

PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'alamiin, segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan taufik kepada penulis sehingga mampu menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Sholawat dan salam patut penulis haturkan kepada *Sayyidina* Muhammad SAW sebagai teladan kehidupan. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan dan segala bantuan sehingga skripsi ini selesai disusun, terutama kepada:

1. Bapak Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng., Dr.Eng. dan Bapak M. Agus Choiron, ST., MT. selaku dosen pembimbing skripsi.
2. Bapak Ir. Marsoedi Wirohardjo, MMT., Bapak Ir. Abdul Hadi Djaelani, dan Bapak Ir. Syaifuddin Baedowi selaku dosen penguji skripsi.
3. Bapak Ir. Suharto, MT., selaku dosen pembimbing akademik.
4. Bapak Ir. Bambang Indrayadi, MT., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
5. Bapak Ir. Djoko sutikno, M.Eng., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
6. Bapak Ir. Achmad As'ad Sonief, MT., selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Konstruksi.
7. Pihak-pihak yang tidak dapat penulis tulis seluruhnya.

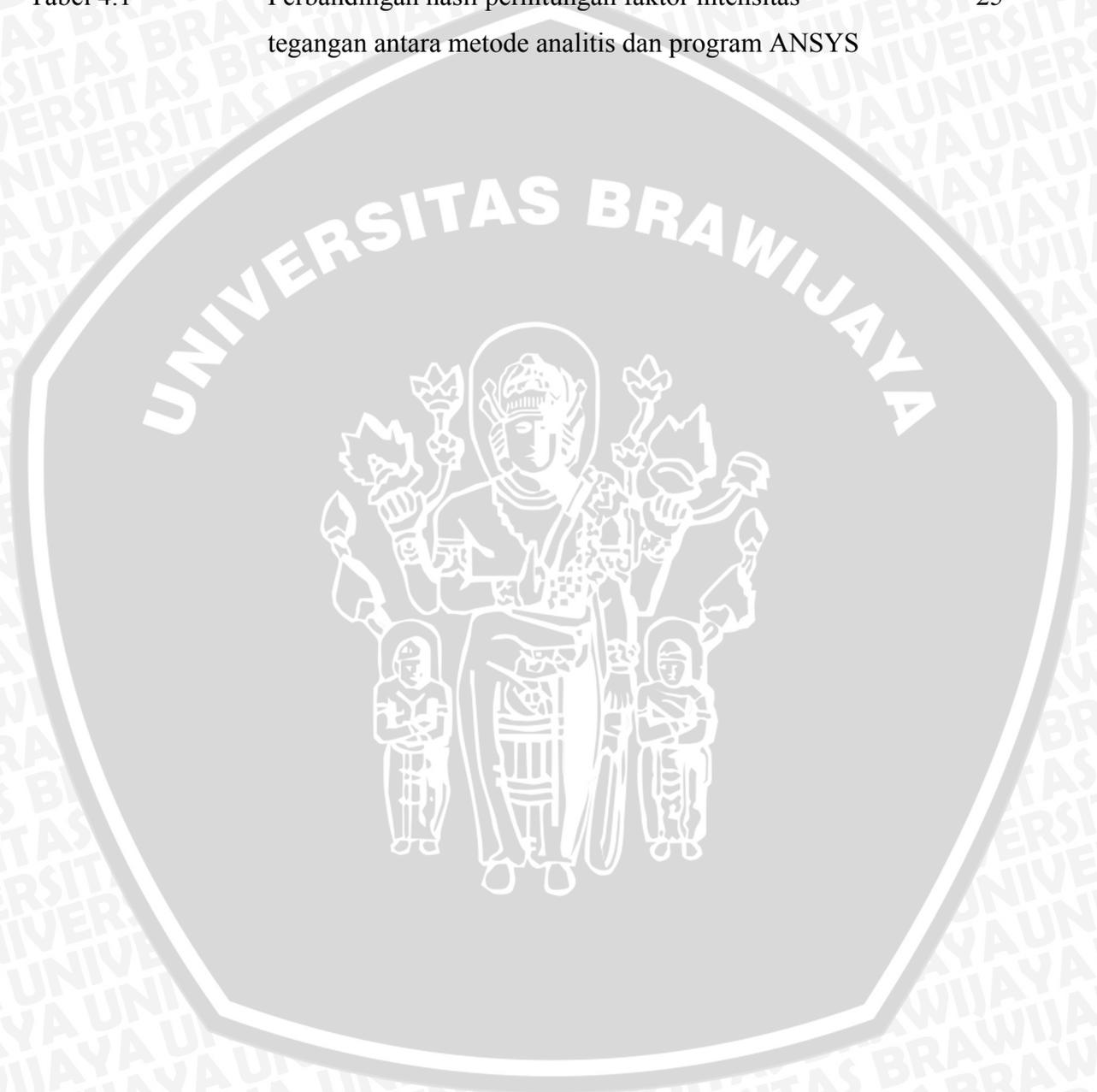
Penulis berharap para pembaca dapat melakukan evaluasi dan analisis yang lebih kritis terhadap permasalahan yang diulas sehingga menumbuhkan ide-ide baru yang lebih menyegarkan sebagai pendukung hasil analisis dalam skripsi ini.

Malang, 5 Juni 2007

Penulis

DAFTAR TABEL

No	Tabel	Halaman
Tabel 4.1	Perbandingan hasil perhitungan faktor intensitas tegangan antara metode analitis dan program ANSYS	25



DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Mode retakan	6
Gambar 2.2	Model untuk persamaan distribusi tegangan di sekitar ujung retak	7
Gambar 2.3	Kurva laju pertumbuhan retak	9
Gambar 2.4	Daerah ujung retak dan daerah depan retak	12
Gambar 2.5	Elemen singular <i>quarter-point kuadrilateral</i> 8 node	12
Gambar 2.6	Evaluasi faktor intensitas tegangan dengan prosedur ekastrapolasi perpindahan	16
Gambar 3.1	Langkah-langkah penelitian	18
Gambar 3.2	Gambar <i>single-edge crack specimen</i>	19
Gambar 3.3	Variabel bebas pada model	21
Gambar 3.4	Geometri spesimen	21
Gambar 3.5	Pemodelan satu bagian	22
Gambar 3.6	Pemodelan separuh bagian	23
Gambar 3.7	Konfigurasi lubang	23

		4
Gambar 3.8	Kondisi pembebanan	24
Gambar 4.1	Grafik verifikasi faktor intensitas tegangan (K) ANSYS dan analitis	26
Gambar 4.2	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak konfigurasi dengan satu jumlah lubang	27
Gambar 4.3 (a)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 1$ mm	28
Gambar 4.3 (b)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 2$ mm	29
Gambar 4.3 (c)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 3$ mm	29
Gambar 4.3 (d)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 4$ mm	30
Gambar 4.3 (e)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 5$ mm	30
Gambar 4.4 (a)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $B = 1$ mm	31
Gambar 4.4 (b)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $B = 2$ mm	31
Gambar 4.4 (c)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $B = 3$ mm	32

		5
Gambar 4.4 (d)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $B = 4$ mm	32
Gambar 4.4 (e)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $B = 5$ mm	33
Gambar 4.5 (a)	Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 1$ mm	34
Gambar 4.5 (b)	Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 2$ mm	35
Gambar 4.5 (c)	Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 3$ mm	35
Gambar 4.5 (d)	Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 4$ mm	36
Gambar 4.5 (e)	Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 5$ mm	36
Gambar 4.6	Grafik $B/D-\beta$ untuk konfigurasi pada dua jumlah lubang	37
Gambar 4.7 (a)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 1$ mm	38
Gambar 4.7 (b)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 2$ mm	39
Gambar 4.7 (c)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 3$ mm	39

		6
Gambar 4.7 (d)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 4$ mm	40
Gambar 4.7 (e)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 5$ mm	40
Gambar 4.8 (a)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $B = 1$ mm	41
Gambar 4.8 (b)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $B = 2$ mm	41
Gambar 4.8 (c)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $B = 3$ mm	42
Gambar 4.8 (d)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $B = 4$ mm	42
Gambar 4.8 (e)	Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $B = 5$ mm	43
Gambar 4.9 (a)	Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 1$ mm	44
Gambar 4.9 (b)	Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 2$ mm	44
Gambar 4.9 (c)	Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 3$ mm	45
Gambar 4.9 (d)	Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 4$ mm	45

		7
Gambar 4.9 (d)	Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 5$ mm	46
Gambar 4.10	Grafik $B/D-\beta$ untuk konfigurasi pada tiga jumlah lubang	47
Gambar 4.11	Grafik $B/D-\beta$ untuk konfigurasi pada tiga jumlah lubang— $H = 0$ mm	47
Gambar 4.12	Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan satu jumlah lubang (konfigurasi lubang di depan ujung retak)	49
Gambar 4.13	Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan satu jumlah lubang (konfigurasi lubang di depan ujung retak)	50
Gambar 4.14	Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang (konfigurasi lubang di depan ujung retak)	51
Gambar 4.15	Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang (konfigurasi lubang di depan ujung retak)	51
Gambar 4.16	Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang (konfigurasi lubang di depan ujung retak)	52
Gambar 4.17	Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang (konfigurasi lubang di depan ujung retak)	52
Gambar 4.18	Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan satu jumlah lubang (Konfigurasi Lubang di Ujung Retak ($H = 0$ mm))	53
Gambar 4.19	Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan satu jumlah lubang (Konfigurasi Lubang di Ujung Retak ($H = 0$ mm))	54

		8
Gambar 4.20	Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang (Konfigurasi Lubang di Ujung Retak ($H = 0$ mm))	55
Gambar 4.21	Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang (Konfigurasi Lubang di Ujung Retak ($H = 0$ mm))	55
Gambar 4.22	Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang (Konfigurasi Lubang di Ujung Retak ($H = 0$ mm))	56
Gambar 4.23	Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang (Konfigurasi Lubang di Ujung Retak ($H = 0$ mm))	57
Gambar 4.24	Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang (Konfigurasi Lubang di Belakang Ujung Retak)	58
Gambar 4.25	Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang (Konfigurasi Lubang di Belakang Ujung Retak)	59
Gambar 4.26	Contoh plot tegangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang (Konfigurasi Lubang di Belakang Ujung Retak)	59
Gambar 4.27	Contoh plot regangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang (Konfigurasi Lubang di Belakang Ujung Retak)	60

DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
Lampiran 1	Makro program ANSYS	63
Lampiran 2	Tabel nilai faktor intensitas tegangan ujung retak (K_I) pada konfigurasi dengan satu jumlah lubang ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	66
Lampiran 3	Tabel nilai faktor intensitas tegangan ujung retak (K_I) pada konfigurasi dengan dua jumlah lubang ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	67
Lampiran 4	Tabel nilai β pada konfigurasi dengan dua jumlah lubang	69
Lampiran 5	Tabel nilai faktor intensitas tegangan ujung retak (K_I) pada konfigurasi dengan tiga jumlah lubang ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	71
Lampiran 6	Tabel nilai β ujung retak pada konfigurasi dengan tiga jumlah lubang	73

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Besaran
a	panjang retak
C, m	konstanta material
ε	regangan
K	faktor intensitas tegangan
K_{Ic}	<i>fracture toughness</i> (ketangguhan patah)
κ	konstanta
L, x	posisi node
N	<i>shape function</i> (fungsi bentuk)
r, θ	koordinat polar
s, t	koordinat natural
σ	tegangan
τ	tegangan geser
u, v	perpindahan
μ	modulus geser
W	lebar spesimen
$\frac{da}{dN}$	laju perambatan retak

RINGKASAN

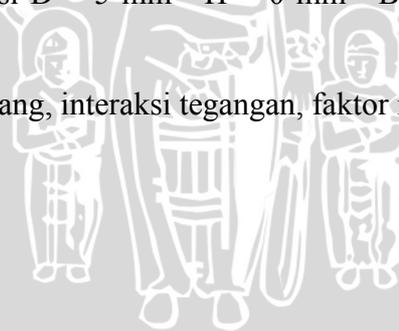
DARMANTO, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2007, *Analisis Pengaruh Konfigurasi Lubang di Sekitar Ujung Retak terhadap Faktor Intensitas Tegangan Ujung Retak*, Dosen Pembimbing : Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng., Dr.Eng. dan M. Agus Choiron, ST., MT.

Analisis K ujung retak pada metode *crack retardation* yang terbatas pada penempatan konfigurasi lubang di ujung retak dengan jumlah satu hingga dua lubang menyebabkan analisis K ujung retak dengan penempatan konfigurasi lubang di daerah depan dan belakang ujung retak tidak dapat diketahui. Oleh karena itu, dilakukan analisis terhadap K ujung retak pada konfigurasi lubang di sekitar ujung retak yang meliputi daerah di depan ujung retak sampai dengan daerah di belakang ujung retak, sehingga diperoleh informasi perilaku K ujung retak yang lebih lengkap dan konfigurasi lubang yang menghasilkan nilai K ujung retak yang lebih rendah.

Pemodelan yang digunakan adalah pemodelan satu bagian dan pemodelan separuh bagian. Jumlah lubang terdiri dari satu, dua, dan tiga susunan lubang dengan konfigurasi variasi diameter (D) sebesar 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, dan 5 mm, jarak antar lubang (B) yang terdiri atas lima variasi, yaitu 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, dan 5 mm, dan konfigurasi jarak lubang dengan ujung retak (H) terdiri dari sebelas variasi yang meliputi daerah di depan ujung retak hingga daerah di belakang ujung retak, yaitu 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 0 mm, -1 mm, -2 mm, -3 mm, -4 mm, dan -5 mm.

Nilai K_I tertinggi terjadi pada kasus tiga lubang dengan konfigurasi $D = 5 \text{ mm}$ — $H = 1 \text{ mm}$ — $B = 1 \text{ mm}$ sebesar $67,078 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ dan nilai K_I terendah terjadi pada kasus tiga lubang dengan konfigurasi $D = 5 \text{ mm}$ — $H = 0 \text{ mm}$ — $B = 1 \text{ mm}$ sebesar $5,55\cdot 10^{-3} \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Kata kunci: konfigurasi lubang, interaksi tegangan, faktor intensitas tegangan.



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fenomena kegagalan pada logam disebabkan oleh pembebanan berulang dalam jumlah siklus yang mengakibatkan kelelahan. Proses kelelahan sendiri dimulai dengan adanya retak awal (*crack initiation*). Bila retak mencapai panjang kritis dan penampang yang tersisa tidak mampu menahan beban yang ada, maka logam atau struktur akan mengalami patah.

Berbagai metode untuk menghambat perambatan retak (*crack retardation*) telah dikembangkan oleh para rekayasawan. Pemanfaatan lubang sering digunakan untuk tujuan tersebut, yaitu dengan pengeboran (*drilling*) ujung retak (Fischer dalam Vulic, 1997:283) dan pengeboran sepasang lubang di sisi ujung retak/*crack-flank holes* (Shin, 1996:535).

Vulic (1997:287) menganalisis metode alternatif dalam menghambat perambatan retak dengan melakukan pengeboran ujung retak pada spesimen dan dilanjutkan dengan tiga perlakuan, yaitu lubang diperluas (*reamed*), lubang dimandrel, dan memasukkan pin ke lubang hasil pemandrelan. Perlakuan dengan memasukkan pin ke lubang hasil pemandrelan memiliki umur bahan yang lebih baik dibandingkan dengan dua metode lain.

Pada teknik menghambat perambatan retak dengan pengeboran *in-situ* (langsung di tempat asal) sulit untuk dilakukan dan seringkali lokasi retak sulit dijangkau. Jika hasil pengeboran berada sedikit di belakang ujung retak, retak dapat berperilaku seperti *mechanically short crack* yang muncul pada *notch* dengan laju retak yang sangat cepat dan tidak beraturan sehingga menambah elemen yang mengalami retakan. Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif yang dapat mengurangi faktor intensitas tegangan dan mampu mengamati perilaku penghambatan retak (*crack retardation*). Salah satu metode tersebut adalah pengeboran sepasang lubang pada sisi ujung retak (Shin, 1996:535).

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

dan susunan lubang. Hal ini juga akan mempengaruhi *fatigue life* (umur bahan teradap kelelahan).

Parameter faktor intensitas tegangan (*stress intensity factor*), K , sangat penting diketahui pada ragam retak yang meliputi kondisi-kondisi praktis (Rooke, 1976). Faktor intensitas tegangan sangat dipengaruhi oleh faktor geometri. Adanya konfigurasi lubang di sekitar ujung retak menunjukkan perubahan geometri pada struktur yang dapat mempengaruhi nilai K . Parameter faktor intensitas tegangan juga menentukan besarnya distribusi tegangan di daerah ujung retak. Interaksi tegangan antara tegangan di ujung retak dan tegangan di sisi-sisi lubang memberikan pengaruh pada K ujung retak sebagai parameter perambatan retak lebih lanjut. Nilai K yang semakin rendah menunjukkan laju perambatan retak yang rendah pula.

Selama ini, analisis K ujung retak pada metode *crack retardation* hanya terbatas pada penempatan konfigurasi lubang di ujung retak dengan jumlah lubang satu hingga dua lubang. Kondisi ini mengakibatkan analisis K ujung retak dengan penempatan konfigurasi lubang di daerah depan dan belakang ujung retak tidak dapat diketahui. Oleh karena itu, penting untuk dilakukan analisis terhadap K ujung retak pada konfigurasi lubang di sekitar ujung retak yang meliputi daerah di depan ujung retak sampai dengan daerah di belakang ujung retak, sehingga diperoleh informasi perilaku K ujung retak yang lebih lengkap dan konfigurasi lubang yang menghasilkan nilai K ujung retak yang lebih rendah.

Latar belakang di atas menjadi landasan bahwa diperlukan studi lebih lanjut tentang pengaruh konfigurasi lubang di sekitar ujung retak terhadap faktor intensitas tegangan ujung retak dengan menggunakan konsep *Linear Elastic Fracture Mechanic* (LEFM). Lubang terdiri dari satu, dua, dan tiga susunan lubang dengan diameter lubang terdiri atas lima variasi dengan jarak antar lubang terdiri lima variasi dan sebelas variasi jarak lubang dengan ujung retak yang meliputi daerah di depan ujung retak sampai dengan daerah di belakang ujung retak. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan program *ANSYS release 9.0*.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diulas dalam skripsi ini adalah pengaruh konfigurasi lubang di sekitar ujung retak terhadap faktor intensitas tegangan ujung retak.

1.3 Batasan Masalah

1. Pemodelan pada *single edge crack specimen* dua dimensi.
2. Material plat yang digunakan adalah aluminium 2024-T3
3. Material diasumsikan homogen dan isotropik.
4. Analisa dilakukan pada mode I (*opening crack*) dan daerah II (*stable crack growth*).
5. Hanya mencari faktor intensitas tegangan ujung retak dan dalam batasan *linear elastic fracture mechanics* (LEFM).

1.4 Tujuan

Tujuan dalam analisis pengaruh konfigurasi lubang di sekitar ujung retak terhadap faktor intensitas tegangan ujung retak ini adalah untuk mengetahui nilai faktor intensitas tegangan ujung retak yang dipengaruhi oleh konfigurasi lubang di sekitar ujung retak.

1.5 Manfaat

1. Analisis dalam skripsi ini dapat memberikan informasi tentang perilaku faktor intensitas tegangan ujung retak yang lebih lengkap sehingga dapat diperhitungkan pula tentang perilaku perambatan retak.
2. Analisis dalam skripsi ini dapat memberikan alternatif metode pencegahan terhadap perambatan retak lebih lanjut.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Hasil-Hasil Penelitian Terdahulu

Waktu yang relatif panjang untuk perambatan retak, mulai dari retak awal sampai dengan patah (*final failure*), biasanya cukup waktu untuk menemukan retak dan melakukan perbaikan. Penelitian tentang kemungkinan menghambat laju retak yang dapat mencegah kerusakan lebih lanjut dan menjaga umur struktur menghasilkan alternatif-alternatif metode untuk maksud tersebut.

Vulic (1997:287) memberikan analisis tentang metode alternatif untuk menghambat laju retakan pada spesimen dengan retak di tengah dan spesimen dengan retak pinggir. Vulic melakukan pengeboran ujung retak, lalu melakukan analisis terhadap tiga kasus perlakuan:

- A. Dilakukan perluasan lubang (*reamed*).
- B. Lubang dimandrel.
- C. Memasukkan pin ke lubang hasil pemandrelan.

Hasil yang diperoleh dari penelitian adalah prosedur dengan memasukkan pin memberikan hasil yang lebih baik pada umur bahan dari pada melakukan pemandrelan atau pelubangan ujung retak saja.

Pengaruh persentase perbesaran lubang terhadap umur bahan memberikan efek yang signifikan pada spesimen dengan retak di pinggir dari pada spesimen dengan retak di tengah. Spesimen dengan retak pinggir yang diberi pin memiliki umur terhadap kelelahan yang sangat tinggi dari pada spesimen yang hanya dimandrel, yaitu hampir dua kalinya. Spesimen dengan retak tengah yang diberi pin memiliki umur terhadap kelelahan sekitar satu kali lebih lama dari pada spesimen yang hanya dimandrel.

Shin (1996:539) melakukan penelitian tentang metode untuk memperbaiki retak pada spesimen pipa AISI 304, yaitu memberikan sepasang lubang pada sisi retak yang disebut dengan *retardation caused by crack-flank holes*. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa terjadi penurunan laju pertumbuhan retak pada spesimen saat panjang retak bertambah 1,2 mm.

Penelitian juga dilakukan pada spesimen *3 point bending (three point-bending specimen/3P)* sejumlah lima spesimen. Pengujian pada tiga spesimen awal

menunjukkan bahwa penambahan umur spesimen sangat erat hubungannya dengan posisi dan susunan lubang. Pada spesimen empat dan lima, lubang ditempatkan di depan ujung retak sehingga retak akan bergerak menuju salah satu lubang dan mampu mengurangi faktor intensitas tegangan. Hal ini akan menambah umur bahan terhadap kelelahan. (*fatigue life*). Hasil pengujian menunjukkan bahwa teknik terbaik adalah dengan mengebor sepasang lubang cukup dekat dengan bidang retak dan sedikit di depan ujung retak. Hasil pengujian juga memberikan efek peningkatan *fatigue life* yang lebih baik dibandingkan dengan metode memberikan pembebanan overload dengan rasio 1,86 pada spesimen yang sama (Shin, 1996:541).

2.2 Mekanika Patahan

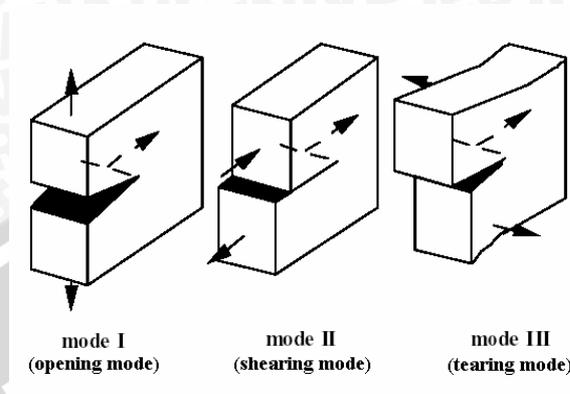
Mekanika patahan (*fracture mechanic*) adalah metode untuk mengetahui perilaku patahan pada parameter-parameter suatu struktur, yaitu tegangan dan ukuran retak (Rolfe, 1977:12). Mekanika patahan didasarkan pada analisis tegangan. Hasil dari analisis mekanika patahan akan menghasilkan kombinasi tingkat tegangan dan ukuran retak yang menjadi syarat timbulnya retak. Objek dari mekanika patahan adalah untuk memberikan jawaban kuantitatif pada masalah-masalah spesifik mengenai retak pada struktur. Retak awal akan berkembang dan akan menyebabkan kegagalan pada struktur pada pemakaian yang cukup lama.

2.2.1 Tiga Mode Pembebanan

Dally (1991:100) menyatakan bahwa retak pada sebuah elemen dapat diakibatkan oleh tiga pembebanan. Mode buka (*opening mode*) melibatkan beban yang menghasilkan permukaan retak yang tegak lurus terhadap bidang retak. Tanda I pada K_I menginformasikan bahwa faktor intensitas tegangan disebabkan oleh pembebanan mode buka.

Mode geser (*shearing mode*) disebabkan oleh beban geser sebidang yang menyebabkan dua permukaan retak saling bergesekan. Perpindahan permukaan retak terletak pada bidang retak dan tegak lurus sisi yang menyebabkan retak. Tanda II pada K_{II} mengindikasikan faktor intensitas tegangan disebabkan oleh pembebanan mode geser. Pembebanan mode buka dan geser dapat terjadi bersamaan. Kasus ini disebut dengan mode campuran (*mixed-mode*) dengan K_I dan K_{II} terdapat pada daerah di sekitar ujung retak.

Pembebanan mode sobekan (*tearing mode*) di sebabkan oleh pembebanan geser yang keluar dari bidang. Perpindahan pada permukaan retak terletak pada bidang retak dan sejajar terhadap sisi-sisi bidang yang menyebabkan retak. Tanda III pada K_{III} mengindikasikan faktor intensitas tegangan pada mode ini.



Gambar 2.1. Mode retakan
Sumber: Pluvinage, 2004:3

2.2.2 Linier Elastic Fracture Mechanics (LEFM)

Bannantine (1990:89) menyatakan bahwa prinsip *linear elastic fracture mechanic*/LEFM digunakan untuk menghubungkan besar dan distribusi tegangan di sekitar ujung retak terhadap:

- tegangan normal
- ukuran dan bentuk retak
- sifat material dan komponen retak

LEFM mengasumsikan material dalam kondisi isotropis dan linear elastis. Berdasar teori ini bidang tegangan di ujung retak dihitung dengan menggunakan teoei elastisitas. Jika tegangan di dekat ujung retak melebihi keuletan patahan mekanik, retak akan terjadi. LEFM hanya sesuai jika deformasi plastis sangat kecil dibandingkan dengan ukuran retak, yang dikenal dengan luluh skala kecil (*small scale yielding*).

2.2.3 Faktor Intensitas Tegangan

Faktor intensitas tegangan (*stress intensity factor*), K , merupakan parameter tunggal untuk memberikan penilaian terhadap permulaan perambatan retak. Faktor intensitas tegangan menjadi syarat utama untuk menilai stabilitas retak. Penggunaan faktor intensitas tegangan harus didukung dengan pengetahuan tentang bidang tegangan di sekitar ujung retak pada kondisi-kondisi geometri, pembebanan, dan kondisi batas tertentu (Owen, 1983:1).

