

**ANALISIS PENGARUH VARIASI DIAMETER LUBANG DAN TEBAL
SPESIMEN TERHADAP FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN UJUNG RETAK
PADA PROSES *STOPPING-HOLE CRACK REPAIR METHOD***

SKRIPSI

KONSENTRASI KONSTRUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

DIAN ANDRA LUKITA

NIM. 0610623021-62

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2012**

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS PENGARUH VARIASI DIAMETER LUBANG DAN TEBAL
SPESIMEN TERHADAP FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN UJUNG RETAK
PADA PROSES *STOPPING-HOLE CRACK REPAIR METHOD***

SKRIPSI

KONSENTRASI KONSTRUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

DIAN ANDRA LUKITA

NIM. 0610623021-62

Telah diperiksa dan Disetujui oleh :

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Moch. Agus Choiron. ST., MT.

NIP.19720817 200003 1 001

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Yang disebut metode *stop-hole* adalah perbaikan teknik darurat yang telah dilakukan sejak lama untuk memperpanjang usia kelelahan retak komponen struktural. Terutama komponen yang tidak dapat diganti dengan cepat saat retak ditemukan, atau pada kondisi ketika komponen yang retak tersebut berukuran besar, komponen yang tidak tersedia penggantinya. Maka cara ini yang digunakan oleh banyak tim *maintenance*, karena relatif murah, sederhana dan cepat untuk menerapkan.

Selain itu, pada kondisi lapangan yang terpencil, praktis tidak ada pilihan lain. Dalam bentuk yang paling sederhana, metode ini terdiri dari pengeboran lubang di sekitar, atau berpusat di ujung retak, untuk mengubah *crack* ke takik. Perhentian retak dengan cara ini dapat meningkatkan usia struktur yang mengalami kelelahan retak dibandingkan dengan jika tidak diperbaiki.

Namun, pada saat terjadi sebuah kasus, ukuran dan posisi dari *stopping-hole* sepenuhnya tergantung pada pengalaman kru, dan keterampilan. Karena itu kadang-kadang *stopping-hole* bekerja sangat baik, menghasilkan kenaikan usia pakai yang signifikan dan efektif memperpanjang usia komponen yang mengalami keretakan, sehingga dapat menunda waktu penggantian. Namun dalam kemungkinan lain, hasilnya bisa mengecewakan, atau bahkan berbahaya. Oleh karena itu, dengan perhitungan sederhana sebelum dilakukan perbaikan dapat memprediksi hasil dari metode perbaikan ini.

Beberapa parameter dapat mempengaruhi kenaikan umur komponen retak yang disebabkan oleh *stopping-hole*. Di antaranya, jari-jari, posisi dan ukuran dari retak; geometri dan *mechanical properties* dari komponen; jenis dan besarnya beban; dan tegangan sisa di sekitar posisi *stopping-hole* tersebut, semua hal tersebut bisa mempengaruhi efektivitas perbaikan. Tujuan langkah ini adalah untuk suatu kasus tertentu diperlukan metode yang kompleks untuk dapat diterapkan, seperti efek dari ukuran diameter *stopping-hole*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat disimpulkan suatu permasalahan yaitu:

- Bagaimanakah hubungan variasi *hole diameter* terhadap besar distribusi tegangan pada proses *stop-hole crack repair method* ?

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan tidak meluas dan tetap terfokus, maka perlu dilakukan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Bahan plat dianggap isotropik dan memiliki struktur yang homogen.
2. Tidak memperhitungkan faktor lingkungan seperti Temperature dan Korosi.
3. Bahan plat yang digunakan adalah *mild steel* (baja lunak) komersial.
4. Ketebalan plat yang dipakai adalah 5 mm.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah:

- Mengetahui Pengaruh variasi *hole diameter* terhadap distribusi tegangan yang terjadi *stoping hole repair method*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Memberikan pemahaman lebih jauh mengenai distribusi tegangan sisa pada proses *stoping hole repair method*.
2. Dapat memberikan suatu masukan yang bermanfaat tentang distribusi tegangan sisa pada proses *stoping hole repair method* yang diaplikasikan dalam penghambatan perambatan retak dalam kehidupan sehari-hari.
3. Sebagai bahan acuan untuk penelitian selanjutnya.

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH VARIASI DIAMETER LUBANG DAN TEBAL
SPESIMEN TERHADAP FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN UJUNG RETAK
PADA PROSES *STOPPING-HOLE CRACK REPAIR METHOD***

SKRIPSI

KONSENTRASI KONSTRUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

DIAN ANDRA LUKITA
NIM. 0610623021-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 02 Februari 2012

Skripsi I

Skripsi II

Prof. Dr. Ir. Pratikto, MMT
NIP. 19461110 198103 1 001

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

Komprehensif

Dr. Ir. Achmad As'Ad Sonief, MT.
NIP. 19591128 198710 1 001

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.
NIP. 19720903 199702 1 001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **Analisis Pengaruh Variasi Diameter Lubang dan Tebal Spesimen Terhadap Faktor Intensitas Tegangan Ujung Retak pada Proses *Stopping-hole Crack Repair Method*** ini dengan baik. Tidak lupa shalawat dan salam kami haturkan kepada Rasulullah, Nabi Muhammad SAW.

Penulis menyadari bahwa selama penulisan dan penyelesaian skripsi ini telah dibantu banyak pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penyelesaian skripsi ini:

- Bapak Dr. Eng. Moch. Agus Choiron. ST., MT. selaku dosen pembimbing yang banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, masukan, dan arahan yang membangun bagi penulis.
- Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST. MT., selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Bapak Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST. M.Eng., selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Saran dan kritik yang bersifat membangun penulis harapkan dari pembaca dan semua pihak. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi para pembacanya. Amin.

Malang, Januari 2012

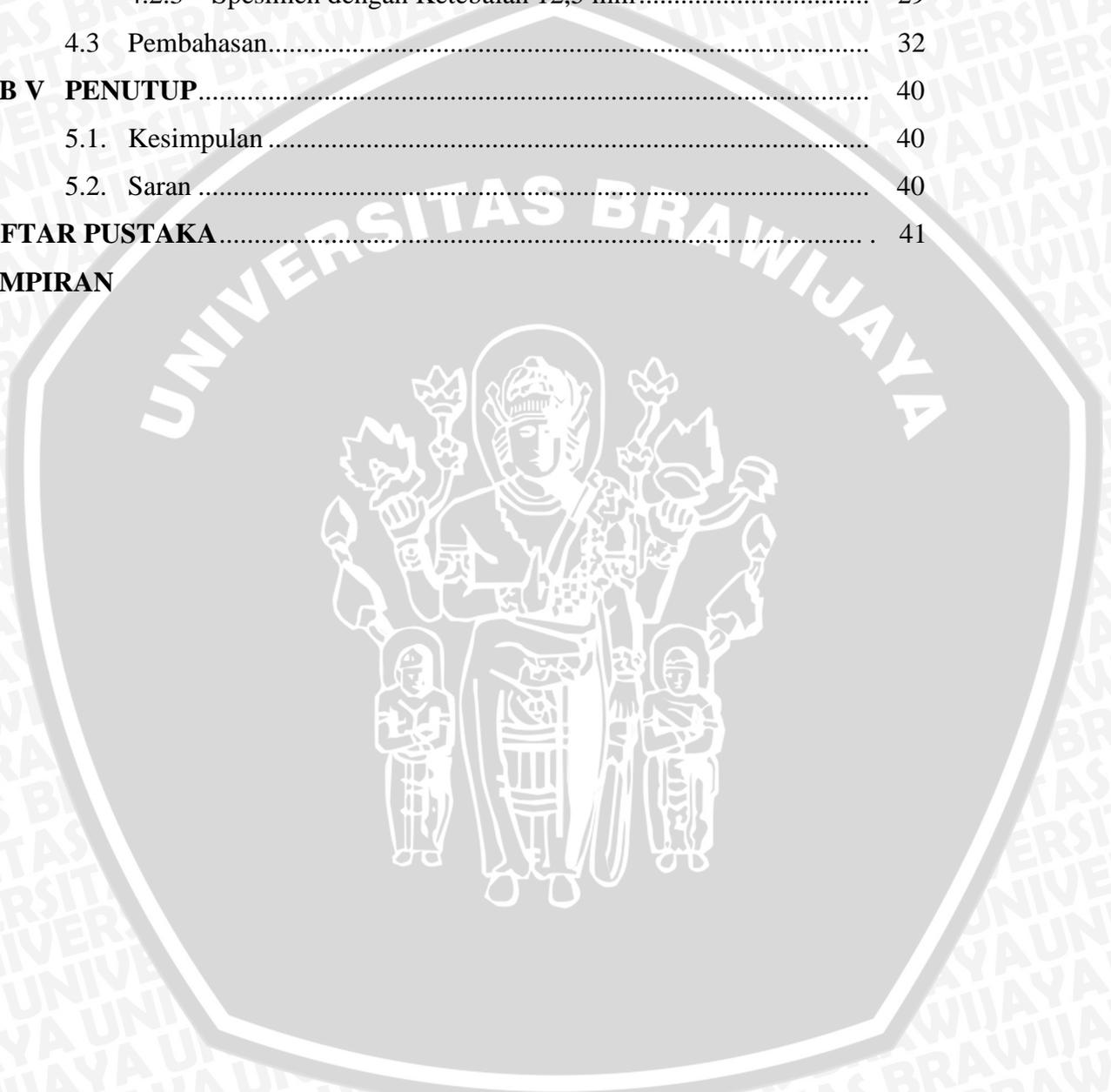
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vii
DAFTAR SIMBOL	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian	2
1.5. Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Mekanika Patahan dan Kelelahan.....	3
2.1.1 Tiga Mode Pembebanan.....	4
2.2. Faktor Intensitas Tegangan.....	5
2.3. <i>Linier Elastic Fracture Mechanics (LEFM)</i>	6
2.4. Metode Elemen Hingga	7
2.4.1 Metode Elemen Hingga untuk Kasus Mekanika Patahan.....	10
2.5. Bentuk Daerah Plastis	13
2.6. Teknik Ekstrapolasi Perpindahan	14
2.7. <i>Software</i> ANSYS	16
2.8. Hipotesa	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1. Metode Penelitian	18
3.2. Variabel Penelitian.....	18
3.3 Data Masukan	21
3.4 Tempat dan Waktu Penelitian.....	21
3.5 Pemodelan Spesimen.....	22
3.6 Prosedur Penelitian	24



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1. Hasil Verifikasi	26
4.2. Hasil Perhitungan ANSYS.....	28
4.2.1 Spesimen dengan Ketebalan 2,5 mm.....	28
4.2.2 Spesimen dengan Ketebalan 7,5 mm.....	29
4.2.3 Spesimen dengan Ketebalan 12,5 mm.....	29
4.3 Pembahasan.....	32
BAB V PENUTUP	40
5.1. Kesimpulan	40
5.2. Saran	40
DAFTAR PUSTAKA	41
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 4.1	Perbandingan hasil perhitungan faktor intensitas tegangan antara metode analitis dan program ANSYS	26



DAFTAR GAMBAR

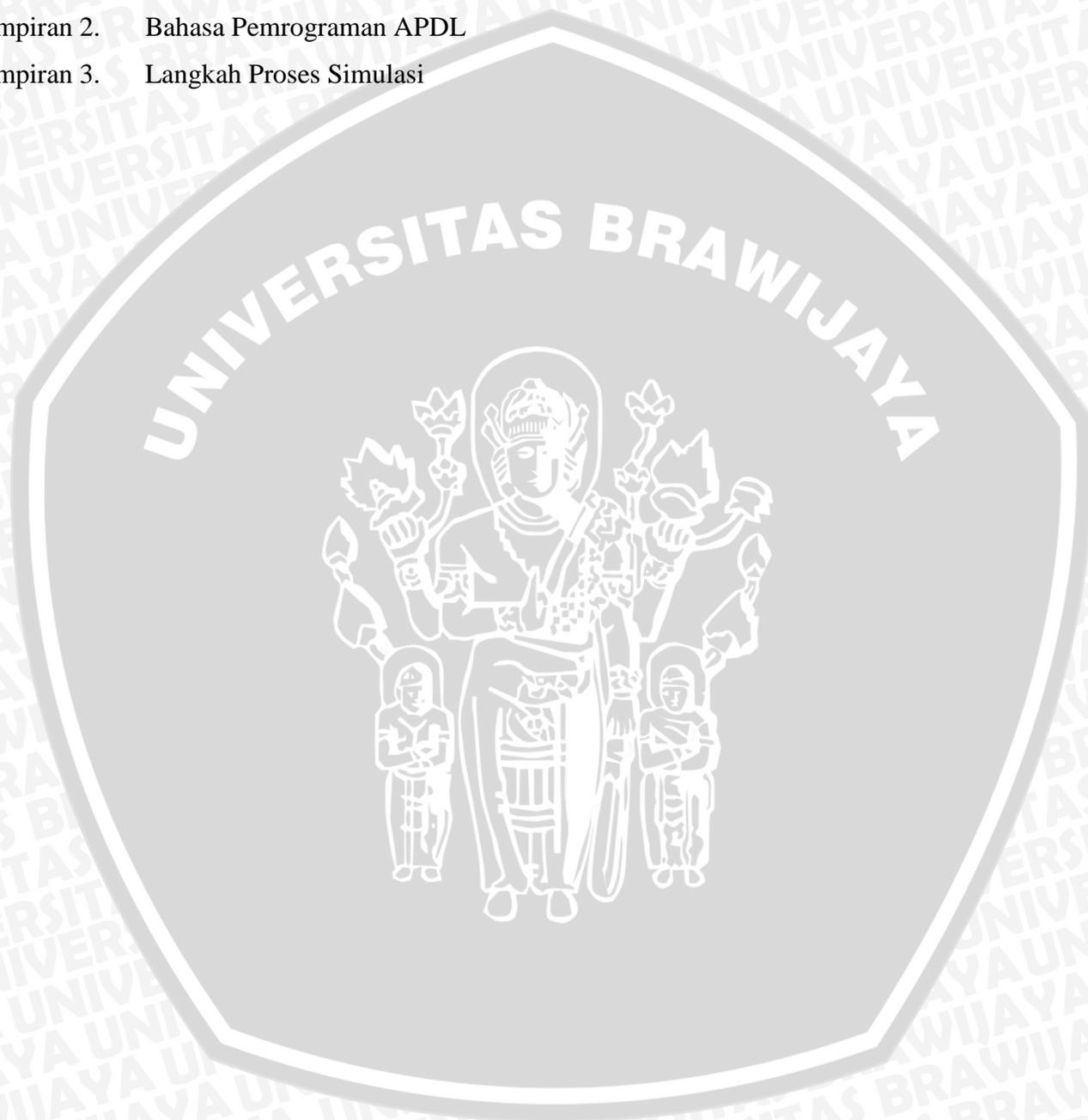
No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Mode pembukaan retak	4
Gambar 2.2	Distribusi tegangan di sekitar ujung retak	5
Gambar 2.3	(a) <i>Gas engine crankshaft</i> , (b) <i>joy swivel link Linear Friction</i>	7
Gambar 2.4	Diskretisasi Elemen	7
Gambar 2.5	Daerah ujung retak dan daerah depan retak Proses <i>Upset Loading</i>	11
Gambar 2.6	Elemen <i>singular quarter-point quadrilateral 8 node</i>	11
Gambar 2.7	Daerah plastis di ujung retak	13
Gambar 2.8	Daerah plastis 3 dimensi	14
Gambar 2.9	Evaluasi faktor intensitas tegangan dengan prosedur ekstrapolasi perpindahan	15
Gambar 3.1	Gambar <i>single edge crack specimen</i> Alat Bantu Cekam	18
Gambar 3.2	Variabel pada spesimen	19
Gambar 3.3	Ukuran spesimen	20
Gambar 3.4	Pembebanan pada spesimen	21
Gambar 3.5	Pemodelan satu bagian	22
Gambar 3.6	Pemodelan lubang	23
Gambar 3.7	Hasil <i>meshing</i>	24
Gambar 3.8	Diagram alir penelitian	25
Gambar 4.1	Grafik hubungan faktor intensitas tegangan pada spesimen tipis	28
Gambar 4.2	Grafik hubungan faktor intensitas tegangan pada spesimen ketebalan menengah	29
Gambar 4.3	Grafik hubungan faktor intensitas tegangan pada spesimen tebal	30
Gambar 4.4	Grafik hubungan faktor intensitas tegangan dan diameter lubang	31
Gambar 4.5	Grafik hubungan faktor intensitas tegangan dan diameter lubang	31
Gambar 4.6	Contoh distribusi tegangan pada $D = 1 \text{ mm}$	32
Gambar 4.7	Contoh distribusi tegangan pada $D = 1 \text{ mm}$	33
Gambar 4.8	Contoh distribusi tegangan pada $D = 5 \text{ mm}$	34
Gambar 4.9	Contoh distribusi tegangan pada $D = 5 \text{ mm}$	34
Gambar 4.10	Contoh distribusi tegangan pada $D = 1 \text{ mm}$	36
Gambar 4.11	Contoh distribusi tegangan pada $D = 5 \text{ mm}$	36
Gambar 4.12	Contoh distribusi tegangan pada $D = 1 \text{ mm}$	37

