



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 184834

SIMULASI PERAMBATAN RETAK PADA BAJA DAN ALUMINIUM AKIBAT PEMBEBANAN STATIS DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

NIMBA SHARON LANDE
NRP 0251154000092

Dosen Pembimbing
Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - TL 184834

**SIMULASI PERAMBATAN RETAK PADA BAJA DAN
ALUMINIUM AKIBAT PEMBEBANAN STATIS DENGAN
MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**NIMBA SHARON LANDE
NRP 0251154000092**

**Dosen Pembimbing
Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Surabaya 2019**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 184834

SIMULATIONS OF CRACK PROPAGATION ON STEEL AND ALUMINIUM DUE TO STATIC LOAD USING FINITE ELEMENT METHOD

**NIMBA SHARON LANDE
NRP 0251154000003**

Advisors

**Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.**

**MATERIALS ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**SIMULASI PERAMBATAN RETAK PADA BAJA DAN
ALUMINIUM AKIBAT PEMBEBANAN STATIS DENGAN
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Material Inovatif
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

NIMBA SHARON LANDE

NRP 0251154000092

Disetujui Oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. (Pembimbing I)
2. Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. (Pembimbing II)

SURABAYA

Juli 2019



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SIMULASI PERAMBATAN RETAK PADA BAJA DAN ALUMINIUM AKIBAT PEMBEBANAN STATIS DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Nimba Sharon Lande
NRP : 0251154000092
Departemen : Teknik Material
Dosen Pembimbing : Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph.D.
Co - Pembimbing : Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

Abstrak

Mengetahui mekanisme terjadinya retakan membantu industri untuk menghindari kerugian. Penelitian ini dilakukan dengan bentuk simulasi berbasis metode elemen hingga, dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh jenis material dan pengaruh lubang pada spesimen terhadap perambatan retak. Variabel penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah jumlah lubang, yaitu satu, dua, tiga, dan empat lubang, posisi lubang dan jenis material, yaitu AISI 1020 dan AA 2024 – T3. Hasil dari penelitian ini berupa arah rambatan retak dan kekuatan spesimen terhadap perambatan retak dengan membandingkan faktor intensitas tegangan (K). Arah perambatan retak cenderung kearah lubang terdekat dari initial crack dan retakan. K terkecil pada spesimen satu, dua, tiga, dan empat lubang adalah $8,23 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$, $5,63 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$, $7,50 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$, dan $5,96 \times 10^6 \text{ MPa}$. Semakin banyak lubang maka semakin tinggi kekuatan spesimen, dengan K pada dua empat lubang sebesar $6,96 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$ dan $5,96 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$. AA 2024 – T3, K senilai $3,94 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$, memiliki ketahanan terhadap retak lebih tinggi dari AISI 1020, dengan K senilai $9,95 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$.

Kata kunci: Elemen Hingga, Lubang, Mekanisme Rambatan, Perambatan Retak.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SIMULATIONS OF CRACK PROPAGATION ON STEEL AND ALUMINUM DUE TO STATIC LOAD USING FINITE ELEMENT METHOD

Student Name : Nimba Sharon Lande
NRP : 0251154000092
Department : Material Engineering
Advisors : Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph.D.
: Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

Abstract

Knowing the mechanism of a crack is an obligation for the industry to avoid losses due to cracks. This research was conducted in the form of a finite element method simulation. The research analyzes the effect of material type and holes on the specimen on crack propagation. The research variables used in this study are the number of holes, their position of holes, and type of material, where the material used is AISI 1020 steel and aluminum alloy AA 2024 - T3. The results of this study are the direction of crack propagation on the specimen with various types of hole positions and the number of holes, as well as plate resistance to crack propagation by comparing the stress intensity factors (K) that occur in cracks. The lowest K in specimen with one, two, three, and four holes are $8,23 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$, $5,63 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$, $7,50 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$, $5,96 \times 10^6 \text{ MPa}$. The more number of the holes, the higher the specimen strength, with the K of the two holes and four holes are $6,96 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$ and $5,96 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$. AA 2024 – T3, with K $3,94 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$, has a higher crack resistance than AISI 1020, with K $9,95 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$.

Keywords: Crack propagation, Finite Element, Holes, Propagation Mechanism.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian penyusunan Tugas Akhir dengan judul **“Simulasi Perambatan Retak Pada Baja dan Aluminium Akibat Pembebanan dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga”**. Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan studi di Departemen Teknik Material Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu penulis dari awal pengerjaan Tugas Akhir ini hingga boleh selesai, diantaranya:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas segala penyertaan-Nya sehingga penulis diberi kelancaran dalam pengerjaan Tugas Akhir hingga selesai
2. Seluruh keluarga dan rekan penulis yang senantiasa memberi dukungan moril dan materiil
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. dan Bapak Wikan Jatimurti S.T., M.Sc., selaku Dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing, memberi arahan dan saran serta nasihat dalam pengerjaan Tugas Akhir ini
4. Seluruh Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Material yang telah memberi ilmu serta didikan bagi penulis

Penulis menyadari dengan keterbatasan ilmu, tentu laporan ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu penulis dengan senang hati menerima kritik dan saran yang membangun. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian Tugas Akhir	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Metode Elemen Hingga	8
2.3 ANSYS.....	12
2.4 Mekanika Patahan	17
2.5 Analisa Tegangan pada Retak.....	20
2.6 Faktor Intensitas Tegangan.....	22
2.8 Sudut Perambatan dari Retak.....	26
2.9 Hubungan Antara Retak Dengan Retak Lain	28
2.10 Karakteristik Laju Perambatan Retak	31
2.11 AA 2024 – T3.....	33
2.12 AISI 1020.....	34
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir	37
3.2 Spesifikasi Material	38
3.3 Peralatan	41
3.4 Prosedur Penelitian.....	42
3.5 Variabel.....	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	

4.1	Pengaruh Lubang Terhadap Arah Retakan	63
4.2	Pengaruh Posisi Lubang Terhadap Kekuatan.....	71
4.3	Pengaruh Jumlah Lubang Terhadap Kekuatan.....	86
4.4	Pengaruh Variasi Material Terhadap Kekuatan	88
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan.....	99
5.2	Saran.....	100
DAFTAR PUSTAKA		101
UCAPAN TERIMA KASIH		105
BIODATA PENULIS.....		107

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Geometri Spesimen Yang Diperbaiki	8
Gambar 2. 2	Elemen Balok Satu Dimensi	12
Gambar 2. 3	(a) Gambaran dari Kekuatan Material (b) Gambaran dari Ketangguhan Patah	17
Gambar 2. 4	Tegangan di Sekitar Retakan	18
Gambar 2. 5	Retak pada Pelat Akibat Tegangan Tarik.....	19
Gambar 2. 6	Penggambaran Sumbu Tiap Retak.....	21
Gambar 2. 7	Tiga Model Pembebanan yang Dapat Menyebabkan Retak	21
Gambar 2. 8	Gaya Normal pada Retak Mode I.....	22
Gambar 2. 9	Retak Pinggir pada Plat dengan Tegangan Tarik	25
Gambar 2. 10	Perbandingan Perpindahan Bukan Retak pada Retak Pinggir dan Retak Tengah.....	26
Gambar 2. 11	Perambatan Retak Tidak Sebidang dengan <i>Normal Stress</i> yang Diberikan.....	26
Gambar 2. 12	Retak Tengah dengan Kasus Umum dimana <i>Principal Stress</i> Tidak Searah dengan Retak	27
Gambar 2. 13	Gambaran Pendekatan pada Ujung Retak.....	28
Gambar 2. 14	<i>Coplanar Cracks</i>	28
Gambar 2. 15	Interaksi antara Dua Retak Koplanar	29
Gambar 2. 16	<i>Parallel Cracks</i>	30
Gambar 2. 17	Interaksi antara Retak Paralel	30
Gambar 2. 18	Skema Kurva Perambatan Retak	31
Gambar 2. 19	Perilaku Perambatan Retak pada Material	32
Gambar 2. 20	Hubungan Intensitas Tegangan dengan Laju Pertumbuhan Retak	32
Gambar 2. 21	Proses <i>Solution Heat Treatment</i> dan <i>Cold Working</i> Dilanjutkan <i>Natural Aging</i>	34
Gambar 2. 22	Perbandingan <i>Cycles to Failure</i> AA 2024 dan AISI 1020	35
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian	38
Gambar 3. 2	<i>Solidworks</i> 2016	41

Gambar 3. 3	ANSYS 19.1.....	41
Gambar 3. 4	Diagram Alir Prosedur Penelitian ANSYS.....	42
Gambar 3. 5	Tampak Depan Spesimen	43
Gambar 3. 6	Tampak Kiri Spesimen	44
Gambar 3. 7	Spesimen dengan Satu Lubang	44
Gambar 3. 8	Spesimen dengan Satu Lubang	45
Gambar 3. 9	Spesimen dengan Dua Lubang	46
Gambar 3. 10	Spesimen dengan Tiga Lubang.....	46
Gambar 3. 11	Spesimen dengan Empat Lubang.....	47
Gambar 3. 12	Posisi Lubang Spesimen.....	48
Gambar 3. 13	Spesimen Satu Lubang	50
Gambar 3. 14	Spesimen Satu Lubang	51
Gambar 3. 15	Spesimen Dua Lubang.....	52
Gambar 3. 16	Spesimen Lubang Simetris	54
Gambar 3. 17	Spesimen Lubang Berseberangan	55
Gambar 3. 18	Spesimen Untuk Simulasi yang Patah	56
Gambar 3. 19	Spesimen Tiga Lubang	58
Gambar 3. 20	Spesimen Empat Lubang	59
Gambar 3. 21	Spesimen Variasi Jumlah Lubang.....	61
Gambar 3. 22	Spesimen pada Variasi Material	62
Gambar 4. 1	Simulasi Satu Lubang	65
Gambar 4. 2	Simulasi Dua Lubang	67
Gambar 4. 3	Simulasi Tiga Lubang.....	69
Gambar 4. 4	Simulasi Empat Lubang.....	70
Gambar 4. 5	Simulasi dengan Satu Lubang.....	72
Gambar 4. 6	Perbandingan K pada Simulasi Satu Lubang	73
Gambar 4. 7	Simulasi Dua Lubang dengan Satu Lubang Tetap.....	75
Gambar 4. 8	Perbandingan K pada Simulasi Dua Lubang.....	75
Gambar 4. 9	Simulasi Dua Lubang Simetris	77
Gambar 4. 10	Perbandingan K pada Simulasi Lubang Simetris.....	77
Gambar 4. 11	Simulasi Dua Lubang Berseberangan	79
Gambar 4. 12	Perbandingan K pada Simulasi Lubang Berseberangan	79

Gambar 4. 13	Simulasi Spesimen yang Patah	80
Gambar 4. 14	<i>Stress Probe</i> Spesimen (a)	81
Gambar 4. 15	<i>Stress Probe</i> Spesimen (b)	82
Gambar 4. 16	Simulasi Tiga Lubang	83
Gambar 4. 17	Perbandingan K pada Simulasi Tiga Lubang	84
Gambar 4. 18	Simulasi pada Spesimen Empat Lubang	85
Gambar 4. 19	Perbandingan K pada Spesimen Empat Lubang	85
Gambar 4. 20	Spesimen dengan Variasi Jumlah Lubang	87
Gambar 4. 21	Perbandingan K pada Spesimen dengan Variasi Jumlah Lubang	88
Gambar 4. 22	Variasi Lubang yang Digunakan pada Variasi Material	89
Gambar 4. 23	Perbandingan K pada AA 2024 – T3 dan AISI 1020	90
Gambar 4. 24	Grafik K terhadap a pada Simulasi Satu Lubang AISI 1020	91
Gambar 4. 25	Grafik K terhadap a pada Simulasi Dua Lubang AISI 1020	92
Gambar 4. 26	Grafik K terhadap a pada Simulasi Empat Lubang AISI 1020	92
Gambar 4. 27	Grafik K terhadap a pada Simulasi Satu Lubang AA 2024 – T3	93
Gambar 4. 28	Grafik K terhadap a pada Simulasi Dua Lubang AA 2024 – T3	93
Gambar 4. 29	Grafik K terhadap a pada Simulasi Empat Lubang AA 2024 – T3	94
Gambar 4. 30	Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Satu Lubang AISI 1020	95
Gambar 4. 31	Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Dua Lubang AISI 1020	95
Gambar 4. 32	Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Empat Lubang AISI 1020	96

Gambar 4. 33	Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi AISI 1020	96
Gambar 4. 34	Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Satu Lubang AA 2024 – T3	97
Gambar 4. 35	Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Dua Lubang AA 2024 – T3	97
Gambar 4. 36	Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Empat Lubang AA 2024 – T3.....	98
Gambar 4. 37	Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi AA 2024 – T3	98

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Penelitian Sebelumnya	5
Tabel 2. 2	Ketangguhan Patah (<i>Fracture Toughness</i>) Beberapa material	24
Tabel 3. 1	Komposisi AA 2024 –T3.....	39
Tabel 3. 2	Sifat Mekanik AA 2024 – T3	39
Tabel 3. 3	Komposisi AISI 1020	40
Tabel 3. 4	Sifat Mekanik AISI 1020.....	40
Tabel 3. 5	Sifat Mekanik <i>Structural Steel</i>	40
Tabel 3. 6	Analisis Permasalahan	43
Tabel 3. 7	Kode Penamaan Posisi Tiap Lubang	47
Tabel 3. 8	Koordinat Lubang Spesimen	48
Tabel 3. 9	Penamaan Spesimen Satu Lubang	50
Tabel 3. 10	Penamaan Spesimen Dua Lubang.....	53
Tabel 3. 11	Penamaan Spesimen Lubang Simetris	54
Tabel 3. 12	Penamaan Spesimen Lubang Berseberangan	56
Tabel 3. 13	Penamaan Spesimen Simulasi yang Patah	57
Tabel 3. 14	Penamaan Spesimen Tiga Lubang	58
Tabel 3. 15	Penamaan Spesimen Empat Lubang	59
Tabel 3. 16	Penamaan Spesimen Variasi Jumlah Lubang ...	61
Tabel 3. 17	Penamaan Spesimen pada Variasi Material	62
Tabel 4. 1	Arah Perambatan Retak pada Simulasi Satu Lubang.....	65
Tabel 4. 2	Arah Perambatan Retak pada Simulasi Dua Lubang.....	67
Tabel 4. 3	Arah Perambatan Retak pada Simulasi Tiga Lubang.....	69
Tabel 4. 4	Arah Perambatan Retak pada Simulasi Empat Lubang.....	70

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu faktor penyebab terjadinya kegagalan pada material adalah retak. Mengetahui mekanisme terjadinya sebuah retakan merupakan sebuah kewajiban bagi industri untuk menghindari kerugian akibat retakan yang dapat menjadi patahan. Laju rambat retakan seringkali dikaitkan dengan kekuatan material. Ketahanan material terhadap beban tentu berbeda-beda, oleh karena itu industri perlu mengklasifikasi material yang digunakan, untuk meningkatkan *lifetime* demi meningkatkan efektivitas penggunaan material tersebut. Retak disebabkan oleh dua jenis beban, yaitu statis dan dinamis. Kegagalan biasanya terjadi saat level tegangan dibawah *yield strength* material. Semakin besar amplitudo pembebanan maka semakin cepat retak merambat (Paris, 1985). Ada tiga fase di dalam kerusakan yaitu: pengintian retak (*crack initiation*), perambatan retak (*crack propagation*), dan patah statik (*fracture*) (Roylance, 2001). Kegagalan material terjadi disebabkan adanya cacat atau retakan dan juga adanya pembebanan. Retak yang terjadi akan semakin bertambah panjang dan retakan ini akan berpengaruh terhadap kekuatan struktur suatu material (Erwin, 1961).

Dari penelitian sebelumnya, lubang dapat mempengaruhi arah perambatan retak pada sebuah plat. Lubang dapat membuat arah rambatan retak menjadi terdefleksi. Lubang pada sebuah plat juga dapat mempengaruhi kekuatan dari plat tersebut, dimana lubang mempengaruhi nilai faktor intensitas tegangan di daerah sekitar ujung retak. (Liao, 2018)

Pada penelitian ini membahas tentang pengaruh lubang pada perambatan retak akibat pembebanan statis. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga, karena penelitian ini berupa simulasi permodelan perambatan retak, yang menghasilkan pendekatan yang ilmiah dan efisien dengan *proof-of-concept*, yang mampu menggantikan pendekatan konvensional

berupa *trial-and-error*. Penelitian ini dilakukan pada spesimen baja AISI 1020 dan paduan aluminium AA 2024 – T3. Untuk spesimen permodelan yang digunakan dibuat dengan aplikasi *SolidWorks*, sedangkan untuk permodelan rambatan retak menggunakan aplikasi *ANSYS Workbench*.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas, dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh posisi lubang terhadap perambatan retak dengan menggunakan metode elemen hingga?
2. Bagaimana pengaruh jumlah lubang terhadap perambatan retak dengan menggunakan metode elemen hingga?
3. Bagaimana pengaruh jenis material terhadap perambatan retak dengan menggunakan metode elemen hingga?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Proses operasional sesuai dengan standard prosedur
2. Efek korosi yang mempengaruhi patahan diabaikan

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh posisi lubang terhadap perambatan retak dengan menggunakan metode elemen hingga.
2. Menganalisis pengaruh jumlah lubang terhadap perambatan retak dengan menggunakan metode elemen hingga.
3. Menganalisis pengaruh jenis material terhadap perambatan retak dengan menggunakan metode elemen hingga.

1.5 Manfaat Penelitian Tugas Akhir

Tugas akhir ini diharapkan dapat bermanfaat dalam bidang industri dan keteknikan, khususnya dalam bidang analisa kegagalan, yang bermanfaat untuk memprediksi perambatan retak yang terjadi pada sebuah material.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian tentang perambatan retak beserta permodelannya telah pernah dilakukan sebelumnya, yang menjadi referensi untuk penelitian ini, diantaranya seperti dirangkum pada Tabel 2.1.

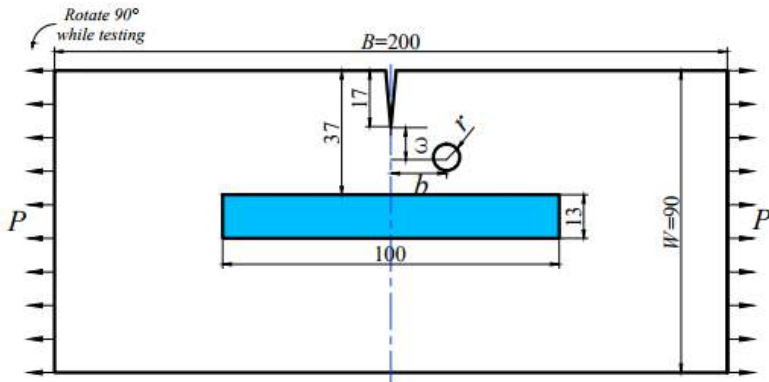
Tabel 2. 1 Penelitian Sebelumnya

No.	Penulis	Penelitian
1.	Jesi (2016)	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui laju dan mekanisme perambatan retak fatik baja AISI 1020 dengan menggunakan metode <i>polynomial incremental</i> . Parameter yang digunakan pada saat pengujian yaitu $P_{max} = 0,7 P_{yield}$, $R = 0,3$, $\sigma_{yield} = 395,5896$ MPa dan $f = 10$ Hz. Dari pengujian diperoleh data panjang retak dan jumlah siklus maka dapat dihitung da/dN dengan menggunakan metode <i>polynomial incremental</i> . Hasil regresi dari grafik hubungan antara ΔK terhadap da/dN diperoleh laju perambatan retak dan faktor intensitas tegangan. Sehingga diperoleh persamaan $y = 8,107 \times 10^{-14}(\Delta K)^{4,69}$. Dimana $C = 8,107 \times 10^{-14}$ dan $m = 4,69$.
2.	Taufiq (2012)	Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya intensitas tegangan akibat cacat produksi yang menyebabkan perambatan retak. Penelitian ini dilakukan dengan metode elemen hingga dan validasi hasil dilakukan dengan membandingkan panjang retak hasil

		<p>simulasi dengan panjang retak yang terjadi pada kasus sebenarnya. Material untuk pemodelan ini adalah poros dengan spesifikasi baja AISI 1045. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan yang pertama bahwa perbedaan rpm mempengaruhi intensitas tegangan. Semakin tinggi rpm, semakin besar intensitas tegangan yang terjadi. Kesimpulan kedua cacat produksi yang besar menyebabkan intensitas tegangan menjadi tinggi. Sehingga proses perambatan retak semakin cepat.</p>
3.	McCullough (2019)	<p>Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis mekanisme terbentuknya inti retak dan pertumbuhan retak secara mikro pada Al 6061 sebagai fungsi dari perlakuan panas T6 dan anil dengan menggunakan metode elemen hingga dan eksperimental. Analisis pasca kegagalan dari permukaan patah digunakan untuk menghitung pertumbuhan retak secara mikri. Untuk menganalisis mekanisme terbentuknya inti retak fatik, medan regangan pada partikel intermetalik dihitung menggunakan simulasi elemen hingga mikromekanik.</p>
4.	Qi (2019)	<p>Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat perambatan retak fatik mode I dan II. Penelitian ini menggunakan Hukum Manson-Coffin untuk siklus rendah, dan menggunakan laju perambatan retak fatik sebagai parameter ketahanan Lelah suatu material. Spesimen yang digunakan berupa rotor</p>

		<p>30Cr₂Ni₄MoV. Dilakukan analisis da/dN terhadap ΔJ masing-masing pada retak fatik mode I dan II dengan menggunakan sifat-sifat dasar fatik siklus rendah tanpa harus menyelesaikan uji pertumbuhan retak fatik.</p>
5.	Andrade (2019)	<p>Penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan mekanisme perambatan retak pada struktur nonhomogen dua dimensi yang mengalami fatik. Penelitian ini berbasis analisis numerik dengan metode elemen batas ganda (DBEM) yang memungkinkan analisis ujung retak yang elastis. Untuk menghitung faktor intensitas tegangan digunakan Hukum Paris dengan parameter J-integral, sedangkan untuk menghitung sudut perambatan retak digunakan mekanika fraktur linier elastis (LEFM).</p>
6.	Liao (2018)	<p>Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ukuran lubang dan posisinya pada sudut defleksi retak. Hasil dari penelitian ini yaitu dengan menempatkan lubang di depan retakan, rambatan retak dapat berubah dengan sudut defleksi yang relatif besar, yang kemudian memperpanjang sisa umur plat tersebut. Pengaruh letak dan ukuran lubang pada konsentrasi tegangan dan jalur pertumbuhan retak pada spesimen tersebut dianalisis menggunakan metode elemen hingga. Penelitian ini menunjukkan peningkatan sudut defleksi retak akibat lubang dengan jari-jari relatif sekitar 2%, jarak vertikal relatif sekitar</p>

		4%, dan jarak horizontal relatif sekitar 16%. Spesimen penelitian ini menggunakan AA 2024 – T3 berbentuk persegi panjang, seperti pada Gambar 2.1.
--	--	--



Gambar 2. 1 Geometri Spesimen Yang Diperbaiki (Liao, 2018)

2.2 Metode Elemen Hingga

Finite Element Methode (FEM), atau disebut juga *Finite Element Analysis* (FEA), adalah teknik komputasi yang digunakan untuk memperkirakan solusi atas berbagai *boundary value problem* di bidang teknik. Secara sederhana, *boundary value problem* adalah permasalahan matematika yang memiliki satu atau lebih variabel bebas yang harus memenuhi persamaan diferensial di seluruh area dalam suatu domain yang diketahui dan memenuhi kondisi spesifik pada batas (*boundary*) domain. *Boundary value problem* terkadang juga disebut *field problem*. Yang dimaksud dengan *field* adalah domain yang diperhatikan dan paling sering merepresentasikan struktur fisik. *Field variable* adalah variabel bebas yang didapatkan dari penyelesaian persamaan diferensial. Sedangkan *boundary condition* adalah nilai spesifik dari *field variable* pada daerah batas (*boundary*) dari *field*. Berdasarkan tipe permasalahan fisik yang dianalisa, *field variable* dapat meliputi

dislokasi fisik, temperatur, *heat flux*, kecepatan fluida, dan sebagainya.

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan sebagai salah satu solusi pendekatan untuk memecahkan berbagai permasalahan fisik. Adapun dasar dari metode elemen hingga adalah membagi benda kerja menjadi elemen-elemen kecil yang jumlahnya berhingga sehingga dapat menghitung reaksi akibat beban pada kondisi batas (*boundary condition*) yang diberikan. Dari elemen-elemen tersebut dapat disusun persamaan-persamaan matriks yang biasa diselesaikan secara numerik dan hasilnya menjadi jawaban dari kondisi beban yang diberikan pada benda kerja tersebut. Metode Elemen Hingga (MEH) dapat mengubah suatu masalah yang memiliki jumlah derajat kebebasan tidak berhingga menjadi suatu masalah dengan jumlah derajat kebebasan tertentu sehingga proses pemecahannya lebih sederhana. Metode ini merupakan metode *computer oriented* yang harus dilengkapi dengan program-program komputer digital yang tepat dalam penelitian.