Irwin menyatakan bahwa persamaan distribusi tegangan di sekitar ujung retak mengindikasikan adanya tegangan lokal (*local stress*) di dekat ujung retak yang bergantung pada tegangan nominal, σ , dan akar dari setengah panjang retak. Hubungan ini dikenal dengan *stress intensity factor* yang didefinisikan sebagai,

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2-5)$$

dengan dimensi $\text{psi}(\text{in})^{1/2}$ atau $\text{MN}/(\text{m})^{3/2}$ atau $\text{MPa}(\text{mm})^{1/2}$. Dengan memasukan definisi K, maka persamaan distribusi tegangan akan menjadi

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \left(\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \\ \sigma_y &= \left(\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \\ \tau_{xy} &= \left(\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) \left[\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \end{aligned} \quad (2-6)$$

Karena distribusi tegangan daerah tersebut adalah tiga dimensi, asumsi *plane stress* dan *plane strain* akan memberikan hasil yang valid (Dally, 1991:106).

Fungsi-fungsi yang lain sering ditambahkan untuk beragam konfigurasi spesimen. Fungsi ini didefinisikan sebagai fungsi $f(a/W)$ yang mencakup fungsi konfigurasi komponen retak dan bentuk spesimen (Hertzberg, 1989:280).

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2-7)$$

dengan: a = panjang retak
 W = lebar spesimen

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

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \sqrt{\sec\left(\frac{a}{W}\pi\right)} \quad (2-8)$$

Faktor koreksi untuk *single edge crack specimen* dinyatakan sebagai berikut (Bannantine, 1990:92),

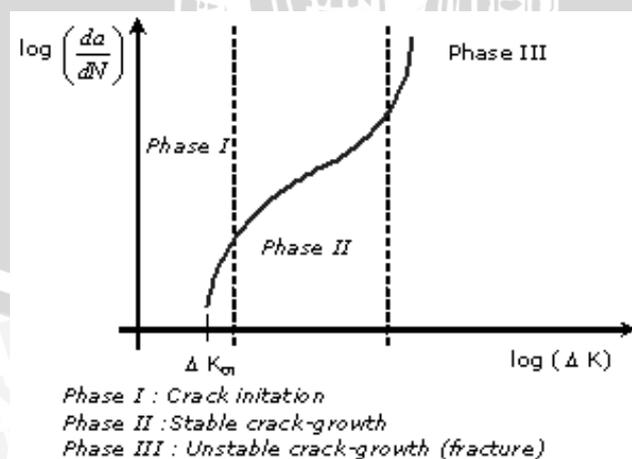
$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 1,12 - 0,231\left(\frac{a}{W}\right) + 10,55\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21,72\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30,39\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (2-9)$$

Sekali faktor intensitas tegangan diketahui, maka dapat ditentukan faktor intensitas tegangan maksimum yang dapat menyebabkan kegagalan. Kondisi kritis ini dikenal dengan keuletan patah (*fracture toughness*) material, K_{IC} . *Fracture toughness* merupakan intensitas tegangan kritis (*critical stress intensity*) yang menyebabkan kegagalan (Hertzberg, 1989:287).

2.3 Kurva Pertumbuhan Retak *Fatigue*

Pada pembebanan dengan amplitudo konstan, umur komponen akan bertahan relatif lama ketika retak berukuran kecil. Selain itu, laju pertumbuhan retak akan meningkat seiring dengan peningkatan tegangan.

Kurva laju pertumbuhan retak memiliki tiga daerah seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut. Pada intensitas tegangan rendah, daerah I, perilaku retak berhubungan dengan efek *threshold*, ΔK_{th} . Pada daerah II, kurva berbentuk linear. Beragam struktur memiliki daerah operasi pada daerah ini. Daerah III memiliki nilai ΔK yang tinggi, pertumbuhan retak sangat tinggi yang menyebabkan umur semakin pendek (Bannantine, 1990:103).



Gambar 2.3. Kurva laju pertumbuhan retak

Sumber: www.utm.edu/departement/engin/lemaster/MachineDesign

A. Daerah I

Daerah I berhubungan dengan efek *threshold*. Di bawah nilai faktor intensitas tegangan *threshold*, ΔK_{th} , pertumbuhan retak tidak terjadi, atau bisa terjadi tapi dengan laju terlalu rendah untuk diukur. *Fatigue threshold* tergantung pada rasio tegangan, R , ($R = \sigma_{maks}/\sigma_{min}$). *Fatigue threshold* menurun dengan meningkatnya rasio tegangan. *Threshold* juga tergantung pada frekuensi pembebanan dan lingkungan (Bannantine, 1990:106).

B. Daerah II

Kebanyakan aplikasi konsep LEFM untuk menjelaskan perilaku pertumbuhan retak berhubungan dengan daerah II. *Slope* yang terbentuk dalam kurva $\log \Delta K$ dengan $\log da/dN$ hampir linear. Persamaan Paris digunakan dalam menggambarkan daerah ini.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2-10)$$

dengan :

$\frac{da}{dN}$ = laju perambatan retak (mm / siklus)

C, m = konstanta material

ΔK = faktor intensitas tegangan

C dan m adalah konstanta material dan ΔK adalah beda faktor intensitas tegangan ($K_{maks} - K_{min}$)

C. Daerah III

Daerah III terjadi pertumbuhan retak yang tidak stabil. Pada situasi praktis, daerah ini diabaikan karena tidak berpengaruh secara signifikan pada umur perambatan retak. Pada intensitas tegangan yang tinggi, efek plastisitas akan mempengaruhi laju pertumbuhan retak karena daerah plastis lebih besar dari dimensi retak sendiri (Bannantine, 1990:106).

2.4 Program ANSYS

Program ANSYS merupakan program komputer untuk analisis kerekayasaan yang berbasis metode elemen hingga (*finite element method/FEM*). ANSYS dapat mendukung analisis statika, dinamika, perpindahan kalor, aliran fluida, dan elektromagnetik (Moaveni, 1990:5).

Program ANSYS memiliki dua tahap dasar: tahap awal (*begin level*) dan tahap proses (*processor level*). Tahap awal akan mengantarkan pengguna/*user* pada *processor level*. *Processor level* sendiri memiliki tiga prosesor: *preprocessor* (PREP7), *the processor* (SOLUTION), dan *general processor* (POST1).

Preprocessor (PREP7) berisi perintah untuk membuat model:

- mendefinisikan tipe elemen dan pilihan (*option*)
- mendefinisikan konstanta real elemen (*element real constants*)
- mendefinisikan *properties* material
- membuat ukuran/geometri model
- mendefinisikan kontrol *meshing*
- melakukan *meshing* pada objek model yang diciptakan

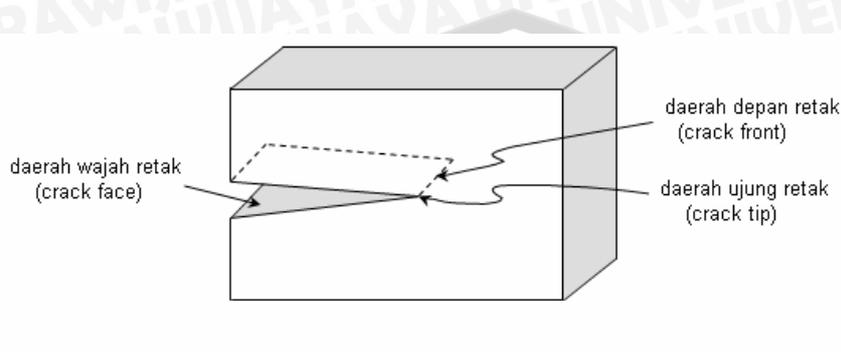
Proseccor (SOLUTION) berisi perintah untuk memberikan kondisi batas dan beban, misal pada persoalan struktur pengguna dapat mendefinisikan kondisi batas tumpuan dan gaya. Sekali informasi tersebut dibuat, maka pemecahan masalah akan bersifat *nodal solution* (hasil analisis pada node). *General processor* (POST1) berisi perintah untuk menampilkan:

- data hasil pemecahan masalah (*read result data from result file*)
- data hasil identifikasi elemen (*read element result data*)
- daftar hasil pemecahan (*list result*)
- plot result*

2.5 Tinjauan Metode Elemen Hingga untuk Kasus Mekanika Patahan

Pemecahan persoalan dalam mekanika patahan melibatkan dua prosedur penting, yaitu pemodelan singularitas ujung retak dan penghitungan parameter retak, dalam hal ini faktor intensitas tegangan. Daerah yang paling penting dalam mekanika patahan adalah daerah di sekitar retak. Istilah ini dikenal dengan daerah ujung retak (*crack tip*) untuk model 2D dan daerah depan retak (*crack front*) untuk model 3D.

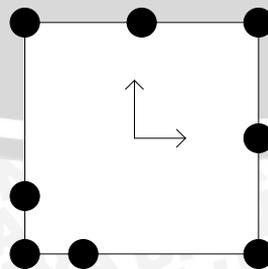
Pada persoalan linear elastis ditunjukkan dengan perpindahan di dekat ujung retak (atau di depan retak) dengan jarak sebesar \sqrt{r} yang bervariasi, dengan r adalah jarak dari ujung retak. Tegangan dan regangan adalah singular di ujung retak yang bervariasi sebesar $1/\sqrt{r}$. Elemen di sekitar ujung retak harus elemen *quadratic* (ANSYS *Release 9.0 Documentation*).



Gambar 2.4. Daerah ujung retak dan daerah depan retak
Sumber: ANSYS Release 9.0 Documentation

Bagaimanapun juga efektivitas solusi numerik pada kasus retak lebih menguntungkan dengan mengembangkan elemen khusus ujung retak yang dapat secara langsung memodelkan singularitas medan regangan elastis $1/\sqrt{r}$ sekitar ujung retak. Banyak versi telah dikembangkan, tetapi pada pembahasan skripsi ini dibatasi perhatiannya pada elemen ujung retak yang berbasis elemen *isoparametric quadratic*.

Singularitas ujung retak dapat dimodelkan dengan elemen *isoparametric quadrilateral*, dengan cara memanipulasi node posisi tengah yang disebut sebagai elemen *quarter-point quadrilateral*. Dengan memindah node 2 dan 8 ke posisi seperempat maka singularitas regangan dapat ditampilkan pada node 1 seperti pada Gambar 2.5 (Owen, 1983:38).



Gambar 2.5. Elemen *singular quarter-point quadrilateral* 8 node

Sumber: Owen, 1983:38

Fungsi bentuk (*shape function*), N_i , untuk node pada tiap-tiap sudut ditulis dalam notasi indeks yang kompak:

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + s.s_i)(1 + t.t_i)(s.s_i + t.t_i - 1) \quad (2-11)$$

dengan i adalah nomor fungsi bentuk,

$$\begin{aligned} s_i &= -1, 1, 1, -1 && \text{untuk } i = 1, 3, 5, 7 \\ t_i &= -1, -1, 1, 1 && \text{untuk } i = 1, 3, 5, 7 \end{aligned} \quad (2-12)$$

Fungsi bentuk pada node sisi tengah adalah,

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{1}{2}(1 - s^2)(1 + t.t_i), t_i = -1, 1 \text{ untuk } i = 2, 6 \\ N_i &= \frac{1}{2}(1 + s.s_i)(1 - t^2), s_i = 1, -1 \text{ untuk } i = 4, 8 \end{aligned} \quad (2-13)$$

Pada node 1, 2, dan 3 fungsi bentuk didefinisikan sebagai

$$\begin{aligned} N_1 &= -\frac{1}{4}(1 - s)(1 - t)(1 + s + t) \\ N_2 &= \frac{1}{2}(1 - s^2)(1 - t) \\ N_3 &= -\frac{1}{4}(1 + s)(1 - t)(1 + s + t) \end{aligned} \quad (2-14)$$

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

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

Representasi x koordinat pada elemen adalah

$$x = \sum_{i=1}^3 N_i x_i = -\frac{1}{2}s(1 - s)x_1 + (1 - s^2)x_2 + \frac{1}{2}s(1 + s)x_3 \quad (2-16)$$

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

$$x = (1 - s^2) \frac{L}{4} + \frac{1}{2}s(1 + s)L \quad (2.17)$$

$$s = -1 + 2\sqrt{\frac{x}{L}} \quad (2.18)$$

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

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{L}{s}(1+s) = \sqrt{Lx} \quad (2.19)$$

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

Perpindahan u pada sisi 1-3 adalah

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

Substituisi s pada persamaan ini akan didapatkan

$$u = -\frac{1}{2}\left(-1 + 2\sqrt{\frac{x}{L}}\right)\left(-2 - 2\sqrt{\frac{x}{L}}\right)u_1 + 4\left(\sqrt{\frac{x}{L}} - \frac{x}{L}\right)u_2 + \frac{1}{2}\left(-1 + 2\sqrt{\frac{x}{L}}\right)\left(2\sqrt{\frac{x}{L}}\right)u_3 \quad (2-21)$$

Regangan pada arah x adalah

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial s} = -\frac{1}{2}\left(\frac{3}{\sqrt{xL}} - \frac{4}{L}\right)u_1 + \left(\frac{2}{\sqrt{xL}} - \frac{4}{L}\right)u_2 + \frac{1}{2}s\left(-\frac{1}{\sqrt{xL}} + \frac{4}{L}\right)u_3 \quad (2-22)$$

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

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

$$u = u_1 + (4u_2 - u_3 - 3u_1)\sqrt{\frac{r}{L}} + (2u_3 - 2u_1 - 4u_2)\frac{r}{L} \quad (2-23)$$

Hal yang sama dapat dilakukan pada perpindahan arah v .

2.6 Teknik Ekstrapolasi Perpindahan

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

Hal tersebut memerlukan prosedur ekstrapolasi untuk mendapatkan faktor intensitas tegangan pada ujung retak (Owen, 1983:36).

Variasi perpindahan secara analitis sekitar ujung retak adalah

$$u = \frac{K_I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left((2\kappa - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_{II}}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left((2\kappa + 3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2-24)$$

$$v = \frac{K_I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left((2\kappa + 1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_{II}}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left((2\kappa - 3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2-25)$$

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

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

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

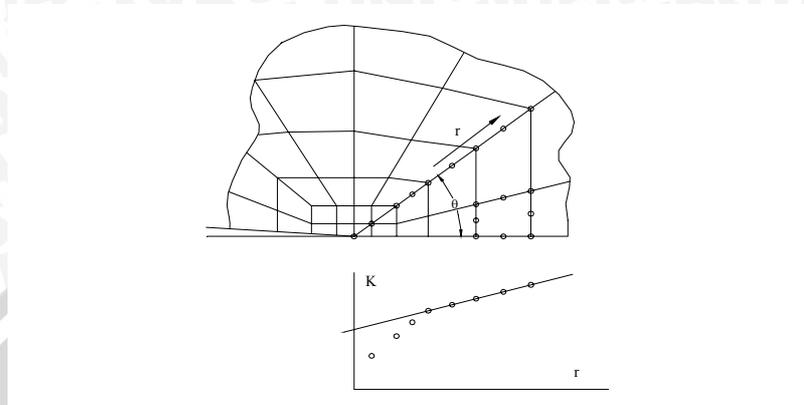
$$K_{II} \begin{Bmatrix} -(2\kappa + 3) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \\ (2\kappa - 3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} = 4\mu \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \begin{Bmatrix} 4u_2 - u_3 - 3u_1 \\ 4v_2 - v_3 - 3v_1 \end{Bmatrix} \quad (2-27)$$

Prosedur ekstrapolasi perpindahan dilakukan dengan melihat hubungan pada Persamaan (2-24) dan (2-25) sehingga diperoleh

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

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

Substitusi harga u , v , dan r pada titik node sepanjang garis radial pada sekitar ujung retak, dapat diperoleh hubungan antara K dengan jarak radial r . Kemudian dengan menghilangkan hasil pada titik yang sangat dekat dengan ujung retak sehingga solusi dapat diekstrapolasi pada $r = 0$ dengan regresi linier (Owen, 1983:43).



Gambar 2.9. Evaluasi faktor intensitas tegangan dengan prosedur extrapulasi perpindahan
Sumber: Owen, 1983:43



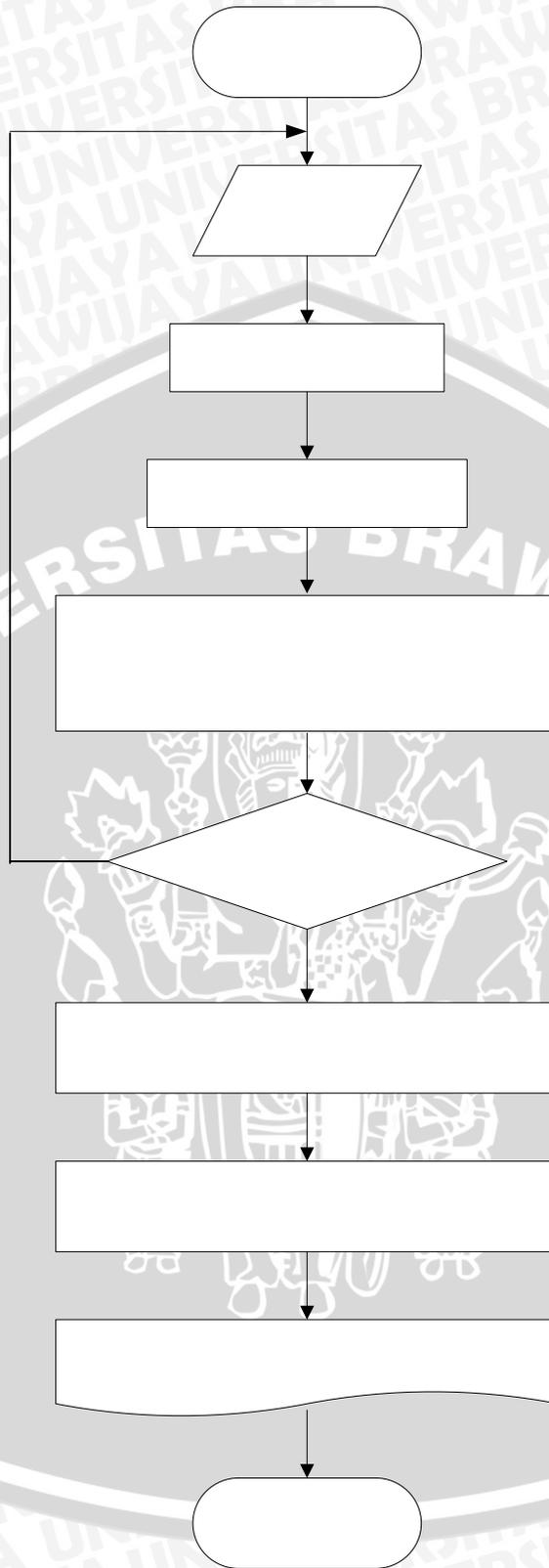
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dalam skripsi ini menggunakan metode eksperimental semu, yaitu melakukan penelitian dengan menggunakan simulasi program *ANSYS release 9.0* yang berbasis metode elemen hingga. Perhitungan faktor intensitas tegangan dilakukan dengan memberikan retak awal dan beberapa lubang di sekitar ujung retak dengan diameter, konfigurasi, dan jarak yang bervariasi. Kemudian diberikan pembebanan pada spesimen. Identifikasi nilai faktor intensitas tegangan dilakukan pada masing-masing konfigurasi lubang sehingga dapat diketahui pengaruh konfigurasi lubang tersebut terhadap faktor intensitas tegangan ujung retak.

Prosedur simulasi disesuaikan dengan standar prosedur ANSYS yang telah tersedia. Hal ini diperlukan untuk menguji tingkat kebenaran hasil yang diinginkan. Verifikasi dilakukan untuk menguji hasil prosedur simulasi ANSYS, yaitu dengan membandingkan hasil perhitungan analitis faktor intensitas tegangan ujung retak pada kasus *single edge crack specimen* dengan hasil perhitungan dengan menggunakan program ANSYS. Faktor intensitas tegangan ujung retak *single edge crack specimen* dirumuskan seperti dalam Persamaan (2-7) dan (2-9). Gambar *single edge crack specimen* diampilkkan dalam Gambar 3.2. Panjang retak, a , dan ukuran spesimen yang digunakan dalam verifikasi sama dengan panjang retak dan ukuran pada spesimen pengujian, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.1. Langkah-langkah penelitian

Hitung K untuk
specimen de

Per

AN

SO

Tidak





Gambar 3.2. Gambar *single edge crack specimen*
Sumber: Bannantine, 1990:92

3.2 Variabel dan Parameter Penelitian

Berikut ini adalah variabel-variabel dan parameter yang digunakan dalam penelitian.

A. Variabel bebas (*independent variable*)

- Jumlah lubang

Jumlah lubang yang terletak di sekitar ujung retak adalah

- A. Satu lubang
- B. Dua lubang
- C. Tiga lubang

- Konfigurasi lubang

Konfigurasi lubang adalah sebaris dengan variasi diameter lubang (D), jarak lubang dengan ujung retak (H), dan jarak antar lubang (B). Berikut ini perincian untuk nilai D, H, dan B.

- Diameter lubang, D:

$$D_1 = 1 \text{ mm} \quad D_4 = 4 \text{ mm}$$

$$D_2 = 2 \text{ mm} \quad D_5 = 5 \text{ mm}$$

$$D_3 = 3 \text{ mm}$$

- Jarak lubang dari ujung retak (arah horinsontal), H:

A. Pada kasus satu lubang

$$\begin{array}{lll} H_1 = 1 \text{ mm} & H_2 = 2 \text{ mm} & H_3 = 3 \text{ mm} \\ H_4 = 4 \text{ mm} & H_5 = 5 \text{ mm} & H_6 = 0 \text{ mm} \end{array}$$

B. Pada kasus dua dan tiga lubang

$$\begin{array}{lll} H_1 = 1 \text{ mm} & H_6 = 0 \text{ mm} & H_{11} = -5 \text{ mm} \\ H_2 = 2 \text{ mm} & H_7 = -1 \text{ mm} & \\ H_3 = 3 \text{ mm} & H_8 = -2 \text{ mm} & \\ H_4 = 4 \text{ mm} & H_9 = -3 \text{ mm} & \\ H_5 = 5 \text{ mm} & H_{10} = -4 \text{ mm} & \end{array}$$

- Jarak antar lubang (arah vertikal), B:

$$\begin{array}{lll} B_1 = 1 \text{ mm} & B_3 = 3 \text{ mm} & B_5 = 5 \text{ mm} \\ B_2 = 2 \text{ mm} & B_4 = 4 \text{ mm} & \end{array}$$

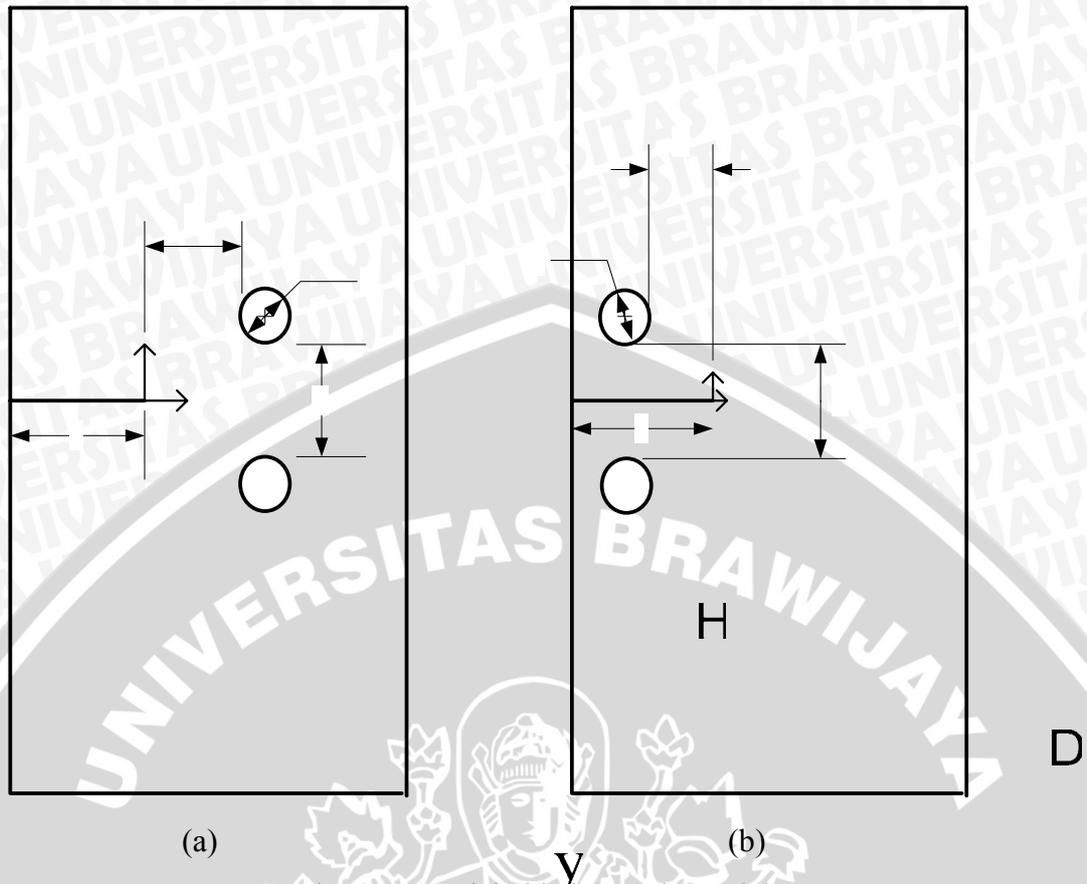
Konfigurasi lubang secara detail dapat dilihat pada Gambar 3.7.

