

29383/H/07



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



RSM
620.112.6 ✓
Kar
A-1

2007

TUGAS AKHIR (Desain) - RM1522

ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN MENGUNAKAN METODE LANGSUNG DAN J-INTEGRAL PADA CORNER CRACK DENGAN VARIASI LEBAR SPESIMEN

DHITA PROVIE KARTINI
NRP. 2104 109 607

Dosen Pembimbing / Penguji Utama,
WIWIEK HENDROWATI, ST.MT.

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	28-4-2007
Terima Dari	H
No. Agenda Perp.	728058

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2007



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT (Design) - RM1522

STRESS INTENSITY FACTOR ANALYSIS USING DIRECT METHODE AND J-INTEGRAL ON CORNER CRACK WITH WIDE VARIATION

DHITA PROVIE KARTINI
NRP. 2104 109 607

Advisor Lecturer
WIWIEK HENDROWATI,ST.MT.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Industrial Faculty of Technology
Sepuluh November Institute of Technology
Surabaya 2007

**ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN
MENGUNAKAN METODE LANGSUNG DAN
INTEGRAL-J PADA CORNER CRACK DENGAN
VARIASI LEBAR SPESIMEN**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Desain
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

DHITA PROVIE K.

Nrp. 2104 109 607

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Wiwiek Hendrowati, ST.MT (Pembimbing I)
2. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA (Penguji I)
3. Dr. Ir. Soeharto, DEA (Penguji II)
4. Ir. Arie Joewono (Penguji III)



**SURABAYA
JANUARI, 2007**

ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN MENGUNAKAN METODE LANGSUNG DAN INTEGRAL-J PADA CORNER CRACK DENGAN VARIASI LEBAR SPESIMEN

Nama Mahasiswa : DHITA PROVIE K.
NRP : 2104 109 607
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Wiwiek Hendrowati,ST.MT

Abstrak

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 dihitung secara analitis, numeris, maupun eksperimental. Dengan memprediksi pertumbuhan retak maka umur dari suatu komponen yang memiliki retakan juga dapat diprediksi.

Tugas akhir ini mengemukakan validasi software ANSYS dalam menghitung faktor intensitas tegangan pada spesimen aluminium 2024 T3 dengan variasi arah lebar dengan retak berupa seperempat elips atau corner crack. Faktor intensitas tegangan dianalisa menggunakan Linier Elastic Fracture Mechanics (LEFM) dan Elastic Plastic Fracture Mechanics (EPFM). Pada kondisi EPFM parameter yang digunakan dalam analisa adalah integral J. Pembebanan menggunakan beban yang bergerak tegak lurus dengan permukaan retak. Harga faktor intensitas tegangan yang dianalisa hanya pada tahapan perambatan retak. Pemodelan spesimen menggunakan elemen isoparametrik 8 node untuk daerah bukan di ujung retak dan elemen heksahedron isoparametrik 20 node pada daerah di ujung retak. Faktor intensitas tegangan yang dihitung adalah ΔK_a , ΔK_c , dan ΔK fungsi θ dimana faktor intensitas tegangan itu dihitung dengan memperhatikan pertambahan panjang retakan. Disamping itu dihitung pula laju perambatan retak arah a (da/dN) dan arah c (dc/dN).

Hasil yang didapat menunjukkan bahwa rasio a/B dan c/W mempengaruhi nilai faktor intensitas tegangan, dimana semakin tinggi a/B dan c/W harga faktor intensitas tegangan semakin besar. Demikian

juga laju perambatan retak arah tebal lebih cepat dibandingkan arah lebar. Harga faktor intensitas tegangan pada crack front mempunyai nilai yang berbeda, dimana pada permukaan spesimen mempunyai harga faktor intensitas tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan yang berada di tengah spesimen. Analisa faktor intensitas tegangan dengan menggunakan metoda EPFM mempunyai error yang lebih kecil daripada metode LEFM.

Kata kunci : faktor intensitas tegangan, Integral-J, perambatan retak, Corner crack, metode elemen hingga

STRESS INTENSITY FACTOR ANALYSIS USING DIRECT METHODE AND J-INTEGRAL ON CORNER CRACK WITH WIDE VARIATION

Name : DHITA PROVIE K.
NRP : 2104 109 607
Major : Mechanical Engineering IFT-ITS
Advisor lecturer : Wiwiek Hendrowati,ST.MT

Abstract

Fatigue at material can be defined as broken material after experiencing of fluctuating load in a number of cycles. Fracture mechanism in general cover three step, that is: Crack Initiation, Crack Propagation and Final Fracture. Stress intensity factor (K) as one of the parameter for predicting crack growth can be calculated analytically, numeric, and also experimental. From predicting crack growth we can predict life of a component with crack.

This Final project tell ANSYS software validating in calculating stress intensity factor at aluminium 2024 T3 specimen with wide direction variation with quarter ellipse crack corner. Stress intensity factor analyzed use Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) and Elastic Plastic Fracture Mechanics (EPFM). At EPFM condition parameter which is used in analysis is J integral. Static load which work in upright way with crack's surface are used. Analyzed Stress intensity factor only at crack propagation step. Specimen's modeling using isoperimetric 8 node element for not in the crack front region and hexahedron isoperimetric 20 node element for the crack front region. On this final project the calculation of stress intensity factor are concentrate in ΔK_a , ΔK_c , and ΔK along crack front where it counted with concern in the increase of crack's dimension. The crack growth in a direction (da/dN) and c direction (dc/dN) are also calculated.

The result shown that dimension ratio a/B and c/W influence stress intensity factor value, when a/B and c/W increase, stress intensity factor are increase. It also shown that crack growth in thick direction is quicker then wide direction. Stress intensity factor at crack front have different value, where at surface of specimen have larger value compared to middle of specimen. Stress intensity factor analysis by using EPFM method have smaller error than LEFM method.

***Keyword: tension intensity factor, Integral-J, crack growth, Crack
Corner, finite element method***

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan YME yang telah melimpahkan rahmat dan nikmat-Nya, sehingga terselesaikannya laporan Tugas Akhir dengan judul “Analisa Faktor Intensitas Tegangan Menggunakan Metode Langsung dan Inegral-J pada Corner Crack dengan Variasi Lebar Spesimen“. Pada kesempatan ini, tiada yang pantas penulis sampaikan ungkapan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu sehingga terselesaikannya penyusunan tugas akhir ini. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada :

1. Dr.Ing Herman Sasongko, selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin ITS
2. Wiwiek Hendrowati ST,MT, selaku pembimbing yang telah banyak memberikan arahan dan bimbingan dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Dr.Ir.Wajan Berata, DEA, Dr.Ir. Soeharto, DEA, Ir.Arie Joewono, Dr.Ir.Agus Sigit P,DEA, Ir.Julendra B. Ariatedja, MT dan Achmad Syaifuddin, ST yang telah memberikan kritik saran dan masukan dalam penulisan tugas akhir.
4. Semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pembuatan tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis berharap semoga laporan akhir ini dapat bermanfaat bagi para pembaca khususnya mahasiswa Teknik Mesin ITS. Untuk lebih sempurnanya laporan akhir ini, penulis mengharap saran dan kritik yang bersifat membangun dari berbagai pihak yang telah membaca laporan ini.

Surabaya, Januari 2007

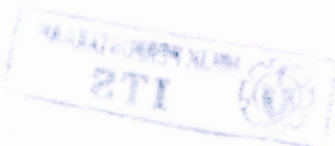
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat Tugas Akhir	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Mekanisme Patah Lelah	6
2.2.1 Mode Pembukaan Retak	6
2.2.2 Faktor Intensitas Tegangan	7
2.2.3 Daerah Plastis Di Ujung Retak	9
2.2.4 Tegangan Bidang Dan Regangan Bidang	11
2.2.5 Perambatan Retak	11
2.2.6 Jenis Tegangan Uji Lelah	13
2.2.7 Integral J dan Ketidak-tergantungannya terhadap Lintasan	14
2.2.8 Kriteria Rnergi	15
2.3 Metode Elemen Hingga	17
2.3.1 Konsep Elemen Hingga	17
2.3.2 Pemodelan Perambatan Retak	18
2.3.3 Evaluasi Faktor Intensitas Tegangan Kondisi LEFM	21
2.3.4 Evaluasi Faktor Intensitas tegangan Kondisi EPFM	22



BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	
3.1	Diagram Alir Penulisan	27
3.2	Simulasi Menggunakan ANSYS	28
3.3	Komparasi Hasil	31
BAB IV	ANALISA DAN PEMBAHASAN	
4.1	Hasil Eksperimen	33
4.2	Faktor Intensitas Tegangan terhadap Dimensi Retak	36
4.3	Faktor Intensitas Tegangan terhadap Rasio Dimensi Retak dan Dimensi Spesimen	37
4.4	Faktor Intensitas Tegangan terhadap Laju Perambatan Retak	39
4.5	Persamaan Paris	41
4.6	Perbandingan Hasil Perhitungan ANSYS dengan Eksperimen	43
4.7	Rentang Faktor Intensitas Tegangan terhadap Posisi	47
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran	52
	DAFTAR PUSTAKA	53
	Lampiran A. Listing Program ANSYS	55
	Lampiran B. Pemodelan Kondisi	65
	Lampiran C. Hasil Perhitungan	67



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Mode Pembebanan	6
Gambar 2.2	Distribusi Tegangan Disekitar Retakan	7
Gambar 2.3	(a) Perkiraan Ukuran Daerah Plastik (b) Sebagai Fungsi θ	10
Gambar 2.4	Kurva Laju Perambatan Retak	13
Gambar 2.5	Kontur lintasan	15
Gambar 2.6	(a) Elemen heksahedron isoparametrik 20 node, (b) Elemen heksahedron quarter-point 20 node	19
Gambar 2.7	Prosedur standar Metode Elemen Hingga	27
Gambar 3.1	Langkah-langkah Evaluasi	31
Gambar 3.2	Langkah-langkah analisa dengan ANSYS untuk metode langsung	28
Gambar 3.3	Langkah-langkah analisa dengan ANSYS untuk metode J-integral	29
Gambar 3.4	Geometri model Corner Crack	30
Gambar 4.1	Grafik faktor intensitas tegangan terhadap dimensi retak	37
Gambar 4.2	Faktor intensitas tegangan terhadap rasio dimensi	38
Gambar 4.3	Grafik laju perambatan retak LEFM	39
Gambar 4.4	Grafik laju perambatan retak EPFM	40
Gambar 4.5	Kurva Paris arah tebal	41
Gambar 4.6	Kurva Paris arah lebar	42
Gambar 4.7	Grafik perbandingan arah tebal	44
Gambar 4.8	Grafik perbandingan arah lebar	45
Gambar 4.9	Rentang faktor tiap kondisi	46
Gambar 4.10	A2006G42R01	48
Gambar 4.11	A1606G42R01	48
Gambar 4.12	A1206G42R01	48
Gambar B.1	A2006G42R01	65
Gambar B.2	A1606G42R01	65
Gambar B.3	A1206G42R01	66

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Dimensi Spesimen	30
Tabel 4.1	Faktor intensitas tegangan hasil eksperimen	33
Tabel C.1	A2006G42R01 LEFM	67
Tabel C.2	A2006G42R01 EPFM	67
Tabel C.3	A1606G42R01 LEFM	68
Tabel C.4	A1606G42R01 EPFM	68
Tabel C.5	A1206G42R01 LEFM	69
Tabel C.6	A1206G42R01 EPFM	67

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Desain berkembang semakin kompleks dan pembebanan peralatan kriteria desain juga berkembang dari konsep umur tak hingga ke umur berhingga. Hal ini menuntut perancang untuk dapat memprediksi umur komponen yang menerima beban fluktuatif (beban operasinya bervariasi terhadap waktu baik dalam bentuk maupun nilainya).

Kelelahan pada material dapat didefinisikan sebagai patahnya material setelah mengalami pembebanan berulang dalam sejumlah siklus. Fase terakhir kelelahan pada sebuah elemen mesin yang mendapat beban siklik ditandai dengan munculnya sebuah titik retak tertentu. Mekanisme patah lelah secara umum meliputi tiga tahapan, yaitu: awal terjadinya retakan (*Crack Initiation*), perambatan retakan (*Crack Propagation*), patah statik (*Final Fracture*).

Deformasi plastis pada ujung retak hanya terjadi di daerah sempit yang dikelilingi atau dibatasi oleh daerah elastis yang jauh lebih besar. Komponen tersebut secara keseluruhan masih berperilaku elastis. Karena daerah yang terdeformasi plastis berpotensi untuk terjadi awal retakan, maka umur komponen tersebut diharapkan dapat diprediksi.

Untuk keperluan keamanan, banyak dilakukan penelitian untuk mengetahui perilaku perambatan retak, baik secara empiris maupun simulasi numerik (menyangkut surface crack ataupun corner crack). Penelitian yang dilakukan antara lain dilaksanakan untuk menyelidiki pengaruh variasi dimensi, bentuk retakan, pembebanan siklik, spesifikasi bahan terhadap perambatan retak. Eksperimen dalam bentuk-bentuk sederhana (*Compact Tension Specimen*) dilakukan untuk mengetahui perilaku perambatan retak, karena eksperimen membutuhkan biaya dan waktu lebih banyak dalam pelaksanaannya maka banyak pengembangan menggunakan simulasi.

Setelah simulasi pada bentuk sederhana dapat dikatakan akurat, maka dilakukan simulasi untuk bentuk yang lebih rumit pada spesimen maupun retakan. Penelitian tentang perilaku corner crack didasari pada kenyataan bahwa banyak terjadi retakan pada komponen yang masuk kategori corner crack (misalnya pada akar roda gigi, sudut pertemuan antara badan dan kepala baut).

1.2 Perumusan Masalah

Tugas akhir ini memodelkan perilaku perambatan corner crack berbentuk seperempat elips dalam ANSYS. Kajian yang dilakukan adalah analisa perambatan corner crack akibat variasi lebar spesimen dalam faktor intensitas tegangan baik dalam kondisi LEFM maupun EPFM pada crack front. Dengan membuat pemodelan metode elemen hingga, dimana pada daerah di ujung retak elemen yang digunakan yaitu elemen heksahedron isoparametrik 20 node dan untuk di daerah bukan di ujung retak menggunakan elemen heksahedron 8 node. Kemudian hasil yang didapat dibandingkan dengan hasil eksperimen.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Kondisi Pembebanan dalam mode I dengan beban statik merata.
- Spesimen diasumsikan homogen, isotropic.
- Pengaruh lingkungan diabaikan.

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- Mendapatkan harga faktor intensitas tegangan dalam analisa LEFM dengan menggunakan metode elemen hingga.
- Mendapatkan harga faktor intensitas tegangan dalam analisa EPFM melalui integral-J dengan menggunakan metode elemen hingga.

- Mengetahui pengaruh variasi lebar spesimen terhadap faktor intensitas tegangan baik menggunakan metode LEFM maupun EPFM.
- Mengetahui kevalidan penggunaan metode elemen hingga pada hasil perhitungan faktor intensitas tegangan dengan ANSYS dan melihat perbandingan hasil analisa dengan hasil eksperimen yang ada.