Gambar 4.13	Contoh distribusi tegangan pada $D = 1 \text{ mm}$	38
Gambar 4.14	Contoh distribusi tegangan pada $D = 5 \text{ mm}$	38
Gambar 4.15	Contoh distribusi tegangan pada $D = 5 \text{ mm}$	39
Gambar 4.16	Efek ketebalan spesimen	39



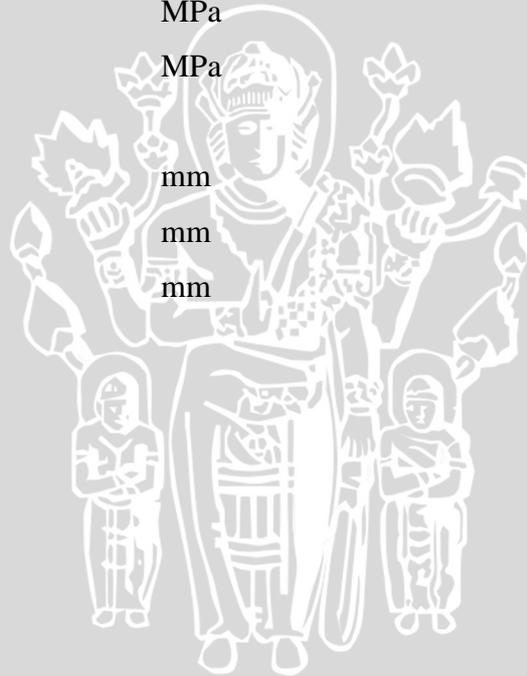
DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul
Lampiran 1.	Tabel Hasil Pengujian
Lampiran 2.	Bahasa Pemrograman APDL
Lampiran 3.	Langkah Proses Simulasi



DAFTAR SIMBOL

Besaran dasar	Satuan	Simbol
Diameter	Mm	D
Tegangan normal	Mpa	σ
Panjang retak	mm	a
Faktor intensitas tegangan	Mpa m ^{1/2}	K
Faktor koreksi geometri		β
Laju pertumbuhan retak		da/dN
Modulus elastisitas	Gpa	E
Angka poisson		ν
Tegangan ultimate	MPa	σ
Tegangan yield	MPa	σ
Koefisien kekuatan		k
Lebar spesimen	mm	w
Tinggi spesimen	mm	h
Tebal spesimen	mm	t
Perpindahan		u, v



RINGKASAN

Dian Andra Lukita, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2012, Analisis Pengaruh Variasi Diameter Lubang dan Tebal Spesimen terhadap Faktor Intensitas Tegangan Ujung Retak pada Proses *Stopping-Hole Crack Repair Method*, **Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Moch. Agus Choiron. ST., MT.**

Metode *stopping-hole crack repair method* merupakan salah satu metode menghambat laju perambatan retak (*crack retardation*). Beberapa parameter dapat mempengaruhi kenaikan umur komponen retak yang disebabkan oleh *stopping-hole*. Di antaranya, diameter lubang (*hole diameter*), posisi dan ukuran dari retak, geometri dan *mechanical properties* dari komponen. Semua hal tersebut bisa mempengaruhi efektivitas perbaikan. Nilai faktor intensitas tegangan (K_1) sebagai parameter distribusi tegangan di sekitar ujung retak amat dipengaruhi oleh faktor geometri spesimen. Analisis K_1 ujung retak pada konfigurasi diameter lubang di depan ujung retak dengan variasi diameter, $D_1 = 1\text{mm}$, $D_2 = 2\text{mm}$, $D_3 = 3\text{mm}$, $D_4 = 4\text{mm}$, $D_5 = 5\text{mm}$, dan 3 variasi ketebalan ($t_1 = 2,5\text{mm}$, $t_2 = 7,5\text{mm}$, $t_3 = 12,5\text{mm}$), dengan spesimen *single edge crack specimen* digunakan bantuan program simulasi berbasis metode elemen hingga. Hasilnya adalah nilai K_1 tertinggi terjadi pada konfigurasi spesimen dengan ketebalan 12,5 mm dengan diameter lubang, $D = 5\text{ mm}$ sebesar $55,995\text{ Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$ dan K_1 terendah terjadi pada konfigurasi spesimen dengan ketebalan 2,5 mm dengan diameter lubang, $D = 1\text{ mm}$ sebesar $34,755\text{ Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Kata Kunci : Faktor intensitas tegangan, diameter lubang, ketebalan spesimen.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fenomena kegagalan pada logam disebabkan oleh pembebanan berulang dalam suatu siklus yang mengakibatkan kelelahan. Proses kelelahan sendiri terjadi melalui beberapa tahapan, dimulai dengan adanya retak awal (*crack initiation*), perambatan retak (*crack propagation*), dan akhirnya terjadi patah final (*final crack*).

Berbagai metode untuk menghambat perambatan retak (*crack retardation*) telah dikembangkan, pemanfaatan lubang (*stopping-hole*) sering digunakan untuk tujuan tersebut, yaitu dengan pengeboran ujung retak (Fischer, 1997:283) dan pengeboran sepasang lubang di sisi ujung retak (Shin, 1996:535)

Yang disebut metode *stopping-hole* adalah perbaikan teknik darurat yang dilakukan untuk memperpanjang umur kelelahan retak pada komponen – komponen suatu struktur. Terutama komponen yang tidak dapat diganti dengan cepat saat retak ditemukan, atau pada kondisi ketika komponen yang retak tersebut berukuran besar. Maka cara ini yang akan digunakan oleh banyak tim *maintenance*, karena relatif murah, sederhana dan cepat untuk diterapkan.

Stopping-hole dapat bekerja sangat baik, menghasilkan kenaikan usia pakai yang signifikan dan efektif memperpanjang usia komponen yang mengalami keretakan, sehingga dapat menunda waktu penggantianannya. Beberapa parameter dapat mempengaruhi kenaikan umur komponen retak yang disebabkan oleh *stopping-hole*. Di antaranya, diameter lubang (*hole diameter*), posisi dan ukuran dari retak, geometri dan *mechanical properties* dari komponen. Semua hal tersebut bisa mempengaruhi efektivitas perbaikan. Tujuan langkah ini adalah untuk suatu kasus tertentu diperlukan metode yang sederhana untuk dapat diterapkan, seperti efek dari posisi dan ukuran diameter *stopping-hole*.

Shin (1996:540) melakukan analisis efek pengeboran sepasang lubang di sisi dan depan ujung retak terhadap laju retak pada spesimen pengujian. Pengujian dilakukan dengan dua variasi jarak lubang di sisi ujung retak dan di depan ujung retak. Pertumbuhan laju retak sangat tergantung pada posisi dan susunan lubang.

Selain itu, ketebalan spesimen amat berpengaruh terhadap kondisi *plane stress* dan *plane strain* yang terbentuk pada daerah ujung retak. Untuk kondisi *plane stress* memiliki ukuran zona plastis yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi *plane strain*. Yang mana pada pengujian aktual sulit untuk melihat distribusi zona plastis *stress* dan *strain* tersebut, oleh karena itu dari latar belakang di atas menjadi landasan bahwa diperlukan studi lebih lanjut

tentang pengaruh variasi diameter lubang dan tebal spesimen terhadap faktor intensitas tegangan ujung retak pada proses *stopping-hole crack repair method*. Diameter lubang terdiri atas lima variasi dan ketebalan spesimen terdiri atas tiga variasi, dari spesimen tipis, sedang, dan tebal. Pemodelan dilakukan dengan bantuan program ANSYS.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat disimpulkan suatu permasalahan yaitu:

- Bagaimanakah pengaruh variasi diameter lubang dan tebal spesimen terhadap faktor intensitas tegangan ujung retak pada proses *stopping-hole crack repair method*?

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan tidak meluas dan tetap terfokus, maka perlu dilakukan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Material plat yang digunakan adalah aluminium 2024-T3
2. Bahan plat dianggap isotropik dan memiliki struktur yang homogen.
3. Tidak memperhitungkan faktor lingkungan seperti temperatur dan korosi.
4. Hanya mencari faktor intensitas tegangan ujung retak dan dalam batasan *linear elastic fracture mechanic* (LEFM).
5. Analisa dilakukan pada mode I (*opening crack*) dan daerah *stable crack growth*.

1.4 Tujuan Penelitian

- Hasil yang diharapkan berupa diameter *stopping-hole* yang paling tepat untuk setiap ketebalan spesimen dengan melihat pengaruhnya terhadap nilai faktor intensitas tegangan sebagai parameter distribusi tegangan di sekitar ujung retak sekaligus mempermudah dalam proses manufaktur *stopping-hole*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat memberikan informasi yang bermanfaat tentang perilaku faktor intensitas tegangan ujung retak pada proses *stopping-hole* sehingga dapat diperhitungkan pula tentang perilaku perambatan retak.
2. Analisis dalam skripsi ini dapat memberikan alternatif metode pencegahan terhadap perambatan retak.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mekanika Patahan dan Kelelahan

Dalam berbagai kasus kegagalan sebuah elemen struktur terjadi ketika material sudah terdeformasi secara plastis. Dalam beberapa kasus, perubahan dimensi dalam kapasitas kecil dan beban statis yang melewati titik luluh dapat ditoleransi. Retak aktual setelah melewati tegangan ultimate material akan menyebabkan patah. Kegagalan juga dapat terjadi dikarenakan penerapan tegangan normal atau tegangan geser pada material. Kegagalan akibat kelelahan merupakan kasus yang paling banyak terjadi pada kasus – kasus kegagalan pada elemen – elemen mesin pada umumnya.

Umur komponen dari sebuah struktur dibatasi oleh kemampuan suatu bahan untuk menahan efek umur pemakaian, dimana terdiri dari beban siklus, fluktuasi temperatur atau pengaruh korosi. Walaupun telah dilakukan berbagai macam cara untuk mengurangi penyebabnya, kelelahan akan menimbulkan retak dan dilanjutkan dengan pertumbuhan retak. Kelelahan ini tentunya sangat mempengaruhi kinerja struktur secara keseluruhan yang mana dikhawatirkan akan menyebabkan kegagalan gungsi dari struktur tersebut.

Kelelahan bahan yang pada akhirnya berakibat patahan, disebabkan adanya pembebanan yang berulang dalam sejumlah siklus pembebanan. Fenomena ini terjadi dalam tiga tahapan sebagai berikut :

1. Naiknya tegangan pada daerah retak yang dapat menimbulkan konsentrasi tegangan. Kemudian pada daerah tersebut terjadi deformasi plastis yang pada akhirnya akan menimbulkan retak mikro yang disebut pengintian retak (*crack initiation*).
2. Pengintian retak akan disertai dengan perkembangan retak jika pembebanan berulang berlanjut. Perambatan retak (*crack propogation*) ini berlangsung terus dan akan segera diikuti dengan tahapan berikutnya.
3. Retak telah merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya didukung penampang sisa yang belum retak dan akhirnya komponen tersebut akan patah (*final fracture*).

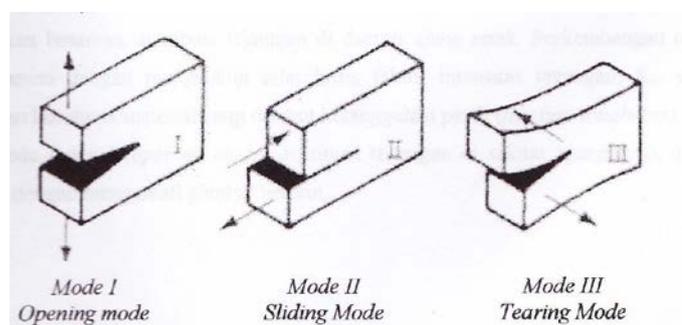
Mekanika patahan (*fracture mechanic*) berdasarkan pada asumsi dasar bahwa semua struktur baik yang baru ataupun sudah lama memiliki cacat dimana pada suatu

kondisi dapat terjadi patah. Mekanika patahan didasarkan pada analisis tegangan. Hasil dari analisis mekanika patahan akan menghasilkan kombinasi tingkat tegangan dan ukuran retak yang menjadi syarat timbulnya retak. Objek dari mekanika patahan adalah untuk memberikan jawaban kuantitatif pada masalah – masalah spesifik mengenai retak pada struktur. Retak awal akan berkembang dan akan menyebabkan kegagalan pada struktur pada kondisi pemakaian yang cukup lama.

2.1.1 Tiga Mode Pembebanan

Retak lelah disebabkan oleh pembebanan dinamis yang metode pembebanannya dapat digolongkan dalam 3 bentuk metode pembukaan retak yaitu, mode buka / *opening mode* (K_I) beban bekerja tegak lurus pada bidang retak dan cenderung membuka retak. Tanda “I” pada K_I menginformasikan bahwa faktor intensitas tegangan disebabkan oleh pembebanan mode buka. Mode geser / *shearing mode* (K_{II}) disebabkan oleh beban geser sebidang yang menyebabkan dua permukaan retak saling bergesekan. Tanda “II” pada K_{II} menginformasikan bahwa faktor intensitas tegangan disebabkan oleh pembebanan mode geser.

Sedangkan mode sobekan / *tearing mode* (K_{III}) disebabkan oleh pembebanan geser yang keluar dari bidang, atau gaya puntir yang keluar bidang struktur. Tanda “III” pada K_{III} menginformasikan bahwa faktor intensitas tegangan disebabkan oleh pembebanan mode ini. Suatu benda yang mengalami retak, dapat terbebani dengan salah satu mode pembebanan ini atau kombinasi dari mode – mode tersebut (*mixed mode*) dengan K_I , K_{II} , K_{III} terdapat pada daerah di sekitar ujung retak.

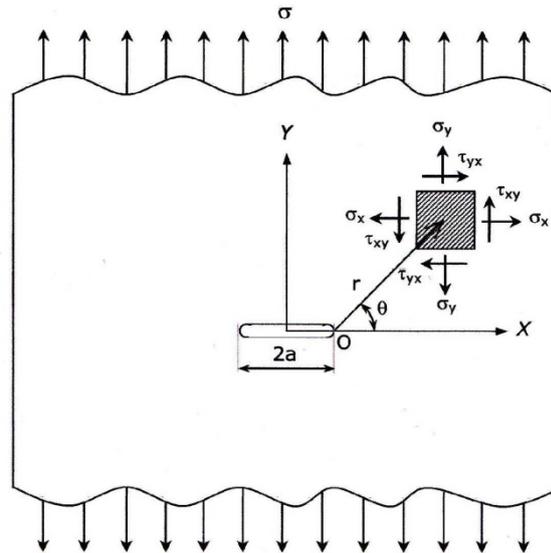


Gambar 2.1. Mode pembukaan retak

Sumber: Bannantine, 1990

2.2 Faktor Intensitas Tegangan

Faktor intensitas tegangan (*stress intensity factor*), K, merupakan parameter tunggal untuk memberikan penilaian terhadap permulaan perambatan retak. Faktor intensitas tegangan menjadi syarat utama untuk menilai stabilitas retak. Penggunaan faktor intensitas tegangan harus didukung dengan pengetahuan tentang bidang tegangan di sekitar ujung retak pada kondisi – kondisi geometri, pembebanan, dan kondisi batas tertentu.



