

# PENGUKURAN FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN DENGAN MENGGUNAKAN STRAIN GAGE

Djoko Suharto, Nanang Nazaruddin

Jurusan Teknik Mesin  
Institut Teknologi Bandung

Husaini

Jurusan Teknik Mesin  
Universitas Syah Kuala

## ABSTRAK

Penentuan faktor intensitas tegangan dapat dilakukan dengan beberapa metoda, antara lain metoda analitik, numerik maupun eksperimental. Dalam penelitian ini dilakukan percobaan penggunaan strain gage tunggal (*single strain gage*) untuk pengukuran faktor intensitas tegangan,  $K_I$  dan ketangguhan inisiasi retak,  $K_{Iq}$ . Dari penelitian ini diperoleh cara untuk menentukan orientasi, lokasi dan ukuran strain gage yang menjadi dasar penelitian lanjutan dalam penentuan faktor intensitas tegangan pada fenomena retak cepat (*fast fracture*) dan retak lelah.

## 1. PENDAHULUAN

Penggunaan strain gage untuk pengukuran factor intensitas tegangan  $K_I$  sebenarnya telah dikenal sejak tahun 1957 (Irwin, 1957). Akan tetapi dalam perkembangannya hingga kini, pengukuran  $K_I$  dengan menggunakan strain gage masih jarang dilakukan. Hal ini disebabkan karena pengukuran  $K_I$  dengan menggunakan strain gage sering memberikan hasil yang kurang memuaskan karena adanya faktor-faktor kesalahan. Faktor-faktor kesalahan tersebut meliputi faktor kesalahan akibat gradien regangan (*strain gradient error*), efek peluluhan setempat (*local yielding*) dan faktor kesalahan penentuan daerah untuk menempelkan strain gage di sekitar ujung retak (Dally dan Sanford, 1987; Dally dan Riley, 1991). Dengan diketahuinya pengaruh-pengaruh dari faktor kesalahan tersebut diharapkan dapat diperoleh suatu cara atau batasan khusus tertentu agar pengaruh faktor-faktor kesalahan tersebut dapat diperkecil.

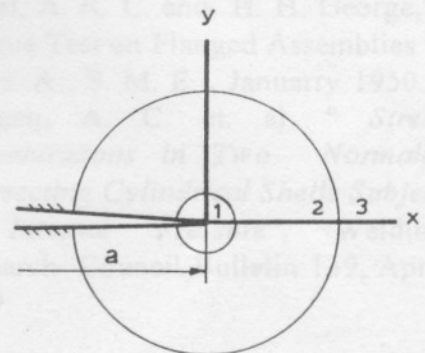
Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian penggunaan strain gage tunggal untuk pengukuran faktor intensitas tegangan,  $K_I$  dan ketangguhan inisiasi retakan,  $K_{Iq}$ . Ketangguhan inisiasi retak,  $K_{Iq}$  merupakan suatu sifat bahan yang dapat digunakan untuk menggambarkan ketangguhan (*toughness*) retak pada bahan apabila ujung retaknya tumpul (memiliki radius tertentu). Selanjutnya untuk menyederhanakan analisis yang diperlukan, maka percobaan yang dilakukan disini dibatasi hanya untuk jenis retakan yang menembus bidang tebal pelat (*through cracks*) dan mode pembebanan yang dilakukan adalah mode-bukaan

(mode I). Tujuan penelitian secara spesifik adalah menghasilkan cara penggunaan strain gage untuk pengukuran  $K_I$  dan  $K_{Iq}$ .

## 2. ANALISIS TEORITIK

### 2.1 Persamaan Medan Tegangan untuk Daerah Deka Ujung Retakan

Berbagai metoda penentuan faktor intensitas tegangan secara eksperimental telah digunakan, namun ketelitian hasil yang diperoleh tergantung pada kelengkapan persamaan medan yang absah untuk daerah dekat dengan ujung retakan. Medan tegangan sekitar ujung retakan dapat dibagi dalam tiga daerah, seperti ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Pembagian daerah di dekat retakan

# PENGUKURAN FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN DENGAN MENGGUNAKAN STRAIN GAGE

Djoko Suharto, Nanang Nazaruddin

Jurusan Teknik Mesin  
Institut Teknologi Bandung

Husaini

Jurusan Teknik Mesin  
Universitas Syah Kuala

## ABSTRAK

Penentuan faktor intensitas tegangan dapat dilakukan dengan beberapa metoda, antara lain metoda analitik, numerik maupun eksperimental. Dalam penelitian ini dilakukan percobaan penggunaan strain gage tunggal (*single strain gage*) untuk pengukuran faktor intensitas tegangan,  $K_I$  dan ketangguhan inisiasi retak,  $K_{Iq}$ . Dari penelitian ini diperoleh cara untuk menentukan orientasi, lokasi dan ukuran strain gage yang menjadi dasar penelitian lanjutan dalam penentuan faktor intensitas tegangan pada fenomena retak cepat (*fast fracture*) dan retak lelah.