Secara umum, analisis beban struktur dapat menggunakan dua pendekatan yang dilakukan dalam keadaan seimbang. Pertama, yaitu metode gaya atau fleksibilitas dengan gaya internal. Yang kedua adalah metode perpindahan atau kekakuan dengan perpindahan nodal. Pada beberapa struktur, metode konvensional tidak mampu menentukan distribusi deformasi sehingga Metode Elemen Hingga (MEH) perlu diterapkan. MEH menerapkan permodelan struktur dengan elemen kecil saling berhubungan yang disebut elemen hingga, dimana fungsi perpindahan yang digunakan berkaitan dengan setiap elemen tersebut. Seluruh elemen saling berhubungan secara langsung maupun tidak langsung dengan elemen lainnya, contohnya hubungan permukaan dan nodal. Kemudian, dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut.

Secara umum, permasalahan berbasis Metode Elemen Hingga dapat diselesaikan dengan menggunakan *software* dengan langkah-langkah sebagai berikut:

-
- a. Pembuatan geometri awal struktur yang akan dianalisis
 - b. Penentuan jenis material yang akan digunakan. Hal ini meliputi massa jenis, modulus elastisitas, *poisson's ratio*, dll dari material tersebut
 - c. Penentuan jumlah elemen yang akan diberikan pada model geometri tersebut
 - d. Pembuatan elemen pada model geometri tersebut atau *mesh generation*
 - e. Pemberian kondisi batas atau *boundary condition*. Hal ini meliputi pemberian jenis tumpuan sesuai dengan kondisi nyata seperti *fixed support*, *clamp*, dll
 - f. Pemberian kondisi pembebanan atau *loading condition*. Hal ini meliputi jenis dan lokasi pembebanan sesuai dengan kondisi nyata seperti beban gaya, tekanan, momen, dll
 - g. Analisis hasil. Langkah ini merupakan langkah terakhir dalam proses analisis Metode Elemen Hingga
 - h. Menginterpretasikan hasil yang di dapat.

Pada praktiknya, geometri (domain atau region solusi) sering kali tidak teratur sehingga langkah pertama dari analisa elemen hingga adalah dengan menerapkan diskretisasi dari domain yang tidak teratur menjadi subdomain yang lebih kecil dan lebih teratur. Berbagai metode dapat digunakan untuk memodelkan domain menggunakan elemen hingga. Perbedaan metode untuk membagi domain pada elemen hingga menyebabkan perbedaan lamanya waktu komputasi dan sering mengarah pada perbedaan aproksimasi solusi. Proses diskretisasi adalah sebuah langkah yang sangat penting dalam pertimbangan teknik. Metode elemen hingga yang efisien memerlukan pengalaman dan pengetahuan yang cukup. Untuk masalah dengan skala besar yang melibatkan geometri kompleks, metode elemen hingga memerlukan waktu dan usaha yang besar jika hanya berdasarkan prosedur manual. Oleh karena itu, beberapa program telah dikembangkan untuk dapat menjalankan *mesh* secara otomatis agar dapat meningkatkan

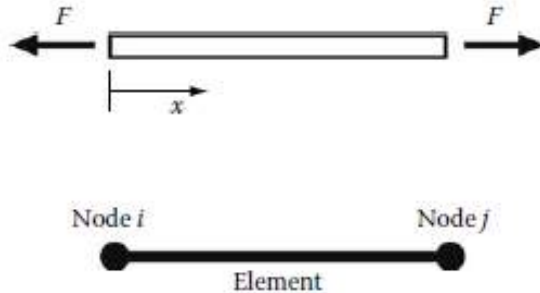
efisiensi pada aplikasi domain yang kompleks dan meminimalkan *interface* dengan analisis.

Membagi daerah atau luasan menjadi sebuah elemen merupakan langkah utama dari sebuah metode elemen hingga. Dimana *mesh* adalah distribusi dari elemen itu sendiri. Dan elemen-elemen itu sendiri dihubungkan oleh *nodes*. Kemudian setelah area tersebut didiskretisasi langkah selanjutnya adalah menentukan persamaan untuk setiap elemen yang dibutuhkan. Misalnya sifat-sifat termal suatu material seperti konduktifitas termal yang mana persamaan dari elemen itu nantinya digabungkan untuk menentukan persamaan global untuk meshnya dimana menggambarkan perubahan dari seluruh bagian secara umum (Alawadhi, 2010). Secara umum, persamaan globalnya dapat dilihat pada Persamaan 2.1.

$$[K]\{A\} = \{B\} \quad (2.1)$$

dimana $[K]$ merupakan *stiffness matrix*, $\{A\}$ adalah derajat kebebasan nodal, perpindahan dari analisa struktural ataupun temperatur pada analisa termal. Dan kemudian $\{B\}$ merupakan gaya luar nodal, gaya pada analisa struktural, serta *heat flux* untuk analisa termal. Matrik $[K]$ merupakan matrik singular sehingga tidak dapat dibalik.

Pada Gambar 2.2 diketahui sebuah balok satu dimensi dengan panjang awal L yang dikenai uji tarik, dengan luas A . Maka balok tersebut dapat dimodelkan dengan elemen tunggal dengan dua node, yaitu i dan j sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 2 Elemen Balok Satu Dimensi (Hutton, 2004)

Dimana, $d(x)$ merupakan perpindahan dari balok dan bervariasi secara linear sepanjang balok, maka rumus dari perpindahan tersebut dapat digambarkan menjadi Persamaan 2.2, a adalah posisi awal *node*, dan b adalah koefisien x.

$$d(x) = a + bx \quad (2. 2)$$

2.3 ANSYS

Pada penelitian ini menggunakan *ANSYS Workbench* dengan fitur *Smart Crack Growth*, dimana *ANSYS Workbench* adalah perkembangan dari *ANSYS* jenis sebelumnya, yaitu *APDL*.

2.3.1 Perbedaan ANSYS Workbench dan ANSYS APDL

ANSYS APDL atau sering dikenal sebagai *ANSYS* klasik merupakan dasar dari *ANSYS Workbench*. Kedua tipe *ANSYS* ini memiliki kekurangan dan keunggulan masing-masing. Pada Tabel 2.2 dirangkum perbandingan antara *ANSYS Workbench* dan *ANSYS APDL*.

Tabel 2. 2 Perbandingan *ANSYS APDL* dan *ANSYS Workbench*

Faktor	<i>ANSYS APDL</i>	<i>ANSYS Workbench</i>
<i>Graphical User Interface</i>	Berbentuk <i>coding</i> , sulit bagi pengguna	Lebih baik, lebih intuitif bagi pengguna
Kemudahan Penggunaan	Lebih sulit, harus menyediakan elemen yang akan digunakan	Lebih mudah, fitur telah tersedia tinggal digunakan
Kontrol	Lebih tinggi, lebih terperinci	Banyak parameter yang otomatis
Kemungkinan Kesalahan	Lebih rendah	Lebih tinggi, akibat kontrol yang rendah
Masalah Kompleks	Lebih baik	Kurang memadai, hanya dapat menganalisis sesuai fitur yang ada
Analisis Berganda	Tidak bisa	Bisa
Kualitas <i>Mesh</i>	Lebih baik, tidak melanjutkan simulasi jika <i>mesh</i> tidak sesuai	Mengabaikan <i>mesh</i> yang buruk dan tetap memberikan hasil
Kodifikasi Masalah	Dapat membuat <i>batch code</i> , sehingga dapat menghemat waktu <i>running</i>	Tidak Bisa

2.3.2 *ANSYS Workbench*

ANSYS Workbench merupakan perangkat lunak yang dapat mensimulasikan berbagai masalah dengan menggunakan metode

elemen hingga, seperti mekanika patahan. Dengan menggunakan fitur *fracture tools* dapat disimulasikan berbagai parameter retak, antara lain *Stress Intensity Factor Mode I* (SIF1/K1), *Stress Intensity Factor Mode II* (SIF2/K2), *Stress Intensity Factor Mode III* (SIF3/K3) dan J-Integral. Dengan mendefinisikan sebuah retak pada suatu titik atau ujung bagian berupa panjang, secara otomatis *ANSYS* akan menyesuaikan permodelan untuk simulasi. Penyesuaian tersebut berupa pendefinisian terhadap *meshing* di sekitar retak yang dimodelkan.

Dengan menggunakan tipe analisis *Static Structural*, mekanika patahan yang disimulasikan bukan tentang bagaimana perambatan retak, tapi untuk menunjukkan nilai parameter mekanika patahan pada suatu ujung retak. Terdapat tiga tipe yang dibagi berdasarkan bentuk retak, sehingga sebelum melakukan simulasi perlu ditentukan geometri retak. Kenyataannya retakan tidak dapat dipastikan bentuknya, maka dari itu *ANSYS* memberikan tiga pilihan pendekatan geometri retak, seperti pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Pendekatan Geometri Retak *Static Structural*

Geometri Retak	Penjelasan
<i>Semi-Elliptical Crack</i>	Retak pada permukaan geometri. Dapat memodelkan diskritisasi secara otomatis pada daerah <i>crack</i> dari data diameter besar dan diameter kecil berbentuk elips.
<i>Arbitrary Crack</i>	Retak pada ketebalan tertentu dari geometri. Bentuk retak elips, perlu memasukkan nilai diameter besar dan kecil.
<i>Pre-Meshed Crack</i>	Retak pada bagian yang ditentukan oleh pengguna, berupa garis (3D) atau titik (2D). Permodelan diskritisasi harus secara manual, seperti <i>meshing</i> pada daerah retak diubah menjadi elemen yang <i>singular</i> . Untuk hasil lebih detail, dapat didefinisikan sumbu koordinat dan jumlah kontur pada ujung retak.

2.3.3 *Smart Crack Growth (SMART)*

SMART adalah metode berbasis *remeshing* untuk simulasi pertumbuhan retak. SMART adalah singkatan dari Separating, Morphing, Adaptive, and Remeshing Technology. SMART secara otomatis menggunakan kombinasi metode *morphing*, *adaptive*, dan *remeshing* untuk memperbarui perubahan *mesh* dari perubahan geometri akibat pertumbuhan retak secara otomatis selama proses *solving*. Perubahan *mesh* hanya terjadi di sekitar daerah retakan saja, dan diintegrasikan ke dalam *solver* mekanik tanpa keluar dan masuk kembali ke *solver*, sehingga menghasilkan solusi komputasi

yang efisien. Mekanika pertumbuhan retak meliputi berbagai kriteria keretakan untuk pertumbuhan retak, sebagai berikut:

- Perumbuhan retak saja
- Bahan isotropik elastis linier saja.
- Hanya menggunakan SOLID187 (high-order 3-D, 10-node element).
- Mengabaikan efek defleksi besar dan rotasi terbatas, efek plastisitas ujung retak, dan efek penutupan ujung retak.
- Kriteria fraktur untuk pertumbuhan retak statis meliputi faktor intensitas tegangan kritis dan J-integral.
- Pertumbuhan retak fatik didasarkan pada Hukum Paris.

Simulasi pertumbuhan retak SMART diasumsikan sebagai quasi-statis. Pengguna dapat menggunakan metode pertumbuhan retak SMART untuk melakukan simulasi pertumbuhan retak statis atau fatik. Simulasi pertumbuhan retak ini adalah analisis struktural nonlinier. Rincian analisis yang disajikan menekankan fitur-fitur khusus untuk pertumbuhan retak, seperti:

- a. Membuat model dengan Retak Awal
Mesh retak awal sangat penting dalam analisis retak, karena akurasi analisis tegangan dan parameter patahan bergantung pada *mesh* retakan.
- b. Menentukan parameter perhitungan patahan
Metode pertumbuhan retak SMART menggunakan faktor J-integral atau faktor intensitas tegangan sebagai parameter perhitungan pertumbuhan retak. Untuk setiap celah, hanya satu parameter patahan yang dapat ditentukan. Parameter harus konsisten dengan kriteria pertumbuhan retak yang ditentukan.
- c. Menentukan kriteria patahan
SMART mendukung analisis pertumbuhan retak statis dan retak fatik. Untuk setiap retakan, hanya satu kriteria patahan yang dapat ditentukan. Parameter kriteria harus konsisten dengan perhitungan parameter patahan yang ditentukan. Ketika menentukan J-

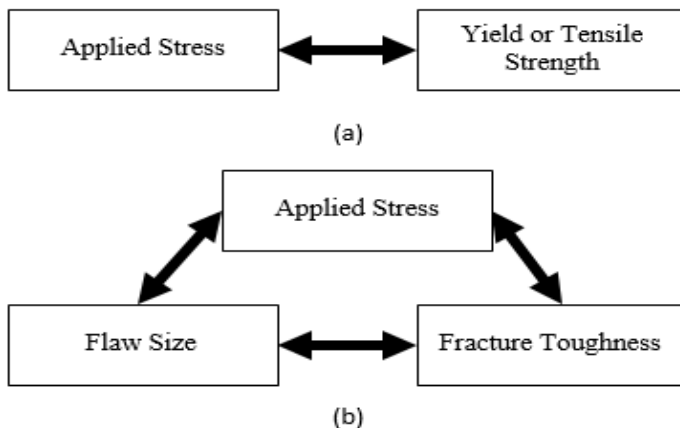
integral sebagai parameter patahan, retakan diasumsikan selalu tumbuh sepanjang arah awal.

d. Mengatur kontrol solusi

Ketika retakan memanjang dengan cepat (misalnya, dalam kasus pertumbuhan retak yang tidak stabil), digunakan nilai DT_{MAX} dan DT_{MIN} yang lebih kecil untuk memberikan waktu untuk penyeimbangan ulang beban. Ketika retakan tidak tumbuh, kontrol pengaturan waktu yang ditentukan diabaikan dan solusinya mengikuti kontrol pengaturan waktu standar.

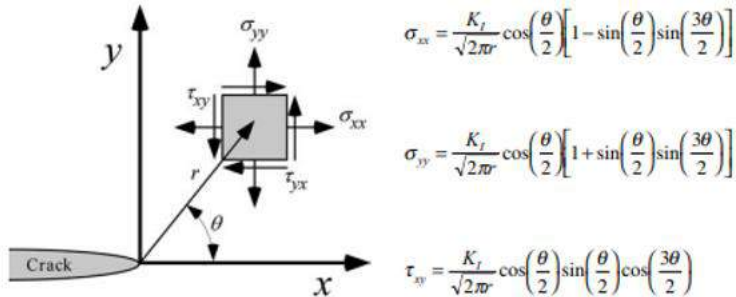
2.4 Mekanika Patahan

Pendekatan energi menyatakan bahwa ekstensi retak terjadi ketika energi untuk pertumbuhan retak cukup untuk mengatasi resistensi material. Resistansi material dapat mencakup energi permukaan, energi plastik, atau jenis disipasi energi lainnya yang terkait dengan retakan yang merambat, digambarkan seperti pada Gambar 2.3.



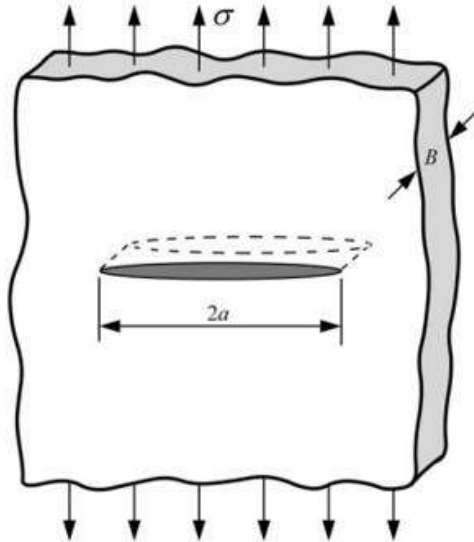
Gambar 2.3 (a) Gambaran dari Kekuatan Material (b) Gambaran dari Ketangguhan Patah (Paris, 1985)

Tingkat pelepasan energi G didefinisikan sebagai tingkat perubahan energi potensial area retak untuk bahan linier elastis. Pada saat terjadi patah, $G = G_c$ merupakan ukuran ketangguhan patah. Gambar 2.4 menunjukkan elemen di ujung retakan pada bahan elastis, dan tekanan pada bidang pada elemen tersebut.



Gambar 2. 4 Tegangan di Sekitar Retakan (Parks, 1706)

Setiap komponen tegangan sebanding dengan K_I . Jika konstanta ini diketahui, seluruh distribusi tegangan pada ujung retak dapat dihitung dengan persamaan pada Gambar 2.4. Konstanta ini, yang disebut faktor intensitas tegangan, mencirikan kondisi ujung retak dalam bahan elastis linier. Jika sebuah material gagal akibat tegangan dan regangan kritis, maka itu berarti bahwa fraktur harus terjadi pada intensitas tegangan kritis K_{IC} . Dengan demikian, K_{IC} adalah ukuran ketangguhan patah. Kegagalan terjadi ketika $K_I = K_{IC}$, dimana K_I adalah kekuatan pendorong untuk fraktur dan K_{IC} adalah ukuran resistensi material. Gambar 2.5 menunjukkan retak di tengah-tengah material yang terjadi akibat dikenakan tegangan tarik.



Gambar 2. 5 Retak pada Pelat Akibat Tegangan Tarik (Paris, 1985)

Untuk pelat yang diilustrasikan pada Gambar 2.5, faktor intensitas tegangan diberikan oleh Persamaan 2.3.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.3)$$

Mekanika patahan sering digunakan dalam memprediksi usia pakai komponen yang berkaitan pada mekanisme pertumbuhan retak berbasis waktu seperti *fatigue* atau *stress corrosion cracking*. Laju retak dapat dikorelasikan dengan parameter mekanika patahan seperti faktor intensitas tegangan, dan ukuran retak kritis untuk kegagalan dapat dihitung jika *fracture toughness* diketahui. Sebagai contoh, laju pertumbuhan retak fatigue pada logam biasanya dapat digambarkan oleh hubungan empiris pada Persamaan 2.4.

$$\frac{da}{dn} = C(\Delta K)^m \quad (2.4)$$

di mana da/dn adalah pertumbuhan retak per siklus, ΔK adalah rentang intensitas tegangan, dan C dan m adalah konstanta material (Hukum Paris).

Toleransi kerusakan menggambarkan celah subkritis untuk tetap ada dalam sebuah struktur. Memperbaiki material yang rusak atau mengganti komponen yang rusak relatif mahal dan seringkali tidak perlu. Mekanika patahan dapat menetapkan batas toleransi cacat. Ukuran retak kritis atau *critical crack length* dihitung dari tegangan yang diberikan dan *fracture toughness*. Ukuran cacat yang diizinkan ditentukan dengan membagi ukuran retak kritis dengan faktor keamanan. Umur pemakaian dari struktur didapatkan dengan menghitung pertumbuhan cacat dari ukuran awal ke ukuran maksimum yang diijinkan.

2.5 Analisa Tegangan pada Retak

Untuk konfigurasi retak yang dikenai gaya eksternal, dimungkinkan untuk memperoleh *closed-form* untuk tekanan pada *body*, dengan asumsi bahan elastis linier isotropik. Jika kita mendefinisikan sumbu koordinat polar dengan titik asal pada ujung retak pada Gambar 2.5, dapat ditunjukkan medan tegangan pada retak elastis linier, seperti pada Gambar 2.6, diberikan pada Persamaan 2.5.

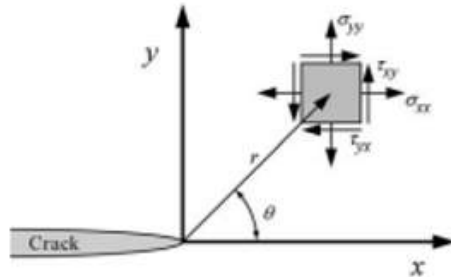
$$\sigma_{ij} = \frac{k}{\sqrt{r}} f_{ij} \quad (2.5)$$

dimana

σ_{ij} = tensor stres

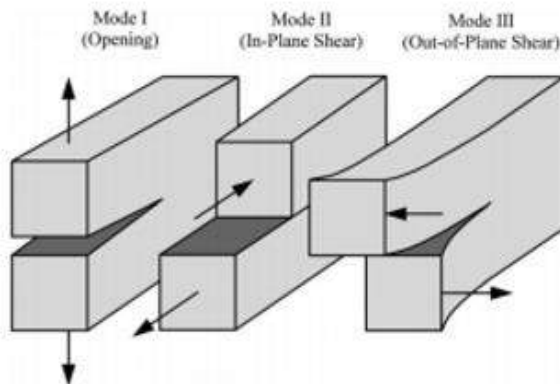
k = konstanta

f_{ij} = fungsi tak berdimensi



Gambar 2. 6 Penggambaran Sumbu Tiap Retak (Parks, 1706)

Ada tiga jenis beban yang dialami oleh retakan. Mode I, beban diterapkan ke bidang normal retak, cenderung membuka celah. Mode II, beban geser pada bidang dan cenderung untuk menggeser satu permukaan retak terhadap yang lain. Mode III, beban menggeser ke luar *body*. *Body* yang retak mendapat salah satu mode, atau kombinasi dari dua atau tiga mode pembebanan. Gambar 2.7 menggambarkan tiga jenis pembebanan yang dialami material.



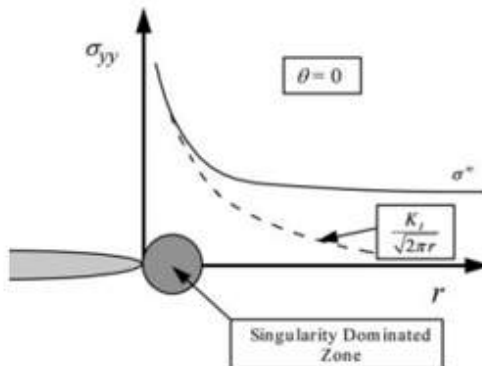
Gambar 2. 7 Tiga Model Pembebanan yang Dapat Menyebabkan Retak (Anderson, 2005)

2.6 Faktor Intensitas Tegangan

Setiap mode pembebanan menghasilkan singularitas di ujung retak, tetapi konstanta proporsionalitas k dan f_{ij} bergantung pada mode. Faktor intensitas tegangan K , di mana $K = k \sqrt{2\pi}$, biasanya diberikan subskrip untuk menunjukkan mode pembebanan, K_I , K_{II} , atau K_{III} . Berdasarkan Mode I pada bidang retak, di mana $\theta = 0$, tekanan dalam arah x dan y diberikan oleh Persamaan 2.6.

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.6)$$

Ketika $\theta = 0$, tegangan geser adalah nol, yang berarti bidang retak adalah bidang utama untuk pemuatan Mode I. Dapat didefinisikan zona yang didominasi singularitas sebagai wilayah yang menggambarkan bidang *crack-tip*, seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Gaya Normal pada Retak Mode I (Erwin, 1961)

Faktor intensitas tegangan menentukan amplitudo singularitas ujung retak. Yaitu, tegangan di dekat ujung retak meningkat sebanding dengan K . Selain itu, faktor intensitas tegangan mendefinisikan kondisi ujung retak; jika K diketahui, dapat diselesaikan semua komponen tegangan, regangan, dan perpindahan sebagai fungsi r dan θ . K_I berguna untuk desain dan

analisis bahwa ujung retakan material dapat bertahan ketika tegangan naik hingga intensitas tegangan kritis K_{Ic} , *critical stress intensity factor* ketika mengukur ketangguhan material (*fracture toughness*), diberikan oleh Persamaan 2.7.

$$\sigma_f = \frac{K_{Ic}}{\alpha\sqrt{\pi a}} \quad (2.7)$$

Dimana α adalah parameter geometri bernilai 1 untuk retak siku dan secara umum namun untuk meningkatkan akurasi pada situasi baru maka membutuhkan metode elemen hingga.

Intensitas tegangan dan energi berinterrelasi, maka dapat dilihat hasil komparasi persamaannya pada Persamaan 2.8.

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{EG_C}{\pi\alpha}} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} = K_{Ic}^2 = EG_C \quad (2.8)$$

Hubungan ini berlaku pada bidang tegangan, namun sedikit berbeda pada bidang regangan, diberikan pada Persamaan 2.9.

$$\sigma_f K_{Ic}^2 = EG_C (1 - \nu^2) \quad (2.9)$$

Untuk logam dengan $\nu = 0.3$, $(1 - \nu^2) = 0.91$. Perubahan tidak begitu besar, bagaimanapun hasil numerik G_{IC} atau K_{IC} sangat berbeda pada kondisi bidang tegangan atau bidang regangan. Nilai G_{IC} dan K_{IC} pada beberapa material diberikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Ketangguhan Patah (*Fracture Toughness*) Beberapa Material (Roylance, 2001)

Material	G_{Ic} (kJm ⁻²)	K_{Ic} (MNm ⁻²)	E (GPa)
Steel alloy	107	150	210
Aluminium alloy	20	37	69
Polyethylene	20 (J_{Ic})	-	0.15
High-impact polystyrene	15.8 (J_{Ic})	-	2.1
Steel-mild	12	50	210
Rubber	13	-	0.001
Glass-reinforced thermoset	7	7	7
Rubber-toughened epoxy	2	2.2	2.4
PMMA	0.5	1.1	2.5
Polystyrene	0.4	1.1	3
Wood	0.12	0.5	2.1
Glass	0.007	0.7	70

Irwin menunjukkan bahwa semua komponen tegangan adalah fungsi dari K dan sebagai energi regangan per unit volume adalah fungsi σ^2 , diberikan padap Persamaan 2.10.