Gambar 2.2. Distribusi tegangan di sekitar ujung retak

Sumber : Broek, 1989

Distribusi tegangan pada mode 1 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\
 \sigma_y &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\
 \tau_{xy} &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right]
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots (2 - 1)$$

Dimana untuk kondisi *plane strain* atau *plane stress*, dapat diambil bahwa,

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 & \quad \text{plane stress} \\
 \sigma_z = \mu (\sigma_x + \sigma_y) & \\
 \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 & \quad \text{plane strain}
 \end{aligned} \right\}
 \dots\dots\dots (2 - 2)$$

Pada $\theta = 0$, faktor intensitas tegangan adalah,

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad \dots\dots\dots (2 - 3)$$

Fungsi yang lain yang sering ditambahkan untuk beragam konfigurasi spesimen. Fungsi ini didefinisikan sebagai fungsi $f(a/W)$ yang mencakup fungsi konfigurasi komponen retak dan bentuk spesimen.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad \dots\dots\dots (2 - 4)$$

dengan : a = panjang retak
 W = lebar spesimen

Faktor koreksi untuk spesimen CC (*center crack*) adalah :

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \sqrt{\sec\left(\frac{a}{W}\pi\right)} \quad \dots\dots\dots (2 - 5)$$

Faktor koreksi untuk *single edge crack specimen* dinyatakan sebagai berikut,

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 1,12 - 0,231\left(\frac{a}{W}\right) + 10,55\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21,72\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30,39\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad \dots\dots\dots (2 - 6)$$

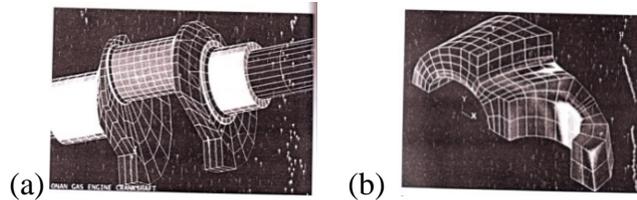
Sekali faktor intensitas tegangan diketahui, maka dapat ditentukan faktor intensitas tegangan maksimum yang dapat menyebabkan kegagalan. Kondisi kritis ini dikenal dengan keuletan patah (*fracture toughness*) material, K_{Ic} . *Fracture toughness* merupakan intensitas tegangan kritis (*critical stress intensity*) yang menyebabkan kegagalan.

2.3 Linier Elastic Fracture Mechanics (LEFM)

Linier Elastic Fracture Mechanics (LEFM) sebagai konsep dasar analisis kasus – kasus retak, memiliki batasan dimana material yang digunakan adalah isotropik dan linear-elastis. Berdasar teori ini bidang tegangan di ujung retak dihitung dengan menggunakan teori elastisitas. Jika tegangan di dekat ujung retak melebihi keuletan patahan mekanik, retak akan terjadi. LEFM hanya sesuai jika deformasi plastis sangat kecil dibandingkan dengan ukuran retak, yang dikenal dengan luluh skala kecil (*small scale yielding*).

2.4 Metode Elemen Hingga

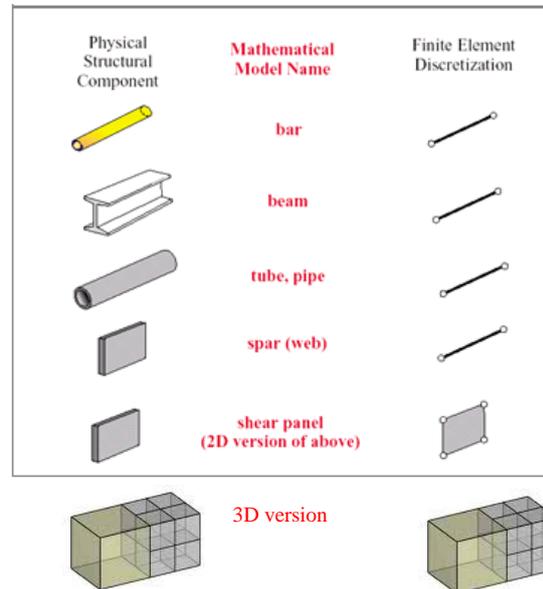
Metode elemen hingga merupakan solusi numerik dengan proses diskretisasinya, yaitu membagi struktur menjadi elemen-elemen kecil yang memiliki geometri yang lebih sederhana dengan jumlah yang masih berhingga.



Gambar 2.1. (a) *Gas engine crankshaft*, (b) *joy swivel link*

Sumber : Zahavi, 1992

Pemakaian Metode Elemen Hingga (MEH) selama ini antara lain untuk menganalisa struktur, yang berada pada pengaruh pembebanan (gaya maupun tekanan), gradien temperatur yang akan memberikan akibat berupa deformasi, tegangan maupun perubahan temperatur yang dialami oleh struktur tersebut. Tujuan utama dari analisa ini adalah untuk memperoleh nilai pendekatan tegangan dan perpindahan yang terjadi pada struktur tersebut.



Gambar 2.2. Diskretisasi Elemen

Sumber : Modul ANSYS 2007, Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem

Prosedur perhitungan dengan Metode Elemen Hingga (MEH)

1. Diskretisasi dan pemilihan elemen

Proses ini adalah proses pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil yang lebih sederhana yang dihubungkan pada titik simpul (*node*), kemudian dilakukan pemilihan elemen seperti model awal dari struktur. Hal ini dilakukan untuk mempermudah analisa.

2. Memilih fungsi pendekatan

Variasi perpindahan pada suatu elemen didekati dengan fungsi interpolasi yang didasarkan pada harga simpul yang mengitari. Fungsi yang paling umum digunakan adalah polinomial. Pendekatan dengan fungsi interpolasi ini disebabkan karena sulitnya mencari jawaban tertutup sehingga dipilih suatu bentuk jawaban, yaitu distribusi perpindahan yang merupakan besaran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi yang harus memenuhi hukum, prinsip dan syarat batas yang menjadi sifat persoalan yang ada.

3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan [k]

Dengan prinsip usaha virtual akan dihasilkan persamaan matrik kekakuan elemen yang dinyatakan sebagai berikut :

$$[k] = \int [B]^T [C] [B] dV \quad \dots\dots\dots (2 - 7)$$

dimana:

[k] : matrik kekakuan elemen

[B] : matrik konstitutive hubungan regangan dan perpindahan

[C] : matrik konstitutive hubungan tegangan dan regangan material

Adapun matrik B untuk elemen tetrahedral adalah sebagai berikut :

$$B_1 = \begin{bmatrix} f_{i,x} & 0 & 0 \\ 0 & f_{i,y} & 0 \\ 0 & 0 & f_{i,z} \\ f_{i,y} & f_{i,x} & 0 \\ 0 & f_{i,z} & f_{i,y} \\ f_{i,z} & 0 & f_{i,x} \end{bmatrix}$$

4. Menghitung matrik beban total

Beban yang bekerja didefinisikan menjadi 3 macam, sehingga beban total adalah :

$$R = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \quad \dots\dots\dots (2 - 8)$$

dimana:

Q_{NF} : beban pada konsentrasi nodal

Q_{BF} : beban *body force* (akibat beban sendiri)

Q_T : beban traksi (*surface traction*)

5. Merakit elemen menjadi struktur

Perakitan persamaan elemen akan dibawa ke bentuk persamaan global, yang prosesnya harus memenuhi sifat konvergen dan sifat sinambung. Salah satunya antara lain : titik-titik yang semula bersebelahan harus tetap bersebelahan satu sama lain setelah elemen dikenai beban. Bentuk persamaan global elemen yaitu :

$$[K] \{q\} = \{R\} \quad \dots\dots\dots (2 - 9)$$

dimana:

$[K]$: matrik kekakuan elemen.

$\{q\}$: vektor perpindahan simpul.

$\{R\}$: matrik beban total.

Setelah matrik kekakuan global diperoleh dan syarat-syarat batasnya dimasukkan maka perpindahan simpul (q) dapat dicari. Suatu syarat batas memberikan informasi bagaimana struktur ditopang dalam ruang, dengan memasukkan nilai perpindahan yang telah ditetapkan sesuai kondisi pada struktur.

6. Mendapatkan perpindahan global

Persamaan global yang telah mendapatkan syarat batas, merupakan sekumpulan persamaan linier yang secara umum dapat ditulis sebagai berikut :

$$k_{1,1} q_1 + k_{1,2} q_2 + \dots\dots\dots + k_{1,n} q_n = R_1 \quad \dots\dots\dots (2 - 10)$$

$$k_{2,1} q_1 + k_{2,2} q_2 + \dots\dots\dots + k_{2,n} q_n = R_2$$

$$k_{n,1} q_1 + k_{n,2} q_2 + \dots\dots\dots + k_{n,n} q_n = R_n$$

Persamaan di atas akan diselesaikan dengan cara eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran primer yaitu $q_1, q_2, q_3 \dots\dots\dots q_n$.

7. Mendapatkan besaran sekunder dan interpretasi hasil

Dari besaran pertamanya yang berupa perpindahan, dapat dicari besaran sekunder yang dapat berupa tegangan maupun regangan, dengan menggunakan hubungan antara keduanya. Hubungan tegangan-regangan pada kondisi 3D dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad .. (2 - 11)$$

Hubungan tersebut dapat ditulis dalam bentuk simbol berikut :

$$\{ \sigma \} = [C] \{ \varepsilon \}$$

Hubungan regangan dengan perpindahan adalah :

$$\{ \varepsilon \} = [B] \{d\}$$

Sehingga tegangan dapat dirumuskan sebagai :

$$\{ \sigma \} = [C] [B] \{d\}$$

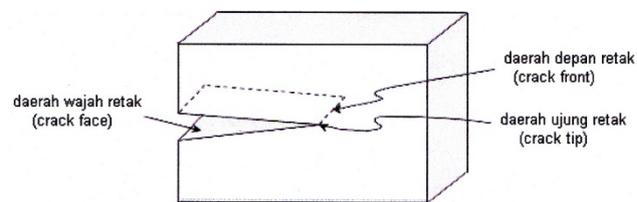
Hasil akhir dari perhitungan dengan metode elemen hingga ini berupa harga distribusi tegangan yang akan diplot di sepanjang struktur untuk dianalisis sesuai dengan rumusan masalah yang ada.

2.4.1 Metode Elemen Hingga untuk Kasus Mekanika Patahan

Sejumlah teknik telah diusulkan untuk mengevaluasi faktor intensitas tegangan dari hasil elemen hingga, tapi representasi memadai dari singularitas ujung retak (*crack tip singularity*) merupakan masalah rata – rata dari metode ini. Penggunaan metode elemen hingga pada prediksi keretakan melibatkan dua hal penting, yaitu :

1. Pemodelan singularitas ujung retak.
2. Evaluasi faktor intensitas tegangan.

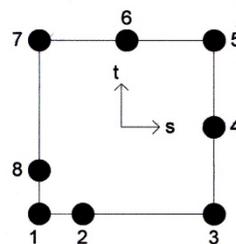
Beberapa penelitian dengan menggunakan metode elemen hingga dengan memakai elemen konvensional, menunjukkan bahwa diperlukan pembagian *meshing* yang sangat halus pada sekitar ujung retak (Chan, 1970) agar secara akurat dapat merepresentasikan singularitas ujung retak. Istilah ini dikenal dengan daerah ujung retak (*crack tip*) untuk model dua dimensi dan daerah depan retak (*crack front*) pada model tiga dimensi. Pada skripsi ini dibatasi perhatiannya pada elemen ujung retak yang berbasis elemen isoparametrik *quadratic*. Pada persoalan linear elastis ditunjukkan dengan perpindahan di dekat ujung retak (atau di depan retak) dengan jarak sebesar \sqrt{r} yang bervariasi, dengan r adalah jarak dari ujung retak. (ANSYS Release 11.0 Documentation).



Gambar 2.3. Daerah ujung retak dan daerah depan retak

Sumber : ANSYS 11.0 Documentation

Singularitas ujung retak dapat dimodelkan dengan elemen *isoparametric quadrilateral*, dengan cara memanipulasi node posisi tengah yang disebut sebagai elemen *quarter-point quadrilateral*. Dengan memindah node 2 dan 8 ke posisi seperempat maka singularitas regangan dapat ditampilkan pada node 1 seperti pada gambar 2.4 berikut,



Gambar 2.4. Elemen *singular quarter-point quadrilateral* 8 node

Sumber : Owen, 1983:38

Fungsi bentuk (*shape function*), N , untuk node pada tiap – tiap sudut dapat ditulis sebagai berikut :

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + s.s_i)(1 + t.t_i)(s.s_i + t.t_i - 1)$$

..... (2 – 12)

Dengan i adalah nomor fungsi bentuk,

$$\begin{aligned} s_i &= -1, 1, 1, -1 && \text{untuk } i = 1, 3, 5, 7 \\ t_i &= -1, -1, 1, 1 && \text{untuk } i = 1, 3, 5, 7 \end{aligned} \quad \text{..... (2 – 13)}$$

Fungsi bentuk pada node sisi tengah adalah,

$$N_i = \frac{1}{2}(1-s^2)(1+tt_i), t_i = -1, 1 \text{ untuk } i = 2, 6 \quad \text{..... (2 – 14)}$$

$$N_i = \frac{1}{2}(1+s.s_i)(1-t^2), s_i = 1, -1 \text{ untuk } i = 4, 8$$

Pada node 1,2, dan 3 fu

$$\begin{aligned} N_1 &= -\frac{1}{4}(1-s)(1-t)(1+s+t) \\ N_2 &= \frac{1}{2}(1-s^2)(1-t) \\ N_3 &= -\frac{1}{4}(1+s)(1-t)(1+s+t) \end{aligned} \quad \text{..... (2 – 15)}$$

Sepanjang sisi 1 – 3 memiliki $t = -1$, sehingga,

$$\begin{aligned} N_1 &= -\frac{1}{2}s(1-s) \\ N_2 &= (1-s^2) \\ N_3 &= \frac{1}{2}s(1+s) \end{aligned} \quad \text{..... (2 – 16)}$$

Representasi x koordinat pada elemen adalah,

$$x = \sum_{i=1}^3 N_i x_i = -\frac{1}{2}s(1-s)x_1 + (1-s^2)x_2 + \frac{1}{2}s(1+s)x_3 \quad \text{..... (2 – 17)}$$

Sumbu koordinat ditempatkan pada node 1 dan panjang sisi 1-3 adalah L , sehingga $x_1 = 0$, $x_2 = L/4$, dan $x_3 = L$, maka,

$$x = (1-s^2)\frac{L}{4} + \frac{1}{2}s(1+s)L \quad \text{..... (2 – 18)}$$

$$s = -1 + 2\sqrt{\frac{x}{L}} \quad \text{..... (2 – 19)}$$

Sehingga matrik Jacobian singular pada node 1 dengan $x = 0$.

Perpindahan u pada sisi 1-3 adalah

$$u = \sum_{i=1}^3 N_i u_i = -\frac{1}{2}s(1-s)u_1 + (1-s^2)u_2 + \frac{1}{2}s(1+s)u_3 \quad \text{..... (2 – 20)}$$

Dengan menggunakan salah satu komponen matrik Jacobian, yaitu $\partial x/\partial s$ akan diperoleh

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{L}{s}(1+s) = \sqrt{Lx} \quad \text{..... (2 – 21)}$$

Substitusi s pada persamaan ini akan didapatkan

$$u = -\frac{1}{2}\left(-1+2\sqrt{\frac{x}{L}}\right)\left(-2-2\sqrt{\frac{x}{L}}\right)u_1 + 4\left(\sqrt{\frac{x}{L}}-\frac{x}{L}\right)u_2 + \frac{1}{2}\left(-1+2\sqrt{\frac{x}{L}}\right)\left(2\sqrt{\frac{x}{L}}\right)u_3 \dots\dots\dots (2-22)$$

Regangan pada arah x adalah,

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial s} = -\frac{1}{2}\left(\frac{3}{\sqrt{xL}}-\frac{4}{L}\right)u_1 + \left(\frac{2}{\sqrt{xL}}-\frac{4}{L}\right)u_2 + \frac{1}{2}s\left(-\frac{1}{\sqrt{xL}}+\frac{4}{L}\right)u_3 \dots\dots\dots (2-23)$$

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

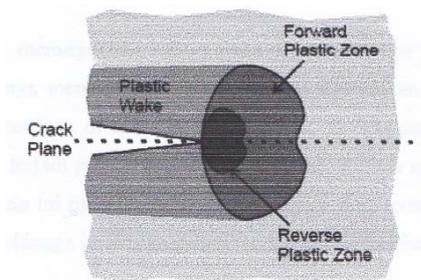
Dengan mengganti x dengan jarak radial dari ujung retak r maka perpindahan arah u sepanjang sisi 1-3 akan menjadi,

$$u = u_1 + (4u_2 - u_3 - 3u_1)\sqrt{\frac{r}{L}} + (2u_3 - 2u_1 - 4u_2)\frac{r}{L} \dots\dots\dots (2-24)$$

Hal yang sama dapat dilakukan pada perpindahan arah v.

2.5 Bentuk Daerah Plastis

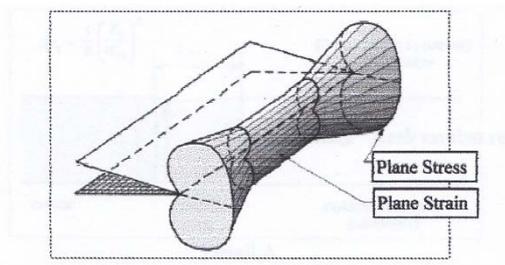
Gambar 2.5 berikut menunjukkan bentuk daerah plastis yang terjadi di ujung retak. Menurut Skinner (2001) daerah ini dibagi menjadi 3, yaitu *forward plastic zone*, *reverse plastic zone*, dan *plastic wake*. Skinner menerangkan bahwa daerah plastis di ujung retak secara umum adalah daerah yang ditunjukkan sebagai *forward plastic zone*. Pada daerah *reverse plastic zone* material mengalami deformasi plastis akibat beban tekan maksimum. Sedangkan *plastic wake* merupakan daerah yang mengalami deformasi akibat perkembangan retak sehingga meninggalkan tegangan sisa di dalamnya.