1.5 Manfaat Tugas Akhir

Tugas akhir ini memberikan manfaat sebagai berikut:

- Untuk perancangan struktur yang memiliki resiko tinggi terhadap kerusakan, maka software metode elemen hingga dapat digunakan sebagai alat komparasi hasil pengujian suatu spesimen.
- Dapat diketahui laju perambatan retak pojok pada suatu jenis material sehingga dapat diprediksi umur material tersebut.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Analisa terhadap perambatan retak yang terjadi pada suatu komponen harus dilakukan jika ingin memprediksi umur pemakaian suatu komponen. Karena faktor intensitas tegangan sangat berpengaruh pada perambatan retak, maka metode dalam menentukan faktor intensitas tegangan berkembang dengan pesat baik melalui metode analitis, eksperimen, maupun numerik. Dengan metode analitis akan didapatkan harga faktor intensitas tegangan yang akurat, tetapi untuk geometri spesimen, pola pembebanan dan pola retak yang rumit akan menemui kesulitan. Sedangkan untuk eksperimen, kendalanya adalah mahalanya biaya dan lamanya waktu yang diperlukan dalam pengujian. Sehingga banyak dikembangkan metode numerik.

Penelitian tentang corner crack pada bahan aluminium dilakukan oleh Curtin, Adey dan Brussat (2000). Spesimen yang digunakan berbentuk clevis yang terdiri dari 2 lug yang berlubang sebagai tempat pin yang dikenai pembebanan. Penelitian dilakukan untuk memperkirakan faktor intensitas tegangan dari laju perambatan retak yang dipengaruhi oleh toleransi pin-lubang. Nilai faktor intensitas tegangan yang diperoleh dari eksperimen dibandingkan dengan analisa numerik menggunakan software BEASY dan NASGRO. Hasil menunjukkan bahwa harga faktor intensitas tegangan dari 3 cara yang ditempuh hampir sama, dan nilai faktor intensitas tegangan bertambah dengan bertambahnya toleransi.

Pramono, Berata dan Kurniawan (2001) menggunakan software ANSYS untuk menghitung faktor intensitas tegangan pada *Compact Tension Specimen* (CTS). Pemodelan menggunakan elemen quadrilateral isoparanetrik 8 node untuk CTS 2D dan elemen isoparametrik 20 node untuk CTS 3D. Hasil yang didapat ternyata memberikan hasil faktor intensitas tegangan yang dekat (error = 3,203%) dengan eksperimen.

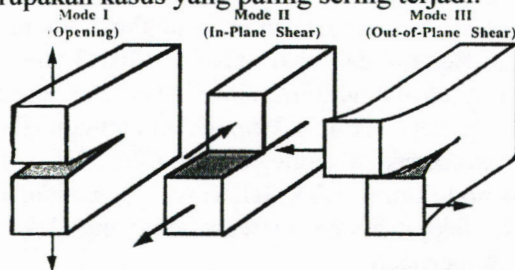
Berata, Pramono dan Irfan (2002) menggunakan parameter J-Integral untuk memperoleh harga factor intensitas tegangan. Penelitian yang dilakukan meliputi analisa perambatan retak untuk material Ti-6Al-4V dalam bentuk *Compact Tension Specimen*. Perhitungan dilakukan secara numeris dengan menggunakan metode elemen hingga memanfaatkan software ANSYS. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa harga faktor intensitas yang diperoleh mendekati hasil eksperimen (error = 1.5%).

2.2 Mekanisme Patah Lelah

Kelelahan pada material dapat didefinisikan sebagai patahnya material setelah mengalami pembebanan berulang dalam sejumlah siklus. Mekanisme patah lelah secara umum terdiri dari tiga tahapan, yaitu: awal terjadinya retakan (*Crack Initiation*), perambatan retakan (*Crack Propagation*), patah statik (*Final Fracture*). Patah akan terjadi bila distribusi tegangan disekitar ujung retak yang ditentukan oleh faktor intensitas tegangan (K) telah mencapai suatu harga kritis.

2.2.1. Mode Pembukaan Retak

Distribusi tegangan pada ujung retak dapat dibebani dalam tiga macam mode pembebanan. Mode I beban bergerak tegak lurus, dimana permukaan retak langsung bergerak terpisah. Mode II perambatan yang terjadi sejajar dengan arah pembebanan. Mode III diakibatkan oleh gaya puntir pada bidang. Dimana pembebanan mode I merupakan kasus yang paling sering terjadi.



Gambar 2.1 Mode Pembebanan

2.2.2. Faktor Intensitas Tegangan

Tegangan disekitar ujung retakan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2r \cdot \cos \omega}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2r \cdot \cos \omega}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.1)$$

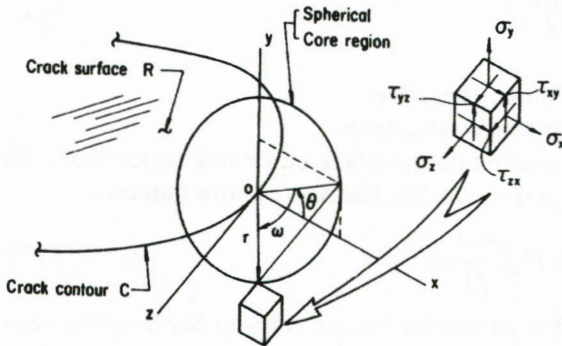
$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2r \cdot \cos \omega}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2r \cdot \cos \omega}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$\sigma_z = 2\theta \left(\frac{K_I}{\sqrt{2r \cdot \cos \omega}} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{K_{II}}{\sqrt{2r \cdot \cos \omega}} \sin \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2r \cdot \cos \omega}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2r \cdot \cos \omega}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.3)$$

$$\tau_{xz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2r \cdot \cos \omega}} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2r \cdot \cos \omega}} \cos \frac{\theta}{2}$$



Gambar 2.2 Distribusi Tegangan Disekitar Retakan

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa tegangan disekitar ujung retak sangat ditentukan oleh harga K, sedangkan suku lain

menyatakan posisi. Harga K disebut faktor intensitas tegangan yang merupakan fungsi dari dimensi retakan dan tegangan. Contoh sederhana yang sering dijadikan referensi adalah kasus retak tembus sepanjang $2a$ yang berada di tengah plat, dibebani dengan tegangan tarik sebesar σ . Sehingga secara umum faktor intensitas tegangan dapat ditulis:

$$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.4)$$

Dimana,

β = faktor koreksi bentuk

$\beta = 1$, untuk lebar pelat tak berhingga maka faktor koreksi bentuk

σ = tegangan yang bekerja pada benda uji

a = panjang retakan

Dengan mengingat persamaan Irwin untuk laju pelepasan energi

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (2.5)$$

Maka

$$K = \sqrt{E.G} \quad (2.6)$$

Dimana,

E = modulus elastisitas

G = laju pelepasan energi

Dimana untuk corner crack berbentuk seperempat elips, nilai K umumnya diperkirakan berdasarkan analisa numerik.

$$K = \sigma.F \sqrt{\frac{\pi.a}{Q}} \quad (2.7)$$

Dimana Q adalah parameter bentuk retakan berdasarkan penyelesaian integral elips. F adalah konstanta geometri, yang menurut Anderson dapat ditulis:

$$F = \left[M1 + M2 \left(\frac{a}{B} \right)^2 + M3 \left(\frac{a}{B} \right)^4 \right] \cdot g1 \cdot g2 \cdot f_\phi \cdot f_w \quad (2.8)$$

$$M1 = 1,08 - 0,03 \left(\frac{a}{c} \right)$$

$$M2 = -0,44 + \frac{1,06}{0,3 + \frac{a}{c}}$$

$$M3 = -0,5 - 0,25 \left(\frac{a}{c} \right) + 14,8 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{15}$$

$$g_1 = 1 + \left[0,08 + 0,4 \left(\frac{a}{B} \right)^2 \right] (1 - \sin \phi)^3$$

$$g_2 = 1 + \left[0,08 + 0,15 \left(\frac{a}{B} \right)^2 \right] (1 - \cos \phi)^3$$

$$f_\phi = \left[\left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right]^{1/4}$$

$$f_w = \left[\sec \left(\frac{\pi c}{2W} \sqrt{\frac{a}{B}} \right) \right]^{1/2}$$

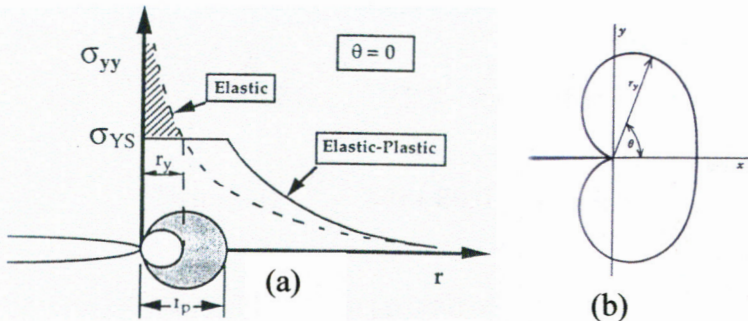
$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65} \quad (2.9)$$

2.2.3. Daerah Plastis di Ujung Retakan

Mengacu pada persamaan (2..1), (2.2), (2.3) untuk kasus pembebanan mode I dengan $\theta = 0^0$, akan muncul tegangan yang bernilai tak berhingga saat r mendekati nol. Pada kenyataannya hal ini tidak mungkin terjadi karena material pada ujung retakan akan

mengalami deformasi plastik, jika tegangan yang bekerja lebih besar daripada tegangan luluhnya. Estimasi daerah plastis dapat dilakukan dengan mengasumsikan batas antara elastis dan plastis adalah kondisi yield. Sehingga daerah plastis di ujung retakan didapat:

$$\sigma_{yy} = \sigma_{yield} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.10)$$



Gambar 2.3 (a) Perkiraan Ukuran Daerah Plastis
(b) Sebagai Fungsi θ

Ukuran daerah plastis untuk kondisi plane stress:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{K}{\sigma_{yield}} \right]^2 \quad (2.11)$$

Untuk kondisi plane strain karena adanya efek tegangan 3 dimensi, maka ukuran daerah plastis menjadi lebih kecil:

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left[\frac{K}{\sigma_{yield}} \right]^2 \quad (2.12)$$

Daerah plastis pada ujung retak dapat dijumpai dalam bentuk lain, dimana ukuran daerah plastis bervariasi terhadap θ . Bila ukuran daerah plastis pada ujung retak ditentukan untuk kasus umum, dimana σ_x , σ_y dan σ_z digambarkan sebagai fungsi r dan θ , maka

didapat daerah plastis yang diasumsikan berbentuk kupu-kupu (Gambar 2.3 b).

$$r_y = \frac{K^2}{6\pi\sigma_{ys}^2} \cdot \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + 3 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (2.13)$$

2.2.4 Tegangan Bidang Dan Regangan Bidang

Bila daerah plastis yang dikelilingi daerah elastis yang luas mendapat beban tegangan (misal 2 arah atau 3 arah), maka pengembangan regangan di daerah plastis berupa regangan tekan. Kondisi tegangan bidang (plane stress) terjadi pada plat tipis dimana σ_z tidak cukup besar dalam arah ketebalan sehingga tegangan yang berlaku hanya dalam 2 arah. Misalnya sebuah beban diberikan dalam arah Y yang akan menyebabkan regangan positif arah Y dan regangan negatif arah X dan Z, agar volume konstan. Sedangkan σ_x bekerja untuk menghalangi kontraksi daerah plastis arah X, dan regangan negative arah Z ditiadakan oleh tegangan tarik yang ditimbulkan σ_z . Bila tidak ada tegangan normal terhadap permukaan bebas, maka tegangan yang menembus ketebalan harus sama dengan nol pada kedua permukaan. Pada spesimen yang memiliki ketebalan tegangan σ_z berkembang sehingga tegangan tarik 3 arah bekerja pada ujung retakan dan menghambat peregangan arah Z. Kondisi regangan bidang (plane strain) ini dapat ditunjukkan untuk mengembangkan suatu tegangan ke arah ketebalan. Kondisi tegangan bidang dan regangan bidang pada suatu pembebanan dapat ditentukan dengan membandingkan ukuran daerah plastis pada ujung retak terhadap

tebal spesimen. Jika $\frac{r_y}{B} \geq 1$ maka kondisi plane stress, jika $\frac{r_y}{B} \leq \frac{1}{10}$ maka kondisi plane strain, dimana B adalah tebal spesimen.

2.2.5. Perambatan Retak

Patah leleh merupakan salah satu kategori kegagalan pada struktur atau material. Permukaan patah leleh mempunyai ciri-ciri khusus yang pada dasarnya dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah patah leleh dan daerah patah static yang dibatasi oleh garis pantai.

Untuk pembebanan yang memiliki amplitude konstan, laju perambatan retak merupakan fungsi dari factor intensitas tegangan. Hubungan tersebut digambarkan dalam kurva log-log yang dapat dibagi menjadi tiga bagian:

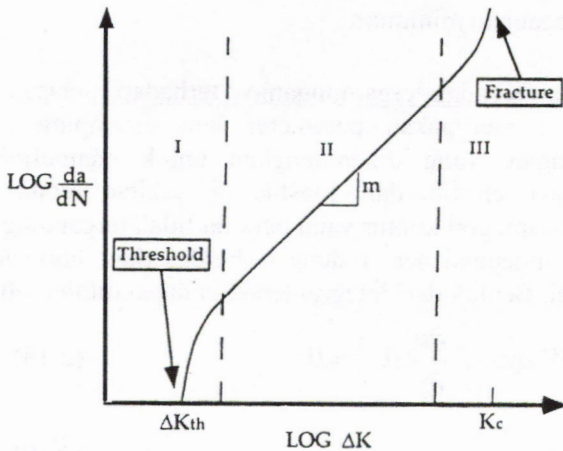
Daerah I, merupakan daerah ambang dimana daerah tersebut menunjukkan nilai ambang ($\Delta K_{threshold}$). Dibawah harga tersebut retak sangat sulit merambat, dan pada daerah ini mulai timbul retak mikro (*Crack Initiation*).

Daerah II, pada daerah ini retak mikro membesar dan jika pembebanan tetap berlanjut maka retak akan merambat (*Crack propagation*). Hubungan log laju perambatan dan log faktor intensitas tegangan mempunyai hubungan linier. Persamaan Paris menunjukkan hubungan antara laju perambatan retak dengan faktor intensitas tegangan dalam fungsi eksponensial

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.14)$$

Dimana C dan m adalah parameter material.

Daerah III, pada daerah ini retak telah merambat cukup jauh dan besar, sehingga perambatan retak dipengaruhi oleh ketahanan patah. Jika pembebanan tetap dilakukan, beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang sisa yang belum retak sampai akhirnya patah (*Final fracture*).



Gambar 2.4 Kurva Laju Perambatan Retak

2.2.6. Jenis Tegangan Uji Lelah

Perkiraan umur lelah biasanya dinyatakan sebagai sejumlah siklus tegangan yang dicapai sampai komponen patah. Dalam hal ini umur total tersebut mencakup tahap awal retakan, perambatan retak, dan akhirnya patah. Beban berulang yang diterima oleh struktur dapat berupa tegangan tarik, tekan, ataupun bending. Notasi yang biasa dipakai dalam kondisi beban berulang adalah:

$$\text{Rasio tegangan } R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.15)$$

$$\text{Amplitudo tegangan } \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.16)$$

$$\text{Tegangan rata-rata } \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.17)$$

dimana σ_{\max} = tegangan maksimum

σ_{\min} = tegangan minimum

2.2.7 Integral J dan Ketidak-tergantungannya terhadap Lintasan

Integral J merupakan parameter lain disamping Faktor Intensitas Tegangan, yang dikembangkan untuk mendefinisikan kondisi deformasi elastik dan plastik di sekitar retak. Rice mengajukan suatu integral kontur yang bersifat tidak tergantung pada lintasan (path independence) dengan berdasarkan atas prinsip kelestarian energi. Bentuk dari integral tersebut dapat ditulis sebagai:

$$J = \int_{\Gamma} \left(W \cdot dy - T \frac{\partial u}{\partial x} \cdot ds \right) = 0 \quad (2.18)$$

$$\text{Dimana: } W = \int_0^{\varepsilon} \sigma \cdot d\varepsilon \quad (2.19)$$

W adalah energi regangan per unit volume. Integral tersebut di atas dinamakan integral J.

