

EVALUASI FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN PADA UJUNG RETAK DENGAN LUBANG PENGHAMBAR RAMBAT RETAK

Anindito Purnowidodo

Teknik Mesin, Universitas Brawijaya

Jl. MT. Haryono 167 Malang 65145

Tlp: 0341- 571147

E-mail : Anindito@ub.ac.id

Abstract

The evaluation of stress intensity factors in the crack tip interacting with stoping hole of crack growth was conducted by computer simulation, and this was carried out on vareid configuration of stoping hole. The results of the simulation show that the position and zise of stoping hole affect the magnitude of the stress intensity factor. The main cause of the fluctuation of the stress intensity factor is that the stoping hole configuration affects the interaction of stress in the vicinity of crack tip.

Keywords : Hole Configuration, Stress Interaction, Stress Intensity Factors

PENDAHULUAN

Berbagai metode untuk menghambat perambatan retak (*crack retardation*) telah banyak dikembangkan. Salah satunya adalah pemanfaatan lubang, yaitu dengan cara pembuatan lubang disekitar ujung retak [1, 2] dan pengeboran sepasang lubang di sisi ujung retak (*crack-flank holes*) [3].

Vulic [2] 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

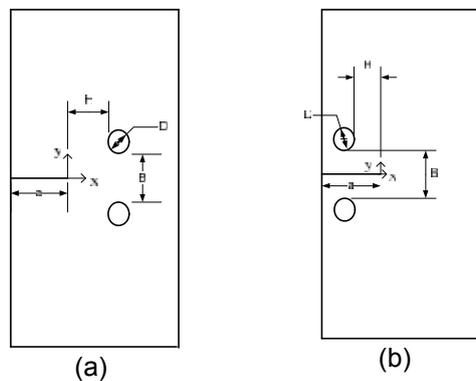
tersebut adalah pengeboran sepasang lubang pada sisi ujung retak [3]. Shin melakukan analisis efek pengeboran sepasang lubang di sisi dan depan ujung retak terhadap laju retak [3]. Pengujian dilakukan dengan dua variasi diameter lubang serta dua variasi jarak lubang di sisi ujung retak dan di depan ujung 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, karena dengan para meter ini dapat diketahui apakah suatu konfigurasi retak pada suatu komponen akan mudah merambat atau tidak. Semakin besar harga K , maka retak tersebut akan mudah merambat [4]. 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 ini menjadi landasan bahwa diperlukan studi lebih lanjut tentang pengaruh konfigurasi lubang di sekitar ujung retak terhadap faktor intensitas tegangan ujung retak dengan menggunakan konsep *Linier 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.



Gambar 1. Konfigurasi retak dan definisi D , H dan B

METODE PENELITIAN

Penelitian dalam studi ini menggunakan metode simulasi komputer dengan bantuan *software* yang berbasis metode elemen hingga, yaitu program ANSYS. 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.

Dalam studi ini material yang digunakan adalah Aluminum 2024-T3 dengan sifat-sifat mekanik sebagai berikut :

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

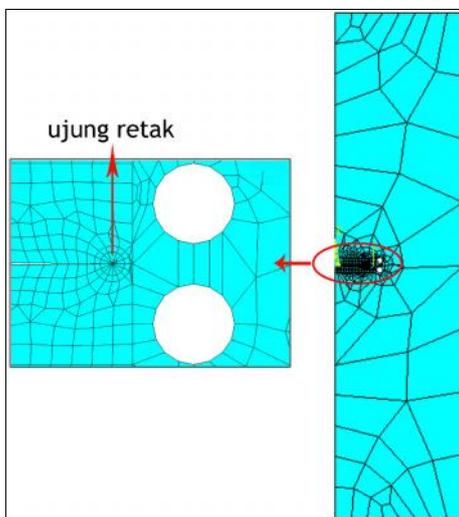
Specimen yang digunakan adalah jenis retak sisi (*edge cracked specimen*), Gambar 1 menunjukkan ukuran specimen, konfigurasi retak terhadap lubang dan definisi D , H dan B . Karena dalam simulasi ini kondisi tegangannya diasumsikan *plain stress*, maka ketebalan dapat diabaikan atau konstan. Selanjutnya specimen diberi beban atau tegangan nominal tarik (σ) sebesar 125 MPa .

