

## ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN DAN LAJU PERAMBATAN RETAK UNTUK CORNER CRACK DENGAN LEBAR SPESIMEN YANG BERVARIASI

Wiwiek Hendrowati, Bambang Daryanto W.,

Jurusan Teknik Mesin  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Jl. Arief Rahman Hakim, Kampus Sukolilo, Surabaya  
Jawa Timur, Indonesia  
Telp. (031) 5946230, Fax. (031) 5922941, E-mail : [wiwiek@me.its.ac.id](mailto:wiwiek@me.its.ac.id).

### ABSTRAK

Pada penelitian ini metode elemen hingga diaplikasikan untuk menentukan faktor intensitas tegangan pada spesimen aluminium 2024 T3 dengan lebar spesimen yang bervariasi, yang memiliki corner crack berbentuk seperempat elip. Penelitian dilakukan untuk 3 nilai lebar spesimen ( $W$ ), yaitu 12 mm, 16 mm dan 20 mm. Sedangkan tebal spesimen ( $B$ ) dan dimensi retakan awal ( $c$  arah lebar dan  $a$  arah tebal) dibuat sama. Pembebanan yang diberikan adalah tegangan merata sebesar 252 Mpa dalam arah tegak lurus terhadap permukaan retak. Dianalisa pula laju perambatan retak arah lebar dan arah tebal.

Program metode elemen hingga, baik untuk kondisi LEFM maupun EPFM, menunjukkan bahwa dengan bertambahnya dimensi retakan maka faktor intensitas tegangan juga bertambah. Rasio  $c/W$  yang lebih rendah (spesimen yang lebih lebar) menghasilkan faktor intensitas tegangan yang lebih rendah. Untuk rasio  $c/W$  yang lebih rendah tersebut retakan akan lebih mudah merambat, karena memerlukan energi yang lebih rendah. Perbandingan dengan hasil eksperimen menunjukkan bahwa kedua metode (numerik dan eksperimental) menunjukkan kecenderungan yang sama. Kesesuaian nilai utamanya ditunjukkan oleh  $\Delta K$  rendah. Perbedaan laju perambatan retak terdeteksi untuk  $\Delta K$  tinggi, dimana perhitungan EPFM (yang mempertimbangkan munculnya daerah plastis) menunjukkan penyimpangan yang lebih kecil daripada kondisi LEFM.

**Kata kunci :** intensitas tegangan, perambatan retak, corner crack, metode elemen hingga

### 1. Pendahuluan

Kelelahan pada material dapat didefinisikan sebagai patahnya material setelah mengalami pembebanan berulang dalam sejumlah siklus. Mekanisme patah lelah secara umum meliputi tiga tahapan, yaitu : awal terjadinya retakan, perambatan retakan dan patah statik. Faktor intensitas tegangan ( $K$ ), sebagai salah satu parameter untuk memprediksi pertumbuhan retak, dapat ditentukan secara analitis, numeris, maupun eksperimental. Dengan mengetahui pertumbuhan retak, umur dari suatu komponen yang memiliki retakan dapat diprediksi.

Penelitian tentang perambatan retak banyak dilakukan oleh para peneliti, berupa analisa, simulasi dan empiris, baik kasus 2 dimensi ataupun 3 dimensi. Diantaranya adalah implementasi

Boundary Element Method (BEM) untuk analisa perambatan retak 3 dimensi untuk beban yang berulang dengan amplitudo konstan [1], yang dilanjutkan dengan pengembangan perangkat lunak berdasarkan BEM [2] dengan kemampuan *remeshing* secara otomatis. Penerapan kombinasi FEM-BEM pada mekanika patahan elastis linier digunakan untuk menganalisa pelat dengan retakan setengah lingkaran (*edge crack*) dan 2 retakan seperempat elip [3], dimana daerah sekitar retakan dimodelkan dengan BEM sedangkan daerah diluarnya dimodelkan dengan *Finite Element Method (FEM)*. Pada [4] dilakukan analisa faktor intensitas tegangan, yang dinormalisasi menjadi *Boundary Correction Factor (BCF)*, sebagai fungsi dari dimensi retakan dan geometri lubang *fastener*, untuk 3 lokasi yaitu *corner*, *knee* dan *lip*.



Penelitian [5] melakukan penggunaan teknik numerik untuk menentukan faktor intensitas tegangan  $K_I$  sepanjang *crack front* pada *corner crack* yang berbentuk seperempat elip.

