATAR DENGAN MODEL RETAK TEPI DAN RETAK TENGAH

STRESS INTENSITY FACTOR ANALYSIS ON A FLAT PLATE WITH EDGE AND CENTER CRACK MODEL

Abian Nurrohmad

Pusat Teknologi Penerbangan, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

abian.nurrohmad@lapan.go.id

Abstrak

Salah satu faktor yang membahayakan operasi pesawat udara adalah adanya retakan. Selain bisa merambat, retakan juga menyebabkan berkurangnya kekuatan struktur karena adanya distribusi tegangan di sekitar ujung retak. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan perhitungan faktor intensitas tegangan pada pelat datar dengan retakan di tepi pelat dan di tengah pelat. Geometri dan panjang retak ditentukan di awal. Beban yang diberikan terdistribusi sebesar 1 MPa. Material yang digunakan adalah aluminium seri 2024-T3 yang biasa digunakan di pesawat terbang. Simulasi numerik dengan metode elemen hingga menggunakan *software* Abaqus telah berhasil dilakukan. Hasil perhitungan numerik selanjutnya dibandingkan dengan perhitungan analitik. Perbedaan hasil antara numerik dan analitik yang dibawah 5% menunjukkan metode perhitungan numerik yang digunakan dapat diterima.

Kata kunci: mekanika retak, faktor intensitas tegangan, metode elemen hingga.

Abstract

One of the factors that endanger aircraft operations is the presence of cracks. In addition to propagating, cracks also cause structural strength loss due to the stress distribution around the crack tip. This study aims to calculate the stress intensity factor on the flat plate with cracks at the edge of the plate and in the center of the plate. Geometry and crack lengths are determined at the beginning. The distributed load is distributed at 1 MPa. Materials used are aluminum 2024-T3 series commonly used in aircraft. Numerical simulation with finite element method using Abaqus software has been successfully done. The result of numerical calculation is then compared with the analytical calculation. The difference between numeric and analytic results below 5% indicates the numerical calculation method used is acceptable

Keywords: fracture mechanics, stress intensity factor, finite element method.

1. PENDAHULUAN

Pesawat terbang adalah moda transportasi yang memiliki tingkat keamanan paling tinggi. Untuk menjamin keamanan tersebut, dikenal konsep tenggang cacat struktur pada rancang bangun pesawat. Tenggang cacat struktur yang dimaksud adalah struktur pesawat terbang dipastikan tidak akan mengalami kegagalan sampai cacat atau retak yang terjadi dapat ditemukan. Salah satu cacat yang bisa terjadi pada struktur pesawat adalah adanya retak. Retak sendiri bisa terjadi akibat kesalahan proses manufaktur atau muncul seiring bertambahnya waktu pengoperasian pesawat yang disebut dengan *fatigue*. Adanya cacat pada pesawat apabila tidak diperhatikan dengan baik maka akan menyebabkan kegagalan struktur dalam menahan beban yang diterima. Siklus pembebanan (*load cycle*) pada struktur pesawat dapat menyebabkan retak mengalami pertambahan panjang dan atau muncul retak bercabang (*multiple site damage*). Selain itu adanya retak juga bisa mengakibatkan munculnya konsentrasi tegangan secara lokal yang menyebabkan beban yang terjadi bertambah berkali lipat sehingga menurunkan kekuatan struktur.

Distribusi tegangan disekitar ujung retak dipengaruhi oleh nilai *stress intensity factor* atau disebut juga faktor intensitas tegangan. Faktor intensitas tegangan digunakan karena adanya daerah plastis pada bagian ujung retakan. Untuk pelat tidak terhingga, secara matematis nilai faktor intensitas tegangan dapat dituliskan sebagai berikut:

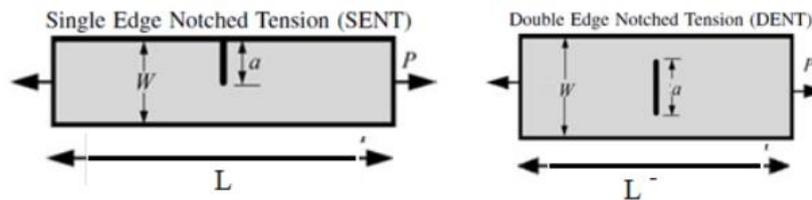
$$K = \beta\sigma\sqrt{\pi a} \tag{1}[1]$$