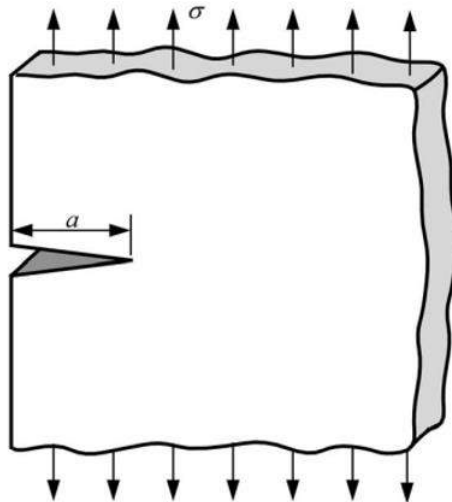
$$G = 2\gamma E \propto K^2 \quad (2.10)$$

Sehingga dapat dibentuk Persamaan 2.11.

$$2\gamma E = \sigma^2 \pi a = K^2 \quad (2.11)$$

Dikenal sebagai persamaan Griffith-Irwin Relationship.

Gambar 2.9 menunjukkan retak di pinggir material yang terjadi akibat dikenakan tegangan tarik.

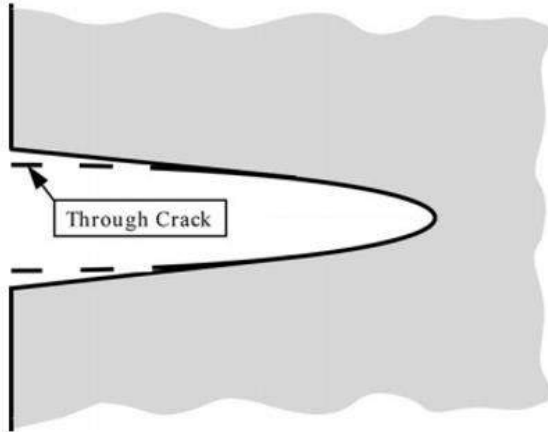


Gambar 2. 9 Retak Pinggir pada Plat dengan Tegangan Tarik
(Paris, 1985)

Faktor intensitas tegangan untuk retak tepi diberikan sebagai Persamaan 2.12.

$$K_I = 1.12\sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.12)$$

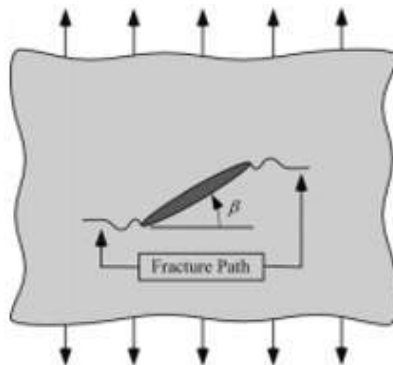
yang mirip dengan Persamaan (2.3). Peningkatan 12% dalam K_I untuk celah tepi disebabkan oleh kondisi batas yang berbeda di tepi bebas. Seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 2.10, celah tepi lebih terbuka karena lebih sedikit tertahan yang membentuk elips saat diberi beban.



Gambar 2. 10 Perbandingan Perpindahan Bukan Retak pada Retak Pinggir dan Retak Tengah (Erwin, 1961)

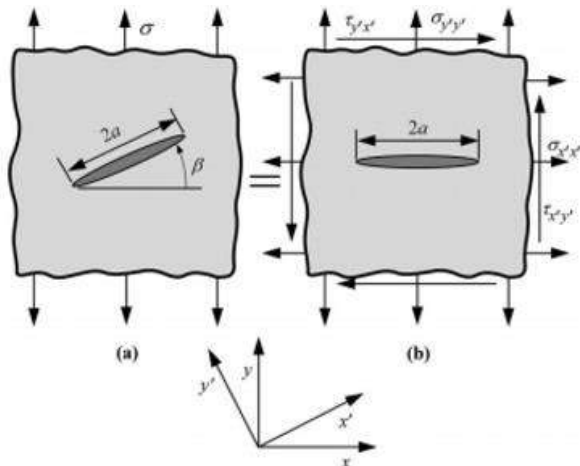
2.8 Sudut Perambatan dari Retak

Gambar 2.11 menggambarkan skenario tipikal untuk celah bersudut.



Gambar 2. 11 Perambatan Retak Tidak Sebidang dengan *Normal Stress* yang Diberikan (Rice, 1989)

Ketika patahan terjadi, retakan cenderung menyebar orthogonal ke tegangan normal yang diterapkan; yaitu, crack mode campuran menjadi Mode I. Retakan yang merambat mencari jalan dengan hambatan paling kecil (atau jalur kekuatan pendorong maksimum) dan tidak perlu terbatas pada bidang awalnya. Jika materialnya isotropik dan homogen, retakan akan merambat sedemikian rupa untuk memaksimalkan laju pelepasan energi. Pada Gambar 2.12 digambarkan evaluasi laju pelepasan energi sebagai fungsi arah propagasi dalam mode campuran, hanya Mode I dan Mode II yang dipertimbangkan



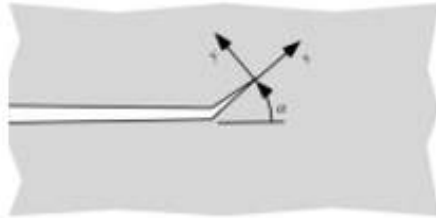
Gambar 2. 12 Retak Tengah dengan Kasus Umum dimana *Principal Stress* Tidak Searah dengan Retak (Rice, 1989)

Kita dapat menggeneralisasi celah bersudut melalui ketebalan pada Gambar 2.12 untuk setiap retak planar yang berorientasi $90^\circ - \beta$ dari tegangan normal yang diterapkan. Untuk pembebanan uniaksial, faktor intensitas tegangan untuk Mode I dan Mode II diberikan oleh Persamaan 2.13.

$$K_I = K_{I(0)} \cos^2 \beta \quad (2.13)$$

$$K_{II} = K_{II(0)} \cos \beta \sin \beta$$

di mana $K_I(0)$ adalah intensitas tegangan Mode I ketika $\beta = 0$. Gambar 2.13 menggambarkan sudut ujung retak.



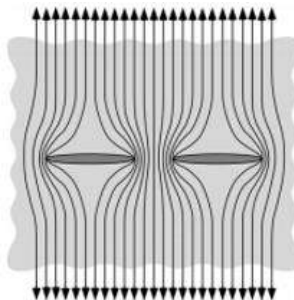
Gambar 2. 13 Gambaran Pendekatan pada Ujung Retak (Rice, 1989)

2.9 Hubungan Antara Retak Dengan Retak Yang Lain

Medan tekanan lokal dan kekuatan pendorong retak untuk cacat tertentu dapat secara signifikan dipengaruhi oleh kehadiran satu atau lebih retakan yang berdekatan. Tergantung pada orientasi relatif dari retakan tetangga, interaksi dapat memperbesar atau mengurangi faktor intensitas tegangan. Ketika retakan sejajar satu sama lain, K_I cenderung menurun karena interaksinya. Interaksi kedua retakan coplanar dan paralel dibahas lebih lanjut di bagian berikut

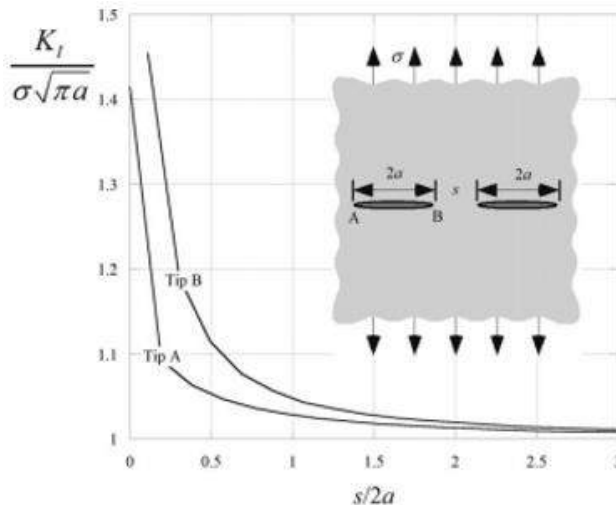
2.9.1 *Coplanar Cracks*

Gambar 2.14 mengilustrasikan dua retakan coplanar yang identik dalam plat.



Gambar 2. 14 *Coplanar Cracks* (Weixing, 1993)

Garis-garis gaya mewakili efek relatif dari pemusatan tegangan pada retakan. Karena ligamen di antara retakan menyusut, area di mana gaya harus ditransmisikan berkurang. Akibatnya, K_I diperbesar untuk setiap celah karena kedua celah tersebut saling mendekati. Gambar 2.15 adalah plot solusi K_I untuk konfigurasi pada Gambar 2.14.



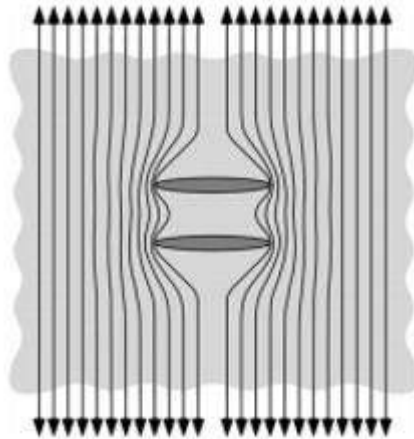
Gambar 2. 15 Interaksi antara Dua Retak Koplanar (Weixing, 1993)

Seperti yang diduga, ujung retak yang paling dekat dengan retak tetangga mengalami pembesaran yang lebih besar pada K_I . Solusi K_I pada ujung B meningkat asimptotik $s \rightarrow 0$. Pada ujung A, solusi mendekati $s \rightarrow 0$ karena dua retakan menjadi retakan tunggal dengan dua kali panjang asli setiap retakan.

Gambar 2.14 dan Gambar 2.15 menggambarkan prinsip umum bahwa beberapa retakan pada bidang yang sama memiliki efek memperbesar K_I satu sama lain.

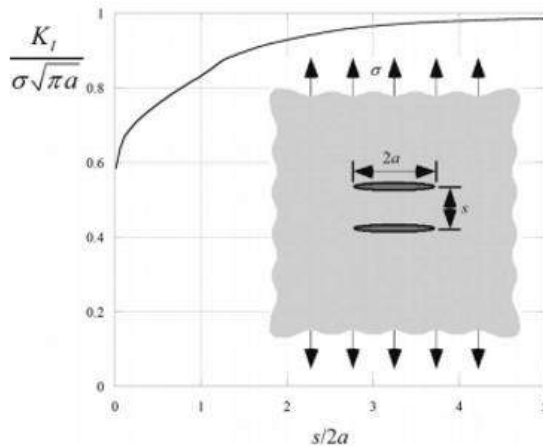
2.9.2 *Parallel Cracks*

Gambar 2.16 menggambarkan dua retakan paralel.



Gambar 2. 16 *Parallel Cracks* (Weixing, 1993)

Dalam hal ini, retakan cenderung untuk melindungi satu sama lain, yang menghasilkan penurunan K_I relatif terhadap kasus retakan tunggal. Gambar 2.17 menunjukkan solusi K_I untuk geometri ini.

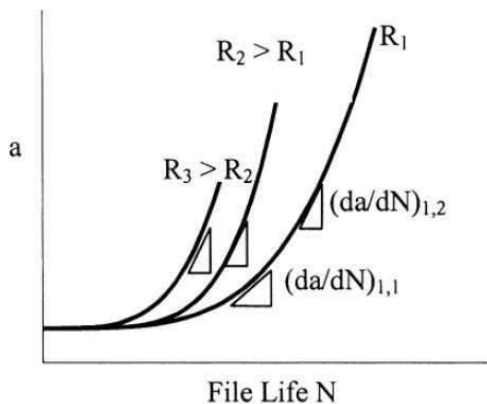


Gambar 2. 17 Interaksi antara Retak Paralel (Weixing, 1993)

Ini merupakan indikasi dari kasus umum di mana dua atau lebih celah paralel memiliki interaksi saling melindungi ketika dikenakan beban Mode I. Akibatnya, banyak retak yang sejajar satu sama lain tidak begitu diperhatikan dibandingkan dengan banyak retak pada bidang yang sama.

2.10 Karakteristik Laju Perambatan Retak

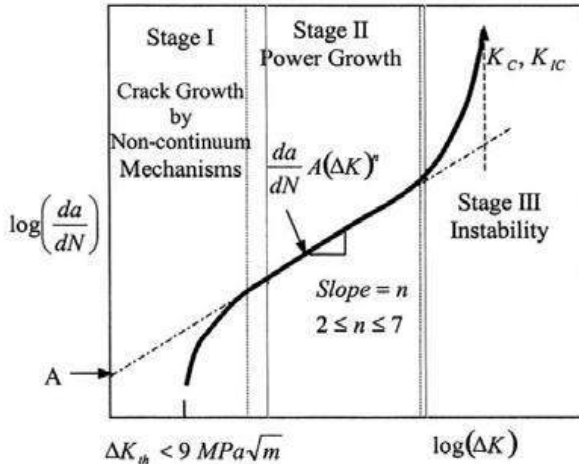
Pertumbuhan panjang retak dan jumlah siklus dapat disajikan dalam kurva a dan N . Gambar 2.18 adalah kurva yang menunjukkan secara skematis tiga spesimen yang dikenai tegangan berbeda, $R_3 > R_2 > R_1$. Benda uji mempunyai ukuran retak awal yang sama dan tegangan siklik minimumnya pun juga sama, yaitu nol. Dari gambar tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa material yang dibebani siklik dengan level tegangan yang lebih tinggi akan mengalami kegagalan dengan jumlah siklus yang lebih sedikit dibandingkan material yang dibebani dengan tegangan yang lebih kecil. Adapun Skema kurva perambatan retak dapat dilihat pada Gambar 2.18 yaitu



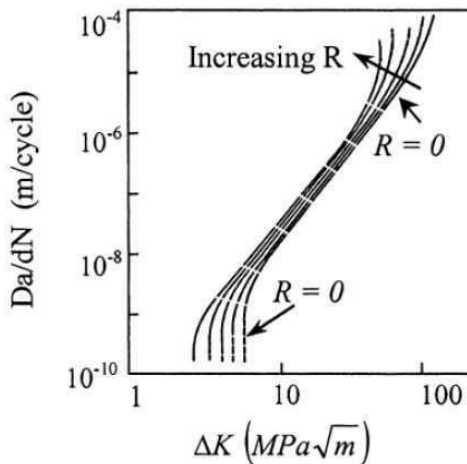
Gambar 2. 18 Skema Kurva Perambatan Retak (Roylance, 2001)

Perilaku perambatan retak pada material dapat juga disajikan dengan grafik hubungan antara laju perambatan retak dan

selisih faktor intensitas tegangan. Grafik tersebut dibuat dalam skala logaritmik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.19



Gambar 2. 19 Perilaku Perambatan Retak pada Material (Roylance, 2001)



Gambar 2. 20 Hubungan Intensitas Tegangan dengan Laju Pertumbuhan Retak (Roylance, 2001)

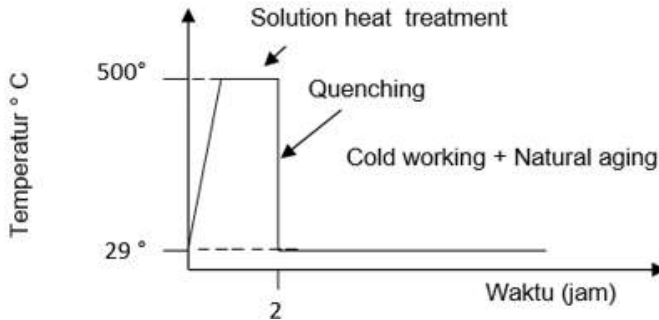
Gambar 2.19 menunjukkan Kurva tersebut dapat dibagi menjadi tiga daerah dan Gambar 2.20 menunjukkan hubungan antara faktor intensitas tegangan dengan laju perambatan retak. Daerah I menunjukkan suatu daerah harga ambang ΔK_{th} , dibawah harga ini tidak ada perambatan retak yang terjadi, kecuali pada orde sekitar $2,5 \times 10^{-10}$ m/siklus. Daerah III merupakan daerah perambatan retak yang sangat cepat sehingga perambatan retak sulit untuk diamati dimana faktor intensitas tegangannya diatas harga faktor intensitas tegangan kritis, sehingga daerah ini tidak begitu penting dalam pengamatan situasi. Daerah II merupakan daerah terpenting dimana daerah ini menunjukkan hubungan linier antara laju perambatan retak dan selisih intensitas tegangan yang bekerja.

2.11 AA 2024 – T3

AA 2024 adalah paduan aluminium, dengan tembaga sebagai elemen paduan utama, dimana T3 adalah perlakuan panas yang diberikan, yaitu dilakukan proses perlakuan panas pelarutan (*solution heat treated*) dan dilanjutkan dengan proses pengerjaan dingin serta *natural aging* untuk mendapatkan kondisi yang stabil. Ini digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, serta ketahanan lelah yang baik. Karakteristik dan penggunaan AA 2024 yaitu kemampuan mesin yang baik dan kemampuan *surface finishing* yang baik, serta kekuatan material yang tinggi dengan kemampuan *machining* yang memadai. Pada 2017 aplikasi struktural sebagian besar telah menggunakan AA 2024. Penggunaan lainnya seperti komponen pesawat, roda gigi dan poros, dan baut.

T3, *solution heat treatment + cold working + natural aging*, digunakan untuk paduan yang mengalami proses *cold working*. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kekuatan paduan setelah mengalami proses *cold working*. Paduan dipanaskan hingga mencapai temperatur *solution heat treatment* (500°C), dengan *holding time* tertentu, selanjutnya paduan tersebut diquenching menggunakan media air, lalu dilakukan pengerjaan

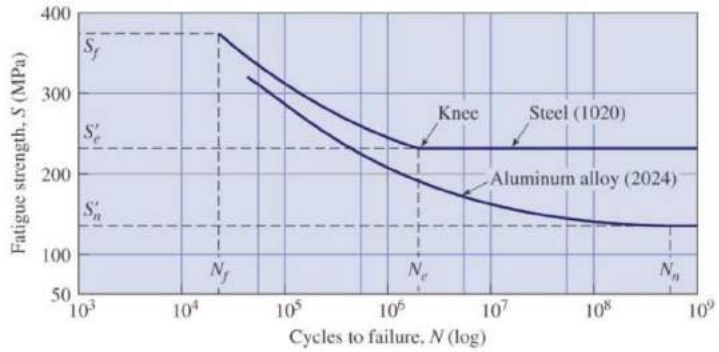
dingin (*cold working*) dan paduan tersebut didinginkan (didiamkan) di temperatur ruangan sehingga terjadi penuaan secara alami (*natural aging*). T3 digambarkan seperti pada Gambar 2.21.



Gambar 2. 21 Proses *Solution Heat Treatment* dan *Cold Working* Dilanjutkan *Natural Aging* (Davis, 2001)

2.12 AISI 1020

Nama AISI 1020 diberi berdasarkan standar American Iron and Steel Institute (AISI), dimana angka 1xxx menyatakan baja, angka 10xx menyatakan jenis baja, sedangkan angka 20 menyatakan kadar kandungan karbon dalam seperseratus persen (0,20%). Jadi AISI 1020 merupakan baja karbon dengan kandungan karbon 0,20%. Baja AISI 1020 adalah baja karbon rendah yang memiliki harga jual murah dibandingkan baja karbon sedang, baja karbon tinggi, dan baja paduan. Pemilihan baja AISI 1020 karena baja ini banyak dipakai dalam pembuatan komponen-komponen permesinan dan mudah diperoleh di pasaran serta sering digunakan sebagai bahan konstruksi umum. Baja AISI 1020 mempunyai keuletan tinggi dan mudah dibentuk, tetapi kekerasannya rendah. Gambar 2.22 menunjukkan perbandingan kurva S-N pada material AISI 1020 dan AA 2024 – T3.



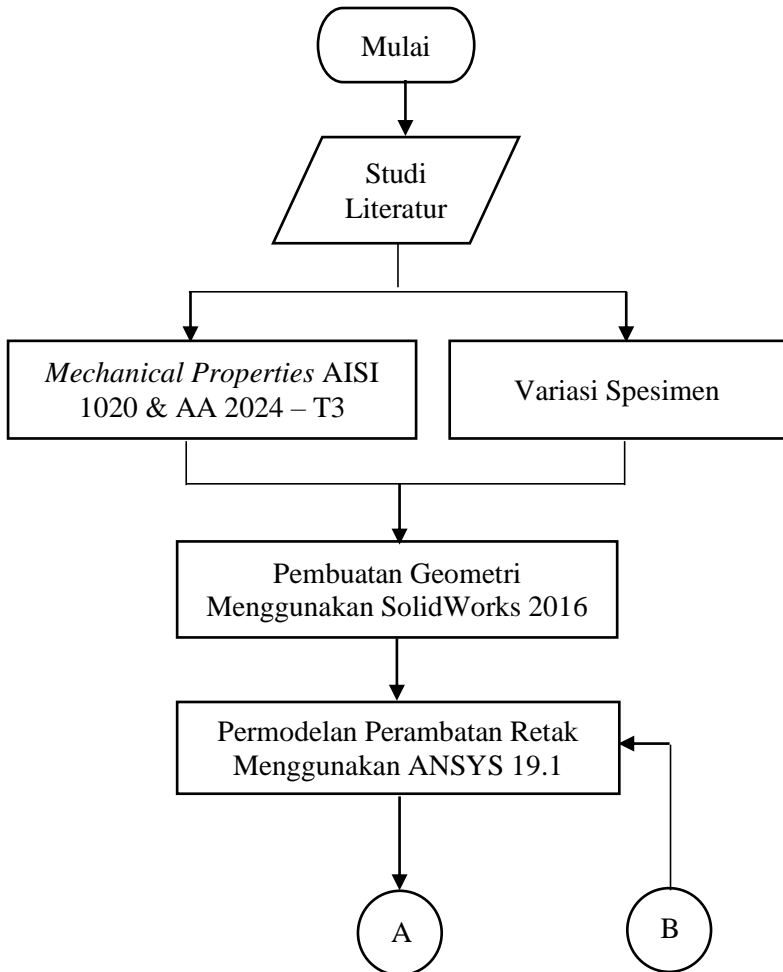
Gambar 2. 22 Perbandingan *Cycles to Failure* AA 2024 dan AISI 1020 (Boardman, 1990)

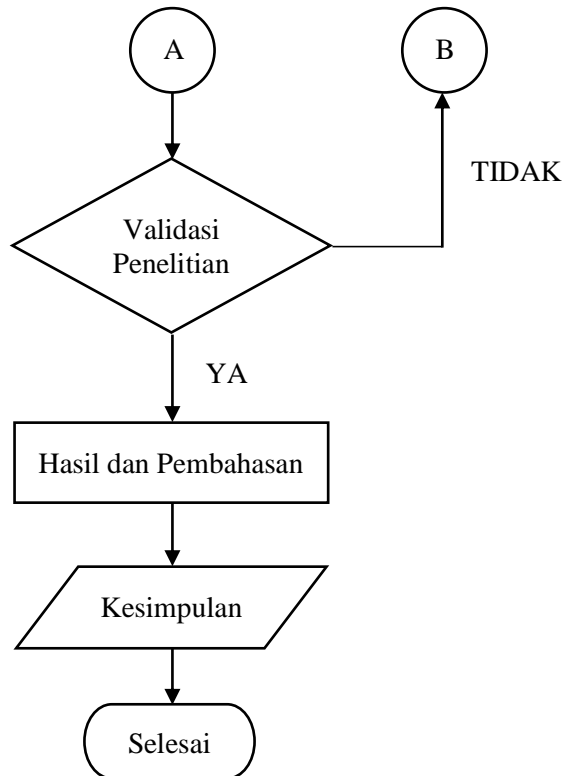
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Diagram alir pengerjaan penelitian ini seperti pada Gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Spesifikasi Material

Pada penelitian Tugas Akhir ini digunakan dua jenis material yang dibandingkan hasil simulasinya tentang pengaruh jenis material ketahanan terhadap perambatan retak, yaitu AA 2024 - T3 dan AISI 1020. Sedangkan untuk menganalisis simulasi perambatan retak terhadap lubang digunakan material *structural steel*, yang merupakan material standar dari *software* yang digunakan.