## 1. PENDAHULUAN

Penggunaan strain gage untuk pengukuran factor intensitas tegangan  $K_I$  sebenarnya telah dikenal sejak tahun 1957 (Irwin, 1957). Akan tetapi dalam perkembangannya hingga kini, pengukuran  $K_I$  dengan menggunakan strain gage masih jarang dilakukan. Hal ini disebabkan karena pengukuran  $K_I$  dengan menggunakan strain gage sering memberikan hasil yang kurang memuaskan karena adanya faktor-faktor kesalahan. Faktor-faktor kesalahan tersebut meliputi faktor kesalahan akibat gradien regangan (*strain gradient error*), efek peluluhan setempat (*local yielding*) dan faktor kesalahan penentuan daerah untuk menempelkan strain gage di sekitar ujung retak (Dally dan Sanford, 1987; Dally dan Riley, 1991). Dengan diketahuinya pengaruh-pengaruh dari faktor kesalahan tersebut diharapkan dapat diperoleh suatu cara atau batasan khusus tertentu agar pengaruh faktor-faktor kesalahan tersebut dapat diperkecil.

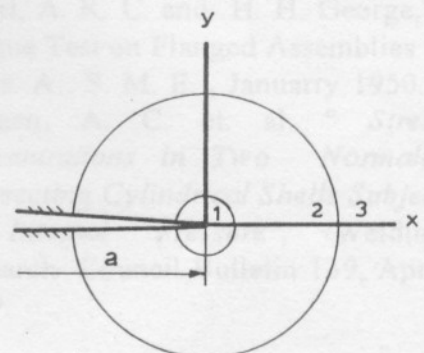
Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian penggunaan strain gage tunggal untuk pengukuran faktor intensitas tegangan,  $K_I$  dan ketangguhan inisiasi retakan,  $K_{Iq}$ . Ketangguhan inisiasi retak,  $K_{Iq}$  merupakan suatu sifat bahan yang dapat digunakan untuk menggambarkan ketangguhan (*toughness*) retak pada bahan apabila ujung retaknya tumpul (memiliki radius tertentu). Selanjutnya untuk menyederhanakan analisis yang diperlukan, maka percobaan yang dilakukan disini dibatasi hanya untuk jenis retakan yang tembus bidang tebal pelat (*through cracks*) dan mode pembebanan yang dilakukan adalah mode-bukaan

(mode I). Tujuan penelitian secara spesifik adalah menghasilkan cara penggunaan strain gage untuk pengukuran  $K_I$  dan  $K_{Iq}$ .

## 2. ANALISIS TEORITIK

### 2.1 Persamaan Medan Tegangan untuk Daerah Dekat Ujung Retakan

Berbagai metoda penentuan faktor intensitas tegangan secara eksperimental telah digunakan, namun ketelitian hasil yang diperoleh tergantung pada kelengkapan persamaan medan yang absah untuk daerah dekat dengan ujung retakan. Medan tegangan sekitar ujung retakan dapat dibagi dalam tiga daerah, seperti ditunjukkan pada gambar 1.



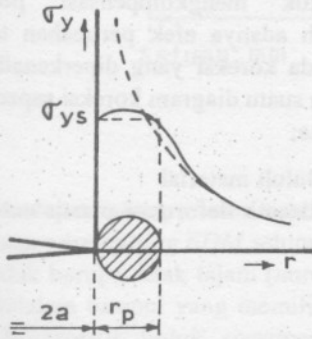
Gambar 1. Pembagian daerah di dekat retakan

Besarnya medan tegangan tersebut secara lengkap ditulis dalam bentuk berikut (solusi eksak) :

$$\sigma_y = \sum_{n=0}^N A_n r^{(n-1/2)} f_n(\theta) + \sum_{m=0}^M B_m r^m g_m(\theta) \quad (1)$$

dimana  $A_n$  dan  $B_m$  adalah koefisien yang tidak diketahui dan  $f_n(\theta)$ ,  $g_m(\theta)$  adalah fungsi trigonometri.

Tampak bahwa untuk  $r \approx 0$ , hanya satu suku pertama yang sangat penting yakni dimana  $n = 0$ . Semua suku lainnya akan hilang. Daerah ini disebut daerah I (*very near-field region*) yang didefinisikan sebagai daerah sekitar ujung retakan dimana suku tunggalnya cukup untuk menentukan besarnya medan tegangan. Pengukuran besarnya medan tegangan pada daerah ini merupakan daerah zona plastis yang akan menyebabkan timbulnya distribusi tegangan yang tidak sesuai dengan persamaan (1) (gambar 2).



Gambar 2. Distribusi tegangan pada zona plastis

Jika  $r$  semakin membesar maka jumlah suku menjadi lebih banyak dan penggunaan suku-suku tersebut diperlukan untuk meningkatkan ketelitian dalam menentukan besarnya medan tegangan. Daerah tersebut disebut daerah II (*near-field region*) yang didefinisikan sebagai daerah di luar daerah I dimana besarnya medan tegangan dapat ditentukan oleh tegangan dapat ditentukan oleh sejumlah kecil suku.

Untuk  $r$  yang lebih besar lagi, lebih banyak suku dibutuhkan untuk ketelitian penentuan medan tegangan. Daerah ini disebut daerah III (*far-field region*). Daerah ini harus dihindarkan dalam pengukuran besarnya medan tegangan karena terlalu banyaknya koefisien suku yang tak diketahui sehingga diperlukan sejumlah besar data untuk ketelitian pengukurannya. Untuk selanjutnya pembahasan medan tegangan sekitar ujung retakan dibatasi hanya untuk daerah II (*near-field region*).