Rice, pada kesempatan lain membuktikan bahwa harga integral J tidak dipengaruhi oleh lintasan. Meskipun tidak nampak secara langsung, integral tersebut sebenarnya menunjukkan prinsip kelestarian energi dalam bentuk tegangan. Pada benda dengan retak, di buat suatu kontur tertutup (ABCDEF) disekeliling ujung retak. Menurut persamaan (2.18), harga integral di sepanjang kontur ini sama dengan nol. Integral terdiri dari jumlah empat bagian, yaitu:

$$\int_{\Gamma 1} + \int_{CD} + \int_{\Gamma 2} + \int_{FA} = 0 \quad (2.20)$$

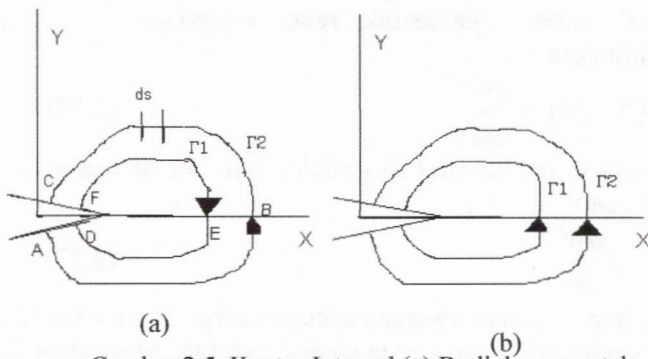
Dimana:

Γ : sembarang lintasan di sekeliling ujung retak.

ds : elemen kecil lintasan Γ .

T : vektor tegangan yang tegak lurus lintasan Γ .

u : perpindahan.



Gambar 2.5. Kontur Integral (a) Bodi dengan retak
(b) Kontur tidak bergantung lintasan

Di sepanjang permulaan retak tidak bekerja traksi dan komponen $dy = 0$, maka integral tersebut di atas menjadi :

$$\int_{\Gamma_1} + \int_{\Gamma_2} = 0 \text{ atau } \int_{\Gamma_1} = - \int_{\Gamma_2} \quad (2.21)$$

Terlihat bahwa kontribusi lintasan ABC sama tapi berlawanan tanda dengan kontribusi lintasan DEF. Satu berarah clockwise dan lainnya counterclockwise, sehingga untuk lintasan Γ_1 dan Γ_2 yang searah akan berharga sama. Karena lintasan Γ_1 dan Γ_2 adalah sembarang lintasan yang berawal dan berakhir pada permukaan retak yang berlawanan, maka dengan demikian nilai integral tersebut tidak bergantung lintasan dan selalu berharga sama.

2.2.8. Kriteria Energi

Persoalan Fracture Mechanics dapat dianalisa menggunakan prinsip kelestarian energi dengan terlebih dahulu meninjau energi-energi yang terlibat didalamnya, yaitu: energi regangan / energi elastik di dalam benda U , kerja yang dilakukan beban luar F dan energi untuk membentuk retak baru W .

Pertambahan retak sepanjang da akan terjadi jika tersedia cukup energi untuk membentuk retak sepanjang da . Secara matematis dituliskan :

$$\frac{d}{da}(F - U) = \frac{dW}{da} \quad (2.22)$$

Dapat ditunjukkan bahwa ruas kiri adalah laju energi regangan itu sendiri, sehingga :

$$\frac{dU}{da} = \frac{dW}{da} \quad (2.23)$$

Yang secara langsung menunjukkan kriteria energi. Persamaan (2.23) dipakai sebagai kriteria energi pada analisa Fracture Mechanics, baik LEFM maupun EPFM.

Persamaan kriteria energi untuk kondisi elastik-plastik adalah :

$$\frac{\pi\beta^2\sigma^2 a}{E} + \frac{H\sigma^{n+1} a}{F} = \frac{dW}{da} \quad (2.24)$$

$$\frac{\pi\beta^2\sigma^2 a}{E} + \frac{H\sigma^{n+1} a}{F} = J_R \quad (2.25)$$

$$J_{el} + J_{pl} = J_R \quad (2.26)$$

Dimana:

β : faktor geometri spesimen

H : faktor koreksi geometri

E : Modulus Elastisitas

F : Modulus Plastisitas

n : *strain hardening exponent*

a : panjang retak

J_R : laju energi untuk membuat retak baru

Harga J_R identik dengan G (laju pelepasan energi Irwin) pada kondisi LEFM, maka

$$J_R = G = \frac{K_I^2}{E}$$

$$K_I = \sqrt{J_R \cdot \bar{E}} \quad (2.27)$$

Dimana

K_I = faktor intensitas teganganmode I

\bar{E} = E (plain stress)

= $\frac{E}{1-\nu^2}$ (plain strain)

2.3 Metode Elemen Hingga

2.3.1. Konsep Elemen Hingga

Dalam analisa untuk menentukan gaya atau tegangan yang terjadi pada setiap titik dalam suatu benda pejal, dibutuhkan fungsi tegangan atau fungsi perpindahan yang harus memenuhi persamaan kesetimbangan, hubungan tegangan-regangan dan kompatibilitas pada setiap titik. Untuk geometri benda kompleks, pembentukan fungsi-fungsi tersebut akan sangat kompleks pula sehingga pemecahan masalahnyapun sulit.

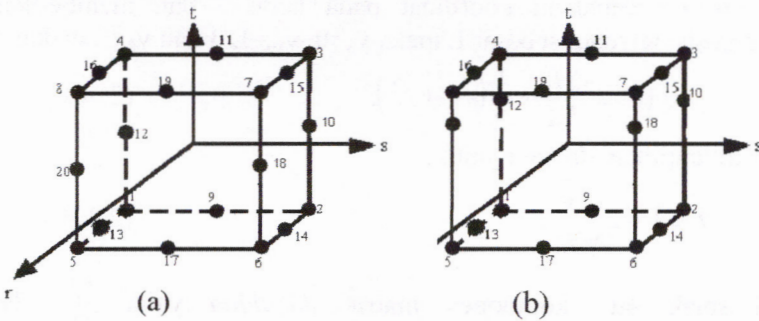
Pada Metode Elemen Hingga, sebuah benda dibagi-bagi menjadi elemen-elemen kecil berhingga yang memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana, sehingga mengubah suatu masalah yang memiliki derajat kebebasan tak berhingga menjadi sejumlah derajat kebebasan berhingga. Metode ini merupakan analisa pendekatan terhadap nilai perpindahan dan tegangan pada elemen, dengan memasukkan beban-beban yang terjadi pada elemen. Oleh karena itu langkah-langkah yang ditempuh adalah:

1. Bagilah kontinum menjadi sejumlah elemen yang berhingga dengan bentuk geometri yang sederhana.
2. Pilihlah titik-titik pada elemen yang diperlakukan sebagai titik nodal dimana syarat keseimbangan dan kompatibilitas harus dipenuhi.
3. Asumsikan fungsi peralihan pada setiap elemen sedemikian rupa sehingga peralihan pada setiap titik sembarang dipengaruhi oleh nilai titik nodalnya.

4. Pada setiap elemen khusus yang dipilih harus dipenuhi persyaratan hubungan tegangan-peralihan dan hubungan tegangan-regangannya.
5. Tentukan kekakuan dan beban titik nodal ekuivalen untuk setiap elemen dengan menggunakan prinsip usaha atau prinsip energi.
6. Turunkan persamaan keseimbangan untuk setiap titik nodal dari diskritisasi kontinum ini sesuai dengan kontribusi elemennya.
7. Selesaikan persamaan keseimbangan ini untuk mencari peralihan titik nodal.
8. Hitung tegangan pada titik-titik tertentu dalam elemen tadi.
9. Tentukan reaksi perletakan pada titik nodal yang tertahan bila diperlukan.

2.3.2. Pemodelan Perambatan Retak.

Agar dapat merepresentasikan singularitas pada sekitar ujung retak diperlukan meshing yang sangat halus. Pengembangan elemen orde tinggi, seperti elemen isoparametrik ternyata memberikan kasamaan akurasi yang dapat diterima pada pembagian meshing yang agak kasar. Sebuah elemen disebut isoparametrik bila fungsi geometrik dan fungsi bentuk peralihan dari elemen tersebut menggunakan rumus interpolasi yang sama. Sedangkan elemen singular dibentuk dengan menggeser nodal tengah dari elemen isoparametrik ke posisi seperempat panjang sisi elemen dari nodal ujung retak. Singularitas pada ujung retak dapat ditampilkan menggunakan elemen heksakedron isoparametrik 20 node yaitu dengan menggeser node 10, 12, 18, dan 20 ke posisi seperempat panjang maka singularitas regangan dapat ditampilkan pada bidang 3-4-8-7. Dari pergeseran tersebut terbentuk suatu elemen yang disebut elemen heksahedron quarter-point seperti yang terlihat pada gambar 2.5.(b)



Gambar 2.6. (a) Elemen heksahedron isoparametrik 20 node
 (b) Elemen singular heksahedron quarter-point 20 node
Shape function pada node 3, 10 dan 2 untuk elemen isoparametrik 20 node tiga dimensi adalah sebagai berikut:

$$N_3 = \frac{1}{8}(1+s)(1+t)(1-r)(s+t-r-2) \quad (2.28)$$

$$N_{10} = \frac{1}{4}(1-t^2)(1+s)(1-r) \quad (2.29)$$

$$N_2 = \frac{1}{8}(1+s)(1-t)(1-r)(s-t-r-2) \quad (2.30)$$

Sepanjang sisi node 2, 10 dan 3 memiliki $r = -1$ dan $s = 1$, sehingga:

$$N_3 = \frac{1}{2}(t+t^2) \quad (2.31)$$

$$N_{10} = (1-t^2) \quad (2.32)$$

$$N_2 = \frac{1}{2}(-t+t^2) \quad (2.33)$$

Dari representasi y koordinat pada elemen yaitu:

$$y = \sum_i N_i y_i \quad (2.34)$$

$$y = \frac{1}{2}(t+t^2)y_3 + (1-t^2)y_{10} + \frac{1}{2}(-t+t^2)y_2 \quad (2.35)$$

Dengan menempatkan koordinat pada node 3 dan memberikan panjang sisi tersebut sebesar L maka $y_3=0$, $y_{10}=L/4$ dan $y_2=L$ maka:

$$y = (1-t^2)\frac{L}{4} + \frac{1}{2}(-t+t^2)L \quad (2.36)$$

Atau ditampilkan dalam t yaitu :

$$t = 1 + 2\sqrt{\frac{y}{L}} \quad (2.37)$$

Dari salah satu komponen matrik *Jacobian* yaitu $\frac{\partial y}{\partial t}$ dan memasukkan harga t dari persamaan diatas akan diperoleh:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{L}{2}(t-1) = \sqrt{Ly} \quad (2.38)$$

Sehingga matrik *Jacobian* akan singular pada node 3 dimana $y = 0$. Perpindahan u pada sisi 3-10-2 yaitu:

$$v = \sum_i N_i v_i = \frac{1}{2}t(1+t)v_3 + (1-t^2)v_{10} + \frac{1}{2}(-t)(1-t)v_2 \quad (2.39)$$

Substitusi t pada persamaan di atas, akan didapat:

$$v \sum_i N_i v_i = \frac{1}{2}\left(1+2\sqrt{\frac{y}{L}}\right)\left(2+2\sqrt{\frac{y}{L}}\right)v_3 - 4\left(\sqrt{\frac{y}{L}}+\frac{y}{L}\right)v_{10} + \frac{1}{2}\left(-1-2\sqrt{\frac{y}{L}}\right)\left(-2\sqrt{\frac{y}{L}}\right)v_2 \quad (2.40)$$

Regangan pada arah y adalah :

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{2}\left(\frac{3}{\sqrt{yL}} + \frac{4}{L}\right)v_3 + \left(-\frac{1}{\sqrt{yL}} - \frac{4}{L}\right)v_{10} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{yL}} + \frac{4}{L}\right)v_2 \quad (2.41)$$

Tampak bahwa komponen ε_y menunjukkan singularitas $1/\sqrt{r}$. Dengan mengganti y dengan jarak radial dari ujung retak r maka perpindahan arah v sepanjang sisi 3-10-2 akan menjadi:

$$v = v_3 + (3v_3 - 4v_{10} + 2v_2) \sqrt{\frac{r}{L}} + (2v_3 - 4v_{10} + 2v_2) \frac{r}{L} \quad (2.42)$$

Hal yang sama dapat dilakukan pada sisi-sisi yang mempunyai singularitas.

2.3.3. Evaluasi Faktor Intensitas Tegangan Kondisi LEFM

Setelah medan perpindahan dan tegangan seluruh bentuk retak (terutama pada sekitar ujung retak) telah ditentukan, berarti evaluasi faktor intensitas tegangan akan dapat ditemukan. Pendekatan yang paling jelas adalah menghubungkan solusi analitik tegangan dan perpindahan pada ujung retak dari harga yang didapatkan dari metode elemen hingga. Hal ini memerlukan prosedur ekstrapolasi untuk mendapatkan faktor intensitas tegangan pada ujung retak. Variasi perpindahan secara analitis sekitar ujung retak adalah:

$$u = \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ (2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right\} - \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ (2k+3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right\}$$

$$v = \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ (2k-1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right\} - \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ (2k+3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right\}$$

$$w = \frac{K_{III}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.36)$$

Dimana

- K_I = faktor intensitas tegangan mode I
- K_{II} = faktor intensitas tegangan mode II
- K_{III} = faktor intensitas tegangan mode III
- G = modulus geser
- $k = (3 - \nu) / (1 + \nu)$ untuk kondisi plane stress
- = $(3 - 4\nu)$ untuk kondisi plane strain
- ν = poisson's ratio

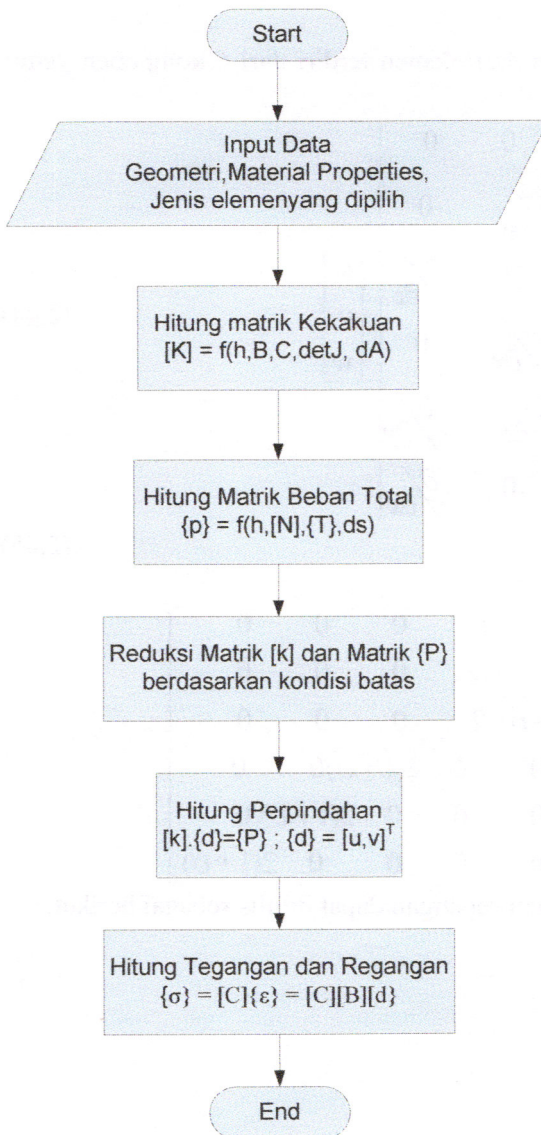
Sehingga faktor intensitas tegangan dapat dievaluasi dengan menyamakan koefisien \sqrt{r} pada persamaan diatas dengan θ merupakan sudut polar dari sisi elemen 3-10-2, maka akan terlihat bahwa faktor intensitas tegangan akibat pembebanan mode I dapat dihitung dari perpindahan arah u maupun v . Prosedur ekstrapolasi perpindahan dilakukan dengan melihat hubungan dari persamaan perpindahan sehingga:

$$K_I \left\{ \begin{array}{l} (2K-1)\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{3\theta}{2} \\ (2K+1)\sin\frac{\theta}{2} - \sin\frac{3\theta}{2} \end{array} \right\} = 4G\sqrt{\frac{2\pi}{r}} \left\{ \begin{array}{l} u \\ v \end{array} \right\} \quad (2.43)$$

Substitusi harga u , v dan r pada titik node sepanjang garis radial pada sekitar ujung retak, dapat diperoleh hubungan antara K dengan jarak radial r . Kemudian dengan menghilangkan hasil pada titik yang sangat dekat dengan ujung retak sehingga solusi dapat diekstrapolasi pada $r = 0$ dengan memakai regresi linier. Teknik ini dapat dipakai bila digunakan elemen konvensional maupun elemen singular. Perhitungan hanya dikonsentrasikan pada modulus I, karena pembebanan yang diberikan adalah tipe modulus I.