Pada [6] dilakukan eksperimen terhadap profil T aluminium 6061-T6 dengan *edge crack* guna memverifikasi hasil analisa numerik dari faktor intensitas tegangan. Studi eksperimental [7] membahas tentang laju perambatan retak pada arah kedalaman (a) dan arah lebar (c), dimana pada kasus *surface crack* dimensi retakan dapat dikelompokkan menjadi 3 kategori yaitu retak dalam ( $a > c$ ), retak dangkal ( $a < c$ ) dan retak seimbang ( $a = c$ ).

Dengan memperhatikan referensi sebagaimana dipaparkan, pada penelitian ini dilaksanakan analisa faktor intensitas tegangan retak pojok eliptik (kasus 3-D) yang ada pada sebuah spesimen, menggunakan metode elemen hingga. Untuk keperluan analisa retakan digunakan elemen singular di daerah sekitar ujung retak. Faktor intensitas tegangan dianalisa menggunakan *Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)* dan *Elastic Plastic Fracture Mechanics (EPFM)*, dengan mengingat adanya daerah plastis di ujung retakan yang berpengaruh terhadap laju perambatan retak. Selanjutnya, hasil yang didapat secara numerik ini dibandingkan dengan hasil eksperimen yang diperoleh pada [8].

Dalam pelaksanaan penelitian beberapa kondisi ditetapkan / diambil, yaitu:

- Untuk keperluan pemodelan, spesimen dengan retak pojok eliptik hanya dimodelkan setengah bagiannya, dengan memanfaatkan kesimetrisan kasus.
- Jenis elemen yang digunakan adalah elemen solid isoparametrik 8-*node* untuk memodelkan elemen bukan di ujung retak, dan elemen solid isoparametrik 20-*node* untuk memodelkan elemen di ujung retak.
- Material diasumsikan homogen dan isotropik.
- Lingkungan kerja diasumsikan berkondisi sama.

## 2. Dasar Teori

### Faktor Intensitas Tegangan, LEFM

*Displacement* menurut sumbu x, y, dan z (u, v, dan w) di sekitar ujung retakan adalah :

$$\begin{aligned} u &= \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ (2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right\} \\ &\quad - \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ (2k+3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right\} \\ v &= \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ (2k-1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right\} \\ &\quad - \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ (2k+3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right\} \\ w &= \frac{K_{III}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

dimana

- $K_I$  : faktor intensitas tegangan modulus I
- $K_{II}$  : faktor intensitas tegangan modulus II
- $K_{III}$  : faktor intensitas tegangan modulus III
- $G$  : modulus geser
- $k$  :  $(3-4\nu)$  kondisi plane strain  
 $\frac{(3-\nu)}{(1+\nu)}$  kondisi plane stress
- $\nu$  : Poisson's ratio
- $r$  : jarak radial titik
- $\theta$  : sudut orientasi titik

Untuk beban tarik dalam arah sumbu-z (tegak lurus bidang retakan), faktor intensitas tegangan akibat pembebanan mode I dapat dianalisa menurut :

$$K_I \left\{ \begin{array}{l} (2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \\ (2k+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \end{array} \right\} = 4G \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \left\{ \begin{array}{l} u \\ v \end{array} \right\} \quad (2)$$

Dengan mensubstitusikan nilai u, v, r,  $\theta$  dan G pada persamaan (2) untuk *node* sepanjang garis radial di sekitar ujung retak, dapat diperoleh hubungan antara K dengan jarak radial r. Kemudian, dengan meniadakan hasil pada titik yang sangat dekat dengan ujung retak, solusi diekstrapolasi untuk  $r = 0$  dengan memakai regresi linier.

### Intensitas Tegangan, EPFM

Integral J merupakan parameter yang dikembangkan untuk mendefinisikan kondisi deformasi elastis dan plastis di sekitar retakan. Laju energi untuk membuat retak baru J dapat ditentukan menurut



$$\frac{\pi\beta^2\sigma^2a}{E} + \frac{H\sigma^{n+1}a}{F} = J \quad (3)$$

dimana

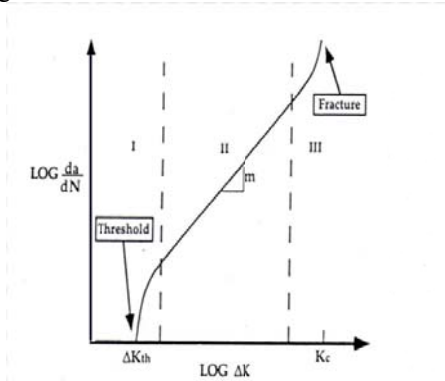
- $\beta$  : faktor geometri spesimen
- H : faktor koreksi geometri
- $\sigma$  : tegangan
- E : modulus elastisitas
- F : modulus plastisitas
- n : *strain hardening exponent*
- a : panjang retak