Dimana β adalah faktor geometri yang berbeda-beda tergantung kepada bentuk spesimen dan pembebanan yang terjadi. “ σ ” adalah tegangan yang dialami struktur dan “ a ” adalah panjang retak. Persamaan di atas mengakomodir struktur yang sudah mengalami retak dengan panjang retak tertentu. Beberapa tahun terakhir ini ada banyak riset yang telah dilakukan terkait tentang simulasi numerik untuk melakukan analisa retak pada pelat. Liu, dkk.[2] Menggunakan metode XFEM untuk melakukan simulasi numerik fenomena perambatan retak *fatigue* yang berinteraksi dengan *micro-defects*. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa adanya *micro-crack* akan mempercepat *macro-crack* dan membelokkan arah perambatan retak. Benvenuti[3] melakukan penelitian bahwa metode XFEM efektif untuk menghitung faktor intensitas tegangan pada pelat homogen. Feng dan Li[4], mengembangkan logaritma yang efisien untuk simulasi retak *fatigue*. Metode eXtended FEM (XFEM) dikombinasikan dengan metode *combined approximation* (CA). Menghasilkan waktu dan biaya perhitungan untuk simulasi *crack* akibat *fatigue* yang lebih rendah. Cai, dkk[5], menurunkan *threshold formula* untuk perhitungan rata-rata nilai *stress intensity factor* pada *fatigue limit condition* dari *crack front*. Ramezani, dkk[6], menyajikan solusi empirik untuk perhitungan *stress intensity factor* pada retak permukaan di silinder solid akibat beban torsi murni menggunakan *dual boundary element method* (DBEM). Shlyannikov dan Zakharov[7], membandingkan metode numerik dan analitik untuk melihat efek *stress intensity factor* pada geometri spesimen dengan *mixed mode crack behavior*. Livieri[8], melakukan evaluasi *stress intensity factor* pada lubang ekuivalen. Wu, dkk[9], melakukan studi *weight function* pada retak tunggal dan ganda di lubang lingkaran pada pelat tak hingga.

Paper ini akan melakukan perhitungan nilai Faktor Intensitas Tegangan pada pelat yang terdapat retak. Akan dibandingkan antara perhitungan metode elemen hingga dengan metode analitik. Diharapkan nantinya metode elemen hingga ini dapat digunakan untuk melakukan analisa pada masalah mekanika retak secara lebih akurat.

2. METODOLOGI

Ada 2 skenario kasus pada paper ini. Yang pertama pada geometri *Single Edge Notched Tension* (SENT) dan *Double Edge Notched Tension* (DENT). Kasus yang pertama adalah retak berada di tepi pelat, sedangkan kasus yang kedua retak berada di tengah pelat. Beban yang diberikan adalah beban tarik sebesar 1 MPa dengan arah tegak lurus terhadap panjang retak.



Gambar 1. Skenario kasus penelitian yang dilakukan

Tabel dibawah ini menjelaskan keterangan lebih detail dari gambar 1

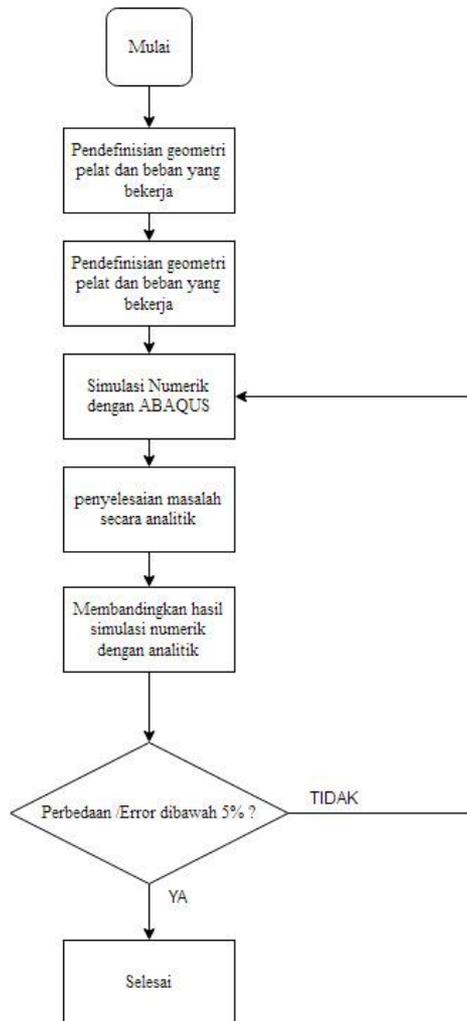
Tabel 1. Penjelasan Geometri dari skenario kasus penelitian

komponen	dimensi
W	50.8 mm
B	25.4 mm
a/W	0.5
L	203 mm

Material yang digunakan adalah aluminium 2024-T3 dengan data material sebagai berikut:

Tabel 2. Data Material

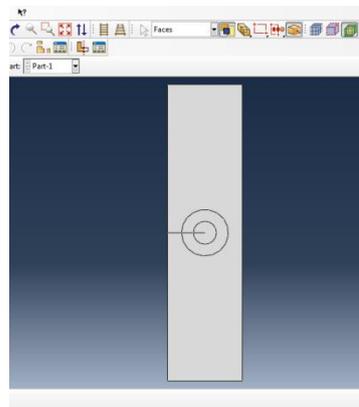
Modulus Young	70 GPa
ν	0.33



Gambar 2. Prosedur Penelitian

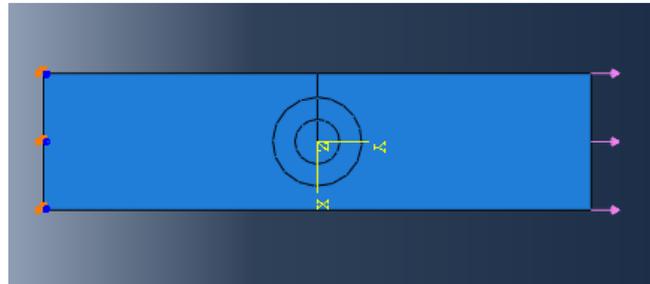
Pemodelan *Finite Element*

Pemodelan *finite element* dimulai dengan membuat pelat dengan geometri sebagaimana ditentukan di awal. Di tengah bagian sisi kiri dibuat garis lurus ke samping dengan panjang 25.8 mm yang akan merepresentasikan sebagai retakan pada pelat. Dari ujung garis mendatar pada titik yang disebut sebagai *crack tip* dibuat 2 buah lingkaran dengan jari-jari yang berbeda. Lingkaran ini sebagai garis bantu dalam proses *meshing* untuk membuat jumlah *mesh* yang lebih banyak di area sekitar *crack tip* dimana bagian tersebut sebagai area *interest* yang ingin ditinjau. Dari area lingkaran paling kecil ada lingkaran transisi sehingga *meshing* pada area yang jauh pada *crack tip* bisa dibuat lebih besar. Strategi ini dilakukan untuk menghemat waktu dan biaya kalkulasi dengan mendapatkan hasil yang lebih akurat. Untuk detailnya bisa dilihat di gambar 3.



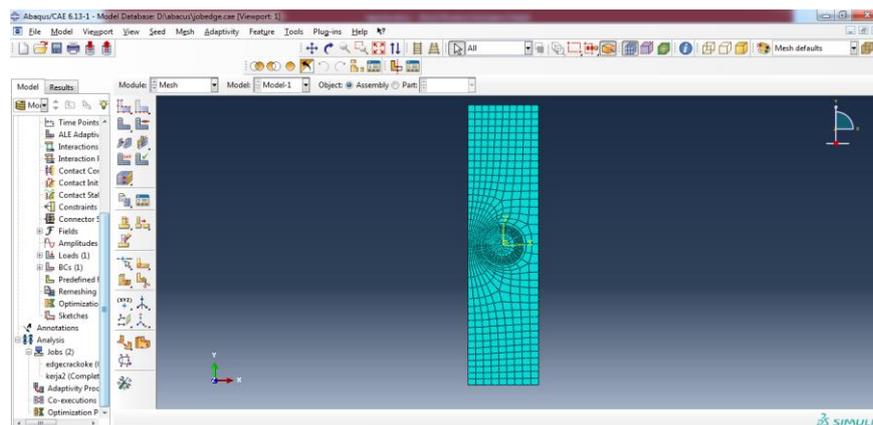
Gambar 3. Pembuatan Geometri Pelat yang memiliki retak di Abaqus

Selanjutnya pada metode *finite element*, perlu didefinisikan kondisi batas dan beban yang bekerja. Sebagaimana pendefinisian kasus di awal, pada bagian ujung bawah pelat ditumpu dengan tumpuan *fixed* dimana pelat ditahan translasi dan rotasi ke semua arah. Kemudian di ujung atas pelat diberi beban terdistribusi sebesar 1 MPa. Lokasi kondisi batas dapat dilihat di gambar 4.



