

# PENGARUH TEBAL BENDA UJI *COMPACT TENSION* TERHADAP LAJU PERAMBATAN RETAK LELAH PADA BAHAN BAJA STRUKTUR

Mudjijana \*)

## INTISARI

Pengaruh tebal benda uji *compact tension* terhadap laju perambatan retak lelah pada bahan baja struktur sangat penting dilakukan penelitian karena banyak konstruksi rekayasa dibuat dengan bahan ini. Penelitian ini bertujuan menentukan karakteristik laju perambatan retak lelah  $da/dN$  vs  $\Delta K$  dengan variasi tebal benda uji, B dan perbandingan tegangan,  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0,1 ; 0,3$

Bahan penelitian dianalisis komposisi kimia, diuji sifat-sifat mekanik, dan diamati struktur mikronya. Mesin uji dinamik Servopulser dengan kapasitas 20 ton digunakan dalam penelitian laju perambatan retak lelah. Panjang retak diukur dengan *travelling microscope* dengan perbesaran 20x.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada benda uji (B) lebih tebal dan perbandingan tegangan (R) yang lebih tinggi dihasilkan laju perambatan retak lelah ( $da/dN$ ) lebih besar pada ( $\Delta K$ ) yang sama. Struktur mikro yang lebih halus dihasilkan ( $da/dN$ ) lebih kecil.

## PENGANTAR

Di Indonesia belum banyak data-data laju perambatan retak lelah dengan amplitudo tegangan berubah untuk bahan baja struktur. Umumnya data-data laju perambatan retak lelah diperoleh dengan pengujian amplitudo tegangan konstan. Cara pengujian seperti ini pemakaiannya terbatas, yaitu hanya dipakai pada suatu konstruksi yang mengalami amplitudo tegangan yang sama. Tebal benda uji berpengaruh pada laju perambatan retak  $da/dN$  vs amplitudo faktor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ), oleh karena itu penelitian perlu dilakukan. Penelitian ditekankan pada daerah linier dan batas ambang (*threshold*), sebagai referensi untuk menentukan umur konstruksi dan batas beban.

*Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM) merupakan prinsip dasar dalam mempelajari karakteristik laju perambatan retak lelah sebagai fungsi faktor intensitas tegangan. Karakteristik ini pada daerah stabil (daerah II) biasanya berlaku Paris Law yang ditulis dengan rumus,

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad 3)$$

dengan C dan m adalah tetapan yang tergantung pada sifat bahan. Batas ambang laju perambatan retak lelah ( $\Delta K$ ) ditentukan berdasarkan laju perambatan

CORE

Metadada, citation and similar papers at core.ac.uk

Provided by UGM Journals, OAI Repository

laju perambatan retak lelah vs amplitudo faktor intensitas tegangan dengan variasi tebal benda uji *compact tension* (B) dan perbandingan tegangan (R).

Kemungkinan terjadi kegagalan lelah suatu konstruksi disebabkan oleh amplitudo beban, bukan besar beban yang terbesar. Amplitudo beban ini dinyatakan dengan amplitudo faktor intensitas tegangan yang dalam satu saikel dinyatakan dengan,

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad \text{untuk } R > 0 \quad 1)$$

$$\Delta K = K_{max} \quad \text{untuk } R \leq 0 \quad 2)$$

$K_{max}$  = nilai terbesar faktor intensitas tegangan

$K_{min}$  = nilai terkecil faktor intensitas tegangan

$$R = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{P_{min}}{P_{max}}$$

= perbandingan tegangan

tegangan super elastisitas dengan Tadao, H., dkk., 1973 ),

$$\Delta K = \frac{\Delta P (2 + \alpha)}{B \sqrt{W} (1 - \alpha)^{3/2}} (0,886 + 4,64 \alpha - 13,32 \alpha^2 + 14,72 \alpha^3 - 5,6 \alpha^4) \quad 4)$$

dengan

$$\alpha = a/W ; \text{ berlaku untuk } \frac{a}{W} > 0,2$$

a = panjang retak, mm,

B = tebal, mm,

W = lebar pelat dari pusat beban, mm.