## 2.2 Metoda Penggunaan Strain Gage untuk Menentukan $K_I$

Dengan hanya mengambil tiga suku pertama dari persamaan (1) maka dapat diturunkan persamaan berikut :

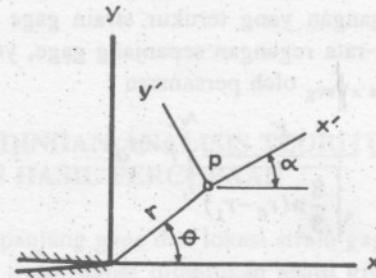
$$2\mu \epsilon_{x'x'} = A_0 r^{1/2} \left[ k \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2} \cos 2\alpha + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2} \sin 2\alpha \right]$$

$$+ B_0 (k + \cos 2\alpha) + A_1 r^{3/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[ k + \sin^2 \frac{\theta}{2} \cos 2\alpha - \frac{1}{2} \sin \theta \sin 2\alpha \right] \quad (2)$$

dimana :

- $A_0, B_0, A_1$  : koefisien yang besarnya tak diketahui
- $\mu$  : modulus geser
- $\epsilon_{x'x'}$  : regangan arah sumbu  $x'$
- $r$  : jarak strain gage terhadap ujung retakan
- $\theta$  : arah posisi strain gage terhadap ujung retakan
- $\alpha$  : orientasi strain gage
- $\nu$  : konstanta perbandingan Poisson

dan  $k = \frac{1-\nu}{1+\nu}$  (3)



Gambar 3. Posisi strain gage

Koefisien-koefisien  $A_0$ ,  $B_0$  dan  $A_1$  pada persamaan di atas harganya dapat ditentukan apabila digunakan tiga buah atau lebih strain gage tunggal yang ditempatkan pada daerah II. Penentuan harga koefisien  $A_0$ ,  $B_0$  dan  $A_1$  tersebut dapat juga dilakukan dengan menggunakan satu buah strain gage tunggal asalkan orientasi dan arah posisi strain gage diatur sebagai berikut (Dally dan Sanford, 1987). Dengan memperlihatkan persamaan tersebut diatas tampak bahwa koefisien  $B_0$  dapat dihilangkan dengan memilih harga sudut  $\alpha$  sebagai berikut,

$$\cos 2\alpha = -k \quad (4)$$

Kemudian tampak pula bahwa koefisien  $A_1$  dapat dihilangkan dengan memilih harga sudut  $\theta$  tertentu :

$$\tan \frac{\theta}{2} = -\cot 2\alpha \quad (5)$$

Jadi dengan memilih harga sudut  $\alpha$  dan  $\theta$  seperti diatas maka persamaannya menjadi :

$$2\mu \epsilon_{x'x'} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[ k \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2} \cos 2\alpha + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2} \sin 2\alpha \right] \quad (6)$$



Tampak bahwa secara tidak langsung, pemilihan besarnya sudut  $\alpha$  dan  $\theta$  tergantung pada jenis material. Hal ini disebabkan karena sudut tersebut harganya hanya tergantung pada konstanta perbandingan Poisson. Sebagai contoh apabila material yang digunakan adalah aluminium ( $\nu = 1/3$ ) yang memiliki retakan tembus, maka berdasarkan persamaan (4) dan (5) besar sudut  $\alpha$  dan  $\theta$  adalah  $60^\circ$ . Jadi strain gage harus diletakkan sejauh  $r$  terhadap ujung retakan dengan arah posisi strain gage  $60^\circ$  dan orientasi strain gage  $60^\circ$  juga. Persamaan (6) kemudian dapat direduksi menjadi:

$$K_I = E \epsilon_g \sqrt{\frac{8}{3} \pi r} \quad (7)$$

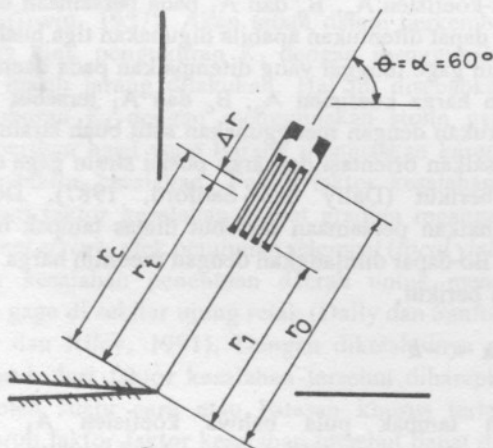
dimana  $\epsilon_g = \epsilon_{x'x'}$ , adalah regangan yang ditunjukkan oleh strain gage.

### 2.3 Kesalahan Gradien Regangan (*strain gradient error*)

Untuk menunjukkan besarnya kesalahan yang disebabkan oleh gradien regangan, tinjau persamaan (7). Harga regangan yang terukur strain gage  $\epsilon_{x'x'}$  merupakan harga rata-rata regangan sepanjang gage, yang dinotasikan dengan  $(\epsilon_{x'x'})_{avg}$  oleh persamaan :

$$(\epsilon_{x'x'})_{avg} = \frac{K_I}{\sqrt{\frac{8}{3} \pi (r_0 - r_1)}} \int_{r_1}^{r_0} r^{-1/2} dr \quad (8)$$

dimana  $r_0$  dan  $r_1$  merupakan jarak antara titik ujung-ujung strain gage terhadap ujung retakan seperti tampak dalam gambar (4).