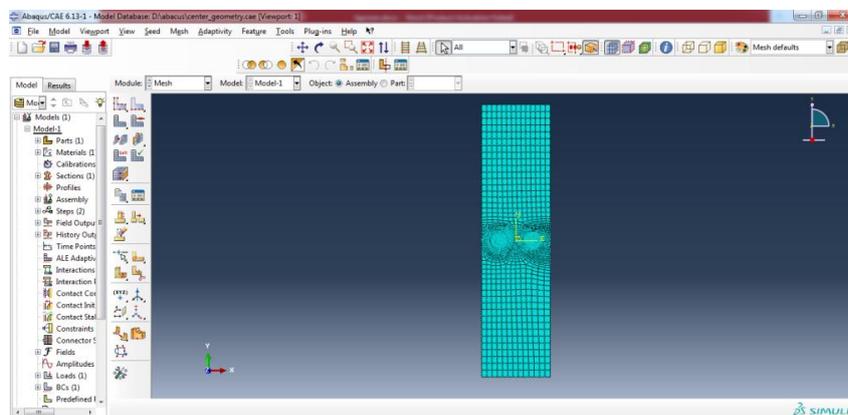
Gambar 4. Pendefinisian Load dan kondisi batas

Proses selanjutnya adalah pembuatan meshing. Sebagaimana dijelaskan di gambar 1 bahwa area interes berada di sekitar *crack tip* yang dibatasi oleh lingkaran paling kecil. Sehingga pada area ini diberi mesh dengan ukuran yang lebih kecil. Kemudian pada lingkaran yang lebih luar adalah area transisi. Area ini dimaksudkan agar nodal tetap tersambung antara meshing yang paling kecil dengan meshing yang paling lebih besar di luar lingkaran. Pada area yang jauh dari *crack tip* ukuran mesh tidak perlu dibuat terlalu besar karena akan memakan waktu kalkulasi yang lebih lama dan tidak berpengaruh terhadap hasil perhitungan. Detail meshing dapat dilihat di gambar 5 dan 6.



Gambar 5. Mesh Generation untuk geometri 1

Meshing pada geometri 2 juga memiliki konsep yang sama dengan geometri 1. Terlihat bahwa di dekat *crack tip*, ukuran meshing dibuat sangat kecil untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat. Kemudian agak di luar dari *crack tip* ukuran mesh dibuat lebih besar sebagai area transisi. Pada area yang jauh dari crack tip maka ukuran mesh dibuat lebih besar karena tidak begitu berpengaruh lagi terhadap keakuratan hasil perhitungan.