Pengaruh tebal pelat pada perambatan retak lelah dekat *threshold* (batas ambang) telah diteliti dengan bahan baja karbon rendah (S10C) dan baja kekuatan

\*) Ir. Mudjijana, M.Eng., Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik UGM.

tarik tinggi (HT60) pada laju perambatan retak leleh dari  $10^{-8} - 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{saikel}}$ , untuk perbandingan tegangan  $R = 0,05$  dan  $0,7$  pada temperatur kamar di lingkungan udara (Tokaji, dkk., 1987). Laju perambatan retak leleh dekat batas ambang berkurang dan nilai batas ambang bertambah dengan ketebalan pelat bertambah. Ditunjukkan pula bahwa ketebalan benda uji yang direkomendasikan oleh ASTM,  $\frac{W}{20} \leq B \leq \frac{W}{4}$ , tidak selalu berlaku untuk perambatan retak leleh dekat batas ambang.

Variabel pengujian  $\frac{a}{W} = 0,35 - 0,8$  tidak mempengaruhi laju perambatan retak leleh dekat batas ambang (Priddle, 1988). Pada pengujian ini dilakukan dengan cara manual atau dikendalikan dengan komputer.

Faktor-faktor yang mempengaruhi laju perambatan retak leleh ( $da/dN$ ) vs amplitudo faktor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ) adalah struktur mikro, tegangan rata-rata, tebal benda uji dan lingkungan (Allen, dkk., 1988).

Sebuah retak leleh dimulai pada permukaan yang merambat melintasi batas-batas butir (transkristalin) dan sebagian kecil yang merambat sepanjang batas-batas butir (interkristalin) (Fuchs dan Stephens, 1980).

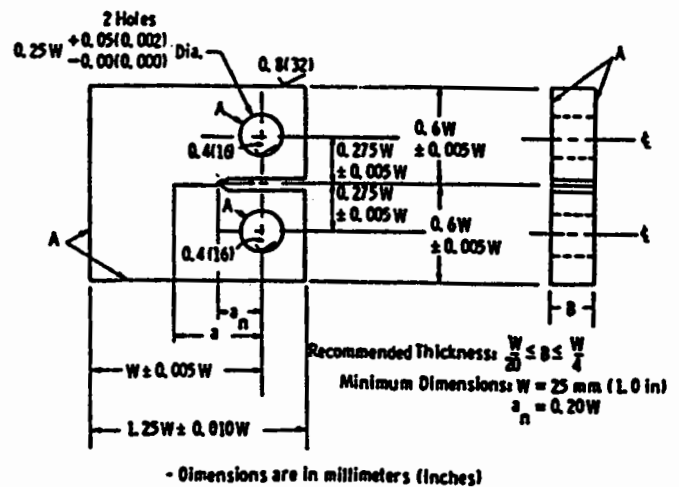
### CARA PENELITIAN

Bahan baja struktur dengan penampang 60 mm x 60 mm di potong-potong dengan ukuran yang sesuai untuk analisis kimia, benda uji tarik, kekerasan, struktur mikro, dan bentuk benda uji yang digunakan untuk pengujian perambatan retak leleh seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dengan ukuran-ukuran disajikan dalam tabel I. Tebal benda uji tidak mengikuti standar yang direkomendasikan oleh ASTM-E647.

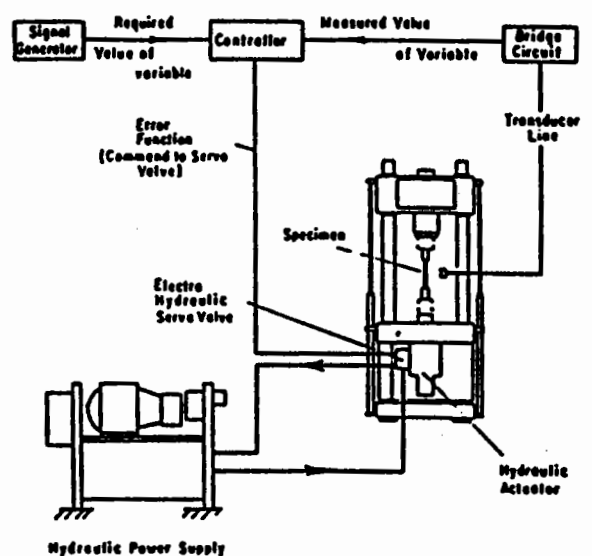
Dalam penelitian ini digunakan alat : (1) spektrometer untuk analisis komposisi kimia C, Mn, Ni, Cr, Si, P, S, (2) mesin uji tarik universal dan kekerasan untuk mendapatkan data sifat-sifat mekanik, (3) mikroskop metalurgi untuk memeriksa struktur mikro dan pola perambatan retak, dan (4) mesin uji dinamik Servopulser dengan kapasitas 20 ton untuk pengujian perambatan retak leleh benda uji C(T) dengan skema seperti ditunjukkan pada gambar 2 (ASTM STP 566, 1974). Pengujian dilakukan dengan cara *decreasing test* dan menggunakan penurunan beban  $\Delta P = 9\%$ . Panjang retak ( $a$ ) diukur setiap bertambah  $\pm 0,5$  mm dengan alat *travelling microscope* dan bersamaan dengan ini jumlah saikel ( $N$ ) dan beban ( $P$ ) dicatat. Pengujian dilakukan dengan perbandingan tegangan  $R = 0,1$  dan  $0,3$ .