Selanjutnya,

$$K_I = \sqrt{J.E} \quad (4)$$

### Laju Perambatan Retak

Untuk pembebanan dengan amplitudo konstan, laju perambatan retak merupakan fungsi dari faktor intensitas tegangan, seperti ditunjukkan oleh gambar 1.



Gambar 1. Laju perambatan retak

Daerah I : Merupakan daerah dimana mulai timbul retak mikro (*crack initiation*). Pada daerah tersebut terdapat nilai ambang ( $\Delta K_{threshold}$ ), dimana dibawah nilai ambang retak sangat sulit merambat.

Daerah II : Pada daerah ini retak mikro membesar dan jika pembebanan berlanjut maka retak akan merambat (*crack propa-gation*). Logaritma rambatan dan logaritma faktor intensitas tegangan mempunyai hubungan linier. Persamaan Paris menunjukkan hubungan antara laju perambatan retak dengan faktor intensitas tegangan sebagai berikut

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (5)$$

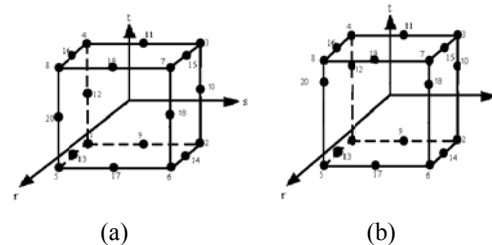
dimana C dan m adalah parameter material.

Daerah III : Pada daerah ini terjadi patah

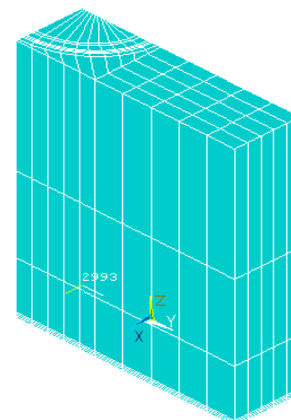
lelah yang merupakan salah satu kategori kegagalan pada struktur atau material. Permukaan patah lelah mempunyai ciri-ciri khusus, dimana pada dasarnya dapat dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah patah lelah dan daerah patah statik yang dipisahkan oleh garis pantai (*beach markings*).

### 3. Metodologi Pemodelan

Pemodelan spesimen dengan retak pojok (yang dilakukan untuk setengah bagian struktur) dilaksanakan sebagai kasus 3-D. Untuk merepresentasikan singularitas di daerah sekitar ujung retak diperlukan *meshing* yang sangat halus. Pada penelitian ini elemen singular dibentuk dengan menggeser *nodes* tengah dari elemen solid isoparametrik 20-*node* ke posisi seperempat panjang sisi elemen yang bersesuaian dengan bentuk retakan. Dari pergeseran tersebut terbentuk suatu elemen yang disebut sebagai elemen heksahedron *quarter-point* seperti yang terlihat pada gambar 1b.



Gambar 2.  
(a) Elemen heksahedron isoparametrik 20 node  
(b) Elemen singular heksahedron quarter-point 20 node



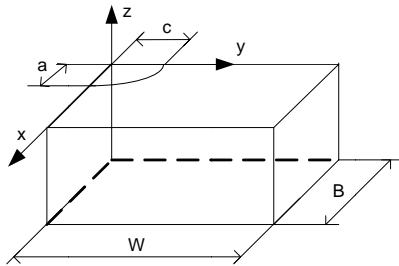
Gambar 3. FEM mesh



## Analisa

Pada penelitian ini dilakukan analisa faktor intensitas tegangan dan laju perambatan *corner crack* dengan lebar spesimen yang bervariasi. Model untuk metoda elemen hingga diimplementasikan sesuai dengan eksperimen yang dilaksanakan, sebagai berikut (ukuran W, B, c, a dalam mm) :

Kode	Spesimen		Retak mula	
	lebar (W)	tebal (B)	c	a
A1206	12	6	4	2
A1606	16	6	4	2
A2006	20	6	4	2