3.2.1 AA 2024 – T3

Tabel 3.1 merupakan komposisi kimia AA 2024 – T3, sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Komposisi AA 2024 – T3 (Matweb.com)

Unsur	Wt. %
Aluminium, Al	90.7 – 94.7 (Balance)
Kromium, Cr	Max 0.1
Tembaga, Cu	3.8 – 4.9
Besi, Fe	Max 0.5
Magnesium, Mg	1.2 – 1.8
Mangan, Mn	0.3 – 0.9
Silikon, Si	≤ 0.5
Titanium, Ti	≤ 0.15
Zinc, Zn	≤ 0.25
Lainnya, per unsur	≤ 0.05
Lainnya, total	≤ 0.15

Tabel 3.2 merupakan sifat mekanik AA 2024 – T3, sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Sifat mekanik AA 2024 – T3 (Matweb.com)

Mechanical Properties	Metric
Density	2780 kg/m ³
Ultimate Tensile Strength	483 MPa
Yield Strength	345 MPa
Poisson's Ratio	0.33
Modulus of Elasticity	73.1 GPa

3.2.2 AISI 1020

Tabel 3.3 merupakan komposisi kimia AISI 1020, sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Komposisi AISI 1020 (Matweb.com)

Unsur	Wt. %
Karbon, C	0.17 – 0.23%
Besi, Fe	99.08 – 99.53 % (Balance)
Mangan, Mn	0.30 - 0.60 %
Fosfor, P	≤ 0.040 %
Sulfur, S	≤ 0.050%

Tabel 3.4 merupakan sifat mekanik AISI 1020, sebagai berikut:

Tabel 3. 4 Sifat mekanik AISI 1020 (Matweb.com)

Mechanical Properties	Metric
Density	7870 kg/m ³
Ultimate Tensile Strength	420 MPa
Yield Strength	350 MPa
Poisson's Ratio	0.29
Modulus of Elasticity	186 GPa

3.2.3 *Structural Steel*

Tabel 3.5 merupakan sifat mekanik AISI 1020, sebagai berikut:

Tabel 3. 5 Sifat mekanik *Structural Steel* (1998 ASME BPV Code)

Mechanical Properties	Metric
Density	7850 kg/m ³
Ultimate Tensile Strength	483 MPa
Yield Strength	345 MPa
Poisson's Ratio	0.3
Modulus of Elasticity	200 GPa

3.3 Peralatan

Dalam pengerjaan tugas akhir ini peralatan yang digunakan adalah *software ANSYS* dan *SolidWorks*. *SolidWorks* digunakan untuk membuat geometri dari spesimen yang digunakan pada simulasi perambatan retak. Untuk permodelannya digunakan *software* analisis elemen hingga, yaitu *ANSYS Workbench 19.1*, dengan modul yang digunakan adalah *Static Structural*. Gambar 3.2 adalah *software SolidWorks*, dan Gambar 3.3 adalah *software ANSYS*.



Gambar 3. 2 *Solidworks* 2016

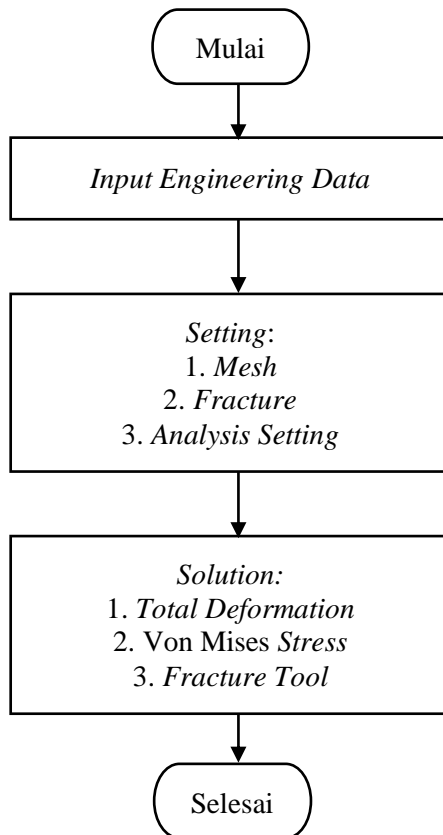


Gambar 3. 3 *ANSYS* 19.1

Seluruh pengerjaan penelitian ini dilakukan dalam satu system operasi karena *software ANSYS* mendukung dalam simulasi dan analisis sekaligus.

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini pada *software ANSYS Workbench* adalah seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Diagram Alir Prosedur Penelitian ANSYS
Workbench

Prosedur penelitian ini terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

3.4.1 Analisis Permasalahan

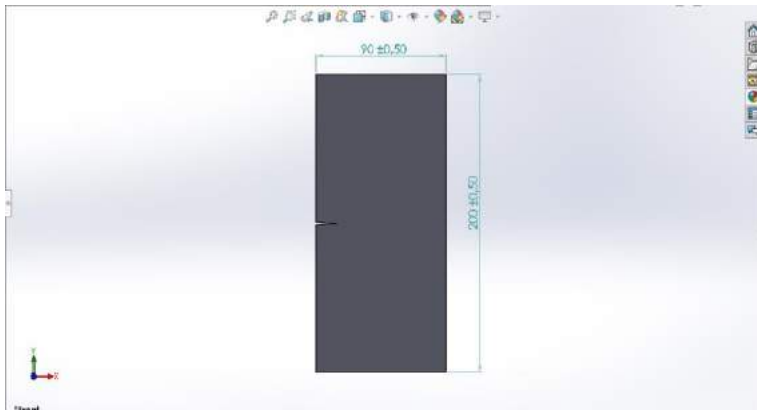
Permasalahan yang akan dianalisis pada penelitian ini dirumuskan seperti pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Analisis Permasalahan

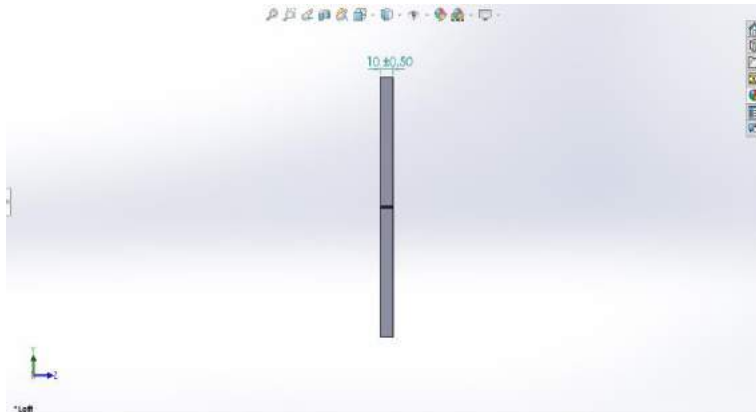
Analisis	Modul	Input	Output
Perambatan Retak	<i>Static Structural</i>	<i>Mechanical Properties, Displacement</i>	<i>Stress Intensity Factor, Pola Rambatan</i>

3.4.2 Pembuatan Geometri

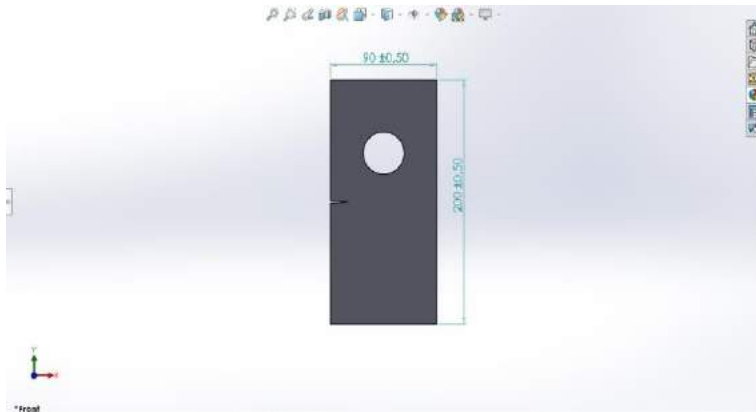
Geometri yang digunakan pada simulasi berbentuk pelat berukuran 200 mm x 90 mm x 10 mm dengan *initial crack* selebar 2 mm dan panjang 15 mm, dengan jari-jari lubang yang berukuran sama tiap spesimen yaitu 17.5 mm. Spesimen yang digunakan tampak depan seperti pada Gambar 3.5, tampak kiri seperti pada Gambar 3.6, dan tampak spesimen dengan lubang seperti pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 5 Tampak Depan Spesimen



Gambar 3. 6 Tampak Kiri Spesimen



Gambar 3. 7 Spesimen dengan Satu Lubang

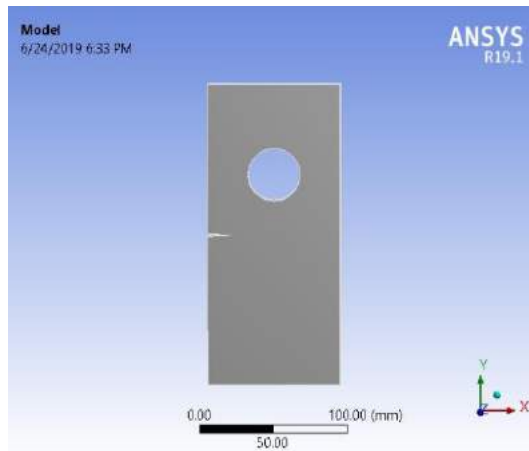
3.4.3 Analisis Perambatan Retak

Spesimen yang telah dibuat sebelumnya diimport ke *software ANSYS* untuk kemudian melakukan *running* menggunakan modul *static structural*. Kemudian mengatur

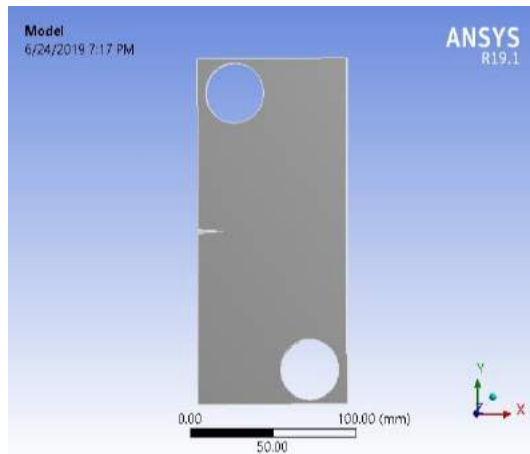
engineering data yang telah terlampir sebelumnya. Setelah itu melakukan *mechanical model* dan memulai proses dengan mengatur fitur *meshing, fracture, analys*, hingga melakukan *solve* untuk mendapatkan hasil dari simulasi berupa gambar, video, grafik, dan tabel.

3.5 Variabel

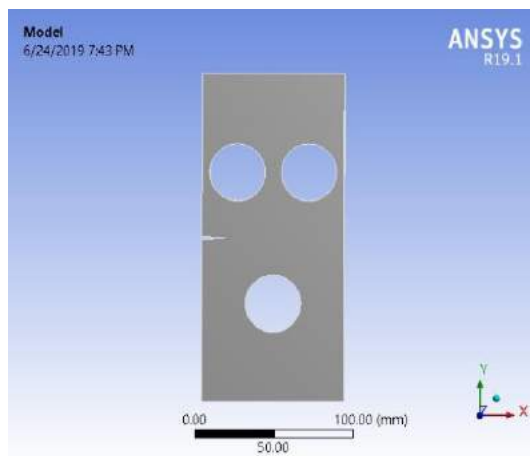
Variabel yang digunakan pada penelitian ini ada tiga, yaitu posisi lubang, jumlah lubang, dan variasi material. Jumlah lubang yang digunakan digunakan yaitu satu lubang, dua lubang, tiga lubang, dan empat lubang. Variasi material yang digunakan yaitu AA 2024 - T3 dan AISI 1020. Gambar 3.8 merupakan contoh spesimen dengan satu lubang, Gambar 3.9 merupakan contoh spesimen dengan dua lubang, Gambar 3.10 merupakan contoh spesimen dengan tiga lubang, dan Gambar 3.11 merupakan contoh spesimen dengan empat lubang.



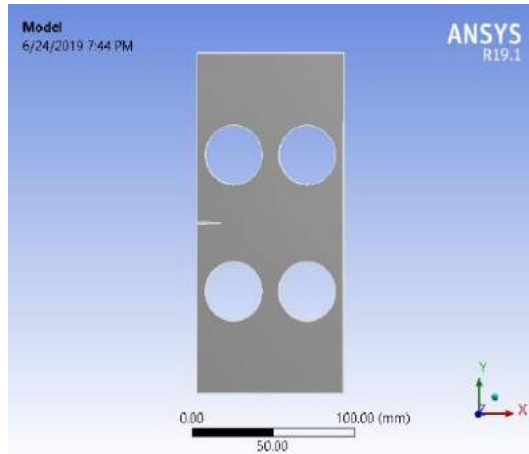
Gambar 3. 8 Spesimen Dengan Satu Lubang



Gambar 3. 9 Spesimen Dengan Dua Lubang



Gambar 3. 10 Spesimen Dengan Tiga Lubang

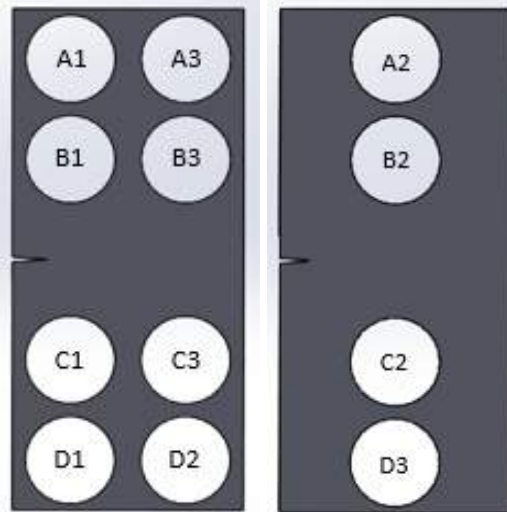


Gambar 3. 11 Spesimen Dengan Empat Lubang

Selain jumlah lubang, tipe geometri spesimen dibedakan berdasarkan letak posisi lubang. Berikut semua posisi lubang seperti pada Gambar 3.12 dengan penamaan pada Tabel 3.7, dengan koordinat tiap lubang seperti Tabel 3.8.

Tabel 3. 7 Kode Penamaan Posisi Tiap Lubang

	Kiri	Tengah	Kanan
Tepi Atas	A1	A2	A3
Tengah Atas	B1	B2	B3
Tengah Bawah	C1	C2	C3
Tepi Bawah	D1	D2	D3



Gambar 3. 12 Posisi Lubang Spesimen

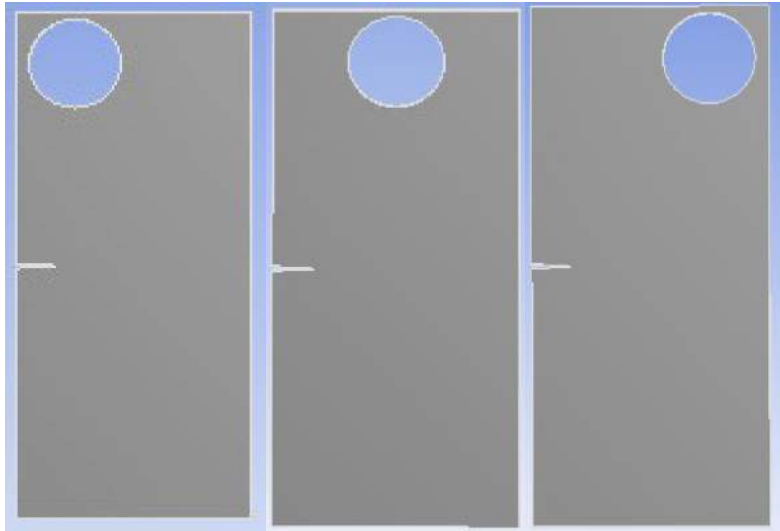
Tabel 3. 8 Koordinat Lubang Spesimen

Kode Lubang	Koordinat (X,Y)
A1	(-22.5 , 80)
A2	(0 , 80)
A3	(-22.5 , 80)
B1	(22.5 , 40)
B2	(0 , 40)
B3	(-22.5 , 40)
C1	(-22.5 , -40)
C2	(0 , -40)
C3	(22.5 , -40)
D1	(-22.5 , -80)
D2	(0 , -80)
D3	(-22.5 , -80)

3.5.1 Posisi Lubang

a. Simulasi Satu Lubang

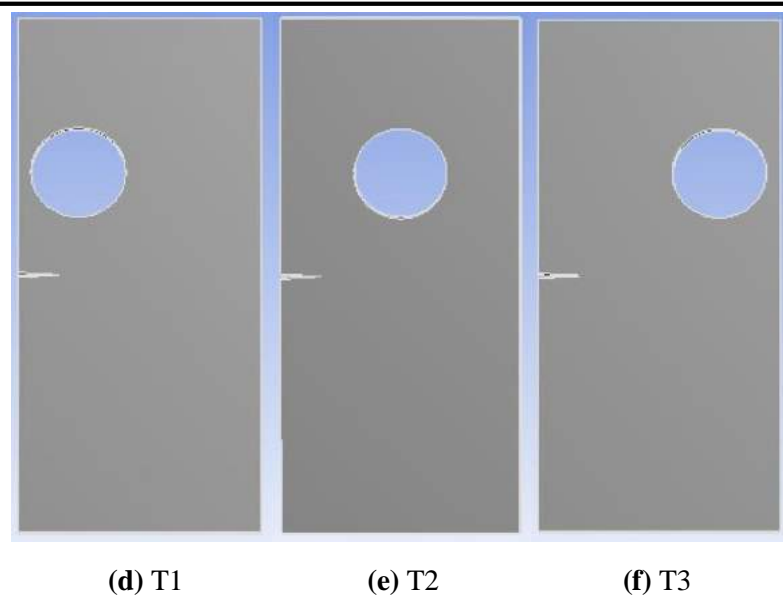
Gambar 3.13 merupakan spesimen yang digunakan dengan jumlah satu lubang, dengan penamaan seperti pada Tabel 3.9.



(a) A1

(b) A2

(c) A3



Gambar 3. 13 Spesimen Satu Lubang

Tabel 3. 9 Penamaan Spesimen Satu Lubang

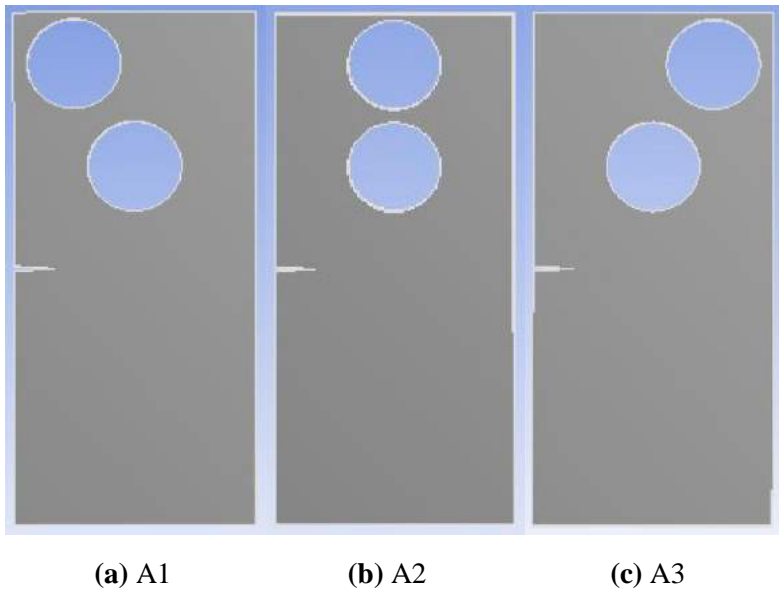
	Kiri	Tengah	Kanan
Atas	A1	A2	A3
Tengah	T1	T2	T3

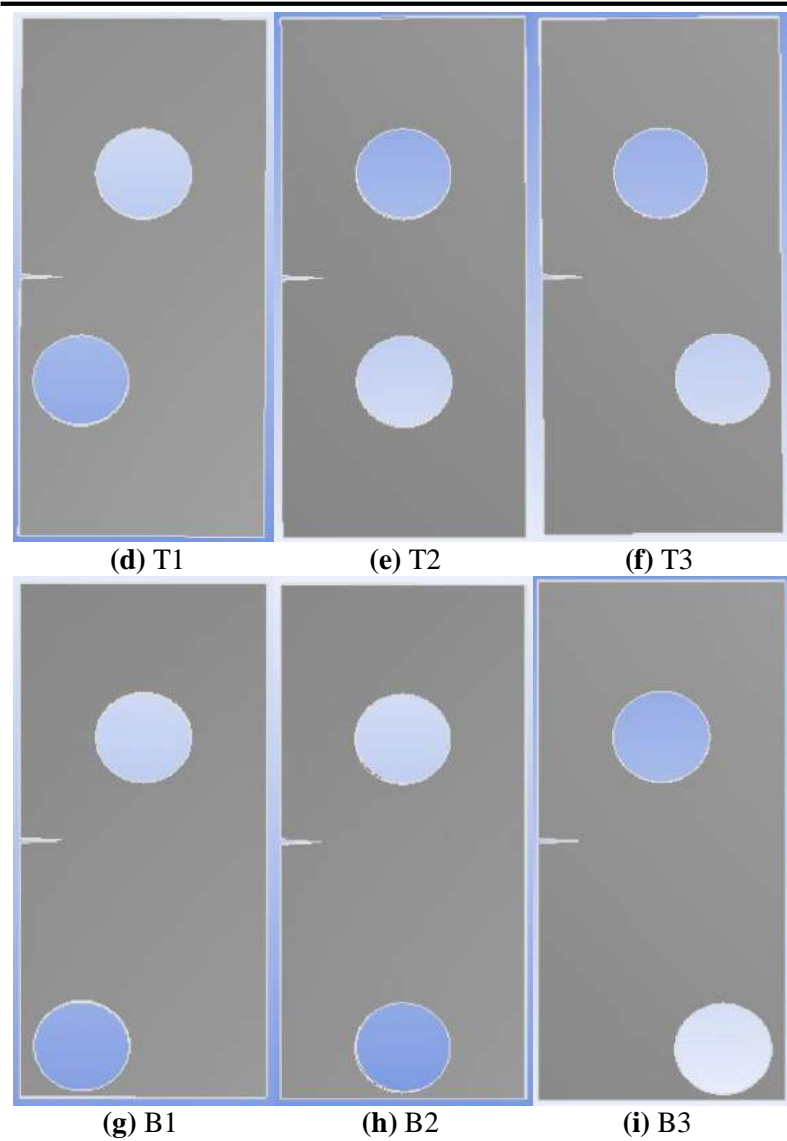
b. Simulasi Dua Lubang

Pada simulasi dua lubang, digunakan satu lubang dengan posisi tetap, seperti pada Gambar 3.14, dan satu lubang tambahan yang posisinya berbeda-beda, seperti pada Gambar 3.15 dengan penamaan seperti pada Tabel 3.10.



Gambar 3. 14 Spesimen Satu Lubang





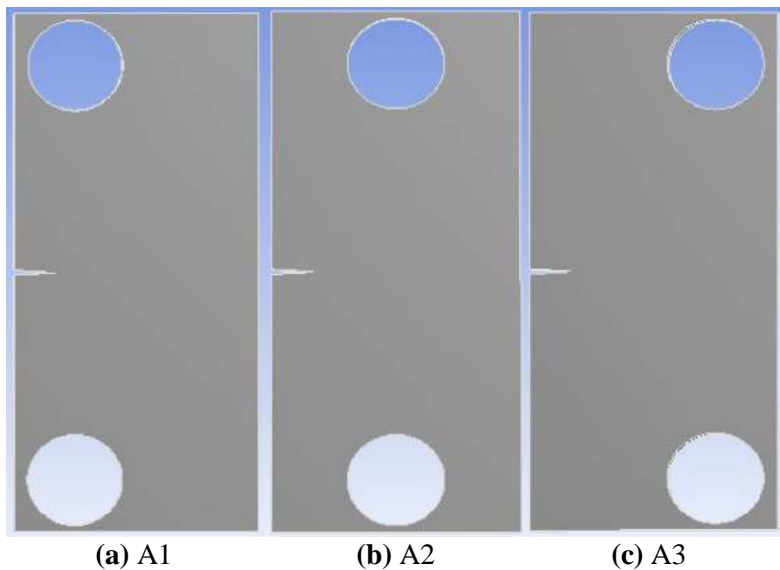
Gambar 3. 15 Spesimen Dua Lubang

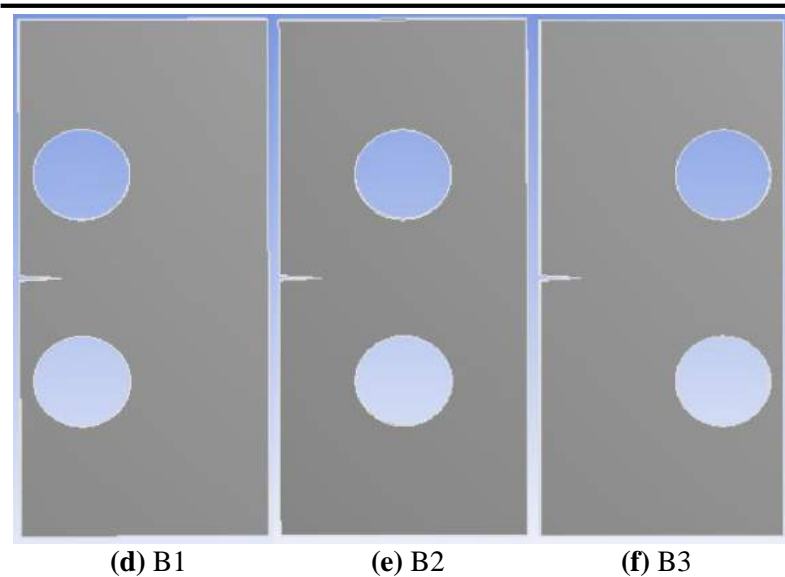
Tabel 3. 10 Penamaan Spesimen Dua Lubang

	Kanan	Tengah	Kiri
Atas	A1	A2	A3
Tengah	T1	T2	T3
Bawah	B1	B2	B3

c. Simulasi Lubang Simetris

Gambar 3.16 merupakan spesimen yang digunakan dengan lubang simetris, dengan penamaan seperti pada Tabel 3.11.