Gambar 4. Definisi notasi jarak

Pada suatu titik pada gage akan ada suatu harga regangan yang besarnya tepat sama dengan harga rata-rata regangan strain gage tersebut, yang dinamakan regangan sejati (*true strain*)  $\epsilon_{x'x'}$ . Regangan sejati ini posisinya akan terletak sejauh  $r_t$  dari ujung retakan. Dengan mensubstitusikan persamaan (8) ke dalam persamaan (7) tampak bahwa

$$r_t = \frac{1}{4} (\sqrt{r_0} + \sqrt{r_1})^2 \quad (9)$$

sehingga dapat diturunkan suatu persamaan penyimpangan posisi :

$$\frac{\Delta r}{(r_c)} = \frac{1}{2} \left( 1 - \left( 1 - \left( \frac{L}{2r_c} \right)^2 \right) \right) \quad (10)$$

dimana :

$r_c$  : jarak pusat gage terhadap ujung retakan

$L$  : panjang gage =  $r_1 - r_0$

$\Delta r$  : selisih jarak antara pusat strain gage dan lokasi regangan sejati

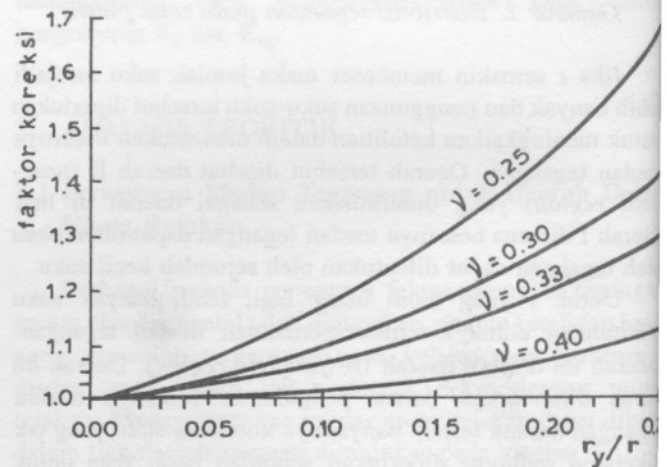
### 2.4 Faktor Koreksi Akibat Adanya Zona Plastis di Ujung Retakan

Seperti telah dijelaskan pada subbab 2.1, pada ujung retakan akan terjadi deformasi plastis setempat sehingga pada daerah ujung retakan (daerah I) terjadi perubahan tegangan. Untuk mengkompensasi pengaruh yang ditimbulkan oleh adanya efek perubahan tegangan maka digunakan metoda koreksi yang diperkenalkan oleh Irwin (1957), di dalam suatu diagram koreksi seperti tampak pada gambar 5 dimana;

$\sigma_{ys}$  : tegangan luluh material

$r_y$  : besarnya daerah deformasi plastis untuk  $\theta = 0$

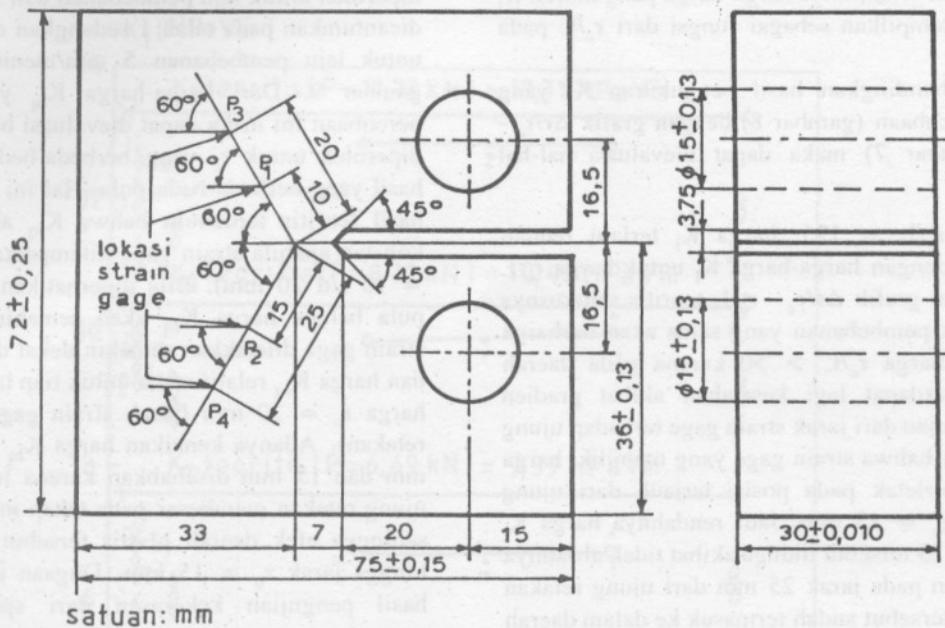
$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right]^2 \quad (11)$$