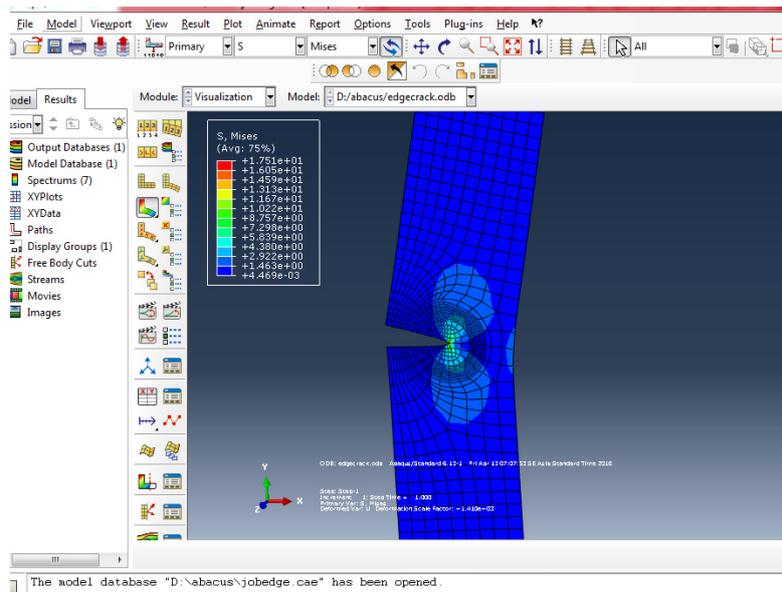


Gambar 6. Mesh Generation untuk geometri 2

3. HASIL DAN ANALISA

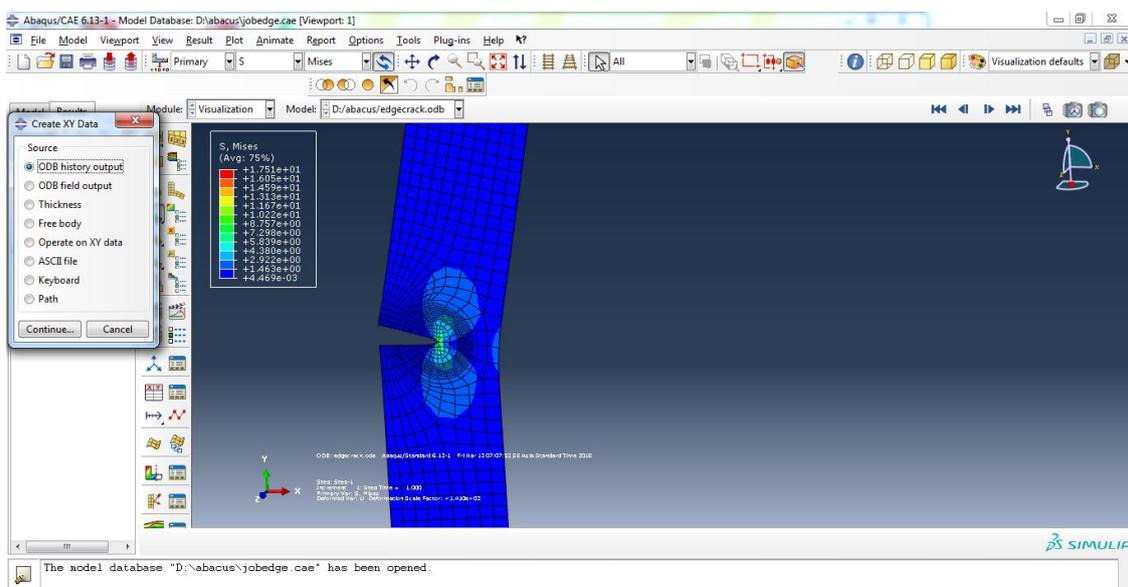
Solusi Numerik FEM

Setelah dilakukan set up model finite element, maka langkah selanjutnya adalah melakukan *running*. Hasil *running* pada *software* Abaqus telah berhasil dilakukan. Kontur distribusi tegangan Von Mises dapat diamati pada gambar 7 untuk geometri 1 dan gambar 10 untuk geometri 2. Dapat terlihat bahwa nilai tegangan Von Mises maksimum sebesar 17.5 MPa untuk geometri 1 dan 24.3 MPa untuk geometri 2. Secara umum nilai tegangan ini masih jauh dibawah nilai *Yield Strength* aluminium sehingga pelat belum mengalami kegagalan [11]. Selain itu dari informasi ini dapat diketahui bahwa pelat masih berada di zona elastis sehingga asumsi linear masih berlaku dan dapat diterima.



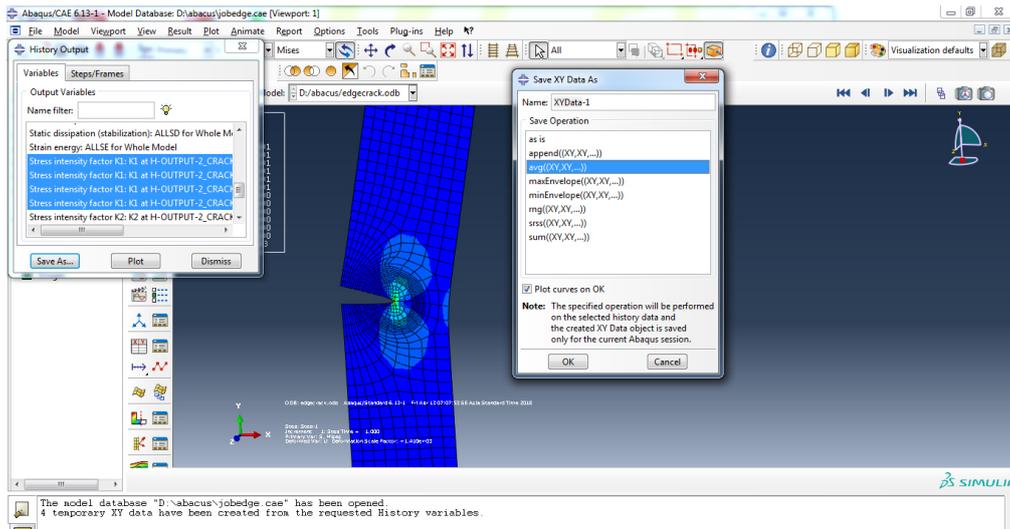
Gambar 7. Distribusi tegangan Von Mises pada geometri 1

Untuk melihat nilai SIF, yang pertama adalah klik pada XY data. Selanjutnya pilih ODB *history output*. Blok semua nilai K_I . Pilih rata-ratanya lalu tampilkan nilai K_I rata-rata.