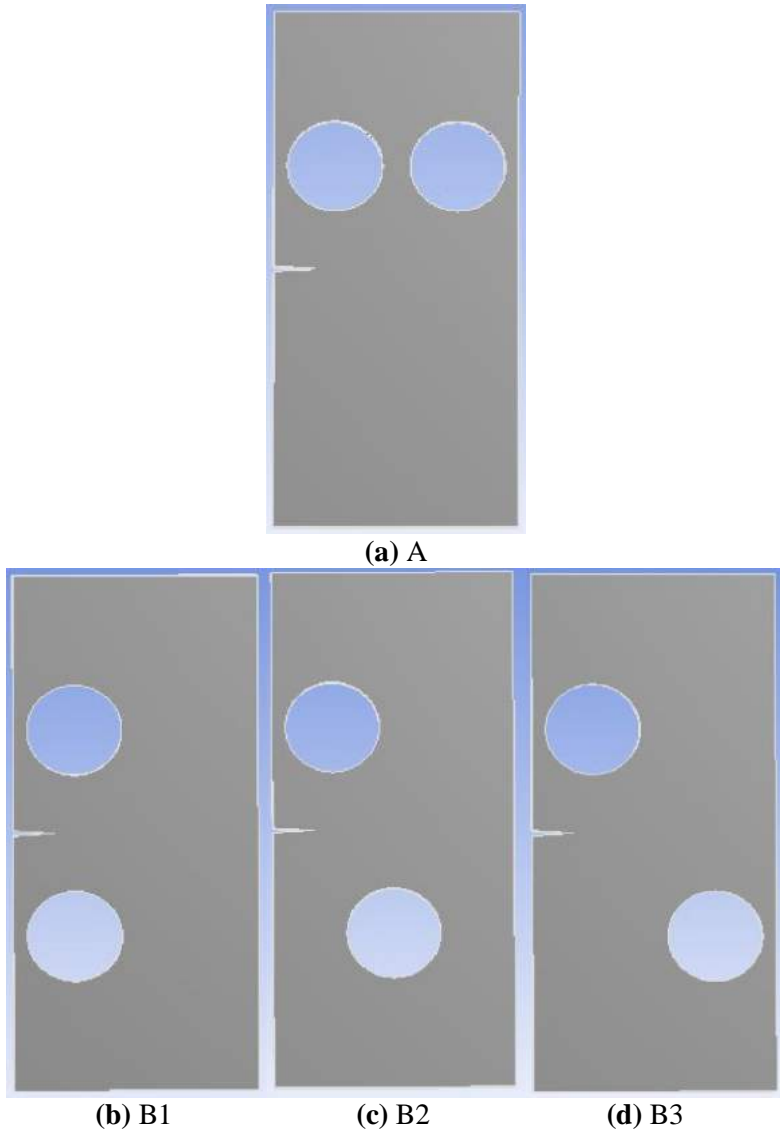
Gambar 3. 16 Spesimen Lubang Simetris

Tabel 3. 11 Penamaan Spesimen Lubang Simetris

	Kiri	Tengah	Kanan
Tepi	A1	A2	A3
Tengah	B1	B2	B3

d. Simulasi Lubang Berseberangan

Gambar 3.17 merupakan spesimen yang digunakan dengan lubang berseberangan, dengan penamaan seperti pada Tabel 3.12.



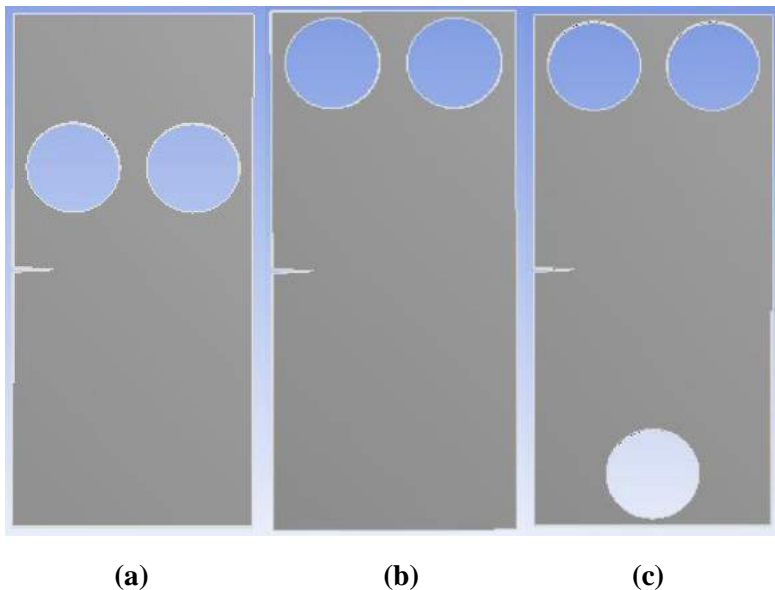
Gambar 3. 17 Spesimen Lubang Berseberangan

Tabel 3. 12 Penamaan Spesimen Lubang Berseberangan

	Kiri	Tengah	Kanan
Berseberangan	B1	B2	B3
Tidak Berseberangan	A		

e. Simulasi Spesimen yang Patah

Gambar 3.18 merupakan spesimen yang digunakan dengan lubang berseberangan, dengan penamaan seperti pada Tabel 3.13.

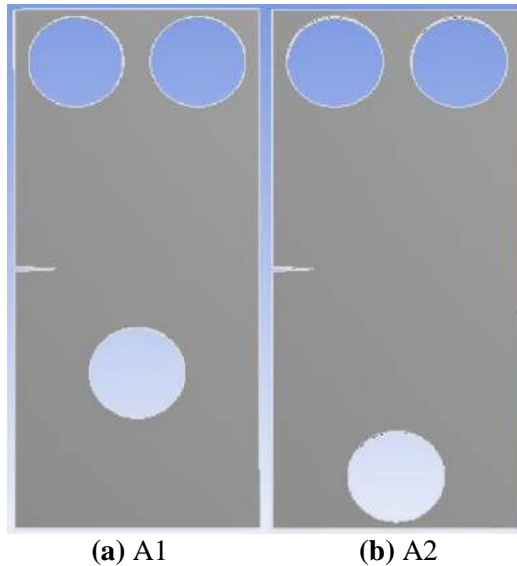
**Gambar 3. 18** Spesimen Untuk Simulasi yang Patah

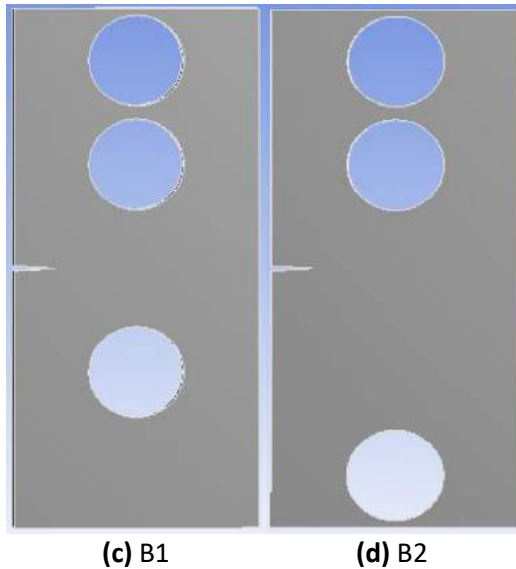
Tabel 3. 13 Penamaan Spesimen Simulasi yang Patah

Kode Gambar	Letak
(a)	Lubang Tengah
(b)	Lubang Tepi
(c)	Lubang Tambahan

f. Simulasi Tiga Lubang

Gambar 3.19 merupakan spesimen yang digunakan dengan tiga lubang, dengan penamaan seperti pada Tabel 3.14.





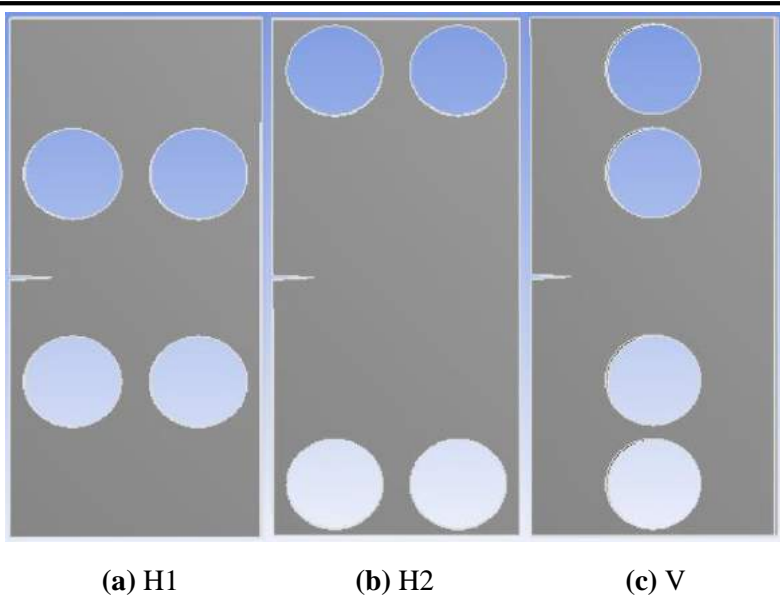
Gambar 3. 19 Spesimen Tiga Lubang

Tabel 3. 14 Penamaan Spesimen Tiga Lubang

	Tengah	Tepi
Horizontal	A1	A2
Vertikal	B1	B2

g. Simulasi Empat Lubang

Gambar 3.20 merupakan spesimen yang digunakan dengan empat lubang, dengan penamaan seperti pada Tabel 3.15.



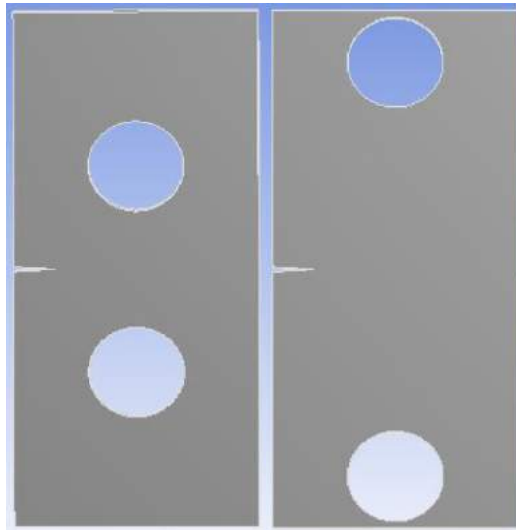
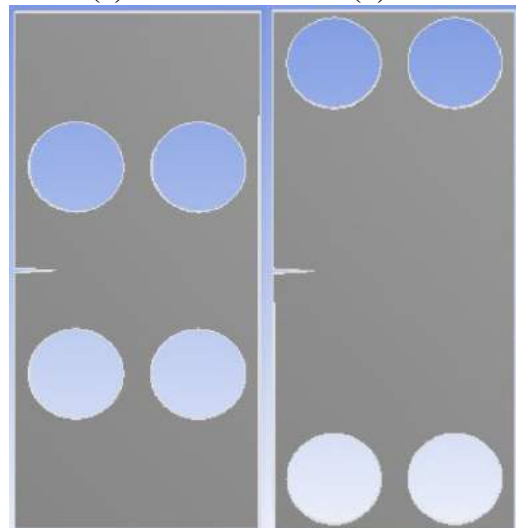
Gambar 3. 20 Spesimen Empat Lubang

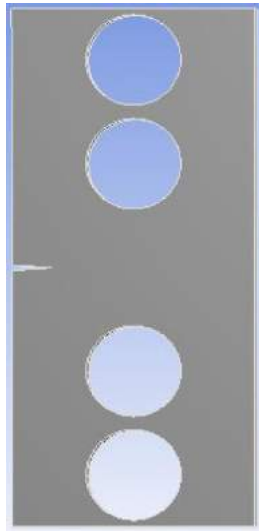
Tabel 3. 15 Penamaan Spesimen Empat Lubang

	Tengah	Tepi
Horizontal	H1	H2
Vertikal	V	

3.5.2 Jumlah Lubang

Gambar 3.21 merupakan spesimen yang digunakan dengan empat lubang, dengan penamaan seperti pada Tabel 3.16.

**(a) A1****(b) A2****(c) B1****(d) B2**



(g) C

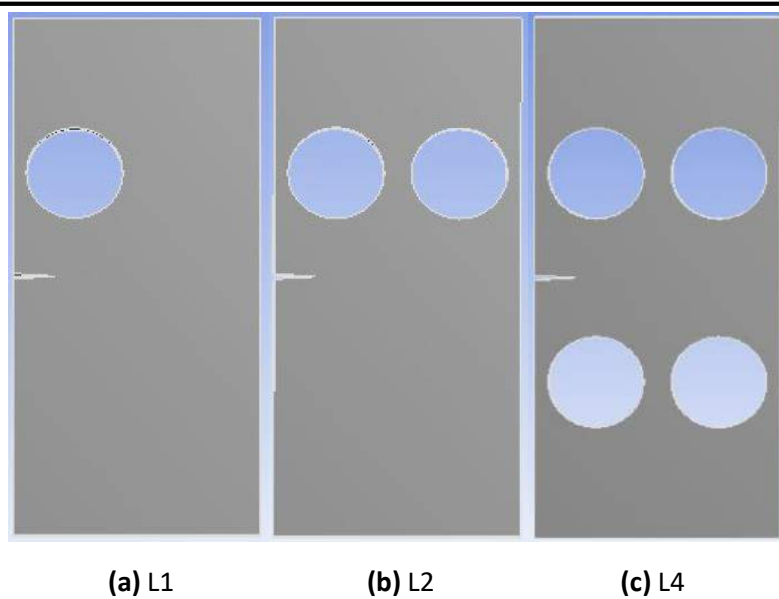
Gambar 3. 21 Spesimen Variasi Jumlah Lubang

Tabel 3. 16 Penamaan Spesimen Variasi Jumlah Lubang

	Tengah	Tepi
2 Lubang	A1	A2
4 Lubang	B1	B2
Vertikal	C	

3.5.3 Variasi Material

Gambar 3.22 merupakan spesimen yang digunakan dengan empat lubang, dengan penamaan seperti pada Tabel 3.17.



Gambar 3. 22 Spesimen pada Variasi Material

Tabel 3. 17 Penamaan Spesimen pada Variasi Material

	1 Lubang	2 Lubang	4 Lubang
AISI 1020	L11	L21	L41
AA 2024 – T3	L12	L22	L42

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan mensimulasikan perambatan retak pada sebuah plat dengan menggunakan aplikasi berbasis Metode Elemen Hingga *ANSYS Workbench*. Aplikasi ini mengolah model spesimen dan data *input* seperti massa jenis, *tensile strength*, *ultimate tensile strength*, *poisson's ratio*, dan modulus elastisitas untuk ditransfer menjadi data *output* seperti pola perambatan retak dan faktor intensitas tegangan. Simulasi ini dilakukan pada spesimen yang berbeda jumlah dan letak lubangnya dengan ukuran geometri spesimen yang sama, bentuk dan ukuran lubang yang sama, dan besarnya gaya berupa *displacement* yang sama. Pada simulasi ini diterapkan dua *displacement* yang sama besar, yaitu 500 mm pada sumbu Y, namun berlawanan arah.

4.1 Pengaruh Posisi Lubang Terhadap Arah Perambatan Retak

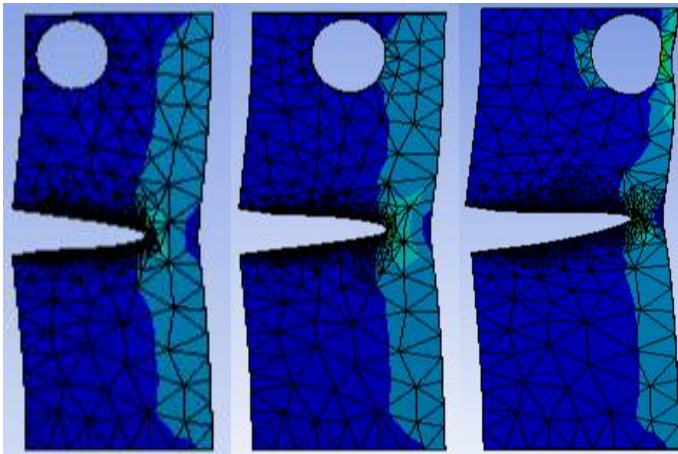
Pendekatan secara energi menyatakan bahwa retak dapat terjadi ketika energi yang tersedia untuk pertumbuhan retak cukup untuk mengatasi energi resistan dari material. Resistansi material dapat mencakup energi permukaan, energi plastik, atau jenis disipasi energi lainnya yang terkait dengan retakan yang merambat. Ketika sebuah patahan terjadi, retakan cenderung merambat secara orthogonal ke arah *normal stress* yang diterapkan, dimana pada simulasi ini *normal stress* diberikan ke arah sumbu Y positif dan sumbu Y negatif. Retakan yang merambat mencari jalur dengan hambatan paling kecil (atau jalur dengan kekuatan pendorong maksimum) dan tidak perlu terbatas pada bidang awalnya, dimana faktor intensitas tegangan merupakan parameter yang berbanding lurus dengan kekuatan pendorong retakan. (Anderson, 2005)

Gambar yang digunakan pada penjelasan dibawah adalah gambar dari tegangan ekuivalensi (Von Mises), dimana tegangan ekuivalensi menggambarkan besarnya tegangan di tiap titik pada spesimen. Tegangan ekuivalensi Von Mises digunakan untuk

spesimen yang bersifat ulet, sesuai dengan spesimen yang digunakan yaitu *Structural Steel* (1998 ASME BPV Code).

4.1.1 Simulasi Satu Lubang

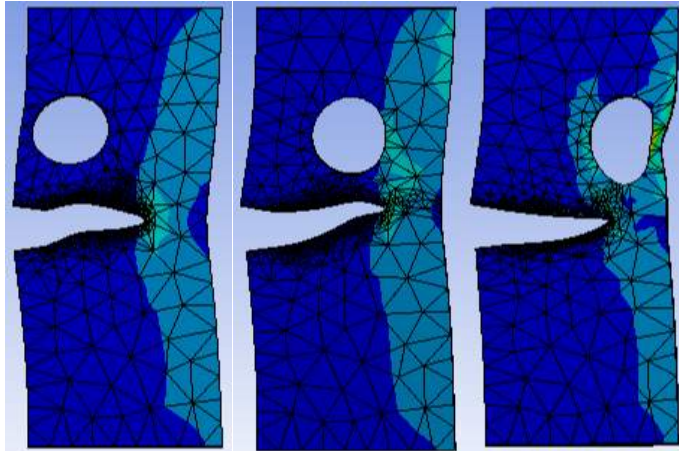
Pada penelitian ini, terdapat enam simulasi rambatan retak dengan satu lubang yang bervariasi dari posisi lubang tersebut, seperti pada Gambar 3.13, dengan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.1.



(a) A1

(b) A2

(c) A3



(d) T1

(e) T2

(f) T3

Gambar 4. 1 Simulasi Satu Lubang

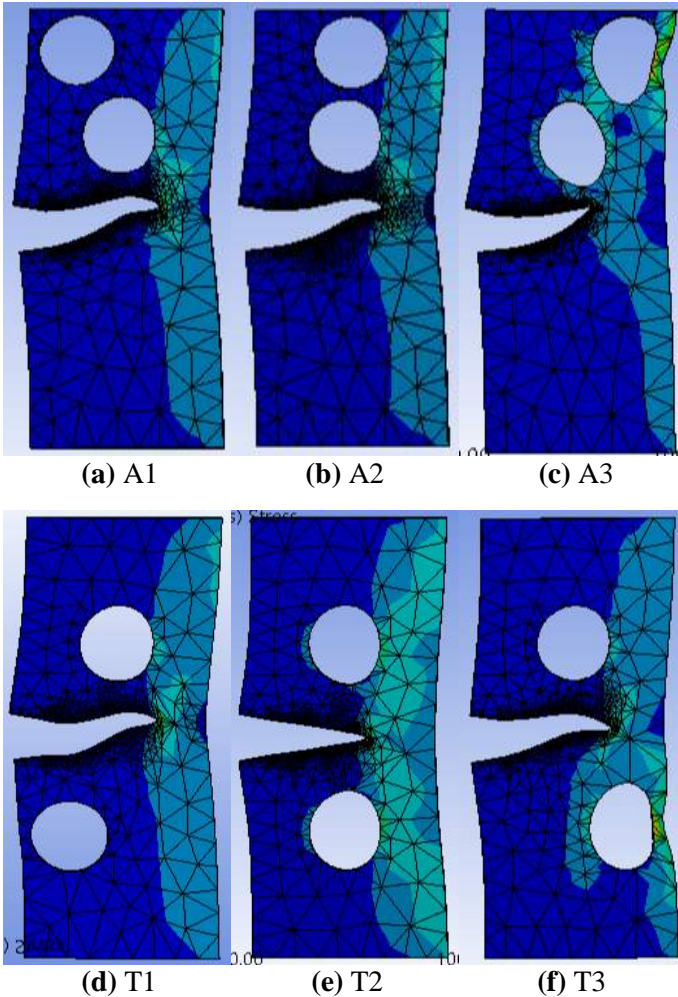
Tabel 4. 1 Arah Perambatan Retak pada Simulasi Satu Lubang

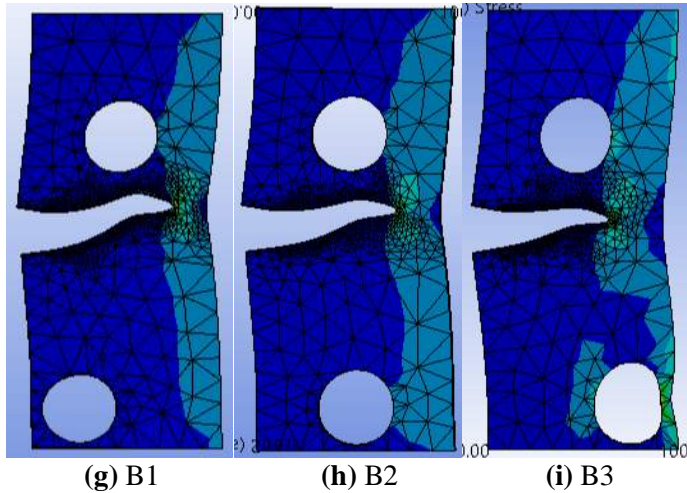
Spesimen	Hasil Perambatan Retak
A1	Lurus
A2	Sedikit terdefleksi
A3	Terdefleksi
T1	Belokan tajam
T2	Belokan kurang tajam
T3	Terdefleksi

Tabel 4.1 adalah hasil simulasi berupa arah perambatan retak pada simulasi satu lubang. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa pada sumbu Y semakin jauh letak lubang dari *initial crack* maka semakin lurus arah rambatan retak, dan pada sumbu X semakin dekat posisi lubang dengan *initial crack* maka semakin tajam belokan rambatan retak.

4.1.2 Simulasi Pada Dua Lubang

Pada pembahasan arah perambatan retak spesimen dua lubang, digunakan spesimen dengan satu lubang tetap, seperti pada Gambar 3.14, dan sembilan variasi lubang kedua, seperti pada Gambar 3.15, dengan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.2.