Gambar 5. Grafik koreksi karena pengaruh zona plastis

## 3. PERANGKAT DAN PROSEDUR PERCOBAAN

Perangkat percobaan yang digunakan terdiri dari spesimen percobaan, strain gage tunggal, mesin uji tarik, penguat regangan (*strain amplifier*) dan pencatat (*recorder*). Spesimen percobaan yang digunakan dalam percobaan ini adalah spesimen tarik-kompak (*compact tension specimen*) dari standard ASTM (1971). Spesimen tersebut dibuat dari material Aluminium 2024-T4. Gambar dan spesimen percobaan tersebut serta lokasi penempatan strain gage tunggal yang digunakan dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Spesimen tarik-kompak

Retakan yang terdapat pada spesimen tersebut dibuat dengan proses pemesinan *wire-cutting EDM* sehingga ujung retakan yang terjadi tidak berupa retak tajam (*natural crack*) tetapi berupa suatu retakan tumpul yang memiliki radius  $\pm 0,15$  mm. Harga  $K_I$  teoritis untuk spesimen tersebut dapat diperoleh dari persamaan pada standard ASTM (1971) :

$$K_I = 1134,52 P \quad (12)$$

dimana :

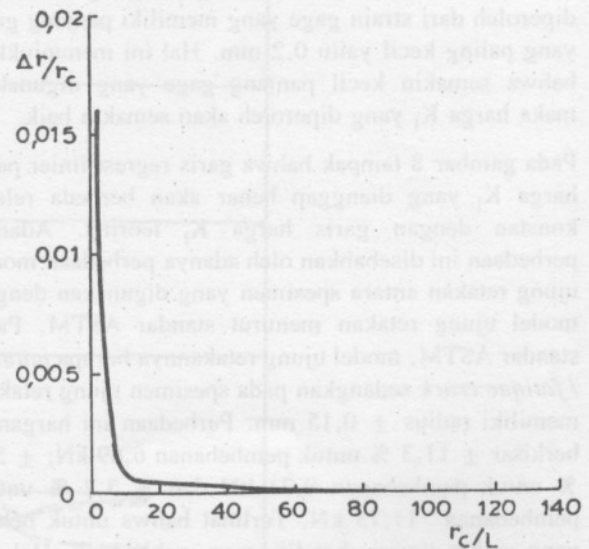
$P$  : beban tarik [N]

Strain gage tunggal yang digunakan dalam percobaan ini memiliki panjang gage 0,2 mm; 2 mm dan 5 mm yang jumlahnya masing-masing sebanyak 4 buah. Tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh panjang gage ( $L$ ) yang berbeda. Masing-masing strain gage dipasang pada jarak 10,15,20 dan 25 mm untuk mengetahui pengaruh jarak  $r_c$  yang berbeda. Strain gage tersebut masing-masing ditempelkan pada 3 buah spesimen tarik-kompak.

Prosedur yang dilakukan dalam percobaan ini adalah dengan membebani spesimen secara bertahap dalam arah pembebanan naik dan turun pada pembebanan 6,69 kN; 9,21 kN dan 11,73 kN sehingga akan diperoleh data regangan untuk masing-masing tahap pembebanan tersebut. Untuk memperoleh harga faktor inisiasi retak  $K_{Iq}$ , pembebanan dilanjutkan secara kontinu sampai terjadi perambatan retak pada spesimen. Pembebanan tersebut dilakukan untuk laju pembebanan yang berbeda-beda yaitu pada 0,5 mm/menit; 2 mm/menit dan 5 mm/menit. Dengan demikian akan diperoleh data regangan maksimum sebelum retakan tepat akan merambat untuk laju pembebanan yang berbeda-beda.

#### 4. PERBANDINGAN ANALISIS TEORITIK DENGAN HASIL PERCOBAAN

Dari data panjang gage dan lokasi strain gage terhadap ujung retakan maka dapat ditentukan suatu grafik teoritis penyimpangan posisi regangan sejati strain gage ( $\Delta r/r_c$ ) terhadap posisi strain gage ( $r_c/L$ ) akibat efek kesalahan gradien regangan (persamaan 10). Grafik teoritis tersebut dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Grafik kesalahan gradien regangan teoritis

Dari data regangan diperoleh harga pengukuran  $K_I$  dengan menggunakan persamaan (7). Akibat adanya deformasi plastis pada ujung retakan, harga  $K_I$  yang telah diperoleh tersebut harus dikoreksi terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan (11) untuk berbagai tingkat

pembebanan. Untuk selanjutnya harga-harga pengukuran  $K_I$  dan  $K_{Iq}$  teoritis ditampilkan sebagai fungsi dari  $r_c/L$  pada gambar 8.

Dengan membandingkan hasil pengukuran  $K_I$  yang diperoleh dari percobaan (gambar 8) dengan grafik  $\Delta r/r_c - r_c/L$  teoritis (gambar 7) maka dapat dievaluasi hal-hal sebagai berikut :