Tabel I. Ukuran-ukuran benda uji *compact tension C(T)* dan perbandingan tegangan  $R$  untuk pengujian laju perambatan retak leleh

No. Benda Uji	Ukuran, mm		Perbandingan tegangan, R
	W	B	
1	28	8	0,1
2	28	8	0,3
3	28	11	0,1
4	28	11	0,3
5	28	14	0,1
6	28	14	0,3



Gambar 1. Bentuk benda uji *compact tension C(T)* untuk pengujian laju perambatan retak.



Gambar 2. Skema mesin uji dinamik Servopulser.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Hasil penelitian komposisi kimia

Hasil analisis komposisi kimia disajikan pada tabel II. Bahan baja struktur yang diteliti mengandung unsur C = 0,341. Baja ini dapat digolongkan baja karbon medium dan termasuk baja karbon SAE C1035 (Parker, 1967). Bahan baja ini mempunyai kekuatan dan keuletan cukup tinggi, dan dapat dideformasi di atas suhu rekristalisasi.

### Hasil penelitian sifat-sifat mekanik

Tabel III disajikan sifat-sifat mekanik bahan uji dari baja karbon medium yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel II. Komposisi kimia bahan uji \*)

No. Uji	Unsur (% wt)							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	P	S
1	0,357	0,620	0,166	0,190	-	0,025	-	0,018
2	0,349	0,622	0,174	0,190	-	0,022	-	0,017
3	0,333	0,609	0,177	0,195	-	0,028	-	0,012
4	0,326	0,619	0,177	0,194	-	0,020	-	0,017
Rata-rata	0,341	0,617	0,174	0,192	-	0,024	-	0,016

\*) Sisanya unsur Fe

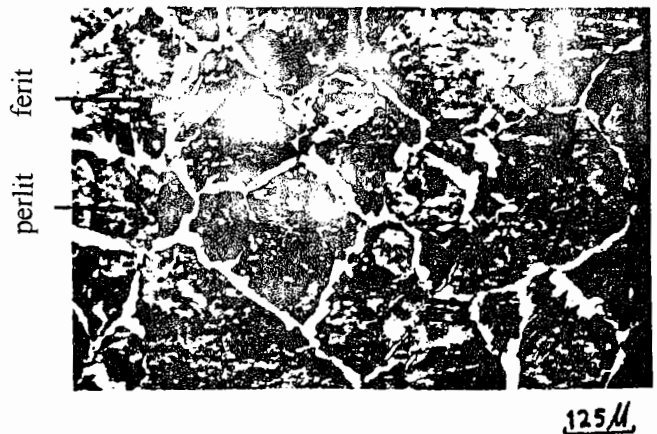
Tabel III. Sifat-sifat mekanik bahan uji baja struktur

No. Bahan uji	Kekuatan luluh (kg/mm <sup>2</sup> )	Kekuatan tarik (kg/mm <sup>2</sup> )	Perpanjangan (%)	Kontraksi (%)	Kekerasan (HB)
1	37,92	62,08	18,70	24,60	213
2	37,53	61,76	16,95	26,20	216
3	38,09	64,30	16,70	29,76	213
4	37,00	62,70	16,70	32,76	209
Rata-rata	37,63	62,71	17,26	28,16	213

Bahan yang diteliti mempunyai kekuatan tarik rata-rata = 62,71 kg/mm<sup>2</sup>, nilai ini kira-kira 1/3 nilai kekerasan Brinell. Mempunyai prosentase perpanjangan dan kontraksi cukup tinggi sehingga bahan ini cocok untuk konstruksi umum yang dapat mengalami deformasi sebelum terjadi kegagalan lelah (*fatigue failure*).