2.3.4 Evaluasi Faktor Intensitas Tegangan Kondisi EPFM

Pada kondisi EPFM membutuhkan tegangan dan regangan dalam penyelesaian mendapatkan faktor intensitas tegangan. Dimana tegangan dan regangan dapat diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut:



Gambar 2.7. Prosedur Standar Metode Elemen Hingga

Regangan dari elemen terdiri dari 6 komponen yaitu: ϵ_x , ϵ_y ,

ϵ_z , γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{xy} .

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (2.44)$$

$$\{\epsilon\} = [C]\{\sigma\} \quad (2.45)$$

Dimana:

$$[C] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix}$$

Hubungan tegangan-regangan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix}$$

Atau $\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\}$

Untuk kasus tegangan bidang ($\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

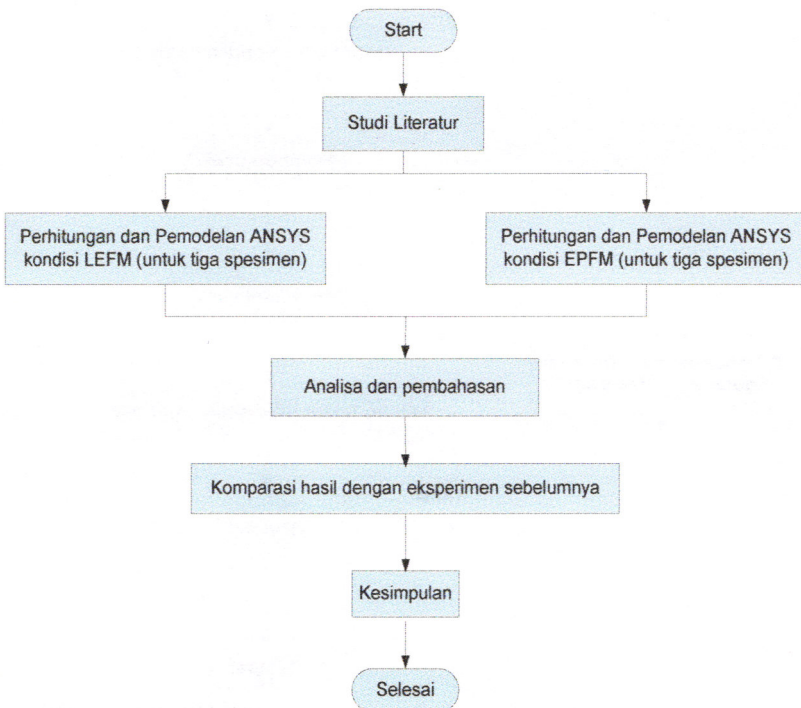
Untuk kasus regangan bidang ($\tau_{xz} = \tau_{yz} = \varepsilon_z = 0$):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penulisan

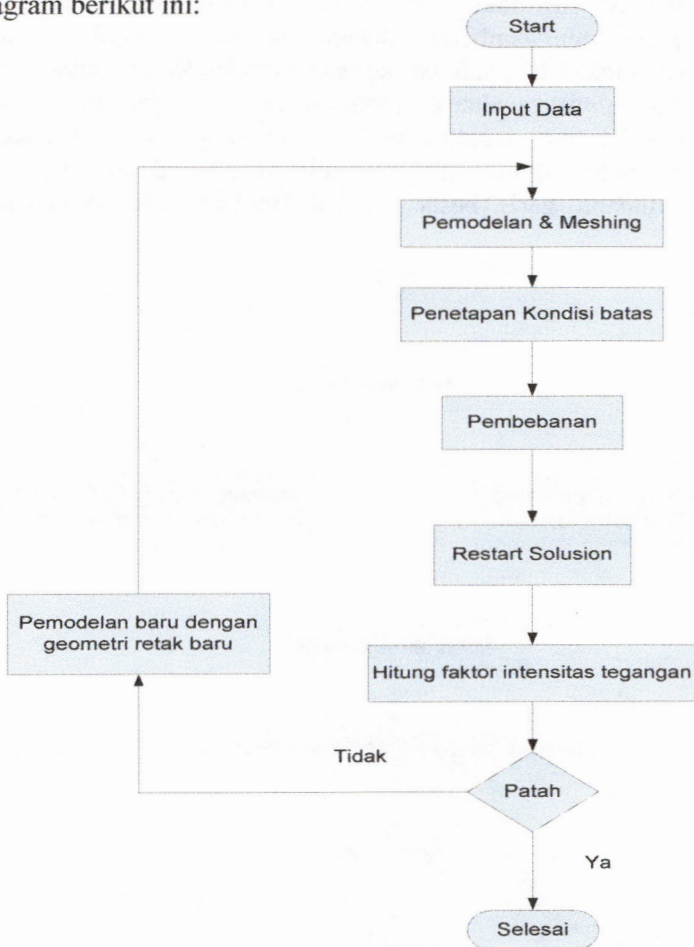
Pada evaluasi faktor intensitas tegangan yang dilakukan, terpusat pada penggambaran secara langsung untuk setiap transformasi langkah-langkah dari konsep metode elemen hingga dan analisa retak untuk evaluasi faktor intensitas tegangan dalam software ANSYS dari langkah perhitungan yang telah dijelaskan sebelumnya, dapat dibuat diagram alir sebagai dasar program komputer, dimana garis besar langkah-langkah yang dilakukan adalah:



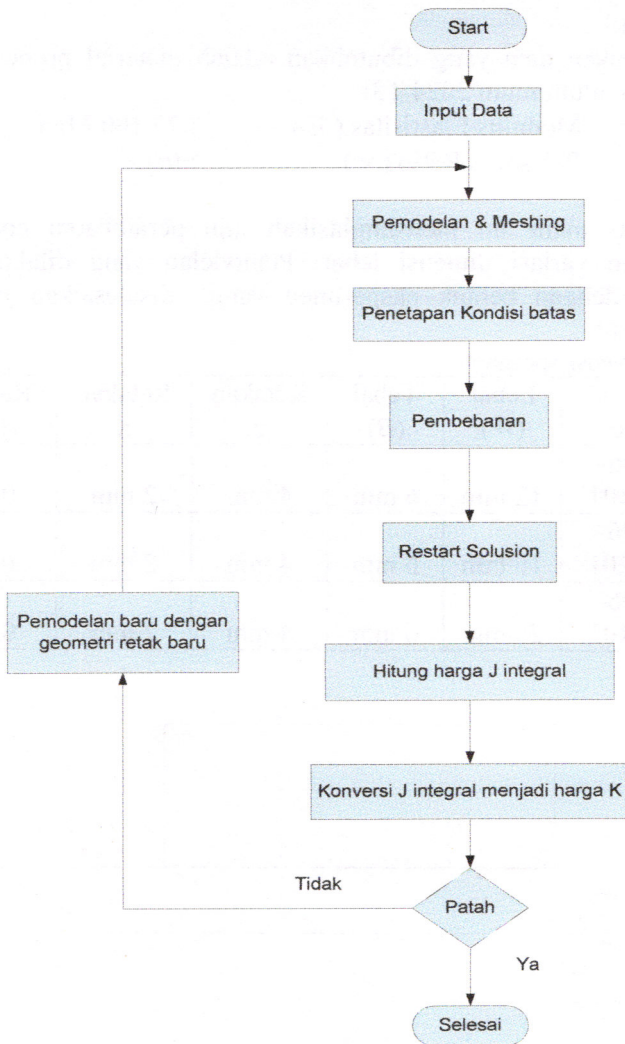
Gambar 3.1 Langkah-langkah evaluasi

3.2. Analisa Menggunakan ANSYS

Dalam menggunakan program ANSYS ada beberapa langkah yang ditempuh untuk mendapatkan harga faktor intensitas tegangan. Adapun langkah-langkah yang ditempuh dapat dilihat pada diagram berikut ini:



Gambar 3.2 Langkah-langkah perhitungan dengan ANSYS untuk metode langsung



Gambar 3.3 Langkah-langkah perhitungan dengan ANSYS untuk metode J Integral

1. Input Data

Masukan data yang dibutuhkan adalah material properties dari spesimen aluminium 2024 T3:

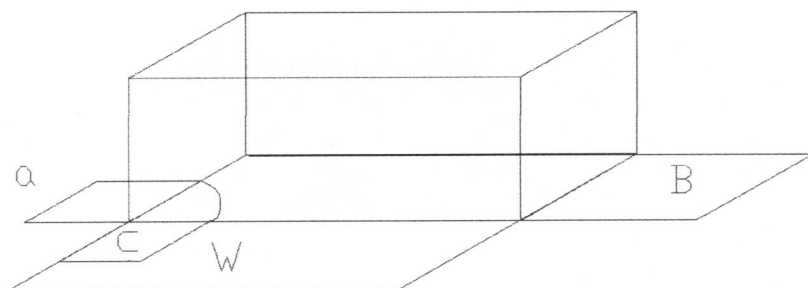
- Modulus Elastisitas (E) : 73.100 MPa
- Poisson's Ratio (ν) : 0.33

2. Pemodelan

Tugas akhir ini mensimulasikan laju perambatan corner crack dengan variasi dimensi lebar. Pemodelan yang dilakukan disesuaikan dengan bentuk eksperimen yang diselesaikan yaitu sebagai berikut:

Tabel 3.1. Dimensi Spesimen

No	Kode	Lebar (W)	Tebal (B)	Retakan c	Retakan a	Rasio (R)
1	A1206-G42-R01	12 mm	6 mm	4 mm	2 mm	0,1
2	A1606-G42-R01	16 mm	6 mm	4 mm	2 mm	0,1
3	A2006-G42-R01	20 mm	6 mm	4 mm	2 mm	0,1



Gambar 3.4 Geometri model Corner Crack

Pemodelan untuk spesimen retak sudut dilakukan dengan setengah bagian struktur karena adanya kesimetrisan model, baik geometri maupun pembebanan. Jenis elemen yang digunakan adalah elemen heksahedron 8 node untuk daerah bukan di ujung retak dan elemen heksahedron isoparametrik 20 node untuk daerah retak. Model dibuat dengan cara mengidentifikasi posisi node untuk setiap elemen yang membentuk struktur spesimen. Pembuatan elemen (meshing) dilakukan berdasarkan posisi node yang telah ada, sehingga setelah semua elemen terbentuk akan didapat suatu spesimen dengan retak pojok. Dengan mengidentifikasi node mayor elips dan ratio elips, bentuk retak pojok (elips) terbentuk secara otomatis.

3. Kondisi batas

Pemodelan spesimen untuk retak pojok menggunakan setengah bagian spesimen dengan kondisi batas pada bidang simetri sumbu y diberikan constrain displacement $y = 0$, kecuali dari ujung retak dan retak yang telah terjadi dibebaskan.

4. Pembebanan

Pembebanan yang dipakai adalah beban tegangan tarik statis sebesar 252 MPa yang dibebankan secara merata. Hal ini disebabkan karena tujuan dari tugas akhir ini untuk mencari faktor intensitas tegangan untuk mode I.

5. Evaluasi Faktor Intensitas Tegangan

Evaluasi faktor intensitas tegangan yang dilakukan dengan menggunakan software ANSYS, faktor intensitas tegangan yang dihitung adalah ΔK_a , ΔK_c , dan ΔK fungsi θ dimana faktor intensitas tegangan itu dihitung dengan adanya pertambahan panjang retakan. Disamping itu dihitung pula laju perambatan retak arah a (da/dN) dan arah c (dc/dN).

3.3. Komparasi hasil

Hasil analisa dari simulasi akan dibandingkan dengan hasil eksperimen dari Hendrowati, Wiwiek (2003) dalam bentuk grafik.

The first of these is the fact that the
 government has a long history of
 intervention in the economy. This
 has been done in a variety of ways,
 including price controls, subsidies,
 and nationalization. The result has
 been a mixed record of success and
 failure. In some cases, government
 intervention has led to economic
 growth and development. In other
 cases, it has led to stagnation and
 inflation. The key to success is
 to use government intervention
 wisely and to avoid the pitfalls
 of overregulation and excessive
 spending.

The second of these is the fact that
 the government has a long history of
 intervention in the economy. This
 has been done in a variety of ways,
 including price controls, subsidies,
 and nationalization. The result has
 been a mixed record of success and
 failure. In some cases, government
 intervention has led to economic
 growth and development. In other
 cases, it has led to stagnation and
 inflation. The key to success is
 to use government intervention
 wisely and to avoid the pitfalls
 of overregulation and excessive
 spending.

The third of these is the fact that
 the government has a long history of
 intervention in the economy. This
 has been done in a variety of ways,
 including price controls, subsidies,
 and nationalization. The result has
 been a mixed record of success and
 failure. In some cases, government
 intervention has led to economic
 growth and development. In other
 cases, it has led to stagnation and
 inflation. The key to success is
 to use government intervention
 wisely and to avoid the pitfalls
 of overregulation and excessive
 spending.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Setelah proses perhitungan dalam ANSYS dilakukan harga faktor intensitas tegangan untuk setiap spesimen dapat diketahui, dengan menggunakan metode langsung maupun menggunakan Integral J. Hasil yang didapat kemudian dibandingkan dengan eksperimen. Data Eksperimen yang digunakan sebagai acuan adalah hasil eksperimen dari Wiwiek Hendrowati yang meneliti tentang perilaku perambatan corner crack dengan rasio pembebanan $R = 0,1$ dan frekuensi 15 Hz. komparasi ditampilkan dalam berbagai bentuk grafik.

