



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

38662/H/10

RSM

620.001 518 25

Naw

a-1

2009



TUGAS AKHIR (Desain) - RM1522

ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN PADA RETAK SETENGAH ELIPS DENGAN VARIASI RETAKAN ARAH (a) PADA KETEBALAN DAN (c) PADA LEBAR SPESIMEN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

ZENDHI NAWAVIKA
NRP. 2102 109 041

Dosen Pembimbing,
WIWIEK HENDROWATI, ST.MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2009

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	2-2-2010
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	687



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT (Design) - RM1522

**STRESS INTENSITY FACTOR ANALYSIS
BARST SEMI ELLIPSE WITH VARIATION
INSTRUCT CRACK (a) THICK AND (c) WIDE
OF SPECIMENT USING METHOD OF
ELEMENT TILL**

ZENDHI NAWAVIKA
NRP. 2102 109 041

Advisor Lecturer
WIWIEK HENDROWATI,ST.MT.

MECHANICAL ENGINEERING
Industrial Faculty of Technology
Sepuluh November Institute of Technology
Surabaya 2009

**ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN
PADA RETAK SETENGAH ELIPS DENGAN
VARIASI RETAKAN ARAH (a) PADA
KETEBALAN DAN (c) PADA LEBAR SPESIMEN
MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Nama Mahasiswa : Zendhi Nawavika
NRP : 2102 109 041
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing: Wiwiek Hendrowati ST.MT

Abstrak

Suatu material akan mengalami suatu kelelahan yang dapat didefinisikan sebagai patahannya material setelah mengalami pembebanan berulang dalam jumlah siklus. Secara umum suatu material mengalami patah lelah yang meliputi tiga tahapan yaitu awal terjadinya retak, perambatan retakan dan patah statik. Salah satu parameter untuk memprediksi perambatan retak yang dapat dihitung secara analitis dengan menganalisa faktor intensitas tegangan yang dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga.

Dalam hal ini digunakan analisa pemodelan yang telah ditentukan untuk menghitung faktor intensitas tegangan pada retak permukaan berbentuk setengah elips. Pemodelan dilakukan dengan tiga dimensi setengah bagian karena kesimetrisan geometri dan beban. Untuk mengetahui pengaruh factor intensitas tegangan, maka spesimen terhadap pengaruh keretakan dibedakan tiga spesimen yaitu T-1, T-7, dan T-14 yang dimodelkan dengan variasi awal retakan $a=c$, $a<c$, dan $a>c$.

Tugas akhir ini dilaksanakan dengan membandingkan hasil validasi yang didapatkan dengan analisa pemodelan menggunakan metode elemen hingga berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Siyi Chen dan Zhenyuan Cui. Dalam menghitung faktor intensitas tegangan pada spesimen alumunium tipe LY12R. Prosentase error yang didapat dari hasil validasi yang dalam analisa pemodelan mendekati dengan eksperimen dimana hasil error besar terdapat pada spesimen T-7 sebesar 12,0790122%.

Kata Kunci : faktor intensitas tegangan, metode elemen hingga.

**STRESS INTENSITY FACTOR ANALYSIS AT
BARST SEMI ELLIPSE WITH VARIATION
INSTRUCK CRACK (a) AT THICK AND (c) WIDE
OF SPECIMENT USING METHOD OF ELEMENT
TILL**

Name : Zendhi Nawavika
NRP : 2102 109 041
Major : Mechanical Engineering IFT-ITS

Advisor lecturer : Wiwiek Hendrowati,ST.MT

Abstract

A material will experience of an fatigue which can be defined by as its breaking is material after experiencing of recurring encumbering in number the cycle. In general a material experience of broken the fatigue covering three step that is early the happening of barst, fracture mechanic and broken static. One of parameter for barst analysis crack which can be analytically with analyzing factor of intensity of tension by using method element till.

In this case used by analysia of appearance which have been determined to stress intensity factor at barst surface in form of elliptical half. Appearance tridimensional semi shares because symmetrical of geometry and burden. To know influence of stress intensity, hence specimen to influence of cart differentiated by there spesiment that is T-1, T-7, T-14 modeled with variation of early crack $a=c$, $a<c$, and $a>c$

This final duty executed compared toly result of validasi got with analysis modeled use element mthod till pursuant to experiment result by Siyi Chen and Zhenyuan Cui. In strees intensity factor spesiment alumunium type LY12R. Prosentase error which got from result validasi which is in analysis modeled come near with experiment where big result error there are at spesiment T-7 equal to 12, 08%

Keyword : factor of tension intensity, method of element til

**ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN PADA
RETAK SETENGAH ELIPS DENGAN VARIASI
RETAKAN ARAH (a) PADA KETEBALAN DAN (c)
PADA LEBAR SPESIMEN MENGGUNAKAN METODE
ELEMEN HINGGA**

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 Noverber

Oleh :

ZENDHI NAWAVIKA

NRP. 2102 109 041

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Wiwiek Hendrowati ST.MT(Pembimbing)
2. Dr.Ir. Soeharto, DEA(Penguji I)
3. Dr.Ir. Agus Sigit Pramono, DEA(Penguji II)
4. Fahmi Mubarak, ST. MSc(Penguji III)

SURABAYA

JANUARI, 2009

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan YME yang telah melimpahkan rahmat dan nikmat-Nya, sehingga terselesaikannya laporan Tugas Akhir dengan judul “Analisa Faktor Intensitas Tegangan Pada Retak Setengah Elips dengan Variasi Retakan Arah (a) pada Ketebalan dan (c) pada Lebar Spesimen Menggunakan Metode Elemen Hingga“. 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 FTI-ITS
2. Wiwiek Hendrowati ST,MT, selaku pembimbing yang telah banyak memberikan arahan dan bimbingan dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Dr.Ir. Soeharto, DEA, Dr.Ir.Agus Sigit Pramono, DEA, Fahmi Mubarak, ST. MSc yang telah memberikan kritik saran dan masukan dalam penulisan tugas akhir.
4. Kedua orang tua serta saudara yang memberikan banyak dukungan secara moril dan materiil.
5. Istri tercinta ”drg. Faridatul Muniroh” yang memberikan inspirasi semangat serta dukungan untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Rekanan seperjuangan tugas akhir ini, Dierga Aris C yang banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini

7. Semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pembuatan tugas akhir ini terutama rekanan angkatan 2002, Riky, Irwan, Dino, Roby, Wahyu, serta yang lain dan 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, Febuari 2009

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iv
HALAMAN PENGESAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penulisan Tugas Akhir	3
1.6 Sistematika Penulisan Tugas Akhir	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Mekanisme Perpatahan Kelelahan	7
2.2.1 Metode Pembukaan Retak	8
2.2.2 Pendekatan Faktor Intensitas Tegangan	9
2.2.3 Laju Perambatan Retak	11
2.3 Daerah Plastik pada Ujung Retak	14
2.4 Metode Elemen Hingga	18
2.4.1 Konsep Elemen Hingga	18
2.4.2 Pemodelan Singularitas Ujung Retak	19
BAB III METODE PENELITIAN	22
3.1 Diagram Alir Pelaksanaan Tugas Akhir	22

3.1.1 Studi Literatur	23
3.1.2 Data Penelitian	23
3.2 Sketsa Pemodelan	28
3.2.1 Pemodelan	29
3.2.2 Tahap Preprocessor	29
3.2.3 Pembuatan Daerah Retak	29
3.2.4 Tahap Solution	30
3.2.5 Tahap General Post Processor	30
3.3 Analisa Data	31
3.4 Perbandingan Hasil Analisa dengan Hasil Eksperimen	31
3.5 Kesimpulan	31
 BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	 32
4.1 Faktor Intensitas Tegangan	32
4.2 Laju Perambatan Retak	34
4.3 Perbandingan Hasil Simulasi Pemodelan dengan Eksperimen Berdasarkan Faktor Intensitas Tegangan	40
4.4 Faktor Intensitas Tegangan Terhadap Laju Perambatan Retak	45
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	 48
5.1 Kesimpulan	48
5.2 Saran	49
 DAFTAR PUSTAKA	 50
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perbandingan Analisa elemen hingga 3D dengan analisa faktor intensitas tegangan Newman – Raju	4
Gambar 2.2 Modus dasar pembebanan	8
Gambar 2.3 Distribusi Tegangan pada Retak Setengah Elips	10
Gambar 2.4 Spesimen Pelat dengan Retak Semi Elips	10
Gambar 2.5 Daerah Plastik di Ujung Retak dengan variasi θ	15
Gambar 2.6 Perkiraan Ukuran Daerah Plastik	16
Gambar 2.7 Kurva Laju Perambatan Retak.....	17
Gambar 2.8 Elemen singular heksahedron quarter poin 20 node	19
Gambar 3.1 Diagram alir pelaksanaan tugas akhir	22
Gambar 3.2 Variasi Retakan, Spesimen T-1, T-7, dan T-14	24
Gambar 3.3 Grafik Pertumbuhan Retak Permukaan	25
Gambar 3.4 Diagram alir pemodelan	28
Gambar 4.1 Grafik ΔK_a dan ΔK_c Fungsi Panjang Retak Arah (a,c) Spesimen T-1	35
Gambar 4.2 Grafik ΔK_a dan ΔK_c Fungsi Panjang Retak Arah (a,c)Spesimen T-7	36
Gambar 4.3 Grafik ΔK_a dan ΔK_c Fungsi Panjang Retak Arah (a,c) Spesimen T-14	36
Gambar 4.4 Data Kecepatan Perambatan Retak pada Pemodelan Spesimen T-1	38
Gambar 4.5 Data Kecepatan Perambatan Retak pada Pemodelan Spesimen T-7	39
Gambar 4.6 Data Kecepatan Perambatan Retak pada Pemodelan Spesimen T-14	39

Gambar 4.7 Data Kecepatan Perambatan Retak pada Eksperimen Spesimen T-1	41
Gambar 4.8 Data Kecepatan Perambatan Retak pada Eksperimen Spesimen T-7	42
Gambar 4.9 Data Kecepatan Perambatan Retak pada Eksperimen Spesimen T-14	44
Gambar 4.10 Gambar laju perambatan retak terhadap ΔK spesimen T-1.....	46
Gambar 4.11 Gambar laju perambatan retak terhadap ΔK spesimen T-7.....	46
Gambar 4.12 Gambar laju perambatan retak terhadap ΔK spesimen T-14.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Spesimen T-1	26
Tabel 3.2 Data Spesimen T-7	26
Tabel 3.1 Data Spesimen T-14	27
Tabel 4.1 Perbandingan ΔK dari hasil eksperimen dan ΔK hasil simulasi pemodelan pada specimen T-1	41
Tabel 4.2 Perbandingan ΔK dari hasil eksperimen dan ΔK hasil simulasi pemodelan pada specimen T-7	42
Tabel 4.3 Perbandingan ΔK dari hasil eksperimen dan ΔK hasil simulasi pemodelan pada specimen T-1	43

DAFTAR SIMBOL

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	Komponen tensor tegangan
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$	Komponen tensor regangan
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Komponen tegangan utama (<i>principle stress</i>)
A	Panjang retak arah tebal
B	Tebal spesimen
c	Panjang retak arah lebar
W	Lebar spesimen
r	Jarak dari ujung retak
ν	<i>Poisson ratio</i>
E	Modulus Elastisitas
K	Faktor intensitas tegangan
ΔK	Rentang faktor intensitas tegangan
P	Beban yang diaplikasikan
β	Faktor koreksi geometri
σ_{\min}	Tegangan minimum
σ_{maks}	Tegangan maksimum
σ_m	Tegangan rata-rata
R	Rasio tegangan (<i>stress ratio</i>)
G	Laju pelepasan energi (<i>energy release rate</i>)
u, v, w	Perpindahan elemen ke arah x, y dan z
x, y, z	Koordinat global sistem
s, t, r	Koordinat natural elemen

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan desain semakin kompleks dan semakin banyak pula pembebanan peralatan kriteria desain yang berkembang dari konsep umur tak hingga ke umur berhingga. Hal ini menuntut perancang untuk dapat memprediksikan umur komponen yang mengalami beban dinamis dalam melaksanakan operasinya yang bervariasi terhadap waktu baik dalam bentuk maupun nilainya (fluktuatif).

Kelelahan pada material dapat didefinisikan sebagai patahnya material setelah mengalami pembebanan berulang dalam sejumlah siklus. Fase terakhir kelelahan pada sebuah elemen mesin yang mendapatkan beban siklik ditandai dengan munculnya sebuah titik retak tertentu yang sebelumnya telah dimulai dengan adanya cacat kristal dan dislokasi mikroskopis. Lalu retak mulai merambat sampai dengan kecepatan rambat tertentu. Sampai pada satu saat retak merambat sangat cepat yang menyebabkan kegagalan pada material.

Untuk keperluan keamanan dari peralatan, banyak dilakukan penelitian 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 Spesimen*) dilakukan untuk mengetahui perilaku perambatan retak. Karena metode eksperimen membutuhkan biaya dan waktu lebih banyak dalam pelaksanaannya, maka banyak pengembangan menggunakan simulasi.

Dengan simulasi pada bentuk sederhana dapat dikatakan akurat, maka dilakukan simulasi untuk bentuk yang lebih rumit pada specimen maupun retakan. Untuk mendukung dan mempermudah analisa keretakan, penulis mencoba menggunakan pemodelan dengan menggunakan metode elemen hingga untuk mengevaluasi faktor intensitas tegangan pada konfigurasi retak permukaan (semi elliptic surface crack) dan retak pojok (quarter elliptic corner crack). Pemodelan specimen menggunakan elemen singular pada sekitar ujung retak. Untuk kasus retak permukaan, hasil yang didapat dibandingkan dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Ziyi Chen dan Zhenyuan Cui yang meneliti tentang perilaku perambatan retak permukaan dengan beban tarik sklis dan variasi arah tebal (a) dan arah lebar (c).