Gambar 2.5. Daerah plastis di ujung retak

Sumber : J.D Skinner, Jr. *Finite Element Predictions of Plasticity-Induced Fatigue Crack Closure in 3D Cracked Geometries*. 2001

Berdasarkan tebal retak yang terjadi, distribusi tegangan pada ujung retak akan berpengaruh pada bentuk daerah plastis yang terjadi. Gambar 2.6 menunjukkan bentuk daerah plastis pada ujung retak secara 3 dimensi. Daerah plastis pada ujung retak ini sangat bergantung pada kondisi retak *plane stress* atau *plane strain*. Jika retak terjadi pada pelat tipis maka *plane strain* lah yang terjadi, namun jika terjadi pada pelat tebal maka kondisi *plane stress* muncul pada permukaan sedang *plane strain* pada daerah yang lebih dalam.



Gambar 2.7. Daerah plastis 3 dimensi

Sumber : Ashok Saxena. *Nonlinear Fracture Mechanics for Engineering*. 1998

Gambar 2.7 menunjukkan bahwa pada permukaan luar daerah plastis terjadi regangan yang arahnya menjorok ke dalam, hal ini disebabkan di daerah ini terjadi *plane stress*, yaitu keadaan dimana σ_z atau $\sigma_3 = 0$. Sedangkan di bagian dalam, σ_3 meningkat sehingga terjadi *plane strain*, yaitu keadaan dimana $\varepsilon_z = 0$. Keadaan *plane stress* dan *plane strain* ini menyebabkan daerah plastis akan mengecil secara berturut – turut dari permukaan hingga ke bagian dalam retak menurut ketebalannya.

2.6 Teknik Ekstrapolasi Perpindahan

Setelah medan perpindahan dan tegangan seluruh bentuk retak (terutama sekitar ujung retak) telah ditentukan, berarti evaluasi faktor intensitas tegangan akan dapat ditemukan. Pendekatan dilakukan dengan menghubungkan solusi analitik tegangan dan perpindahan pada ujung retak dari harga yang didapatkan dari metode elemen hingga. Hal tersebut memerlukan prosedur ekstrapolasi untuk mendapatkan faktor intensitas tegangan pada ujung retak.

Variasi perpindahan secara analitis sekitar ujung retak adalah,

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

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

..... (2 - 25)

- Dengan K_I : faktor intensitas tegangan mode I
 K_{II} : faktor intensitas tegangan mode II
 μ : modulus geser
 κ : $(3-\nu)/(1+\nu)$ untuk kondisi *plane stress*
 $(3-4\nu)$ untuk kondisi *plane strain*

Faktor intensitas tegangan dapat dievaluasi dengan menyamakan koefisien \sqrt{r} dengan harga θ merupakan sudut polar dari sisi elemen 1-3, sehingga

$$K_I \begin{Bmatrix} (2\kappa - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \\ (2\kappa + 1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} = 4\mu \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \begin{Bmatrix} 4u_2 - u_3 - 3u_1 \\ 4v_2 - v_3 - 3v_1 \end{Bmatrix} \quad \text{..... (2 - 26)}$$

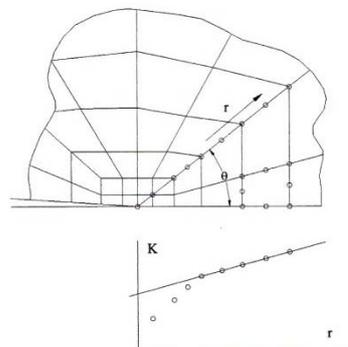
$$K_{II} \begin{Bmatrix} -(2\kappa + 3) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \\ (2\kappa - 3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} = 4\mu \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \begin{Bmatrix} 4u_2 - u_3 - 3u_1 \\ 4v_2 - v_3 - 3v_1 \end{Bmatrix} \quad \text{..... (2 - 27)}$$

Prosedur ekstrapolasi perpindahan dengan melihat hubungan pada persamaan (2-25) dan (2-26) sehingga diperoleh

$$K_I \begin{Bmatrix} (2\kappa - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \\ (2\kappa + 1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} = 4\mu \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad \text{..... (2 - 28)}$$

$$K_{II} \begin{Bmatrix} -(2\kappa + 3) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \\ (2\kappa - 3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} = 4\mu \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad \text{..... (2 - 29)}$$

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 regresi linier.



Gambar 2.8. Evaluasi faktor intensitas tegangan dengan prosedur ekstrapolasi perpindahan

Sumber : Owen, 1983

2.7 Software ANSYS

Software yang berbasis elemen hingga ini mempunyai kelebihan lain dari penggunaan *software* ini adalah kemampuan untuk mendiskritisasi model dengan sangat halus, mampu bekerja elemen lebih banyak dan menghasilkan output dengan ketelitian tinggi. ANSYS dapat digunakan untuk menganalisis antara lain : analisis struktural, analisis thermal, analisis listrik, analisis magnetis dan analisis fluida.

Secara umum langkah-langkah analisis dengan menggunakan ANSYS dibagi menjadi tiga, yaitu *Preprocessing* (Proses Awal), *Solution* (Proses Solusi) dan *Postprocessing* (Proses Pembacaan Hasil).

1. *Preprocessing* (Proses Awal)

Tahap-tahap penting dalam preprocessing :

- Pemodelan Geometri: disini dilakukan proses modeling geometri baik 1D, 2D maupun 3D
- Pemilihan tipe elemen: digunakan untuk mendiskritisasikan model yang dibuat.
- Material properties (input data material yang digunakan)
- Meshing (pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil/ elemen diskrit)

Pembuatan model geometri dari benda kerja dapat juga dilakukan dengan *software CAD* yang nantinya diekspor ke dalam ANSYS.

2. *Solution* (Proses Solusi)

Tahap-tahap penting dalam Solution :

- Mendefinisikan analisis solusi yang dipakai (*Analysis Type*)
- Memasukkan kondisi batas (*constrain*)
- Menerapkan pembebanan
- Penyelesaian (*Solving*)

3. *General Postprocessing* (Proses Pembacaan Hasil)

Hasil analisis dari proses solusi dapat ditampilkan dalam bentuk tabel maupun dalam bentuk *plot result* dan *list result*.

➤ *Plot result*

Dengan menggunakan (*contour plot*) akan tampak distribusi tegangan atau variable lain pada model sehingga mudah dalam menginterpretasikan informasi yang disajikan. Di sini model digambarkan dengan sebaran warna yang menunjukkan besarnya tegangan yang terjadi.

➤ *List result*

Hasil analisis dalam bentuk *list result* berupa tabel yang memberikan informasi secara detail nilai perpindahan, tegangan dan regangan yang terjadi pada tiap node maupun elemennya.

➤ *Animasi*

Hasil analisa yang diperoleh juga ditampilkan dalam bentuk simulasi (animasi).

2.8 Hipotesa

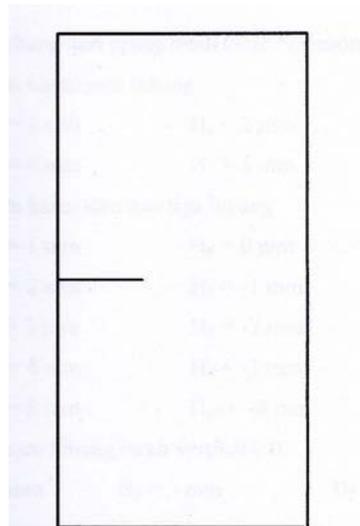
Semakin kecil variasi diameter lubang dan semakin tipis spesimen pada *stopping hole crack repair method*, semakin kecil faktor intensitas tegangan pada ujung retak, sehingga rambatan retakan pada bahan akan terhambat.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam menyelesaikan masalah dalam penelitian ini adalah eksperimental semu yaitu melakukan simulasi program *ANSYS* yang berbasis metode elemen hingga. Perhitungan faktor intensitas tegangan dilakukan dengan memberikan retak awal dan lubang di daerah ujung retak dengan diameter dan ketebalan spesimen yang bervariasi. Kemudian diberikan pembebanan pada spesimen. Identifikasi nilai faktor intensitas tegangan dilakukan pada tiap kombinasi diameter lubang dan tingkat ketebalan spesimen sehingga diketahui pengaruh masing – masing terhadap faktor intensitas tegangan ujung retak. Disamping itu juga dilakukan studi literatur untuk memperoleh informasi tambahan berkenaan dengan penelitian yang dilakukan.



Gambar 3.1. Gambar *single edge crack specimen*

Sumber: Bannantine, 1990:92

3.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

a) Variabel bebas :

1. Variasi diameter lubang, D:

$$D1 = 1 \text{ mm}$$

$$D2 = 2 \text{ mm}$$

$$D3 = 3 \text{ mm}$$

$$D4 = 4 \text{ mm}$$

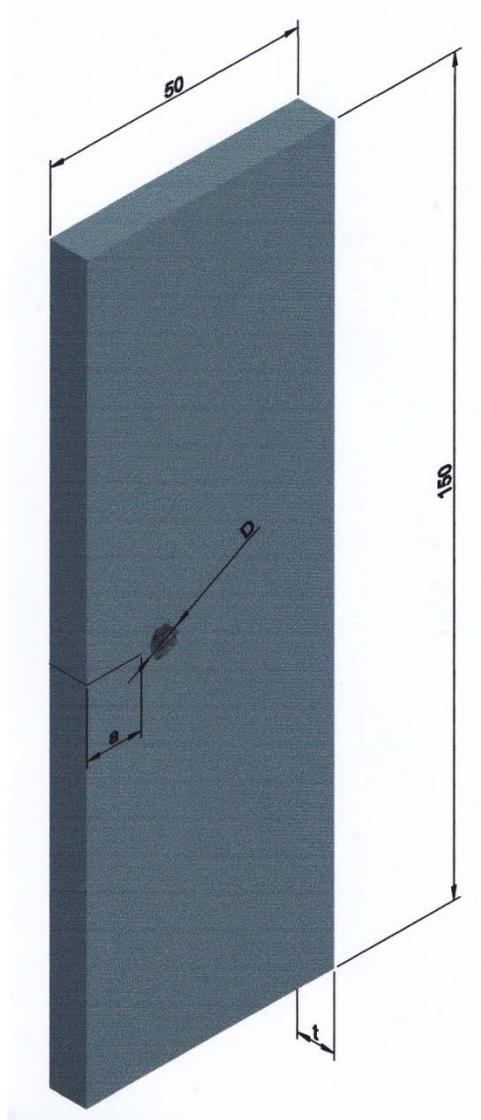
$$D5 = 5 \text{ mm}$$

2. Ketebalan Spesimen, t :

$$t1 = 2,5 \text{ mm}$$

$$t2 = 7,5 \text{ mm}$$

$$t3 = 12,5 \text{ mm}$$



Gambar 3.2. Variabel pada spesimen

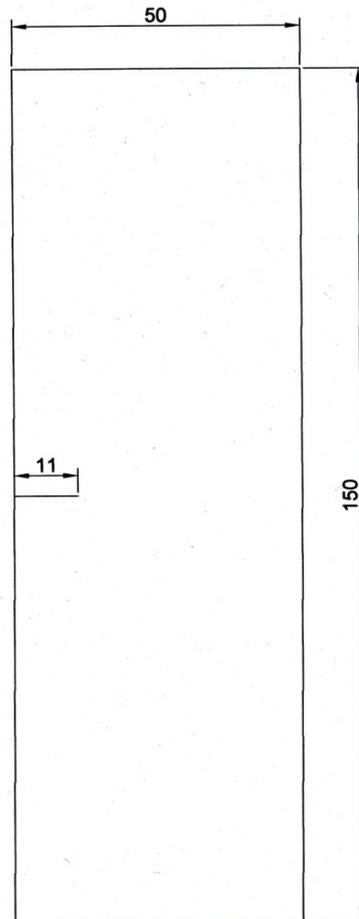
b) Variabel terikat :

- Faktor intensitas tegangan ujung retak

c) Parameter yang dikonstantakan adalah :

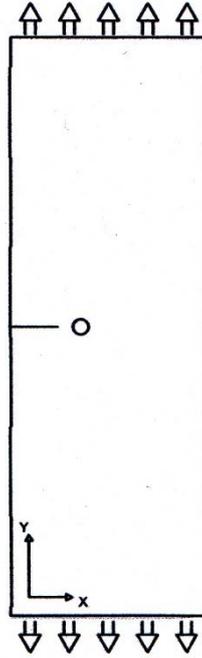
1. *Material properties* aluminium 2024 – T3 (MatWeb – *Online Material Data Sheet*)

- Modulus Elastisitas bahan (E) = 73.100 Mpa
- *Poisson ratio* = 0,33
- Tegangan *Yield* = 345 Mpa
- Tegangan *Ultimate* = 483 Mpa



Gambar 3.3. Ukuran spesimen

2. Panjang retak (a) = 11 mm
3. Panjang spesimen = 150 mm
4. Lebar spesimen = 50 mm



Gambar 3.4. Pembebanan pada spesimen

3.3 Data Masukan

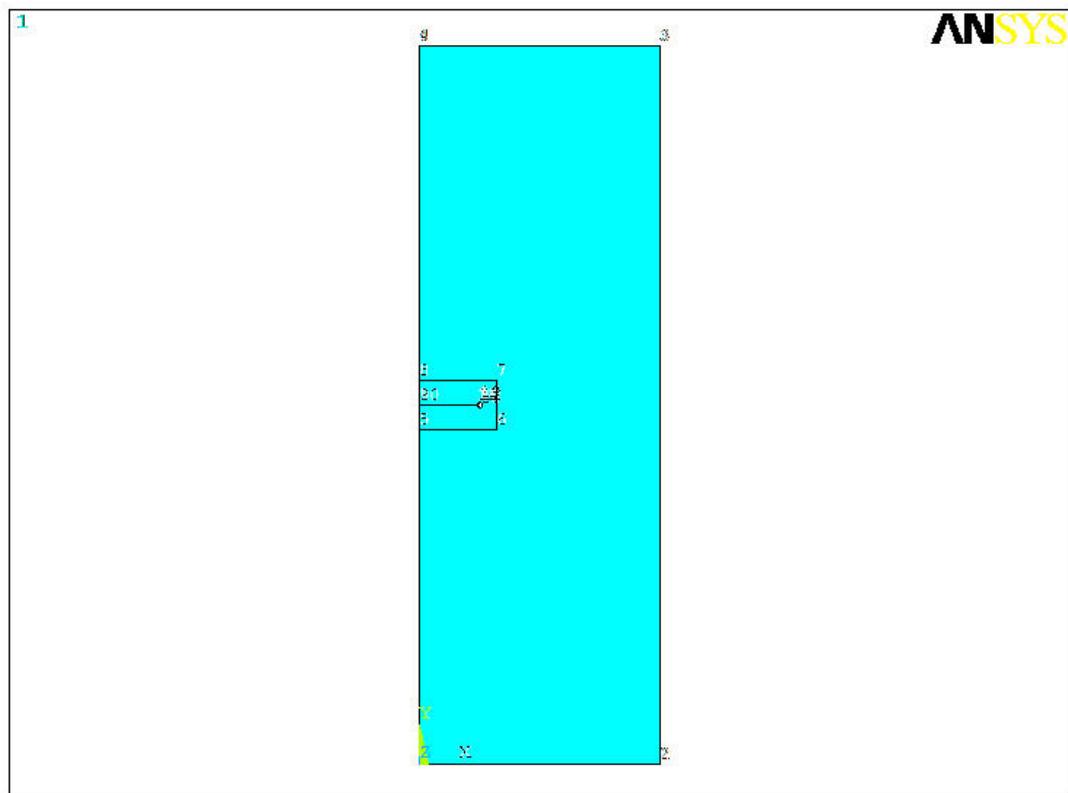
- Modulus Elastisitas bahan (E) = 73.100 Mpa
- *Poisson ratio* = 0,33
- Tegangan *Yield* = 345 Mpa
- Tegangan *Ultimate* = 483 Mpa

3.4 Tempat dan Waktu Penelitian

Pemodelan dilakukan Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Fakultas Teknik Jurusan Mesin Universitas Brawijaya.