B. Variabel terikat (*dependent variable*)

- Faktor intensitas tegangan ujung retak, K_I

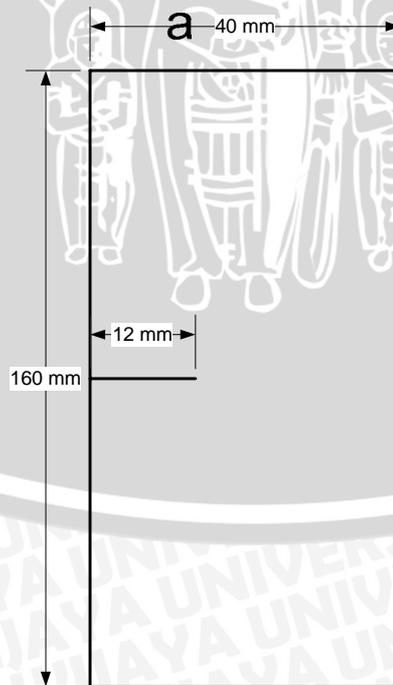
C. Parameter konstan

- Geometri spesimen seperti pada Gambar 3.4
- *Material properties* aluminium 2024-T3 (MatWeb - *Online Material Data Sheet*)
 - Modulus Elastisitas bahan (E) = 73.100 MPa
 - *Poisson ratio* = 0,33
 - Tegangan *Yield* = 345 MPa
 - Tegangan *Ultimate* = 483 Mpa
- Panjang retak (a) = 12 mm
- Panjang spesimen = 160 mm
- Lebar spesimen = 40 mm
- Tegangan nominal (σ) sebesar 125 MPa dengan kondisi beban tarik seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 3.3. Variabel bebas pada model

- (a) Konfigurasi lubang di depan ujung retak, $H = 0$ mm sampai dengan $H = 5$ mm
- (b) Konfigurasi lubang di belakang ujung retak, $H = -1$ mm sampai dengan $H = 5$ mm



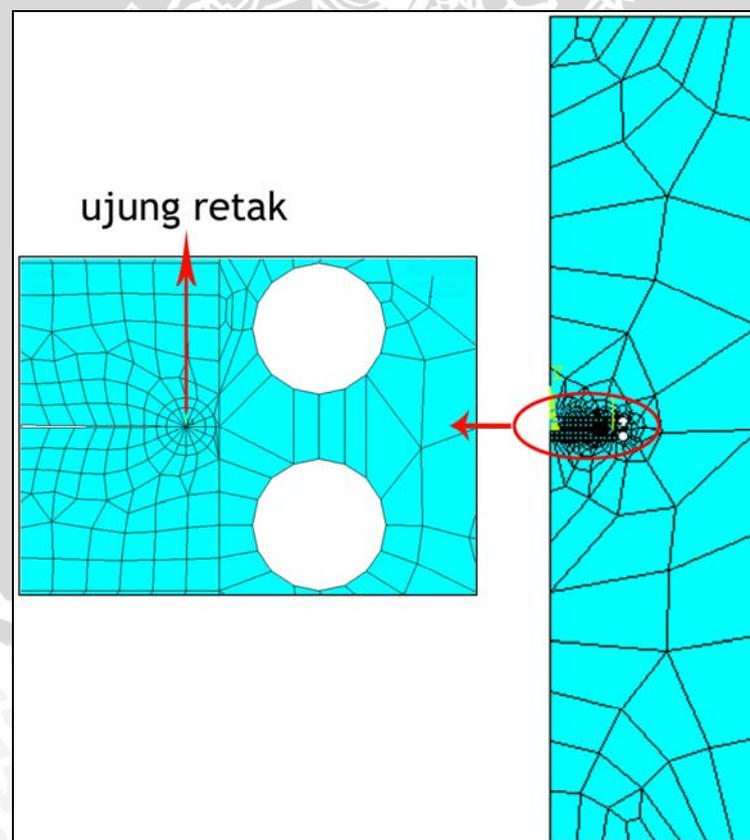
Gambar 3.4. Ukuran spesimen

Sumber: Vulic, 1997:285

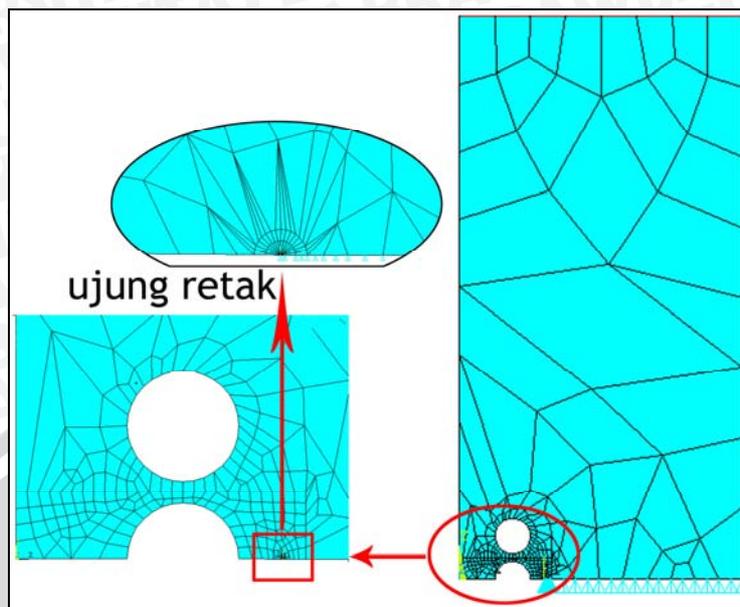
3.3 Pemodelan Spesimen dan Konfigurasi

Pemodelan spesimen dilakukan dengan menggunakan pemodelan satu bagian dan separuh bagian. Pemodelan satu bagian dilakukan pada kasus satu lubang, dua lubang, dan sebagian kasus tiga lubang, yaitu untuk jarak lubang dengan ujung retak $H = 1$ mm, $H = 2$ mm, $H = 3$ mm, $H = 4$ mm, dan $H = 5$ mm. Pemodelan separuh bagian dilakukan pada kasus tiga lubang untuk jarak lubang dengan ujung retak $H = 0$ mm, $H = -1$ mm, $H = -2$ mm, $H = -3$ mm, $H = -4$ mm, dan $H = -5$ mm. Pemodelan satu dan separuh bagian masing-masing ditampilkan dalam Gambar 3.5 dan Gambar 3.6.

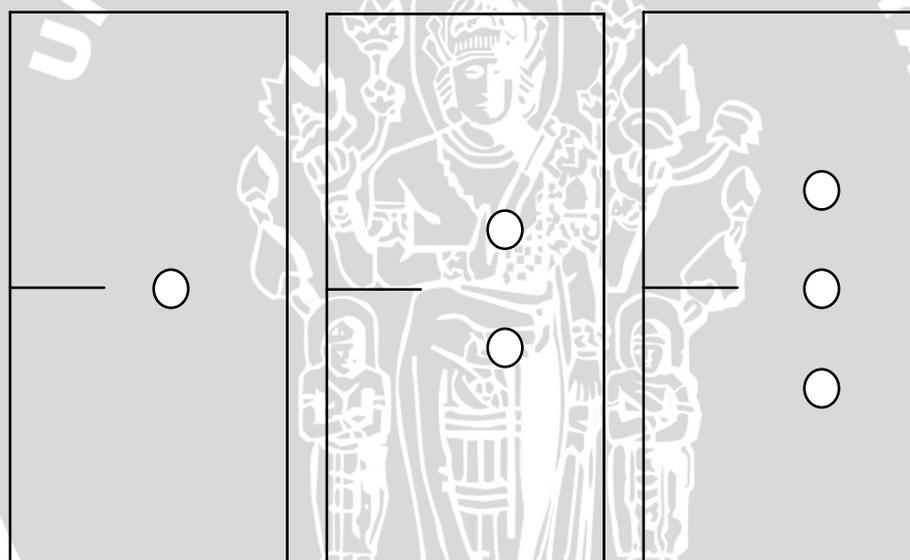
Penentuan *path* (alur node pada sisi sepanjang *crack face*) mensyaratkan searah sumbu X pada sistem koordinat lokal. Pada pemodelan satu bagian dengan sisi retak yang tidak searah sumbu X, maka model dirubah menjadi separuh bagian sehingga sistem koordinat lokal dapat dimodifikasi dan faktor intensitas tegangan dapat ditentukan. Pada beberapa kasus, model separuh bagian dipilih karena nilai faktor intensitas tegangan yang diperoleh dengan metode ekstrapolasi perpindahan lebih meyakinkan.



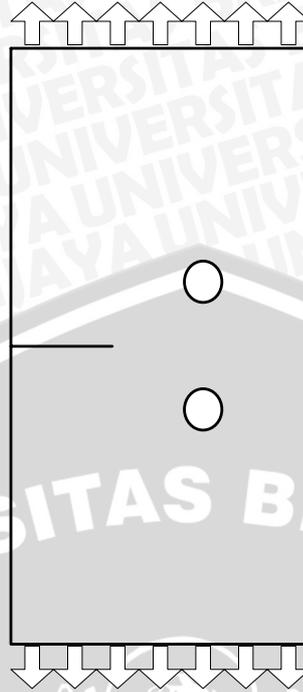
Gambar 3.5. Pemodelan satu bagian



Gambar 3.6. Pemodelan separuh bagian



Gambar 3.7. Konfigurasi lubang



Gambar 3.8. Kondisi pembebanan
Sumber: Vulic, 1997:290

3.4 Pemodelan Elemen Hingga dengan Program ANSYS

Pemodelan elemen hingga dengan program ANSYS dilakukan dengan menjadikan model fisik menjadi elemen-elemen atau biasa disebut *meshing*. *Meshing* dapat dilakukan dengan dua metode: manual dan otomatis. *Meshing* manual memungkinkan pengguna untuk menentukan sendiri ketelitian yang diinginkan. *Meshing* otomatis dijalankan oleh program ANSYS dengan perintah AMESH sehingga pengguna cukup membuat modelnya saja. Pemodelan pada skripsi ini menggunakan *meshing* otomatis. Jenis elemen yang digunakan adalah isoparametrik quadrilateral 8 node.

Program ANSYS menyediakan perintah KSCON untuk pemodelan ujung retak yang mensyaratkan pemberian elemen singular pada *keypoint*, bukan pada node. Perhitungan faktor intensitas tegangan dilakukan dengan mengeksekusi perintah KCALC pada program ANSYS. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan metode ekstrapolasi perpindahan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Verifikasi

Verifikasi dilakukan untuk menguji prosedur perhitungan simulasi ANSYS, yaitu dengan melakukan perbandingan perhitungan faktor intensitas tegangan (K) secara analitis dan dengan metode simulasi ANSYS pada *single edge crack specimen*. Panjang retak, a , divariasikan sehingga dari hasil perhitungan secara analitis dan metode simulasi ANSYS tersebut akan diketahui kecenderungan faktor intensitas tegangan. Rumus analitis perhitungan faktor intensitas tegangan pada *single edge crack specimen* adalah seperti pada Persamaan (2-7) dan (2-9).

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

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

dengan ketentuan,

$$\begin{aligned} \sigma \text{ (tegangan nominal)} &= 125 \text{ Mpa} \\ a \text{ (panjang retak)} &= 12 \text{ mm, } 13 \text{ mm, } 14 \text{ mm, } 15 \text{ mm, } 16 \text{ mm} \\ W \text{ (lebar spesimen)} &= 40 \text{ mm} \end{aligned}$$

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

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

PANJANG RETAK $a(\text{mm})$	FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN K (MPa.m ^{1/2})		RASIO (%)
	K ANSYS	K ANALITIS	
12	40,5	40,276558	0,554769
13	44,708	44,264658	1,001571
14	48,851	48,65099	0,411112
15	53,798	53,511728	0,534971
16	59,579	58,935662	1,091594

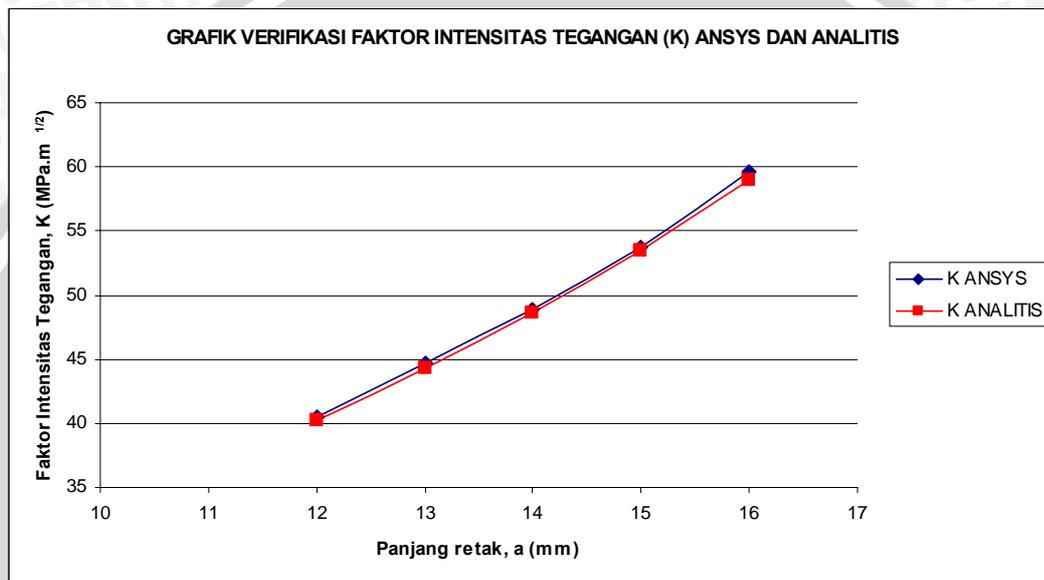
Pada Tabel 4.1 diketahui bahwa spesimen dengan panjang retak 12 mm memiliki nilai K sebesar 40,5 MPa.m^{1/2}. Nilai ini merupakan nilai K tanpa lubang atau K₀ yang

selanjutnya akan dipakai sebagai pembandingan dengan nilai K pada spesimen yang diberi lubang atau K_I .

Rasio perbedaan (γ) menunjukkan besarnya perbedaan dari hasil yang digunakan pada kedua metode perhitungan. Rasio perbedaan dirumuskan,

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

Hasil perhitungan dengan kedua metode tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik berikut.



Gambar 4.1. Grafik verifikasi faktor intensitas tegangan (K) ANSYS dan analitis

Pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1, diketahui bahwa hasil perhitungan K dengan metode simulasi ANSYS memiliki kecenderungan yang sama dengan metode analitis. Rasio perbedaan faktor intensitas tegangan dari kedua metode tersebut rata-rata sebesar 0,718803%. Data ini menunjukkan bahwa tingkat keyakinan prosedur ANSYS lebih dari 95% yang berarti metode ini cukup memenuhi.

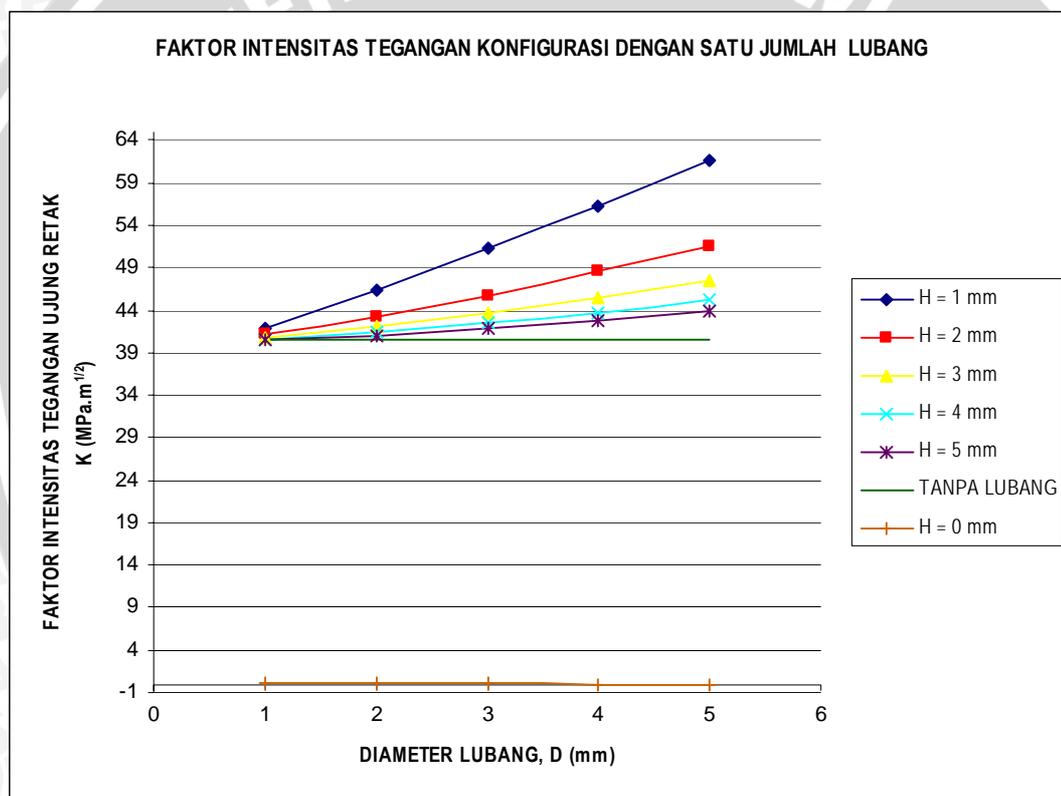
Perbedaan antara metode analitis dan simulasi disebabkan oleh ketidakteraturan *meshing* pada simulasi ANSYS. Ketidakteraturan ini disebabkan oleh elemen singular pada ujung retak, yaitu elemen *quadrilateral quarter point*.

4.2 Hasil Perhitungan ANSYS

4.2.1 Konfigurasi dengan Satu Jumlah Lubang

Konfigurasi dengan satu jumlah lubang ini berupa retak dengan lubang di depan ujung retak. Lubang memiliki variasi diameter (D) dan jarak dari ujung retak (H). Faktor intensitas tegangan ujung retak pada konfigurasi dengan satu jumlah lubang (K_1) ini dibandingkan dengan faktor intensitas tegangan ujung retak tanpa lubang (K_0). Perbandingan ini akan memberikan informasi tentang pengaruh konfigurasi lubang terhadap K_1 .

Hasil perhitungan untuk masing-masing variasi lubang dan diameter ditampilkan pada Lampiran 1. Berikut ini ditampilkan grafik faktor intensitas tegangan kasus satu lubang.



Gambar 4.2. Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak konfigurasi dengan satu jumlah lubang

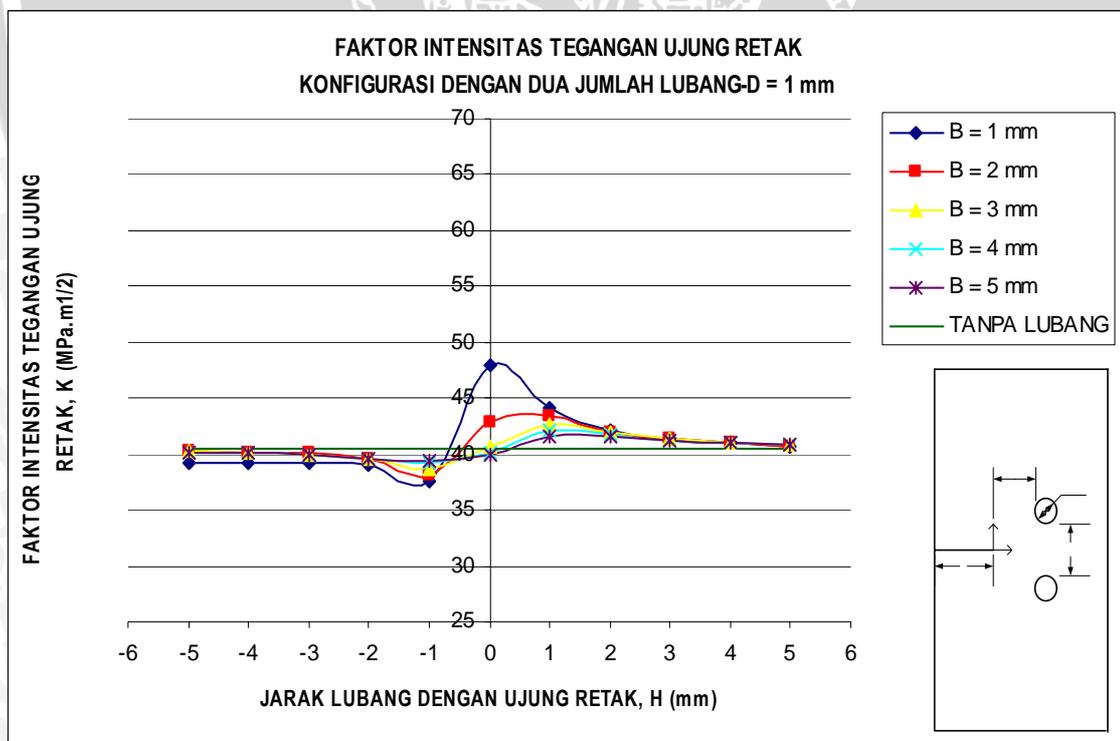
Pada Gambar 4.2 diketahui bahwa nilai faktor intensitas tegangan ujung retak (K_1) untuk masing-masing diameter lubang akan semakin besar dengan mendekatnya lubang ke ujung retak dan bernilai jauh di atas K_0 . Hal ini terlihat dari jarak $H = 1$ mm memiliki *slope* yang tinggi dibandingkan dengan jarak H yang lain. Nilai K_1 ini akan cenderung mendekati nilai K_0 saat lubang menjauh dari ujung retak. Berdasar grafik tersebut, nilai K_1 juga berbanding lurus dengan diameter lubang. Lubang dengan $D = 5$

mm memiliki nilai K_I yang lebih besar dibandingkan dengan lubang lain. Akan tetapi, hal berbeda ditunjukkan pada grafik untuk $H = 0$ mm. Nilai faktor intensitas tegangan dengan lubang pada $H = 0$ turun secara signifikan jika dibandingkan K_I pada jarak H yang lain. Kecenderungan K_I pada $H = 0$ mm akan semakin menurun sebanding dengan besarnya diameter lubang. Nilai K_I pada $H = 0$ mm jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan nilai K_0 .

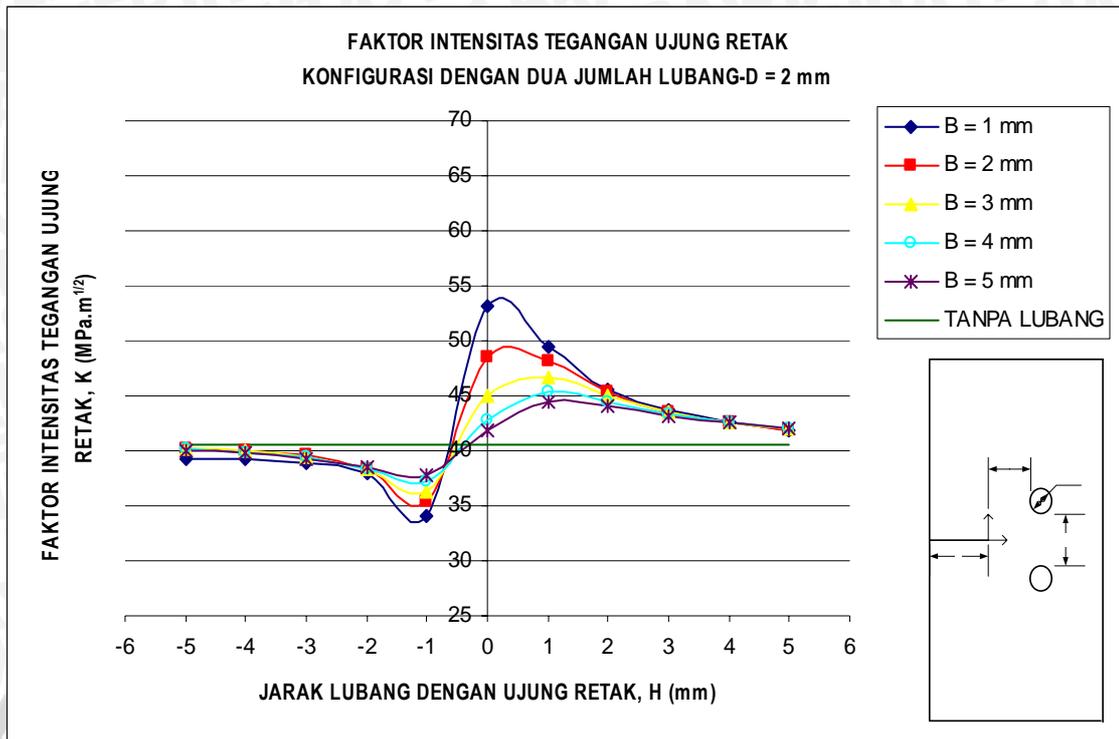
4.2.2 Konfigurasi dengan Dua Jumlah Lubang

Konfigurasi dengan dua jumlah lubang ini berupa retak dengan dua lubang di depan ujung retak dan sepanjang sisi-sisi retak. Lubang memiliki variasi diameter (D), jarak dengan ujung retak (H), dan jarak antar lubang (B). Faktor intensitas tegangan ujung retak konfigurasi pada dua jumlah lubang ini (K_I) akan dibandingkan dengan faktor intensitas tegangan ujung retak tanpa lubang (K_0). Perbandingan ini akan memberikan informasi tentang pengaruh konfigurasi lubang terhadap K_I .

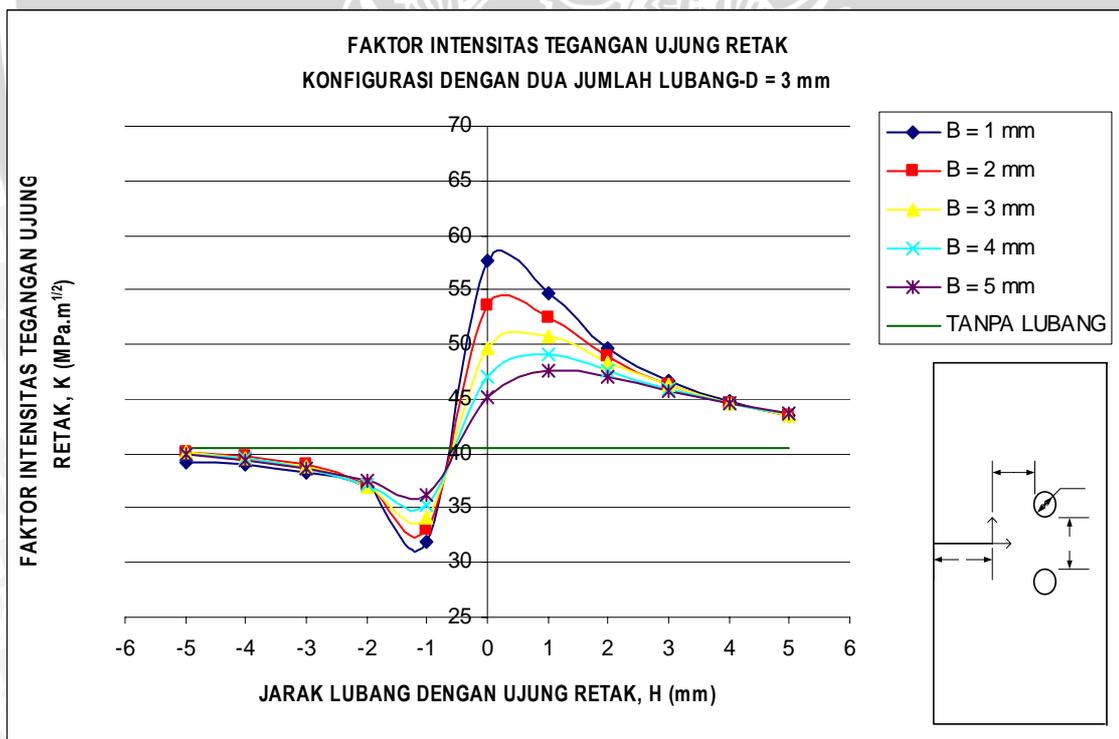
Hasil perhitungan kasus dua lubang ditampilkan dalam Lampiran 2. Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak pada kasus dua lubang ditampilkan pada Gambar 4.3 dan 4.4 berikut ini.