1.2 Perumusan Masalah

Dalam tugas akhir ini model perilaku perambatan surface crack berbentuk setengah elips dalam analisa berupa simulasi 3D. Kajian yang dilakukan adalah analisa perambatan corner crack yang disimetrikkan dengan variasi retakan arah lebar (c) dan arah tebal (a) dengan membuat pemodelan metode elemen hingga, elemen yang digunakan yaitu elemen heksahedron isoparametrik 20 node dan untuk daerah bukan retak menggunakan elemen heksahedron 8 node. Kemudian hasil yang didapat divalidasikan dengan hasil surface crack pada eksperimen dan penelitian yang ada.

1.3 Tujuan

Tujuan dilaksanakannya tugas akhir ini adalah :

1. Mendapatkan faktor intensitas tegangan pada kasus retakan permukaan dan retak pojok dengan metode elemen hingga.
2. Mengetahui pengaruh variasi retakan arah tebal dan arah lebar pada specimen terhadap faktor intensitas tegangan pada *crack front*.

3. Mengetahui kevalidan penggunaan metode elemen hingga pada hasil perhitungan faktor intensitas tegangan dengan analisa simulasi 3D, dibandingkan dengan hasil ekperimen dan penelitian yang ada.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam pelaksanaan tugas akhir ini adalah:

1. Material diasumsikan homogen, dan isotropic
2. Perhitungan faktor intensitas tegangan permukaan dalam masalah linear elastik fracture (LEFM) dan modulus pembebanan I (Opening Mode).
3. Tidak memperhitungkan adanya pengaruh lingkungan.

1.5 Manfaat Penulisan Tugas Akhir

Manfaat dari penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Untuk perancangan struktur yang memiliki resiko tinggi terhadap kerusakan, sehingga software metode elemen hingga dapat digunakan sebagai alat komparasi hasil pengujian suatu spesimen.
2. Dapat diketahui laju perambatan retak pada permukaan pada suatu jenis material yang membentuk setengah elips, sehingga dapat diprediksi umur material tersebut.
3. Mengetahui karakteristik ketahanan patah terhadap variasi retakan arah lebar (c) dan arah tebal (a) pada spesimen.

1.6 Sistematika Penulisan Tugas Akhir

Penulisan tugas akhir disusun dengan sistematika sebagai berikut :

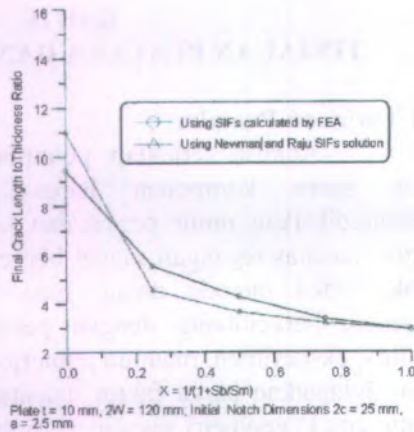
- **Bab I PENDAHULUAN**
Merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan tugas akhir dan sistematika penulisan tugas akhir.
- **Bab II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**
Berisi tinjauan pustaka dan dasar teori yang dipergunakan dalam mengerjakan tugas akhir ini, diantaranya yang meliputi teori mekanika patahan dan metode elemen hingga.
- **Bab III METODE PENELITIAN**
Berisi mengenai metode pemodelan perambatan retak pojok untuk mendapatkan rentang intensitas tegangan dan spesifikasi material yang digunakan dalam eksperimen yang akan digunakan sebagai pembandingan.
- **Bab IV HASIL DAN PEMBAHASAN**
Berisi data dan pembahasan grafik yang didapatkan untuk kemudian dibandingkan dengan hasil yang didapatkan dengan eksperimen.
- **Bab V KESIMPULAN DAN SARAN**
Berisi kesimpulan yang diperoleh dan saran untuk pengembangan penelitian lebih lanjut.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Analisa terhadap perambatan retak yang terjadi pada suatu komponen harus dilakukan jika ingin memprediksikan umur pemakaian suatu komponen. Karena factor intensitas tegangan sangat berpengaruh pada perambatan retak, maka metode dalam menentukan factor intensitas tegangan berkembang dengan pesat baik melalui metode analitis, eksperimen, maupun numeric. 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.

S. Saxena [9] melakukan penelitian tentang faktor intensitas tegangan modulus I pada retak setengah elips internal dengan spesimen mild steel plate. Penelitian menggunakan metode elemen hingga domain integral tiga dimensi. Untuk hasil yang didapat pada retak setengah elips internal dibandingkan dengan solusi faktor intensitas tegangan Newman Raju. Ternyata untuk kedua metode, perbedaan antara hasil yang didapat metode elemen hingga dan solusi numerik tidak begitu signifikan.



Gambar 2.1 Perbandingan Analisa elemen hingga 3D dengan analisa faktor intensitas tegangan Newman – Raju

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) dengan menggunakan software ANSYS untuk menghitung faktor intensitas tegangan pada *Compact Tension Spesimen* (CTS). Pemodelan menggunakan elemen quadrilateral isoparametrik 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.

Neves, Adey, Baynham, Niku melakukan penelitian dengan menggunakan metode Boundary Elemen Methode (BEM) untuk mengetahui K dan perambatan retak yang terjadi. Mereka menggunakan software BEASY dan memodelkan secara 3D, dan remeshing secara otomatis pada setiap perambatan retaknya. Hasil yang didapat sangat akurat dan perilaku perambatannya dapat langsung terlihat.

Hendrowati, W telah melakukan penelitian perilaku perambatan retak semi elips. Spesimen yang digunakan adalah aluminium 2024 T3. Dalam penelitiannya dilakukan beberapa variasi ukuran spesimen, yaitu variasi tebal spesimen, variasi lebar dan panjang retakan pada spesimen. Disamping itu juga dilakukan penelitian dengan variasi rasio dimensi retakan terhadap dimensi spesimen dan variasi rasio pembebanan terhadap spesimen. Dari penelitian tersebut didapatkan laju perambatan retak dan rentang faktor intensitasnya.

Dari penelitian yang dilakukan Siyi Chen dan Zhenyuan Cui pada eksperimen jenis plat LY12R dengan variasi titik awal beban luluh yang ditetapkan. Sesuai dengan nilai kurva $a-N$ dan $c-N$, yang bertujuan untuk mengklasifikasikan retak pada permukaan yang diteliti. Dengan menghasilkan sebuah persamaan empirik untuk memprediksikan kedalaman retak.

2.2 Mekanisme Perpatahan Kelelahan

Kelelahan (fatigue) pada metal atau logam dapat dinyatakan sebagai patahnya logam setelah mengalami pembebanan berulang dalam jumlah siklus, dengan melalui tiga tahapan berikut, yaitu :

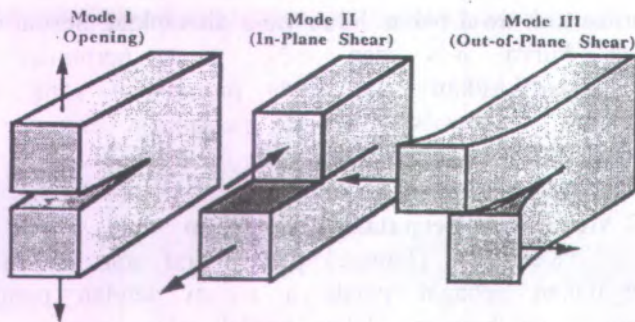
1. Naiknya tegangan pada daerah retak yang dapat menimbulkan konsentrasi tegangan, kemudian pada daerah tersebut (local) bentukan plastis terjadi, yang akhirnya menimbulkan retak mikro (crack initiation), di daerah I.

2. Retak mikro membesar dan jika pembebanan berulang berlanjut, retak akan merambat (crack propagation), di daerah II.
3. Tahap terakhir terjadi dimana setelah retak lelah merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang sisa yang belum retak dan akhirnya komponen tersebut akan patah (final fracture), di daerah II.

Pada daerah I dan III terjadi pada pengaruh tebal dan struktur mikro yang dominant, tetapi kedua pengaruh ini menjadi lemah pada daerah II. Pengaruh dominant pada daerah I dan III, menyebabkan mekanisme perambatan retak kedua daerah itu sukar diprediksi secara teoritis.

2.2.1 Mode Pembukaan Retak

Suatu retak pada padatan dapat dibebani dalam tiga mode berbeda seperti gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Modus dasar pembebanan

Pada mode I (*opening mode*) beban bekerja tegak lurus pada bidang retak dan cenderung untuk membuka retak. Beban berupa geser dalam bidang akan menyebabkan terjadinya mode II (*shearing mode*) dengan perambatan retak yang muncul sejajar dengan gaya-gaya utama penyebab keretakan. Sedangkan mode III (*tearing mode*) diakibatkan

oleh gaya puntir yang keluar bidang struktur. Suatu benda yang mengandung retak dabit dibebani dengan salah satu mode pembebanan ini atau kombinasi dari mode-mode tersebut. Secara teknis mode I merupakan hal yang paling penting dan banyak terjadi.

2.2.2 Pendekatan Faktor Intensitas Tegangan

Distribusi tegangan disekitar ujung retak referensi dari T.L Anderson dapat diperoleh dari gambar 2.1 yaitu :

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

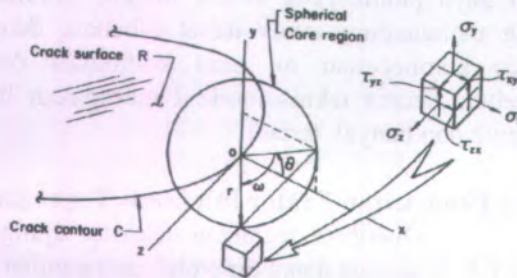
$$\sigma_y = \frac{K_I}{(2r \cdot \cos \omega)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{(2r \cdot \cos \omega)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\sigma_z = 2\nu \left(\frac{K_I}{(2r \cdot \cos \omega)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{K_{II}}{(2r \cdot \cos \omega)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \right)$$

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

$$\tau_{xz} = \frac{K_{III}}{(2r \cdot \cos \omega)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{(2r \cdot \cos \omega)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \dots \dots \dots (2.1)$$



Gambar 2.3 Distribusi tegangan pada retak setengah elips

Dari persamaan (2.1) di atas dapat dilihat bahwa distribusi tegangan di sekitar ujung retak sangat ditentukan oleh harga \$K\$ sedangkan suku-suku yang lain hanyalah menunjukkan posisi. Harga \$K\$ disebut faktor intensitas tegangan yang merupakan fungsi dari \$(\sigma, a)\$. Medan tegangan di sekitar ujung retak dapat diketahui jika \$K\$ diketahui sehingga \$K\$ merupakan suatu parameter penting karena menggambarkan tegangan-tegangan di sekitar ujung retak.

Dari persamaan (2.1) dapat diketahui faktor ini pada mode I dengan memberikan \$\theta = 0\$ adalah :

$$K_I = \sigma \sqrt{a} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan \$\sigma\$ adalah tegangan pada tempat jauh dari ujung retak (far field stress). Besarnya \$K_I\$ untuk bentuk geometri yang lain akan berbeda dan diberikan suatu faktor koreksi geometri \$\beta\$:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{a} \dots\dots\dots(2.3)$$

Beberapa contoh faktor geometri untuk suatu geometri tertentu, beban tertentu dan panjang retak tertentu dari persamaan (2.3) untuk spesimen center crack spesimen dalam bentuk :

$$\beta = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{W}} \dots\dots\dots(2.4)$$

2.2.3 Laju Perambatan Retak

Prediksi perambatan retak yang melibatkan beban amplitudo konstan dengan beban sederhana ditujukan untuk menghindari adanya efek-efek interaksi seperti terjadinya percepatan dan perlambatan. Dimana dalam aplikasinya laju perambatan retak lelah untuk beban yang lebih kompleks seperti beban amplitudo bervariasi.

Untuk memprediksi perambatan retak dapat dilakukan pada setiap siklus beban atau setiap sejumlah siklus beban tertentu. Dengan cara yang pertama tentunya akan didapat hasil prediksi yang teliti, karena setiap pertambahan panjang retak akan berpengaruh pada besarnya faktor intensitas tegangan. Makin besar K , retak akan merambat lebih cepat atau dengan kata lain makin panjang retak akan mengakibatkan perambatan retak yang lebih cepat.

Karena perambatan retak merupakan fenomena local di ujung retak, maka cukup logis untuk menghubungkan laju perambatan retak sebagai fungsi dari faktor intensitas tegangan yaitu $da/dN = f(\Delta K)$. Paris menunjukkan hubungan tersebut dalam bentuk fungsi eksponen

$$da/dN = C(\Delta K)^m \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan C dan m adalah parameter material

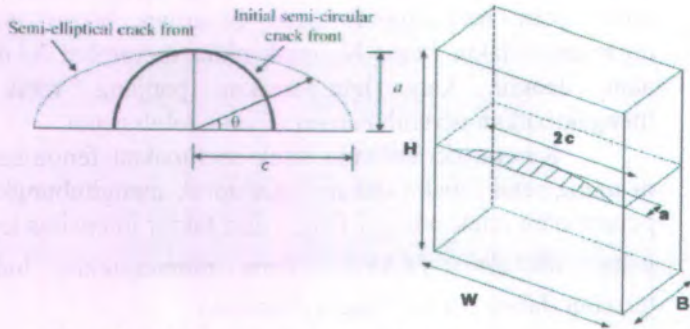
Untuk retak tengah, panjang retak didefinisikan sebagai $2a$ (dan $2c$). Untuk retak pinggir, panjang retak didefinisikan sebagai a (dan c). Sedangkan untuk retak berbentuk elips, semi elips atau seperempat elips mendapat perhatian yang luas dikalangan peneliti.

Untuk surface crack berbentuk semi elips atau retak pojok berbentuk seperempat elips nilai K umumnya diperkirakan berdasar analisa numerik. Sebagai contoh adalah persamaan Newman dan Raju.

$$K = \sigma \cdot F \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{Q}} \dots \dots \dots (2.6)$$

$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana Q adalah parameter bentuk retakan berdasarkan penyelesaian integral elips. F adalah konstan geometri yang ditentukan Newman dan Raju dari finite elemen analisis. Parameter F tergantung pada a/c, a/B, Φ dan lebar pelat.