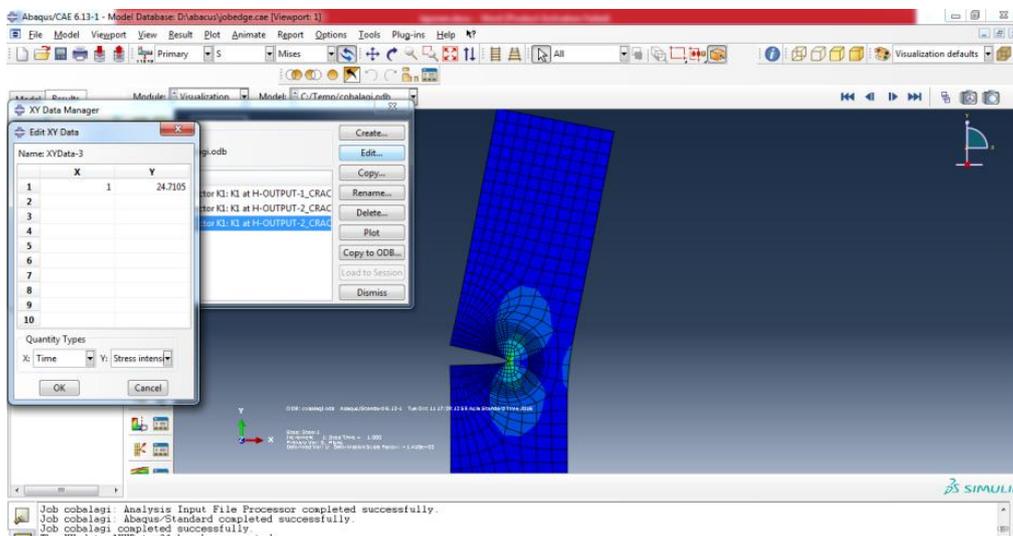


Gambar 8. Membuka ODB history output

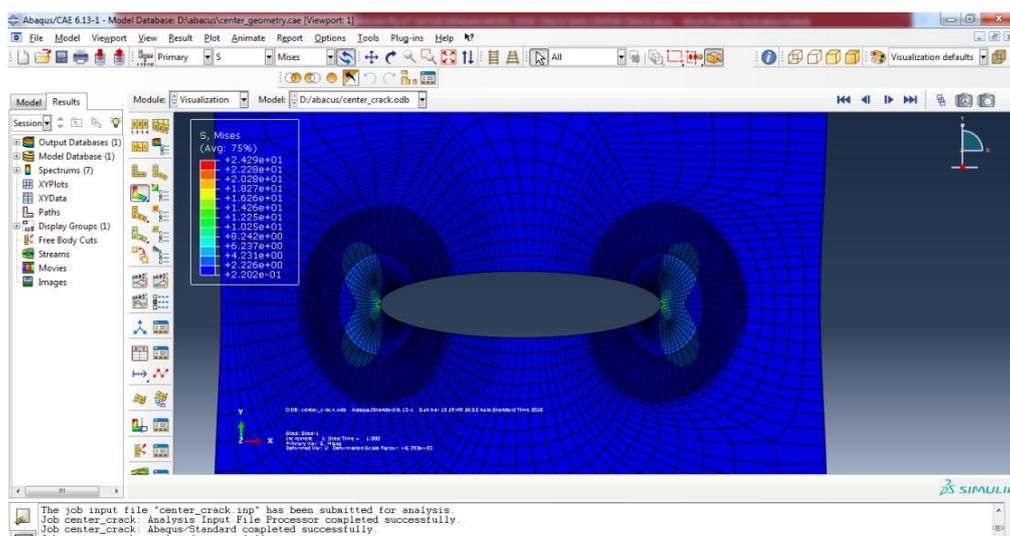
Nilai K_I yang didapat dari hasil *running* Abaqus harus dirata-rata terlebih dahulu dan dilihat pada kurva *SIF vs time*