Variasi konfigurasi lubang yang digunakan untuk mengetahui pengaruhnya

terhadap stress intensitas factor pada daerah disekitar ujung retak adalah sebagai berikut;

- Konfigurasi lubang
Konfigurasi lubang adalah sebaris dengan variasi diameter lubang (D), jarak lubang dengan ujung retak (H), dan jarak antar lubang (B). Berikut ini nilai D , H , dan B .
- Diameter lubang, D :
 $D_1 = 1 \text{ mm}$ $D_4 = 4 \text{ mm}$
 $D_2 = 2 \text{ mm}$ $D_5 = 5 \text{ mm}$
 $D_3 = 3 \text{ mm}$
- Jarak lubang dari ujung retak (arah horisontal), H :
 $H_1 = 1 \text{ mm}$ $H_6 = 0 \text{ mm}$ $H_{11} = -5 \text{ mm}$
 $H_2 = 2 \text{ mm}$ $H_7 = -1 \text{ mm}$
 $H_3 = 3 \text{ mm}$ $H_8 = -2 \text{ mm}$
 $H_4 = 4 \text{ mm}$ $H_9 = -3 \text{ mm}$
 $H_5 = 5 \text{ mm}$ $H_{10} = -4 \text{ mm}$
- Jarak antar lubang (arah vertikal), B :
 $B_1 = 1 \text{ mm}$ $B_3 = 3 \text{ mm}$ $B_5 = 5 \text{ mm}$
 $B_2 = 2 \text{ mm}$ $B_4 = 4 \text{ mm}$

Pemodelan spesimen dilakukan dengan menggunakan pemodelan satu bagian, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Pemodelan pada simulasi ini menggunakan *meshing* otomatis. Jenis elemen yang digunakan adalah isoparametrik quadrilateral 8 node.



Gambar 2. Pemodelan satu bagian

HASIL PERHITUNGAN

Faktor intensitas tegangan ujung retak pada konfigurasi dengan lubang (K_I) ini dibandingkan dengan faktor intensitas

tegangan ujung retak tanpa lubang (K_0). Perbandingan ini akan memberikan informasi tentang pengaruh konfigurasi lubang terhadap K_I . Rumus analitis perhitungan faktor intensitas tegangan pada *single edge crack specimen* tanpa lubang (K_0) adalah seperti berikut [5].

$$K_0 = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \tag{1}$$

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

Harga untuk σ (tegangan nominal) = 125 Mpa., a (panjang retak) = 12 mm dan W (lebar spesimen) = 40 mm. Perbandingan faktor intensitas tegangan ujung retak konfigurasi pada dua jumlah lubang (K_I) dan faktor intensitas tegangan ujung retak tanpa lubang (K_0) dinyatakan dengan β , dengan nilai β adalah sebagai berikut.

$$\beta = \frac{K_I}{K_0} \tag{2}$$

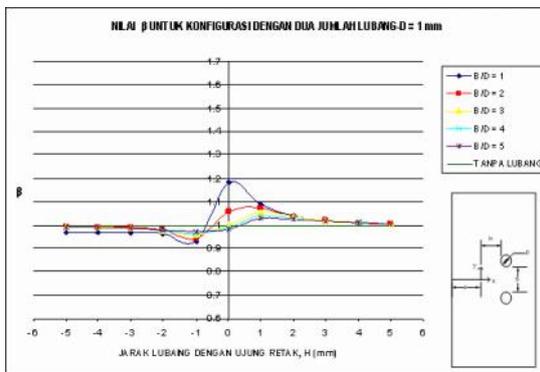
Pada Gambar 3, grafik memiliki ciri umum yaitu K_I bernilai di atas satu pada lubang berjarak $H = 0 \text{ mm}$ dan di depan ujung retak kecuali pada $D = 1 \text{ mm}$. Konfigurasi $D = 1 \text{ mm}$ dengan $B/D = 4$ dan $B/D = 5$ masing-masing bernilai 0.991481 dan 0.984963. Hal ini disebabkan oleh 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.

PEMBAHASAN

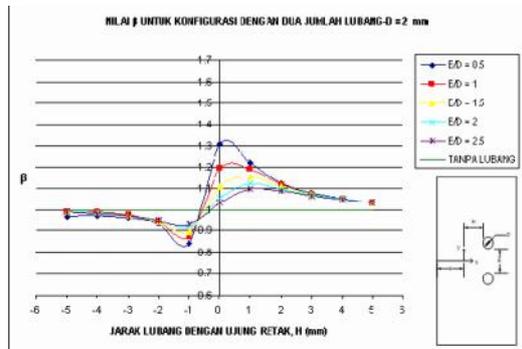
Dari hasil simulasi diketahui bahwa variasi nilai faktor intensitas tegangan ujung retak (K_I) yang disebabkan oleh adanya konfigurasi lubang menunjukkan bahwa faktor intensitas tegangan sangat dipengaruhi oleh faktor geometri. Adanya lubang di sekitar ujung retak menunjukkan adanya perubahan geometri 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