Gambar 2.4 Spesimen pelat dengan retak semi elips

Untuk mendapatkan intensitas tegangan referensi dari Newman dan Raju pada kasus semi elliptical crack berbentuk setengah elips dengan dimensi retakan $a \leq c$ adalah sebagai berikut:

$$F = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{B} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{B} \right)^4 \right] f_\phi \cdot f_w \cdot g$$

$$M_1 = 1,13 - 0,09 \left(\frac{a}{c} \right)$$

$$M_2 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \frac{a}{c}}$$

$$M_3 = 0,5 - \frac{1,0}{0,65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1,0 - \frac{a}{c} \right)^{24}$$

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

$$g = 1 + \left[0,1 + 0,35 \left(\frac{a}{B} \right)^2 \right] (1 - \sin \phi)^2 \dots \dots \dots (2.8)$$

Sedangkan untuk mendapatkan intensitas tegangan pada kasus corner crack berbentuk seperempat elips dengan dimensi retakan $a \leq c$ adalah sebagai berikut :

$$F = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{B} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{B} \right)^4 \right] f_\phi \cdot f_w \cdot g_1 \cdot g_2$$

$$M_1 = 1,08 - 0,03 \left(\frac{a}{c} \right)$$

$$M_2 = -0,44 + \frac{1,06}{0,3 + \frac{a}{c}}$$

$$M_3 = -0,5 - 0,25 \left(\frac{a}{c} \right) + 1,48 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{15}$$

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

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

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

$$f_w = \left[\sec \left(\frac{\pi \cdot c}{2 \cdot W} \sqrt{\frac{a}{B}} \right)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots(2.9)$$

2.3 Daerah Plastik Pada Ujung Retak

Persamaan (2.11) menunjukkan bahwa tegangan - tegangan lokal dapat bernilai tak terhingga pada elemen dengan r yang mendekati nol. Secara fisik hal ini tak mungkin terjadi, karena material pada ujung retakan akan mengalami deformasi plastik jika tegangan yang bekerja lebih besar daripada tegangan luluhnya. Daerah plastik yang terjadi ini akan mengubah distribusi tegangan di daerah elastik. Pada elemen yang terletak tepat di ujung retak dimana $\theta = 0^\circ$ maka

tegangan elastiknya $\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}}$ akan melebihi kekuatan

luluhnya pada suatu jarak r dari ujung retak, sehingga memotong tegangan elastik pada harga tersebut. Dengan memberikan $\sigma_y = \sigma_{ys}$ pada batas elastik, maka :

$$\sigma_{ys} = \frac{K}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana σ_{ys} = tegangan luluh material
sehingga ukuran daerah plastik menjadi :

$$r_y = \frac{K^2}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{ys}^2} \dots\dots\dots(2.11)$$

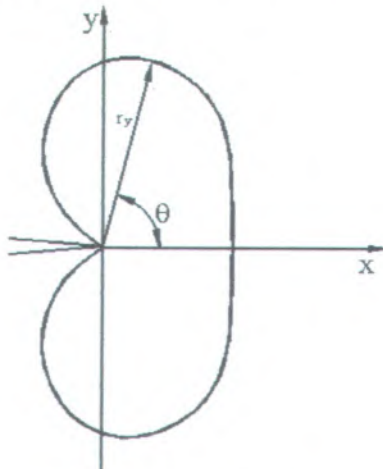
Persamaan (2.11) berlaku untuk kondisi tegangan bidang. Untuk kondisi regangan bidang, maka :

$$r_y = \frac{K^2}{6 \cdot \pi \cdot \sigma_{ys}^2} \dots \dots \dots (2.12)$$

Daerah plastik pada ujung retak dapat pula bervariasi terhadap θ , dengan persamaan :

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

persamaan di atas berlaku untuk kondisi tegangan bidang. Daerah plastis berbentuk seperti kupu-kupu sebagaimana gambar di bawah ini.

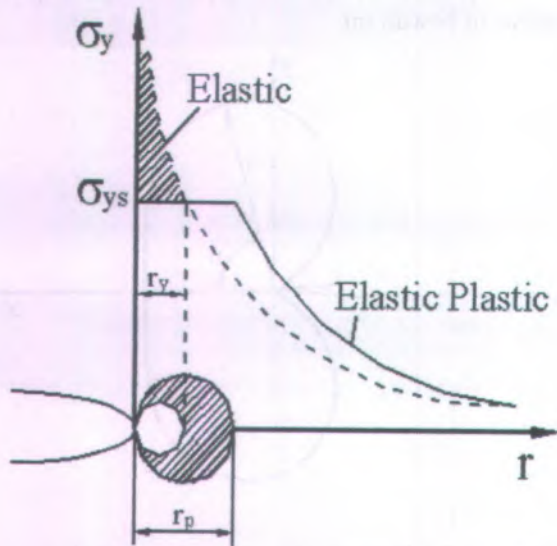


Gambar 2.5 Daerah plastik di ujung retak dengan variasi θ

Pada kondisi tegangan bidang, persamaan (2.11) tidak sepenuhnya benar, karena didasarkan asumsi bahwa ujung retakan yang elastik. Bila terjadi yield, tegangan harus terdistribusi sedemikian rupa sehingga kondisi keseimbangan tercapai. Daerah terarsir pada gambar 2.7 merepresentasikan

gaya yang ada pada material yang elastik tapi tidak bisa melewati titik yield pada material elastik-plastik. Dengan demikian daerah plastik harus lebih besar untuk mengakomodasi gaya tersebut. Irwin memasukkan pengaruh pendistribusian tegangan ini pada suatu faktor koreksi sehingga besarnya daerah plastik adalah dua kali dari estimasi awal, sehingga ukuran daerah plastik menjadi :

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \dots\dots\dots(2.14)$$



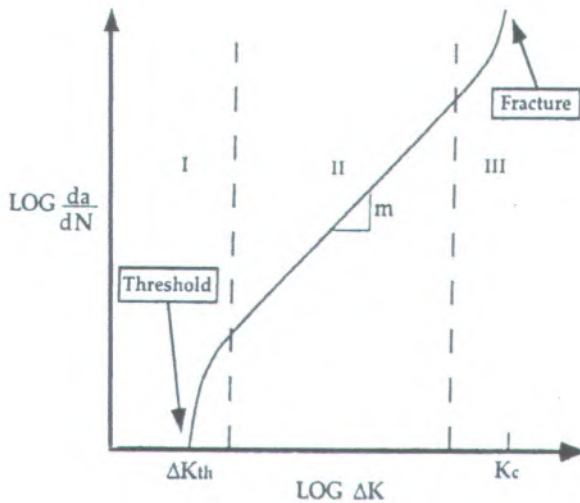
Gambar 2.6 Perkiraan ukuran daerah plastic

Untuk menentukan kondisi pembebanan, apakah regangan bidang atau tegangan bidang, maka dapat dilakukan dengan membandingkan ukuran daerah plastis dengan tebal

dari benda uji. Bila $\frac{r_y}{B} \geq 1$, maka pembebanan dalam kondisi

tegangan bidang. Bila $\frac{r_y}{B} \leq \frac{1}{10}$ maka pembebanan dalam

kondisi regangan bidang. B merupakan tebal benda uji. Daerah plastis pada ujung retak diukur berdasarkan asumsi kondisi tegangan bidang dengan menggunakan persamaan (2.11).



Gambar 2.7 Kurva Laju Perambatan Retak

Umur lelah biasanya dinyatakan sebagai jumlah siklus tegangan yang dicapai sampai spesimen patah. Maka umur total mencakup tahap awal retakan dan penjalaran retakan yang bila telah cukup jauh perambatannya akan menyebabkan spesimen patah menjadi dua. Uji lelah sederhana dilakukan dengan memberikan beban atau tegangan berupa tegangan tarik, tekan atau bending yang berfluktuasi. Parameter tegangan yang diberikan antara lain :

Rasio tegangan

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \dots\dots\dots (2.15)$$

Amplitudo tegangan

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \dots\dots\dots (2.16)$$

Tegangan rata - rata

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \dots\dots\dots (2.17)$$

dimana σ_{maks} = tegangan maksimum

σ_{min} = tegangan minimum

2.4 Metode Elemen Hingga

2.4.1 Konsep Elemen Hingga

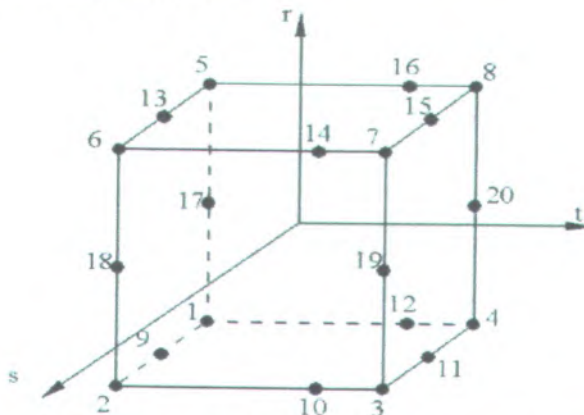
Pada metode elemen hingga, sebuah kontinum dibagi menjadi beberapa elemen-elemen kecil yang berhingga yang memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana, sehingga mengubah suatu masalah yang memiliki derajat kebebasan tak hingga menjadi sejumlah kebebasan yang berhingga. Metode ini merupakan analisa pendekatan terhadap nilai perpindahan dan tegangan pada elemen dengan memasukkan beban-beban yang terjadi pada elemen. Langkah-langkah yang harus dilakukan adalah :

1. Idealisasi obyek dan membaginya menjadi elemen-elemen berhingga yang sederhana.
2. Menentukan titik nodal pada elemen dimana syarat kesetimbangan dan kompatibilitas harus terpenuhi.
3. Membentuk matrik kekakuan elemen dan kontinum berdasarkan bentuk geometri, tipe elemen dan jenis material.
4. Menentukan kondisi batas baik berupa vektor beban (terpusat/traksi), *body force*, *thermal*, maupun *displacement*.

5. Menyelesaikan persamaan kesetimbangan untuk mendapatkan perpindahan semua titik nodal.
6. Mendapatkan nilai tegangan elemen.
7. Interpretasi hasil.

2.4.2 Pemodelan Singularitas Ujung Retak

Kondisi singular di ujung retak dapat diperoleh dengan menggunakan elemen yang fungsi bentuknya melibatkan kondisi singular. Secara sederhana kondisi singular dapat diperoleh dengan menggunakan elemen isoparametrik yang dimodifikasi. Kondisi singular akan terjadi jika determinan dari Jacobian menjadi nol. Elemen singular dibentuk dengan menggeser node tengah dari elemen isoparametrik kuadrat ke posisi seperempat panjang sisi elemen dari node ujung retak. Pada tugas akhir ini, singularitas ujung retak dimodelkan dengan elemen heksahedron isoparametrik 20 node. Untuk mendapatkan model yang singular didapatkan dengan memindahkan node 10, 12, 14 dan 16 ke posisi seperempat panjang setiap sisinya seperti pada gambar 2.10. Elemen ini disebut juga elemen singular quadraliteral quarter point.



Gambar 2.8 Elemen singular heksahedron quarter point 20 node

Shape function pada node 3,10,2 untuk elemen isoparametrik 20 node adalah sebagai berikut :

$$N_3 = \frac{1}{8}(1+s)(1+t)(1-r)(s+t-r-2) \dots\dots\dots(2.18)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1+s)(1-t^2)(1-r) \dots\dots\dots(2.19)$$

$$N_3 = \frac{1}{8}(1+s)(1-t)(1-r)(s-t-r-2) \dots\dots\dots(2.20)$$

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

$$N_3 = \frac{1}{2}(t+t^2) \dots\dots\dots(2.21)$$

$$N_{10} = (1-t^2) \dots\dots\dots(2.22)$$

$$N_2 = \frac{1}{2}(-t+t^2) \dots\dots\dots(2.23)$$

Transformasi y koordinat pada elemen yaitu :

$$y = \sum N_i \cdot y_i$$

$$y = \frac{1}{2}(t)(1+t)y_3 + (1-t^2)y_{10} + \frac{1}{2}(-t)(1-t)y_2 \dots\dots\dots(2.24)$$

Dengan menempatkan sumbu koordinat pada node 3 dan memberikan panjang sisi 3,10,2 sebesar L, maka $y_3 = 0$,

$y_{10} = \frac{L}{4}$ dan $y_2 = L$, sehingga :

$$y = (1-t^2)\frac{L}{4} + \frac{1}{2}(-t)(1-t)L \dots\dots\dots(2.25)$$

atau ditampilkan dalam t yaitu :

$$t = 1 + 2\sqrt{\frac{y}{L}} \dots\dots\dots(2.26)$$

Dari salah satu komponen Jacobian yaitu $\partial y/\partial t$ pada persamaan (2.25) dan memasukkan harga t pada persamaan (2.26) akan diperoleh :

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{L}{2}(t-1)\sqrt{L \cdot y} \dots\dots\dots(2.27)$$

Perpindahan v pada sisi 3,10,2 yaitu :

$$v = \sum N_1 v_1 = \frac{1}{2}(t)(1+t)v_3 + (1-t^2)y_{10} + \frac{1}{2}(-t)(1-t)v_2 \dots\dots\dots(2.28)$$

substitusi t pada persamaan (2.23) didapatkan :

$$v = \sum_{i=1}^3 N_i v_i = \frac{1}{2} \left(1 + 2\sqrt{\frac{y}{L}} \right) \left(2 + 2\sqrt{\frac{y}{L}} \right) v_3 + \left(-4\sqrt{\frac{y}{L}} - 4\frac{y}{L} \right) v_{10} + \frac{1}{2} \left(-1 - 2\sqrt{\frac{y}{L}} \right) \left(-2\sqrt{\frac{y}{L}} \right) v_2 \dots\dots\dots(2.29)$$