- Untuk harga  $r_c/L = 125$ , harga  $K_I$  terlalu rendah dibandingkan dengan harga-harga  $K_I$  untuk harga  $r_c/L > 50$ . Menurut grafik  $\Delta r/r_c - r_c/L$  teoritis seharusnya harga  $K_I$  untuk pembebanan yang sama akan berharga sama apabila harga  $r_c/L > 50$  karena pada daerah tersebut tak terdapat lagi kesalahan akibat gradien regangan. Ditinjau dari jarak strain gage terhadap ujung retakan tampak bahwa strain gage yang memiliki harga  $r_c/L = 125$  terletak pada posisi terjauh dari ujung retakan,  $r = r_c = 25$  mm. Jadi rendahnya harga  $K_I$  untuk  $r_c/L = 125$  tersebut diduga akibat tidak absahnya lagi pengukuran pada jarak 25 mm dari ujung retakan karena daerah tersebut sudah termasuk ke dalam daerah III (*far-field region*). Untuk selanjutnya harga  $K_I$  untuk  $r_c = 25$  mm tidak diikutsertakan lagi dalam pembahasan berikutnya.
- Tampak harga  $K_I$  akan semakin menyimpang apabila harga  $r_c/L$  semakin kecil. Hal ini sesuai dengan perkiraan teoritis (gambar 7). Jadi penyimpangan harga pengukuran  $K_I$  yang semakin besar dengan semakin kecilnya harga  $r_c/L$  disebabkan oleh adanya efek kesalahan gradien regangan yang semakin besar pula.
- Dalam percobaan ini harga pengukuran  $K_I$  yang dianggap benar adalah pada harga  $r_c/L = 50,75$  dan 100 (gambar 8), yang mana harga-harga  $r_c/L$  tersebut diperoleh dari strain gage yang memiliki panjang gage yang paling kecil yaitu 0.2 mm. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil panjang gage yang digunakan maka harga  $K_I$  yang diperoleh akan semakin baik.
- Pada gambar 8 tampak bahwa garis regresi linier pada harga  $K_I$  yang dianggap benar akan berbeda relatif konstan dengan garis harga  $K_I$  teoritis. Adanya perbedaan ini disebabkan oleh adanya perbedaan model ujung retakan antara spesimen yang digunakan dengan model ujung retakan menurut standar ASTM. Pada standar ASTM, model ujung retakannya berupa *natural / fatigue crack* sedangkan pada spesimen ujung retakan memiliki radius  $\pm 0,15$  mm. Perbedaan ini harganya berkisar  $\pm 11,3$  % untuk pembebanan 6,69 kN;  $\pm 5,2$  % untuk pembebanan 9,21 kN dan  $\pm 3,2$  % untuk pembebanan 11,73 kN. Terlihat bahwa untuk beban yang makin tinggi ketelitiannya makin baik. Hal ini disebabkan oleh pembacaan harga regangan yang makin teliti dan pengaruh bentuk retakan yang makin kecil.

Harga ketangguhan inisiasi retak,  $K_{Iq}$  dapat ditentukan dengan memasukkan data regangan maksimum untuk laju pembebanan 0,5 mm/menit; 2 mm/menit dan 5 mm/menit ke dalam persamaan (7). Selanjutnya harga  $K_{Iq}$  yang

diperoleh untuk laju pembebanan dan  $r_c$  yang berbeda-beda dicantumkan pada tabel 1 sedangkan contoh data regangan untuk laju pembebanan 5 mm/menit dapat dilihat pada gambar 9. Dari harga-harga  $K_{Iq}$  yang diperoleh pada percobaan ini maka dapat dievaluasi bahwa harga  $K_{Iq}$  yang diperoleh untuk  $r_c$  yang berbeda-beda akan memberikan hasil yang berbeda-beda pula. Hal ini bertentangan dengan hasil teoritis terdahulu bahwa  $K_{Iq}$  akan berharga relatif konstan apabila strain gage ditempatkan pada daerah II ( $r_c = 10$  s/d 20 mm). Bila diperhatikan lebih lanjut tampak pula bahwa harga  $K_{Iq}$  akan semakin membesar apabila strain gage diletakkan semakin dekat dengan ujung retakan dan harga  $K_{Iq}$  relatif sama untuk tiap laju pembebanan pada harga  $r_c = 20$  mm (jarak strain gage terjauh dari ujung retakan). Adanya kenaikan harga  $K_{Iq}$  pada jarak  $r_c = 10$  mm dan 15 mm disebabkan karena luas daerah plastis di ujung retakan membesar pada tahap inisiasi (ujung tumpul) sehingga efek daerah plastis tersebut masih berpengaruh hingga jarak  $r_c = 15$  mm. Dugaan ini diperkuat dengan hasil pengujian kekerasan dari spesimen yang telah mengalami perambatan retak seperti ditunjukkan pada gambar 10. Hasil uji kekerasan pada gambar 1 dan 3 dapat dilihat pada gambar 11 dan 12. Pada kedua gambar tersebut terlihat bahwa pengaruh "strain hardening" pada zona plastis terlihat sampai jarak 15 mm pada garis 1 dan 13 mm pada garis ketiga. Jadi hasil pengukuran  $K_{Iq}$  yang absah adalah yang diperoleh dari strain gage yang ditempatkan pada terjauh dari ujung retakan ( $r_c = 20$  mm) karena pengaruh daerah plastis sudah tak tampak dan hasil  $K_{Iq}$  yang diperolehpun relatif konstan untuk tiap-tiap laju pembebanan.