Gambar 4. Dimensi spesimen dan retak pojok

## Input

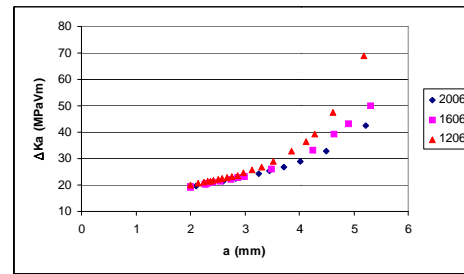
Masukan data yang diperlukan adalah :

- Spesifikasi spesimen
  - Disamping geometri spesimen aluminium 2024-T3, data yang dimasukkan adalah
    - Modulus elastisitas (E) : 73.100 MPa
    - Poisson's ratio ( $\nu$ ) : 0.33
- Pembebanan
  - Beban yang diberikan berupa tegangan tarik sebesar 252 MPa yang dibebankan secara merata, dalam arah sumbu-z (tegak lurus bidang retakan).
- Kondisi batas
  - Pada bidang simetri diberi *displacement constraint*  $z = 0$  sepanjang sumbu-z, kecuali di ujung retak mula dan retak yang terjadi (tidak diberi *constraint* / dibebaskan).
- Data retakan
  - Dimensi c dan a dari retakan yang digunakan adalah seperti yang dihasilkan oleh eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya [8].

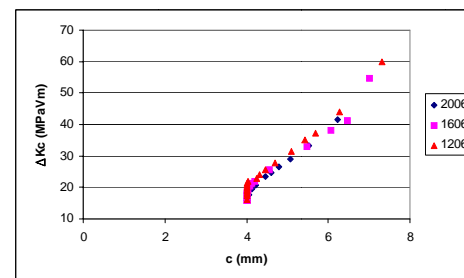
## 4. Hasil dan Pembahasan

### Intensitas Tegangan vs. Dimensi Retakan

Hasil perhitungan dalam kondisi *LEFM* maupun *EPFM* dari program metode elemen hingga ditampilkan dalam bentuk grafik  $\Delta K_a$  dan  $\Delta K_c$  vs. panjang retak arah a dan c seperti terlihat di gambar 5 dan gambar 6.



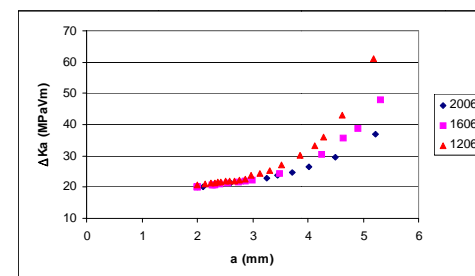
(a)  $\Delta K_a$  LEFM vs. a



(b)  $\Delta K_c$  LEFM vs. c

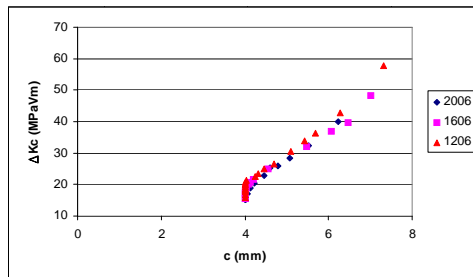
Gambar 5. Intensitas tegangan vs. dimensi retak, LEFM

Dari gambar 5.a dan 5.b diketahui hubungan antara faktor intensitas tegangan dengan panjang retak untuk analisa menurut kondisi *LEFM*. Dengan bertambahnya panjang retak maka nilai faktor intensitas tegangan juga bertambah. Kondisi tersebut berlaku untuk arah tebal ( $\Delta K_a$  vs. a) maupun arah lebar ( $\Delta K_c$  vs. c).



(a)  $\Delta K_a$  EPFM vs. a





(b)  $\Delta K_c$  EPFM vs.  $c$

Gambar 6. Intensitas tegangan vs. dimensi retak, EPFM

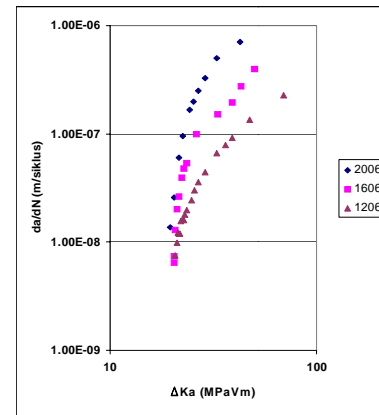
Hal yang sama ditunjukkan oleh analisa menurut kondisi *EPFM* (gambar 6.a dan 6.b), dimana dengan bertambahnya panjang retak maka nilai faktor intensitas tegangan akan bertambah.