4.1. Hasil Eksperimen

Dari eksperimen yang telah dilakukan Hendrowati, hasil yang didapat yaitu jumlah siklus dan panjang retak (a dan c) tiap siklus. Setelah dilakukan terhadap data-data yang diperoleh untuk tiap spesimen dilakukan perhitungan faktor intensitas tegangan dan laju perambatan retak yang dapat di tampilkan sebagai berikut:

Tabel 4.1 faktor intensitas tegangan hasil eksperimen.

(a) A2006G42R01

N	Retakan		Rambatan		Experiment	
	a (mm)	c (mm)	da/dN	dc/dN	ΔK_a	ΔK_c
0	2	4	0	0	20,895	15,152
2703	2	4	0	0	20,895	15,152
12706	2	4	0	0	20,895	15,152
20007	2,1	4,02	1,37E-08	2,739E-09	21,253	15,792
27712	2,3	4,06	2,596E-08	5,191E-09	21,902	17,038
32713	2,6	4,13	5,999E-08	1,4E-08	22,745	18,816
35227	2,84	4,23	9,547E-08	3,978E-08	23,419	21,16
37760	3,26	4,45	1,658E-07	8,685E-08	24,513	22,365
38764	3,46	4,59	1,992E-07	1,394E-07	25,051	23,357
39768	3,71	4,79	2,49E-07	1,992E-07	25,717	24,542
40715	4,02	5,08	3,273E-07	3,062E-07	26,535	25,922



41676	4,5	5,53	4,995E-07	4,683E-07	27,35	27,661
42714	5,23	6,22	7,033E-07	6,647E-07	27,036	28,746

(b) A1606G42R01

N	Retakan		Rambatan		Experiment	
	a (mm)	c (mm)	da/dN	dc/dN	ΔK_a	ΔK_c
0	2	4	0	0	20,895	15,152
10003	2	4	0	0	20,895	15,152
20004	2	4	0	0	20,895	15,152
30010	2	4	0	0	20,895	15,152
40011	2,26	4	6,498E-09	0	21,663	16,812
42696	2,28	4	7,449E-09	0	21,715	16,935
45028	2,31	4	1,286E-08	0	21,79	17,119
50012	2,41	4,02	2,006E-08	3,999E-10	22,073	17,719
54949	2,54	4,04	2,633E-08	4,051E-09	22,394	18,479
60027	2,74	4,08	3,939E-08	7,877E-09	22,842	19,602
62551	2,86	4,12	4,754E-08	1,585E-08	23,12	20,25
64954	2,99	4,2	5,41E-08	3,329E-08	23,506	20,94
69998	3,49	4,56	9,913E-08	7,137E-08	24,947	23,464
74959	4,24	5,48	1,512E-07	1,854E-07	27,756	27,062
76954	4,63	6,06	1,955E-07	2,907E-07	29,161	28,745
77968	4,91	6,46	2,761E-07	3,945E-07	29,833	29,708
78977	5,31	7,01	3,964E-07	5,451E-07	30,17	30,563

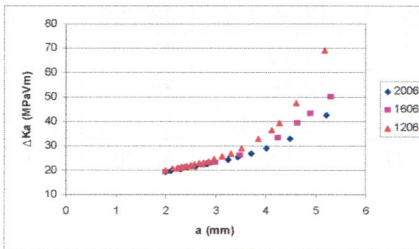
LABORATORIUM
271

(c) A1206G42R01

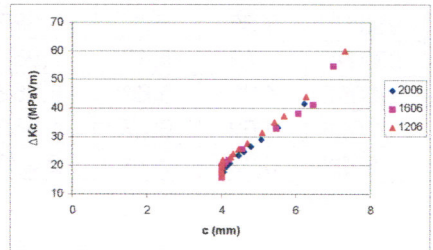
N	Retakan		Rambatan		Experiment	
	a (mm)	c (mm)	da/dN	dc/dN	ΔK_a	ΔK_c
0	2	4	0	0	20,895	15,152
20001	2,15	4	7,50E-09	0	21,361	16,121
30057	2,25	4	9,94E-09	0	21,637	16,75
35013	2,31	4	1,21E-08	0	21,79	17,12
40002	2,37	4	1,20E-08	0	21,933	17,484
45019	2,43	4	1,20E-08	0	22,067	17,842
50099	2,51	4	1,57E-08	0	22,231	18,311
55014	2,59	4	1,63E-08	0	22,378	18,769
60003	2,67	4	1,60E-08	0	22,509	19,215
65045	2,76	4	1,79E-08	0	22,636	19,702
70110	2,86	4,04	1,97E-08	5,71E-10	22,876	20,234
75048	2,98	4,25	2,43E-08	4,25E-08	23,652	20,904
80004	3,13	4,32	3,03E-08	1,41E-08	24,006	21,68
85054	3,31	4,45	3,56E-08	2,57E-08	24,536	22,598
90027	3,53	4,7	4,42E-08	5,03E-08	25,438	23,738
95013	3,86	5,1	6,62E-08	8,02E-08	26,766	25,403
98278	4,12	5,43	7,96E-08	1,01E-07	27,746	26,653
100005	4,28	5,69	9,26E-08	1,51E-07	28,503	27,449
102528	4,62	6,27	1,35E-07	2,30E-07	30,039	29,065
105029	5,19	7,31	2,279E-07	4,158E-07	32,165	31,367

4.2. Faktor Intensitas Tegangan terhadap Dimensi Retak

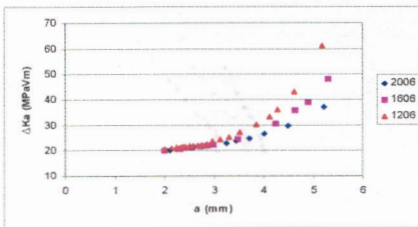
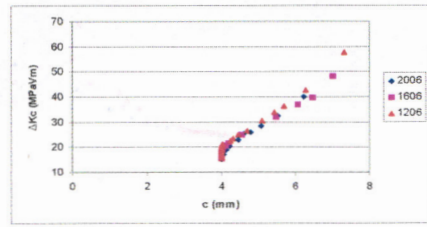
Grafik 4.1 menunjukkan grafik faktor intensitas tegangan terhadap dimensi retak. Dari gambar 4.1.a dan b, diketahui hubungan antara faktor intensitas tegangan dengan panjang retak untuk perhitungan kondisi LEFM. Dengan bertambahnya panjang retak maka harga faktor intensitas tegangan juga bertambah, kondisi tersebut berlaku pada arah tebal (ΔK_a VS a) maupun arah lebar (ΔK_c VS c). Dimana untuk spesimen A2006G42R01 memiliki harga faktor intensitas tegangan terendah diikuti spesimen A1606G42R01 dan spesimen A1206G42R01. Demikian juga dengan perhitungan kondisi EPFM (gambar 4.1.c dan d), dengan bertambahnya panjang retak maka harga faktor intensitas tegangan juga bertambah. Dimana untuk spesimen A2006G42R01 memiliki harga faktor intensitas tegangan terendah diikuti spesimen A1606G42R01 dan spesimen A1206G42R01. Hal ini disebabkan karena harga faktor intensitas tegangan dipengaruhi oleh panjang retak. Dimana panjang retak berbanding lurus dengan faktor intensitas tegangan seperti yang tertulis pada rumus (2.4). Sehingga jika panjang retak bertambah maka harga faktor intensitas tegangan juga bertambah.



(a) ΔK_a LEFM VS a



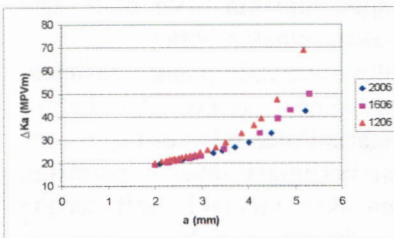
(b) ΔK_c LEFM VS c

(c) ΔK_c EPFM VS a(d) ΔK_c EPFM VS c

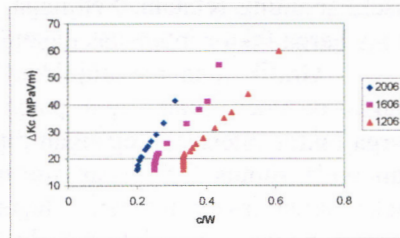
Gambar 4.1. Grafik faktor intensitas tegangan terhadap dimensi retak

4.3. Faktor Intensitas Tegangan terhadap Rasio Dimensi Retak dan Dimensi Spesimen

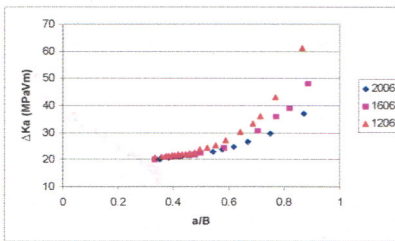
Gambar 4.2. a dan b merupakan grafik faktor intensitas tegangan (ΔK_a , ΔK_c) terhadap rasio dimensi retak dan dimensi spesimen (a/B , c/W) yang diperoleh dari perhitungan LEFM. Grafik menunjukkan bahwa dengan meningkatnya rasio dimensi maka harga faktor intensitas tegangan ikut meningkat. Pada rasio a/B yang sama ($\approx 0,9$), ΔK_a yang dicapai oleh A2006G42R01 memiliki harga paling rendah ($\pm 40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) diikuti dengan A1606G42R01 ($\pm 50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) dan spesimen A1206G42R01 memiliki harga paling tinggi ($\pm 70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$). Sedangkan untuk arah lebar, spesimen A2006G42R01 memiliki rasio c/W dan ΔK_c sebelum patah paling rendah yaitu 0,3 dan $40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Diikuti A1606G42R01 dengan rasio c/W dan ΔK_c yaitu 0,4 dan $55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Dan spesimen A1206G42R01 memiliki rasio c/W dan ΔK_c paling tinggi yaitu 0,6 dan $60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.



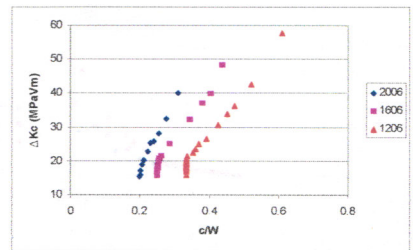
(a) Arah tebal LEFM



(b) Arah lebar LEFM



(c) Arah tebal EPFM



(d) Arah lebar EPFM

Gambar 4.2. Faktor intensitas tegangan terhadap rasio dimensi

Gambar 4.2. c dan d merupakan grafik faktor intensitas tegangan (ΔK_a , ΔK_c) terhadap rasio dimensi retak dan dimensi spesimen (a/B , c/W) yang diperoleh dari perhitungan EPFM. Grafik menunjukkan bahwa dengan meningkatnya rasio dimensi maka harga faktor intensitas tegangan ikut meningkat. Pada rasio a/B yang sama ($\approx 0,9$), ΔK_a yang dicapai oleh A2006G42R01 memiliki harga paling rendah ($\pm 40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) diikuti dengan A1606G42R01 ($\pm 50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) dan spesimen A1206G42R01 memiliki harga paling tinggi ($\pm 60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$). Sedangkan untuk arah lebar, spesimen A2006G42R01 memiliki rasio c/W dan ΔK_c paling rendah yaitu 0,3 dan $40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Diikuti A1606G42R01 dengan rasio c/W dan ΔK_c yaitu 0,4 dan $50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Dan spesimen A1206G42R01 memiliki rasio c/W dan ΔK_c paling tinggi yaitu 0,6 dan $55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

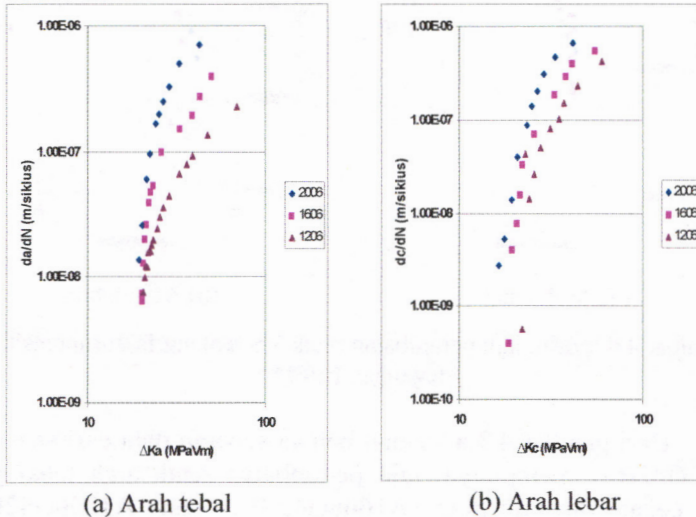
Hal ini disebabkan pada ratio a/B dan c/W yang lebih kecil, spesimen akan mempunyai energi intensitas tegangan yang lebih kecil, dimana hal ini berkaitan dengan daerah plastis yang terjadi disekitar ujung retakan. Sehingga dengan semakin besar nilai rasio maka harga faktor intensitas tegangan akan semakin besar.

Grafik juga menunjukkan bahwa semakin lebar spesimen, maka spesimen akan cepat patah. Mengingat rumus 2.7. bahwa harga faktor intensitas tegangan dipengaruhi oleh geometri spesimen dan pada rumus 2.8. lebar spesimen berfungsi sebagai pembagi, maka harga faktor intensitas tegangan akan menjadi kecil dengan adanya penambahan lebar. Sehingga dengan memberikan energi

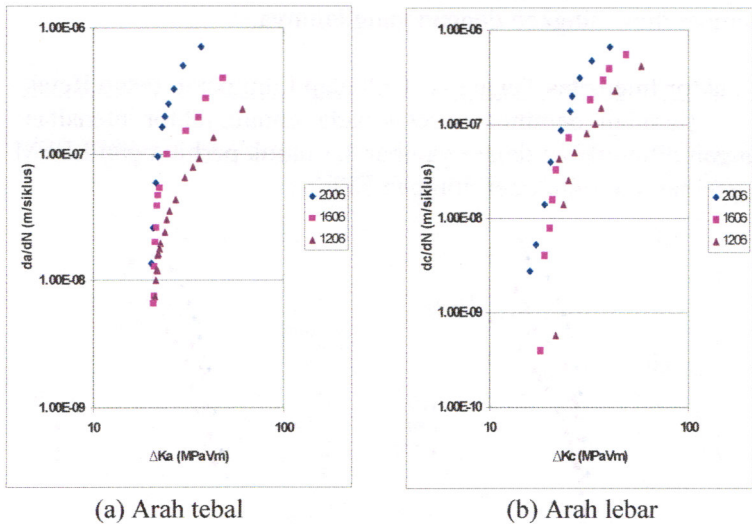
yang kecil, retakan pada spesimen paling lebar lebih mudah merambat dibandingkan dengan yang lainnya.

4.4. Faktor Intensitas Tegangan Terhadap Laju perambatan Retak

Data laju perambatan retak pada rentang faktor intensitas tegangan ditunjukkan dalam gambar 4.3 untuk perhitungan LEFM dan gambar 4.4. untuk perhitungan EPFM.