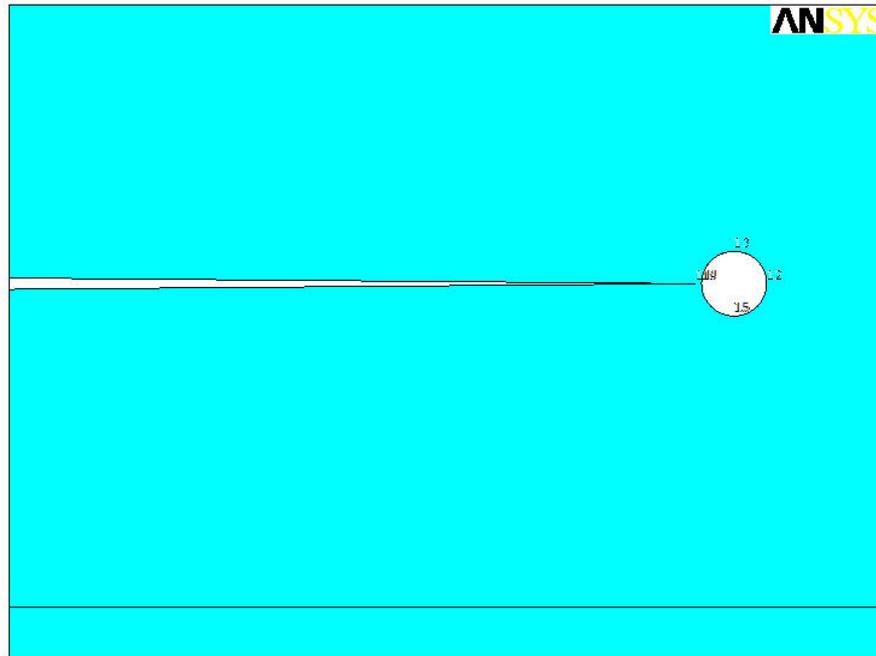
3.5 Pemodelan Spesimen

Pemodelan spesimen dilakukan dengan menggunakan pemodelan setengah bagian yaitu dengan jarak lubang dengan ujung retak $H = 1\text{mm}$, $H = 2\text{mm}$, $H = 3\text{mm}$, $H = 4\text{mm}$, $H = 5\text{mm}$. Variasi diameter lubang dengan, $D = 1\text{mm}$, $D = 2\text{mm}$, $D = 3\text{mm}$, $D = 4\text{mm}$, $D = 5\text{mm}$. Setelah pemodelan selesai, langkah selanjutnya adalah proses pembagian elemen (*meshing*). Pada daerah ujung retak dilakukan *meshing* untuk menghasilkan elemen singular pada ujung retak. Setelah proses *meshing* selesai, dilakukan pemberian *constrain* pada *sheet*, dilanjutkan proses *solving* dan perhitungan faktor intensitas tegangan.

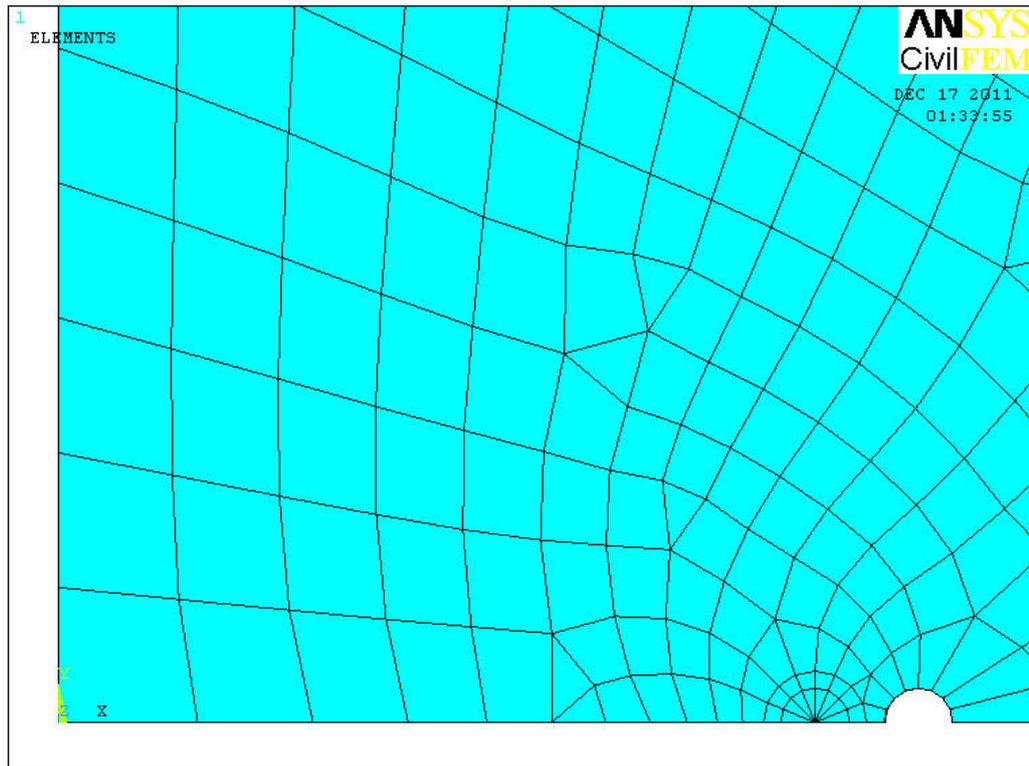


Gambar 3.5. Pemodelan satu bagian

Jenis elemen yang digunakan adalah isoparametrik quadrilateral 8 node. Program ANSYS menyediakan perintah KSCON untuk pemodelan ujung retak yang mensyaratkan pemberian elemen singular pada *keypoint*, bukan pada node. Perhitungan faktor intensitas tegangan dilakukan dengan mengeksekusi perintah KCALC pada program ANSYS.



Gambar 3.6. Pemodelan lubang

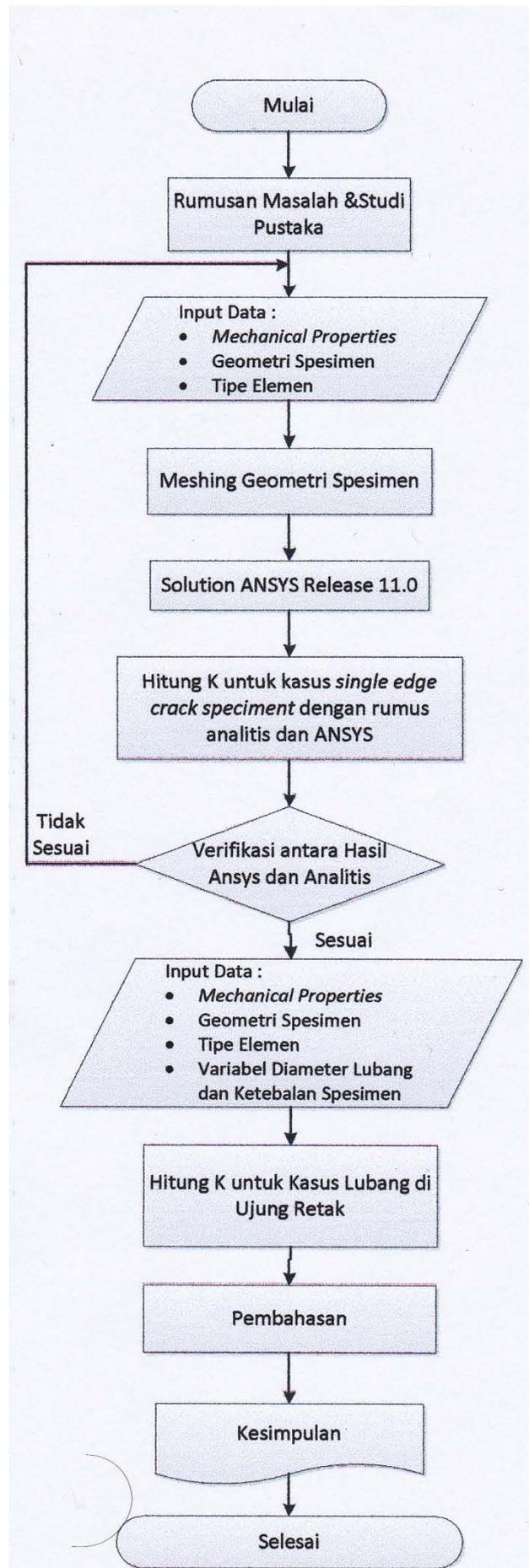


Gambar 3.7. Hasil *meshing*

3.6 Prosedur Penelitian

Langkah – langkah yang dilaksanakan dalam penelitian ini adalah :

1. Dipersiapkan alat yang digunakan untuk penelitian.
2. *Input data mechanical properties* aluminium 2024 – T3.
3. Dilakukan pemodelan geometri pada ANSYS.
4. Dilakukan *meshing* pada Ansys.
5. Pemodelan pembebanan siklus.
6. *Running (solving)* dengan Ansys 11.0
7. Dilakukan pembacaan hasil.
8. Dilakukan pembahasan dan menarik kesimpulan.



Gambar 3.8 Diagram alir penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Verifikasi

Verifikasi dilakukan untuk menguji prosedur perhitungan simulasi ANSYS, yaitu dengan melakukan perbandingan perhitungan faktor intensitas tegangan (K) secara analitis dan dengan metode simulasi ANSYS pada *single edge crack specimen*. Panjang retak, a, divariasikan sehingga dari hasil perhitungan secara analitis dan metode simulasi ANSYS tersebut diketahui kecenderungan faktor intensitas tegangan. Rumus analitis perhitungan faktor intensitas tegangan pada *single edge crack specimen* adalah seperti pada persamaan (2 – 4) dan (2 – 6).

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 1,12 - 0,231\left(\frac{a}{W}\right) + 10,55\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21,72\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30,39\left(\frac{a}{W}\right)^4$$

dengan ketentuan,

σ (tegangan nominal)	= 125 Mpa
a (panjang retak)	= 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm, 15 mm
W (lebar spesimen)	= 50 mm

Hasil Perhitungan secara analitis dan hasil perhitungan dengan program ANSYS ditampilkan dalam tabel berikut.

Tabel 4.1. Perbandingan hasil perhitungan faktor intensitas tegangan antara metode analitis dan program ANSYS.

Panjang Retak a (mm)	Faktor Intensitas Tegangan K (Mpa.m ^{1/2})		Rasio (%)
	K ANSYS	K Analitis	
11	33,16262	32,981667	0,180956
12	36,0945	35,736500	0,358002
13	38,88501	38,646243	0,238766
14	41,95829	41,735054	0,223237
15	45,49148	45,030562	0,460916

Pada tabel 4.1 diketahui bahwa spesimen dengan panjang retak 11 mm memiliki nilai K sebesar 33,16262 Mpa.m^{1/2}. Nilai ini merupakan nilai K tanpa lubang atau K₀ yang selanjutnya akan dipakai sebagai pembanding dengan nilai K pada spesimen yang diberi lubang atau K₁. Rasio perbedaan dirumuskan (γ) menunjukkan besarnya perbedaan dari hasil yang digunakan pada kedua metode perhitungan. Rasio perbedaan dirumuskan,

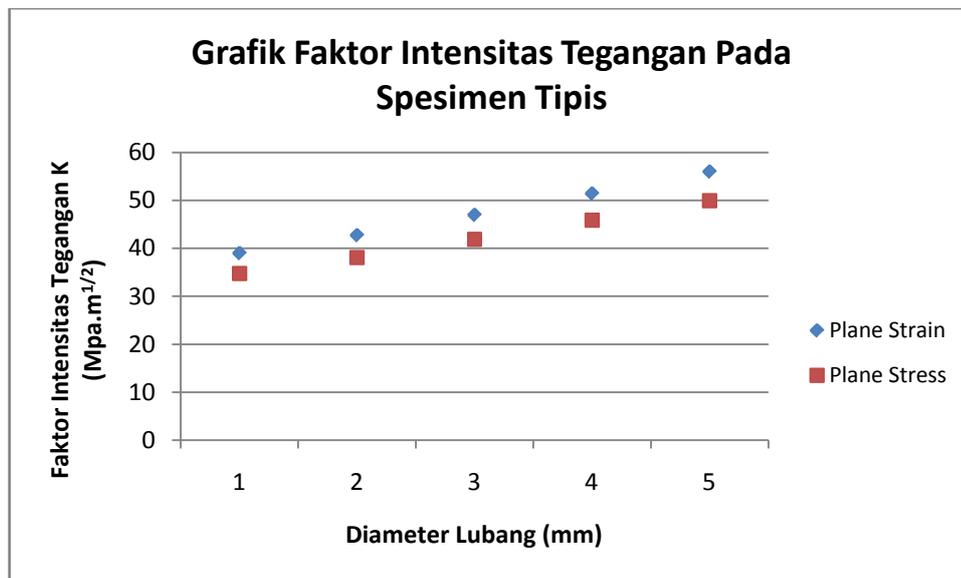
$$\gamma = \left[\frac{(K_{ANSYS} - K_{Analitis})}{K_{analitis}} \right] \cdot 100\%$$

Pada tabel 4.1, diketahui bahwa hasil perhitungan K dengan metode simulasi ANSYS memiliki kecenderungan yang sama dengan metode analitis. Rasio perbedaan faktor intensitas tegangan dari kedua metode tersebut rata – rata sebesar 0,708497 %. Data ini menunjukkan bahwa tingkat keyakinan prosedur ANSYS lebih dari 95 % yang berarti metode ini cukup memenuhi. Perbedaan antara metode analitis dan simulasi disebabkan oleh pemodelan secara setengah bagian pada simulasi ANSYS.

4.2 Hasil Perhitungan ANSYS

4.2.1 Spesimen dengan Ketebalan 2,5 mm

Pada spesimen dengan ketebalan 2,5 mm terdapat lubang di depan ujung retak. Lubang memiliki lima variasi diameter (D), mulai dari 1 mm, hingga 5 mm. Hasil perhitungan untuk masing – masing variasi lubang ditampilkan pada lampiran 1. Dalam skripsi ini digunakan ukuran elemen singular ujung retak sebesar $r = 0,05$ mm dan jumlah sebanyak $n = 6$ elemen. Berikut ini ditampilkan grafik faktor intensitas tegangan pada spesimen tipis.

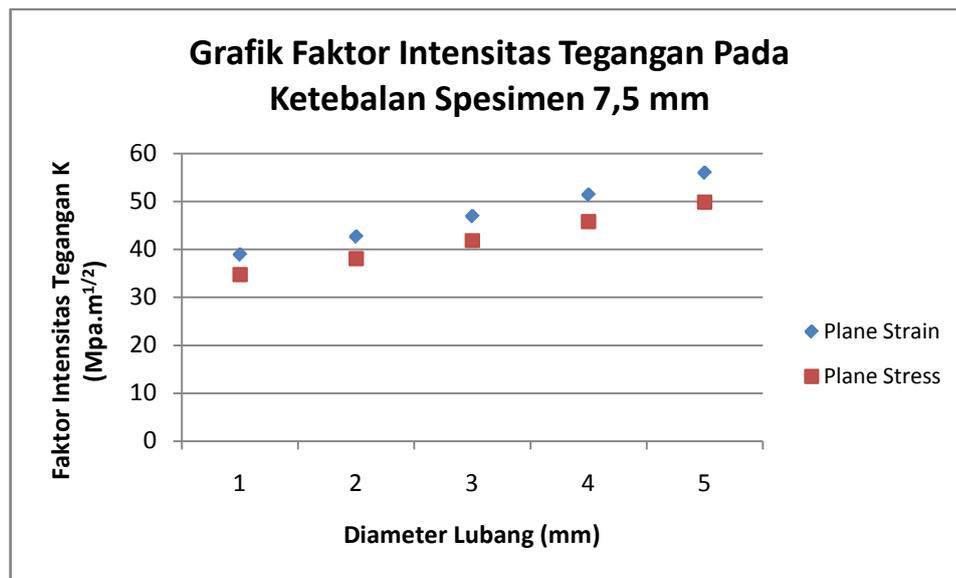


Gambar 4.1 Grafik hubungan faktor intensitas tegangan pada spesimen tipis

Pada gambar 4.1 diketahui bahwa nilai faktor intensitas tegangan ujung retak (K_1) untuk masing – masing diameter lubang akan semakin besar dengan meningkatnya ukuran diameter. Hal ini terlihat dari nilai plane stress maupun plane strain berbanding lurus dengan besarnya diameter lubang. Dapat dilihat juga pada persamaan Griffith, $G = \frac{K_1^2}{E}$ untuk plane stress, dapat terlihat bahwa semakin besar nilai pembilang, K_1 sementara nilai modulus elastisitas tetap, maka akan dihasilkan kecenderungan meningkat juga. Dan, untuk plane strain, $G = \frac{K_1^2 (1-\nu^2)}{E}$ akan menghasilkan kecenderungan yang sama karena nilai ν dan E tetap, dimana ν merupakan angka poisson dan E merupakan modulus elastisitas material.