Gambar 4. 2 Simulasi Dua Lubang

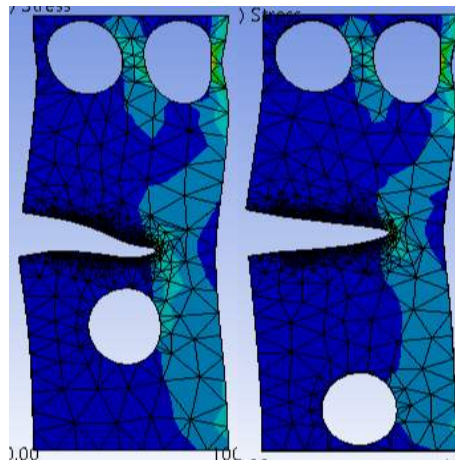
Tabel 4. 2 Arah Perambatan Retak pada Simulasi Dua Lubang

Spesimen	Hasil Perambatan Retak
A1	Ke arah lubang tetap
A2	Ke arah lubang tetap
A3	Ke arah lubang tetap, ujung retak ke arah lubang kedua
T1	Ke arah lubang tetap, awal retak ke arah lubang kedua
T2	Lurus
T3	Ke arah lubang tetap, ujung retak ke arah lubang kedua
B1	Ke arah lubang tetap
B2	Ke arah lubang tetap
B3	Ke arah lubang tetap, ujung retak terdefleksi ke arah lubang kedua

Tabel 4.2 adalah hasil simulasi berupa arah perambatan retak pada simulasi dua lubang. Pada Gambar A1, A2, A3, B1, B2, B3, letak lubang tetap lebih dekat dari *initial crack* dibanding letak lubang kedua, sehingga retak merambat ke arah lubang kedua. Pada Gambar A3 ujung retak mengarah ke lubang kedua karena letaknya dekat dari lubang tetap, sedangkan pada Gambar B3 ujung retak hanya terdefleksi ke lubang kedua karena letaknya jauh dari lubang tetap. Pada Gambar T1 dan T3, retak akan merambat ke arah lubang terdekat dari *initial crack*, lalu merambat lagi ke arah lubang terdekat dari retakan tersebut karena letak lubang relative tidak jauh dari retakan. Pada Gambar T2 retakan hanya merambat lurus karena specimen membentuk pola yang simetris, sehingga hambatan untuk retak merambat terbagi menjadi sama besar.

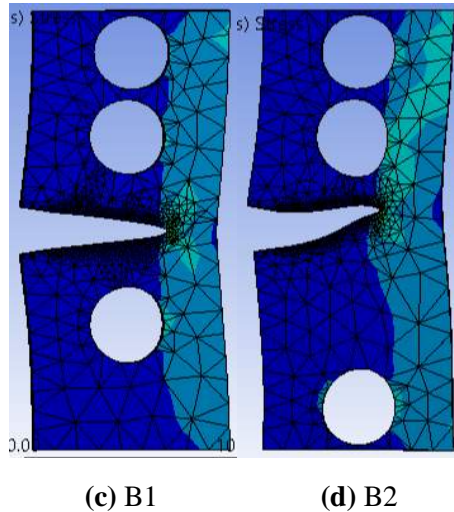
4.1.3 Simulasi Pada Tiga Lubang

Pada penelitian ini disimulasikan empat jenis spesimen dengan tiga lubang, seperti pada Gambar 3.19, dengan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.3.



(a) A1

(b) A2



Gambar 4. 3 Simulasi Tiga Lubang

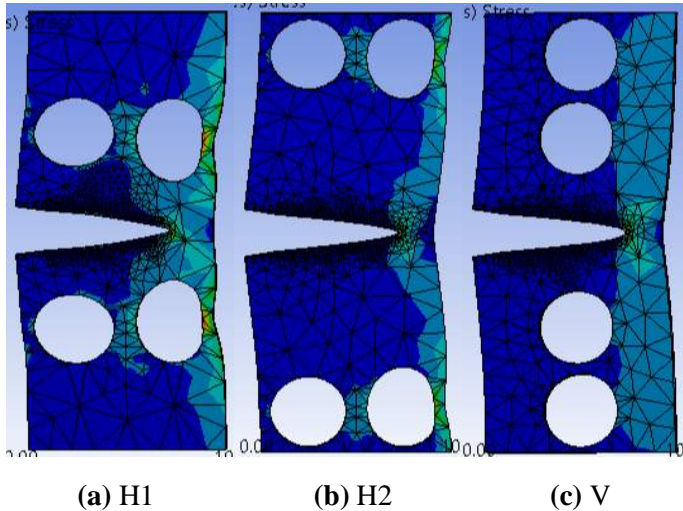
Tabel 4. 3 Arah Perambatan Retak pada Simulasi Tiga Lubang

Spesimen	Hasil Perambatan Retak
A1	Ke arah lubang tengah
A2	Lurus, sedikit terdefleksi
B1	Lurus
B2	Ke arah lubang tengah

Tabel 4.3 adalah hasil simulasi berupa arah perambatan retak pada simulasi tiga lubang. Pada Gambar A1 dan B2 retak merambat ke arah lubang tengah karena lubang tersebut yang paling dekat dari *initial crack*. Pada Gambar B1 lubang hanya merambat lurus karena lubang terdekat membentuk pola simetris, sehingga hambatan retak untuk merambat cenderung sama. Pada Gambar A2 retak hanya terdefleksi ke arah tiap lubang, karena letak lubang yang jauh dari *initial crack*.

4.1.4 Simulasi Pada Empat Lubang

Pada penelitian ini disimulasikan tiga jenis spesimen dengan empat lubang, seperti pada Gambar 3.20, dengan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Simulasi Empat Lubang

Tabel 4. 4 Arah Perambatan Retak pada Simulasi Empat Lubang

Spesimen	Hasil Perambatan Retak
H1	Lurus, retakan lebar
H2	Lurus
V	Lurus

Tabel 4.4 adalah hasil simulasi berupa arah perambatan retak pada simulasi satu lubang. Dari hasil simulasi empat lubang dapat disimpulkan jika spesimen membentuk pola yang simetris maka retakan merambat lurus searah *initial crack*. Retakan pada Gambar H1 lebih lebar dibanding retakan pada Gambar H2, karena posisi lubang pada Gambar H1 lebih dekat dengan *initial crack*, sehingga retakan lebih terdefleksi ke arah lubang.

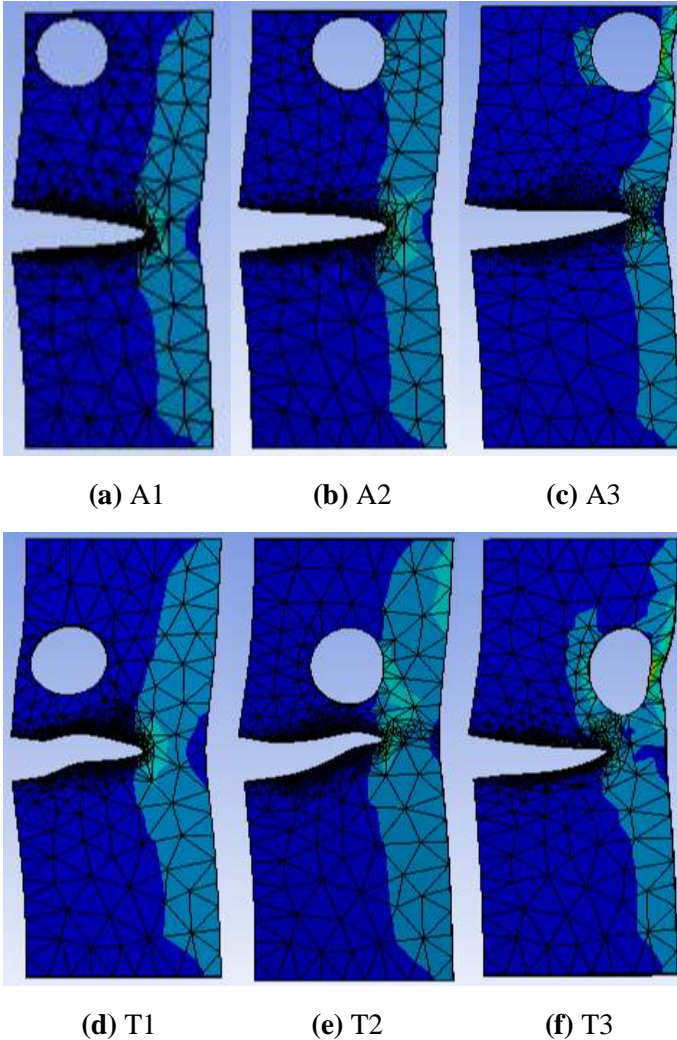
Dari simulasi satu, dua, tiga, dan empat lubang dapat disimpulkan bahwa retak merambat ke arah lubang terdekat dari *initial crack*, dan merambat lagi ke lubang terdekat yang jaraknya tidak jauh dari retakan. Jika letak lubang relatif jauh dari *initial crack* atau dari retakan, retakan hanya akan terdefleksi ke arah lubang tersebut. Jika spesimen membentuk pola yang simetris, maka retakan hanya akan merambat lurus searah dengan *initial crack*.

4.2 Pengaruh Posisi Lubang Terhadap Kekuatan Material

Mengukur besarnya nilai kekuatan spesimen terhadap retakan pada simulasi ini menggunakan parameter faktor intensitas tegangan atau K , hasil *output*-an dari fitur *fracture tool ANSYS Workbench*, yang didasarkan pada Hukum Paris, pada persamaan (2.4), dimana nilai K berbanding lurus dengan da/dN , yaitu laju perambatan retak, sehingga semakin besar nilai K maka semakin besar tingkat pertumbuhan retak dari sebuah spesimen, yang berarti semakin besar nilai K maka semakin kecil kekuatan spesimen terhadap retakan. Nilai K yang digunakan adalah nilai K maksimum dari tiap simulasi.

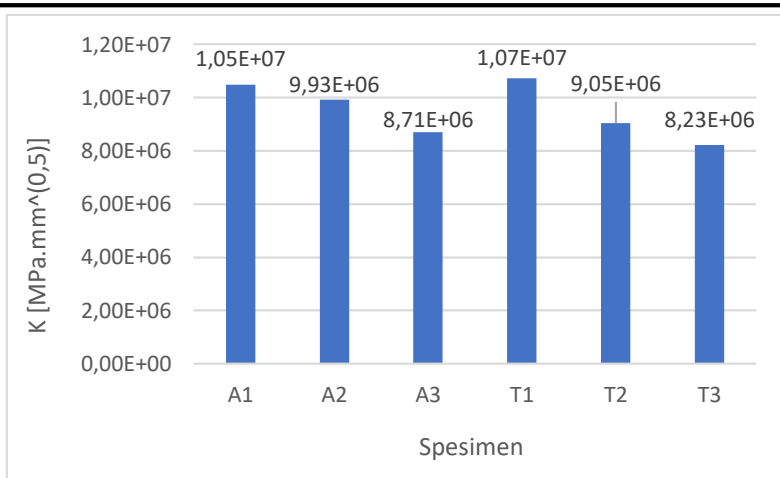
4.2.1 Pengaruh Posisi Lubang pada Simulasi Satu Lubang

Pada penelitian ini, terdapat enam simulasi rambatan retak dengan satu lubang yang bervariasi dari posisi lubang tersebut, seperti pada Gambar 3.13, dengan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Simulasi dengan Satu Lubang

Berdasarkan hasil dari tiap simulasi, dibuat perbandingan nilai K dari tiap simulasi seperti pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Perbandingan K pada Simulasi Satu Lubang

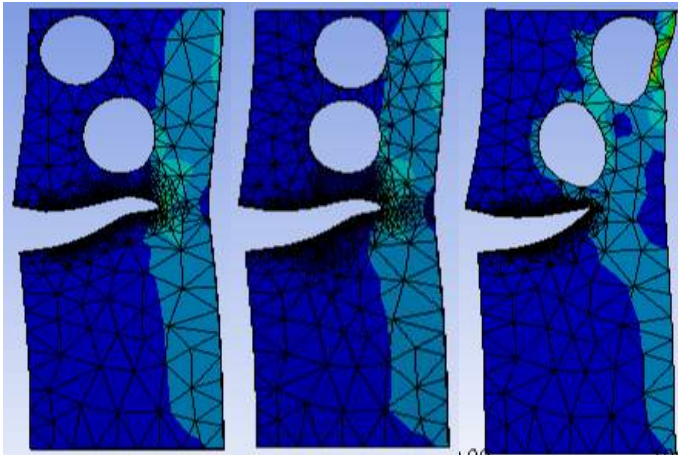
Dari Gambar 4.6 dapat disimpulkan, pada sumbu X semakin jauh letak lubang dari *initial crack* maka semakin rendah Nilai K, atau kekuatan spesimen semakin tinggi, sedangkan pada sumbu Y semakin dekat dengan *initial crack* maka semakin rendah nilai K, atau semakin tinggi kekuatan spesimen, terkecuali pada spesimen A1 dan T1, dimana nilai K spesimen T1 lebih tinggi dari A1, karena letak lubang pada T1 sangat dekat dengan *initial crack* yang mempengaruhi hambatan retak untuk merambat sehingga sangat mudah retakan merambat pada spesimen T1. Dari enam simulasi tersebut, spesimen T3 memiliki nilai K terendah senilai $8,23 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$, dan spesimen T1 dengan nilai K tertinggi senilai $1,07 \times 10^7 \text{ MPa.mm}^{0,5}$.

4.2.2 Pengaruh Posisi Lubang pada Simulasi Dua Lubang

Penelitian ini dilakukan pada spesimen dengan dua lubang yang posisinya bervariasi. Berikut dibahas berdasarkan kesesuaian letak lubang untuk dibandingkan ketahanan spesimen terhadap retakan.

a. Simulasi Dua Lubang dengan Satu Lubang Tetap

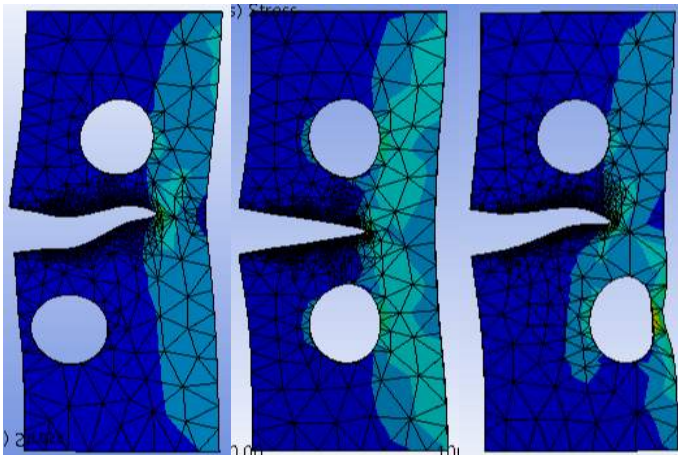
Digunakan satu lubang tetap, seperti pada Gambar 3.14, dan sembilan variasi lubang kedua, seperti pada Gambar 3.15, dengan hasil simulasi seperti Gambar 4.7.



(a) A1

(b) A2

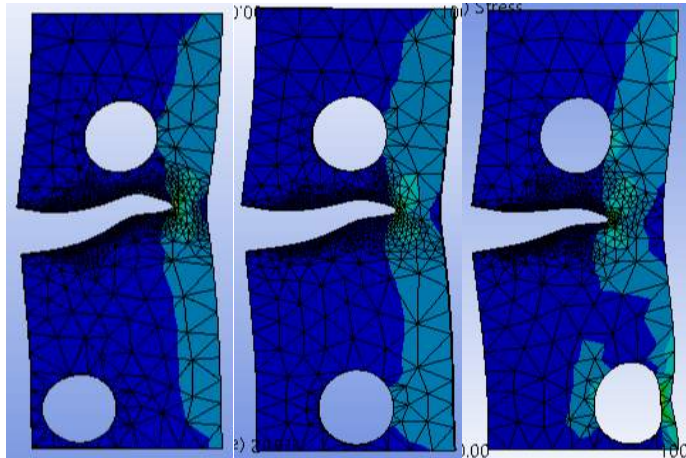
(c) A3



(d) T1

(e) T2

(f) T3



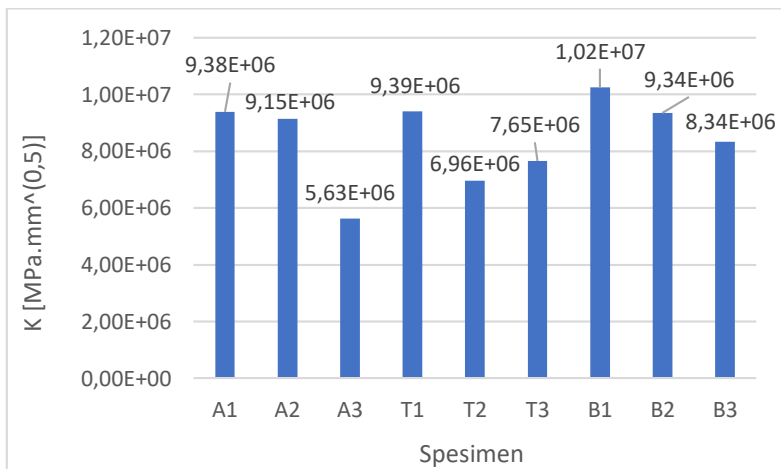
(g) B1

(h) B2

(i) B3

Gambar 4. 7 Simulasi Dua Lubang dengan Satu Lubang Tetap

Berdasarkan hasil dari tiap simulasi, dibuat perbandingan nilai K dari tiap simulasi seperti pada Gambar 4.8.

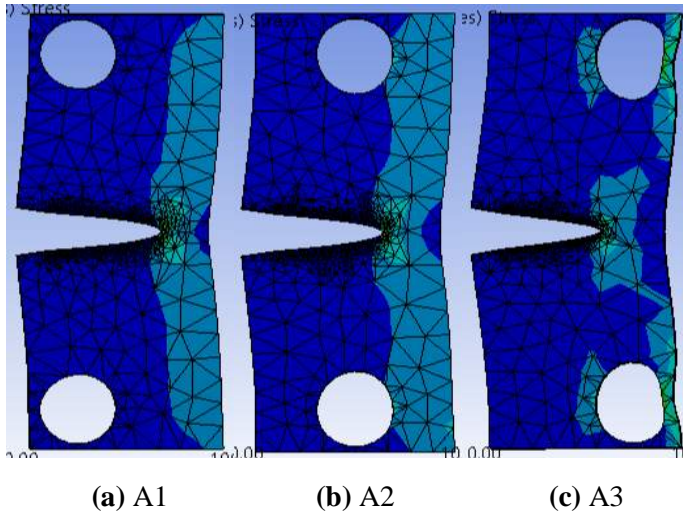


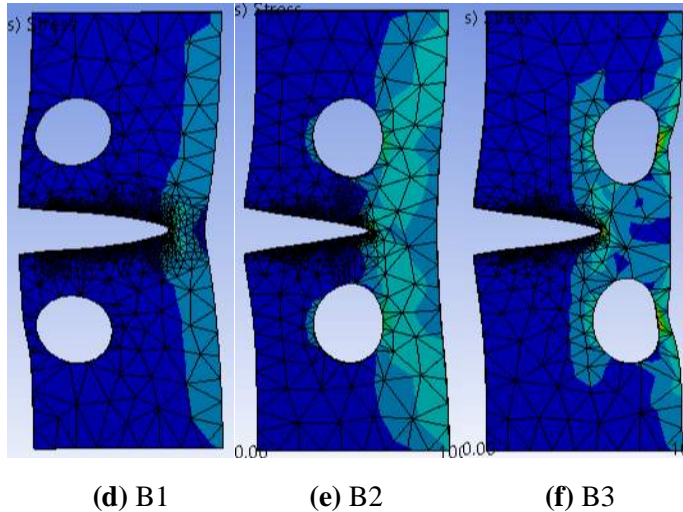
Gambar 4. 8 Perbandingan K pada Simulasi Dua Lubang

Dari Gambar 4.8 dapat dilihat pada sumbu X semakin jauh letak lubang dari *initial crack* maka semakin rendah nilai K, atau semakin tinggi kekuatan spesimen, terkecuali pada spesimen T2 dimana spesimen berbentuk pola yang simetris. Dari Sembilan spesimen tersebut, spesimen dengan nilai K terendah yaitu spesimen A3 senilai $5,63 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0,5}$, dan spesimen dengan nilai K tertinggi yaitu spesimen B1 senilai $1,02 \times 10^7 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0,5}$.

b. Simulasi Dua Lubang Simetris

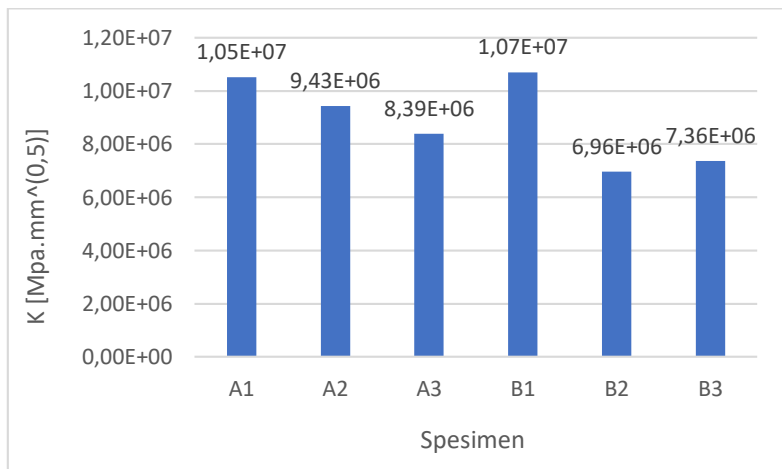
Digunakan enam spesimen dengan lubang simetris seperti pada Gambar 3.16, dengan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.9.





Gambar 4. 9 Simulasi Dua Lubang Simetris

Berdasarkan hasil dari tiap simulasi, dibuat perbandingan nilai K dari tiap simulasi seperti pada Gambar 4.10.

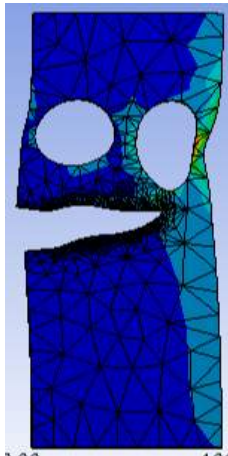


Gambar 4. 10 Perbandingan K pada Simulasi Lubang Simetris

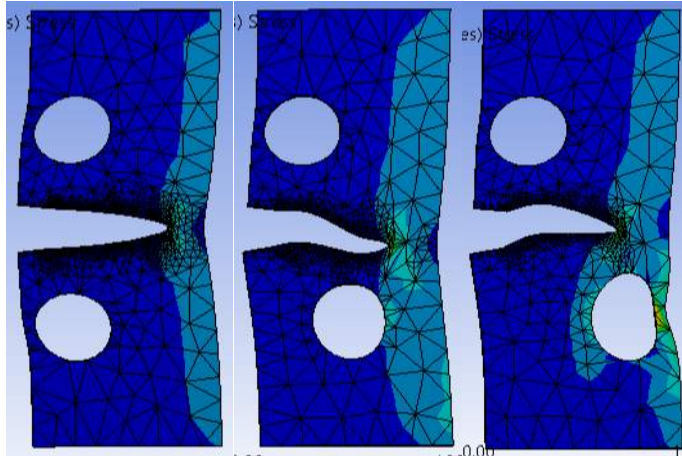
Dari Gambar 4.10, pada sumbu X semakin jauh letak lubang dari *initial crack* maka semakin rendah nilai K, atau semakin tinggi kekuatan spesimen, terkecuali pada spesimen B2, yang terletak ditengah, memiliki nilai K yang lebih rendah dari B3 yang terletak di sebelah kanan. Pada sumbu Y semakin dekat lubang dengan *initial crack* maka semakin rendah nilai K, atau semakin tinggi kekuatan spesimen, terkecuali pada spesimen B1 dimana jarak lubangnya lebih dekat dengan *initial crack* dibandingkan spesimen A1 tetapi memiliki nilai K yang lebih besar. Spesimen dengan nilai K terendah dari enam spesimen diatas adalah spesimen B2 senilai $6,96 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$, dan spesimen dengan nilai K tertinggi adalah spesimen B1 senilai $1,07 \times 10^7 \text{ MPa.mm}^{0,5}$.

c. Simulasi Dua Lubang Berseberangan

Digunakan empat spesimen seperti pada Gambar 3.17, dengan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.11.



(a) A



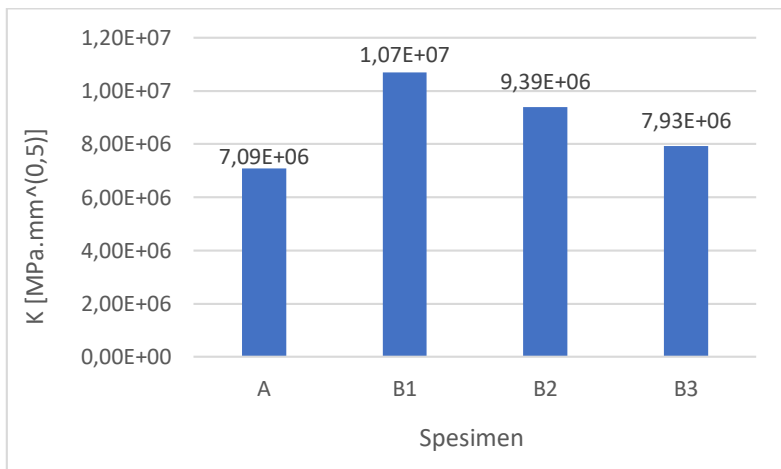
(b) B1

(c) B2

(d) B3

Gambar 4. 11 Simulasi Dua Lubang Berseberangan

Berdasarkan hasil dari tiap simulasi, dibuat perbandingan nilai K dari tiap simulasi seperti pada Gambar 4.12.