Regangan pada arah y adalah :

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{\sqrt{yL}} + \frac{4}{L} \right) v_3 + \left(-\frac{2}{\sqrt{yL}} - \frac{4}{L} \right) v_{10} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{yL}} + \frac{4}{L} \right) v_2 \dots\dots\dots(2.30)$$

Tampak bahwa komponen ε_y menunjukkan singularitas $\frac{1}{\sqrt{r}}$

Dengan mengganti y dengan jarak radial dari ujung retak r , maka perpindahan arah v sepanjang sisi 3,10,2 akan menjadi :

$$v = v_3 + (3 \cdot v_3 - 4 \cdot v_{10} + v_2) \sqrt{\frac{r}{L}} + (2 \cdot v_3 - 4 \cdot v_{10} + 2 \cdot v_2) \frac{r}{L} \dots\dots\dots(2.31)$$

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

Dari hasil uji konvergensi tersebut dapat kita simpulkan bahwa deret tersebut (2.25) dan konvergen pada $x = 1$ pada persamaan (2.26) akan diperoleh :

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \sqrt{2n+1} \dots (2.27)$$

Perhatikan bahwa deret (2.27) adalah

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \sqrt{2n+1} = 1 - \sqrt{3} + \sqrt{5} - \sqrt{7} + \dots (2.28)$$

Untuk menentukan konvergensi deret tersebut, kita gunakan uji perbandingan (2.21) dengan :

$$u_n = \sqrt{2n+1} \quad \text{dan} \quad v_n = \frac{1}{\sqrt{2n+1}}$$

..... (2.29)

Rekan pada deret (2.29) adalah

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2n+1}} = 1 + \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{5}} + \dots$$

..... (2.30)

Tampak bahwa komponen u_n merupakan suatu deret yang

konvergen ke suatu nilai yang positif dan bukan nol. Oleh karena itu, deret tersebut akan konvergen ke suatu nilai yang positif.

$$u_n = \sqrt{2n+1} \quad \text{dan} \quad v_n = \frac{1}{\sqrt{2n+1}}$$

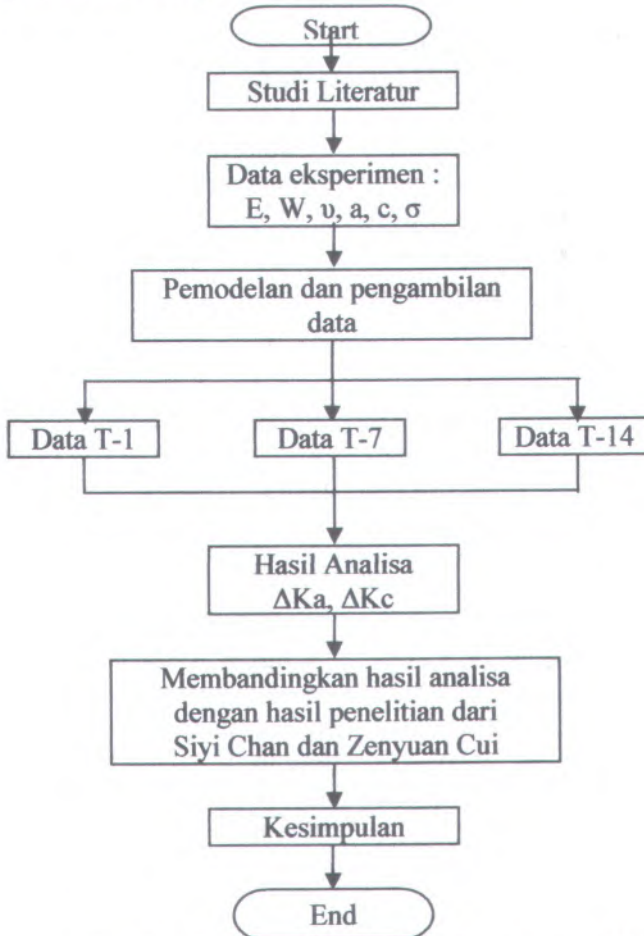
..... (2.31)

Hal yang harus diperhatikan pada saat ini adalah untuk memastikan bahwa

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Pelaksanaan Tugas Akhir

Pada evaluasi Pelaksanaan tugas akhir ini dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.1 Diagram alir pelaksanaan tugas akhir.

3.1.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengetahui tentang teori retakan, baik dari buku referensi ataupun dari handbook. Selain itu studi literature juga dilakukan dengan mencari makalah dan jurnal penelitian tentang retakan baik dengan metode pelaksanaan eksperimen maupun simulasi computer.

3.1.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data yang diambil dari data eksperimen dalam penelitian yang dilakukan Siyi Chen dan Zhenyuan Cui, yaitu :

1. Material properti bahan aluminium LY12R :

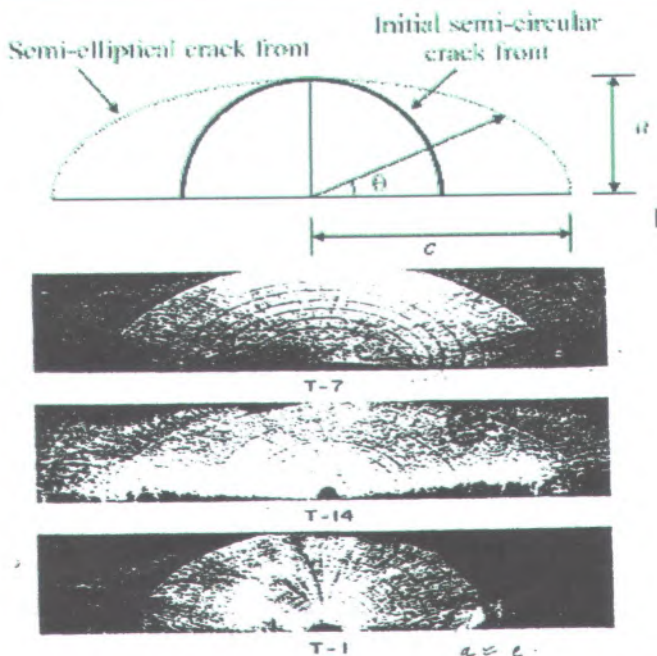
- Modulus elastisitas (E) = 70.000 MPa
- Angka Poisson (ν) = 0,35
- Tegangan Yield (σ_y) = 170 Mpa
- Tegangan Ultimat (σ_u) = 282 Mpa

2. Pembebanan

Pembebanan yang dipakai adalah beban tegangan tarik. Hal ini disebabkan karena tujuan dari penelitian ini untuk mencari faktor intensitas tegangan untuk mode I (opening mode), dengan pembebanan sebesar 122,4 Mpa

3. Data retak

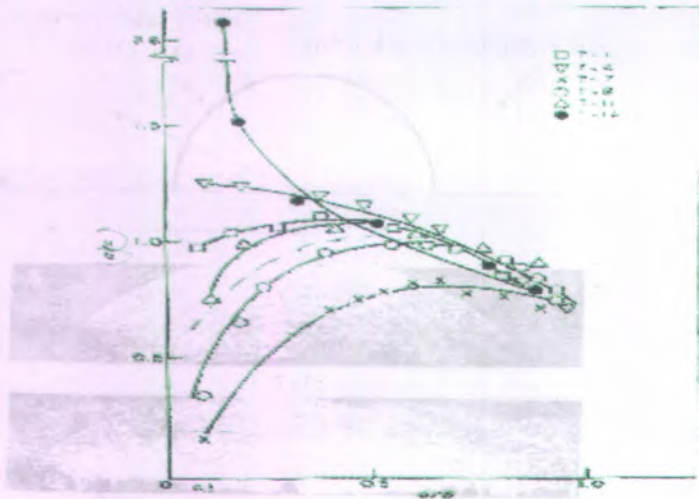
Data retak yang digunakan untuk kasus retak permukaan sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Ziyi Chen dan Zhenyuan Cui (1998) yang meneliti tentang perilaku perambatan retak permukaan dengan beban tarik siklis yang digunakan dalam pemodelan untuk $\frac{1}{4}$ bagian dari spesimen. Perbedaan spesimen dipengaruhi oleh variasi dari awal retakan, seperti pada gambar 3.2 .



Gambar 3.2 Variasi retakan, spesimen T-1, T-7, dan T-14

Dari gambar 3.2 perbedaan variasi retakan dilakukan pada tiga spesimen yaitu spesimen T-1, T-7, dan T-14, merupakan retakan awal arah tebal 'a' sama dengan retakan arah lebar, pada spesimen T-7 merupakan retakan awal arah tebal 'a' lebih kecil daripada arah lebar, dan spesimen T-14 retakan awal arah tebal lebih besar daripada arah.

Sedangkan data yang digunakan dalam penelitian merupakan data yang diperoleh dengan cara mengplotkan grafik eksperimen yang telah dilakukan oleh Ziyi Chen dan Zhenyuan Cui pada gambar grafik 3.3



Gambar 3.3 Grafik Pertumbuhan retak permukaan

Dari grafik diatas akan didapatkan nilai pertumbuhan awal retak a_0/B dan a_0/C_0 , Untuk mempermudah pencarian nilai tersebut maka digunakan software DigXY, sehingga akan muncul nilai $X = a_0/B$ dan $Y = a_0/C_0$. Sedangkan nilai $\frac{da}{dN}$ dan $\frac{dc}{dN}$ diperoleh dengan cara yang sama seperti yang ditunjukkan diatas. Adapun grafik laju perambatan retak pada specimen T-1, T-7, dan T-14 terdapa dalam lampiran. Data tersebut dapat ditampilkan dalam tabel berikut :

Tabel 3.1 Data spesimen T-1

a	c	a/B	a/c	c/W	da	dc	Nx1000	da/dn	dc/dn
2.77	2.74	0.1385	1.010949	0.0548	-		-	-	-
5.34	4.86	0.267	1.098765	0.0972	2.57	2.12	58.285	4.41E-05	3.64E-05
7.41	6.54	0.3705	1.133028	0.1308	2.07	1.68	105	1.97E-05	0.000016
8.11	7.89	0.4055	1.027883	0.1578	0.7	1.35	124	5.65E-06	1.09E-05
9.63	9.27	0.4815	1.038835	0.1854	1.52	1.38	127	1.2E-05	1.09E-05
10.25	9.92	0.5125	1.033266	0.1984	0.62	0.65	135	4.59E-06	4.81E-06
12.36	12.29	0.618	1.005696	0.2458	2.11	2.37	138	1.53E-05	1.72E-05
14.9	14.83	0.745	1.00472	0.2966	2.54	2.54	141	1.8E-05	1.8E-05
15.61	15.89	0.7805	0.982379	0.3178	0.71	1.06	143	4.97E-06	7.41E-06
17.56	18.32	0.878	0.958515	0.3664	1.95	2.43	146	1.34E-05	1.66E-05
18.1	19.1	0.905	0.947644	0.382	0.54	0.78	148	3.65E-06	5.27E-06

Tabel 3.2 Data spesimen T-7

a	c	a/B	a/c	c/W	da	dc	Nx1000	da/dn	dc/dn
1.84	9.63	0.092	0.19107	0.1926	-	-	-	-	
5.21	10.72	0.2605	0.486007	0.2144	3.37	1.09	30.673	0.00011	3.55E-05
7.49	11.33	0.3745	0.661077	0.2266	2.28	0.61	35.864	6.36E-05	1.7E-05
9.81	12.11	0.4905	0.810074	0.2422	2.32	0.78	38.432	6.04E-05	2.03E-05
11.89	13.4	0.5945	0.887313	0.268	2.08	1.29	41.346	5.03E-05	3.12E-05
13.23	15.34	0.6615	0.862451	0.3068	1.34	1.94	42.312	3.17E-05	4.58E-05
15.09	17.63	0.7545	0.855927	0.3526	1.86	2.29	43.445	4.28E-05	5.27E-05
16.57	20.38	0.8285	0.813052	0.4076	1.48	2.75	44.235	3.35E-05	6.22E-05