4.2.2 Spesimen dengan Ketebalan 7,5 mm

Konfigurasi ini berupa spesimen dengan retak dan lubang terletak di depan ujung retak. Lubang memiliki lima variasi diameter (D) yang besarnya sama dengan spesimen 2,5 mm. Hasil perhitungan faktor intensitas tegangan ditampilkan pada lampiran 1. Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak pada tebal spesimen 7,5 mm ditampilkan pada gambar 4.2 berikut,



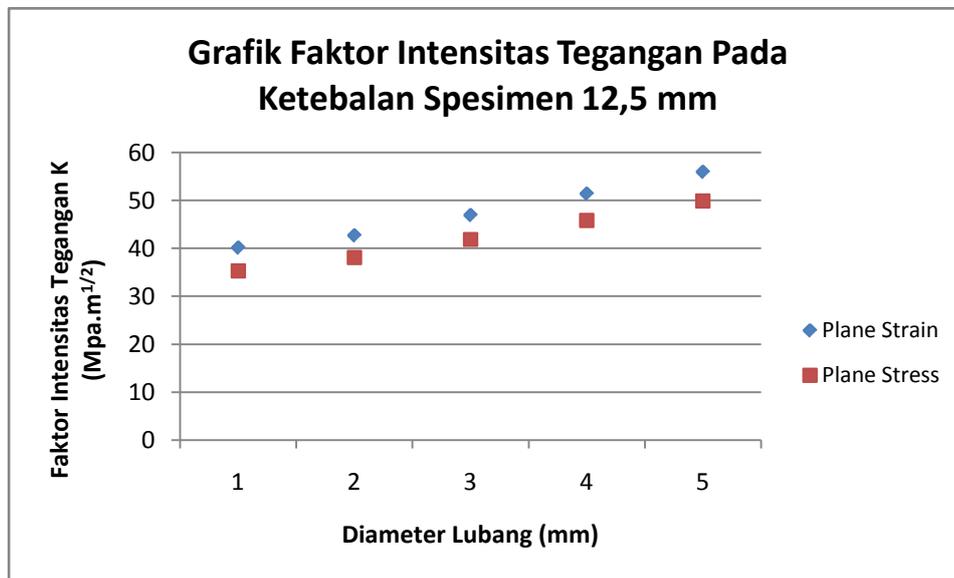
Gambar 4.2 Grafik hubungan faktor intensitas tegangan pada spesimen ketebalan menengah

Gambar 4.2 merupakan hubungan variasi nilai K untuk ketebalan spesimen 7,5 mm pada masing – masing diameter lubang (D). Pada gambar 4.2 nilai K_1 menunjukkan hal yang sama dengan gambar 4.1. Nilai K_1 pada masing – masing diameter lubang cenderung meningkat, berbanding lurus dengan meningkatnya ukuran diameter lubang. Konfigurasi dengan diameter (D) yang besar dan ketebalan spesimen 7,5 mm memiliki nilai K_1 yang paling tinggi jika dibandingkan dengan ketebalan spesimen 2,5 mm yaitu sebesar $56,035 \text{ Mpa.m}^{1/2}$ untuk plane strain dan $49,933 \text{ Mpa.m}^{1/2}$ untuk plane stress.

4.2.3 Spesimen dengan Ketebalan 12,5 mm

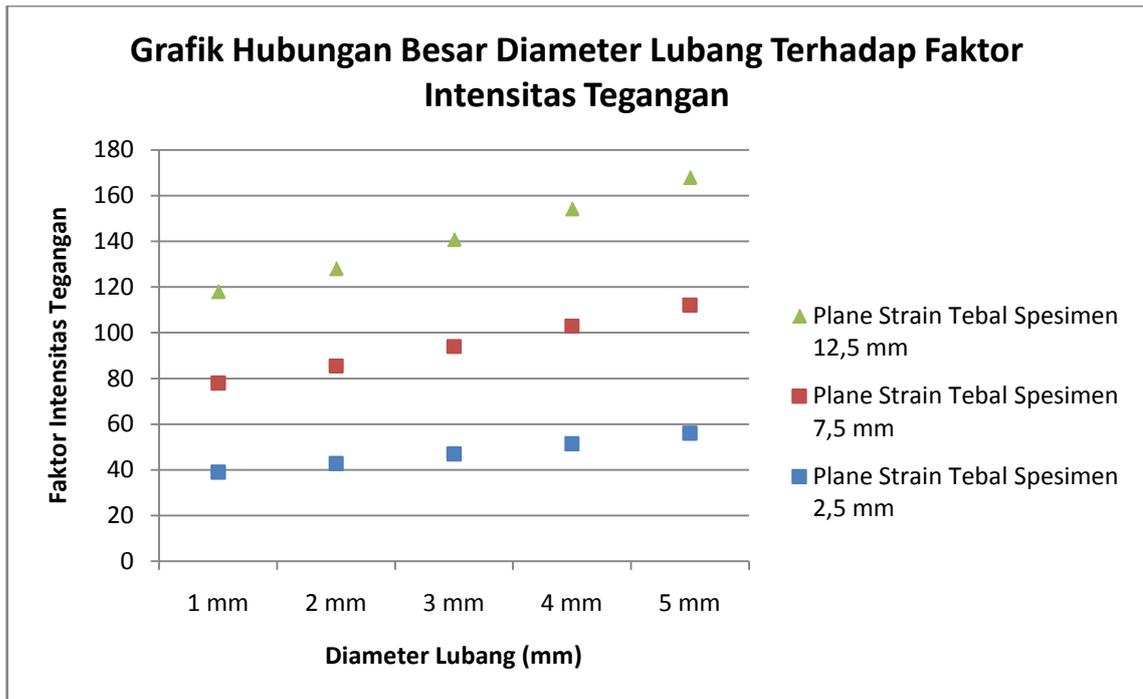
Konfigurasi ini berupa spesimen dengan retak dan lubang terletak di depan ujung retak. Lubang memiliki lima variasi diameter (D) yang besarnya sama dengan spesimen yang memiliki ketebalan 2,5 mm dan 7,5 mm. Hasil perhitungan faktor

intensitas tegangan ditampilkan pada lampiran 1. Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak pada tebal spesimen 12,5 mm ditampilkan pada gambar 4.3 berikut,

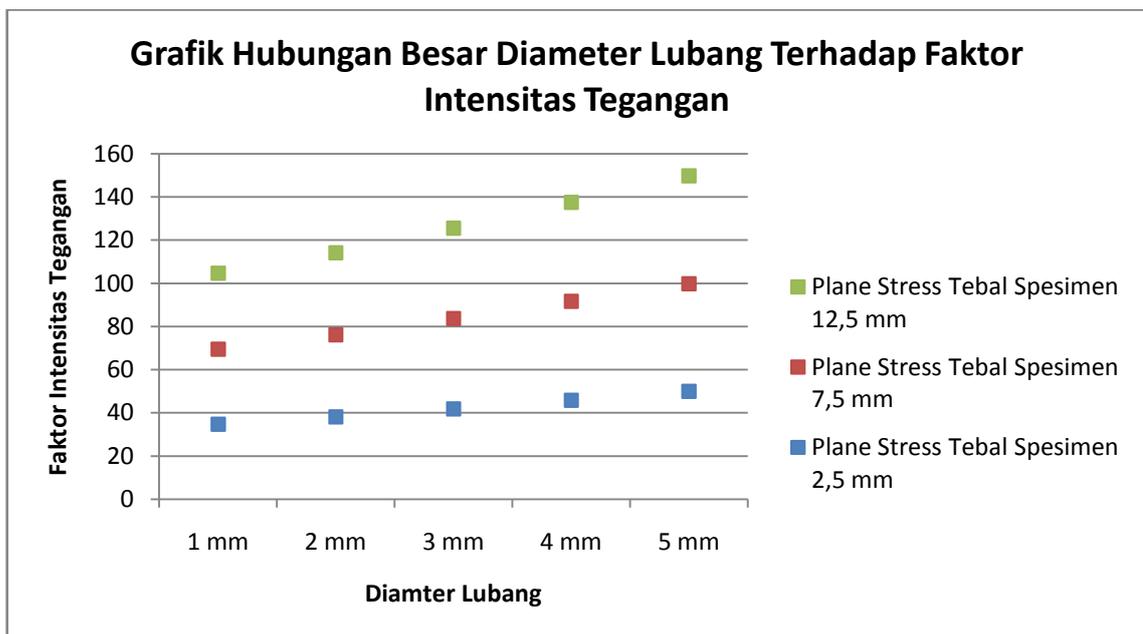


Gambar 4.3 Grafik hubungan faktor intensitas tegangan pada spesimen tebal

Gambar 4.3 menunjukkan variasi nilai K_1 untuk konfigurasi dengan ketebalan spesimen 12,5 mm pada masing – masing diameter lubang. Gambar 4.3 merupakan grafik K_1 pada masing – masing diameter yang menunjukkan kecenderungan yang sama dengan gambar 4.1 dan 4.2. Nilai K_1 semakin meningkat saat ukuran diameter lubang bertambah besar. Pada diameter 1 mm bernilai paling rendah dibandingkan dengan variasi diameter lain, yaitu sebesar $40,155 \text{ Mpa.m}^{1/2}$ untuk nilai plane strain dan sebesar $35,254 \text{ Mpa.m}^{1/2}$ untuk nilai plane stress. Tetapi, bila dibandingkan dengan spesimen yang memiliki tebal 2,5 mm dan 7,5 mm nilai K_1 tersebut masih tergolong tinggi karena pola grafik spesimen dengan tebal 12,5 mm berada di atas pola grafik spesimen dengan tebal 2,5 mm dan 7,5 mm.



Gambar 4.4 Grafik antar variabel hubungan faktor intensitas tegangan dan diameter lubang



Gambar 4.5 Grafik antar variabel hubungan faktor intensitas tegangan dan diameter lubang

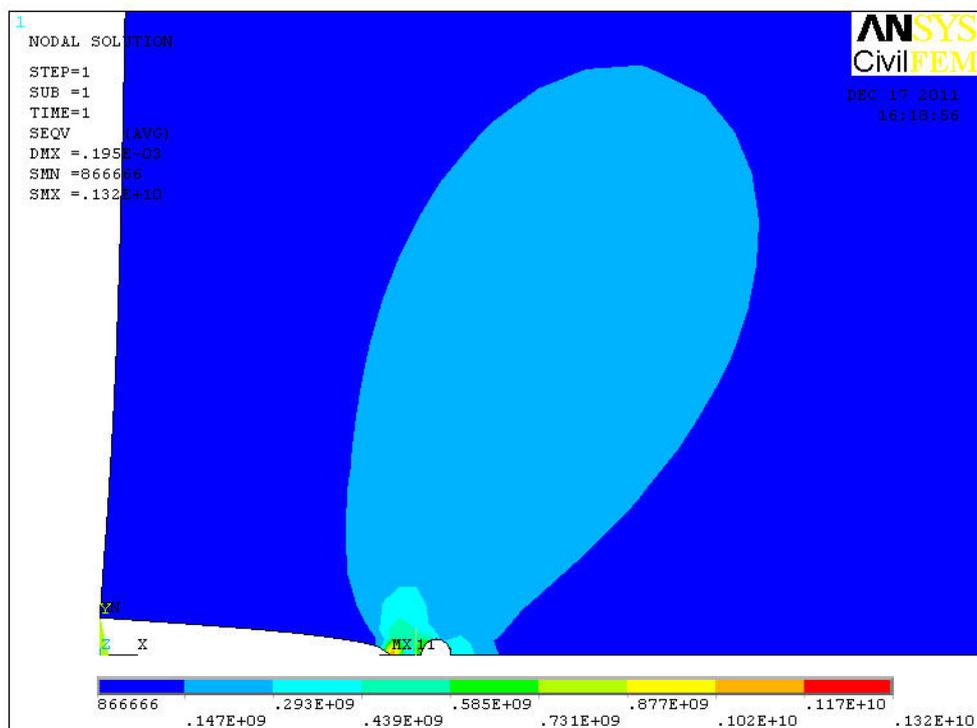
4.3 Pembahasan

Pada subbab 4.2 telah diketahui variasi nilai faktor intensitas tegangan ujung retak (K_1) yang disebabkan oleh berbagai konfigurasi diameter lubang (D), dan variasi ketebalan spesimen. Variasi nilai K_1 menunjukkan bahwa faktor intensitas tegangan dipengaruhi oleh faktor geometri pada spesimen sehingga berpengaruh pada nilai K_1 .

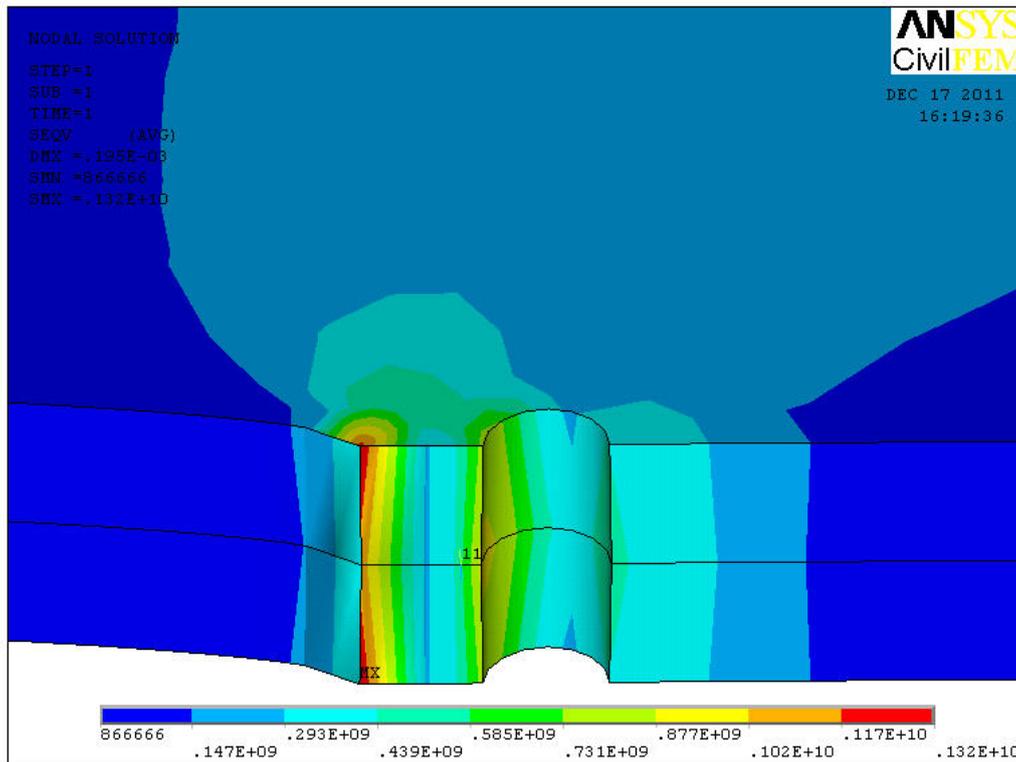
Pada ujung retak dan sisi lubang terdapat pemusatan tegangan. Secara umum, konfigurasi lubang di ujung retak akan mengakibatkan interaksi tegangan yang melibatkan tegangan di ujung retak dan sisi lubang tersebut. Interaksi tegangan ini pada akhirnya mempengaruhi besar kecilnya nilai K_1 . Pada masing – masing spesimen, baik tebal, sedang, dan tipis, menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu semakin meningkat dan berbanding lurus dengan D yang semakin besar. Peningkatan ini terjadi hingga $D = 5$ mm.