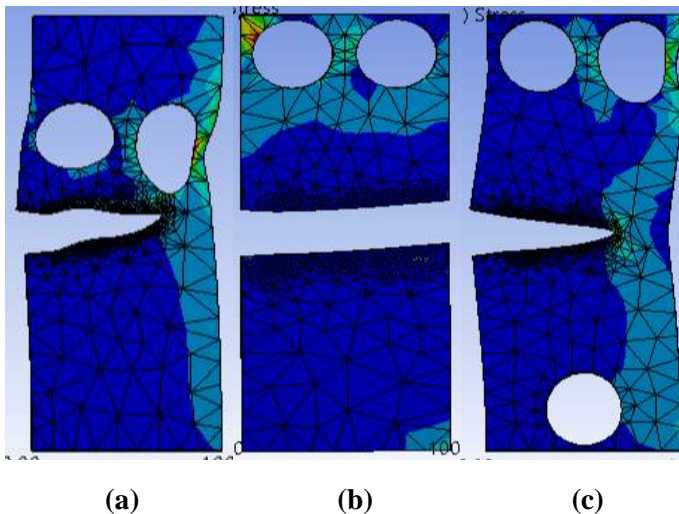


Gambar 4. 12 Perbandingan K Simulasi Lubang Berseberangan

Dari Gambar 4.12, dapat dilihat bahwa spesimen dengan lubang yang berseberangan, yaitu spesimen B, memiliki nilai K lebih tinggi dari spesimen yang tidak berseberangan, yaitu spesimen A, atau kekuatan spesimen B lebih rendah, dengan nilai K pada spesimen A sebesar $7,09 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0.5}$. Namun jika nilai K spesimen A tersebut dibandingkan dengan nilai spesimen B2 lubang simetris pada Gambar 4.10 yang merupakan spesimen dengan lubang berseberangan, nilai K spesimen B2 tersebut lebih rendah, yaitu sebesar $6,96 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0.5}$. Sehingga tidak selalu spesimen lubang berseberangan memiliki nilai K lebih tinggi, atau kekuatan spesimennya lebih rendah.

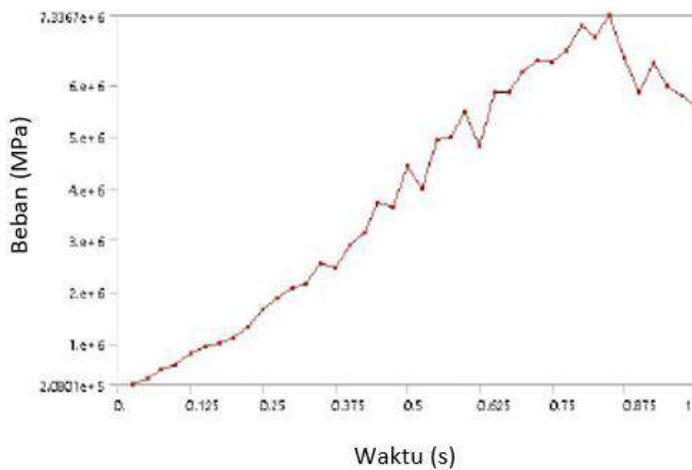
d. Simulasi Spesimen yang Patah

Pada penelitian ini terdapat satu simulasi yang mengalami patah, yaitu spesimen seperti pada Gambar 3.18 (b). Simulasi spesimen tersebut beserta simulasi yang memiliki kesesuaian letak lubang, dengan spesimen seperti pada Gambar 3.18, memiliki hasil seperti pada Gambar 4.13.

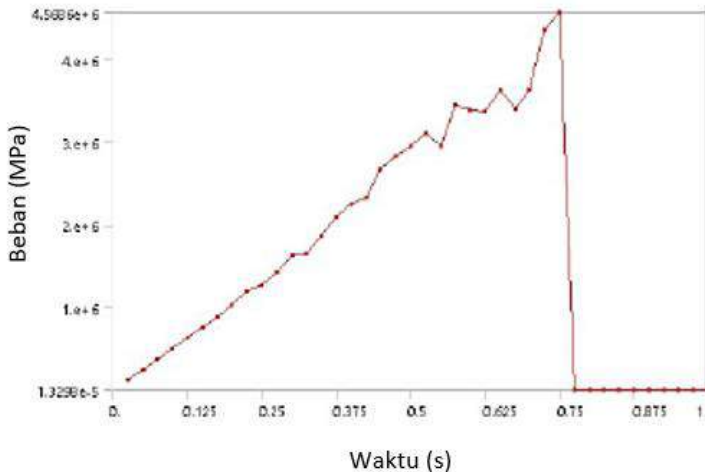


Gambar 4. 13 Simulasi Spesimen yang Patah

Spesimen (b) merupakan satu-satunya spesimen dari empat puluh enam simulasi yang mengalami patah. Pada *report preview* hasil simulasi tidak terdapat nilai K dari simulasi spesimen (b), oleh karena itu untuk membandingkannya dengan simulasi spesimen (a) digunakan parameter *stress probe* terhadap sumbu Y, searah dengan *displacement* yang dikenakan pada tiap simulasi, seperti pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15.



Gambar 4. 14 *Stress Probe* Spesimen (a)

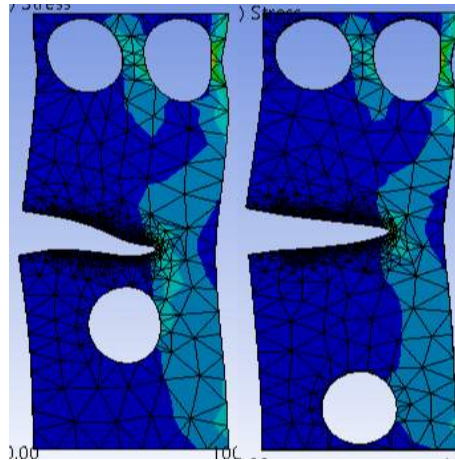


Gambar 4.15 *Stress Probe* Spesimen (b)

Dari Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa spesimen (b) mengalami patah saat beban pada sumbu Y sebesar 4.5686×10^6 MPa, sedangkan spesimen (a) mengalami beban maksimum pada sumbu Y sebesar 5.5605×10^6 MPa. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa kekuatan spesimen dengan letak lubang di tepi lebih rendah daripada spesimen dengan letak lubang di tengah. Penambahan lubang, pada spesimen (c) menghasilkan spesimen menjadi tidak patah, sehingga semakin banyak lubang maka semakin tinggi kekuatan spesimen.

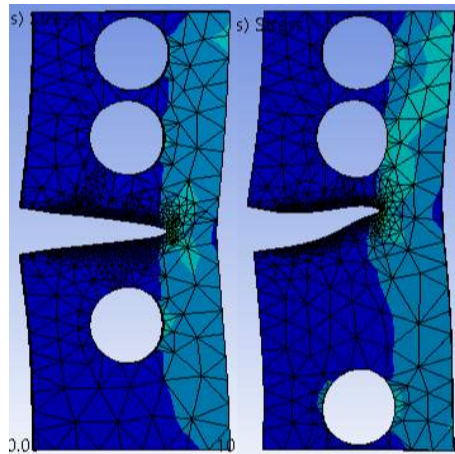
4.2.3 Pengaruh Posisi Lubang pada Simulasi Tiga Lubang

Pada penelitian ini disimulasikan empat jenis spesimen dengan tiga lubang, seperti pada Gambar 3.19, dengan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.16.



(a) A1

(b) A2

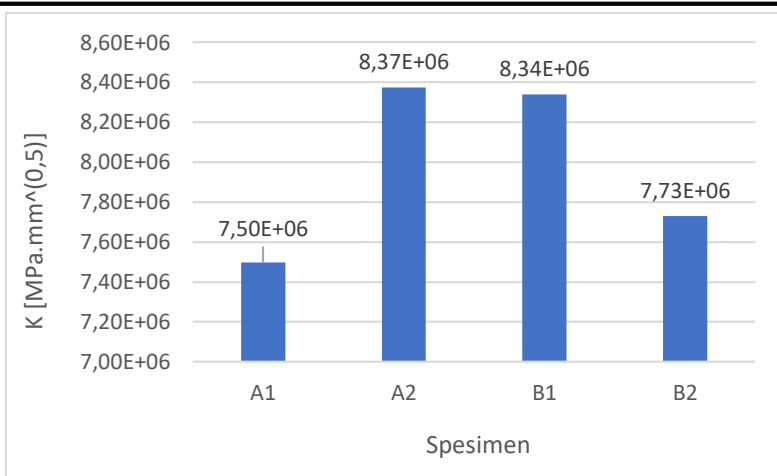


(c) B1

(d) B2

Gambar 4. 16 Simulasi Tiga Lubang

Berdasarkan hasil dari tiap simulasi, dibuat perbandingan nilai K dari tiap simulasi seperti pada Gambar 4.17.

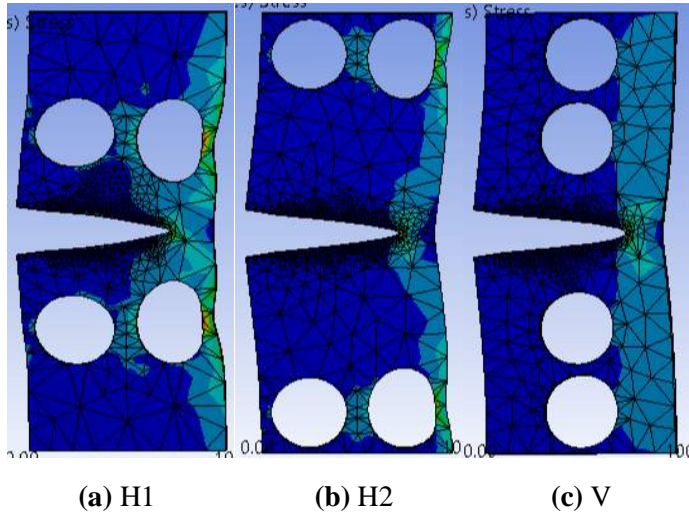


Gambar 4. 17 Perbandingan K pada Simulasi Tiga Lubang

Dari Gambar 4.18, dapat dilihat spesimen A1 dan B2, yang bentuk retaknya berbelok ke lubang tengah, memiliki nilai K lebih rendah dibandingkan dengan spesimen A2 dan B1, yang bentuk retaknya lurus. Sehingga dapat disimpulkan semakin ke tengah letak lubangnya maka semakin rendah nilai K, atau semakin tinggi kekuatan spesimen, dengan tidak membentuk pola simetris seperti spesimen B1. Dari empat spesimen tersebut, spesimen A1 memiliki nilai K terendah sebesar $7,50 \times 10^6$ MPa.mm^{0,5}, dan spesimen A2 memiliki nilai K tertinggi sebesar $8,37 \times 10^6$ MPa.mm^{0,5}.

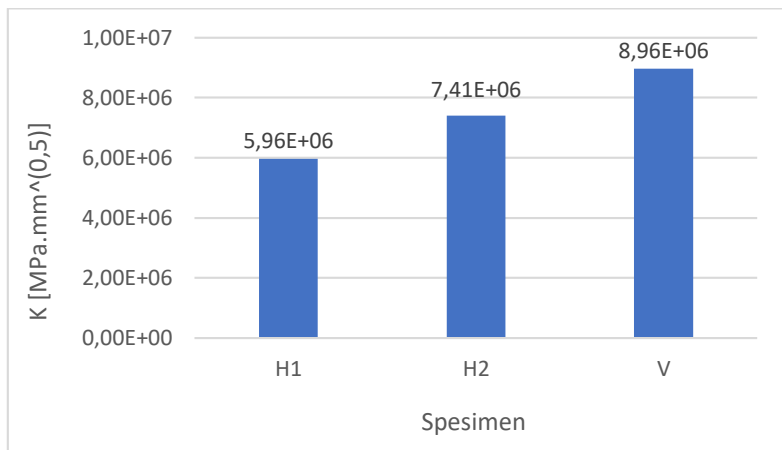
4.2.4 Pengaruh Posisi Lubang pada Simulasi Empat Lubang

Pada penelitian ini disimulasikan tiga jenis spesimen dengan empat lubang, seperti pada Gambar 3.20, dengan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 18 Simulasi pada Spesimen Empat Lubang

Berdasarkan hasil dari tiap simulasi, dibuat perbandingan nilai K dari tiap simulasi seperti pada Gambar 4.19.

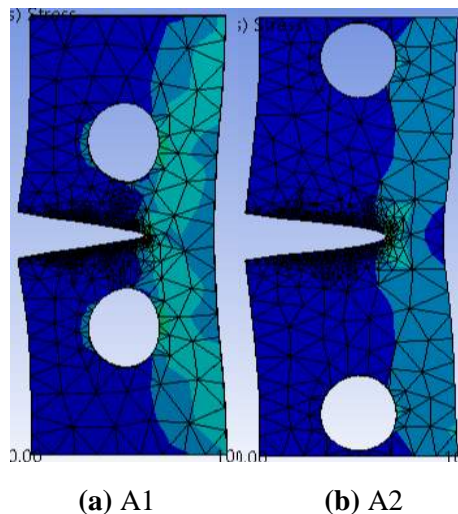


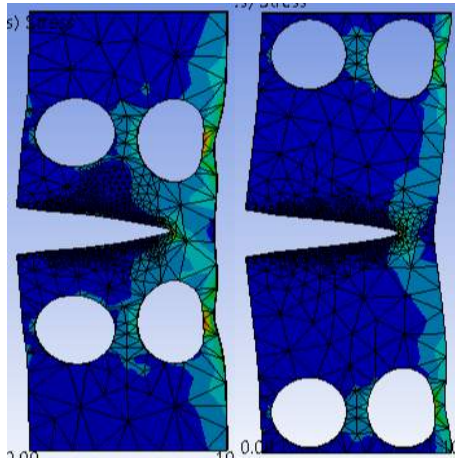
Gambar 4. 20 Perbandingan K pada Spesimen Empat Lubang

Dari Gambar 4.19, dapat disimpulkan posisi lubang horizontal memiliki nilai K lebih rendah dari posisi lubang vertikal, atau kekuatan spesimen lubang horizontal lebih tinggi dari spesimen lubang vertikal. Dari Gambar 4.19 juga dapat disimpulkan semakin ke tepi letak lubang maka semakin tinggi nilai K, atau semakin rendah kekuatan spesimen. Dari tiga spesimen tersebut, spesimen H1 memiliki nilai K terendah sebesar $5,96 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$, dan spesimen V memiliki nilai K tertinggi sebesar $8,96 \times 10^6 \text{ MPa.mm}^{0,5}$.

4.3 Pengaruh Jumlah Lubang Terhadap Kekuatan Material

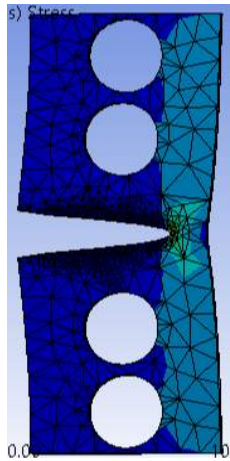
Jumlah lubang pada sebuah spesimen berpengaruh pada kekuatannya. Karena parameter yang ditinjau pada analisis ini adalah jumlah lubang, maka bentuk spesimen yang digunakan adalah yang sejenis, agar dapat dibandingkan dengan selaras. Terdapat lima jenis spesimen yang digunakan pada analisis ini, seperti pada Gambar 3.21, dengan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.20.





(c) B1

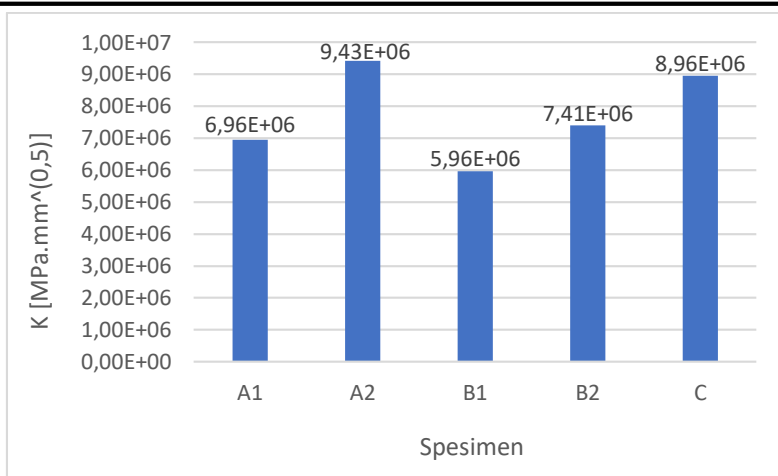
(d) B2



(e) C

Gambar 4. 20 Spesimen dengan Variasi Jumlah Lubang

Berdasarkan hasil dari tiap simulasi, dibuat perbandingan nilai K dari tiap simulasi seperti pada Gambar 4.21.



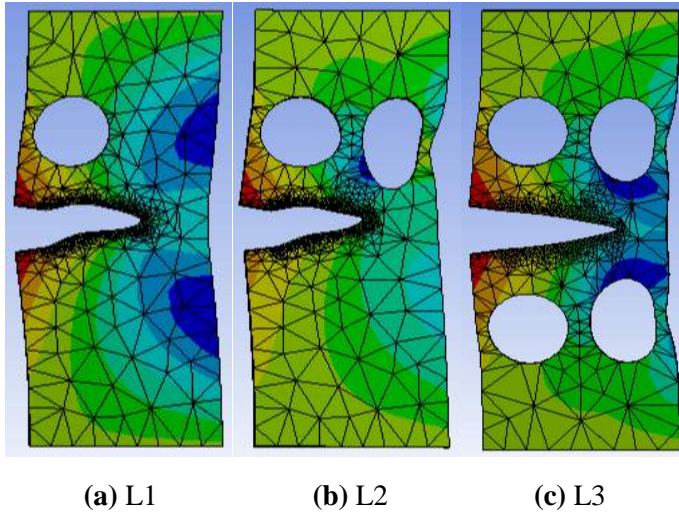
Gambar 4. 21 Perbandingan K pada Spesimen dengan Variasi Jumlah Lubang

Dari Gambar 4.21 dapat dilihat nilai K pada spesimen empat lubang, spesimen B1 dan B2, lebih rendah dibandingkan dengan spesimen dua lubang, spesimen A1 dan A2, menunjukkan kekuatan spesimen empat lubang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen dua lubang, yang berarti semakin banyak jumlah lubang maka semakin tinggi kekuatan spesimen. Namun jika membandingkan spesimen A1 dengan spesimen C, spesimen empat lubang vertikal, nilai K spesimen C lebih tinggi dibandingkan spesimen A1, atau kekuatan spesimen C lebih rendah dari spesimen A1. Sehingga selain jumlah lubang perlu diperhatikan letak lubang tersebut dalam menentukan pengaruh lubang terhadap kekuatan spesimen.

4.4 Pengaruh Variasi Material

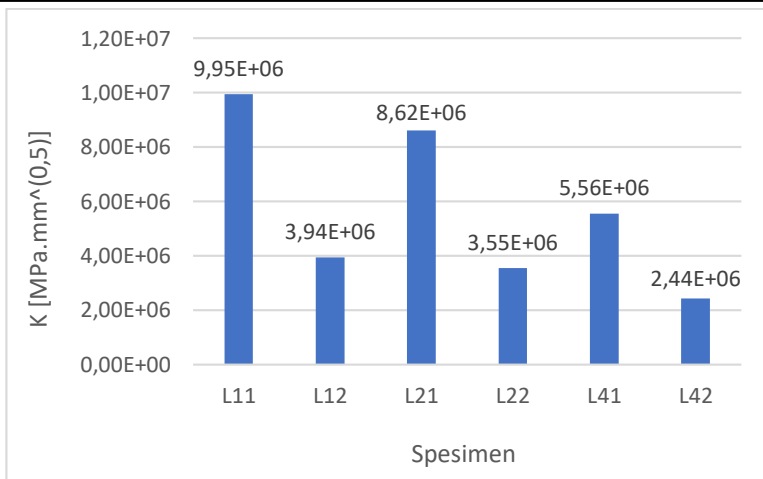
Perbedaan hasil simulasi pada variasi material dihasilkan dari perbedaan data *input*, yaitu modulus elastisitas, tegangan tarik, *poisson's ratio*, dan massa jenis. Digunakan tiga spesimen untuk

masing-masing jenis material, seperti pada Gambar 3.22, dengan hasil deformasi dari simulasi seperti pada Gambar 4.23.



Gambar 4. 22 Variasi lubang yang digunakan pada variasi material

Berdasarkan hasil dari tiap simulasi pada spesimen AISI 1020 dan AA 2024 – T3, dibuat perbandingan nilai K dari tiap simulasi seperti pada Gambar 4.23.

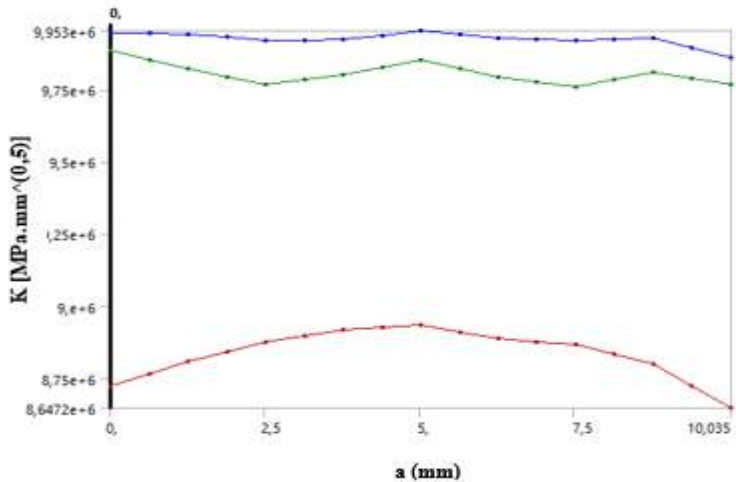


Gambar 4. 23 Perbandingan K pada AA 2024 – T3 dan AISI 1020

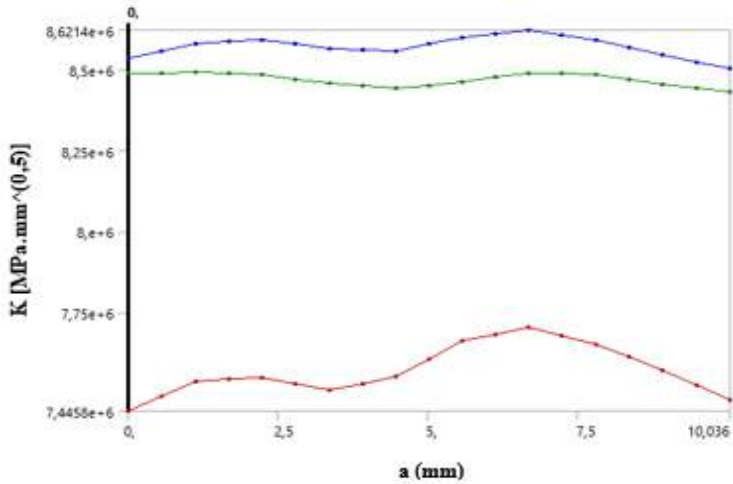
Dari Gambar 4.23, didapatkan hasil bahwa nilai K pada AA 2024 – T3 lebih rendah daripada AISI 1020, menunjukkan kekuatan spesimen dari AA 2024 – T3 lebih tinggi dibandingkan AISI 1020.

Nilai K yang digunakan sebagai parameter perbandingan kekuatan terhadap retak dari tiap spesimen dapat digunakan untuk menghitung laju perambatan retak da/dN dengan menggunakan Hukum Paris, seperti pada Persamaan 2.4, dengan nilai konstanta C AISI 1020 adalah $6,90 \times 10^{-12}$ dan m sebesar 3, dan untuk nilai konstanta C AA 2024 – T3 adalah $1,1 \times 10^{-10}$ dan m sebesar 2,601. Berikut hasil tiap simulasi berupa grafik faktor intensitas tegangan (K) terhadap panjang retak (a) yang digunakan untuk menghitung laju perambatan retak. Gambar 4.24 merupakan grafik K terhadap a pada simulasi satu lubang AISI 1020. Gambar 4.25 merupakan grafik K terhadap a pada simulasi dua lubang AISI 1020. Gambar 4.26 merupakan grafik K terhadap a pada simulasi empat lubang AISI 1020. Gambar 4.27 merupakan grafik K terhadap a pada simulasi satu lubang AA 2024 – T3. Gambar 4.28 merupakan

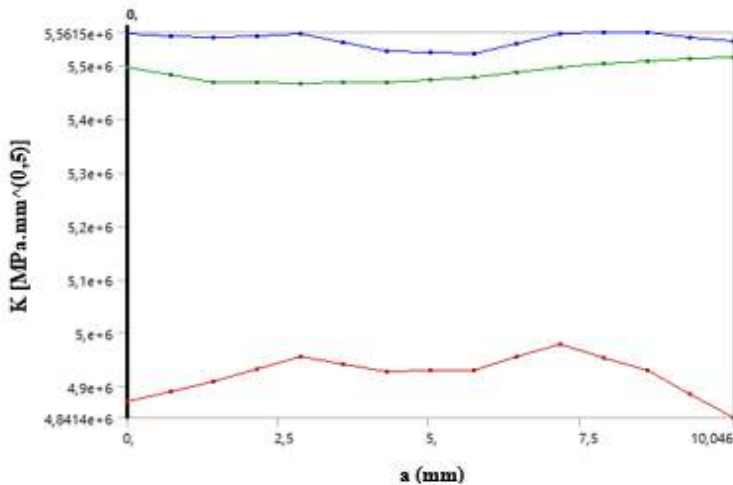
grafik K terhadap a pada simulasi dua lubang AA 2024 – T3. Gambar 4.29 merupakan grafik K terhadap a pada simulasi empat lubang AA 2024 – T3.