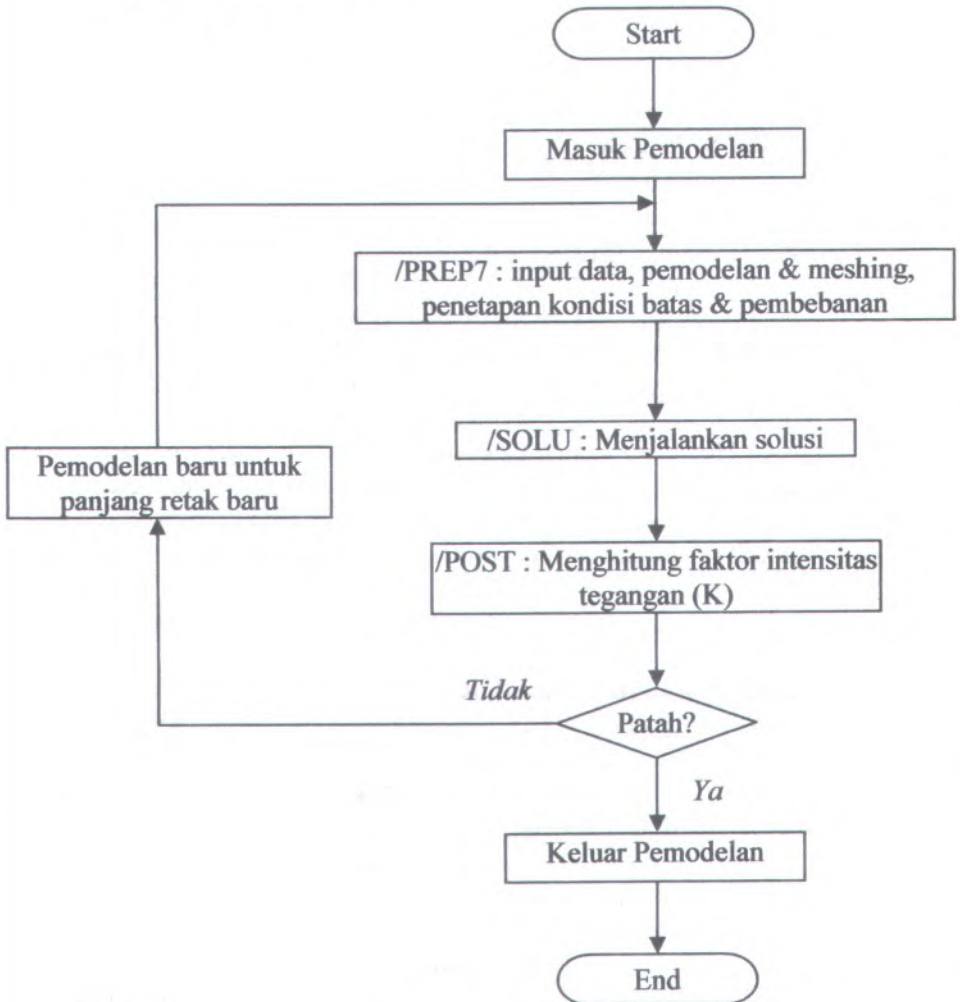
Tabel 3.3 Data spesimen T-14

	a	c	a/B	a/c	c/W	da	dc	Nx1000	da/dn	dc/dn
	3.43	2.15	0.1715	1.595349	0.043	-	-	-	-	-
	4.41	3.24	0.2205	1.361111	0.0648	0.98	1.09	10.1069	9.7E-05	0.000108
	5.48	4.32	0.274	1.268519	0.0864	1.07	1.08	11.8307	9.04E-05	9.13E-05
	6.25	5.14	0.3125	1.215953	0.1028	0.77	0.82	15.1921	5.07E-05	5.4E-05
	10.18	9.26	0.509	1.099352	0.1852	3.93	4.12	16.959	0.000232	0.000243
	11.59	10.73	0.5795	1.080149	0.2146	1.41	1.47	18.1656	7.76E-05	8.09E-05
	12.84	11.62	0.642	1.104991	0.2324	1.25	0.89	20.7944	6.01E-05	4.28E-05
	13.91	13.17	0.6955	1.056188	0.2634	1.07	1.55	21.3547	5.01E-05	7.26E-05
	15.43	16.54	0.7715	0.93289	0.3308	1.52	3.37	21.6563	7.02E-05	0.000156
	18.13	16.69	0.9065	1.086279	0.3338	2.7	0.15	21.7425	0.000124	6.9E-06

Waktu	posisi	posisi	posisi	posisi	posisi	posisi	posisi	posisi	posisi

3.2 Sketsa Pemodelan

Pada proses pemodelan dapat digambarkan sketsa sebagai berikut :



Gambar 3.4 Diagram alir pmodelan

3.2.1 Pemodelan

Pemodelan untuk specimen retak sudut dilakukan dengan setengah bagian struktur karena adanya kesimetrisan model. Baik geometri maupun pembebanan. jenis, sehingga elemen singular dibentuk dengan menggeser node tengah dari elemen isoparametrik ke posisi seperempat panjang sisi elemen dari node ujung retak. Sehingga untuk memodelkan daerah retak digunakan elemen isoparametrik heksahedron 20 node. Sedangkan untuk memodelkan daerah bukan di ujung retak digunakan elemen isoparametrik 8 node.

3.2.2 Tahap Preprocessor

Langkah pertama yang dilakukan dalam pemodelan adalah dengan membuat model geometri retak pojok yang dilakukan pada tahap Preprocessor. Pada tahap ini terlebih dahulu menentukan bahwa analisa yang akan dilakukan adalah analisa statik dengan memasukkan perintah ANTYPE, STATIC. Lalu menentukan tiga tipe elemen. Elemen 1 adalah elemen solid 45, elemen 2 adalah elemen solid 45 dan elemen 3 adalah elemen solid 95. Pembuatan tiga tipe elemen tersebut untuk memudahkan pengalihan menjadi elemen yang singular pada daerah retak. Selanjutnya adalah memasukkan properti material berupa modulus elastisitas dan Poisson's Ratio.

3.2.3 Pembuatan Daerah Retak

Untuk memodelkan daerah retak, maka dibuat node yang digunakan untuk menghasilkan 80 ring elemen terfokus sepanjang crack front yang berbentuk elips. Elips elemen yang terbentuk dibuat dengan sistem koordinat cylindrical, sehingga cukup memasukkan nilai sumbu mayor rasio antara panjang mayor dan minor, maka pemodelan akan membuat elips crack front secara otomatis. Selanjutnya dibuat node untuk daerah yang bukan retak. Tahap selanjutnya adalah proses modifikasi pada elemen untuk mendapatkan singularitas pada ujung retak dengan bantuan program makro FRACT.MAC. Program

makro ini akan memodifikasi elemen yang telah kita tentukan menjadi suatu elemen yang mampu memodelkan singularitas. Dalam hal ini makro akan menjalankan rutin, yang akan membuat node-node tambahan pada sisi yang akan menampilkan singularitas dengan meletakkan node-node tersebut pada seperempat panjang sisi elemen yang singular. Karena adanya kesimetrian model, pemodelan untuk spesimen retak pojok dilakukan dengan model setengah bagian struktur, baik geometri maupun pembebanan. Retak dimodelkan dengan cara tidak memberikan kondisi batas pada node yang berada di ujung retak, sedangkan node yang terletak pada luasan yang tidak terjadi keretakan dikekang arah v . Sementara pada ujung yang berlawanan, diberi beban tarik statis merata yang konstan pada seluruh luasannya sebesar $\Delta\sigma$.

3.2.4 Tahap Solution

Setelah model elemen hingga terbentuk, selanjutnya masuk tahap Solution dengan memasukkan perintah /SOLU dan SOLVE. Pada tahap ini pemodelan dilakukan perhitungan mencari solusi atas persamaan-persamaan yang dibentuk oleh metode elemen hingga dalam menanggapi permasalahan yang diberikan.

3.2.5 Tahap General Post Processor

Selanjutnya faktor intensitas tegangan dapat dihitung dengan masuk ketahap General Processor dengan memasukkan perintah /POST1. Dalam menghitung faktor intensitas tegangan, pemodelan menggunakan perpindahan 3 node di muka retak untuk analisa separuh model dengan memasukkan perintah PATH dan PPATH. Langkah selanjutnya dengan memasukkan perintah KCALC untuk mendapatkan rentang faktor intensitas tegangan.

3.3 Analisa Data

Analisa data dilakukan terhadap data yang diperoleh dari eksperimen dengan pemodelan. Untuk mengetahui pengaruh faktor intensitas tegangan pada spesimen yang memiliki variasi awal retakan arah tebal (a) dan arah lebar (c), maka ditampilkan :

1. Grafik ΔK_a dan ΔK_c terhadap a,c
2. Grafik $\frac{da}{dN}$ dan $\frac{dc}{dN}$ terhadap ΔK pada pemodelan
3. Grafik laju perambatan retak arah tebal $\frac{da}{dN}$ terhadap ΔK_a pada spesimen T-1, T-7, dan T-14
4. Grafik laju perambatan retak arah lebar $\frac{dc}{dN}$ terhadap ΔK_c pada spesimen T-1, T-7, dan T-14

3.4 Perbandingan Hasil Analisa Dengan Hasil Eksperimen

Untuk membandingkan hasil analisa pemodelan dengan hasil eksperimen yang dilakukan Siyi Chen dan Zhenyuan Cui maka ditampilkan grafik ΔK_a terhadap arah tebal 'a' dan ΔK_c terhadap arah lebar 'c' untuk masing-masing spesimen. Data- data eksperimen diambil dari artikel yang ditulis oleh Siyi Chen dan Zhenyuan Cui kemudian dianalisa dalam pemodelan yang dapat memperhitungkan kisaran harga ΔK .

3.5 Kesimpulan

Dari analisa spesimen berdasarkan variasi panjang retakan arah tebal 'a' dan lebar 'c' pada spesimen T-1, T-7 dan T-14 dapat dijadikan kesimpulan dan suatu landasan bahwa analisa dari hasil pemodelan dapat dijadikan acuan spesimen pada eksperimen.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Faktor Intensitas Tegangan

Setelah proses perhitungan dalam pemodelan dilakukan harga faktor intensitas tegangan untuk setiap spesimen dapat diketahui, dengan menggunakan metode langsung maupun menggunakan metode elemen hingga. Hasil yang didapat kemudian dibandingkan dengan eksperimen. Data eksperimen yang digunakan sebagai acuan adalah data eksperimen dari Ziyi Chen dan Zhenyuan Cui yang meneliti tentang perilaku perambatan retak, dimana dalam penelitian tersebut divariasikan terhadap awal permukaan retak (surface crack threshold). Salah satu dimensi yang divariasikan pada awal permukaan retak arah ketebalan (a) dan arah lebar (c) pada specimen T-1, T-7, dan T-14.

Dari data dimensi spesimen, properti material dan tegangan yang diberikan maka dibuat pemodelan elemen hingga sesuai prosedur yang telah dijelaskan sebelumnya. Kemudian dengan perintah KCALC, yang menggunakan prosedur ekstrapolasi perpindahan untuk evaluasi faktor intensitas tegangan.

Sebagai contoh, berikut analisa data yang diambil dari spesimen T-1 pada saat jumlah siklus pembebanan $N=532704$ dengan dimensi retakan $a=7,41$ mm dan $c=6,54$ mm.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{70.000MPa}{2(1+0.35)} = 27481,2MPa$$

$$\kappa = \frac{(3-\nu)}{(1+\nu)} = \frac{(3-0,35)}{(1+0.35)} = 2,0075$$

Perpindahan node pada path yang dihasilkan pemodelan untuk menghitung rentang fktor intensitas tegangan adalah :

Node 532704 yang berjarak $r = 0,025$ mm dari ujung retak,

$$v_{532704} = 0,000860266 \text{ mm}$$

Lalu dilakukan ekstrapolasi terhadap perpindahan dengan

fungsi $\frac{v}{r}$. Sehingga pada $r = 0,025$ mm maka

$$\frac{v}{r} = 0,0344106\sqrt{\text{mm}}$$

Dari data-data tersebut lalu dicari persamaan : garis $f\left(\frac{v}{\sqrt{r}}\right)$

terhadap r . Dengan linearisasi $\frac{v}{r} = A + Br$. Nilai B

ditentukan sebagai $\frac{v_2/r_2 - v_1/r_1}{r_2 - r_1}$, sehingga

$$B = \frac{0,00483 - 0,0054408}{0,1 - 0,025} = 3,4906667 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-0,5}$$

Dengan memasukan $r = 0,025$ mm, maka

$$A = 0,01389 - (2,6977 \cdot 10^{-3})(0,025) = 0,00483\sqrt{\text{mm}}$$

Sehingga persamaan garisnya

$$\frac{v}{r} = (2,6977 \cdot 10^{-3})r + 0,01342$$

untuk mendapatkan K_1

$$K_1 = \sqrt{2\pi} \frac{2 \cdot (274812) \cdot (0,1342)}{1 + 2,0075} = 39197 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} = 6,76347 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

4.2 Laju Perambatan Retak

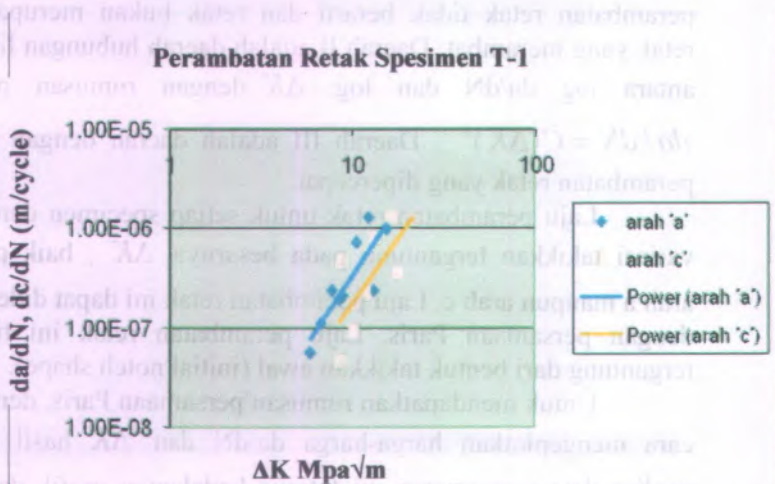
Grafik da/dN terhadap ΔK dapat dibagi dalam tiga daerah. Daerah I dibatasi oleh ΔK_{th} . Dibawah harga ini laju perambatan retak tidak berarti dan retak bukan merupakan retak yang merambat. Daerah II adalah daerah hubungan linier antara $\log da/dN$ dan $\log \Delta K$ dengan rumusan paris $da/dN = C(\Delta K)^m$. Daerah III adalah daerah dengan laju perambatan retak yang dipercepat.

Laju perambatan retak untuk setiap specimen dengan variasi takikkan tergantung pada besarnya ΔK , baik pada arah a maupun arah c. Laju perambatan retak ini dapat didekati dengan persamaan Paris. Laju perambatan retak ini tidak tergantung dari bentuk takikkan awal (initial notch shape).