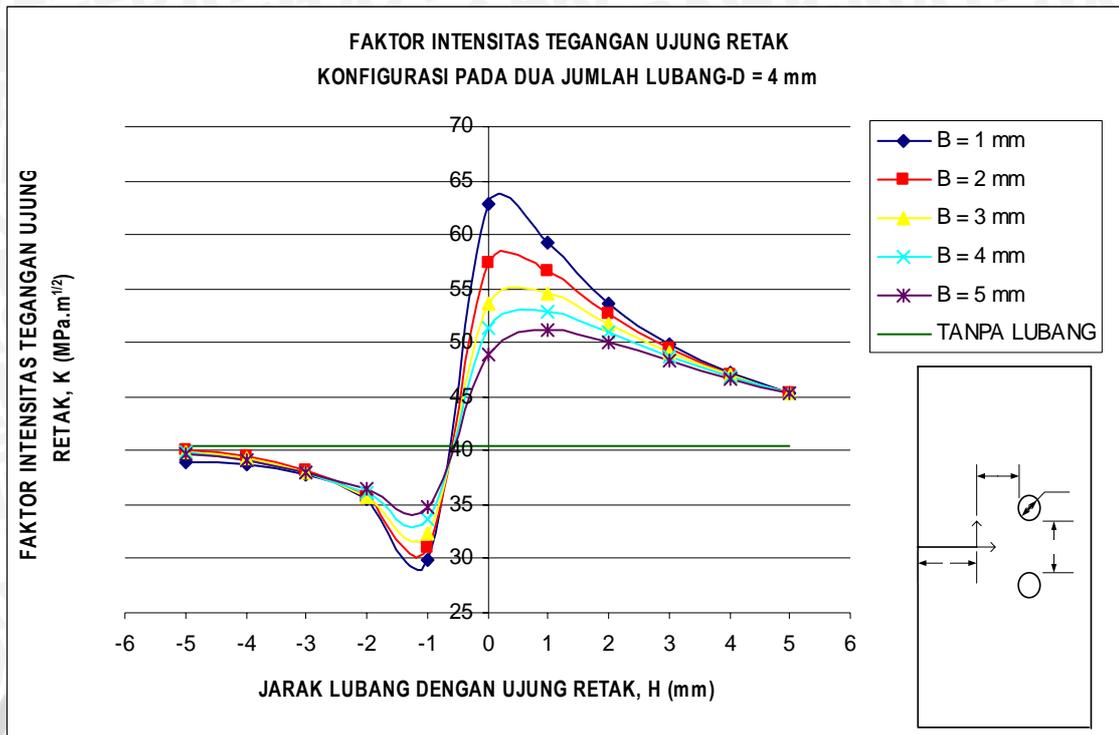
Gambar 4.3 (a). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 1$ mm



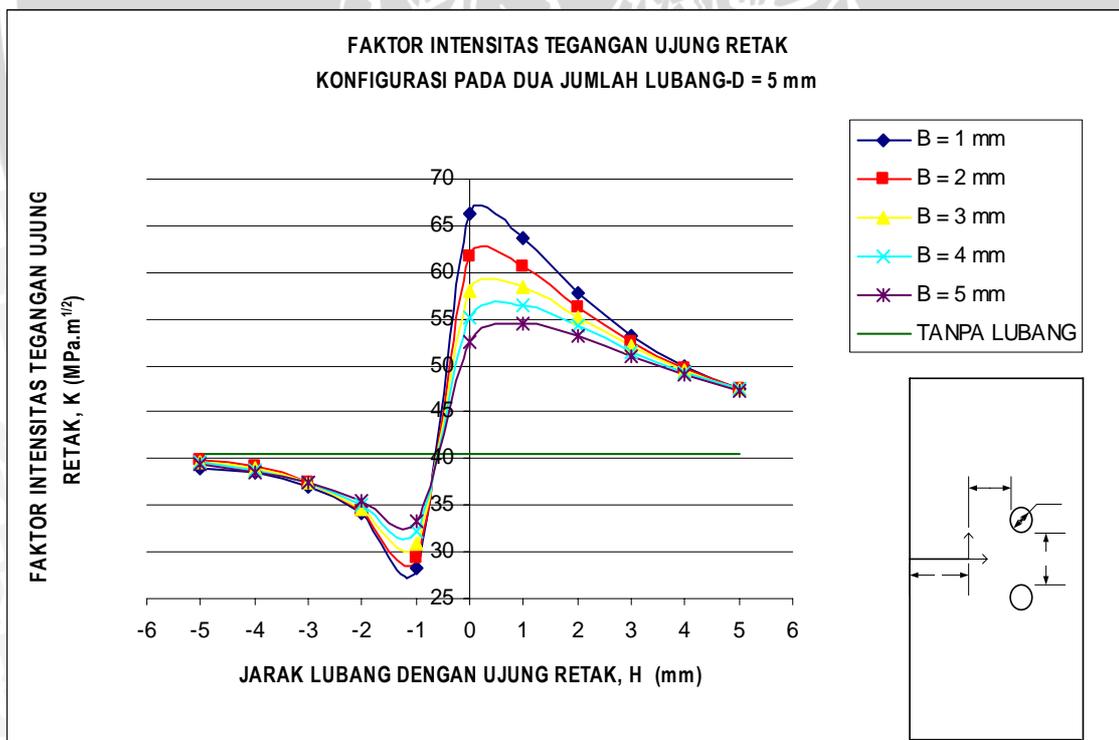
Gambar 4.3 (b). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 2$ mm



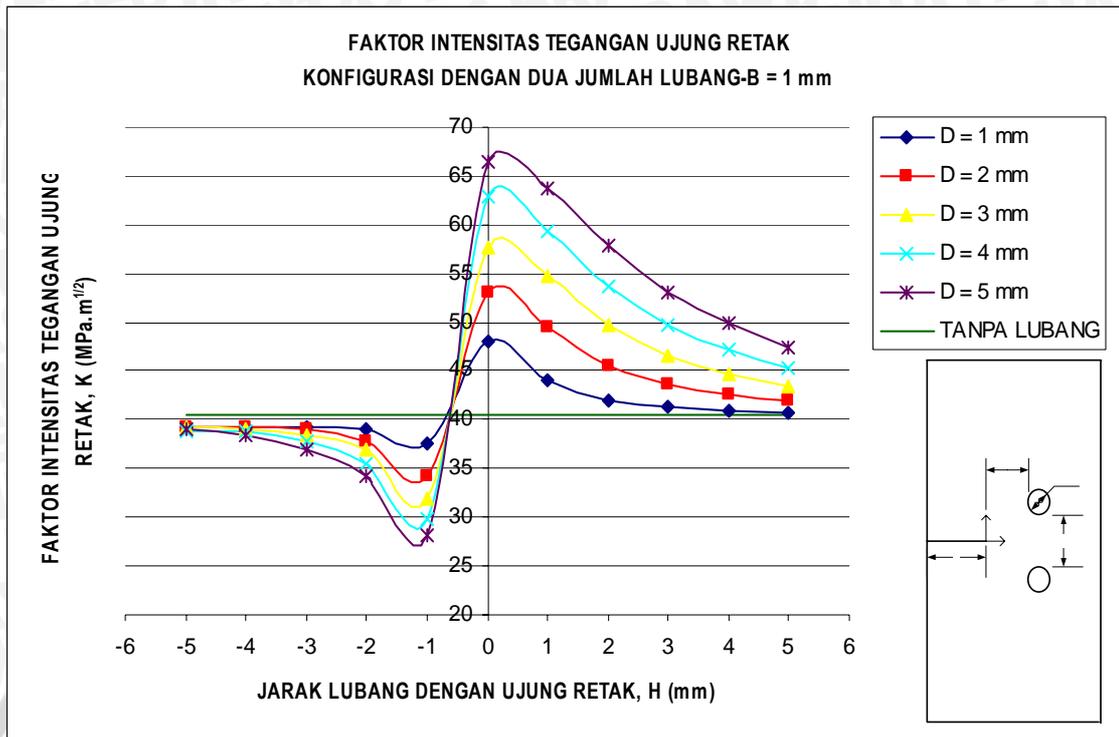
Gambar 4.3 (c). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $D = 3$ mm



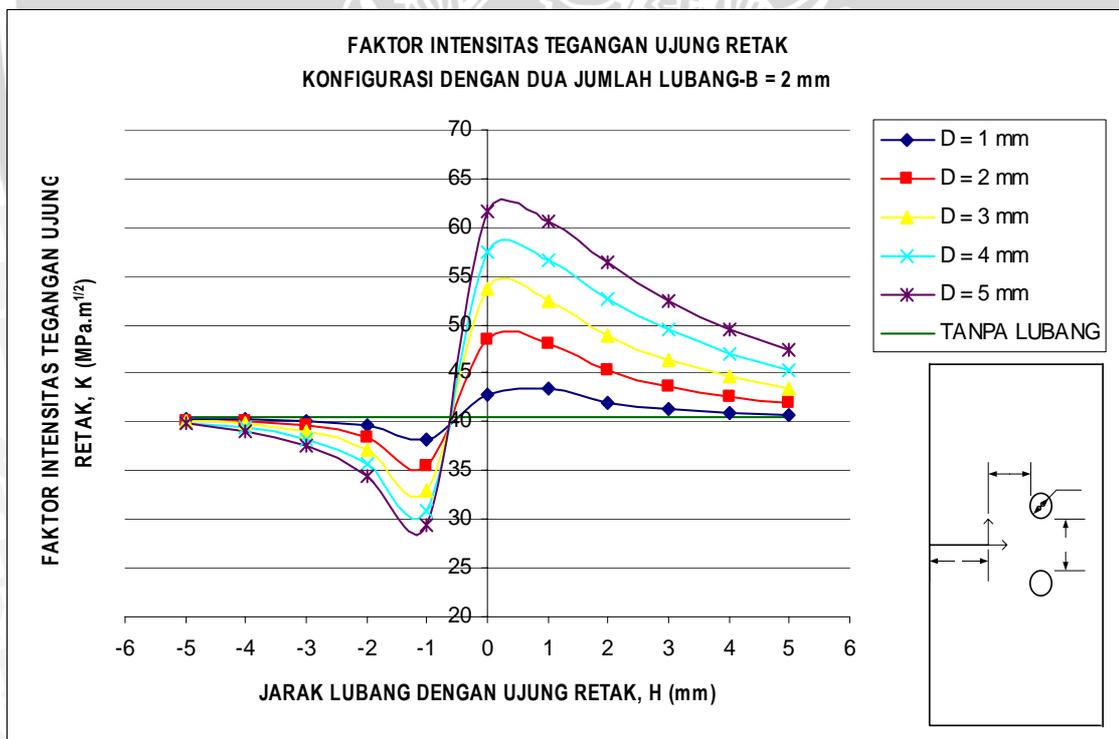
Gambar 4.3 (d). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang—D = 4 mm



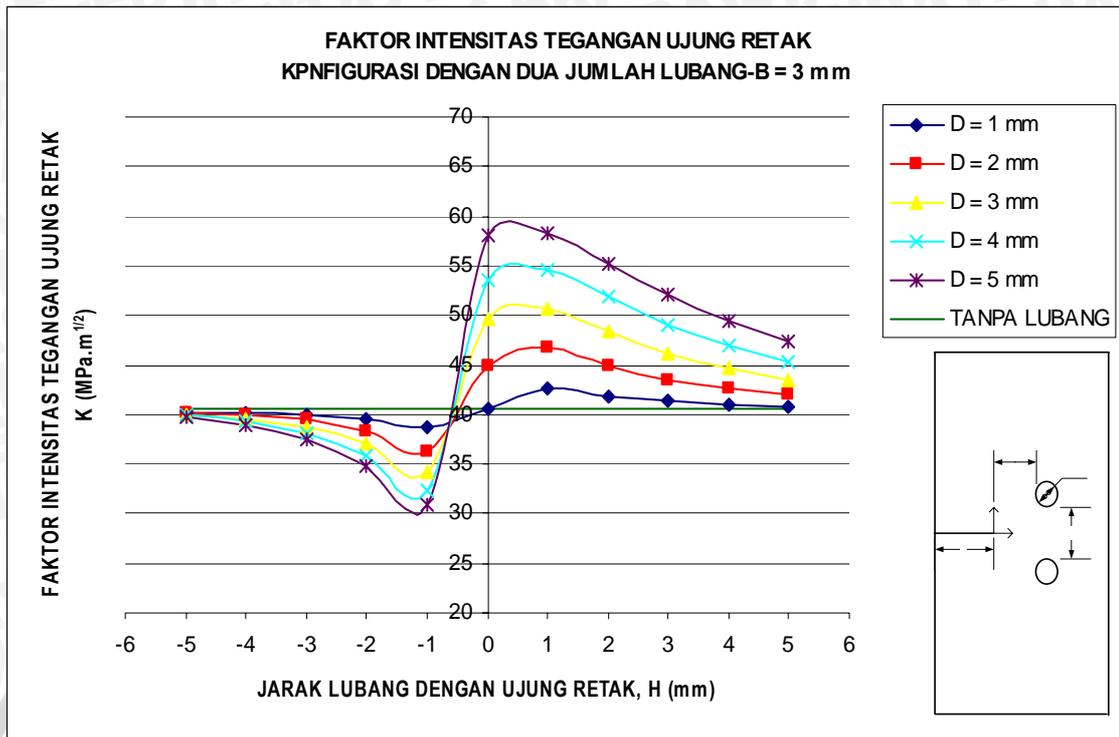
Gambar 4.3 (e). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang—D = 5 mm



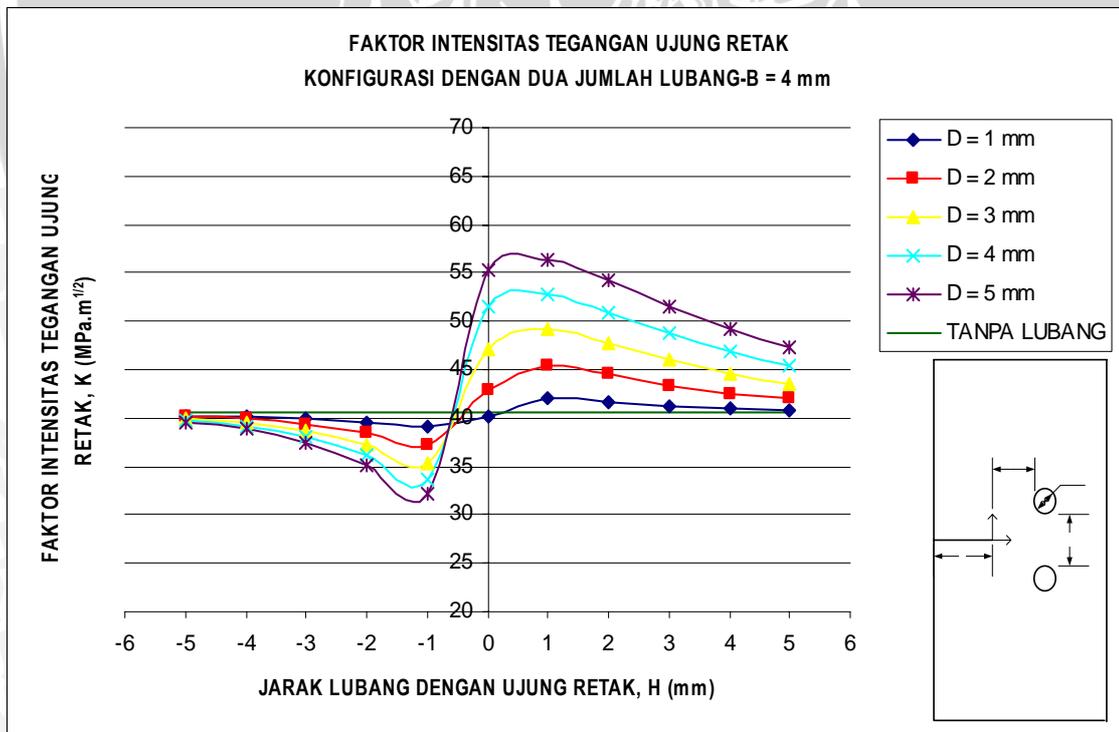
Gambar 4.4 (a). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $B = 1$ mm



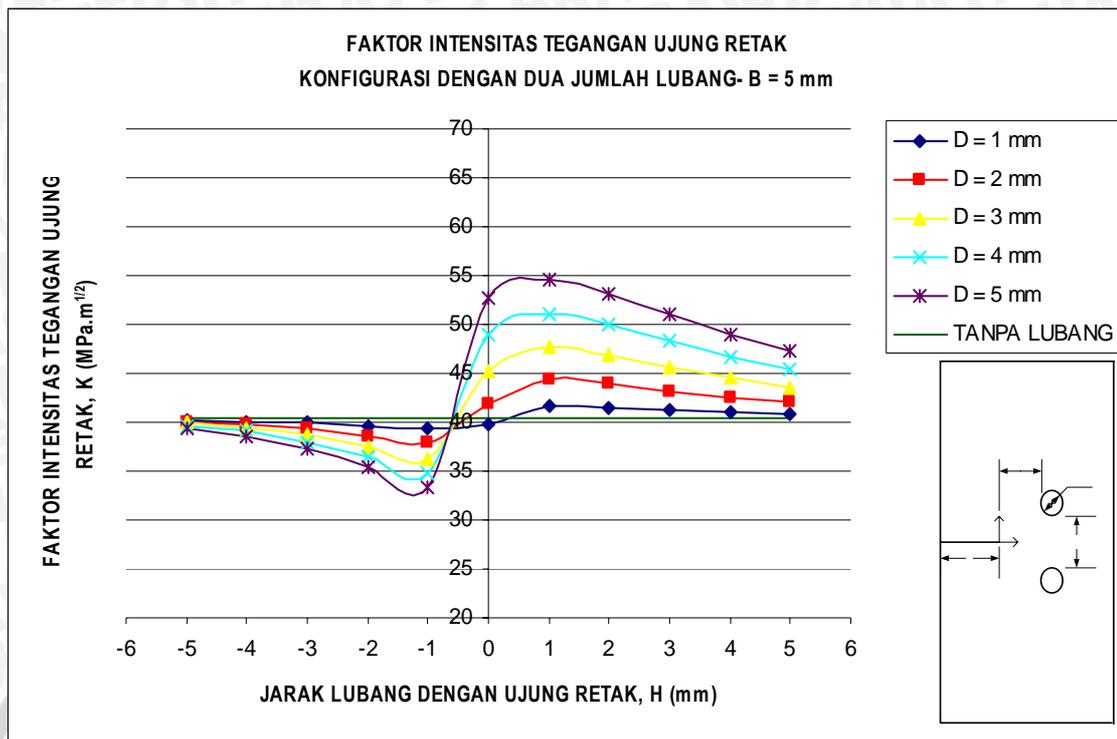
Gambar 4.4 (b). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $B = 2$ mm



Gambar 4.4 (c). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $B = 3$ mm



Gambar 4.4 (d). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $B = 4$ mm



Gambar 4.4 (e). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang— $B = 5$ mm

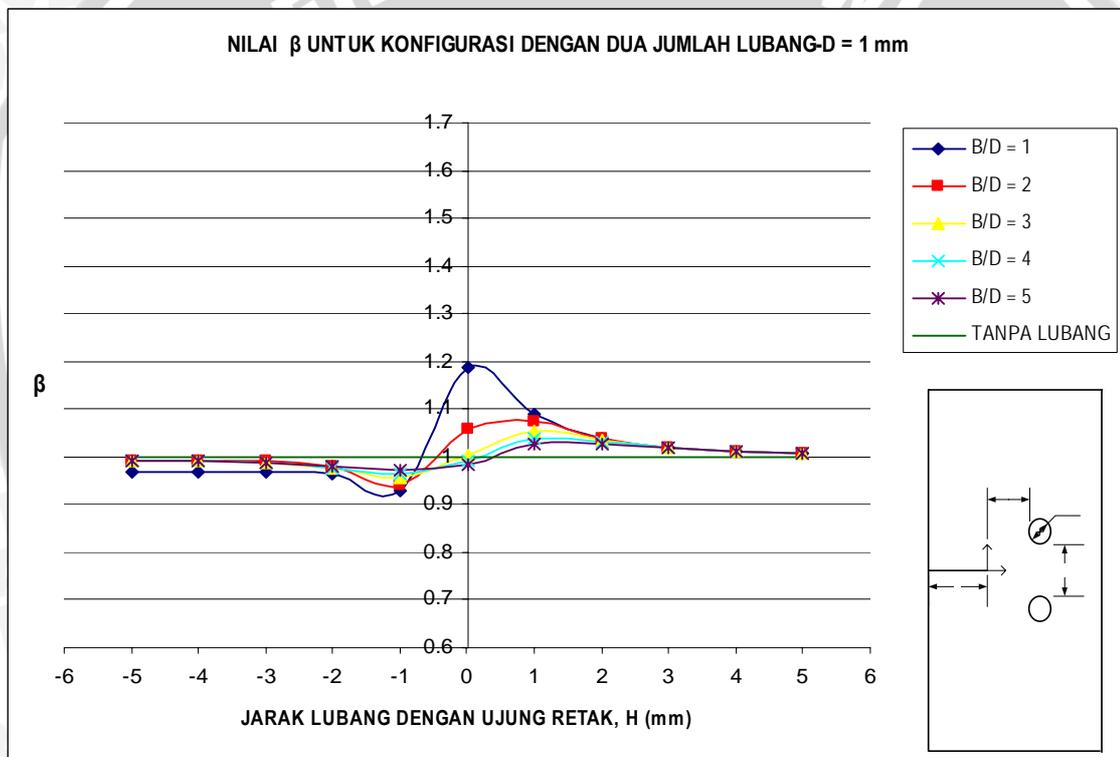
Gambar 4.3 merupakan variasi nilai K_I untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang pada masing-masing diameter lubang (D) dengan jarak antar lubang (B) yang bervariasi. Gambar 4.4 adalah grafik K_I pada masing-masing jarak antar lubang (B) dengan variasi diameter (D). Pada Gambar 4.4, nilai K_I menunjukkan hal yang sama dengan Gambar 4.3. Nilai K_I pada masing-masing diameter lubang, cenderung meningkat saat lubang mendekati ujung retak. K_I juga menurun secara signifikan saat lubang melewati ujung retak. Pada daerah di depan ujung retak, K_I cenderung berada di atas K_0 . Pada $H = 0$ mm, hampir semua K_I pada masing-masing lubang berada di atas K_0 kecuali pada konfigurasi $D = 1$ mm— $B = 4$ mm dan $D = 1$ mm— $B = 5$ mm yang berada di bawah K_0 . Nilai K_I akan berada di bawah K_0 saat lubang berada di belakang ujung retak. K_I terendah berada pada jarak H antara -1 mm dan -2 mm. Setelah itu, K_I cenderung meningkat mendekati K_0 . Konfigurasi dengan diameter (D) yang besar dan jarak antar lubang (B) yang kecil mengakibatkan K_I bernilai paling tinggi dan paling rendah jika dibandingkan dengan konfigurasi yang lain. Hal ini bisa dilihat pada konfigurasi $D = 5$ mm— $B = 1$ mm dengan K_I tertinggi dan terendah masing-masing sebesar $66,373 \text{ MPa.m}^{1/2}$ pada $H = 0$ mm dan $28,193 \text{ MPa.m}^{1/2}$ pada $H = -1$ mm.

Indikasi lain terlihat dari *slope* (kemiringan grafik) yang curam dibandingkan dengan konfigurasi yang lain.

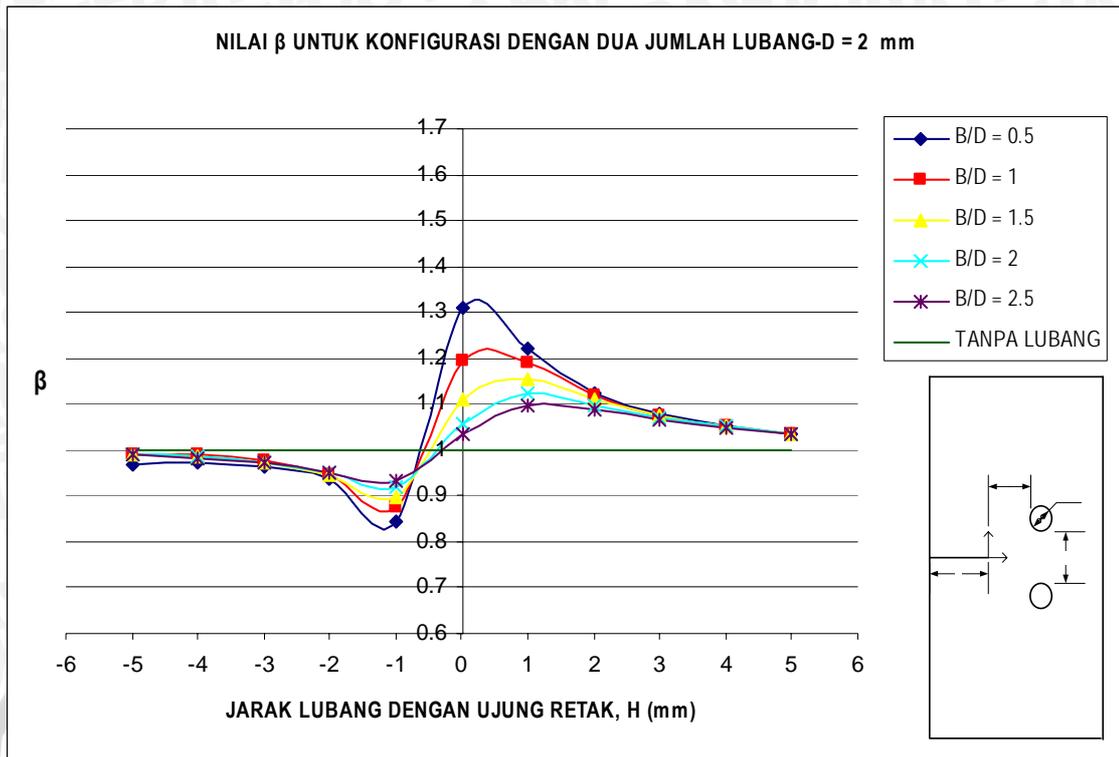
Perbandingan faktor intensitas tegangan ujung retak konfigurasi pada dua jumlah lubang (K_I) dan faktor intensitas tegangan ujung retak tanpa lubang (K_o) dinyatakan dengan β , dengan nilai β adalah sebagai berikut.

$$\beta = \frac{K_I}{K_o}$$

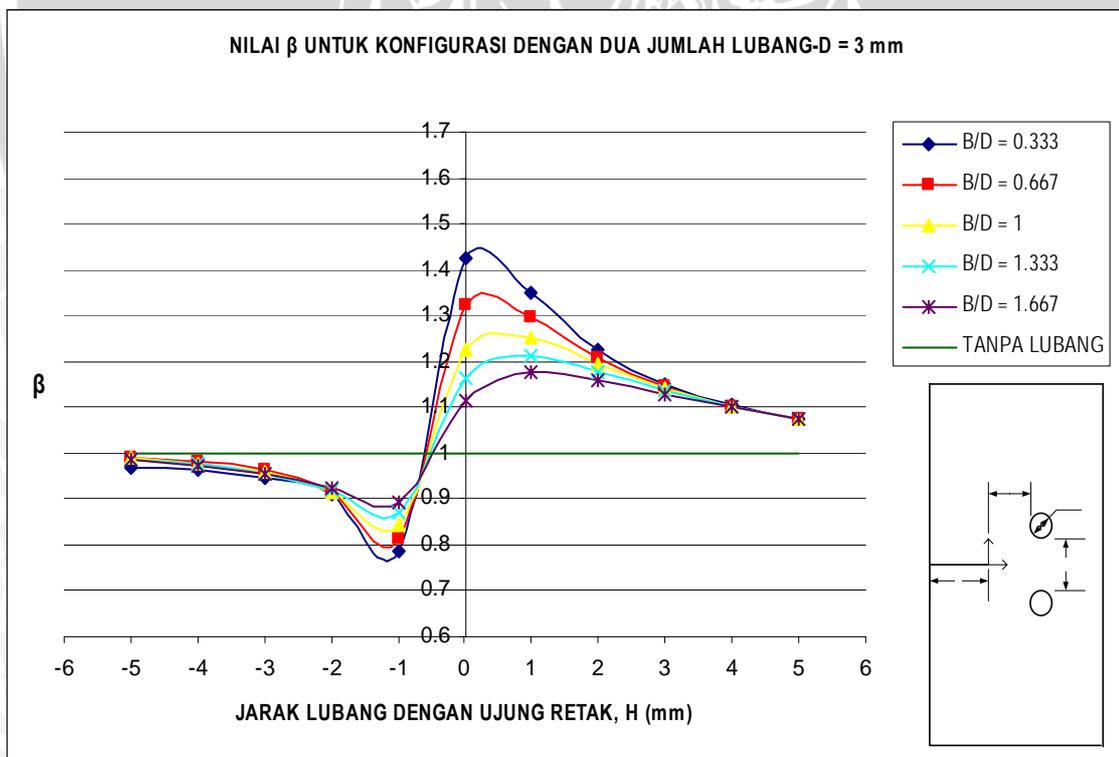
Hasil perbandingan ini ditampilkan pada Lampiran 3. Berikut ini ditampilkan grafik β pada masing-masing diameter.