Gambar 4.3. grafik laju perambatan retak VS rentang faktor intensitas tegangan LEFM



Gambar 4.4. grafik laju perambatan retak VS rentang faktor intensitas tegangan EPFM

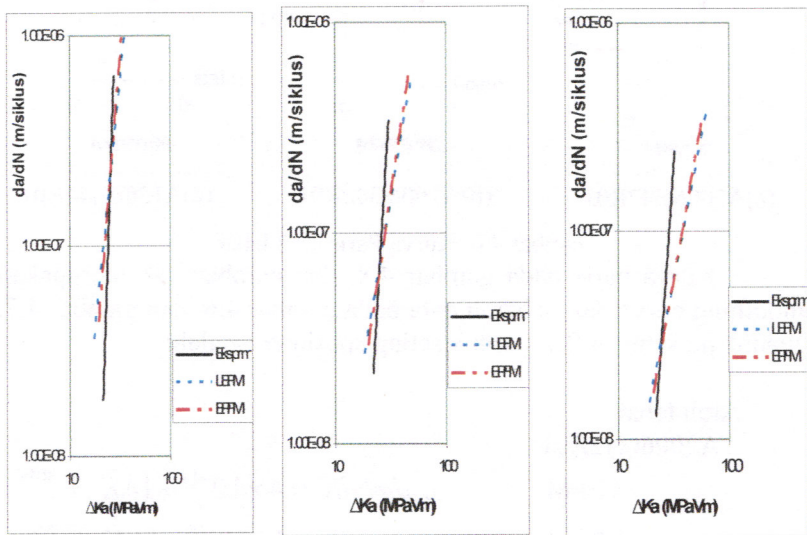
Dari gambar 4.3.a terlihat bahwa sebaran data dari spesimen A2006G42R01 mempunyai laju perambatan retak arah tebal yang lebih cepat dibandingkan A1606G42R01 dan A1206G42R01. Demikian juga dengan laju perambatan retak arah lebar (gambar 4.3.b), spesimen A2006G42R01 mempunyai laju perambatan retak yang lebih cepat dibandingkan dengan A1606G42R01 dan A1206G42R01. Kecenderungan yang sama juga ditunjukkan pada perhitungan EPFM. Dari gambar 4.4.a terlihat bahwa sebaran data dari spesimen A2006G42R01 mempunyai laju perambatan retak arah tebal yang lebih cepat dibandingkan A1606G42R01 dan A1206G42R01. Demikian juga dengan laju perambatan retak arah lebar (gambar 4.4.b), spesimen A2006G42R01 mempunyai laju perambatan retak yang lebih cepat dibandingkan dengan A1606G42R01 dan A1206G42R01.

Hal ini disebabkan pada ratio a/B dan c/W yang lebih kecil, spesimen akan mempunyai energi intensitas tegangan yang lebih

kecil, dimana hal ini berkaitan dengan daerah plastis yang terjadi disekitar ujung retakan. Sehingga dengan memberikan energi yang kecil, retakan pada spesimen A2006G42R01 lebih mudah merambat dibandingkan dengan yang lainnya.

4.5. Persamaan Paris

Data data yang disertakan untuk pembuatan persamaan paris adalah data yang laju perambatan retaknya bernilai antara 10^{-8} MPa \sqrt{m} hingga 10^{-6} MPa \sqrt{m} sesuai dengan ASTM.

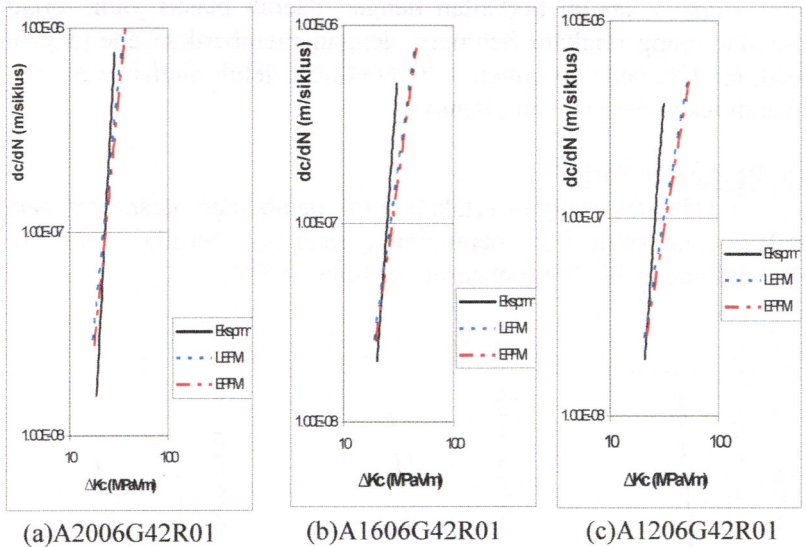


(a) A2006G42R01

(b) A1606G42R01

(c) A1206G42R01

Gambar 4.5. Kurva Paris arah tebal



Gambar 4.6. Kurva Paris arah lebar

Kurva paris pada gambar 4.8. dan gambar 4.9. merupakan smoothing curve dari sebaran data pada gambar 4.6. dan gambar 4.7. Dimana persamaan Paris untuk setiap spesimen adalah:

- Arah tebal

A2006G42R01

LEFM : $da/dN = 4 \times 10^{-14} \times (\Delta K_a)^{4.8049}$

EPFM : $da/dN = 1 \times 10^{-15} \times (\Delta K_a)^{5.8856}$

A1606G42R01

LEFM : $da/dN = 3 \times 10^{-12} \times (\Delta K_a)^{3.115}$

EPFM : $da/dN = 8 \times 10^{-13} \times (\Delta K_a)^{3.5006}$

A1206G42R01

LEFM : $da/dN = 5 \times 10^{-12} \times (\Delta K_a)^{2.7037}$

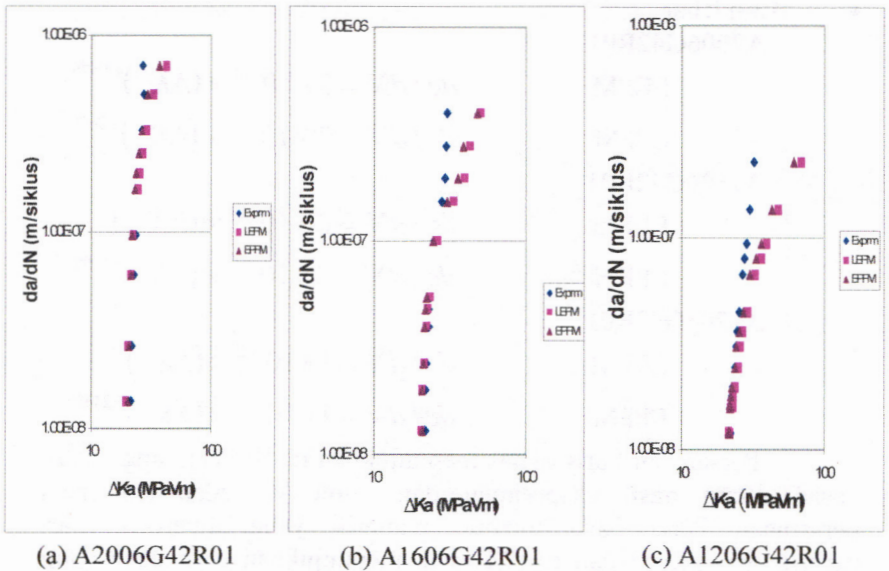
EPFM : $da/dN = 2 \times 10^{-12} \times (\Delta K_a)^{2.972}$

- Arah lebar
 - A2006G42R01
 - LEFM : $dc/dN = 3 \times 10^{-14} \times (\Delta K_c)^{4.8576}$
 - EPFM : $dc/dN = 2 \times 10^{-14} \times (\Delta K_c)^{4.9699}$
 - A1606G42R01
 - LEFM : $dc/dN = 2 \times 10^{-13} \times (\Delta K_{ca})^{3.9635}$
 - EPFM : $dc/dN = 2 \times 10^{-13} \times (\Delta K_c)^{4.0086}$
 - A1206G42R01
 - LEFM : $dc/dN = 1 \times 10^{-12} \times (\Delta K_c)^{3.2193}$
 - EPFM : $dc/dN = 1 \times 10^{-12} \times (\Delta K_c)^{3.2433}$

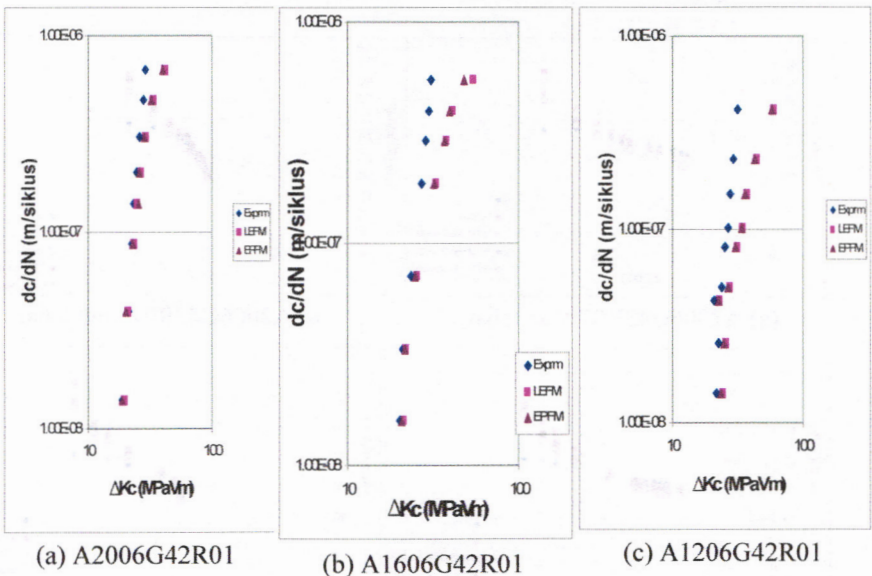
Persamaan Paris diatas menunjukkan perbedaan yang cukup besar antara hasil eksperimen dan numerik, sedangkan hasil persamaan Paris pada metode numerik yang diperoleh dari perhitungan LEFM dan EPFM tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hal ini disebabkan karena pada eksperimen rambatan terjadi ke segala arah (terjadi percabangan) yang menyebabkan perambatan retak yang terjadi menjadi lebih cepat, sedangkan pada pemodelan ANSYS tidak.

4.6. Perbandingan Hasil perhitungan ANSYS Dengan Eksperimen

Untuk melihat kevalidan dari hasil perhitungan ANSYS, perlu dilakukan perbandingan dengan eksperimen yang ada. Perbandingan hasil dari perhitungan ANSYS dan hasil eksperimen ditampilkan dalam gambar berikut.

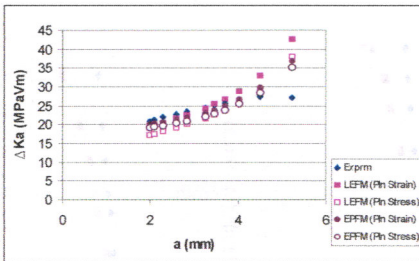


Gambar 4.7. Grafik Perbandingan ΔK hasil eksperimen dan ΔK hasil Perhitungan untuk arah tebal.

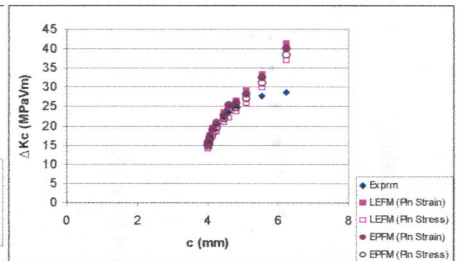


Gambar 4.8. Grafik Perbandingan ΔK hasil eksperimen dan ΔK hasil Perhitungan untuk arah lebar.

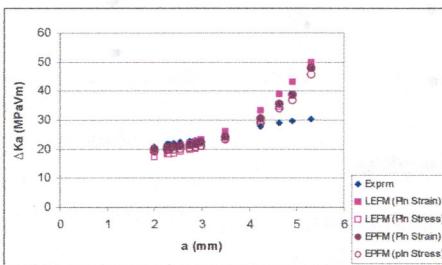
Dari gambar 4.6. dan gambar 4.7. terlihat bahwa terjadi perbedaan antara ketiga metode tersebut. Terjadi penyimpangan (error) antara hasil eksperimen dan hasil perhitungan ANSYS baik dalam arah lebar maupun tebal, dimana hasil perhitungan ANSYS dengan perhitungan LEFM memiliki error lebih besar dibandingkan dengan metode Integral J. Hal ini disebabkan karena pada perhitungan LEFM (*Linier Elastic Fracture Mechanics*) mengabaikan munculnya daerah plastis di ujung retak, sedangkan kemunculan daerah plastis ini akan mengakibatkan adanya perlambatan perambatan retak. Sedangkan pada metode Integral J memiliki error yang lebih kecil karena perhitungan dalam kondisi EPFM (*Elastic Plastik Fracture Mechanics*). Disamping itu dalam pemodelan ANSYS tidak menyertakan pengaruh lingkungan, sedangkan lingkungan berpengaruh terhadap laju perambatan retak seperti hasil penelitian Berata, W (2002).



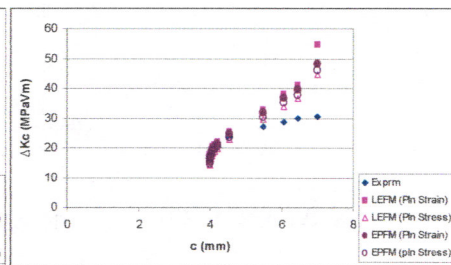
(a) A2006G42R01 arah tebal



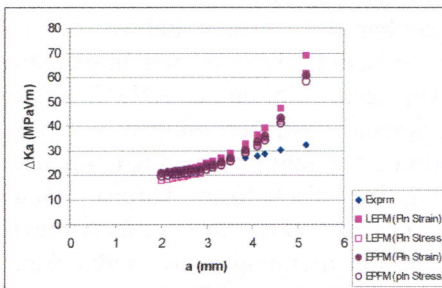
(b) A2006G42R01 arah lebar



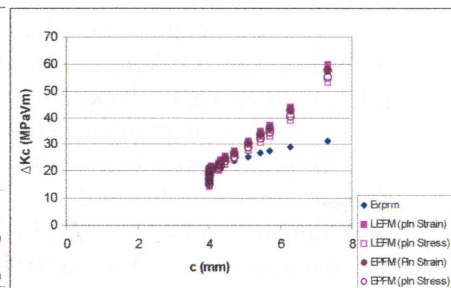
(c) A1606G42R01 arah tebal



(d) A1606G42R01



(e) A1206G42R01 arah tebal



(f) A1206G42R01 arah lebar

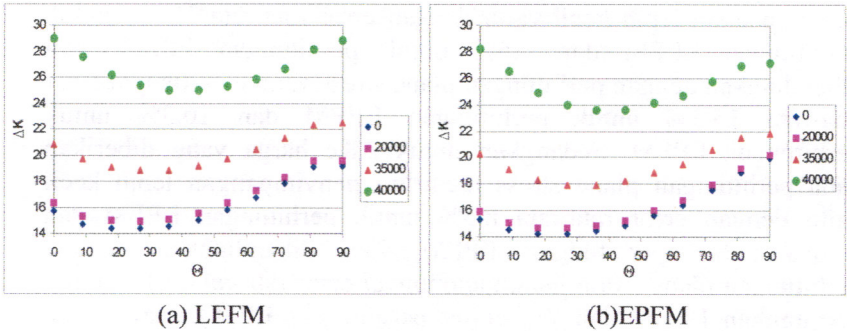
Gambar 4.9. Rentang faktor intensitas tegangan terhadap dimensi retak untuk tiap kondisi

Dari gambar 4.9.a terlihat bahwa untuk spesimen A2006G42R01 harga faktor intensitas tegangan arah tebal (ΔK_a) yang diberikan pada perhitungan plane strain memiliki