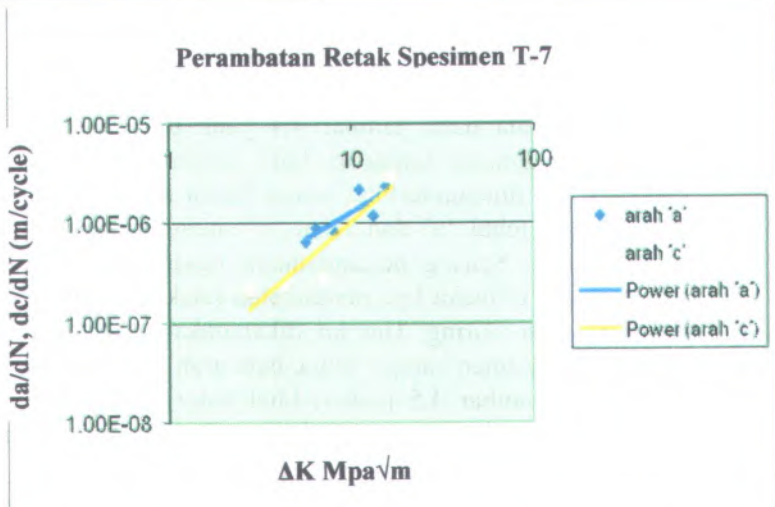
Untuk mendapatkan rumusan persamaan Paris, dengan cara mengplotkan harga-harga da/dN dan ΔK hasil dari analisa data pengamatan uji fatigue kedalam grafik da/dN terhadap ΔK dengan scala log, kemudian dilakukan regresi linier pada daerah II. Linierisasi dari persamaan perambatan retak akan mendekati persamaan $y = ax + b$, dimana $y = \log(da/dN)$, $x = \log(\Delta K)$, $a = m$ dan $b = \log(c)$. Harga m ini merupakan slope dari kurva da/dN terhadap ΔK , sehingga bila harga m semakin besar maka laju perambatan retak juga akan makin besar untuk suatu harga ΔK yang sama.

Kecepatan perambatan retak dapat terlihat lebih jelas dari grafik perambatan retak. Dengan menggunakan data kecepatan perambatan retak arah tebal da/dN dan kecepatan perambatan retak arah lebar dc/dN yang didapatkan dari hasil eksperimen kemudian diplotkan terhadap rentang faktor

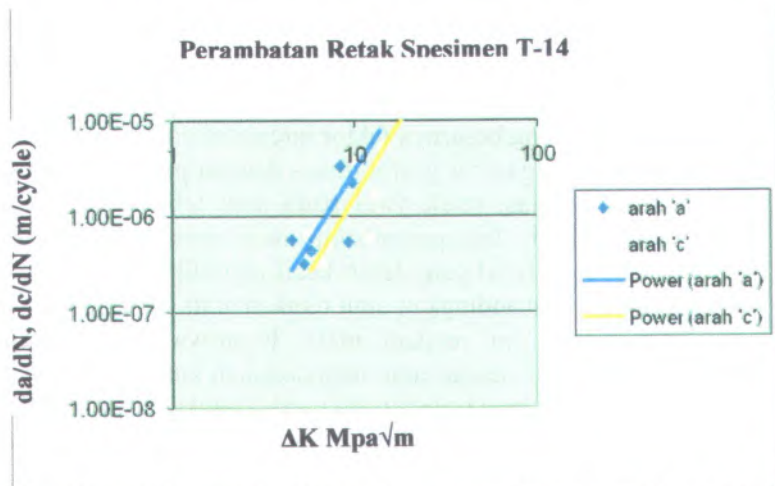
intensitas tegangan ΔK_a dan ΔK_c yang didapatkan dari pemodelan elemen hingga, ditampilkan pada grafik berikut :



Gambar 4.1 grafik kecepatan perambatan retak pada pemodelan spesimen T-1



Gambar 4.2 grafik kecepatan perambatan retak pada pemodelan spesimen T-7



Gambar 4.3 grafik kecepatan perambatan retak pada pemodelan spesimen T-14

Pada gambar 4.4, 4.5 dan 4.6 merupakan grafik analisa dari pemodelan dengan menggunakan metode elemen hingga. Dimana pada gambar 4.4 yang menunjukkan faktor intensitas tegangan terhadap laju perambatan retak pada spesimen T-1 dimana terlihat bahwa faktor intensitas tegangan dengan arah tebal 'a' dan lebar 'c' memiliki besaran yang hampir sama. Seiring bertambahnya besar faktor intensitas arah 'a' dan 'c' maka laju perambatan retaknya akan semakin besar berjalan seiring. Hal ini dikarenakan panjang retakan awal pada spesimen hampir sama, baik arah tebal maupun arah lebar. Dari gambar 4.5 juga terlihat bahwa faktor intensitas pada awal retakan arah tebal memiliki faktor intensitas tegangan yang lebih besar dari pada faktor intensitas pada awal retakan arah lebar 'c'. Seiring perubahan besarnya intensitas tegangan terhadap laju perambatan retak terlihat bahwa harga faktor intensitas tegangan arah tebal akan sejajar dengan arah faktor intensitas tegangan arah lebar. Dan sebaliknya yang terjadi pada gambar 4.6 dimana terlihat bahwa faktor intensitas arah lebar memiliki harga yang lebih besar daripada arah tebal dan seiring semakin besarnya faktor intensitas tegangan terhadap laju perambatan retak maka akan berjalan seiring besarnya faktor intensitas tegangannya.

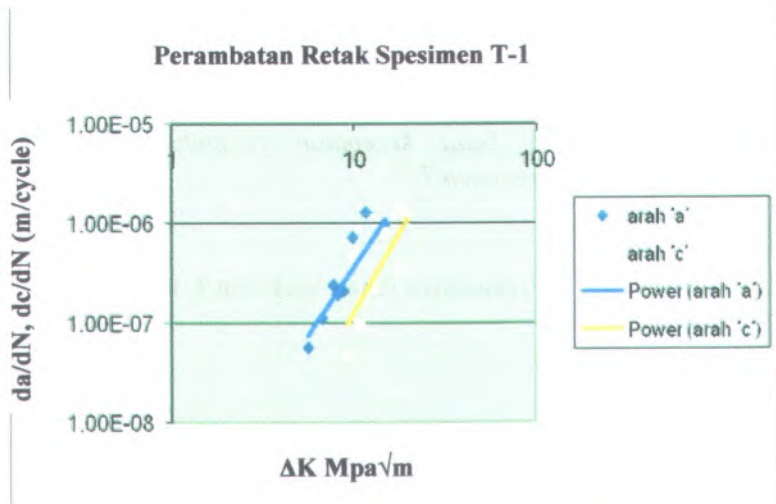
Dari gambar grafik diatas dengan perbedaan spesimen terhadap variasi retak awal pada arah tebal dan arah lebar mempengaruhi laju perambatan awal retakan dimana variasi retakan arah tebal yang lebih kecil memiliki faktor intensitas yang besar dibandingkan arah retakan arah lebar, tetapi seiring perambatan laju retakan maka besarnya faktor intensitas tegangan akan sejajar atau menyamakan antara arah tebal dan lebar. Hal ini juga terjadi pada variasi retakan awal arah lebar.

Laju perambatan retak pada grafik juga dapat ditampilkan dalam persamaan Paris. Persamaan Paris dari ketiga spesimen dalam pemodelan adalah sebagai berikut :

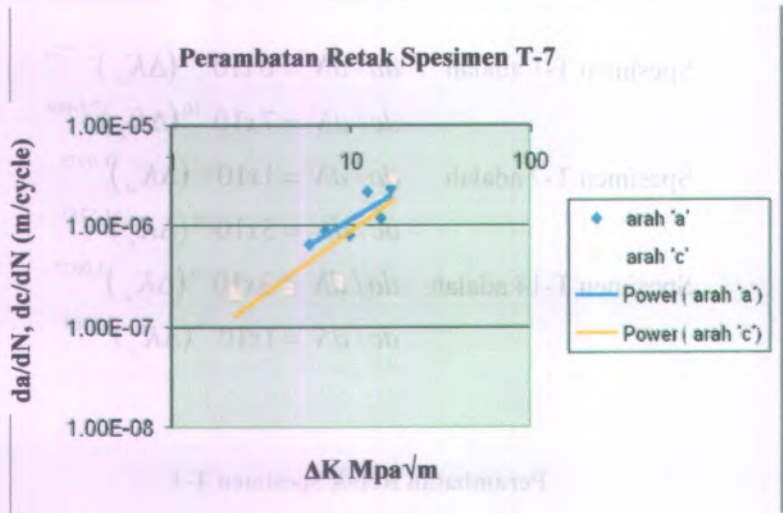
Spesimen T-1 adalah $da/dN = 6 \times 10^{-10} (\Delta K_a)^{2,7276}$
 $dc/dN = 7 \times 10^{-10} (\Delta K_c)^{2,6489}$

Spesimen T-7 adalah $da/dN = 1 \times 10^{-7} (\Delta K_a)^{1,0975}$
 $dc/dN = 3 \times 10^{-8} (\Delta K_c)^{1,5753}$

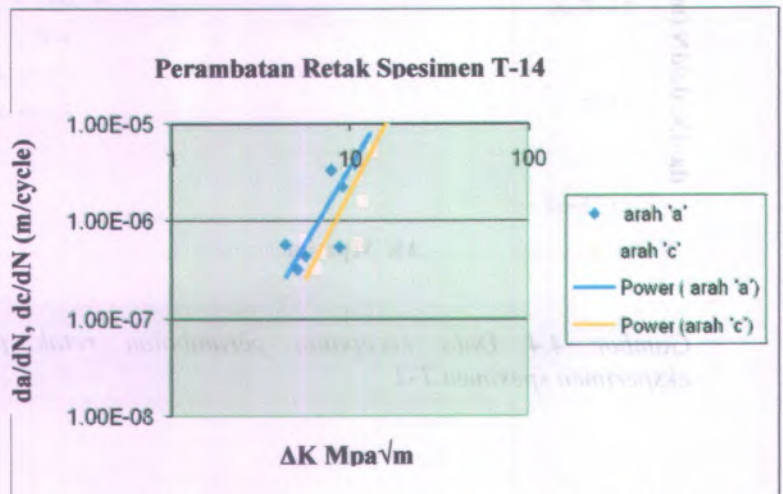
Spesimen T-14 adalah $da/dN = 3 \times 10^{-9} (\Delta K_a)^{3,0022}$
 $dc/dN = 1 \times 10^{-9} (\Delta K_c)^{3,1464}$



Gambar 4.4 Data kecepatan perambatan retak pada eksperimen spesimen T-1



Gambar 4.5 Data kecepatan perambatan retak pada eksperimen spesimen T-7



Gambar 4.6 Data kecepatan perambatan retak pada eksperimen spesimen T-14

Gambar 4.7, 4.8, dan 4.9 merupakan grafik dari data eksperimen yang dilakukan oleh Siyi Chen dan Zhenyuan Cui. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa perambatan retak terjadi paling cepat pada spesimen T-14, kemudian pada spesimen T-7, dan spesimen T-1. Hal tersebut berlaku pada perambatan retak arah tebal maupun perambatan retak arah lebar. Penjelasan faktor intensitas retakan terhadap laju perambatan retak perbandingannya tidak jauh dari penjelasan faktor intensitas retakan terhadap laju perambatan retak pada pemodelan, hal ini terlihat bahwa besar persamaan Paris yang ditampilkan dari analisa pemodelan hamper mendekati dari persamaan Paris pada eksperimen yang dilakukan oleh Siyi Chen dan Zhenyuan Cui. Persamaan Paris pada eksperimen yang dilakukan oleh Siyi Chen dan Zhenyuan Cui dapat ditampilkan sebagai berikut :

Spesimen T-1 adalah $da / dN = 6 \times 10^{-10} (\Delta K_a)^{2,7795}$

$$dc / dN = 7 \times 10^{-10} (\Delta K_c)^{3,2317}$$

Spesimen T-7 adalah $da / dN = 1 \times 10^{-7} (\Delta K_a)^{1,0707}$

$$dc / dN = 4 \times 10^{-8} (\Delta K_c)^{1,2995}$$

Spesimen T-14 adalah $da / dN = 3 \times 10^{-9} (\Delta K_a)^{3,0933}$

$$dc / dN = 6 \times 10^{-10} (\Delta K_c)^{3,5079}$$

4.3 Perbandingan Hasil Simulasi Pemodelan dengan Eksperimen Berdasarkan Faktor Intensitas Tegangan

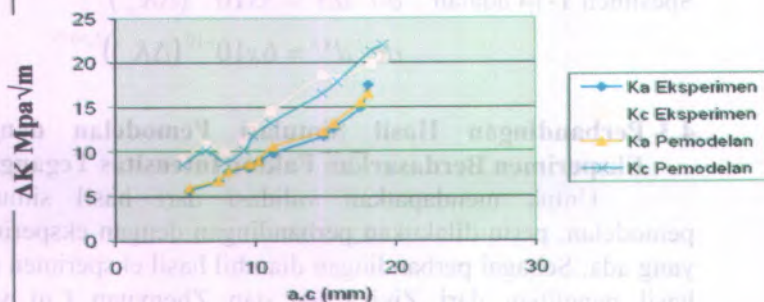
Untuk mendapatkan validasi dari hasil simulasi pemodelan, perlu dilakukan perbandingan dengan eksperimen yang ada. Sebagai perbandingan diambil hasil eksperimen dari hasil penelitian dari Ziyi Chen dan Zhenyuan Cui yang meneliti tentang perilaku perambatan retak permukaan dengan beban tarik siklis. Perbandingan hasil dari simulasi pemodelan dan hasil eksperimen ini, ditampilkan dalam bentuk grafik

ΔK_a , ΔK_c terhadap panjang retak arah tebal (a) dan arah lebar (c) seperti ditampilkan dalam tabel dan gambar berikut

Tabel 4.1 Perbandingan ΔK dari hasil eksperimen dan ΔK hasil simulasi pemodelan pada specimen T-1

a	c	Ka Eksperimen	Ka Pemodelan	Error (%)	Kc Eksperimen	Kc Pemodelan	Error (%)
2.1	2.1	-	-	-	-	-	-
2.77	2.74	-	-	-	-	-	-
5.34	4.86	5.665779717	5.901443	4.159414851	9.277404974	8.594614	7.359719403
7.41	6.54	6.761258753	6.763479	0.032837776	10.85563618	10.118832	6.787296182
8.11	7.89	7.796476774	7.777622	0.241837109	10.02105755	8.85501	11.63597299
9.63	9.27	8.243601122	8.551115	3.730334273	11.27262946	10.19803	9.532819861
10.25	9.92	8.894545575	8.954938	0.678982692	12.7198744	11.81341	7.12636282
11.32	11.15	9.853068633	10.53133	6.883757662	14.49985831	13.22148	8.81648829
14.9	14.83	11.76638859	12.26236	4.215154091	18.43596734	16.51594	10.41457334
15.61	15.89	12.66188358	13.15571	3.900102357	18.00718744	17.78591	1.228828437
17.56	18.32	14.94991053	15.45785	3.397608761	19.72975592	21.24892	7.699862513
18.1	19.1	17.45752929	16.48938	5.545740602	20.43477069	21.89435	7.142626321