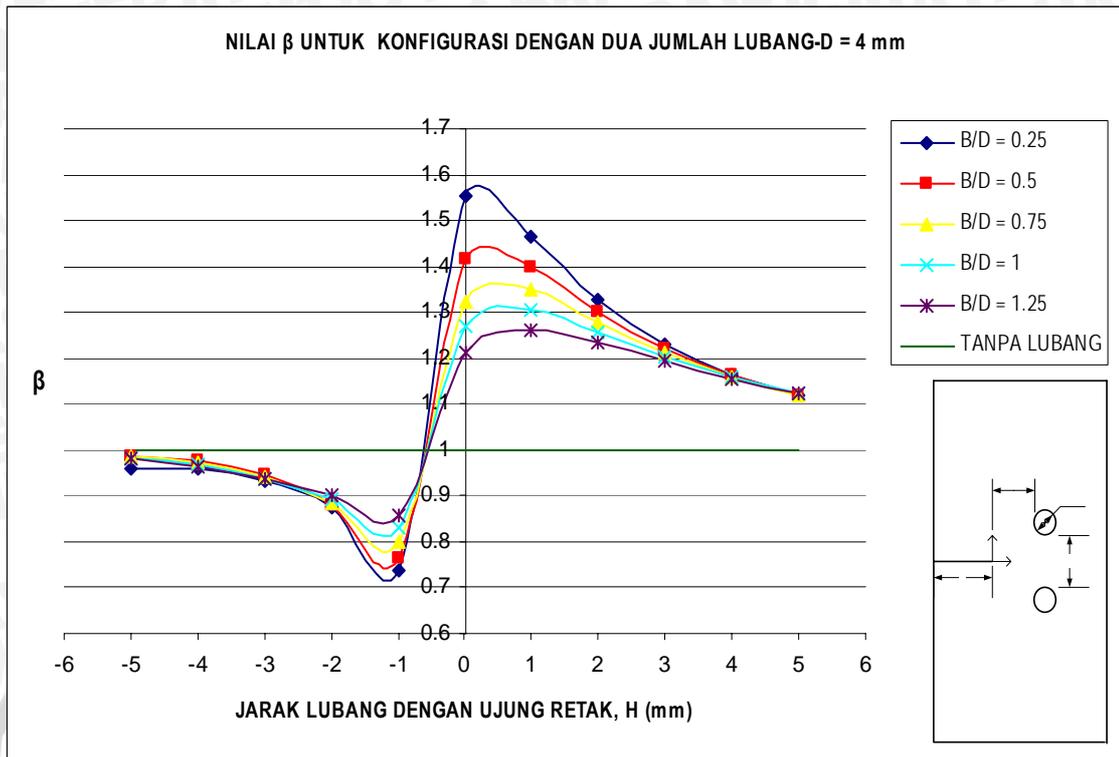
Gambar 4.5 (a). Grafik H— β untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang—D = 1 mm



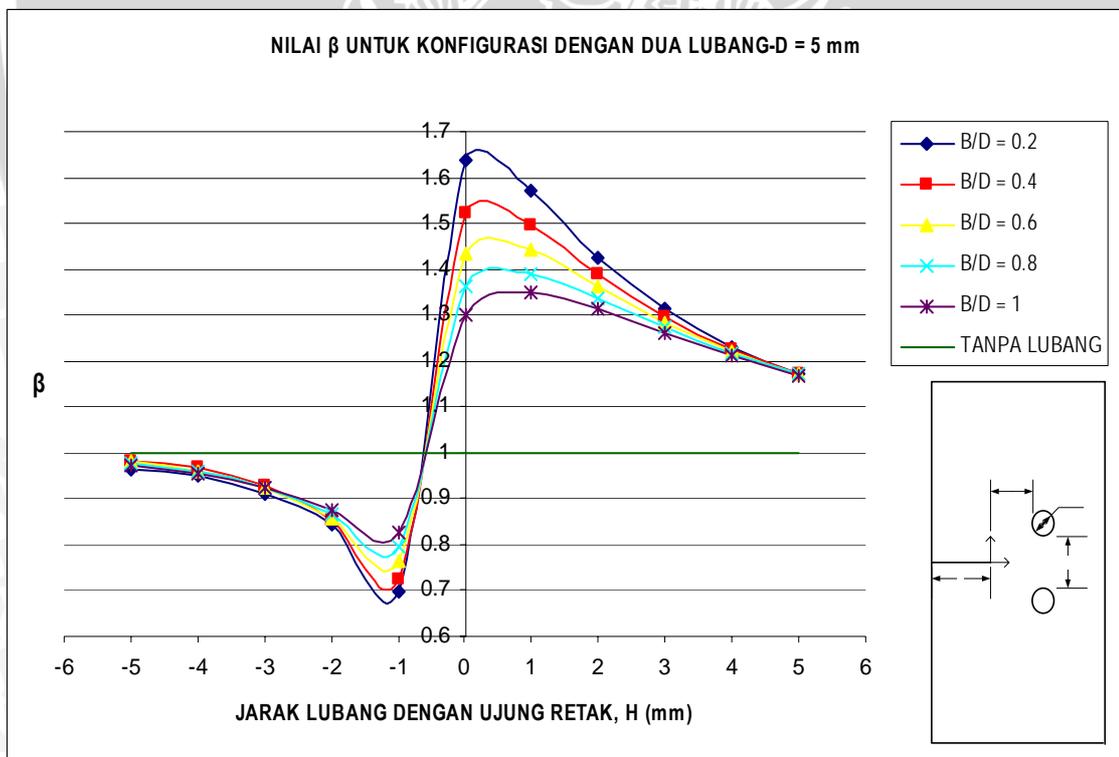
Gambar 4.5 (b). Grafik H— β untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang—D = 2 mm



Gambar 4.5 (c). Grafik H— β untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang—D = 3 mm



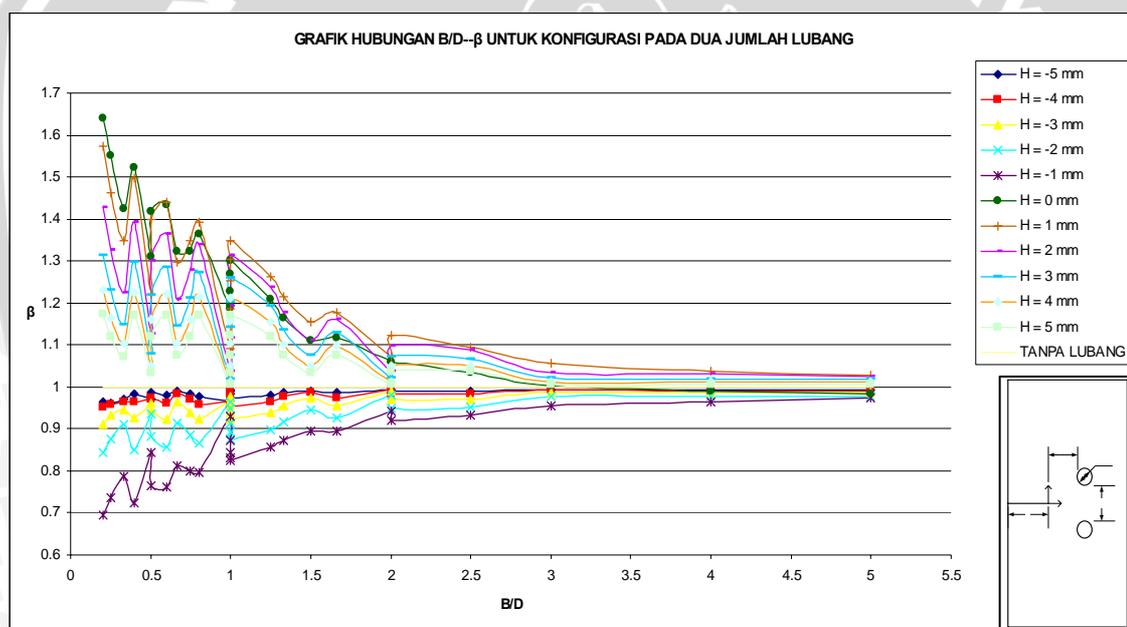
Gambar 4.5 (d). Grafik H— β untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang—D = 4 mm



Gambar 4.5 (e). Grafik H— β untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang—D = 5 mm

Pada Gambar 4.5, grafik memiliki ciri umum yaitu K_I bernilai di atas satu pada lubang berjarak $H = 0$ mm dan di depan ujung retak kecuali pada $D = 1$ mm. Konfigurasi $D = 1$ mm dengan $B/D = 4$ dan $B/D = 5$ masing-masing bernilai 0.991481 dan 0.984963. Hal ini disebabkan oleh nilai K_I yang lebih rendah dari nilai K_0 . Pada masing-masing diameter lubang, grafik dengan *slope* (kemiringan grafik) tertinggi terjadi pada B/D yang terkecil. Hal ini berarti diameter lubang (D) yang semakin besar dengan jarak antar lubang (B) yang kecil mengakibatkan nilai K_I yang semakin besar pada daerah di depan ujung retak atau K_I yang semakin kecil untuk daerah di belakang retak.

Pada Gambar 4.6 berikut ini ditampilkan grafik hubungan B/D dengan β untuk masing-masing jarak H . Grafik hubungan ini menunjukkan kecenderungan konfigurasi antara jarak B dan diameter lubang (D) terhadap β .



Gambar 4.6. Grafik B/D — β untuk konfigurasi pada dua jumlah lubang

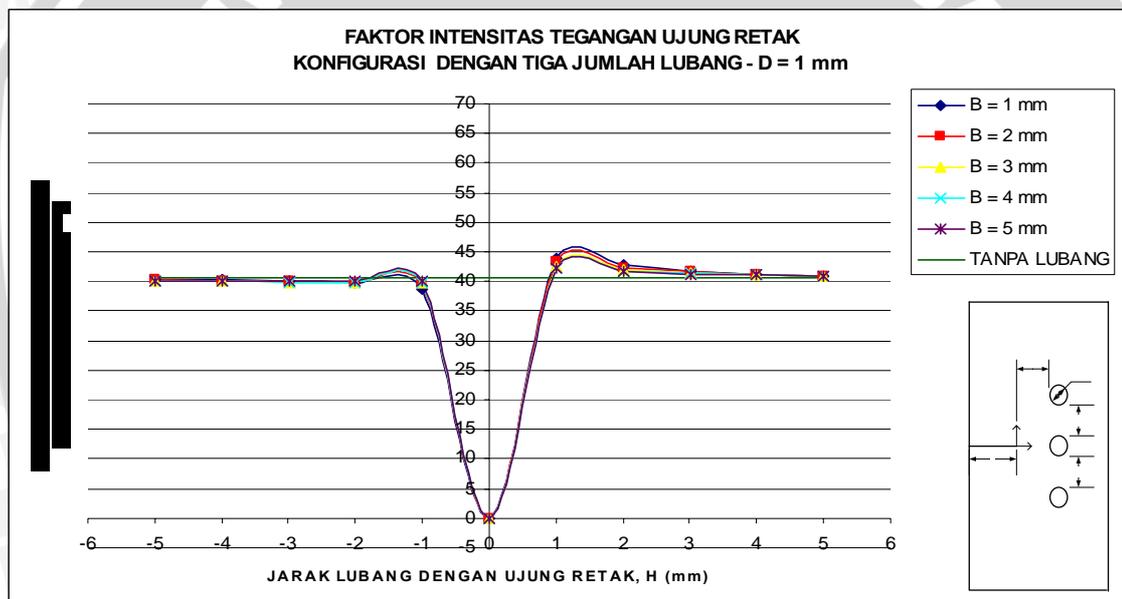
Pada Gambar 4.6 terlihat bahwa nilai β selalu di atas 1 pada jarak $H = 0$ mm hingga $H = 5$ mm dan di bawah 1 untuk lubang $H = -1$ mm hingga $H = -5$ mm. Nilai β di atas 1 berarti nilai K_I lebih tinggi dari nilai K_0 , sebaliknya nilai β di bawah 1 berarti nilai K_I lebih rendah dari nilai K_0 . Semakin kecil harga B/D , β akan berfluktuatif dan semakin besar harga B/D , β berangsur mendekati 1 dengan stabil. Kondisi ini menunjukkan K_I semakin dekat dengan K_0 . Grafik minimum terjadi pada $H = -1$ mm.

Grafik β maksimum terjadi pada $H = 0$ mm, tetapi seiring bertambahnya harga B/D , β maksimum terjadi pada grafik $H = 1$ mm.

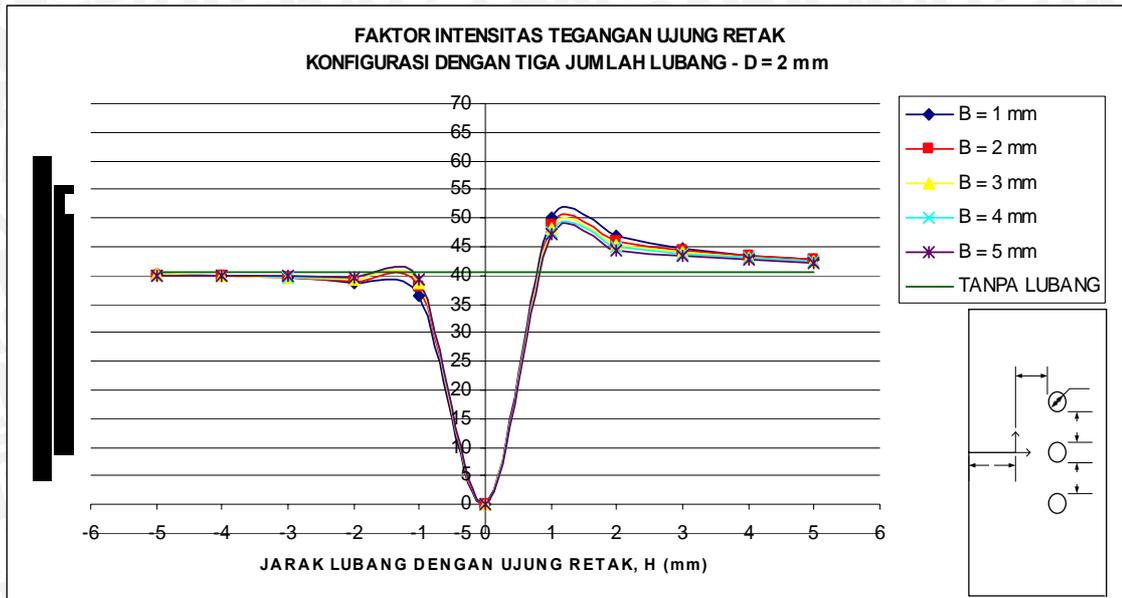
4.2.3 Konfigurasi dengan Tiga Jumlah Lubang

Konfigurasi dengan tiga jumlah lubang ini berupa retak dengan tiga lubang di depan ujung retak. Lubang memiliki variasi diameter (D), jarak dari ujung retak (H), dan jarak antar lubang (B). Faktor intensitas tegangan ujung retak kasus tiga lubang ini (K_I) akan dibandingkan dengan faktor intensitas tegangan ujung retak tanpa lubang (K_0). Perbandingan ini akan memberikan informasi tentang pengaruh konfigurasi lubang terhadap K_I .

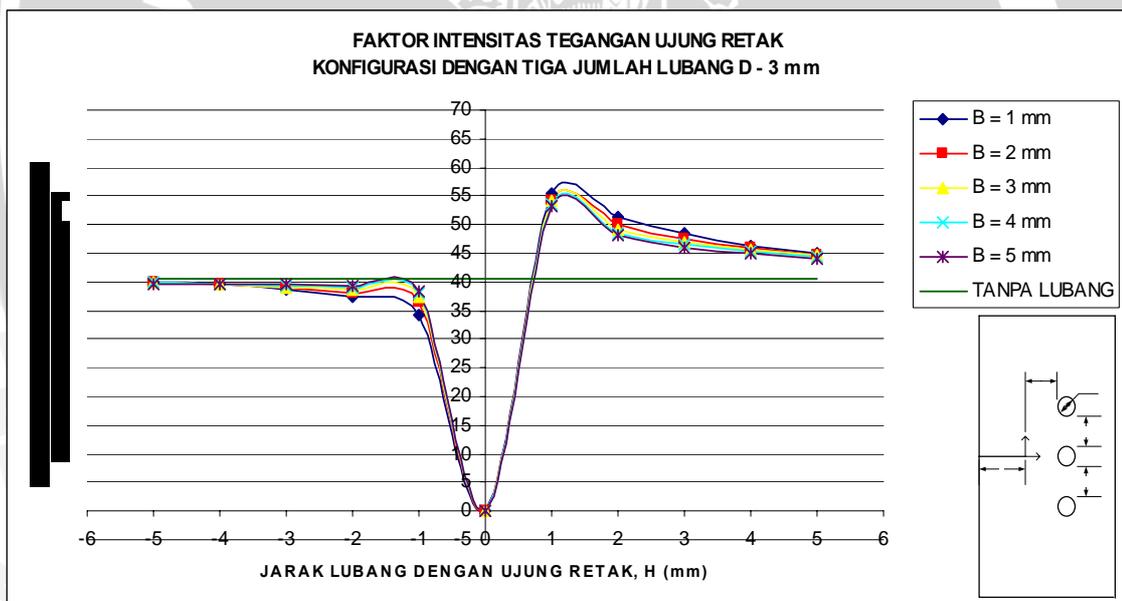
Hasil perhitungan K_I kasus tiga lubang ditampilkan dalam Lampiran 4. Grafik K_I pada kasus tiga lubang ditampilkan pada Gambar 4.7 dan 4.8 berikut ini.



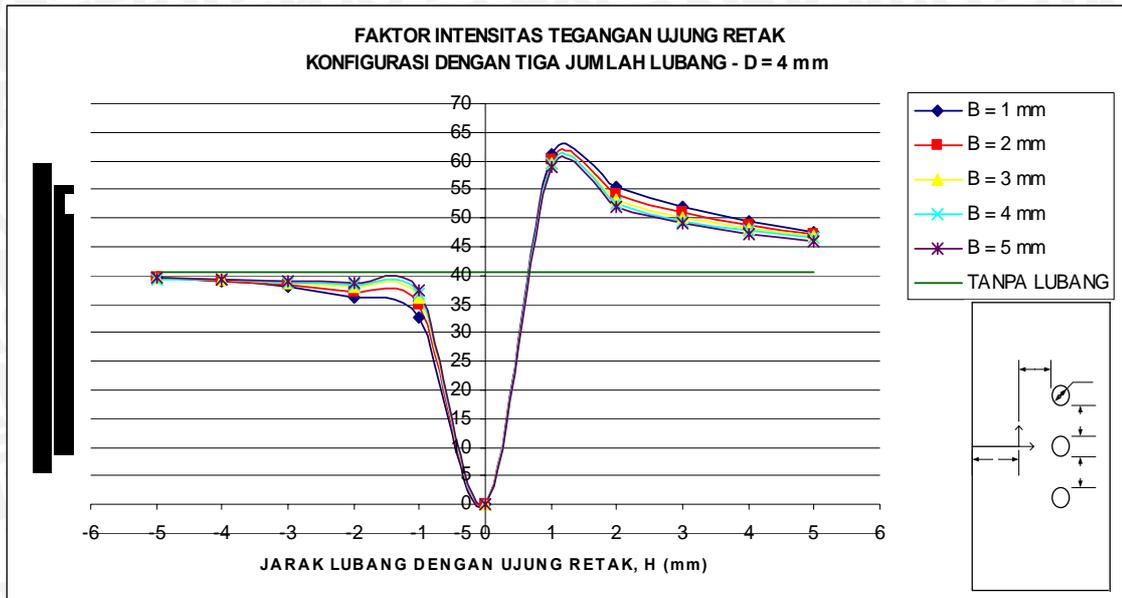
Gambar 4.7 (a). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 1$ mm



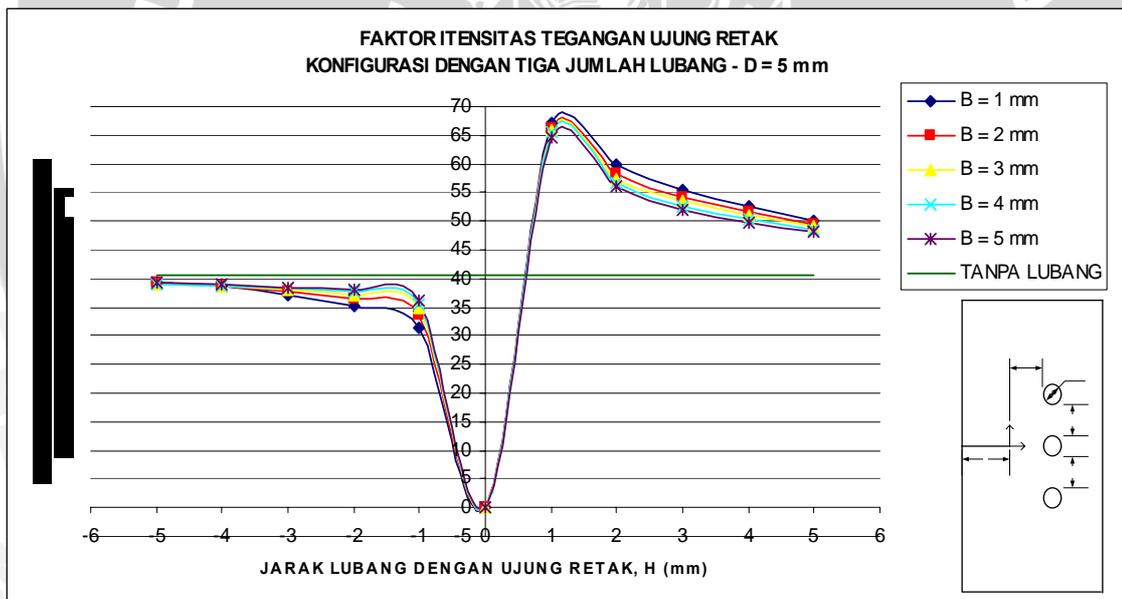
Gambar 4.7 (b). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 2$ mm



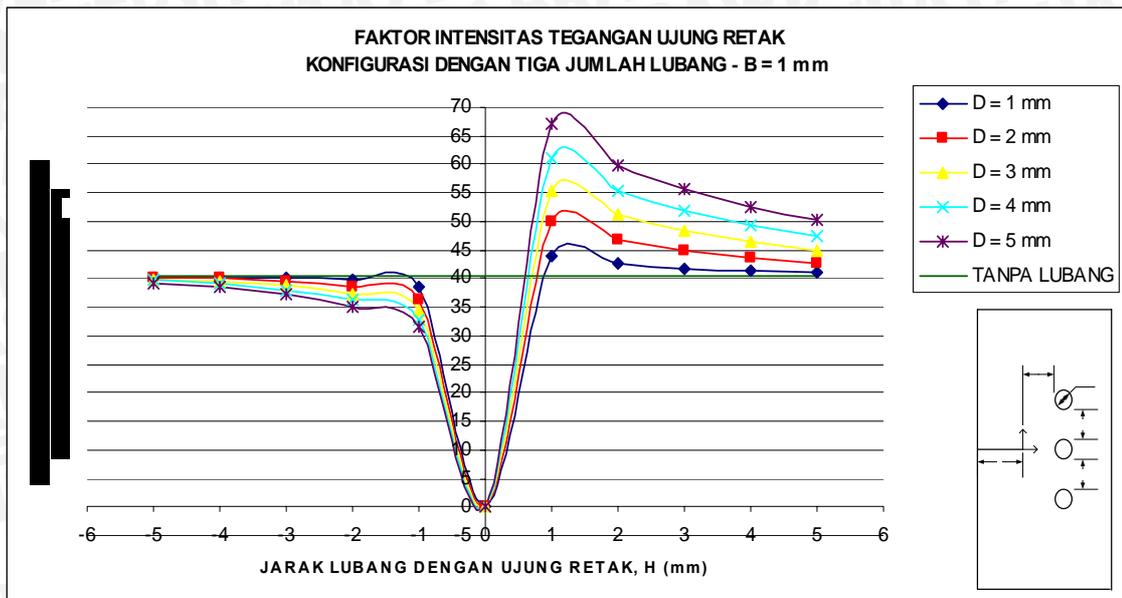
Gambar 4.7 (c). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 3$ mm