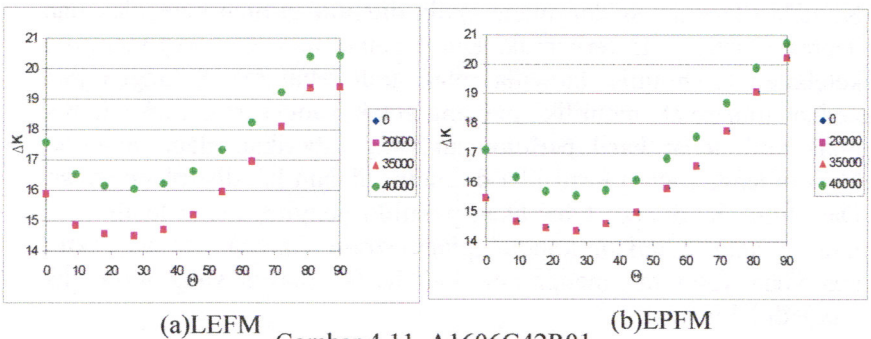
penyimpangan lebih kecil yaitu dengan error rata-rata 10.9% untuk perhitungan LEFM dan 7.5% untuk perhitungan EPFM, jika dibandingkan dengan perhitungan plane stress yang mempunyai error rata-rata 15.3% untuk perhitungan LEFM dan 10.3% untuk perhitungan EPFM. Sedangkan untuk ΔK_c harga yang diberikan pada perhitungan plane stress memiliki penyimpangan lebih kecil yaitu dengan error rata-rata 8.5% untuk perhitungan LEFM dan 76.6% untuk perhitungan EPFM, jika dibandingkan dengan perhitungan plane strain yang mempunyai error rata-rata 9.1% untuk perhitungan LEFM dan 7% untuk perhitungan EPFM. Hal serupa juga ditunjukkan pada spesimen A1606G42R01 dan A1206G42R01. Kondisi plane stress dan plane strain ditentukan oleh ketebalan dan daerah plastis yang terbentuk. Untuk retak arah lebar (c) memiliki ketebalan lebih tipis daripada retak arah tebal (a). Sehingga jika kedua arah retak memiliki panjang retak yang sama, maka untuk retak arah lebar hasil perhitungan yang diberikan akan memiliki penyimpangan lebih kecil jika di analisa dalam kondisi plane stress. Dan untuk retak arah tebal akan memiliki penyimpangan lebih kecil jika di analisa dalam kondisi plane strain, karena adanya faktor ketebalan yang mempengaruhi dan daerah plastis yang terbentuk menjadi lebih kecil.

4.7. Rentang Faktor Intensitas Tegangan Terhadap Posisi

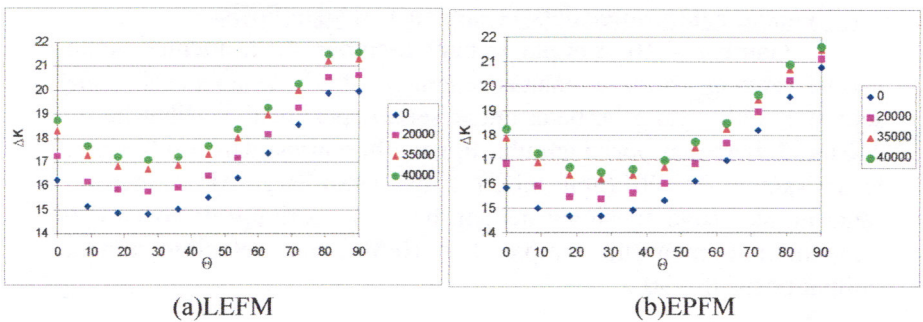
Gambar 4.10. sampai dengan gambar 4.12. menunjukkan variasi rentang faktor intensitas tegangan untuk setiap posisi pada sejumlah siklus yang berbeda untuk setiap spesimen. Terlihat harga ΔK untuk berbagai posisi angular θ , yang bervariasi dari $\theta = 0^0$ (arah lebar) sampai $\theta = 90^0$ (arah tebal). Penyebaran harga ΔK cenderung sama untuk ketiga spesimen dengan harga yang tinggi di posisi $\theta = 0^0$, kemudian menurun sampai $\theta = 10-30^0$, dan selanjutnya naik sampai posisi $\theta = 90^0$.



Gambar 4.10. A2006G42R01



Gambar 4.11. A1606G42R01



Gambar 4.12. A1206G42R01

Dari ketiga gambar diatas terlihat bahwa harga faktor intensits tegangan naik dengan kenaikan siklus. Hal ini disebabkan

dengan semakin banyaknya siklus, retakan yang terjadi semakin panjang sehingga harga faktor intensitas tegangan semakin tinggi. Pada awal siklus ΔK_a cenderung memiliki nilai lebih kecil daripada ΔK_c , tetapi semakin mendekati patah nilainya akan meningkat. Hal tersebut terjadi karena laju perambatan retak arah tebal lebih cepat dari pada arah lebar. ΔK untuk kondisi tidak dipermukaan memiliki nilai yang lebih kecil dari ΔK_a maupun ΔK_c . Hal ini disebabkan karena pada permukaan mengalami kondisi plane stress yang mempunyai daerah plastis yang lebih besar sehingga retak lebih cepat menjalar. Pada daerah ditengah spesimen mengalami kondisi plane strain sehingga daerah plastis yang terbentuk menjadi lebih kecil dan retak menjalar lebih lambat. Kondisi ditengah spesimen akan memiliki harga faktor intensitas tegangan yang lebih kecil dibandingkan dengan kondisi di permukaan.

The first part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the work done during the year. It is followed by a detailed account of the various projects and the results achieved. The report concludes with a summary of the work done and a list of the names of the staff members who have been engaged in the work.

The work done during the year has been very satisfactory and it is hoped that the results achieved will be of great value to the country. The staff members who have been engaged in the work have all done their best and it is a pleasure to acknowledge their services.

I am, Sir, very truly yours,
 J. H. [Name]

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil analisa dan komparasi yang telah dilakukan pada rentang faktor intensitas tegangan (ΔK), dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Dengan bertambahnya nilai rasio dimensi retak terhadap dimensi spesimen (a/B dan c/W) maka harga faktor intensitas tegangan akan meningkat. Untuk arah tebal, pada rasio a/B yang sama, spesimen terkecil (A1206G42R01) mempunyai nilai DK_a yang terbesar, sedangkan pada arah lebar spesimen terkecil (A1206G42R01) mempunyai nilai DK_c yang terbesar. Hal ini disebabkan karena faktor intensitas tegangan dipengaruhi oleh dimensi retak dan dimensi spesimen.
- Karena dipengaruhi oleh rasio dimensi retakan dan dimensi spesimen, maka laju perambatan retak arah tebal lebih cepat dibandingkan arah lebar. Sehingga laju perambatan arah tebal lebih cepat dibandingkan arah lebar.
- Semakin lebar spesimen ketahanan patah semakin kecil sehingga retak semakin cepat merambat. Maka spesimen paling lebar lebih cepat patah dibandingkan spesimen yang lainnya.
- Hasil perhitungan ANSYS memberikan hasil yang cukup dekat dengan eksperimen dengan tingkat kesalahan rata-rata sebesar 10,33% untuk perhitungan EPFM dan 13,4% untuk perhitungan LEFM. Hasil ini menunjukkan bahwa ANSYS cukup mampu mengevaluasi faktor intensitas tegangan pada retak berbentuk seperempat elips.
- Harga faktor intensitas tegangan sepanjang crack front menunjukkan bahwa pada permukaan memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan yang berada di tengah spesimen. Sehingga retak merambat lebih cepat pada permukaan dibandingkan dengan yang berada di tengah spesimen.

5.2. Saran

Beberapa saran yang perlu dikemukakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Perlu dilakukan pemodelan pembebanan dinamis pada ANSYS sehingga lebih sesuai dengan kondisi eksperimen.
- Perlu diperhitungkan adanya pengaruh-pengaruh lingkungan seperti temperatur dan sifat korosif material.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anderson, T.L. "*Fracture Mechanic: Fundamental and Application, 2nd edition*", CRC Press, Boca Raton, FL, 2000.
2. Ariatedja, Julendra B. "*Pengaruh Modulus Plastis dan Rasio Beban Siklis Terhadap Pola Buka-an Permukaan dan Tingkat Pengatupan Retak*", Thesis S-2 ITS-Jurusan Teknik Mesin, 2005.
3. Berata, Pramono, Irfan. "*Analisa J-Integral Pada Compact Tension Specimen (CTs) Ti-6Al-4V Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga* ", Laporan Penelitian, Jurusan Teknik Mesin ITS, 2002.
4. Curtin, Thomas J., Adey, R. A., and Brussat, T. R., "*Computational and Experimental Fracture Analysis of a Pin-Loaded Lug*", Computational Mechanics Inc. Billerica, MA, www.beasy.com. 2000.
5. Hendrowati, Wiwiek. "*Studi Eksperimental Perilaku Prambatan Corner Crack Pada Spesimen Uji Aluminium 2024 T3*", Thesis S-2 ITS-Jurusan Teknik Mesin, 2003.
6. Hertzberg, Richard W, "*Deformation and Fracture Mechanic of Engineering Materials, 3rd edition*", John Wiley & Sons, New York, 1989.
7. Muhayat, Nurul. "*Faktor Intensitas Tegangan Pada Part Through Crack Untuk Kasus Surface Dan Corner Crack Dengan Metode Elemen Hingga* ", Thesis S-2 ITS-Jurusan Teknik Mesin, 2003.
8. Pramono, Berata, Kurniawan. "*Analisa faktor Intensitas Tegangan Modus I Pada Compact Tension Specimen 2D dan 3D Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga*", Laporan Penelitian, Jurusan Teknik Mesin ITS, 2001.

LAMPIRAN

Lampiran A

LISTING PROGRAM ANSYS

PEMODELAN

```

*CREATE,FRACT,MAC
! MACRO TO CREATE 3D SOLID95 CRACK TIP ELEMENTS
FROM 3D SOLID45 ELEMENTS
! MAKE A COMPONENT CONTAINING THE CRACK TIP
NODES (CRACKTIP)
! THE CRACK TIP IS BETWEEN NODES K AND O
! SET ELEMENT TYPE TO POINT TO SOLID95
! SET ARG1 TO N (THE TYPE OF THE ELEMENTS
AROUND THE CRACK TIP)
!
/NOPR
NSEL,ALL
*GET,N,NODE,,NUM,MAX
CMSEL,S,CRACKTIP
ELMI=IEL
*IF,ELMI,LE,0,EXIT
*GET,ELTYPE,ELEM,ELMI,ATTR,TYPE
*IF,ELTYPE,NE,ARG1,CYCLE
N3 = NELEM(ELMI,3)
*IF,NSEL(N3),LE,0,CYCLE
N7 = NELEM(ELMI,7)
*IF,NSEL(N7),LE,0,CYCLE
N1 = NELEM(ELMI,1)
N2 = NELEM(ELMI,2)
N5 = NELEM(ELMI,5)
N6 = NELEM(ELMI,6)
X3 = 0.75*NX(N3)
Y3 = 0.75*NY(N3)
Z3 = 0.75*NZ(N3)
X = 0.25*NX(N2) + X3
Y = 0.25*NY(N2) + Y3
Z = 0.25*NZ(N2) + Z3

```



```
N = N + 1
N10 = N
N,N10,X,Y,Z
X = 0.25*NX(N1) + X3
Y = 0.25*NY(N1) + Y3
Z = 0.25*NZ(N1) + Z3
N = N + 1
N12 = N
N,N12,X,Y,Z
X7 = 0.75*NX(N7)
Y7 = 0.75*NY(N7)
Z7 = 0.75*NZ(N7)
X = 0.25*NX(N6) + X7
Y = 0.25*NY(N6) + Y7
Z = 0.25*NZ(N6) + Z7
N = N + 1
N14 = N
N,N14,X,Y,Z
X = 0.25*NX(N5) + X7
Y = 0.25*NY(N5) + Y7
Z = 0.25*NZ(N5) + Z7
N = N + 1
N16 = N
N,N16,X,Y,Z
N4=N3
N8=N7
NSEL,ALL
TYPE,3
EN,ELM1,N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8
EMORE,0,N10,0,N12,0,N14,0,N16
EMORE,
*ENDDO
CMSEL,U,CRACKTIP
NUMMRG,NODE
NSEL,ALL
```

```
ESEL,ALL
/GOPR
*END
/PREP7
SMRT,OFF
/COM,*BY DHITA - A2006G42R01 - a/c=0.5**
ANTYPE, STATIC
ET,1,SOLID45
ET,2,SOLID45
ET,3,SOLID95
MP,EX,1,73.1E3
MP,NUXY,1,.33
CSYS,1
N,1
NGEN,9,20,1
N,11,1
N,171,1,180
FILL,11,171,7,31,20
CSYS,0
FILL,1,11,9,2,1,9,20,1
N,1615,6
N,1675,6,1
FILL,1615,1675,2,1635,20
N,14,-2,0,0
N,74,-2,1,0
FILL,14,74,2,34,20
N,13,-1.25,0,0
N,73,-1.25,1,0
FILL,13,73,2,33,20
N,12,2,0,0
N,72,2,1,0
FILL,12,72,2,32,20
N,2615,6,0,6
N,2675,6,1,6
FILL,2615,2675,2,2635,20
```

!Z=t MERUPAKAN TEBAL PELAT

FILL,1615,2615,4,1815,200
 FILL,1635,2635,4,1835,200
 FILL,1655,2655,4,1855,200
 FILL,1675,2675,4,1875,200
 N,3615,-4,0,6

!X=4 MERUPAKAN PANJANG C,
 SUMBU MAYOR ELIPS

N,3675,-4,1,6
 N,1193,-3.2
 N,2993,-4,
 N,1133,-3.2,1
 N,2933,-4,1
 FILL,2993,2933,2,2973,-20
 FILL,1193,1133,2,1173,-20
 FILL,3615,3675,2,3635,20
 FILL,2615,3615,4,2815,200
 FILL,2635,3635,4,2835,200
 FILL,2655,3655,4,2855,200
 FILL,2675,3675,4,2875,200
 FILL,1193,2993,8,1393,200
 FILL,1173,2973,8,1373,200
 FILL,1153,2953,8,1353,200
 FILL,1133,2933,8,1333,200
 N,198,-3.2,0,1

CS,2993,2,2993,1,198,0.5
 NGEN,11,200,1,177,,9
 CSYS,0

!rasio elips

NGEN,2,10000,71,2071,200,,10.076120467,0,1
 NGEN,2,10000,72,2072,200,,10,0,1
 NGEN,2,10000,73,2073,200,,10,0,1
 NGEN,2,10000,74,2074,200,,10,0,1
 NGEN,2,10000,91,2091,200,,10,0,1
 NGEN,2,10000,111,2111,200,,10.076120467,0,1
 NGEN,2,10000,1675,3675,200,,10,0,1
 NGEN,2,10000,1133,2933,200,,10,0,1
 NGEN,3,10000,10071,12071,200,,10,0,1.5
 NGEN,3,10000,10072,12072,200,,10,0,1.5