Hal yang disebutkan menunjukkan pengaruh dimensi retakan terhadap nilai faktor intensitas tegangan, dimana jika panjang retak bertambah maka nilai faktor intensitas tegangan juga bertambah. Sedangkan perbandingan antara gambar 5 dengan gambar 6 mengindikasikan bahwa perhitungan menurut kondisi *EPFM* memberikan nilai faktor intensitas tegangan yang lebih rendah daripada perhitungan menurut kondisi *LEFM*.

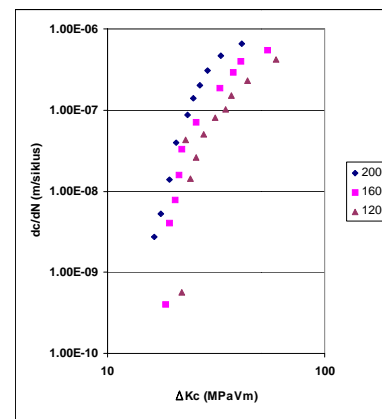
Gambar 5 dan gambar 6 mengindikasikan bahwa spesimen terkecil (A1206) memiliki nilai  $\Delta K_a$  dan  $\Delta K_c$  terbesar. Hal ini menunjukkan pengaruh rasio dimensi retakan (mula) dengan dimensi spesimen terhadap faktor intensitas tegangan, dimana makin besar rasio  $c/W$  dan  $a/B$  semakin besar pula faktor intensitas tegangan pada spesimen.

#### Faktor Intensitas Tegangan vs. Laju Perambatan Retak

Hubungan antara laju perambatan retak dengan intensitas tegangan ( $d_c/dN$  vs.  $\Delta K$ ), berdasarkan  $\Delta K$  hasil perhitungan metode elemen hingga kondisi *LEFM*, dinyatakan dalam grafik berikut.



(a) Arah tebal



(b) Arah lebar

Gambar 7. Laju perambatan retak vs. intensitas tegangan, LEFM

Dari gambar 7.a terlihat bahwa sebaran data untuk spesimen A2006 menunjukkan laju perambatan retak arah tebal yang lebih cepat dibandingkan A1606 dan A1206. Temuan yang sama juga diindikasikan oleh gambar 7.b, dimana semakin lebar spesimen laju perambatan retak arah lebar akan semakin cepat. Kecenderungan serupa juga ditunjukkan oleh perhitungan menurut metode *EPFM*.

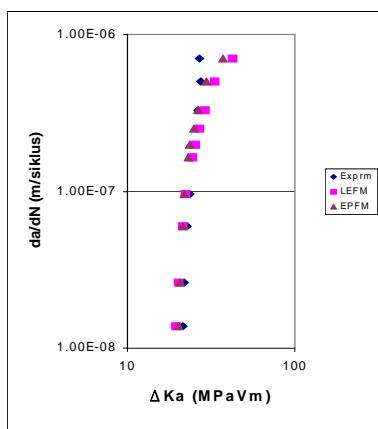
Hal tersebut disebabkan karena pada rasio  $a_{mula}/B$  dan  $c_{mula}/W$  yang lebih kecil, spesimen akan mempunyai energi intensitas tegangan yang lebih kecil. (Hal ini berkaitan dengan daerah plastis yang terjadi disekitar ujung retakan.) Sehingga dengan memberikan energi yang lebih sedikit, retakan pada spesimen A2006 lebih mudah merambat dibandingkan dengan yang lainnya. Pada spesimen



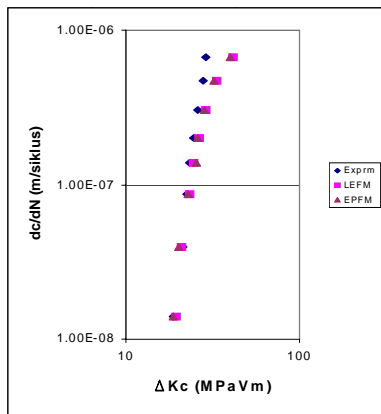
dengan rasio  $a/B$  dan  $c/W$  (mula) yang lebih rendah diperlukan energi yang lebih sedikit untuk perambatan retaknya.