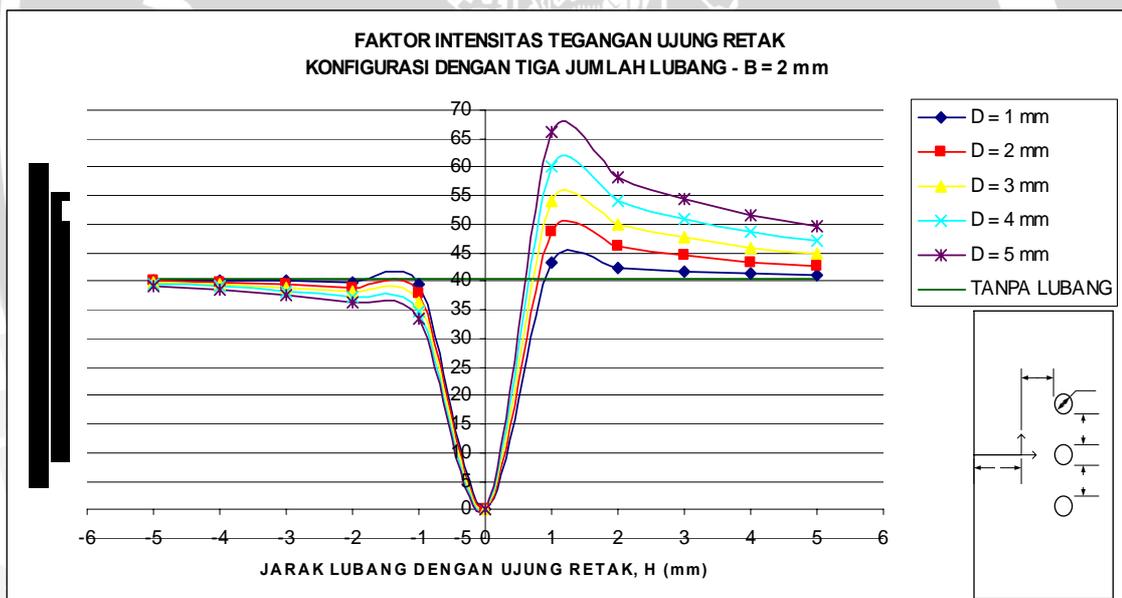
Gambar 4.7 (d). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang—D = 4 mm



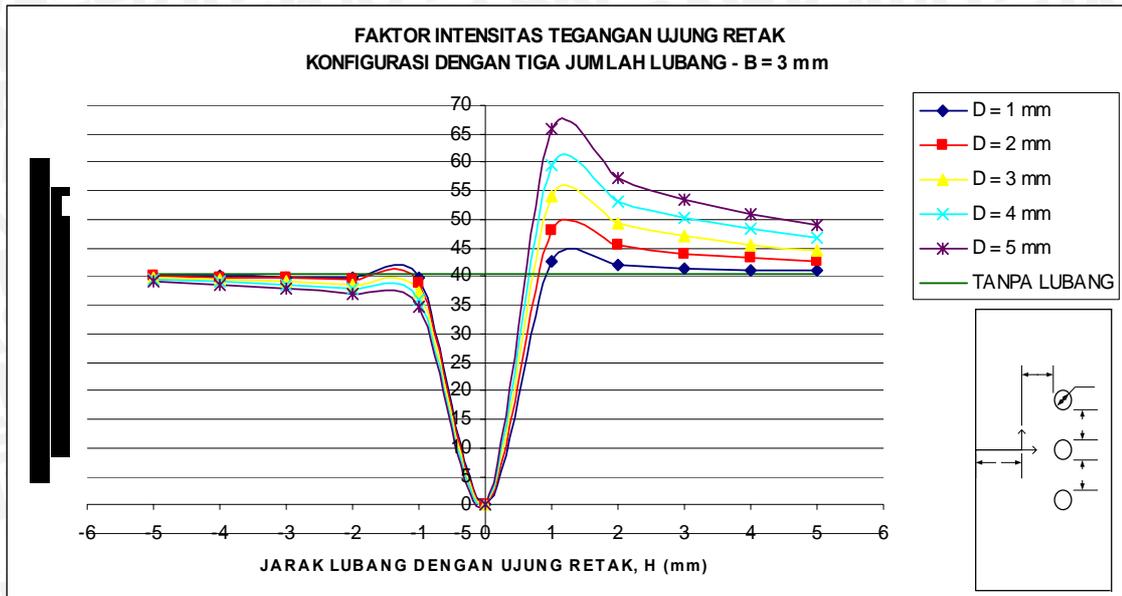
Gambar 4.7 (e). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang—D = 5 mm



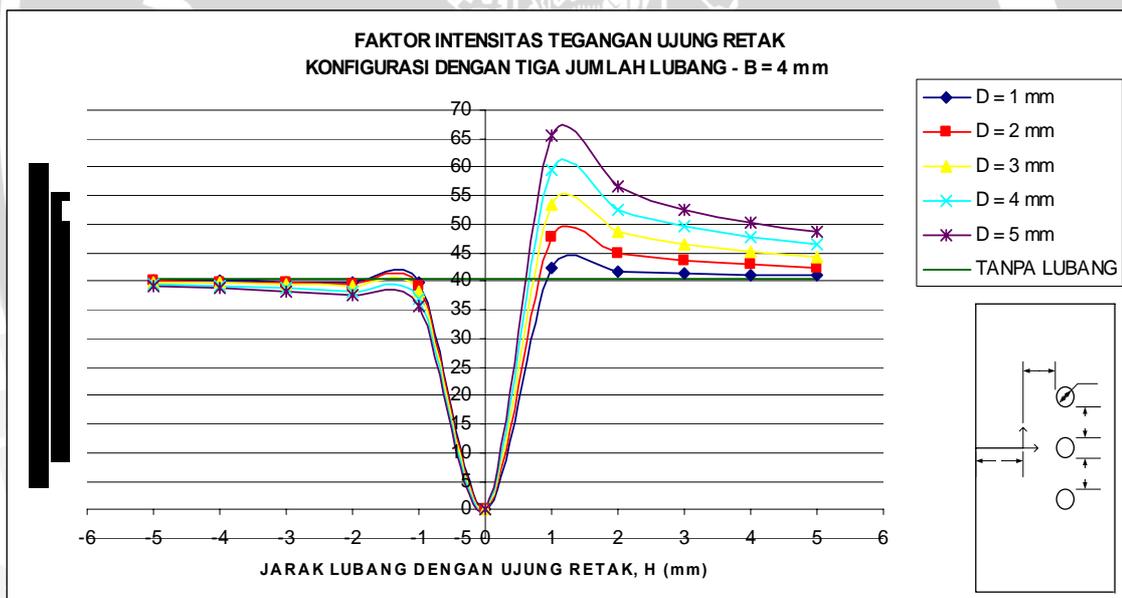
Gambar 4.8 (a). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $B = 1$ mm



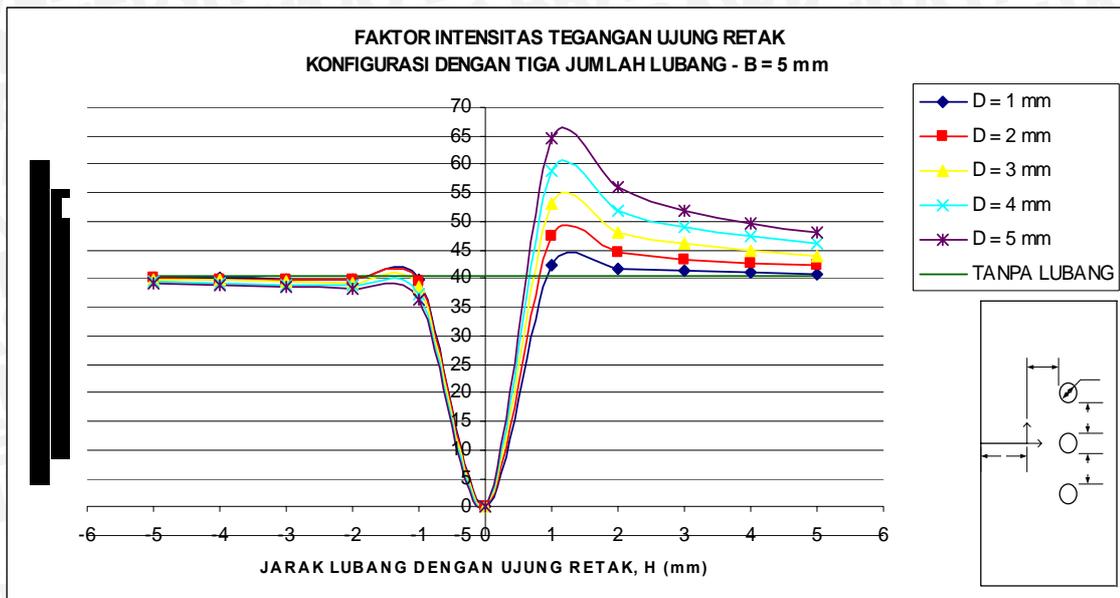
Gambar 4.8 (b). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $B = 2$ mm



Gambar 4.8 (c). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $B = 3$ mm



Gambar 4.8 (d). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $B = 4$ mm



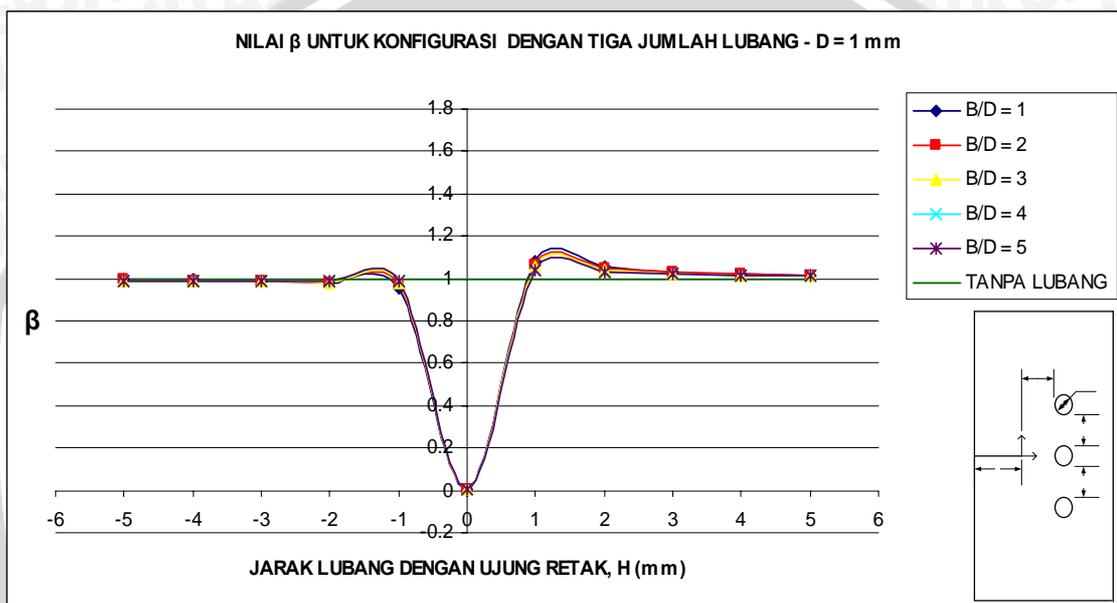
Gambar 4.8 (e). Grafik faktor intensitas tegangan ujung retak untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $B = 5$ mm

Gambar 4.7 menunjukkan variasi nilai K_I untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang pada masing-masing diameter lubang dengan jarak B yang bervariasi. Gambar 4.8 merupakan grafik K_I pada masing-masing jarak antar lubang (B) dengan variasi diameter (D) yang menunjukkan hal yang sama dengan Gambar 4.7. Nilai K_I pada masing-masing diameter lubang akan meningkat sampai pada $H = 1$ mm, setelah itu K_I turun secara signifikan pada $H = 0$ mm dan berangsur meningkat lagi saat lubang berada di belakang ujung retak. Pada daerah di depan ujung retak yang berjarak $H = 1$ mm, nilai K_I untuk konfigurasi $D = 5$ mm— $B = 1$ mm bernilai tertinggi dibandingkan dengan konfigurasi yang lain, yaitu sebesar $67,078 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Konfigurasi ini bernilai terendah pada jarak $H = 0$ mm, yaitu sebesar $5,55\cdot 10^{-3} \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Pada daerah di belakang ujung retak yang berjarak $H = -1$ mm, konfigurasi ini juga bernilai terendah jika dibandingkan dengan konfigurasi lain, yaitu $31,45 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Pada lubang yang berada jauh di depan atau di belakang ujung retak, K_I cenderung menuju K_0 , dengan K_I di depan ujung retak bernilai di atas K_0 sedangkan K_I di belakang ujung retak bernilai di bawah K_0 . Diameter lubang yang semakin kecil dan berada jauh di depan atau di belakang ujung retak akan memiliki nilai K_I yang semakin mendekati K_0 . Hal ini terlihat pada konfigurasi $D = 1$ mm— $H = 5$ mm dan $D = 1$ mm— $H = -5$ dengan nilai K_I lebih mendekati K_0 jika dibandingkan konfigurasi lain.

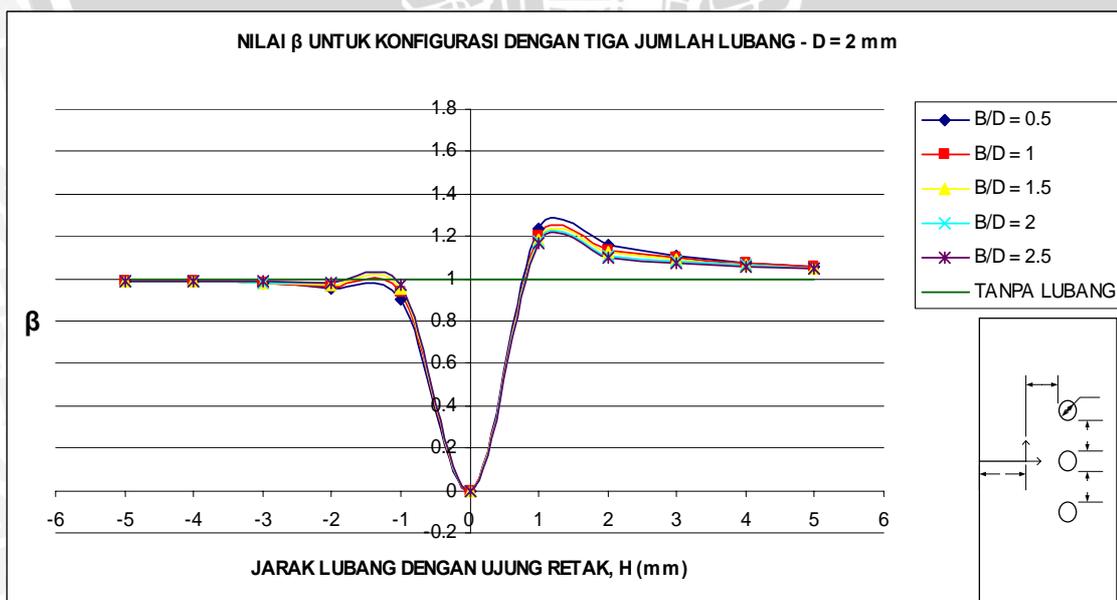
Perbandingan faktor intensitas tegangan ujung retak kasus tiga lubang (K_I) dan faktor intensitas tegangan ujung retak tanpa lubang (K_o) dinyatakan dengan β , dengan nilai β adalah sebagai berikut.

$$\beta = \frac{K_I}{K_o}$$

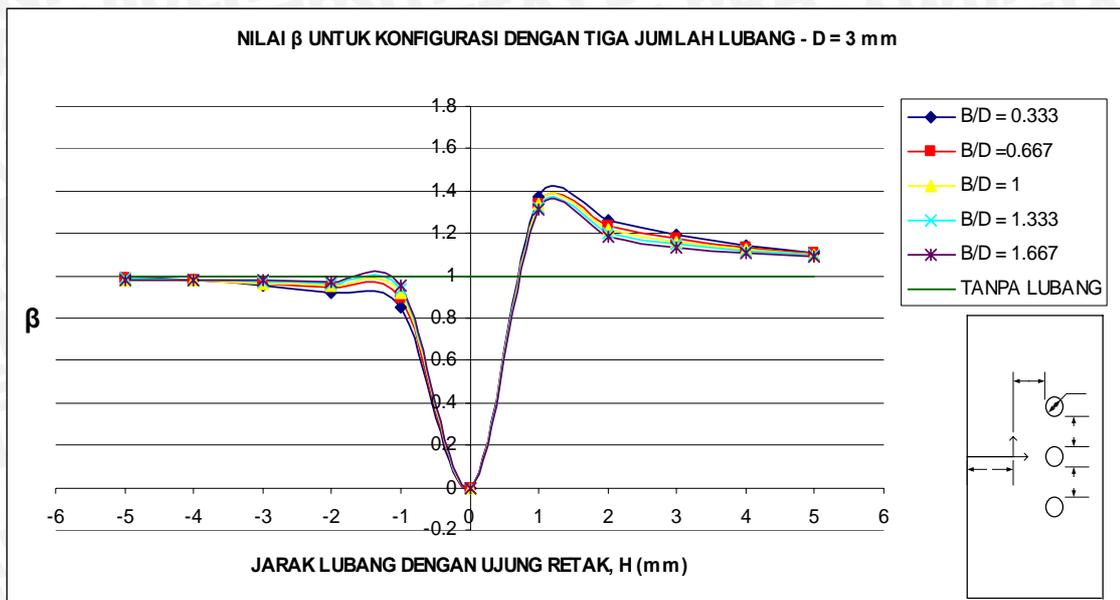
Perbandingan ini ditampilkan dalam Lampiran 4. Grafik perbandingan ini ditunjukkan dalam Gambar 4.9.



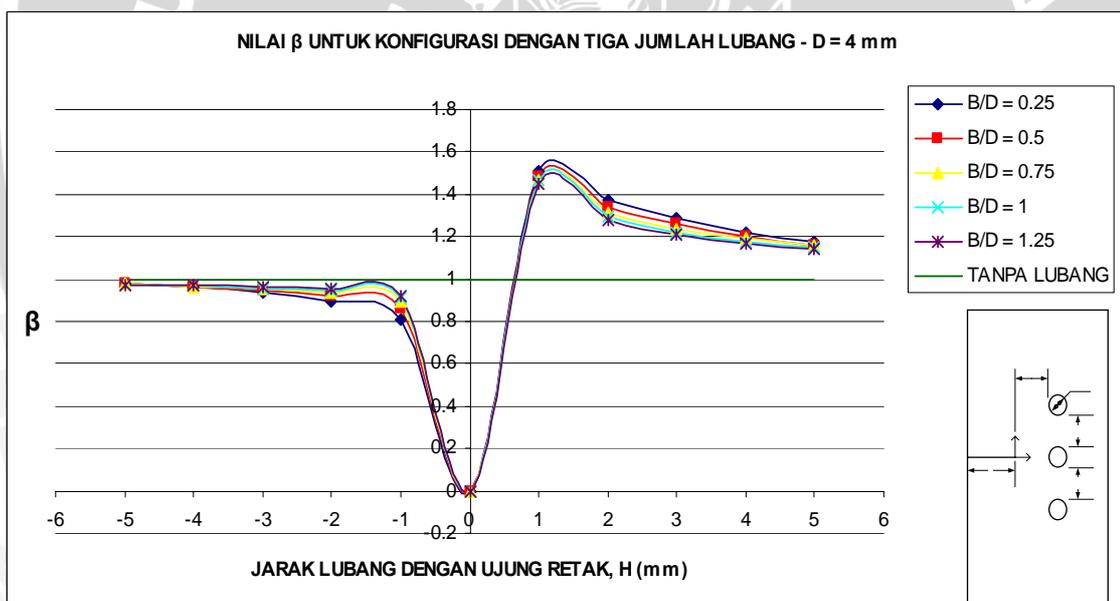
Gambar 4.9 (a). Grafik H— β untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang—D = 1 mm



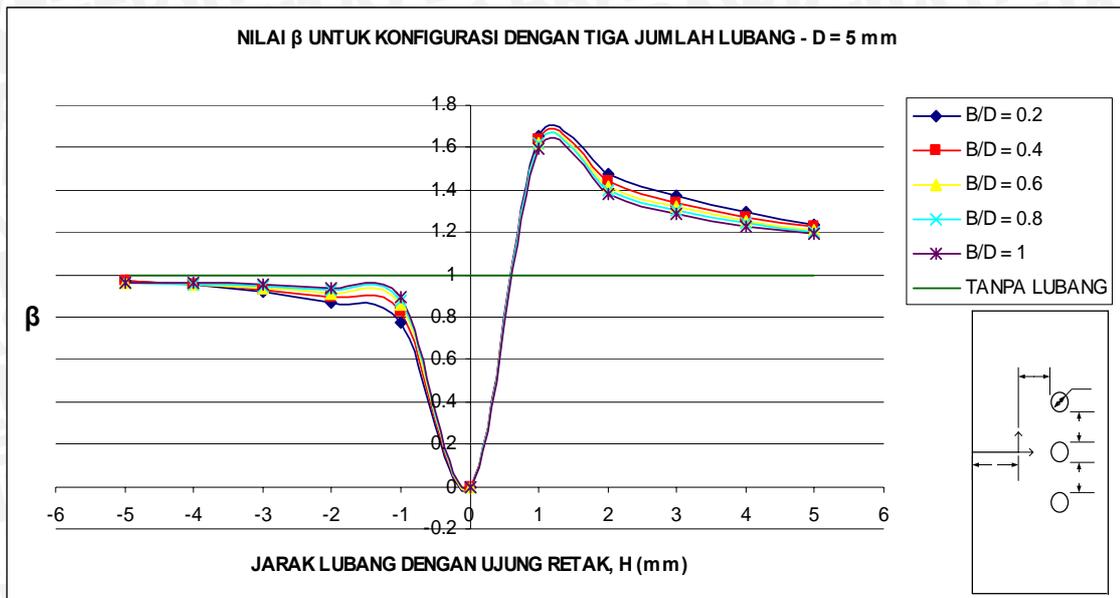
Gambar 4.9 (b). Grafik H— β untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang—D = 2 mm



Gambar 4.9 (c). Grafik H— β untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang—D = 3 mm



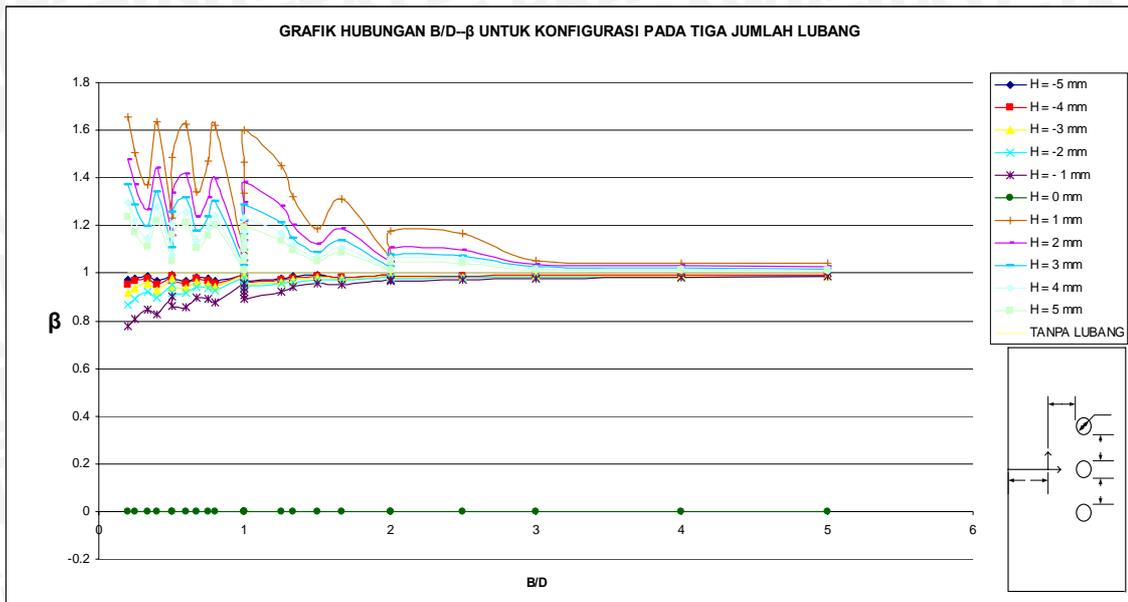
Gambar 4.9 (d). Grafik H— β untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang—D = 4 mm



Gambar 4.9 (e). Grafik H — β untuk konfigurasi dengan tiga jumlah lubang— $D = 5$ mm

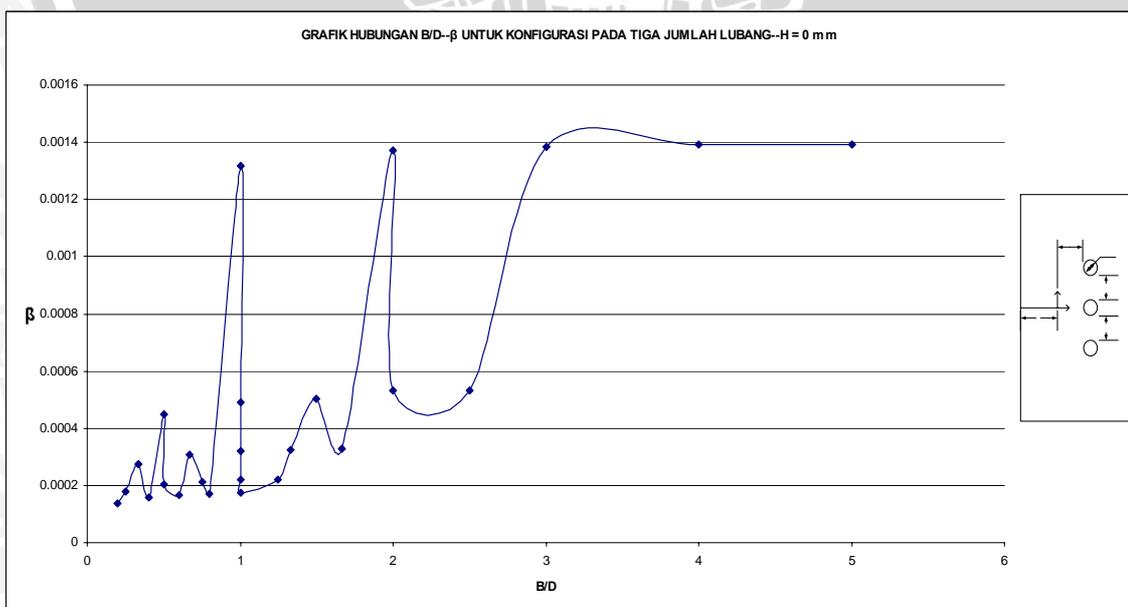
Pada masing-masing konfigurasi dalam Gambar 4.9, nilai β akan semakin meningkat dengan mendekatnya lubang ke ujung retak sampai pada jarak $H = 1$ mm. Nilai itu akan turun drastis pada $H = 0$ mm dan meningkat lagi saat lubang berada di belakang ujung retak sampai mendekati nilai satu. Nilai β saat lubang di depan ujung retak cenderung lebih tinggi dari satu dan saat lubang di belakang ujung retak nilai β lebih rendah dari satu. Pada jarak lubang yang jauh dari ujung retak nilai β akan cenderung mendekati satu. Kecenderungan tersebut terlihat jelas saat diameter lubang semakin kecil, dalam hal ini diwakili oleh $D = 1$ mm. Hubungan diameter dan jarak antar lubang ditunjukkan pada perbandingan B/D . Pada masing-masing diameter lubang, perbandingan B/D yang kecil memberikan nilai β tertinggi pada daerah di depan ujung retak dan minimum pada $H = 0$ mm. Pada daerah belakang ujung retak, konfigurasi dengan B/D yang rendah mengakibatkan nilai β cenderung semakin rendah dibandingkan dengan konfigurasi yang lain. Perbandingan B/D yang kecil berarti jarak antar lubang yang kecil dengan diameter lubang besar.