ΔK Terhadap Panjang Retak (a,c) Spesimen T-1

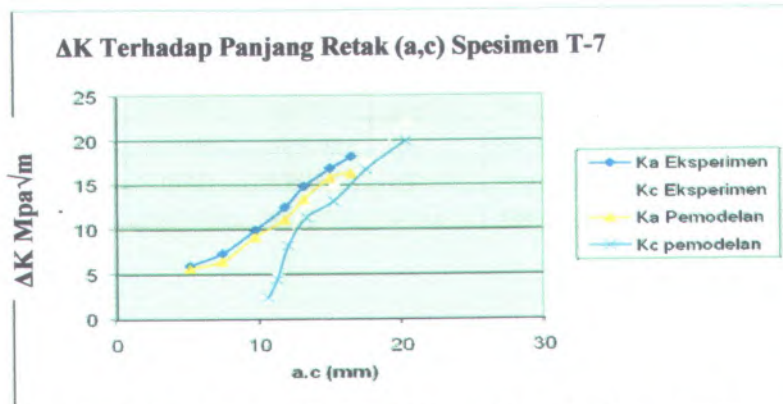


Gambar 4.7 Perbandingan Grafik ΔK_a , ΔK_c terhadap panjang retak arah a dan c hasil eksperimen dan hasil simulasi pemodelan

Pada spesimen T-1 terlihat nilai dari ΔK_a dan ΔK_c pada hasil eksperimen maupun pemodelan saling berhimpit dan naik secara beriringan sesuai dengan perambatan arah tebal (a) dan arah lebar (c). hal ini dapat digambarkan bahwa retak yang berada pada ujung retakan memiliki faktor intensitas tegangan yang hampir sama.

Tabel 4.2 Perbandingan ΔK dari hasil eksperimen dan ΔK hasil simulasi pemodelan pada specimen T-7

a	c	Ka Eksperimen	Ka Pemodelan	Error (%)	Kc Eksperimen	Kc Pemodelan	Error (%)
1.84	9.63	-	-	-	-	-	-
5.21	10.72	5.88345248	5.640642	4.127006733	2.297795699	2.384955	3.793170169
7.49	11.33	7.284943144	6.415084	11.94050697	4.540511493	4.33991	4.418037336
9.81	12.11	9.911998907	9.141688	7.771499112	8.581107808	8.124928	5.316094591
11.89	13.4	12.48213321	11.083326	11.20647558	12.79748473	11.29163	11.76680232
13.23	15.34	14.81795204	13.357	9.85933843	14.91778053	13.11586	12.0790122
15.09	17.63	16.84479836	15.75338	6.479260462	17.38579288	16.70758	3.900960311
16.57	20.38	18.1604905	16.28605	10.32153014	21.9467746	19.8942	9.352511416

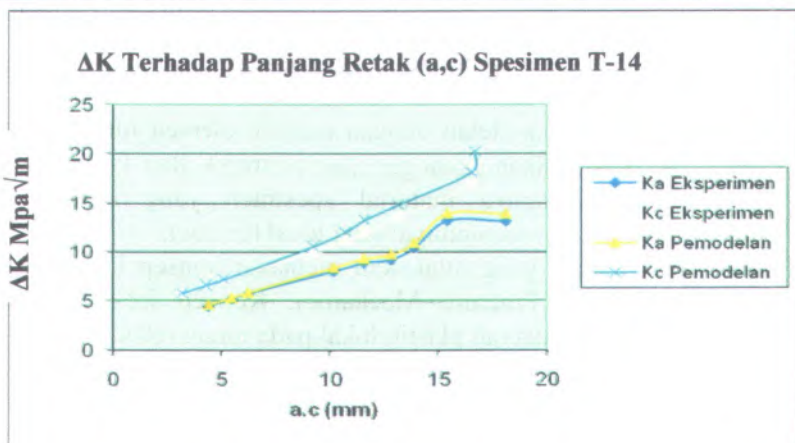


Gambar 4.8 Perbandingan Grafik ΔK_a , ΔK_c terhadap panjang retak arah a dan c hasil eksperimen dan hasil simulasi pemodelan

Pada spesimen T-1 terlihat nilai dari ΔK_a dan ΔK_c pada hasil eksperimen maupun pemodelan saling berhimpit dan grafik menunjukkan trend dimana pada awal retakan terlihat bahwa nilai ΔK_a dan ΔK_c memiliki kisaran harga lebih besar ΔK_a daripada ΔK_c yang dipengaruhi variasi arah tebal (a) lebih kecil daripada arah (c) tetapi semakin besar variasi perambatan, maka besaran harga ΔK_a dan ΔK_c hampir seiring atau mendekati.

Tabel 4.3 Perbandingan ΔK dari hasil eksperimen dan ΔK hasil simulasi pemodelan pada specimen T-14

a	c	Ka Eksperimen	Ka Pemodelan	Error (%)	Kc Eksperimen	Kc Pemodelan	Error (%)
3.3	1.17	-	-	-	-	-	-
3.43	2.15	-	-	-	-	-	-
4.41	3.24	4.402293963	4.545142	3.244854574	5.713822775	5.762935	0.859533572
5.48	4.32	5.166481666	5.291439	2.418615648	6.521361131	6.567102	0.701400644
6.25	5.14	5.727987601	5.831556	1.808111438	7.125440646	7.157499	0.449913986
10.18	9.26	7.997181928	8.368652	4.645012147	9.915176344	10.53576	6.258927068
11.59	10.73	8.863665098	9.289507	4.804354602	11.13564189	11.99262	7.695812405
12.84	11.62	9.176023343	9.739183	6.137295383	11.86952855	13.20504	11.25159643
13.91	13.17	10.41251048	10.901	4.691371221	13.48647548	14.76973	9.515121441
15.43	16.54	13.15174644	13.90991	5.764736748	16.809719	18.09582	7.650936937
18.13	16.69	13.09578376	13.86532	5.876213704	18.62775081	20.13454	8.088948609



Gambar 4.9 Perbandingan Grafik ΔK_a , ΔK_c terhadap panjang retak arah a dan c hasil eksperimen dan hasil simulasi pemodelan

Pada spesimen T-1 terlihat nilai dari ΔK_a dan ΔK_c pada hasil eksperimen maupun pemodelan saling berhimpit, grafik menunjukkan trend dimana pada awal retakan terlihat bahwa nilai ΔK_a dan ΔK_c memiliki kisaran harga lebih besar ΔK_c daripada ΔK_a yang dipengaruhi variasi arah tebal (a) lebih besar daripada arah (c).

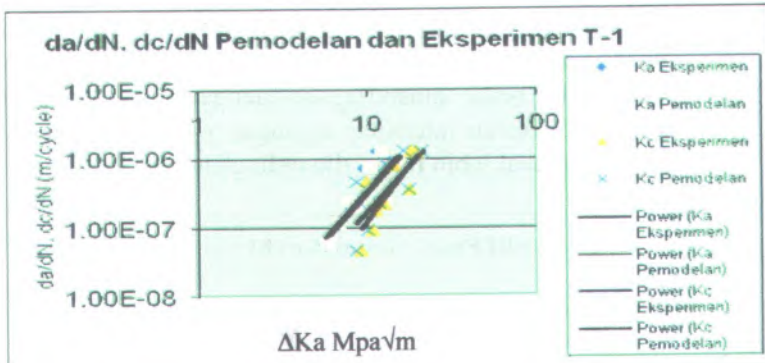
Dari gambar 4.6, 4.7, dan 4.8 terlihat bahwa nilai rentang faktor intensitas tegangan pada spesimen T1, T-7, dan T-14 yang didapatkan dari pemodelan dengan menggunakan metode elemen hingga mendekati hasil yang didapatkan dari eksperimen. Dimana ΔK_a , ΔK_c yang didapat dalam analisa pemodelan mendekati hasil dari ΔK_a , ΔK_c dari eksperimen, hal tersebut ditunjukkan bahwa error terbesar 12,08% yang terjadi pada spesimen T-7

4.4- Penyebab terjadinya perbedaan hasil antar pemodelan dengan hasil eksperimen secara umum antara lain:

1. Pada pemodelan dengan metode elemen hingga material diasumsikan homogen dan isotropik dan kontinyu. Pada kenyataannya material spesimen yang dipakai tidak mungkin mempunyai sifat ideal tersebut.
2. Analisa yang dilakukan memakai konsep LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanic). Konsep ini mengabaikan adanya daerah plastik lokal pada ujung retak.
3. Penerapan beban pada pemodelan adalah beban statis yang merata. Pada kondisi eksperimen beban yang diberikan merupakan beban dinamis.
4. Pada pemodelan bentuk spesimen disederhanakan menjadi bentuk pelat seperempat lingkaran yang diconstrain terhadap sumbu $x=0$ dan $y=0$, sementara bentuk spesimen pada eksperimen adalah berbentuk setengah lingkaran yang diconstrain terhadap sumbu $y=0$.
5. Pemberian beban pada spesimen pada pemodelan selalu sejajar dengan sumbu tegak lurus terhadap permukaan yang diberi beban, sedangkan pada kondisi eksperimen dimungkinkan terjadi pergeseran posisi spesimen.

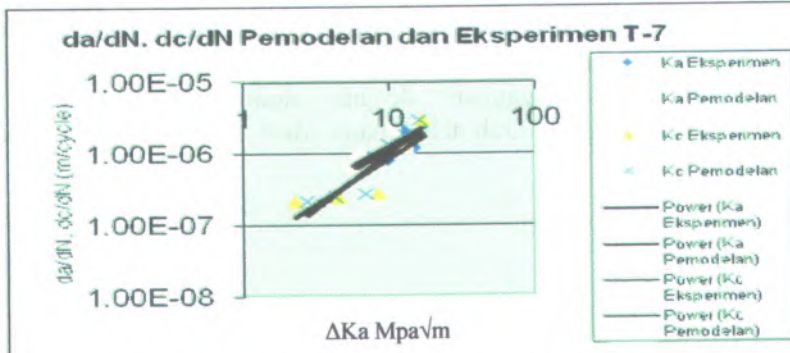
4.4 Faktor Intensitas Tegangan Terhadap Laju Perambatan Retak

Data laju perambatan retak pada rentang faktor Intensitas tegangan ditunjukkan pada gambar 4.10 untuk laju perambatan retak pemodelan dan eksperimen, gambar 4.11 untuk laju perambatan retak pada spesimen T-7 dan gambar untuk laju perambatan retak pada spesimen T-14



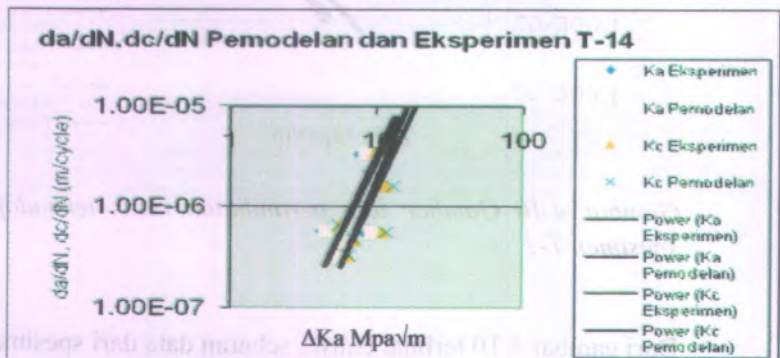
Gambar 4.10 Gambar laju perambatan retak terhadap ΔK spesimen T-1

Dari gambar 4.10 terlihat bahwa sebaran data dari spesimen T-1 mempunyai laju perambatan retak antara laju perambatan retak arah tebal seiring dengan arah perambatan retak arah lebar baik pada pemodelan maupun eksperimen.



Gambar 4.11 Gambar laju perambatan retak terhadap ΔK spesimen T-7

Dari gambar 4.11 terlihat bahwa sebaran data dari spesime T-7 mempunyai laju awal perambatan retak arah tebal yang lebih besar dibandingkan dengan arah lebar dengan demikian besaran intensitas tegangan yang terjadi pada awal retak arah tebal lebih tinggi dibandingkan arah lebar.



Gambar 4.12 Gambar laju perambatan retak terhadap ΔK spesimen T-14

Dari gambar 4.12 bahwa laju awal perambatan retak arah tebal lebih besar dari arah lebar, hal ini mempengaruhi besarnya intensitas tegangan dengan arah lebar lebih tinggi dibandingkan arah tebal pada awal terjadi laju perambatan retak.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari pembahasan dan perbandingan rentang factor intensitas tegangan ΔK didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Perbandingan hasil analisa metode elemen hingga dengan pemodelan pada kasus retak permukaan (semi elliptic surface crack) memberikan hasil yang relative sama dengan eksperimen yang dilakukan oleh Siyi Chen dan Zhenyuan Cui error yang terjadi pada specimen T-7 sebesar 12,08 %. Sehingga dapat disimpulkan bahwa prosedur yang dipakai dalam analisa dengan pemodelan cukup valid untuk dipakai sebagai suatu metode mengevaluasi faktor intensitas tegangan.
2. Variasi awal retakan mempengaruhi besarnya faktor intensitas tegangan, yang dihasilkan retakan semakin kecil baik pada arah tebal maupun arah lebar akan menyebabkan faktor intensitas tegangan menjadi semakin besar.
3. Pada kondisi faktor intensitas tegangan yang relatif sama terdapat perbedaan harga antara laju perambatan retak arah tebal da/dN dengan laju perambatan retak arah lebar dc/dN .
4. Berdasarkan faktor intensitas tegangan (ΔK_a) dan (ΔK_c) maka diperoleh hasil laju perambatan retak tertinggi pada spesimen T-14 sementara laju perambatan retak terendah terdapat pada specimen T-7.