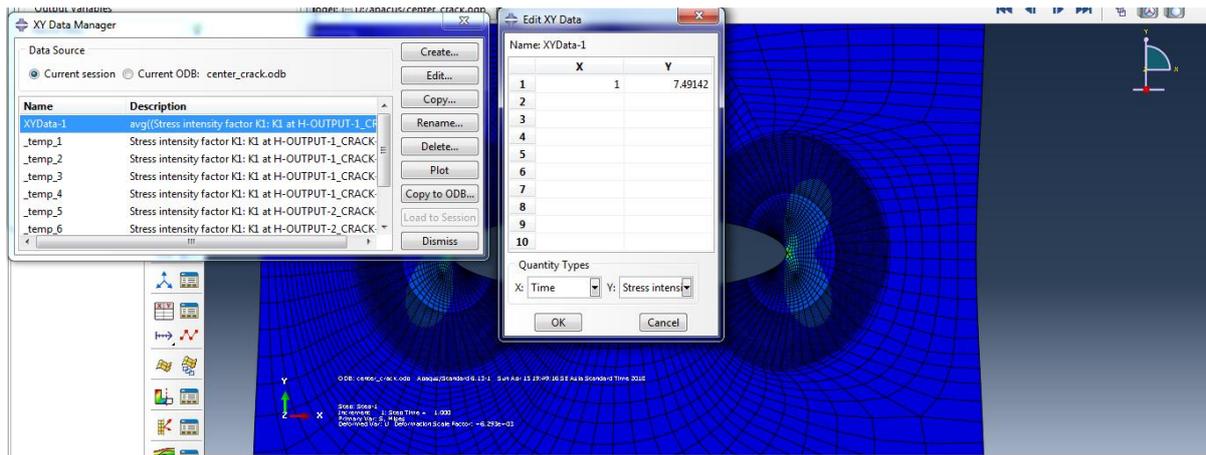
Gambar 9. Proses Mengambil nilai rata-rata *Stress Intensity Factor*



Gambar 10. Display nilai *Stress Intensity Factor* geometri 1



Gambar 11. Distribusi tegangan Von Mises pada geometri 2



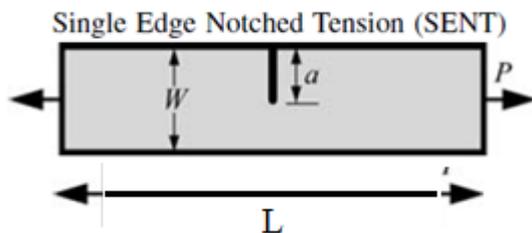
Gambar 12. Display nilai *Stress Intensity Factor* geometri 2

Output nilai *stress intensity factor* (K_I) yang didapat dari perhitungan dapat dilihat di gambar 10 untuk geometri 1 dan gambar 12 untuk geometri 2. Didapat nilai K_I untuk geometri 1 sebesar $24.7105 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ dan untu geometri 2 sebesar $7.49 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan analitik untuk dibandingkan hasilnya dengan perhitungan numerik.

Gopichand [11] telah membandingkan hasil simulasi numerik dengan pengujian eksperimental untuk kasus retak pada pelat alumunium. Metode yang digunakan adalah *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT). Untuk kasus retak tengah yang diteliti oleh Gopichand, didapat nilai faktor intensitas tegangan K_I sebesar $321.36 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ untuk beban sebesar 80 MPa. Dari sini dapat dilihat bahwa hasil yang didapat oleh penulis cukup similar dengan hasil yang didapat oleh Gopichand.

Solusi Analitik

3.1.1. Geometri 1



Dari hasil menggunakan *software* Abaqus didapat nilai SIF sebesar $24.7105 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} = 0.781415 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Untuk perhitungan analitik geometri 1 menggunakan persamaan sebagai berikut[10]:

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2)$$

$$P = 1 \text{ MPa} \times (25.4 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm}) = 0.00129 \text{ N}$$

$$B = 25.4 \text{ mm}$$

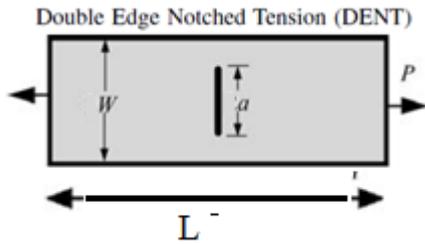
$$W = 50.8 \text{ mm}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \sqrt{\frac{2 \tan \frac{\pi a}{2W}}{\cos \frac{\pi a}{2W}}} \left[0.752 + 2.02 \left(\frac{a}{W}\right) + 0.37 \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2W}\right)^3 \right] \quad (3)$$

Didapat nilai K_I secara analitik = $0.79846 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Error = 2.13%

3.2.2 Geometri 2



Dari hasil menggunakan *software* Abaqus didapat nilai SIF :

Crack tip sebelah kiri, $K_I = 7.49138 \text{ MPa}\sqrt{mm} = 0.236898 \text{ MPa}\sqrt{m}$

Crack tip sebelah kanan, $K_I = 7.49146 \text{ MPa}\sqrt{mm} = 0.236901 \text{ MPa}\sqrt{m}$

Untuk perhitungan analitik geometri 2, nilai K_I sama seperti geometri 1, menggunakan persamaan (2)

$P = 1 \text{ MPa} \times (25.4 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm}) = 0.00129 \text{ N}$

$B = 25.4 \text{ mm}$

$W = 50.8 \text{ mm}$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\sqrt{\frac{\pi a}{2W}}}{\sqrt{1 - \frac{a}{W}}} \left[1.122 - 0.561 \left(\frac{a}{W}\right) - 0.205 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.471 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 0.190 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (4)$$

Didapat nilai K_I secara analitik = $0.243218 \text{ MPa}\sqrt{m}$

Nilai error sebesar 2.67%

Secara analisis teoritik harusnya nilai SIF di kedua crack tip adalah sama. Akan tetapi pada perhitungan dengan metode FEM ini memberikan hasil yang sedikit berbeda. Hal ini disebabkan oleh jumlah element meshing di kedua crack tip yang berbeda.