Berikut ini ditampilkan grafik hubungan antara B/D dengan β untuk masing-masing jarak H . Grafik ini memberikan kecenderungan pengaruh konfigurasi B dan D terhadap nilai β .



Gambar 4.10. Grafik B/D— β untuk konfigurasi pada tiga jumlah lubang

Pada gambar 4.10 diketahui bahwa pada daerah di depan ujung retak atau di belakang ujung retak, harga B/D yang semakin kecil mengakibatkan nilai β cenderung berfluktuatif dan akan bergerak mendekati 1 saat harga B/D semakin besar. Nilai β selalu di atas 1 untuk konfigurasi lubang yang berada di daerah depan ujung retak dan bernilai di bawah 1 untuk konfigurasi di belakang ujung retak. Nilai β bahkan mendekati nol saat lubang berada pada $H = 0$ mm. Grafik hubungan B/D— β untuk $H = 0$ mm ditampilkan secara khusus pada Gambar 4.11 berikut ini untuk menunjukkan kecenderungan pengaruh konfigurasi B/D terhadap nilai β .



Gambar 4.11. Grafik B/D— β untuk konfigurasi pada tiga jumlah lubang— $H = 0$ mm

Berdasar Gambar 4.11 diketahui bahwa nilai β cenderung berfluktuatif saat harga B/D semakin kecil. Pada harga B/D yang semakin besar, nilai β cenderung lebih stabil. Nilai β berada jauh di bawah 1, bahkan mendekati nol. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai KI turun secara signifikan jauh di bawah K_0 dan mendekati nilai nol. Berubahnya kelengkungan tajam ujung retak menjadi kelengkungan sebuah lubang menjadi sebab menurunnya nilai KI secara signifikan.

4.3 Pembahasan

Pada subbab 4.2 telah diketahui variasi nilai faktor intensitas tegangan ujung retak (K_I) yang disebabkan oleh berbagai konfigurasi diameter lubang (D), jarak lubang dengan ujung retak (H), dan jarak antar lubang (B). Variasi nilai K_I menunjukkan bahwa faktor intensitas tegangan sangat dipengaruhi oleh faktor geometri. Adanya lubang di sekitar ujung retak menunjukkan adanya perubahan geometri pada spesimen sehingga berpengaruh pada nilai K_I .

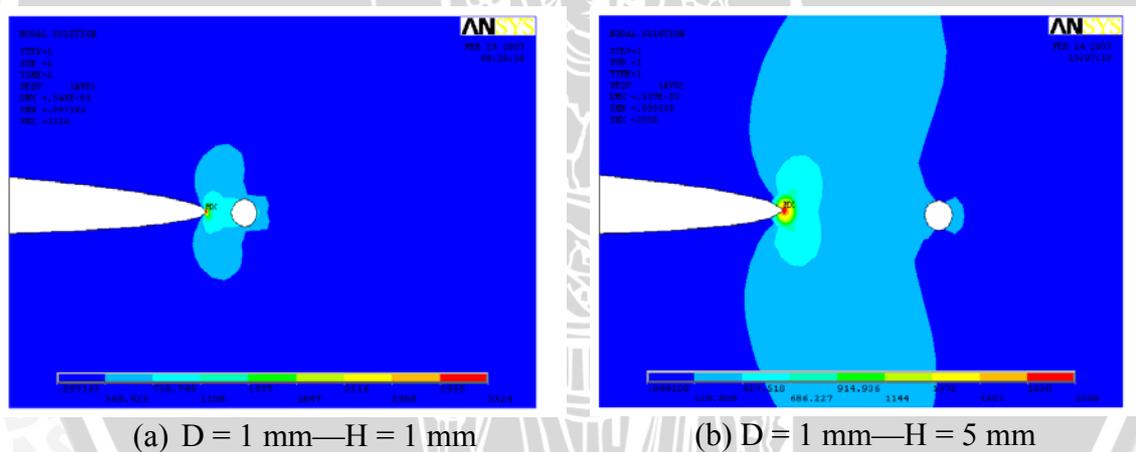
Pada ujung retak dan sisi lubang terdapat pemusatan tegangan. Secara umum, konfigurasi lubang di sekitar ujung retak akan mengakibatkan interaksi tegangan yang melibatkan tegangan di ujung retak dan sisi lubang tersebut. Interaksi tegangan ini pada akhirnya mempengaruhi besar kecilnya nilai K_I . Pada masing-masing jumlah lubang, baik satu jumlah lubang, dua jumlah lubang, dan tiga jumlah lubang, menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu pada daerah di depan ujung retak nilai K_I semakin meningkat dan selalu di atas nilai K_0 saat jarak H dan B semakin kecil serta D yang semakin besar. Peningkatan ini terjadi hingga $H = 1$ mm. Saat $H = 0$, nilai K_I mengalami penurunan yang sangat signifikan atau K_I di bawah K_0 , kecuali pada dua jumlah lubang yang penurunannya justru terjadi saat $H = -1$ mm. Pada daerah di belakang ujung retak, nilai K_I tetap berada di bawah K_0 meskipun cenderung terjadi peningkatan dengan semakin berkurangnya diameter lubang (D) serta bertambahnya jarak H dan B.

4.3.1 Konfigurasi Lubang di Depan Ujung Retak

Pada daerah di depan ujung retak, nilai K_I akan semakin meningkat dengan semakin besarnya diameter lubang (D), dekatnya lubang pada ujung retak (H) dan jarak antar lubang (B). Hal ini terjadi pada masing-masing jumlah lubang, baik satu jumlah lubang, dua jumlah lubang, atau tiga jumlah lubang. Pada dasarnya, faktor intensitas

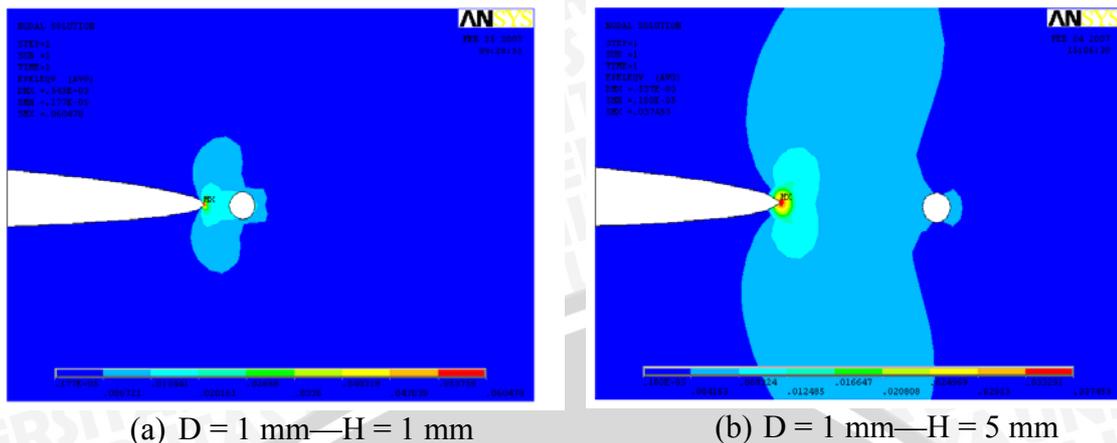
tegangan ujung retak (K_I) pada konfigurasi lubang di depan ujung retak akan lebih besar dari pada faktor intensitas tegangan ujung retak dengan tanpa lubang di depannya (K_0) (Broek, 1978).

Pada konfigurasi dengan satu jumlah lubang, K_I akan semakin besar dengan semakin berkurangnya jarak H dan bertambahnya diameter lubang (D) (Rooke, 1976). Selain itu, pada kasus satu lubang identik dengan retak pinggir (*edge crack*) sehingga cenderung meningkatkan nilai K_I dengan bertambahnya D atau berkurangnya jarak H . Interaksi tegangan yang melibatkan tegangan ujung retak dan tegangan di sekitar lubang menyebabkan nilai K_I meningkat. Pola distribusi tegangan ditampilkan dalam Gambar 4.12. Gambar 4.12 menunjukkan adanya interaksi tegangan antara ujung retak dan lubang yang ditandai dengan daerah biru muda. Pada daerah ujung retak dan sisi lubang yang tegak lurus arah pembebanan terjadi tegangan tarik. Dengan mendekatnya lubang ke ujung retak, maka tegangan tarik itu semakin besar sehingga potensi peningkatan K_I juga besar. Kondisi ini tampak pada Gambar 4.12 dengan menyatunya pola berwarna hijau terang antara ujung retak dan lubang.



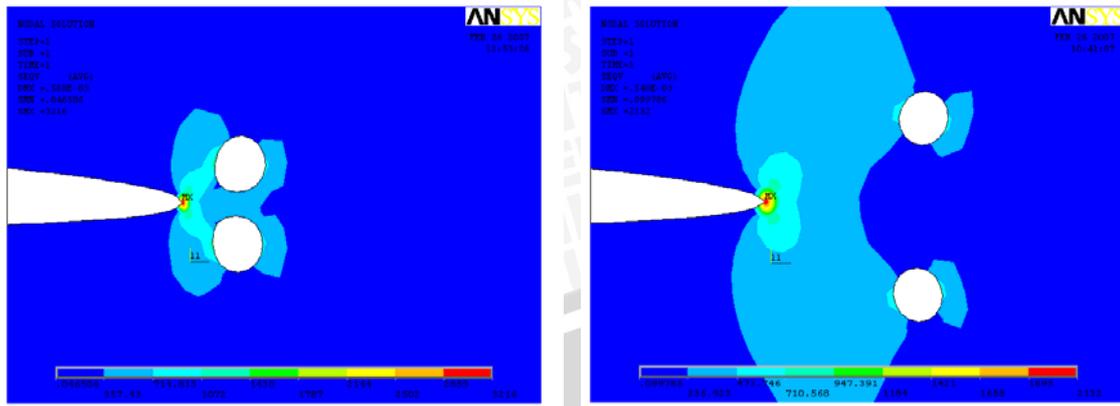
Gambar 4.12. Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan satu jumlah lubang

Distribusi regangan yang terjadi menunjukkan pola yang sama dengan distribusi tegangan. Contoh regangan ditampilkan dalam Gambar 4.13. Kesamaan ini disebabkan bahwa asumsi yang digunakan dalam kasus ini adalah linear elastis, sehingga penambahan tegangan sebanding dengan penambahan regangan. Semakin dekat jarak H , maka regangan antara sisi lubang dan ujung retak semakin besar. Hal ini ditandai dengan menyatunya pola berwarna hijau terang antara ujung retak dengan sisi lubang.



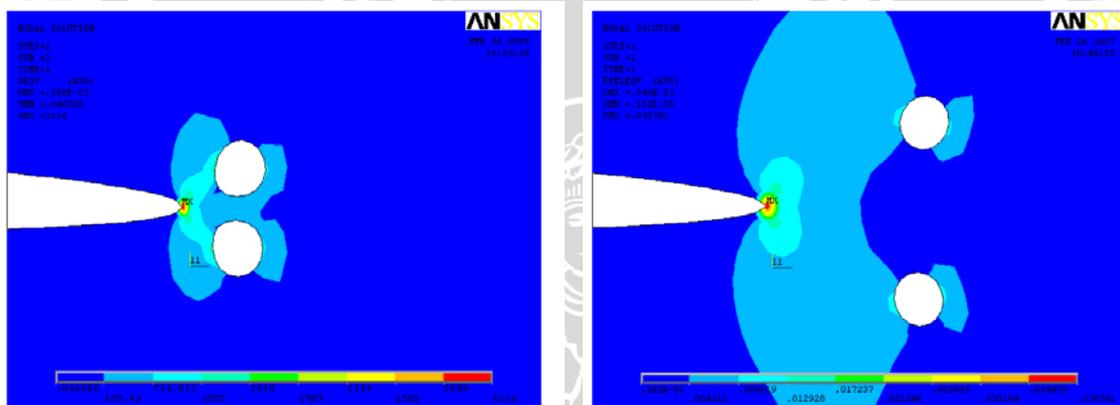
Gambar 4.13. Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan satu jumlah lubang

Pada konfigurasi dengan dua jumlah lubang, bertambahnya diameter lingkaran (D) dan berkurangnya jarak H dan B mengakibatkan nilai K_I meningkat. Jarak B atau H yang semakin dekat, menyebabkan interaksi yang lebih besar antara tegangan ujung retak dengan tegangan di sisi lubang. Interaksi tegangan yang terjadi pada konfigurasi ini cenderung meningkatkan nilai K_I . Fakta ini juga diwakili oleh harga B/D pada grafik hubungan $H—\beta$ dengan harga B/D yang semakin rendah dan jarak H yang semakin dekat akan meningkatkan nilai β . Nilai β yang tinggi mengindikasikan nilai K_I yang tinggi pula dengan nilai β selalu di atas 1 atau K_I selalu di atas K_0 . K_I tertinggi terjadi pada konfigurasi $D = 5 \text{ mm}—H = 1 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$ sebesar $63,67 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ atau pada $B/D = 0,2$ dengan nilai $\beta = 1,57$. Nilai K_I terendah terjadi pada konfigurasi $D = 1 \text{ mm}—H = 5 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$ yaitu sebesar $40,74 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ atau pada harga $B/D = 1$ dengan nilai $\beta = 1,0059$. Kenyataan ini menguatkan teori bahwa nilai K_I sangat ditentukan oleh faktor geometri. Pola distribusi tegangan ditampilkan dalam Gambar 4.14 dengan interaksi tegangan yang melibatkan ujung retak dan sisi lubang tampak pada pola biru muda. Interaksi tegangan ini akan semakin besar dengan ditandai menyatunya pola hijau terang antara ujung retak dan sisi lubang yang terjadi pada konfigurasi $H = 1 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$. Hal ini juga ditandai dengan adanya deformasi yang lebih nyata pada kedua lubang. Kondisi yang sama terjadi pada pola distribusi regangan yang ditampilkan pada Gambar 4.15 dengan regangan semakin besar saat lubang mendekati ujung retak.



(a) $D = 2 \text{ mm}$ — $H = 1 \text{ mm}$ — $B = 1 \text{ mm}$ (b) $D = 2 \text{ mm}$ — $H = 5 \text{ mm}$ — $B = 5 \text{ mm}$

Gambar 4.14. Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang

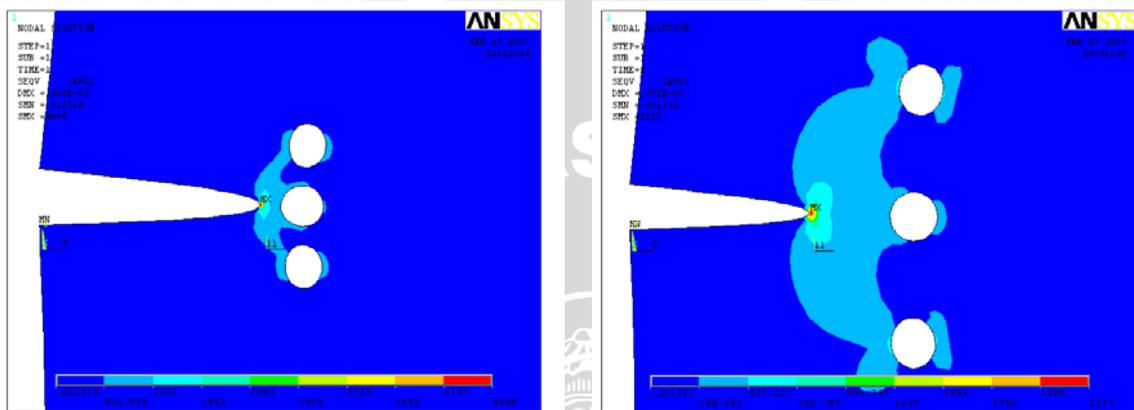


(a) $D = 2 \text{ mm}$ — $H = 1 \text{ mm}$ — $B = 1 \text{ mm}$ (b) $D = 2 \text{ mm}$ — $H = 5 \text{ mm}$ — $B = 5 \text{ mm}$

Gambar 4.15. Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang

Pada konfigurasi dengan tiga jumlah lubang, nilai K_I juga semakin meningkat dengan bertambahnya diameter (D) dan berkurangnya jarak H dan B . Hal ini juga ditunjukkan oleh harga B/D pada grafik hubungan H — β dengan nilai β akan semakin besar dengan harga B/D dan H yang kecil. Interaksi tegangan yang terjadi pada konfigurasi tiga jumlah lubang cenderung meningkatkan nilai K_I , bahkan jika dibandingkan dengan konfigurasi satu jumlah lubang dan konfigurasi dua jumlah lubang, nilai K_I konfigurasi dengan tiga jumlah lubang lebih tinggi pada masing-masing konfigurasi yang sama. Interaksi tegangan ini ditampilkan pada Gambar 4.16 dengan interaksi tegangan melibatkan tegangan di ujung retak dan ketiga sisi lubang. Konfigurasi tiga jumlah lubang sebenarnya pengembangan dari konfigurasi satu jumlah lubang. Adanya lubang atas dan bawah menyebabkan interaksi tegangan yang memberikan pengaruh pada peningkatan K_I . Selain itu, peningkatan ini juga menunjukkan bahwa penambahan lubang di depan ujung retak justru akan

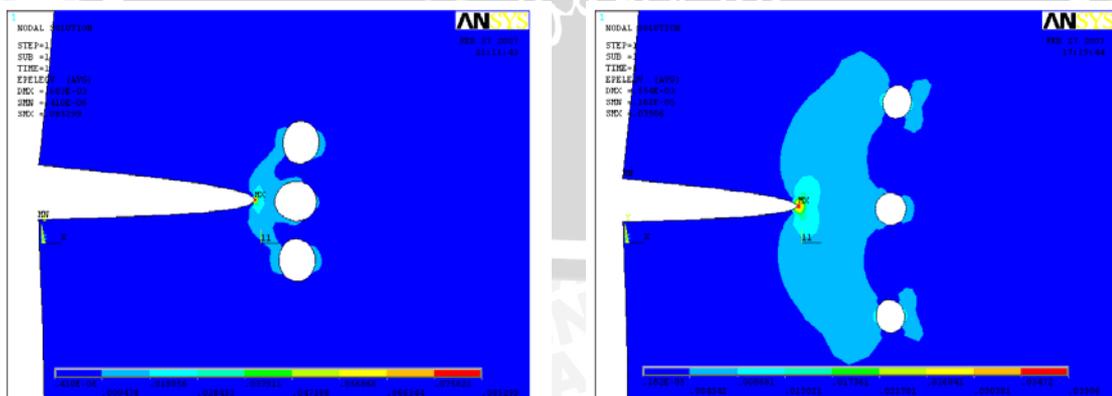
meningkatkan K_I . Nilai K_I pada konfigurasi tiga jumlah lubang selalu berada di atas K_0 atau nilai β selalu di atas 1. K_I tertinggi terjadi pada konfigurasi $D = 5 \text{ mm}$ — $H = 1 \text{ mm}$ — $B = 1 \text{ mm}$ sebesar $67,08 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ atau pada $B/D = 0,2$ dengan nilai $\beta = 1,66$. Nilai K_I ini menjadi nilai K_I yang paling tinggi di antara nilai K_I pada kasus dan konfigurasi yang lain. Nilai K_I terendah terjadi pada konfigurasi $D = 1 \text{ mm}$ — $H = 5 \text{ mm}$ — $B = 5 \text{ mm}$ yaitu sebesar $40,89 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ atau pada harga $B/D = 5$ dengan nilai $\beta = 1,0097$.



(a) $D = 2 \text{ mm}$ — $H = 1 \text{ mm}$ — $B = 1 \text{ mm}$ (b) $D = 2 \text{ mm}$ — $H = 5 \text{ mm}$ — $B = 5 \text{ mm}$

Gambar 4.16. Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang

Gambar 4.17 di bawah ini merupakan pola contoh distribusi regangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang yang memiliki pola yang sama dengan tegangan. Hal ini disebabkan asumsi yang digunakan adalah linier elastis, sehingga pertambahan tegangan sebanding dengan pertambahan regangan, karena itu pola regangannya sama dengan tegangan. Semakin mendekatnya lubang ke ujung retak, maka terjadi peningkatan regangan.



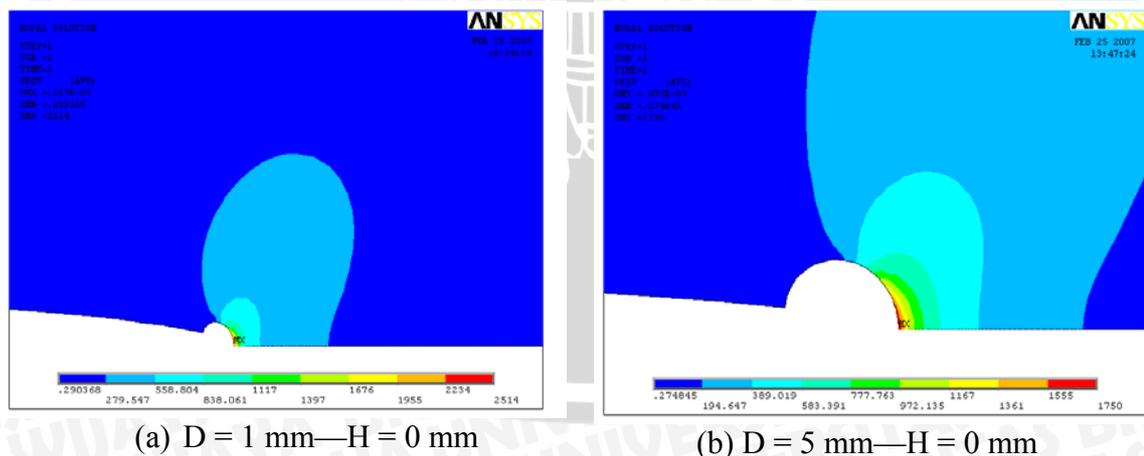
(a) $D = 2 \text{ mm}$ — $H = 1 \text{ mm}$ — $B = 1 \text{ mm}$ (b) $D = 2 \text{ mm}$ — $H = 5 \text{ mm}$ — $B = 5 \text{ mm}$

Gambar 4.17. Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang

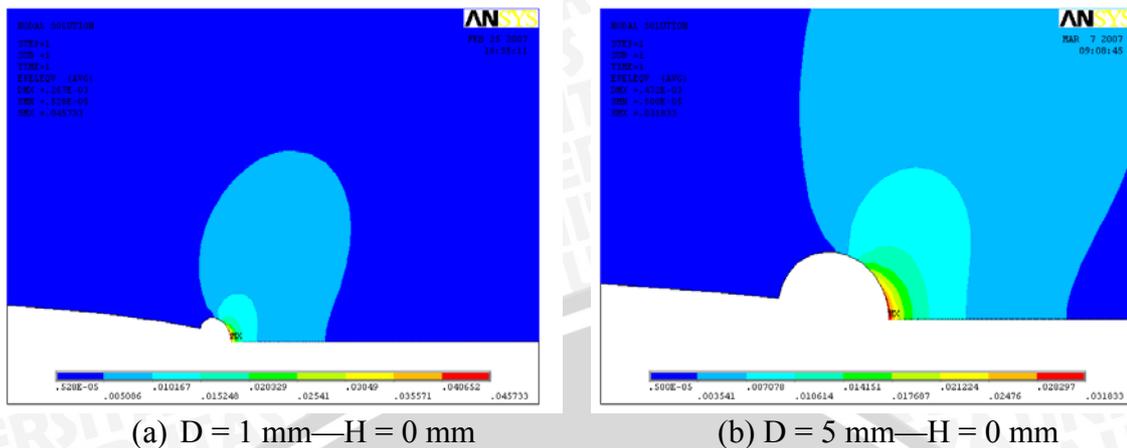
4.3.2 Konfigurasi Lubang di Ujung Retak ($H = 0$ mm)

Konfigurasi lubang pada saat $H = 0$ mm, nilai K_I terjadi penurunan yang sangat signifikan, kecuali pada kasus dua lubang. Pada konfigurasi dengan satu jumlah lubang dan tiga jumlah lubang, penurunan nilai K_I jauh di bawah K_0 atau nilai β di bawah 1. Hal ini berbeda dengan konfigurasi dengan dua jumlah lubang dengan nilai K_I masih berada di atas K_0 atau β di atas 1, namun memiliki dua kecenderungan yaitu pada konfigurasi tertentu nilai K_I mengalami peningkatan dan di konfigurasi yang lain mengalami penurunan.

Pada konfigurasi dengan satu jumlah lubang, penurunan nilai K_I yang signifikan disebabkan oleh berkurangnya konsentrasi tegangan di ujung retak yang disebabkan oleh hilangnya kelengkungan tajam ujung retak dan digantikan oleh kelengkungan sebuah lubang. Semakin besar diameter lubang, maka semakin berkurang nilai K_I . Hal ini wajar karena dengan bertambahnya diameter lubang, berarti kelengkungan ujung retak akan lebih lembut atau lebih landai. Nilai K_I tertinggi adalah $5,44 \cdot 10^{-2} \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ pada $D = 1$ mm dan nilai K_I terendah sebesar $7,36 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ pada $D = 5$ mm. Gambar 4.18 berikut ini merupakan contoh distribusi tegangan kasus satu lubang. Pada Gambar 4.18 konsentrasi tegangan terjadi pada sisi ujung retak dengan daerah distribusi tegangan semakin luas saat diameter (D) bertambah meskipun tegangan ujung retak berkurang. Regangan yang terjadi juga menunjukkan pola yang sama dengan pola tegangan yang menunjukkan bahwa besar regangan sebanding dengan besar tegangan. Contoh distribusi regangan ditampilkan dalam Gambar 4.19.