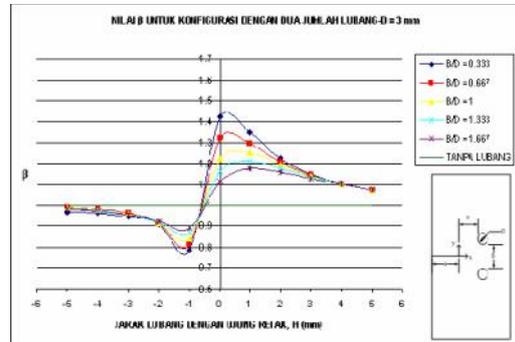
melibatkan tegangan di ujung retak dan sisi lubang tersebut. Interaksi tegangan ini pada akhirnya mempengaruhi besar kecilnya nilai K_I . Pada daerah di depan ujung retak nilai K_I semakin meningkat dan selalu di atas nilai K_0 . Peningkatan ini terjadi hingga $H = 1$ mm. Pada daerah di belakang ujung 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 .



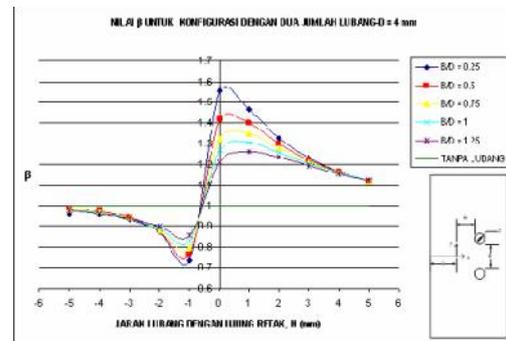
Gambar 3 (a). Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang $D = 1$ mm



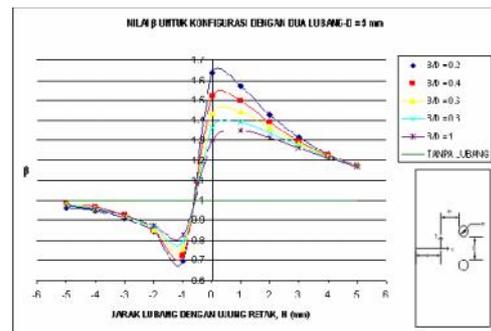
(b). Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang $D = 2$ mm



(c). Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang $D = 3$ mm



(d). Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang $D = 4$ mm

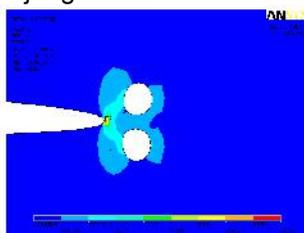


(e). Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang $D = 5$ mm

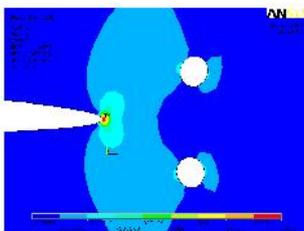
Gambar 3. Grafik $H-\beta$ untuk konfigurasi dengan dua jumlah lubang dengan masing-masing nilai D .

Konfigurasi Lubang di Depan Ujung Retak

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 . Nilai β yang tinggi mengindikasikan nilai K_I yang tinggi pula dengan nilai β selalu diatas 1 atau K_I selalu di atas K_o . 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 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 5 dengan regangan semakin besar saat lubang mendekati ujung retak.

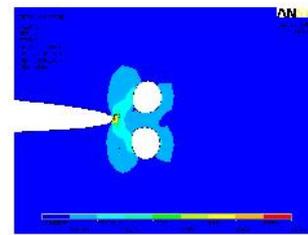


(a). $D = 2 \text{ mm}—H = 1 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$

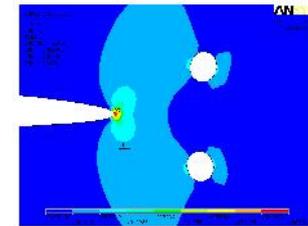


(b) $D = 2 \text{ mm}—H = 5 \text{ mm}—B = 5 \text{ mm}$

Gambar 4. 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 5. Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang

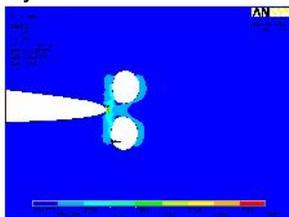
Konfigurasi Lubang di Ujung Retak ($H = 0 \text{ mm}$)

Konfigurasi lubang pada saat $H = 0 \text{ mm}$, 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_o atau nilai β di bawah 1. Hal ini berbeda dengan konfigurasi dengan dua jumlah lubang dengan nilai K_I masih berada di atas K_o 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.