4. KESIMPULAN

Simulasi numerik metode elemen hingga dengan *software* Abaqus telah berhasil dilakukan untuk memodelkan crack pada pelat aluminium dengan model retak tepi dan retak tengah. Untuk kedua geometri perbedaan hasil antara simulasi numerik dengan perhitungan analitik berada di kisaran angka 2%. Lebih detailnya bisa dilihat di tabel 3. Dari pekerjaan ini bisa disimpulkan bahwa simulasi numerik telah tervalidasi untuk bisa memodelkan dan menghitung faktor intensitas tegangan pada retak yang terjadi di pelat logam, pada kasus ini adalah pelat aluminium. Dengan begitu metode elemen hingga dapat digunakan pula untuk memodelkan retak pada komponen yang lebih kompleks seperti pada sayap maupun fuselage pesawat terbang.

Untuk pekerjaan selanjutnya alangkah lebih baiknya jika dimodelkan fenomena retak pada pelat komposit. Sampai saat ini pemodelan retak pada komposit masih menantang karena kompleksitasnya.

Tabel 3. Perbandingan hasil simulasi numerik dengan perhitungan analitik

	FEM	analitik	
	$K_I \text{ (MPa}\sqrt{m})$	$K_I \text{ (MPa}\sqrt{m})$	error (%)
Geometri 1	0.781	0.798	2.1
Geometri 2	0.237	0.243	2.6

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Agus Aribowo selaku Kepala Bidang Progfas dan Bapak Gunawan Prabowo selaku Kepala Pusat Teknologi Penerbangan-LAPAN yang telah mendukung kegiatan ini. Penulis Juga mengucapkan terimakasih kepada Bapak Atik Bintoro sebagai pembimbing

penulis dalam melakukan penelitian. Terima kasih juga kami ucapkan kepada seluruh tim Laboratorium Aerostruktur Pustekbang-LAPAN.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis dengan ini menyatakan bahwa seluruh isi makalah ini merupakan tanggung jawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Putra, Ichsan Setya. *Lecture Damage Tolerance Analysis*. Bandung: ITB. 2016.
- [2] Liu, dkk. "Numerical Simulation of fatigue crack propagation interacting with micro-defect using multiscale XFEM." *Int. Journal of Fatigue*, 109. 70-82, 2018.
- [3] Benvenuti. "An Effective XFEM with equivalent eigenstrain for stress intensity factors of homogeneous plates", *Comput. Methods Appl. Mech Engrg.* 321, 427-454. 2017.
- [4] Feng dan Li. "An accurate and efficient algorithm for the simulation of fatigue crack growth based on XFEM and combined approximations", *Applied Mathematical Modelling* 55. 600-615. 2018.
- [5] Cai, dkk. "A threshold formula for fatigue crack growth with mean stress intensity factors". *International Journal of Mechanical Sciences* 135, 639-645. 2018.
- [6] Ramezani, dkk. "Empirical solutions for stress intensity factors of a surface crack in a solid cylinder under pure torsion". *Engineering Fracture Mechanics* 193. 122-136. 2018
- [7] Shlyannikov dan Zakharov. "Generalization of mixed mode crack behavior by the plastic stress intensity factor". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 91. 52-65. 2017
- [8] Livieri. "Stress intensity factors from stress analysis of an equivalent hole". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 84. 119-128. 2016
- [9] Wu, dkk. "Discussions on weight functions and stress intensity factors for radial crack(s) emanating from a circular hole in an infinite plate". *Engineering Fracture Mechanics* 192. 192-204. 2018
- [10] Tada, H., Paris P.C, Irwin, G.R, "The stress analysis of cracks handbook". Edisi 2. St Louis-Paris. 1985
- [11] A.Gopichand, M.Surendra Kumar, A.V.N.L.Sharma, "Computation of Stress Intensity Factor of Cracked Aluminium Plate Using Virtual Crack Closure Technique". Vol 2 Issue 6. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* ISSN: 2248-9622. 2012