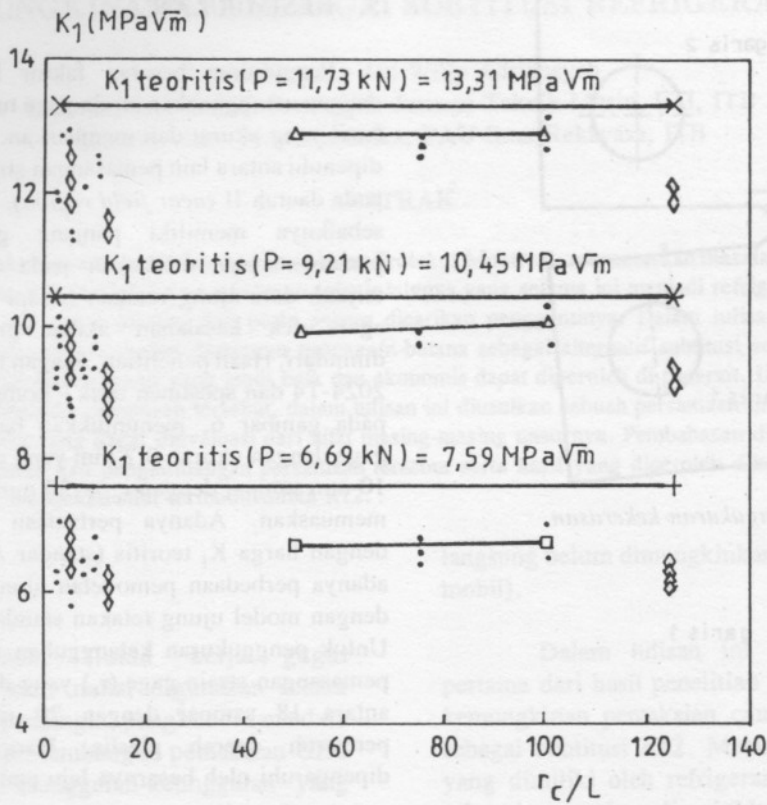
Hasil yang menarik dari penelitian ini adalah harga regangan maksimum yang tercatat pada waktu ujung retak berada pada orientasi  $60^\circ$  dari strain gage. Hal ini sesuai dengan hasil pengukuran menggunakan crack gage. Jadi disamping dapat digunakan untuk mengukur  $K_I$  dan  $K_{Iq}$ , strain gage juga dapat digunakan untuk mengamati posisi ujung retak.

Tabel 1  
Hasil Pengukuran  $K_{Iq}$

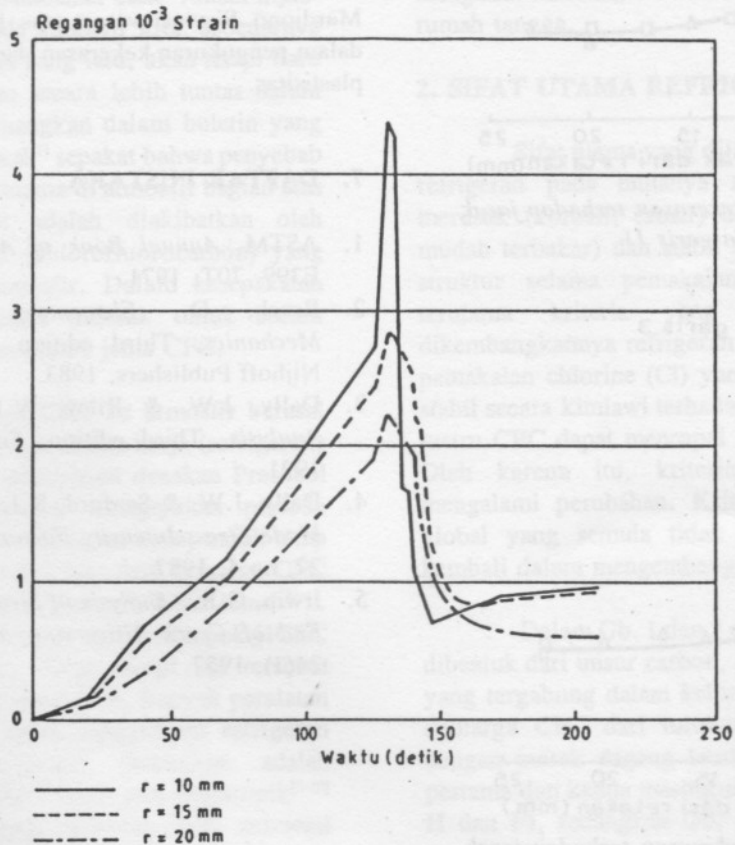
Laju Pembebanan mm/min	$r_c$ mm	$K_{Iq}$ MPa $\sqrt{m}$
0,5	10	*
	15	73,95
	20	66,5
2	10	120,75
	15	81,08
	20	70,14
5	10	95,1
	15	75,53
	20	69,53