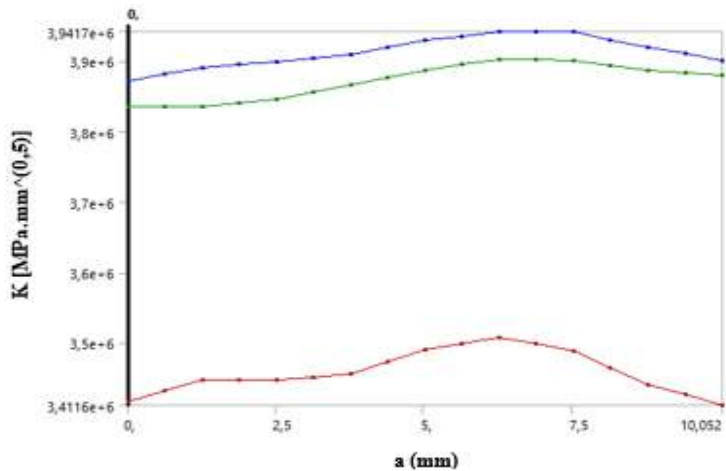
Gambar 4. 24 Grafik K terhadap a pada Simulasi Satu Lubang AISI 1020



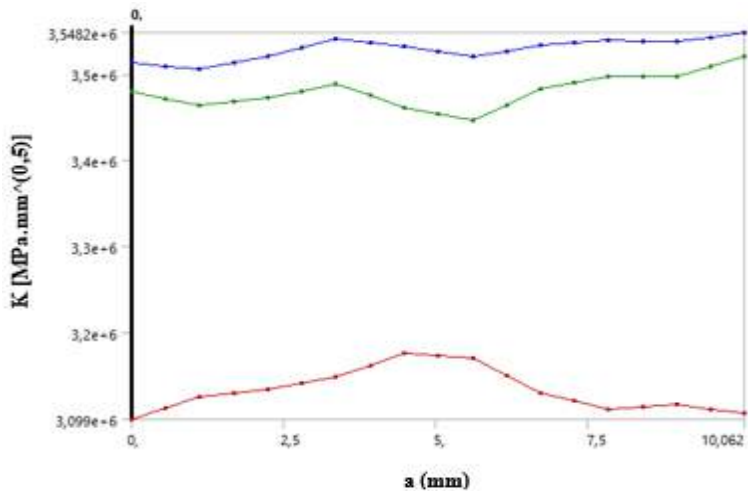
Gambar 4. 25 Grafik K terhadap a pada Simulasi Dua Lubang AISI 1020



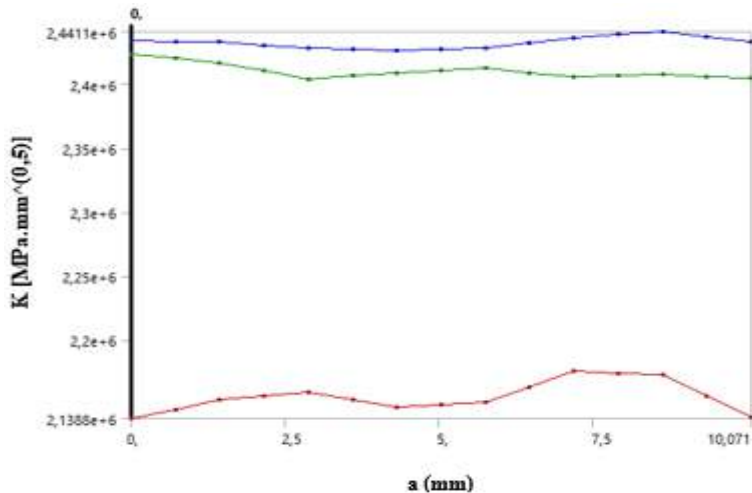
Gambar 4. 26 Grafik K terhadap a pada Simulasi Empat Lubang AISI 1020



Gambar 4. 27 Grafik K terhadap a pada Simulasi Satu Lubang AA 2024 – T3

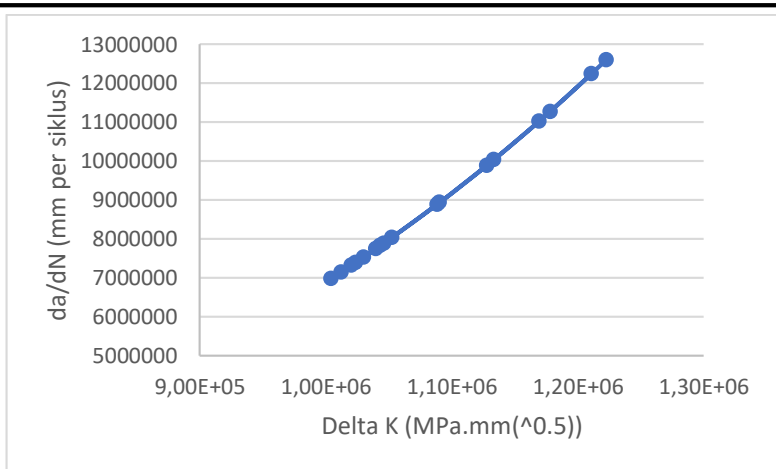


Gambar 4. 28 Grafik K terhadap a pada Simulasi Dua Lubang AA 2024 – T3

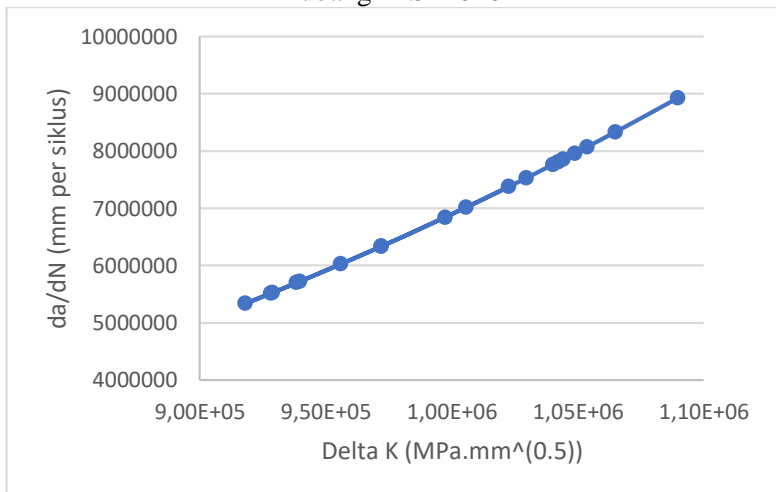


Gambar 4. 29 Grafik K terhadap a pada Simulasi Empat Lubang AA 2024 – T3

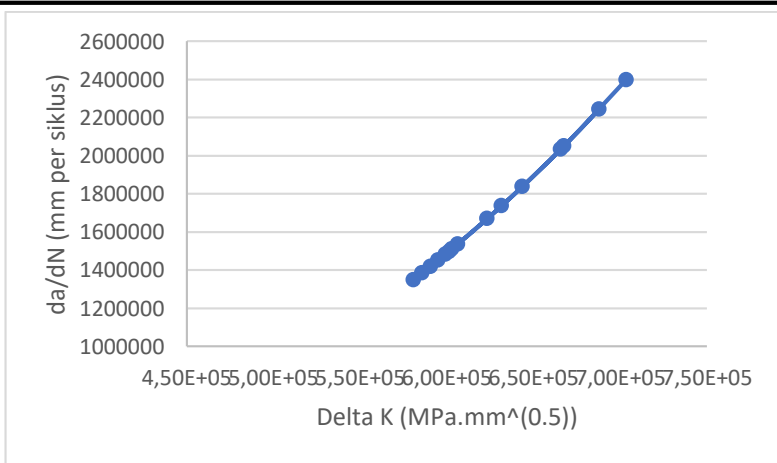
Dibawah ini adalah grafik laju perambatan retak da/dN terhadap faktor intensitas tegangan ΔK hasil tiap simulasi sesuai dengan Hukum Paris. Gambar 4.30 merupakan grafik da/dN terhadap ΔK pada simulasi satu lubang AISI 1020. Gambar 4.31 merupakan grafik da/dN terhadap ΔK pada simulasi dua lubang AISI 1020. Gambar 4.32 merupakan grafik da/dN terhadap ΔK pada simulasi empat lubang AISI 1020. Gambar 4.33 merupakan grafik da/dN terhadap ΔK pada simulasi AISI 1020. Gambar 4.34 merupakan grafik da/dN terhadap ΔK pada simulasi satu lubang AA 2024 – T3. Gambar 4.35 merupakan grafik da/dN terhadap ΔK pada simulasi dua lubang AA 2024 – T3. Gambar 4.36 merupakan grafik da/dN terhadap ΔK pada simulasi empat lubang AA 2024 – T3. Gambar 4.37 merupakan grafik da/dN terhadap ΔK pada simulasi AA 2024 – T3.



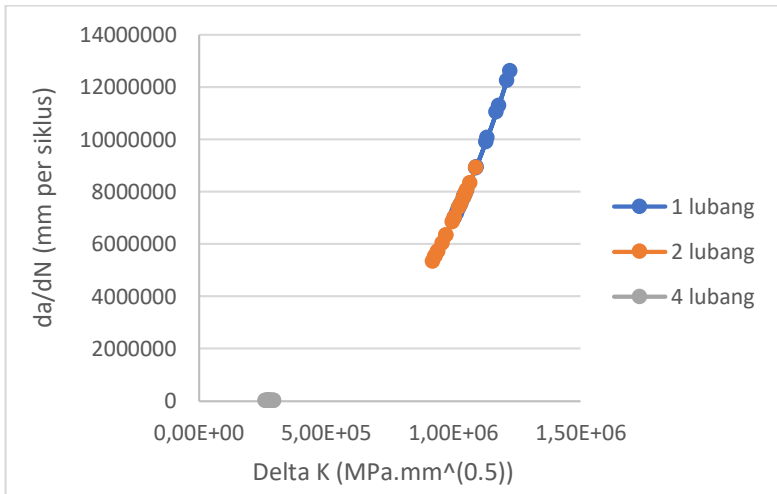
Gambar 4. 30 Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Satu Lubang AISI 1020



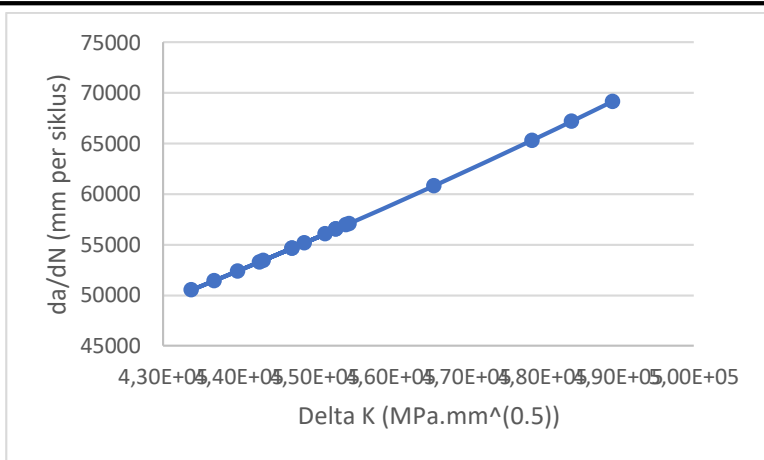
Gambar 4. 31 Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Dua Lubang AISI 1020



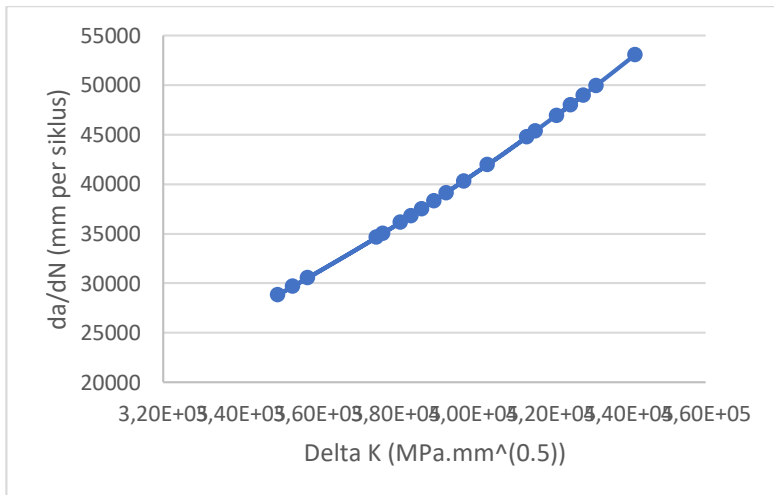
Gambar 4.32 Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Empat Lubang AISI 1020



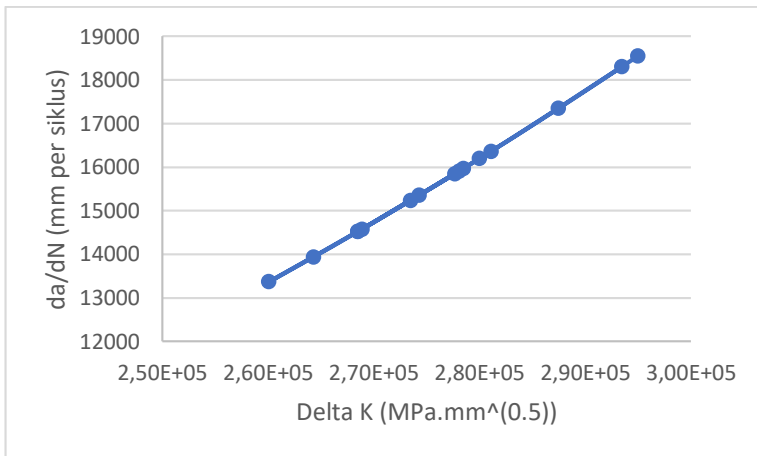
Gambar 4.33 Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi AISI 1020



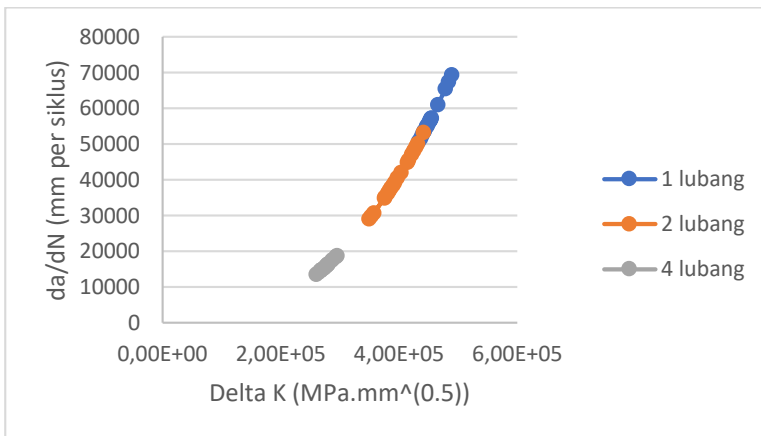
Gambar 4. 34 Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Satu Lubang AA 2024 – T3



Gambar 4. 35 Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Dua Lubang AA 2024 – T3



Gambar 4. 36 Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi Empat Lubang AA 2024 – T3



Gambar 4. 37 Grafik da/dN terhadap ΔK pada Simulasi AA 2024 – T3

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Telah dilakukan penelitian mengenai perambatan retak yang terjadi pada material baja dan aluminium dengan metode elemen hingga atau simulasi. Dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa:

1. Arah perambatan retak cenderung ke arah lubang terdekat dari *initial crack*, dan merambat lagi ke lubang terdekat yang jaraknya tidak jauh dari retakan. Jika letak lubang relatif jauh dari *initial crack* atau dari retakan, retakan hanya akan terdefleksi ke arah lubang tersebut. Jika spesimen membentuk pola yang simetris, maka retakan hanya akan merambat lurus searah dengan *initial crack*.
2. Posisi lubang menentukan kekuatan spesimen. Umumnya, pada sumbu X semakin jauh letak lubang dari *initial crack* maka semakin tinggi kekuatan spesimen, dan pada sumbu Y semakin dekat letak lubang dengan *initial crack* maka semakin tinggi kekuatan spesimen. Pada simulasi satu lubang, spesimen dengan kekuatan tertinggi adalah spesimen T3 dengan nilai K $8,23 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0,5}$. Pada simulasi dua lubang, dengan satu lubang tetap, spesimen dengan kekuatan tertinggi adalah spesimen A3 dengan K senilai $5,63 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0,5}$. Pada simulasi tiga lubang, spesimen dengan kekuatan tertinggi adalah spesimen A1 dengan K senilai $7,50 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0,5}$. Pada simulasi empat lubang, spesimen dengan kekuatan tertinggi adalah spesimen H1 dengan K senilai $5,96 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0,5}$.
3. Jumlah lubang mempengaruhi kekuatan spesimen. Semakin banyak jumlah lubang maka semakin tinggi kekuatan spesimen, atau semakin besar energi yang dibutuhkan untuk retakan dapat merambat. Nilai K pada

spesimen dua lubang A1 sebesar $6,96 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0,5}$, dan nilai K pada spesimen empat lubang B1 sebesar $5,96 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0,5}$.

4. Spesimen paduan aluminium AA 2024 – T3 memiliki kekuatan yang lebih tinggi daripada baja AISI 1020, dengan nilai K pada spesimen satu lubang AA 2024 – T3 sebesar $3,94 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0,5}$, dan AISI 1020 sebesar $9,95 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0,5}$.

5.2 Saran

Untuk kemajuan penelitian selanjutnya yang akan dilakukan mengenai permodelan perambatan retak, saran berikut dapat menjadi pertimbangan agar hasil yang didapatkan lebih baik, antara lain:

1. Ukuran dari *mesh* dan jumlah *contour* yang digunakan ditingkatkan agar hasil yang didapatkan lebih presisi.
2. Penelitian secara eksperimental perlu dilakukan sebagai validasi dari simulasi yang dilakukan

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, T. L. 2005. **Fracture Mechanics : Fundamentals and Applications, Third Edition**. Florida: CRC Press.
- Andrade, H. d. 2019. "The Multiple Fatigue Crack Propagation Modelling in Nonhomogeneous Structures Using The DBEM". **University of Sao Paolo** 14, 27:244-252.
- Boardman, B. 1990. **Fatigue Resistance of Steels**. ASM Handbook Committee.
- Bueckner, H. F. 1970. **A Novel Principle for the Computation of Stress Intensity Factors**. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik.
- Callister, W. D. 2009. **Materials Science and Engineering: An Introduction 9E**. Hoboken: John Wiley & Sons Inc.
- Davis, J. R. 2001. **ASM Specialty Handbook: Aluminium and Aluminium Alloy**. ASM International Handbook Committee.
- Erwin, G. R. 1961. **Plastic Zone Near a Crack and Fracture Toughness**. Syracuse University Research Institute.
- Gehlen, P. C. 1970. **An Atomic Model for Cleavage Crack Propagation in Iron**. New York: McGraw-Hill.
- Hutton, D. B. 2004. **Fundamentals of Finite Element Analysis**. New York: McGraw-Hill Inc.
- Inglis, C. E. 1913. **Stresses in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners**. Transactions of the Institute of Naval Architects.
- Irwin, G. R. 1948. **Fracture Dynamics**. Cleveland: American Society for Metals.

-
- Irwin, G. R. 1957. **Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traversing a Plate**. NBS Publication.
- Liao, Y. 2018. "Residual fatigue life analysis and comparison of an aluminum". **Central South University** 46, 19:227-235.
- Liao, Y. 2019. "Effect of Hole Relative Size and Position on Crack Deflection Angle of Repaired Structures". **Central South University** 48, 23:256-266.
- McCullough, R. R. Apr. 2019. "Fatigue Crack Nucleation and Small Crack Growth In An Extruded 6061 Aluminium Alloy". **University of Alabama** 33, 2:97-105
- Paris, P. C. 1961. **A Rational Analytic Theory of Fatigue**. The Trend in Engineering.
- Paris, P. C. 1985. **The Stress Analysis of Cracks Handbook**. St Louis: Paris Production.
- Parks, D. M. 1706. **Weight Functions from Virtual Crack Extension**. Science Press.
- Qi, S. Jan. 2019. "The Prediction Models For Fatigue Crack Propagation Rates of Mixed Mode I-II Cracks". **Southwest Jiaotong University** 16, 3:112-119.
- Rahardjo, T. E. Jul. 2012. "Analisa Perambatan Retak Pada Bagian Poros KM. Surya Tulus Akibat Torsi Dengan Metode Elemen Hingga". **Jurusan Teknik Perkapalan Institut Teknologi Sepuluh Nopember**.
- Rao, S. S. 2004. **The Finite Element Method in Engineering**. Miami: Elsevier Science & Technology.
- Rice, J. R. 1972. **Some Remarks on Elastic Crack-Tip Stress Fields**. International of Solids and Structures.
-

-
- Rice, J. R. 1989. **Weight Function Theory for Three-Dimensional Elastic Crack Analysis**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Roylance, D. 2001. **Introduction to Fracture Mechanics**. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Setiawan, R. W. Jan. 2018. "Pengaruh Ketinggian dan Panjang Retak pada Parameter Patahan Kasus Slewing Tower Level Luffing Crane". **Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember**.
- Shibanuma, K. 2018. **Crack Tip Opening Angle During Unstable Ductile Crack Propagation of A High-Pressure Gas Pipeline**. University of Tokyo.
- Tiastuti, J. Sep. 2016. "Analisis Perambatan Retak Fatik Baja AISI 1020". **Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung**.
- Weixing, Y. 1993. **Handbook of Stress-Intensity Factor**. Chinese Aeronautical Establishment: Science Press.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa, hanya karena anugerah-Nya penulisan Laporan Tugas Akhir ini dapat selesai
2. Orang tua dan saudara, keluarga tercinta yang telah menjadi sumber motivasi dan penyemangat dalam pembuatan laporan ini, serta telah mendukung secara moril maupun materil, dan doa yang selalu dinaikkan demi kesehatan, keselamatan, dan kelancaran dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
3. Gio, Ema, Bhimo, dan Debora yang sudah meminjamkan laptopnya untuk penulis untuk menyelesaikan Laporan ini.
4. Anky yang telah banyak membantu dan membagi ilmu kepada penulis dalam menyusun Tugas Akhir ini.

Akhir kata, semoga penelitian ini dapat bermanfaat dan berguna bagi semua yang membutuhkan.

Surabaya, Juli 2019
Penulis

Nimba Sharon Lande
NRP 0251154000092

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Nimba Sharon Lande. Lahir di Kendari pada tanggal 1 Juni 1998 dari pasangan Yunus Lande dan Rosalina Sallata. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis pernah menempuh pendidikan formal di SDN 1 Poasia, SMPN 5 Kendari, dan SMAN 1 Kendari. Penulis merupakan mahasiswa aktif Departemen Teknik Material FTI-ITS angkatan 2015. Selama menjalani pendidikan, penulis juga aktif dalam bidang non akademik, seperti menjadi Ketua Ekstrakurikuler

Kelompok Ilmiah Remaja (KIR) SMAN 1 Kendari 2013-2014. Saat menjalani kehidupan kampus, penulis juga aktif dalam bidang kepanitiaan, seperti menjadi koordinator Divisi Logistik Pembinaan Kerohanian Mahasiswa Baru Kristen ITS (PKMBK-ITS), maupun dalam organisasi, seperti di Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi ITS Fakultas Teknologi Industri ITS (HMMT FTI-ITS) sebagai staff BSO Material Techno Club kepengurusan 2016/2017, dan di Persekutuan Mahasiswa Kristen ITS (PMK-ITS) sebagai Kepala Divisi Logistik kepengurusan 2018/2019. Saat ini penulis bertempat tinggal di Kendari, Sulawesi Tenggara. Dalam kegiatan akademik, penulis pernah melaksanakan Kerja Praktik di PT ZEE Indonesia. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email nimbasharonlande@gmail.com dan nomor telepon 081242234504.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)