### Hasil penelitian struktur mikro

Hasil struktur mikro bahan uji dari baja struktur diperiksa pada penampang melintang ditunjukkan pada gambar 3. Pada penampang memanjang mempunyai struktur mikro yang sama sehingga bahan penelitian ini dapat dikatakan mempunyai sifat-sifat mekanik isotropik. Pada struktur mikro tampak warna putih merupakan ferit pra-eutektoid yang terpisah dari austenit sebelum terjadi reaksi eutektoid. Warna yang lain adalah perlit yang merupakan lapisan ferit eutektoid dan karbida (Van Vlack dan Djaprie, 1983).



Gambar 3. Struktur mikro bahan baja struktur C1035 pada penampang melintang.

### Hasil penelitian perambatan retak lelah

Hasil penelitian laju perambatan retak lelah ( $da/dN$ ) vs ( $\Delta K$ ) untuk tebal benda uji B = 8,0 mm ; 11,0 mm; 14,0 mm dengan perbandingan tegangan  $R = P_{min} / P_{max} = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0,1$  dan 0,3 ditunjukkan pada gambar 4. Simbol pokok yang dipakai dalam gambar 4 adalah sebuah lingkaran untuk tebal benda uji 8,0 mm, sebuah bujur sangkar untuk tebal benda uji 11,0 mm, sebuah segitiga untuk tebal benda uji 14,0 mm. Untuk  $R = 0,3$  simbol-simbol tersebut dihitamkan.

Dalam penelitian ini dihasilkan nilai batas ambang perambatan retak lelah  $\Delta K_{th}$  disajikan dalam tabel IV. Nilai ini ditentukan berdasarkan laju perambatan retak lelah  $10^{-7}$  mm/saikel (ASTM-E647, 1988) dengan cara interpolasi maupun ekstrapolasi  $da/dN$  vs  $\Delta K$ .

Pada laju perambatan retak lelah di atas  $10^{-7}$  mm/saikel berlaku Paris law  $da/dN = C (\Delta K)^m$ . Bila data-data tiap-tiap peubah tebal benda uji dan perbandingan tegangan R dimasukkan ke dalam persamaan Paris, diperoleh konstanta C dan m yang disajikan dalam tabel V. Dengan persamaan Paris ini, dapat diprediksi umur suatu konstruksi bila panjang retak awal dapat diukur dan panjang retak kritis yang diijinkan ditentukan yaitu dengan cara mengintegrasikan,

$$N = \frac{1}{C (\Delta K)^m} \int_{a_0}^{a_c} da \quad 5)$$

dengan

- N = jumlah saikel
- $a_0$  = panjang retak awal, mm
- $a_c$  = panjang retak kritis, mm
- $\Delta K$  = amplitudo faktor intensitas tegangan, kg/mm<sup>3/2</sup>
- C dan m = konstanta

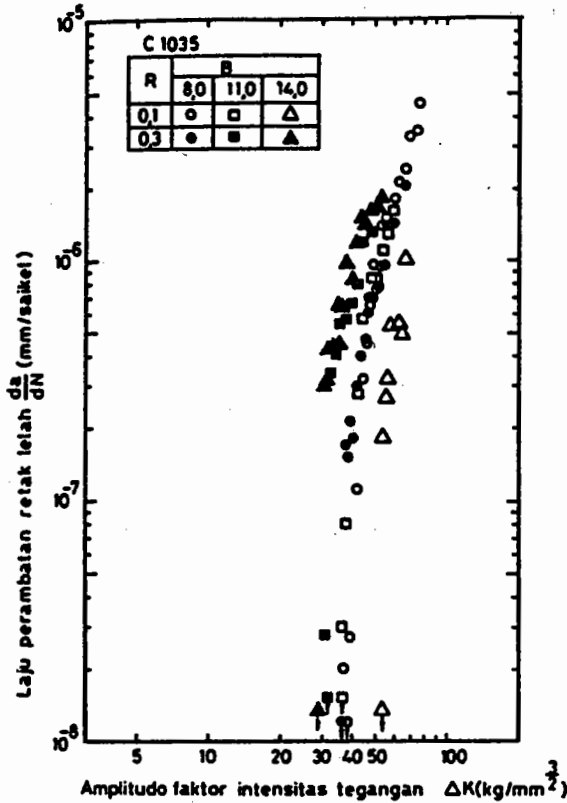
Tabel IV. Nilai batas ambang perambatan retak lelah ( $\Delta K_{th}$ ) untuk baja struktur C1035.