\* tak tercatat

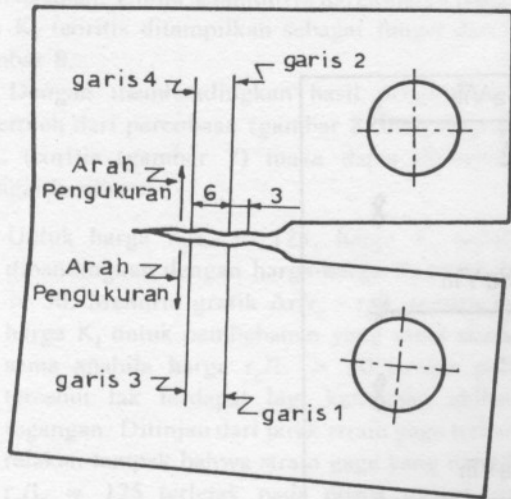




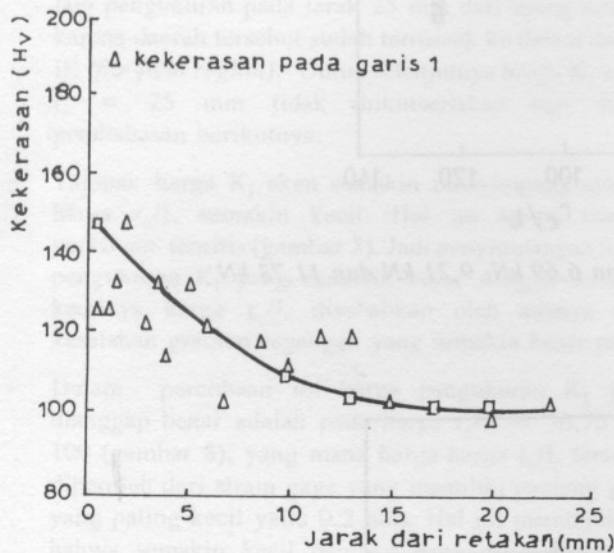
Gambar 8. Grafik  $K_1$  terhadap  $r_c/L$  pada Pembebanan 6,69 kN; 9,21 kN dan 11,73 kN



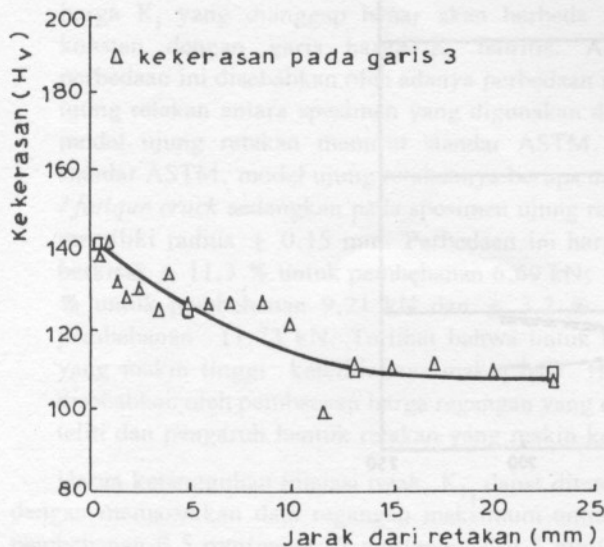
Gambar 9. Regangan Strain gage pada inisiasi dan perambatan retak



Gambar 10. Lokasi pengukuran kekerasan



Gambar 11. Grafik hasil uji kekerasan terhadap jarak dan retakan (pada garis 1)



Gambar 12. Grafik hasil uji kekerasan terhadap jarak dan retakan (pada garis 3)

## 5. KESIMPULAN

Pengukuran besaran faktor intensitas tegangan,  $K_I$  dengan menggunakan strain gage tunggal dapat memberikan hasil yang akurat dan memuaskan. Persyaratan yang harus dipenuhi antara lain pemasangan strain gage harus dilakukan pada daerah II (*near field region*). Strain gage yang dipilih sebaiknya memiliki panjang gage yang kecil dan penempatannya dilakukan pada titik pusat strain gage terjauh dari ujung retakan (tetapi masih dalam daerah II) agar efek kesalahan akibat gradien regangan dapat dihindari. Hasil penelitian, dengan menggunakan aluminium 2024-T4 dan spesimen tarik - kompak seperti diperlihatkan pada gambar 6, menunjukkan bahwa penggunaan strain gage dengan ukuran 0,2 mm yang dipasang pada jarak  $r_c = 10$  mm sampai dengan  $r_c = 20$  mm memberikan hasil yang memuaskan. Adanya perbedaan harga pengukuran  $K_I$  dengan harga  $K_I$  teoritis (standar ASTM) disebabkan oleh adanya perbedaan pemodelan ujung retakan yang digunakan dengan model ujung retakan standar ASTM. Untuk pengukuran ketangguhan inisiasi retak  $K_{Iq}$ , jarak pemasangan strain gage ( $r_c$ ) yang direkomendasikan adalah antara 18 sampai dengan 20 mm untuk menghindari pengaruh daerah plastis. Harga  $K_{Iq}$  terbukti tidak dipengaruhi oleh besarnya laju pembebanan.

## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Mardjono Siswosuwarno atas konsultasi yang diberikan dalam pengukuran kekerasan dan diskusi tentang pengaruh plastisitas.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

1. ASTM, *Annual Book of ASTM Standards vol. 31, E399. 70T, 1971.*
2. Broek, D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics, Third edition, Netherlands, Martinus Nijhoff Publishers, 1983.*
3. Dally, J.W. & Riley, W.F., *Experimental Stress Analysis, Third edition, Singapore, Mc Graw-Hill, 1991.*
4. Dally, J.W. & Sanford, R.J., *Measuring the Opening-Mode Stress-Intensity Factor,  $K_I$ , J. Exp. Mech., vol 27, no 4, 1987.*
5. Irwin, G.R., *Analysis of Stresses and Strains Near the End of Crack Traversing a plate, J. Appl. Mech., 24(3), 1957.*