5.2 Saran

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

1. Perlu dikembangkan meshing secara otomatis pada tiap-tiap perambatan retak, sehingga dapat mendekati kondisi eksperimen
2. Perlu dipertimbangkan pengaruh munculnya daerah plastis di ujung retak dan pengaruh lingkungan untuk mendapatkan hasil analisa yang mendekati kondisi di lapangan.

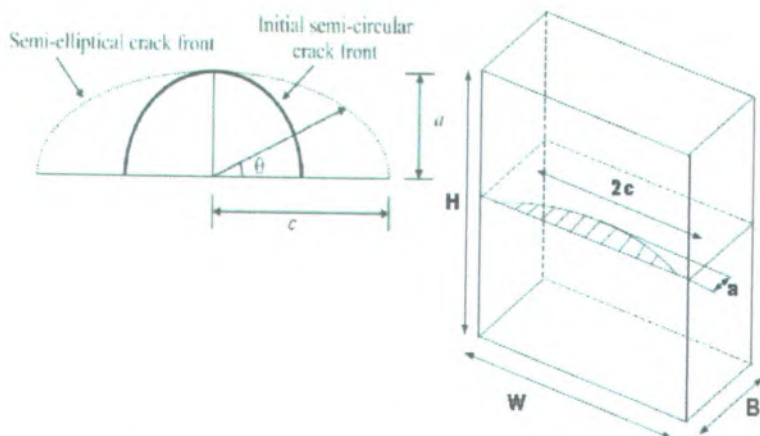
DAFTAR PUSTAKA

1. A.C. Neves, R.A. Adey, J.M.W. Baynham, S.M. Niku, 2006. **Automatic 3D Crack Growth using BEASY, Computational Mechanics BEASY**. Ashurst Lodge.
2. Ashurst, <URL:http://www.beasy.com>.
3. Anderson, T.L, 2000. **Fracture Mechanic : Fundamental and Application, 2nd edition**,. Boca Raton, FL : CRC Press.
4. Broek, David. 1986. **Elementary Engineering Fracture Mechanic**. Dordrecht : Martinus Nijhoff Publishers.
5. Dally, James W. 1991. **Experimental Stress Analysis**. Singapore : McGraw-Hill.
6. Dowling, Norman.W. 1999. **Mechanical Behavior of Materials**. New Jersey : Prentice Hall International.
7. Farahman, B. 1997. **Fatigue and Fracture Mechanics of High Risk Part**. New York : Chapman & Hall.
8. Gosz. M, Moran. B. 1998. **Stress Intensity Factor Along Three Dimensional Elliptical Crack Fronts**.
9. S, Saxena. 2004. **Master Curve Approach for Through-thickness Crack Length in Plates with Central Surface Notch**.
10. Hendrowati, W. 2003. **Studi Eksperimental Perilaku Perambatan Corner Crack Pada Spesimen Uji Aluminium 2024 T3**. Thesis S-2 ITS-Jurusan Teknik Mesin.
11. Hertzberg, Richard W. 1989. **Deformation and Fracture Mechanic of Engineering Materials, 3rd edition**. New York : John Wiley & Sons.
12. Ingraffea, A.R, Manu, C 2005. "Stress Intensity Factor Computation in Three Dimension With Quarter Point Element". **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, vol 10, pp 1427-1445.

13. Muhayat, N. 2003. **Faktor Intensitas Tegangan Pada Part Through Crack Untuk Kasus Surface dan Corner Crack dengan Metode Elemen Hingga.** Thesis S-2 ITS Jurusan Teknik Mesin.
14. Pramono, Agus Sigit. 2001. **Analisa faktor Intensitas Tegangan Modus I Pada Compact Tension Specimen 2D dan 3D Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga.**
15. Laporan Penelitian, Jurusan Teknik Mesin ITS. Sih, G.C. 1990. **Mechanic of Fracture Initiation and Propagation.**
16. Dadiyanto, Cahya. 2007. **Analisa faktor intensitas tegangan pada retak pojok dengan variasi ketebalan specimen menggunakan metode elemen hingga.** Tugas Akhir ITS jurusan Teknik Mesin.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Perumusan Newman dan Raju untuk retak permukaan setengah elips dan retak pojok



Setengah elips dengan dimensi retakan $a \leq c$ adalah sebagai berikut:

$$F = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{B} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{B} \right)^4 \right] f_\phi \cdot f_w \cdot g$$

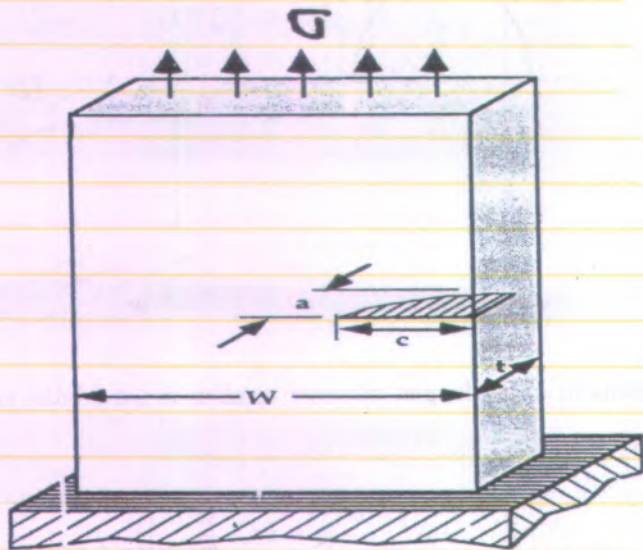
$$M_1 = 1,13 - 0,09 \left(\frac{a}{c} \right)$$

$$M_2 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + a/c}$$

$$M_3 = 0,5 - \frac{1,0}{0,65 + a/c} + 14 \left(1,0 - \frac{a}{c} \right)^{24}$$

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

$$g = 1 + \left[0,1 + 0,35 \left(\frac{a}{B} \right)^2 \right] (1 - \sin \phi)^2$$



Berbentuk seperempat elips dengan dimensi retakan $a \leq c$ adalah sebagai berikut :

$$F = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{B} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{B} \right)^4 \right] f_{\phi} \cdot f_w \cdot g_1 \cdot g_2$$

$$M_1 = 1,08 - 0,03 \left(\frac{a}{c} \right)$$

$$M_2 = -0,44 + \frac{1,06}{0,3 + \frac{a}{c}}$$

$$M_3 = -0,5 - 0,25\left(\frac{a}{c}\right) + 1,48\left(1 - \frac{a}{c}\right)^{15}$$

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

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

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

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

Lampiran 2: Listing pemodelan dengan menggunakan software

```
/PREP7
SMRT,OFF
/COM,*FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN PADA
RETAK POJOK *
```

```
ANTYPE, STATIC !Analisa Statik
ET,1,SOLID45 !Tipe Elemen Solid 45
```

ET,2,SOLID45 !Tipe Elemen Solid 45
ET,3,SOLID95 !Tipe elemen Solid 95
MP,EX,1,73.1E3 !Modulus Elastisitas
MP,NUXY,1,.33 !Poisson's Rasio
CSYS,1 !Membuat node-node struktur
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,1615,2
N,1675,2,1
FILL,1615,1675,2,1635,20
N,14,-2,0,0
N,74,-2,1,0
FILL,14,74,2,34,20
N,13,-1.5,0,0
N,73,-1.5,1,0
FILL,13,73,2,33,20
N,12,1.3,0,0
N,72,1.3,1,0
FILL,12,72,2,32,20
N,2615,2,0,20
N,2675,2,1,20
FILL,2615,2675,2,2635,20
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,-18.42,0,20
N,3675,-18.42,1,20
N,1193,-17.47,0,0
N,2993,-18.42,0,0
N,1133,-17.47,1,0
N,2933,-18.42,1,0

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,2993,2,2993,1,198,0.933225 !Membuat elips untuk
memodelkan bentuk retak
NGEN,11,200,1,177,,9
CSYS,0
NGEN,2,10000,71,2071,200,,5.07612046749,0,1
NGEN,2,10000,72,2072,200,,5,0,1
NGEN,2,10000,73,2073,200,,5,0,1
NGEN,2,10000,74,2074,200,,5,0,1
NGEN,2,10000,91,2091,200,,5,0,1
NGEN,2,10000,111,2111,200,,5.07612046749,0,1
NGEN,2,10000,1675,3675,200,,5,0,1
NGEN,2,10000,1133,2933,200,,5,0,1
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,2
NGEN,6,100000,ALL,, 15.916
NSEL,ALL



E,2,22,1,1,202,222,201,201 !Membuat mesh pada daerah retak

EGEN,8,20,-1
EGEN,10,200,1,8
E,2,3,23,22,202,203,223,222 !Membuat mesh pada daerah
bukan retak
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 !Memodifikasi elemen daerah retak dari elemen tipe 1 menjadi elemen tipe 2
*REPEAT,80,1
NUMMRG,NODE !Menggabungkan node-node yang berada pada koordinat yang sama
NSEL,S,NODE,,1,2001,200 !Memodifikasi elemen daerah retak menjadi elemen yang
CM,CRACKTIP,NODE
/NERR,0
FRACT,2 !Menggunakan macro untuk mengkonversi elemen tipe 2 menjadi quadrilateral
/OUTPUT
OUTPR,,ALL

NSEL,S,LOC,Y,0 !Simetri kondisi batas kecuali pada daerah retak
NSEL,R,NODE,,1,2001,200
NSEL,A,NODE,,2,2002,200
NSEL,A,NODE,,3,2003,200

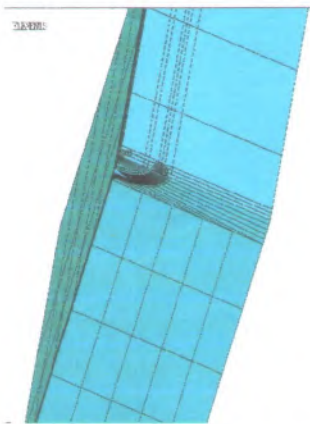
```
NSEL,A,NODE,,4,2004,200
NSEL,A,NODE,,5,2005,200
NSEL,A,NODE,,6,2006,200
NSEL,A,NODE,,7,2007,200
NSEL,A,NODE,,8,2008,200
NSEL,A,NODE,,9,2009,200
NSEL,A,NODE,,10,2010,200
NSEL,A,NODE,,11,2011,200
NSEL,A,NODE,,12,2012,200
NSEL,A,NODE,,1615,3615,200
NSEL,A,NODE,,102615,502615,100000
NSEL,A,NODE,,102415,502415,100000
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
```

```
NSEL,S,LOC,Y,26 !Memberikan beban tarik pada struktur
SF,ALL,PRES,-122.4
NSEL,ALL
ESEL,ALL
FINISH
/OUTPUT,SCRATCH
/SOLU
SOLVE
FINISH
/OUTPUT
/POST1
C*** DETERMINE KI **
CS,2993,1,2993,1,198,1
PATH,KI0,3,,80 !Menghitung K pada retak arah lebar (c)
PPATH,1,1
PPATH,2,532704
PPATH,3,162
```

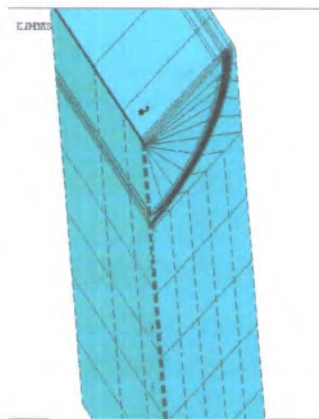
KCALC,1,,1
*GET,KI0,KCALC,,K,1

PATH,KI95,3,,80 !Menghitung K pada retak arah tebal (a)
PPATH,1,2001
PPATH,2,532994
PPATH,3,2162
KCALC,1,,1
*GET,KI95,KCALC,,K,1

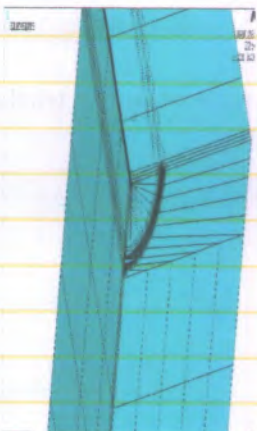
Lampiran 3 : Gambar Pemodelan Kondisi Awal Retak dan Retak Akan Patah



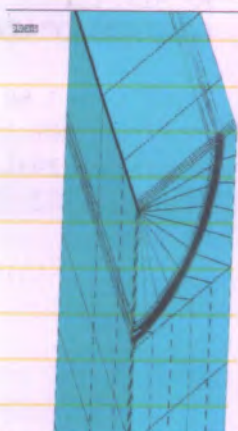
Spesimen T-1 awal retak



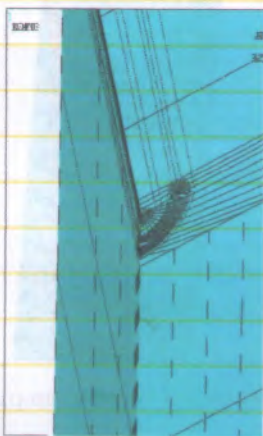
Spesimen T-1 retak akan patah



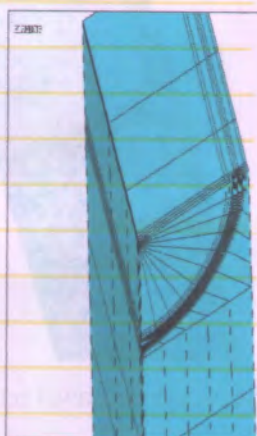
Spesimen T-7 awal retak



Spesimen T-7 retak akan patah



Spesimen T-14 awal retak



Spesimen T-14 retak akan patah