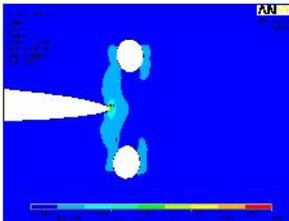
Pada konfigurasi dengan dua jumlah lubang, nilai K_I saat $H = 0 \text{ mm}$ masih berada di atas K_o atau β di atas 1. Hal ini disebabkan kelengkungan tajam ujung retak masih ada sedangkan lubang hanya berada di atas atau di bawah ujung retak sehingga interaksi tegangan masih menghasilkan nilai K_I yang tinggi. Interaksi tegangan pada $H = 0 \text{ mm}$ 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 $D = 5 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$ 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 $H = 0 \text{ mm}$, konfigurasi lubang dengan $B = 1 \text{ mm}$ dan $B = 2 \text{ mm}$ memiliki nilai K_I yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan K_I pada konfigurasi lubang saat $H = 1 \text{ mm}$. Pada $B = 3 \text{ mm}$ hingga $B = 5 \text{ mm}$ nilai K_I saat $H = 0 \text{ mm}$ lebih rendah dari pada nilai K_I pada konfigurasi lubang saat $H = 1 \text{ mm}$.

Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang ditampilkan pada Gambar 6. Pada Gambar 6 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.



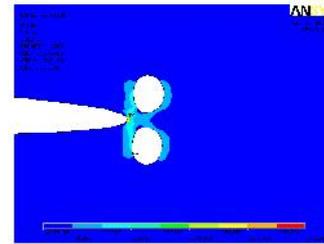
(a) $D = 2 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$



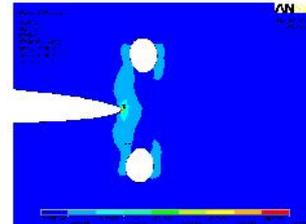
(b) $D = 2 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 5 \text{ mm}$

Gambar 6. Contoh distribusi tegangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang

Gambar 7 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) $D = 2 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$



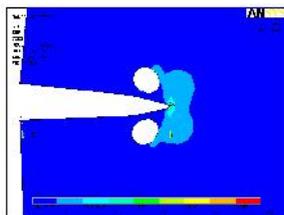
(b) $D = 2 \text{ mm}—H = 0 \text{ mm}—B = 5 \text{ mm}$

Gambar 7. Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan dua jumlah lubang

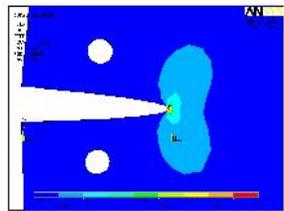
Konfigurasi Lubang di Belakang Ujung Retak

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 8. Pada Gambar 8 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 9 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 doeformasi lubang tampak nyata saat jarak lubang B semakin kecil dan dekat dengan ujung retak.

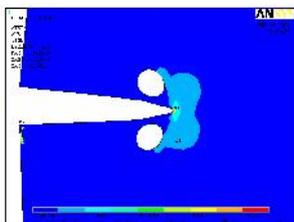


(a) $D = 2 \text{ mm}—H = -1 \text{ mm}—B = 1 \text{ mm}$

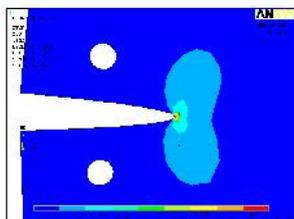


(b) $D = 2 \text{ mm}—H = -5 \text{ mm}—B = 5 \text{ mm}$

Gambar 8. 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 9. Contoh distribusi regangan konfigurasi dengan dua 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. Secara umum, laju perambatan retak semakin tinggi saat lubang berada di daerah depan ujung retak, 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.

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 .

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. P.S. Song, Y.L. Shieh, 2004, "Stop drilling procedure for fatigue life improvement", *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, 1333–1339.
- [2]. Vulic, Naned, Stejpan Jecic; Vastroslav Grubisic, 1997, "Validation of Crack Arrest Technique by Numerical modelling", *International Journal Fatigue Volume 19 No. 4 pp. 283-291*.
- [3]. 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*.
- [4]. Rooke, D.P and D.J. Cartwright. 1976. *Copendium of Sress Intensity Factors*. London: The Hillingdon Press
- [5]. Bannantine, Julie A; Jess J. Comer; James L. Handrock. 1990. *Fundamental of Metal Fatigue Analysis*. New Jersey: Prentice—Hall, Inc.