4.3.1 Spesimen dengan Ketebalan 2,5 mm

Pada daerah di depan ujung retak, nilai K_1 akan semakin meningkat dengan semakin besarnya diameter lubang. Interaksi tegangan yang melibatkan tegangan ujung retak dan tegangan di sekitar lubang menyebabkan nilai K_1 meningkat. Pola distribusi tegangan ditampilkan dalam gambar 4.6 dan 4.7 berikut,

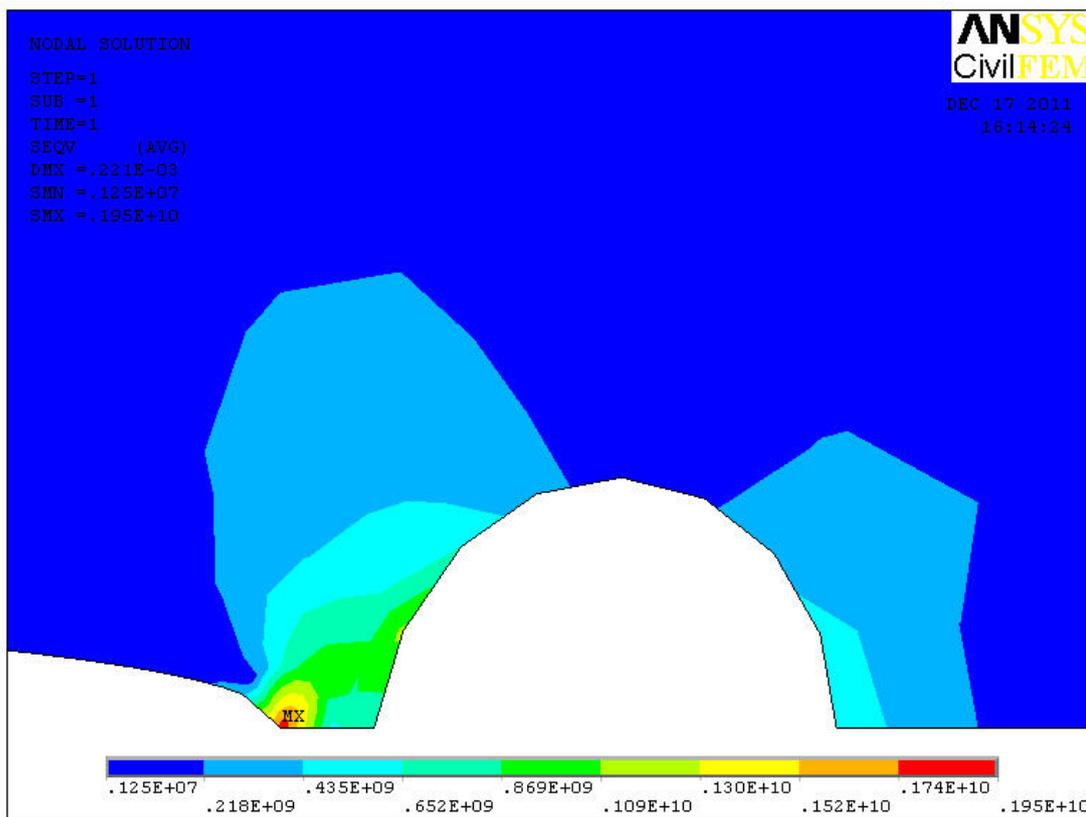
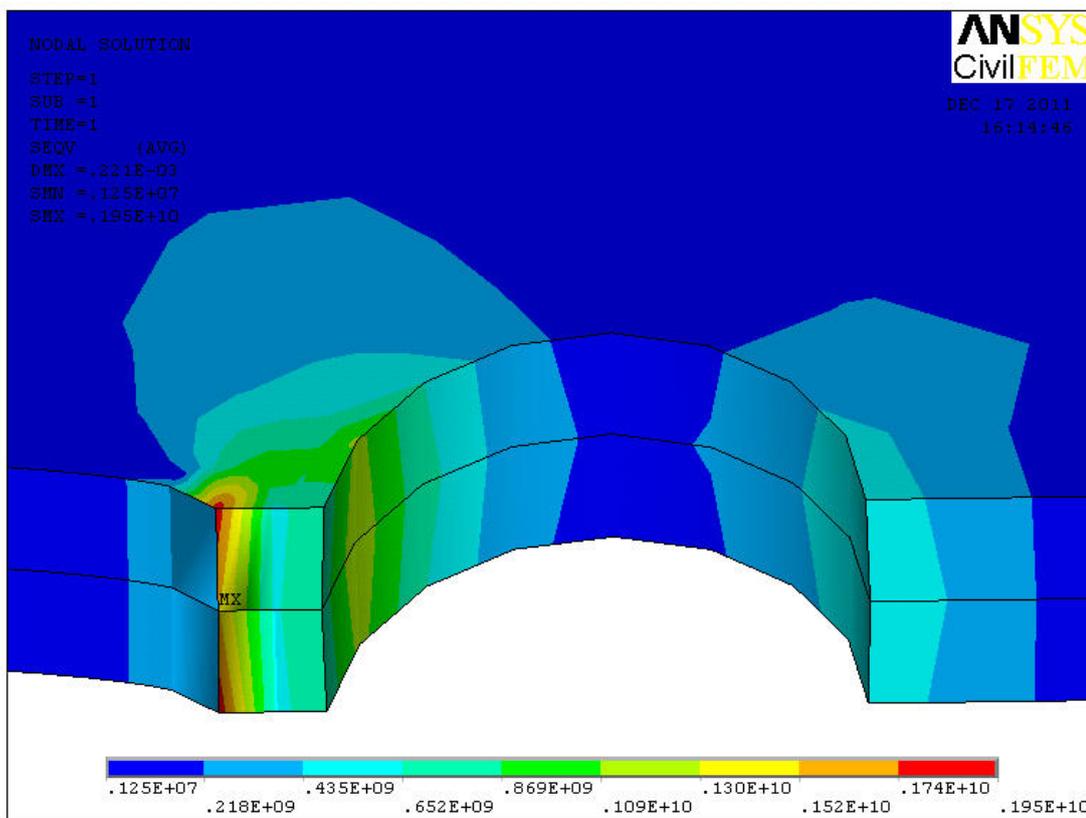


Gambar 4.6 Contoh distribusi tegangan pada $D = 1$ mm



Gambar 4.7 Contoh distribusi tegangan pada $D = 1$ mm

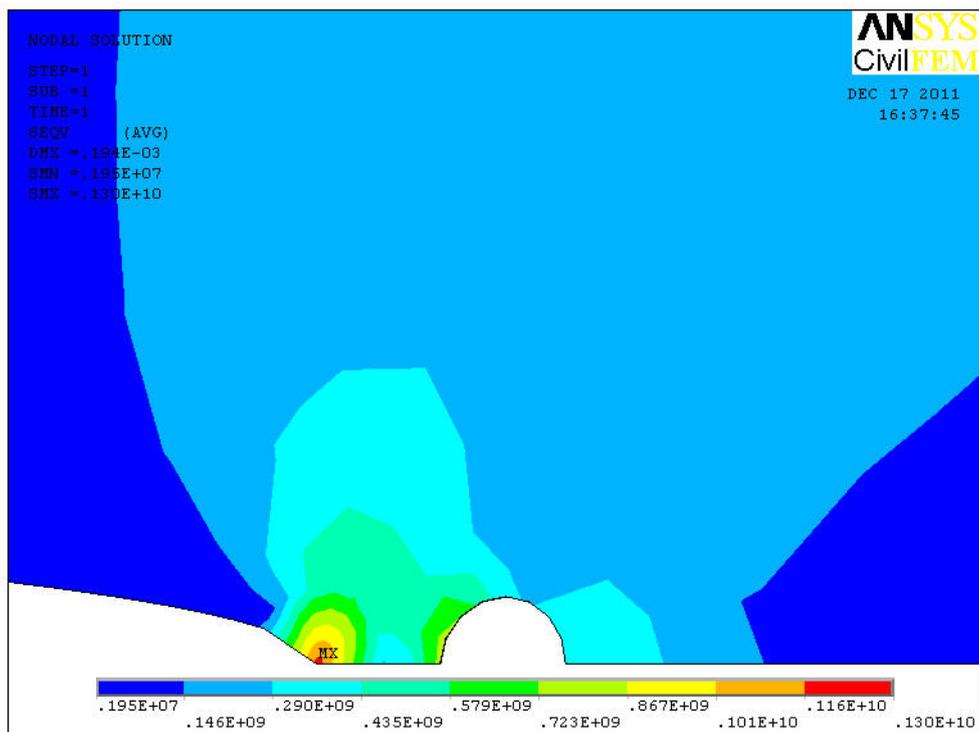
Gambar 4.6 menunjukkan adanya interaksi tegangan antara ujung retak dan lubang yang ditandai dengan daerah biru muda. Pada daerah ujung retak dan sisi lubang yang tegak lurus dengan arah pembebanan terjadi tegangan tarik. Dengan mendekatnya tepi lubang ke ujung retak seiring membesarnya diameter lubang, maka tegangan tarik itu semakin besar sehingga potensi peningkatan K_I juga semakin besar. Kondisi ini tampak pada gambar 4.8 dan 4.9 pada $D = 5$ mm berikut ini,

Gambar 4.8 Contoh distribusi tegangan pada $D = 5$ mmGambar 4.9 Contoh distribusi tegangan pada $D = 5$ mm

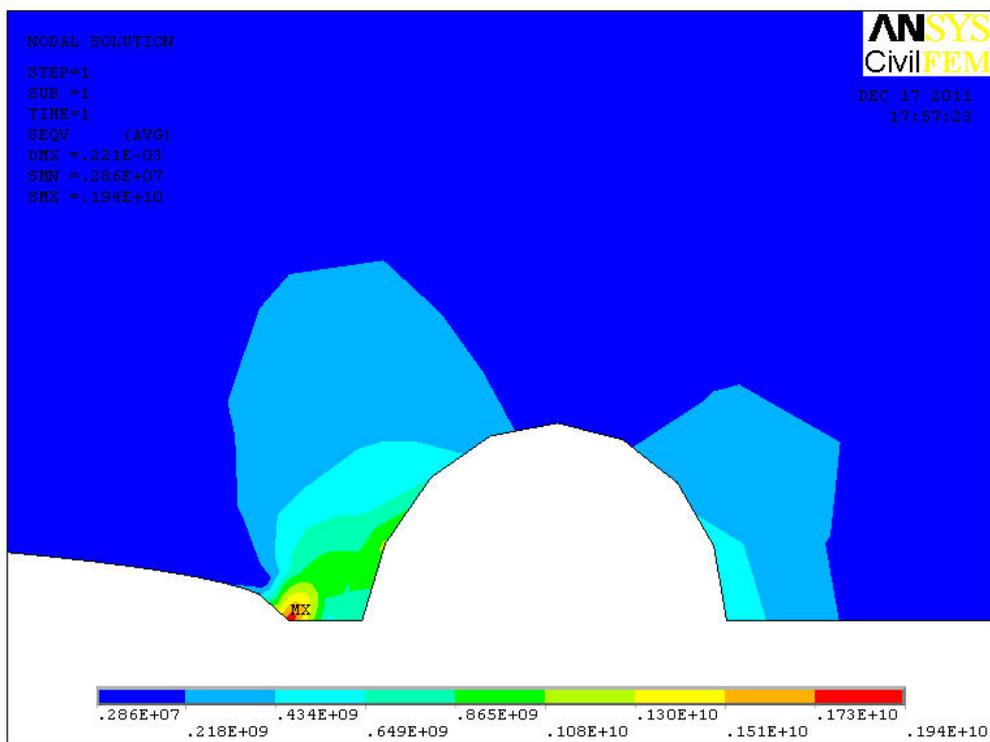
Pada gambar 4.8 dan 4.9 dapat terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai K_1 dengan bertambahnya ukuran diameter lubang. Hal ini terlihat pada gambar 4.8 dan 4.9 tersebut dengan semakin besar dan semakin jelasnya pola berwarna hijau terang antara ujung retak dan lubang. Ukuran *plane stress* selalu lebih besar daripada *plane strain*, dapat mencapai dua kali lipatnya (H.O. Fuchs & R.I. Stephens, 1980). Dengan perintah KCALC pada Ansys dapat terbukti terjadi peningkatan nilai K_1 , yang dapat dilihat pada lampiran 2. Sehingga untuk spesimen dengan ketebalan 2,5 mm diameter lubang yang memiliki nilai K_1 terendah terdapat pada spesimen dengan diameter lubang 1 mm.

4.3.2 Spesimen dengan Ketebalan 7,5 mm

Pada spesimen dengan ketebalan 7,5 mm, nilai K_1 memiliki kecenderungan yang sama dengan spesimen tebal 2,5 mm. Dimulai dari diameter lubang terkecil, 1 mm nilai K_1 cenderung bertambah hingga mencapai titik tertinggi pada diameter lubang 5 mm. Dengan bertambahnya diameter lubang, membuat daerah tepi lubang semakin mendekati ujung retak. Hal ini mengakibatkan interaksi tegangan semakin besar. Gambar 4.10 adalah contoh distribusi tegangan dengan diameter lubang $D = 1$ mm. Pada gambar 4.10, semakin dekat jarak tepi lubang maka interaksi tegangan semakin besar. Hal ini terlihat pada gambar 4.11 dari menyatunya pola berwarna hijau dan hijau terang yang menandakan terjadi peningkatan pada sisi lubang. Nilai K_1 paling rendah terdapat pada lubang dengan $D = 1$ mm yaitu sebesar $38,985 \text{ Mpa.m}^{1/2}$ dan terbesar terdapat pada $D = 5$ mm yaitu, $56,035 \text{ Mpa.m}^{1/2}$. Dapat dilihat juga pada persamaan Griffith, $G = \frac{K_1^2}{E}$ untuk *plane stress*, dapat terlihat bahwa semakin besar nilai pembilang, K_1 sementara nilai modulus elastisitas tetap, maka akan dihasilkan kecenderungan meningkat juga. Dan, untuk *plane strain*, $G = \frac{K_1^2(1-\nu^2)}{E}$ akan menghasilkan kecenderungan yang sama karena nilai ν dan E tetap, dimana ν merupakan angka poisson dan E merupakan modulus elastisitas material. Pada permukaan plat spesimen memiliki nilai tegangan normal dan geser bernilai nol karena yang terjadi pada permukaan adalah kondisi *plane stress*. Sedangkan bagian lebih dalam pada plat yang berada dekat dengan titik puncak retak, cenderung memiliki kondisi *plane strain* sebagai akibat dari *elastic constrain* dari retak (H.O. Fuchs & R.I. Stephens, 1980). Pada pengujian dengan eksperimen sesungguhnya, kondisi *plane stress* maupun *plane strain* tidak dapat diamati karena tidak nampak pada permukaan spesimen logam uji.



Gambar 4.10 Contoh distribusi tegangan pada $D = 1$ mm

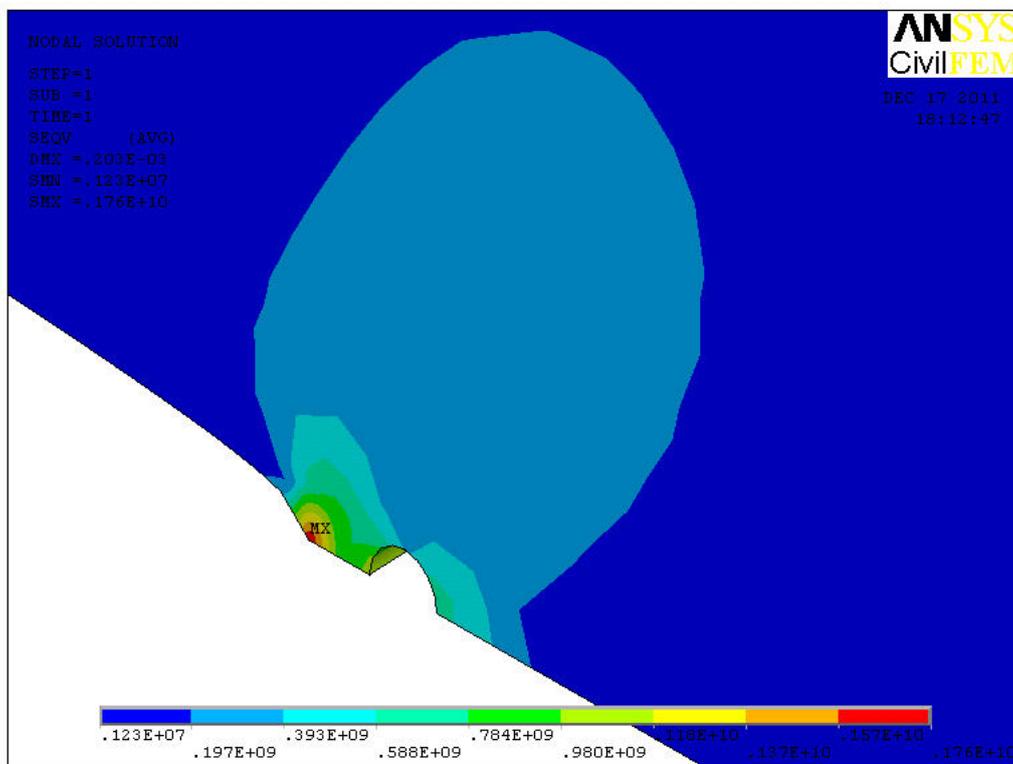


Gambar 4.11 Contoh distribusi tegangan pada $D = 5$ mm

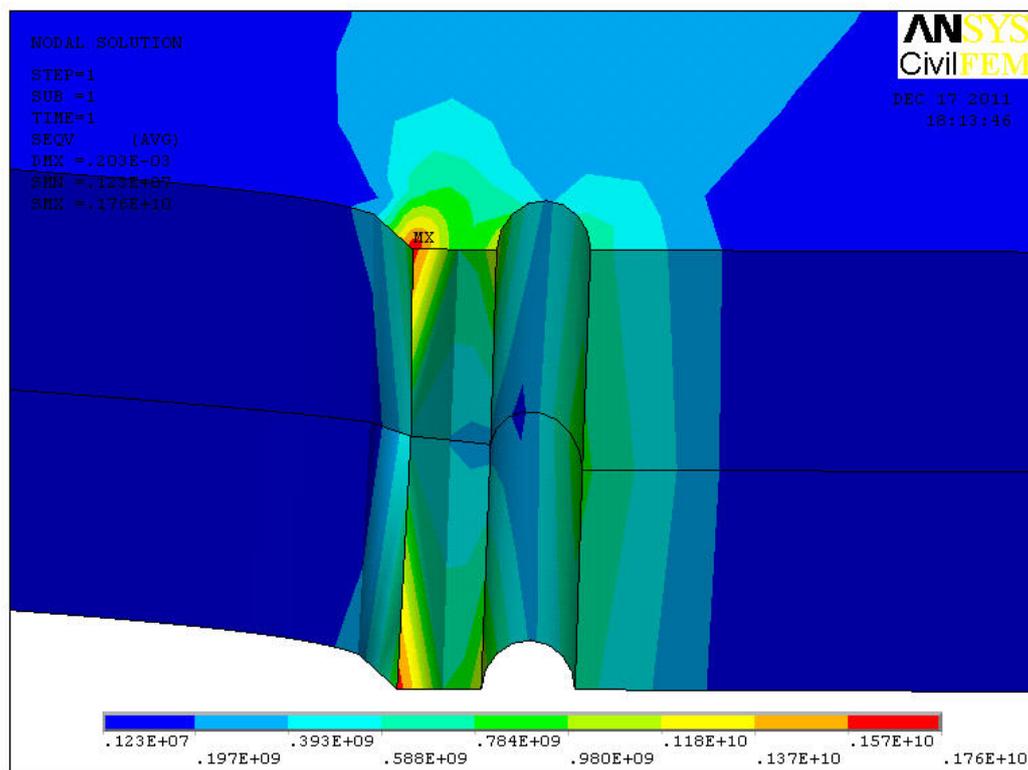
Pada gambar 4.11 terlihat bahwa distribusi tegangan yang ditunjukkan dari pola berwarna biru terang semakin mengecil karena terjadi pemusatan tegangan pada ujung retak dan tepi lubang akibat dari membesarnya ukuran diameter lubang.