Tebal benda uji (mm)	Perbandingan tegangan $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$	
	0,1	0,3
8,0	38,0	36,0
11,0	36,0	31,0
14,0	52,0	29,0

batas ambang laju perambatan retak lebih kecil. Jadi, bila suatu konstruksi mengalami beban di daerah tarik-tarik atau tegangan rata-rata tarik lebih tinggi kemungkinan kegagalan lelahnya lebih besar. Hal ini disebabkan hampir tidak terjadi penutupan retak sehingga laju perambatan retaknya lebih besar. Bila R lebih kecil kemungkinan terjadi penutupan retak lebih besar. Penutupan retak ini disebabkan oleh *fretting* sebagai akibat kekasaran permukaan retakan, oksida yang terjadi pada permukaan retak, plastisitas di ujung retakan, dan transformasi fase (Suresh dan Ritchie, 1984).

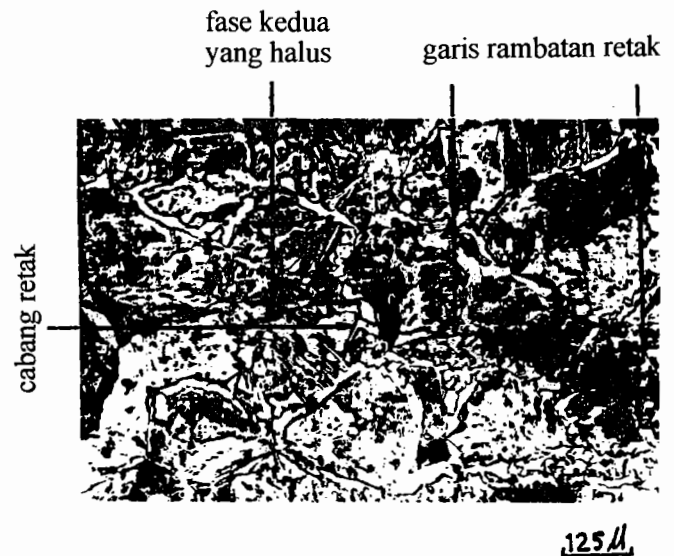
Tabel V. Nilai konstanta C dan m pada persamaan Paris dengan variasi tebal benda uji B dan perbandingan tegangan R.

Tebal benda uji (mm)	Perbandingan tegangan $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$			
	0,1		0,3	
	C	m	C	m
0,8	$1,4 \times 10^{-12}$	3,97	$4,9 \times 10^{-12}$	3,67
11,0	$8,7 \times 10^{-11}$	2,94	$2,6 \times 10^{-11}$	3,40
14,0	$7,7 \times 10^{-13}$	3,80	$5,2 \times 10^{-11}$	3,28



Gambar 4. Hubungan laju perambatan retak lelah ( $da/dN$ ) dengan amplitudo faktor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ).

Pada gambar 4 untuk  $R = 0,3$  dapat ditunjukkan bahwa benda uji lebih tebal mempunyai laju perambatan retak lebih tinggi dari pada benda uji lebih tipis (simbol dihitamkan). Untuk  $R = 0,1$  pengaruh tebal benda uji tidak dapat disimpulkan dengan jelas karena untuk tebal benda uji 14,0 mm mempunyai laju perambatan retak lelah lebih kecil dibandingkan tebal benda uji yang lain. Bila dilihat mekanisme retak mikro yang ditunjukkan pada gambar 5 dengan  $R = 0,1$  ternyata retakan melalui fase kedua yang halus dan terjadi banyak cabang retak. Hal ini mengakibatkan terjadi perlambatan retak. Kalau perambatan retak terjadi melalui fase dengan kurun butir yang kasar dimungkinkan untuk  $R = 0,1$  dengan tebal benda uji lebih tebal akan mempunyai laju perambatan retak lebih besar. Pada perbandingan tegangan R lebih tinggi dihasilkan laju perambatan retak lebih besar dan diperoleh nilai



Gambar 5. Foto retak mikro di ujung retakan untuk benda uji B = 14,0 mm dan  $R = 0,1$ .

### KESIMPULAN

Dari hasil-hasil penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Baja struktur yang diteliti merupakan baja karbon biasa dengan kandungan karbon  $C = 0,341$  dan dapat dimasukkan ke dalam katagori baja SAE C1035.