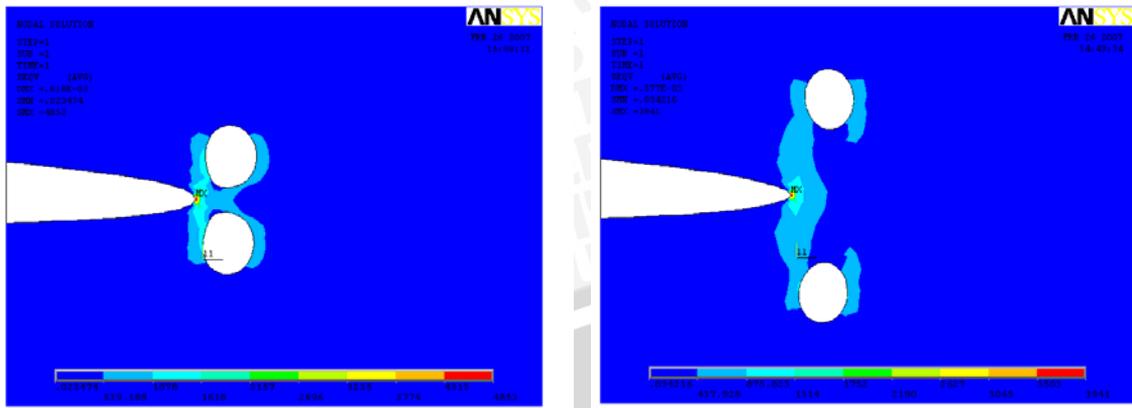
Gambar 4.18. Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan satu jumlah lubang



Gambar 4.19. Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan satu jumlah lubang

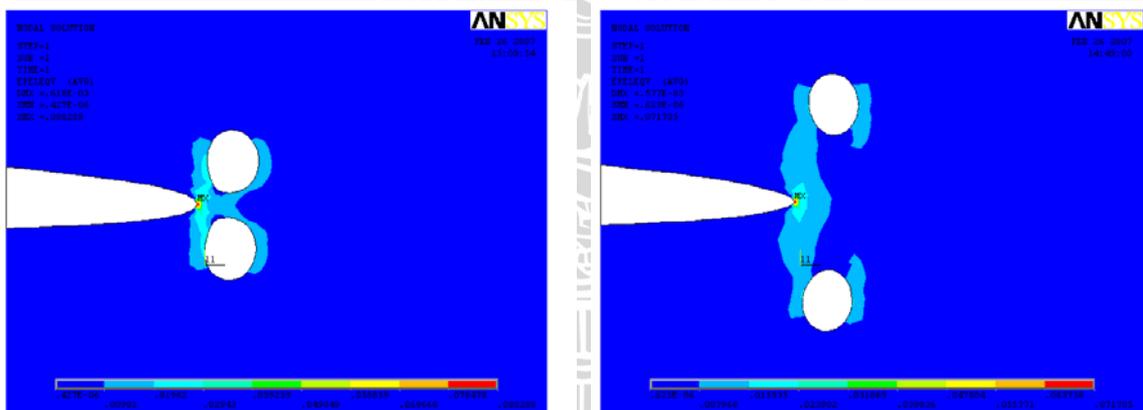
Pada konfigurasi dengan dua jumlah lubang, nilai K_I saat $H = 0$ mm masih berada di atas K_0 atau β di atas 1. Hal ini disebabkan kelengkungan tajam ujung retak masih ada sedangkan lubang hanya berada di atas atau di bawah ujung retak sehingga interaksi tegangan masih menghasilkan nilai K_I yang tinggi. Interaksi tegangan pada $H = 0$ mm dengan D yang semakin besar dan B yang semakin kecil menyebabkan nilai K_I menjadi sangat tinggi sehingga nilai β jauh di atas satu. Konfigurasi $D = 5$ mm— $H = 0$ mm— $B = 1$ mm memiliki nilai K_I yang paling tinggi jika dibandingkan dengan konfigurasi dua jumlah lubang yang lain, baik konfigurasi lubang di depan ujung retak atau di belakang ujung retak, yaitu sebesar $66,373 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ atau bernilai $\beta = 1,64$ pada harga $B/D = 0,2$. Secara umum, pada masing-masing diameter lubang saat $H = 0$ mm, konfigurasi lubang dengan $B = 1$ mm dan $B = 2$ mm memiliki nilai K_I yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan K_I pada konfigurasi lubang saat $H = 1$ mm. Pada $B = 3$ mm hingga $B = 5$ mm nilai K_I saat $H = 0$ mm lebih rendah dari pada nilai K_I pada konfigurasi lubang saat $H = 1$ mm.

Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang ditampilkan pada Gambar 4.20. Pada Gambar 4.20 tampak bahwa semakin dekat jarak antar lubang (B) interaksi tegangan semakin besar. Hal ini ditandai dengan menyatunya pola berwarna hijau terang pada sisi lubang yang mengindikasikan terjadinya peningkatan tegangan. Selain itu, terjadi deformasi yang lebih nyata pada lubang saat jarak B semakin dekat.

(a) $D = 2 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$ (b) $D = 2 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 5 \text{ mm}$

Gambar 4.20. Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang

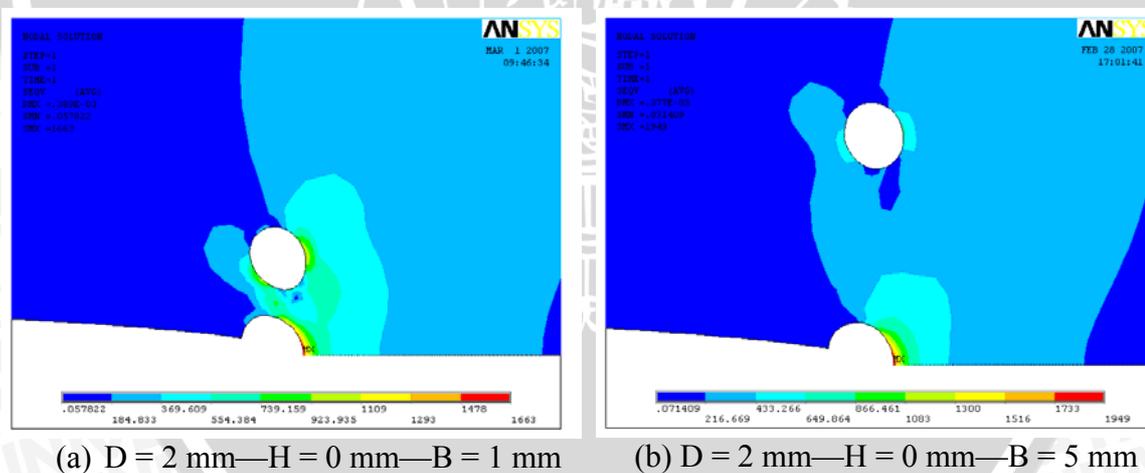
Gambar 4.21 merupakan contoh distribusi regangan konfigurasi dua jumlah lubang yang memiliki pola yang sama dengan distribusi tegangan. Semakin dekat jarak B, maka deformasi pada lubang tampak lebih nyata. Kesamaan ini disebabkan asumsi yang digunakan adalah linier elastis sehingga pertambahan tegangan sebanding dengan regangan.

(a) $D = 2 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$ (b) $D = 2 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 5 \text{ mm}$

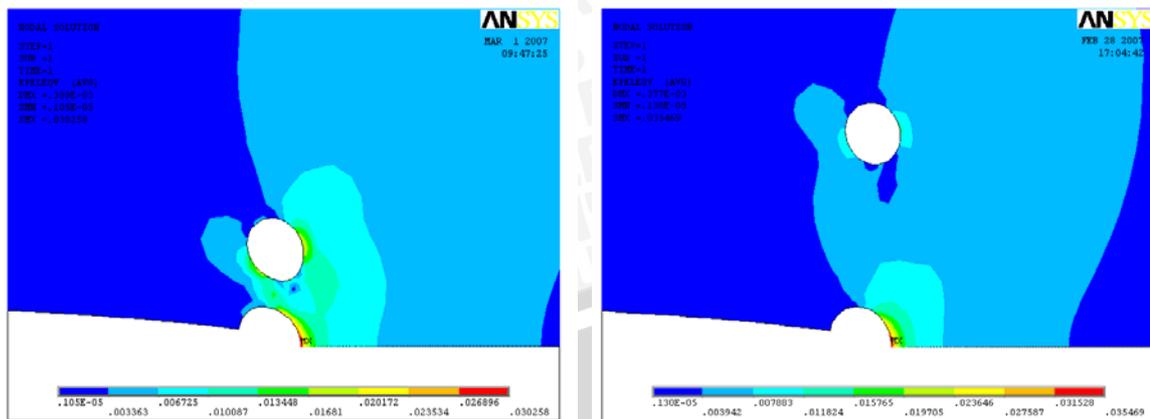
Gambar 4.21. Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang

Pada konfigurasi dengan tiga jumlah lubang, nilai K_I berada jauh di bawah K_0 atau nilai β jauh di bawah 1. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya konsentrasi tegangan akibat hilangnya kelengkungan tajam ujung retak digantikan dengan kelengkungan sebuah lubang. Pada konfigurasi lubang dengan D yang semakin besar dan jarak B yang semakin kecil, K_I akan bernilai terendah dan merupakan nilai K_I yang paling rendah di antara nilai K_I pada konfigurasi jumlah lubang yang lain. Nilai K_I terendah ini terjadi pada konfigurasi $D = 5 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$, yaitu sebesar

$5,55 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ atau dengan nilai $\beta = 1,37 \cdot 10^{-4}$ pada perbandingan $B/D = 0,2$. Nilai K_I tertinggi dalam konfigurasi tiga jumlah lubang terjadi pada konfigurasi $D = 1 \text{ mm}$ — $H = 0 \text{ mm}$ — $B = 5 \text{ mm}$ sebesar $5,64 \cdot 10^{-2} \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ atau $\beta = 1,32 \cdot 10^{-2}$ pada harga $B/D = 5$. Konfigurasi dengan tiga jumlah lubang sebenarnya identik dengan konfigurasi satu jumlah lubang dengan tambahan satu lubang di bagian atas dan di bagian bawah. Adanya lubang di bagian atas dan bawah memberikan pengaruh pada nilai K_I . Interaksi tegangan yang melibatkan lubang di bagian atas dan bawah menjadikan nilai K_I cenderung lebih rendah dibandingkan dengan konfigurasi satu jumlah lubang, terutama dengan berkurangnya jarak B dan bertambahnya diameter lubang (D). Gambar 4.22 adalah contoh distribusi tegangan konfigurasi tiga jumlah lubang. Pada Gambar 4.22, semakin dekat jarak B maka interaksi tegangan semakin besar. Hal ini terlihat dari menyatunya pola berwarna hijau dan hijau terang yang menandakan terjadi peningkatan tegangan pada sisi lubang. Selain itu, akibat dari interaksi yang semakin besar, lubang semakin terdeformasi dan daerah distribusi tegangan semakin luas. Distribusi regangan ditampilkan pada gambar 4.22. Pola distribusi regangan identik dengan distribusi tegangan dengan semakin dekat jarak B maka regangan semakin besar dan deformasi lubang semakin nyata.



Gambar 4.22. Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang

(a) $D = 2 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$ (b) $D = 2 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 5 \text{ mm}$

Gambar 4.23. Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang

4.3.3 Konfigurasi Lubang di Belakang Ujung Retak

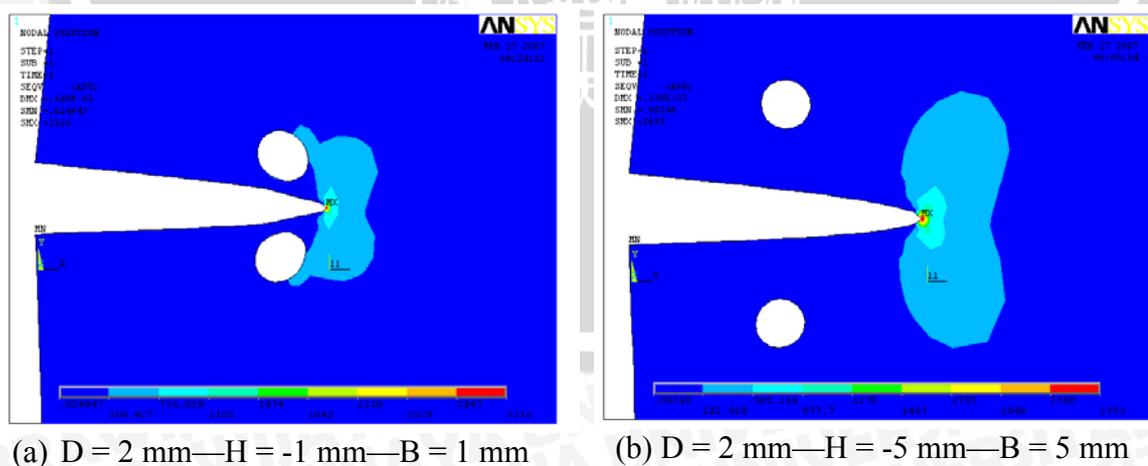
Perilaku K_I untuk konfigurasi lubang di belakang ujung retak menunjukkan kecenderungan selalu berada di bawah K_0 atau nilai β selalu di bawah 1. Kondisi ini terjadi baik pada konfigurasi dua jumlah lubang dan tiga jumlah lubang. Semakin dekat lubang ke ujung retak (H) dan jarak antar lubang (B), serta diameter lubang (D) yang semakin besar, nilai K_I akan semakin rendah.

Pada konfigurasi dengan satu jumlah lubang, perhitungan nilai K_I untuk konfigurasi lubang di belakang ujung retak tidak dilakukan. Hal-hal yang menjadi alasan adalah sebagai berikut. Konfigurasi satu jumlah lubang yang berada di belakang ujung retak yang di modelkan dalam skripsi ini akan identik dengan retak yang muncul dari lubang (*crack emanating from hole*). Perilaku *crack emanating from hole* jika panjang retak lebih rendah $0,13r$ dengan r adalah radius lubang, maka akan berperilaku sebagai retak pendek (*short crack*). Pada kasus retak pendek, nilai K_I tidak bisa diselesaikan dengan persamaan biasa. Jika panjang retak lebih besar dari $0,13r$, maka retak berperilaku sebagai retak panjang (*long crack*) dan lubang menjadi bagian dari retak itu sendiri. K_I retak panjang dapat ditentukan dengan persamaan biasa, yaitu

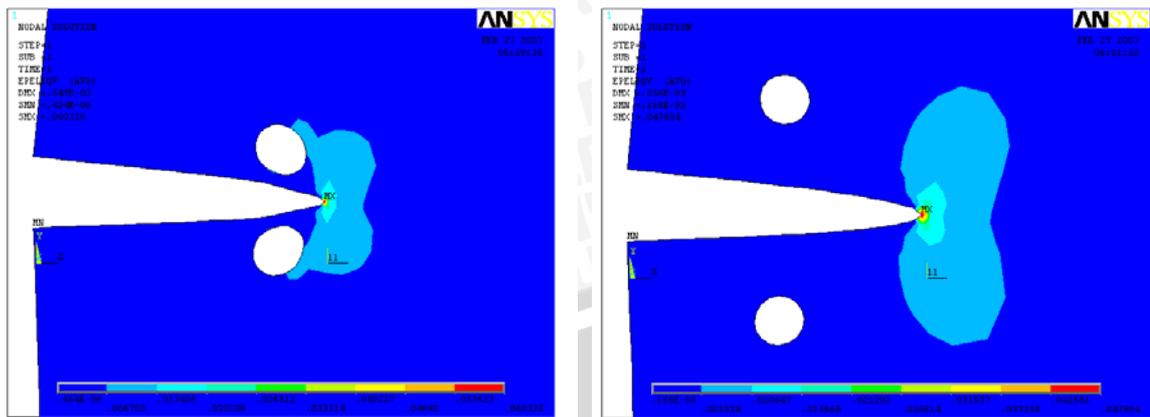
$$\sigma\sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$
 (Bannantine, 1999:92). Oleh karenanya, K_I konfigurasi satu jumlah lubang di belakang ujung retak akan bernilai sama dengan K ujung retak tanpa lubang (K_0). Pada skripsi ini, konfigurasi lubang di belakang ujung retak memiliki panjang retak yang lebih besar dari $0,13r$ sehingga lubang menjadi bagian dari retak itu sendiri dan

retak dapat diasumsikan sebagai retak panjang. K_I akan bernilai sama dengan nilai K tanpa adanya lubang (K_0), yaitu sebesar $40,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Nilai K_I untuk konfigurasi dua jumlah lubang selalu berada di bawah K_0 atau β di bawah 1. Nilai K_I akan semakin kecil pada konfigurasi lubang dengan D yang semakin besar serta jarak H dan B yang semakin kecil. Interaksi tegangan yang terjadi pada konfigurasi ini menyebabkan nilai K_I terendah. Semakin kecil diameter lubang (D) dan semakin jauh jarak H dan B , nilai K_I cenderung meningkat meskipun masih berada di bawah K_0 . Nilai K_I terendah terjadi ada konfigurasi $D = 5 \text{ mm}$ — $H = -1 \text{ mm}$ — $B = 1 \text{ mm}$ sebesar $28,19 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ atau $\beta = 0,696$ untuk harga $B/D = 0,2$. Contoh distribusi tegangan ditampilkan dalam Gambar 4.23. Pada Gambar 4.23 interaksi tegangan semakin besar saat lubang semakin dekat dengan ujung retak yang ditandai dengan menyatunya pola berwarna biru muda mulai dari ujung retak hingga sisi lubang. Akibat besarnya interaksi tegangan, deformasi lubang makin nyata. Interaksi tegangan pada konfigurasi ini cenderung menurunkan nilai K_I . Pada konfigurasi dengan jarak yang makin jauh di belakang ujung retak, tidak terjadi pemusatan tegangan di sisi-sisi lubang dan lubang cenderung tidak mengalami deformasi. Interaksi tegangan yang melibatkan tegangan di ujung retak dan tegangan di sisi-sisi lubang juga tidak terjadi. Kondisi ini cenderung meningkatkan nilai K_I . Gambar 4.24 merupakan contoh distribusi regangan yang memiliki pola yang sama dengan tegangan. Hal ini disebabkan asumsi yang digunakan adalah linier elastis sehingga pertambahan tegangan sebanding dengan regangan. Regangan makin besar dan deformasi lubang tampak nyata saat jarak lubang B semakin kecil dan dekat dengan ujung retak.

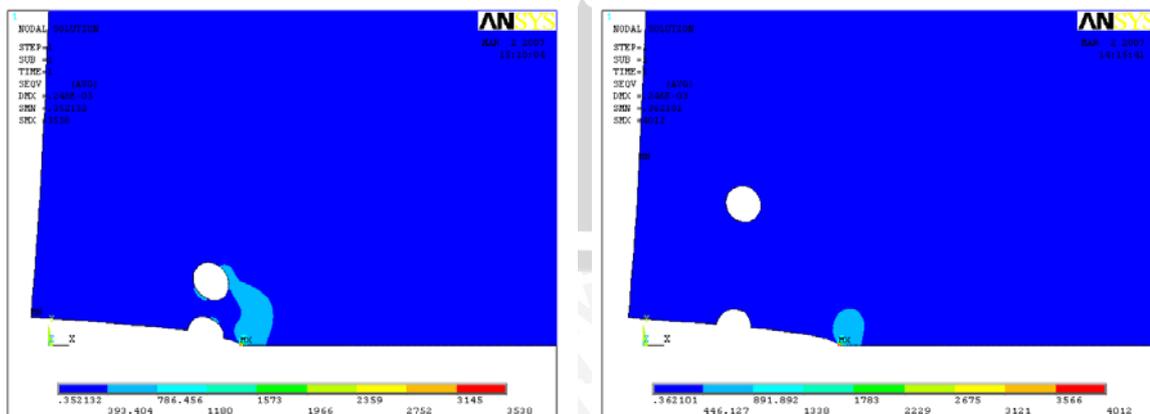


Gambar 4.24. Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang

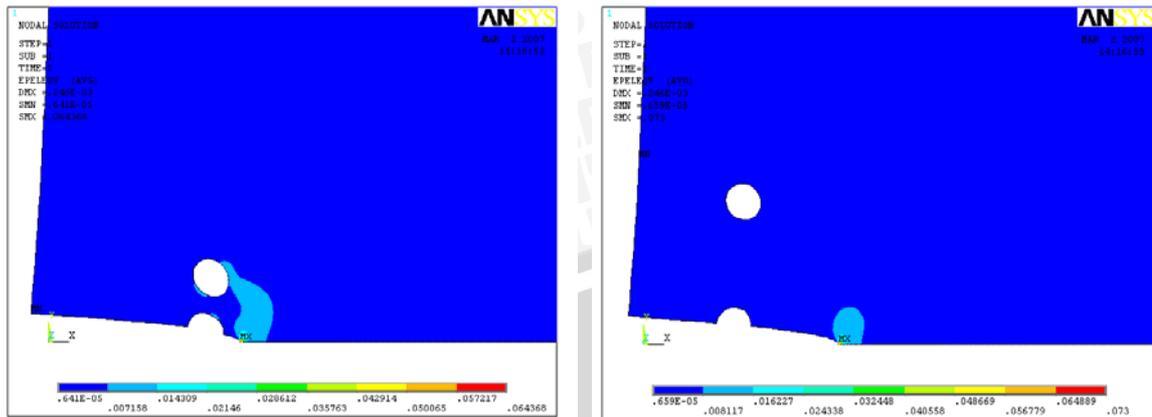
(a) $D = 2 \text{ mm}—H = -1 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$ (b) $D = 2 \text{ mm}—H = -5 \text{ mm}—B = 5 \text{ mm}$

Gambar 4.25. Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang

Pada konfigurasi tiga jumlah lubang, bertambahnya D dan berkurangnya jarak H dan B , interaksi tegangan menyebabkan nilai K_I akan semakin rendah, namun masih lebih tinggi dibandingkan nilai K_I konfigurasi dua jumlah lubang. Konfigurasi $D = 5 \text{ mm}—H = -1—B = 1 \text{ mm}$ adalah konfigurasi dengan nilai K_I terendah, yaitu $31,45 \text{ MPa.m}^{1/2}$ atau $\beta = 0,78$ pada harga $B/D = 0,2$. Konfigurasi dengan D yang kecil dengan jarak H dan B yang semakin jauh di belakang ujung retak maka nilai K_I akan semakin meningkat, tetapi masih berada di bawah K_0 . Gambar 4.25 merupakan contoh distribusi tegangan yang menunjukkan bahwa dengan semakin dekat jarak B dan H interaksi akan semakin besar dan deformasi pada lubang akan semakin nyata. Semakin jauh dari ujung retak, tidak terdapat pemusatan tegangan pada sisi lubang dan deformasi cenderung tidak terjadi. Kondisi ini cenderung meningkatkan nilai K_I . Lubang tengah menjadi bagian dari retak itu sendiri. Gambar 4.26 merupakan contoh distribusi regangan yang terjadi yang memiliki pola yang sama dengan pola tegangan.

(a) $D = 2 \text{ mm}—H = -1 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$ (b) $D = 2 \text{ mm}—H = -5 \text{ mm}—B = 5 \text{ mm}$

Gambar 4.26. Contoh plot tegangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang



(c) $D = 2 \text{ mm}$ — $H = -1 \text{ mm}$ — $B = 1 \text{ mm}$ (b) $D = 2 \text{ mm}$ — $H = -5 \text{ mm}$ — $B = 5 \text{ mm}$

Gambar 4.27. Contoh plot regangan konfigurasi dengan tiga jumlah lubang

Pada dasarnya, metode *crack retardation* adalah menurunkan nilai K_I sehingga berada di bawah nilai K_0 karena dengan demikian laju perambatan retak akan semakin rendah. Berdasar subbab 4.2, dapat diketahui konfigurasi-konfigurasi yang dapat meningkatkan atau menurunkan nilai K_I . Secara umum, laju perambatan retak semakin tinggi saat lubang berada di daerah depan ujung retak, baik pada satu, dua, atau tiga jumlah lubang sehingga kondisi ini justru akan membahayakan struktur yang mengalami retakan.

Konfigurasi lubang pada ujung retak ($H = 0 \text{ mm}$) dan daerah di belakang ujung retak menghasilkan nilai K_I yang lebih rendah dari K_0 . Di antara keduanya, metode *crack retardation* yang paling baik adalah dengan menempatkan lubang di ujung retak. Pada $H = 0 \text{ mm}$, nilai K_I jauh berada di bawah K_0 yang memberikan gambaran bahwa laju perambatan retak akan semakin rendah. Konfigurasi lubang dengan satu jumlah lubang atau tiga jumlah lubang dapat dijadikan pilihan, dengan nilai K_I konfigurasi dengan tiga jumlah lubang lebih rendah dibandingkan dengan satu jumlah lubang. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi dengan tiga jumlah lubang lebih mampu untuk menghambat laju perambatan retak. Konfigurasi $D = 5 \text{ mm}$ dengan jarak $B = 1 \text{ mm}$ bernilai K_I paling rendah yang memberikan informasi bahwa laju perambatan retak akan terhambat dengan lebih baik atau laju perambatan retak akan lebih lambat.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasar perhitungan dan analisis faktor intensitas tegangan ujung retak (K_I) yang dipengaruhi oleh lubang di sekitar ujung retak dapat disimpulkan bahwa konfigurasi lubang dengan variasi diameter (D), jarak lubang dengan ujung retak (H), dan jarak antar lubang (B) masing-masing mempengaruhi nilai K_I di mana nilai K_I tertinggi terjadi pada konfigurasi dengan tiga jumlah lubang dengan konfigurasi $D = 5$ mm— $H = 1$ mm— $B = 1$ mm sebesar $67,078 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, sedangkan nilai K_I terendah terjadi pada konfigurasi dengan tiga jumlah lubang dengan konfigurasi $D = 5$ mm— $H = 0$ mm— $B = 1$ mm sebesar $5,55 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan pengkajian lebih lanjut tentang laju perambatan retak.
2. Perlu dilakukan perhitungan dengan mempertimbangkan kondisi material, seperti suhu bahan serta kondisi lingkungan sekitar seperti adanya pengaruh korosi terhadap K_I .

DAFTAR PUSTAKA

ANSYS Realease 9.0 Documentation

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

Broek, David. 1978. *Elementary Enggineering Fracture Mechanics*. Alphen aan den Rijn: Sijthoff & Noordhoff International Publisher B.V.

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

Dally, James W and William F. Riley. 1991. *Experimental Stress Analysis*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.

Hertzberg, Richard W. 1989. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Material*. Singapore: John Wiley and Sons.

Moaveni, Saeed. 1999. *The Finite Element Analysis—Theory and Application with ANSYS*. New Jersey: Prentice—Hall, Inc.

Owe, D.R.J. dan Fawkes, A.J. 1983. *Eengineering Fracture Mechanics Numerical Methods and Application*. Swansea: Pineridge Press, Ltd.

Phan, A.V. 2005. *ANSYS Tutorial 2D Fracture Analysis*. Alabama: University of Alabama.

Rolfe, Stanley T. and John M. Barsom. 1977. *Fracture and Fatigue Control in Structure—Application of Fracture Mechanics*. New Jersey: Prentice—Hall, Inc.

Rooke, D.P and D.J. Cartwright. 1976. *Copendium of Sress Intensity Factors*. London: The Hillingdon Press

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

Syah, Helmy Z. 2006. "Analisa Faktor Intensitas Tegangan untuk Kasus Multiple Site Damage terhadap Konfigurasi Straight Shank Hole," *Skripsi Tidak Diterbitkan*. Malang: Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya, 2006.

Vulic, Naned.; Stejan Jecic; Vastroslav Grubisic. 1997. "Validation of Crack Arrest Tachnique by Numerical modelling," *International Journal Fatigue Volume 19 No. 4 pp. 283-291*. Inggris Raya: Elsevier Science Ltd.

www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/fracture_mechanics

www.utm.edu/department/engin/lemaster/MachineDesign