4.3.3 Spesimen dengan Ketebalan 12,5 mm

Perilaku K_1 untuk spesimen dengan ketebalan 12,5 mm menunjukkan kecenderungan yang sama dengan dua variasi tebal spesimen sebelumnya. Dimana pada diameter lubang sebesar $D = 1$ mm memiliki nilai K_1 yang terkecil yaitu sebesar 42,712 $\text{Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$ untuk *plane strain* dan 38,061 $\text{Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$ untuk *plane stress*. Contoh distribusi tegangan ditampilkan dalam gambar 4.12,

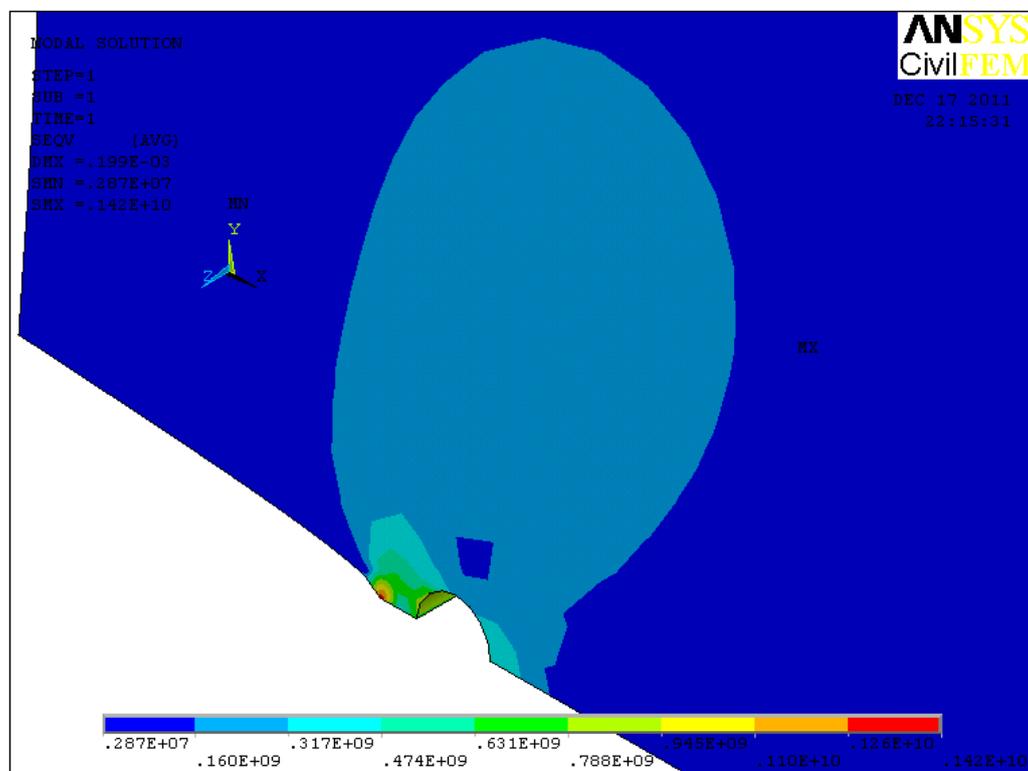


Gambar 4.12 Contoh distribusi tegangan pada $D = 1$ mm

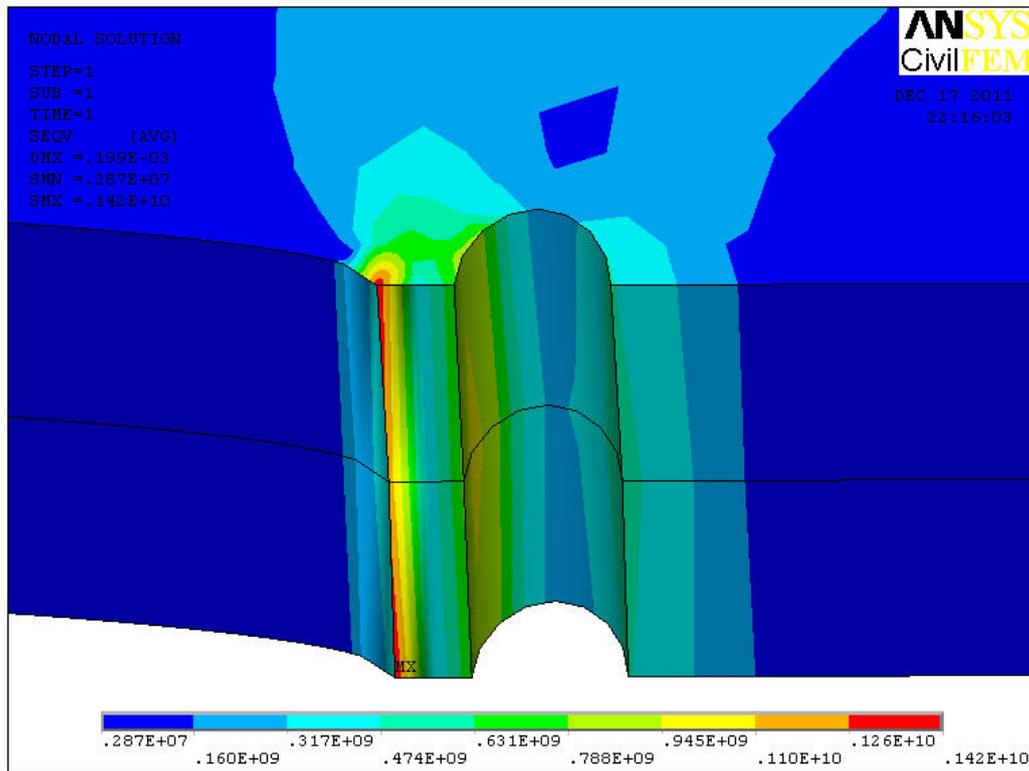


Gambar 4.13 Contoh distribusi tegangan pada $D = 1$ mm

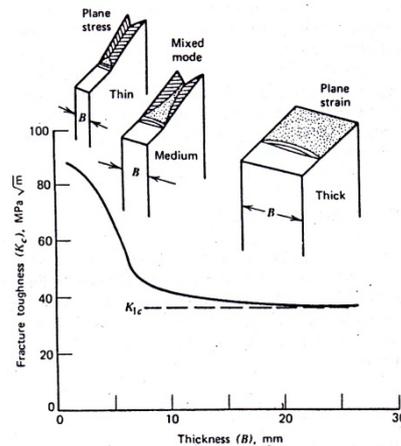
Pada gambar 4.14 merupakan contoh distribusi tegangan pada $D = 5$ mm.



Gambar 4.14 Contoh distribusi tegangan pada $D = 5$ mm



Gambar 4.15 Contoh distribusi tegangan pada $D = 5$ mm



Gambar 4.16. Efek ketebalan spesimen

Sumber : H.O. Fuchs. *Metal Fatigue in Engineering*. 1980

Gambar 4.15 menjelaskan hubungan antara *fracture toughness* (K_{IC}) dan ketebalan material pada *single edge crack specimen*. Terlihat bahwa pada spesimen tipis (2,5mm), memiliki nilai K_{IC} yang tinggi saat spesimen mulai terbuka dan pada daerah ujung retak terbentuk permukaan patahan (*shear lips*), yang berlaku adalah *plane stress*.. Saat ketebalan spesimen bertambah, nilai dari K_{IC} berkurang, hal ini disebut mode campuran. Untuk spesimen tebal, seluruh permukaan patahan rata dan nilai K_{IC} mencapai nilai minimum. Nilai K_{IC} minimum ini disebut *plane strain*.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasar perhitungan dan analisis faktor intensitas tegangan ujung retak (K_1) yang dipengaruhi oleh lubang di sekitar ujung retak dapat disimpulkan bahwa konfigurasi lubang dengan variasi diameter (D), dan ketebalan spesimen (t) masing – masing mempengaruhi nilai K_1 dimana nilai K_1 terendah pada masing – masing spesimen, spesimen dengan ketebalan 2,5 mm terjadi pada variasi lubang dengan diameter $D = 1$ mm yaitu sebesar $34,755 \text{ Mpa.m}^{1/2}$, sedangkan pada spesimen dengan ketebalan 7,5 mm dan 12,5 mm terjadi kecenderungan yang sama yaitu semakin besar variasi diameter lubang maka semakin besar nilai K_1 dan nilai terendah terjadi pada variasi lubang dengan diameter $D = 1$ mm, masing – masing yaitu sebesar $34,739 \text{ Mpa.m}^{1/2}$, dan pada spesimen dengan ketebalan 12,5 mm sebesar $38,061 \text{ Mpa.m}^{1/2}$.

5.2 Saran

1. Pada penelitian ini menggunakan :
 - a. Pemodelan setengah bagian, sementara pada pengujian sebenarnya tidak bisa dilakukan setengah bagian.
 - b. Beban yang diberikan tetap, sedangkan pada pengujian sebenarnya beban yang diberikan terus bertambah.
 - c. Material spesimen linear, sedangkan pada pengujian sebenarnya yang terjadi adalah non linear. Sehingga perlu dikaji dengan metode PYFM.
 - d. Geometri takikan yang digunakan berupa garis, sedangkan pada pengujian sebenarnya tidak menggunakan takikan garis.
 - e. Pemodelan beban yang dipakai masih diasumsikan berada tetap dalam kondisi lurus ke arah sumbu y , sedangkan dalam pengujian yang sebenarnya dapat dimungkinkan bergeser, tidak dalam kondisi tetap lurus.Sehingga dapat dilakukan penelitian lebih lanjut agar hasil yang dihasilkan semakin mendekati eksperimen sesungguhnya.
2. Perlu dilakukan perhitungan dengan mempertimbangkan kondisi material, seperti suhu serta kondisi lingkungan sekitar.

DAFTAR PUSTAKA

ANSYS Release 11.0 Documentation

Bannantine, Julie A; Jess J. Comer; James L. Handrock. 1990. *Fundamental of Metal Fatigue Analysis*. New Jersey: Prentice Hall, Inc.

Dieter, George E. 1990. *Metalurgi Mekanik*. Jakarta: Erlangga.

Fuchs, H.O. and Stephens, R.I. 1980. *Metal Fatigue in Engineering*. Canada: A Wiley-interscience Publication.

Saxena, Ashok. 1998. *Nonlinear Fracture Mechanics for Engineering*. New York: CRC Press.

Shin, C.S.; Wang C. M.; Song, P.S., 1996. "Fatigue Damage Repair: A Comparison of Some Possible Methods," *International Journal Fatigue Volume 18 No. 8 pp. 535 – 546*. Inggris Raya: Elsevier Science Ltd.

Skinner, J. D. 2001. *Finite Element Prediction of Plasticity Induced Crack Closure in Three Dimensional Cracked Geometries*. Thesis. Mississippi State: Department of Mechanical Engineering.

Owen D.R.J. and Fawkes, A. J. 1983. *Engineering Fracture Mechanics Numerical Methods and Applications*. Swansea: Pineridge Press Ltd.

Vulic, Naned.; Stejpan Jecic; Vastroslov Grubisic. 1997. "Validation of Crack Arrest Technique by Numerical Modelling," *International Journal Fatigue Volume 19 No. 4 pp. 283 – 291*. Inggris Raya: Elsevier Science Ltd.

Lampiran 2. Makro Program Ansys

```

/PREP7
!*.....[pemilihan elemen]
ET,1,PLANE82
!*
ET,2,SOLID95
!*
!*.....[penentuan material]
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,73.1e9
MPDATA,PRXY,1,,0.33
!*.....[pembuatan geometri]
K, , , ,
K, ,11e-3, ,
K, ,0.05, ,
K, ,0.05,75e-3, ,
K, ,0.075, ,
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 5
LSTR, 5, 1
FLST,2,5,4
FITEM,2,5
FITEM,2,4
FITEM,2,3
FITEM,2,2
FITEM,2,1
AL,P51X
CYL4,12.5e-3,0,0.5e-3
ASBA, 1, 2
!*
KSCON,2,0.5e-3,1,6,0.5,

FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,6
FITEM,5,-7
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, , _Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,6, , , , ,1
!*
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,3
AESIZE,P51X,2e-3,
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
!*
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 3
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1

```



```

!*
CMDELE, _Y
CMDELE, _Y1
CMDELE, _Y2
!*
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
FLST,3,1,5,ORDE,1
FITEM,3,3
FLST,3,1,5,ORDE,1
FITEM,3,3
AGEN, ,P51X, , , , -1.25e-3, , ,1
FLST,3,1,5,ORDE,1
FITEM,3,3
ARSYM,Z,P51X, , , ,0,0
!*
TYPE, 2
EXTOPT,ESIZE,0,0,
EXTOPT,ACLEAR,0
!*
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL, _Z4
ESYS,0
!*
!*
VOFFST,3,1.25e-3, ,
!*
VOFFST,1,0.00125, ,
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
VGLUE,P51X
!*.....[pembebanan]
FLST,2,4,4,ORDE,3
FITEM,2,9
FITEM,2,-11
FITEM,2,14
DL,P51X, ,SYMM
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,6
FITEM,2,9
FITEM,2,23
FITEM,2,26
DA,P51X,SYMM
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,31
FITEM,2,55
DL,P51X, ,SYMM
!*
FITEM,2,31
FITEM,2,55
DL,P51X, ,SYMM
FLST,2,8956,1,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-8956
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UZ, , , ,

```

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



```

/AUTO,1
/REP,FAST
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/REPLOT,RESIZE
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,4
FITEM,2,16
/GO
!*
SFL,P51X,PRES,-125e6,
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,11
FITEM,2,28
/GO
!*
SFA,P51X, ,PRES,-125000000
!*.....[solving]
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
!*.....[Pengaturan plane]
LOCAL,11,0,11e-3,0,1.25e-3, , , ,1,1,
CSYS,11,
!*
RSYS,11
AVPRIN,0,0
AVRES,2,
/EFACET,1
LAYER,0
FORCE,TOTAL
!*.....[hide plane 82]
EPLOT
ESEL,U,ENAME,,plane 82
EPLOT
FLST,2,3,1
FITEM,2,4556
FITEM,2,4578
FITEM,2,4574
!*.....[pemilihan node retak]
PATH,a,3,30,20,
PPATH,P51X,1
PATH,STAT
!*.....[faktor intensitas tegangan]
KCALC,0,1,0,0
KCALC,1,1,0,0
!*
FINISJ
!*.....[akhir program]

```

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