### Perbandingan Hasil Perhitungan Metode Elemen Hingga Dengan Hasil Eksperimen

Hasil perhitungan menurut metode elemen hingga, kondisi *LEFM* dan *EPFM*, dibandingkan dengan hasil eksperimen [8], sebagaimana ditunjukkan pada gambar 8. Dalam gambar 8 perbandingan yang dimaksud diwakili oleh spesimen A2006, sebagai contoh tipikal.



(a) A2006 arah tebal



(b) A2006 arah lebar

Gambar 8. Perbandingan antara hasil eksperimen dengan hasil perhitungan menurut metode elemen hingga

Dalam arah lebar maupun tebal spesimen, hasil eksperimen dan perhitungan metode elemen hingga memiliki kecenderungan yang sama. Untuk  $\Delta K$  rendah, hasil eksperimen dan hasil perhitungan

metode elemen hingga menunjukkan kesesuaian yang baik tentang kecepatan perambatan retak. Semakin besar  $\Delta K$ , perbedaan kecepatan perambatan retak antara hasil eksperimen dengan hasil perhitungan metode elemen hingga bertambah pula. Hasil analisa metode elemen hingga dengan perhitungan *LEFM* memiliki penyimpangan terhadap hasil eksperimen yang lebih besar dibandingkan dengan metode Integral J. Hal ini disebabkan karena perhitungan *LEFM* mengabaikan munculnya daerah plastis di ujung retak, sementara munculnya daerah plastis mengakibatkan adanya perlambatan perambatan retak. Perbedaan rata-rata dengan hasil eksperimen adalah 10.33% untuk *EPFM* dan 13.40% untuk *LEFM*.

### 5. Kesimpulan

Dari analisa dan komparasi yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Dengan bertambahnya dimensi retakan nilai faktor intensitas tegangan akan meningkat.
- Semakin tinggi rasio  $c_{mula}/W$  semakin besar nilai faktor intensitas tegangan spe-simen.
- Semakin tinggi rasio  $c_{mula}/W$  semakin rendah laju perambatan retaknya.
- Semakin lebar spesimen ketahanan patah-nya semakin kecil, karena retakan semakin cepat merambat.
- Hasil perhitungan menurut metode elemen hingga memberikan hasil yang cukup dekat dengan hasil eksperimen. Dengan kecenderungan yang sama, metode elemen hingga mampu mengevaluasi faktor intensitas tegangan dan perambatan retak untuk retak pojok.

### Daftar Pustaka

1. Curtin, Thomas J., Adey, R. A., Baynham, J.M.W., and Marais, P., *Fatigue Crack Growth Simulation for Complex Three-Dimensional Geometry and Loading*, Computational Mechanics, Billerica, MA, 1999
2. Mellings, Sharon, Baynham, John M.W., and Adey, R. A., *Fully Automatic 3D Crack Growth with BEM*, Computational Mechanics, Billerica, MA, 2000



3. Frangi, A., and Novati, G., *Fracture Mechanics in 3D by a Coupled FE-BE Approach*, International Association for Boundary Element Methods, Austin, TX, pp. 28-30, 2002
4. Rahman, Anisur, Backukas Jr., J.G., Bigelow, C. A., and Tan, P. W., *Recent Result for Stress-Intensity Factors Solutions for Crack Growing Out of Fasteners Holes*, FAA William J. Hughes Technical Center AAR-430, Atlantic City, NJ, 2001
5. Gosz, M. and Morab, B., *Stress-Intensity Factors Along Three Dimensional Elliptical Crack Fronts*, Research Report DOT/FAA/AR-96/97, U.S. Federal Aviation Administration, Washington, DC, 1998
6. Gentilcore, Michael L., and Roberts, R., *Analysis of Stress Intensity Factors for an Edge Crack T-Section in Tension*, Fracture Mechanics : 25<sup>th</sup> volume, ASTM STP 1220, ASTM, Philadelphia, PA, 1995
7. Chen, Si-yi, and Cui, Z., *Surface Crack Growth Behaviour Under Tensile Cyclic Loading*, International Journal of Fatigue, vol. 10, No. 1, pp 43-47, 1988
8. Hendrowati, Wiwiek. *Studi Eksperimental Perilaku Perambatan Corner Crack Pada Spesimen Uji Aluminium 2024 T3*, Thesis S-2, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, 2003
9. Anderson, T.L., *Fracture Mechanic: Fundamental and Application*, 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2000