NGEN,3,10000,10073,12073,200,,10,0,1.5
 NGEN,3,10000,10074,12074,200,,10,0,1.5
 NGEN,3,10000,10111,12111,200,,10,0,1.5
 NGEN,3,10000,11675,13675,200,,10,0,1.5
 NGEN,3,10000,11133,12933,200,,10,0,1.5
 NGEN,3,10000,10091,12091,200,,10,0,1.5
 NSEL,S,LOC,X,6
 NGEN,6,100000,ALL,,,2,
 NSEL,ALL
 E,2,22,1,1,202,222,201,201 !MESHING ELEMEN CRACKTIP
 EGEN,8,20,-1
 EGEN,10,200,1,8
 E,2,3,23,22,202,203,223,222!MESHINGELEMENBUKAN CRACKTIP
 EGEN,8,20,-1
 EGEN,9,1,-8
 EGEN,10,200,81,152
 CSYS,0
 EGEN,2,1,145,147
 EGEN,10,200,801,803
 E,1615,12,212,1815,1635,32,232,1835
 EGEN,3,20,-1
 EGEN,10,200,831,833
 E,171,13,213,371,151,33,233,351
 E,151,33,233,351,131,53,253,331
 E,131,53,253,331,111,73,273,311
 EGEN,10,200,861,863
 E,13,213,214,14,33,233,234,34
 EGEN,3,20,-1
 EGEN,10,200,891,893
 E,2993,2793,1814,2014,2973,2773,1834,2034
 E,2973,2773,1834,2034,2953,2753,1854,2054
 E,2953,2753,1854,2054,2933,2733,1874,2074
 EGEN,9,-200,921,923
 E,214,14,1193,1193,234,34,1173,1173
 E,234,34,1173,1173,254,54,1153,1153


```

E,254,54,1153,1153,274,74,1133,1133
E,1675,1875,272,72,11675,11875,10272,10072
EGEN,10,200,951
E,72,272,271,71,10072,10272,10271,10071
EGEN,10,200,961
E,71,271,291,91,10071,10271,10291,10091
EGEN,10,200,971
E,91,291,311,111,10091,10291,10311,10111
EGEN,10,200,981
E,111,73,273,311,10111,10073,10273,10311
EGEN,10,200,991
E,74,274,273,73,10074,10274,10273,10073
EGEN,10,200,1001
E,2933,2733,1874,2074,12933,12733,11874,12074
EGEN,9,-200,1011
E,274,74,1133,1133,10274,10074,11133,11133
EGEN,3,10000,951,1020
E,1615,1815,101815,101615,1635,1835,101835,101635
EGEN,5,200,1161
EGEN,5,100000,1161,1165
EGEN,3,20,1161,1185
E,1675,1875,101875,101675,11675,11875,111875,111675
EGEN,5,200,1236
EGEN,5,100000,1236,1240
EGEN,3,10000,1236,1260
TYPE,2
EMODIF,1          !MODIFY ELEMENT 1 TO 80 FROM TYPE1
TO TYPE2
*REPEAT,80,1
NUMMRG,NODE      !MERGE COINCIDENT NODES
NSEL,S,NODE,,1,2001,200
CM,CRACKTIP,NODE
/NERR,0
FRACT,2          !CONVERSION MACRO,TYPE 2
IS SOILID45

```

```
/NERR,DEFA
/OUTPUT
OUTPR,,ALL
OUTPR,VENG,ALL
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,NODE,,1,2001,200
NSEL,A,NODE,,2,2002,200
NSEL,A,NODE,,3,2003,200
NSEL,A,NODE,,4,2004,200
NSEL,A,NODE,,5,2005,200
NSEL,A,NODE,,6,2006,200
NSEL,A,NODE,,7,2007,200
NSEL,A,NODE,,8,2008,200
NSEL,A,NODE,,9,2009,200
NSEL,A,NODE,,10,2010,200
NSEL,A,NODE,,11,2011,200
NSEL,A,NODE,,12,2012,200
NSEL,A,NODE,,1615,3615,200
NSEL,A,NODE,,102615,502615,100000
NSEL,A,NODE,,102415,502415,100000
NSEL,A,NODE,,102215,502215,100000
NSEL,A,NODE,,102015,502015,100000
NSEL,A,NODE,,101815,501815,100000
NSEL,A,NODE,,101615,501615,100000
NSEL,A,NODE,,532679,532967,32
NSEL,A,NODE,,532677
DSYM,SYMM,Y           !SIMETRI BC AT Y=0 KECUALI
PADA CRACK NODE
NSEL,S,LOC,Y,31
SF,ALL,PRES,252
NSEL,ALL
ESEL,ALL
FINISH
/OUTPUT,SCRATCH
/SOLU
SOLVE
```

FINISH
/OUTPUT
/POST1

PERHITUNGAN LEFM

C*** DETERMINE K1 **
CS,1193,1,2993,1,198,1
PATH,KI1,3,,80
PPATH,1,1
PPATH,2,532704
PPATH,3,162
KCALC,,1
*GET,KI1,KCALC,,K,1
PATH,KI11,3,,80
PPATH,1,2001
PPATH,2,532994
PPATH,3,2162
KCALC,,1
*GET,KI11,KCALC,,K,1

PERHITUNGAN EPFM

ETABLE,SENE,SENE
ETABLE,VOLU,VOLU
*CREATE,JIN1
STINFC
SEXP,W,SENE,VOLU,1,-1
PATH,SIFUJI,4,50,48
PPATH,1,2
PPATH,2,43
PPATH,3,123
PPATH,4,162
PDEF,W,ETAB,W
PCALC,INTG,J,W,YG
*GET,JA,PATH,,LAST,J
PDEF,CLEAR

```

PVECT,NORM,NX,NY,NZ
PDEF,INTR,SX,SX
PDEF,INTR,SY,SY
PDEF,INTR,SXY,SXY
PCALC,MULT,TX,SX,NX
PCALC,MULT,C1,SXY,NY      ! TX = SX*NX + SXY*NY
PCALC,ADD,TX,TX,C1
PCALC,MULT,TY,SXY,NX
PCALC,MULT,C1,SY,NY      ! TY = SXY*NX + SY*NY
PCALC,ADD,TY,TY,C1
*GET,DX,PATH,,LAST,S
DX=DX/100
PCALC,ADD,XG,XG,,,,-DX/2
PDEF,INTR,UX1,UX
PDEF,INTR,UY1,UY
PCALC,ADD,XG,XG,,,,DX
PDEF,INTR,UX2,UX
PDEF,INTR,UY2,UY
PCALC,ADD,XG,XG,,,,-DX/2
C=(1/DX)

PCALC,ADD,C1,UX2,UX1,C,-C
PCALC,ADD,C2,UY2,UY1,C,-C
PCALC,MULT,C1,TX,C1
PCALC,MULT,C2,TY,C2      !TX*DUX/DX+TY*DUY/DX
PCALC,ADD,C1,C1,C2
PCALC,INTG,J,C1,S
*GET,JB,PATH,,LAST,J
JINT=2*(JA-JB)
PDEF,CLEAR
*END

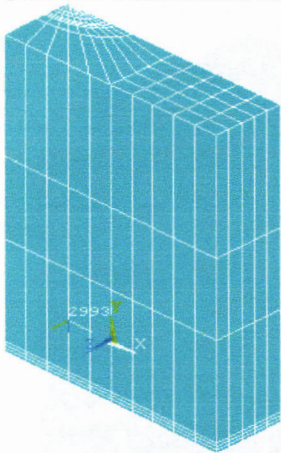
CON1=73.1E3/(1-(0.33*0.33))      !J-TO-KICONVERSION
FACTOR
*ULIB,JIN1

```

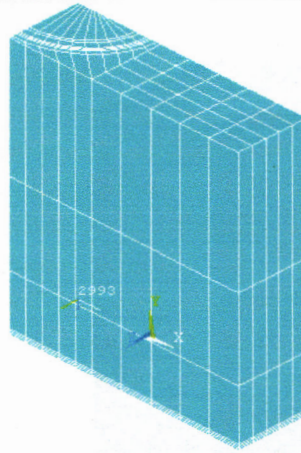
```
*USE,STINFC,2,43,123,162
KI2=SQRT(CON1*SIFUJI)
*STATUS,SIFUJI
```

```
! CALCULATE KI FROM J
! VIEW RESULTS
```

```
FINISH
```

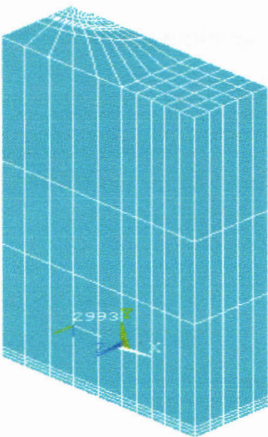
Lampiran B**Gambar Pemodelan Kondisi Awal Retak dan Sebelum Patah**

(a) Awal Retak

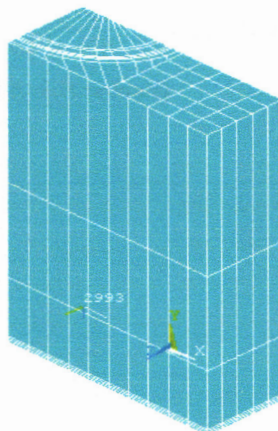


(b) Sebelum patah

Gambar B.1. A2006G42R01

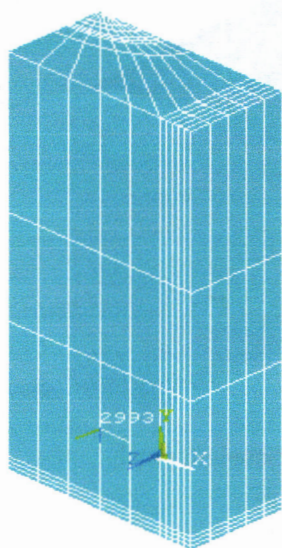


(a) Awal Retak

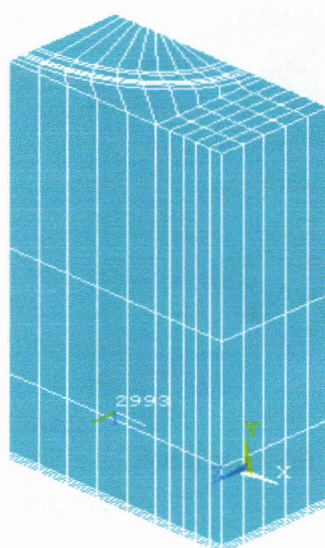


(b) Sebelum patah

Gambar B.2. A1606G42R01



(a) Awal Retak



(b) Sebelum patah

Gambar B.3. A1206G42R01

Lampiran C. Hasil Perhitungan

Tabel C.1. A2006G42R01 LEFM

N	LEFM (plain strain)		LEFM (plain stress)	
	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)
0	19,16	15,729	17,076	14,016
2703	19,16	15,729	17,076	14,016
12706	19,16	15,729	17,076	14,016
20007	19,57	16,343	17,436	14,563
27712	20,35	17,561	18,136	15,649
32713	21,48	19,346	19,14	17,239
35227	22,45	20,787	20,003	18,523
37760	24,28	23,42	21,639	20,87
38764	25,3	24,758	22,544	22,062
39768	26,73	26,539	23,818	23,649
40715	28,86	29,015	25,72	25,855
41676	32,88	33,365	29,295	29,732
42714	42,57	41,489	37,935	36,973

Tabel C.2. A2006G42R01 EPFM

N	EPFM (plain strain)		EPFM (plain stress)	
	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)
0	19,962	15,338	19,043	14,63
2703	19,962	15,338	19,043	14,63
12706	19,962	15,338	19,043	14,63
20007	20,203	15,935	19,272	15,2
27712	20,639	17,121	19,689	16,33
32713	21,227	18,859	20,249	17,99
35227	21,802	20,261	20,798	19,33
37760	22,98	22,82	21,921	21,77
38764	23,718	25,281	22,625	24,21
39768	24,814	25,844	23,671	24,65
40715	26,524	28,24	25,302	26,94
41676	29,703	32,444	28,335	30,95
42714	36,834	40,112	35,138	38,26

Tabel C.3. A1606G42R01 LEFM

N	LEFM (plain strain)		LEFM (plain stress)	
	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)
0	19,42	15,9	17,304	14,169
10003	19,42	15,9	17,304	14,169
20004	19,42	15,9	17,304	14,169
30010	19,42	15,9	17,304	14,169
40011	20,43	17,556	18,203	15,644
42696	20,5	17,68	18,268	15,754
45028	20,6	17,853	18,359	15,909
50012	21	18,471	18,715	16,46
54949	21,51	19,285	19,163	17,184
60027	22,25	20,477	19,825	18,247
62551	22,74	21,226	20,262	18,914
64954	23,38	22,08	20,833	19,675
69998	26,18	25,616	23,327	22,827
74959	33,33	32,986	29,702	29,392
76954	39,15	38,112	34,886	33,963
77968	43,13	41,141	38,431	36,66
78977	49,98	54,707	48,75	44,538

Tabel C.4. A1606G42R01 EPFM

N	EPFM (plain strain)		EPFM (plain stress)	
	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)
0	20,218	15,505	19,286	14,79
10003	20,218	15,505	19,286	14,79
20004	20,218	15,505	19,286	14,79
30010	20,218	15,505	19,286	14,79
40011	20,716	17,115	19,762	16,33
42696	20,748	17,236	19,792	16,44
45028	20,792	17,404	19,834	16,6
50012	21,004	18,006	20,037	17,18
54949	21,245	18,798	20,266	17,93

60027	21,605	19,959	20,609	19,04
62551	21,875	20,688	20,868	19,73
64954	22,321	21,518	21,293	20,53
69998	24,408	24,952	23,284	23,8
74959	30,597	32,081	29,188	30,6
76954	35,665	37,028	34,023	35,32
77968	38,746	39,791	36,961	37,96
78977	48,067	48,256	45,853	46,03

Tabel C.5. A1206G42R01 LEFM

N	LEFM (plain strain)		LEFM (plain stress)	
	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)
0	19,95	16,237	17,782	14,469
20001	20,62	17,252	18,376	15,373
30057	21,06	17,927	18,763	15,975
35013	21,31	18,328	18,989	16,332
40002	21,56	18,726	19,212	16,687
45019	21,81	19,122	19,431	17,039
50099	22,13	19,645	19,716	17,505
55014	22,44	20,163	19,994	17,968
60003	22,74	20,678	20,265	18,426
65045	23,06	21,265	20,57	18,949
70110	23,58	21,95	21,013	19,559
75048	24,76	23	22,062	20,495
80004	25,6	24,107	22,815	21,481
85054	26,87	25,602	23,942	22,814
90027	28,94	27,722	25,784	24,703
95013	32,68	31,417	29,119	27,995
98278	36,29	35,041	32,337	31,028
100005	39,22	37,34	34,943	33,273
102528	47,34	44,019	42,188	39,225
105029	68,98	59,843	61,472	53,325

Tabel C.6. A1206G42R01 EPFM

N	EPFM (plain strain)		EPFM (plain stress)	
	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)	ΔK_a (MPaVm)	ΔK_c (MPaVm)
0	20,75	15,833	19,795	15,1
20001	21,124	16,821	20,151	16,05
30057	21,349	17,509	20,366	16,7
35013	21,474	17,867	20,485	17,04
40002	21,592	18,255	20,598	17,41
45019	21,704	18,64	20,704	17,78
50099	21,843	19,149	20,837	18,27
55014	21,972	19,654	20,96	18,75
60003	22,09	20,155	21,073	19,23
65045	22,216	20,727	21,193	19,77
70110	22,527	21,393	21,489	20,41
75048	23,681	22,414	22,59	21,38
80004	24,25	23,49	23,133	22,41
85054	25,214	24,942	24,053	23,79
90027	27,003	26,681	25,759	25,45
95013	30,248	30,574	28,854	29,17
98278	33,367	33,862	31,83	32,3
100005	35,981	36,295	34,323	34,62
102528	43,086	42,732	41,102	40,76
105029	60,991	57,698	58,182	55,04