

PERCEPATAN PERAMBATAN RETAK LELAH DENGAN INTERMITTENT OVERSTRESS DAN VARIASI TEGANGAN RATA-RATA

Mudjijana

Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Yogyakarta

INTISARI

Kelakuan perambatan retak lelah dengan intermittent overstress telah diselidiki dengan menggunakan baja karbon rendah dan beban tarik-tekan dengan variasi tegangan rata-rata. Overstress dengan jumlah 2 saikel diberikan secara intermittent di antara understress dengan jumlah $2,2 \times 10^5$ saikel. Tegangan rata-rata yang lebih tinggi menghasilkan percepatan perambatan retak lelah yang lebih kecil dibandingkan dengan tegangan rata-rata yang lebih rendah. Percepatan dengan banyak level intermittent overstress dan variasi tegangan rata-rata dapat diprediksi dengan penjumlahan data pengujian dua level intermittent overstress. Ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan mekanisme mikro dalam percepatan perambatan retak lelah.

PENGANTAR

Pada umumnya konstruksi mesin selalu mengalami beban yang berubah berulang, tarik-tarik atau tarik-tekan dengan amplitudo yang berbeda. Hal ini menimbulkan persoalan yang sulit dalam perencanaan. Untuk mengatasi hal ini diperlukan pengujian dinamik dengan intermittent overstress dan variasi tegangan rata-rata, sehingga karakteristik bahan yang dipakai pada konstruksi mesin tersebut dapat diketahui. Pada pengujian terhadap beban dinamik dengan amplitudo konstan dihasilkan laju perambatan retak lelah yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan pengujian beban dinamik dengan amplitudo yang berubah atau intermittent overstress (Koterazawa and Shimo, 1976). Kondisi tegangan ini terjadi terutama bila sebagian besar saikel ($n \cong 10^6$) bekerja pada tegangan di bawah tegangan batas ambang yang disebut understress yang diselingi dengan jumlah saikel yang sedikit ($\cong 2$) dengan tegangan di atas tegangan batas ambang yang disebut overstress. Understress dan overstress terjadi pada benda uji bulat de-

ngan takik runcing secara intermittent. Hal ini menyebabkan laju perambatan retak lelah 100 x lebih besar dibandingkan dengan penggunaan beban dinamik dengan amplitudo konstan. Pengujian ini dilakukan dengan mesin lentur putar (Rotary bending machine).

Di samping itu, telah diteliti pula pengaruh lingkungan (udara kering, vakum, nitrogen, dan udara basah) terhadap percepatan perambatan retak lelah intermittent overstress (Koterazawa and Noshu, 1992), dan terlihat bahwa percepatan dalam vakum lebih kecil dari pada di lingkungan yang lain.

Dalam kenyataan sehari-hari keadaan pola pembebanan pada konstruksi mesin sangat kompleks. Hal ini dapat didekati dengan cara menggabungkan 2 level tegangan menjadi beberapa level tegangan dinamik intermittent berdasarkan prinsip linear cumulative damage rule (Koterazawa and Shimo, 1976; Koterazawa, 1985).

Pada penggunaan benda uji pelat dengan takik di tengah, faktor intensitas tegangan (K) yang merupakan parameter ujung retak, dapat ditentukan dengan persamaan (Tada dkk, 1973):

$$K = \frac{P}{B} \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2 W} \sec\left(\frac{\pi \alpha}{2}\right)} \quad \dots\dots (1),$$

dengan :

$$\alpha = \frac{2 a}{W}, \text{ yang berlaku untuk } \alpha < 0,95$$

a = setengah panjang retak awal, m

P = beban, N

B = tebal pelat, m

W = lebar pelat, m

Kemungkinan terjadi patah lelah yang lebih banyak disebabkan oleh amplitudo beban, bukan oleh besar beban yang terbesar (Fuchs and Stephens, 1980). Amplitudo beban ini dinyatakan dengan amplitudo faktor intensitas tegangan yang dalam 1 saikel dinyatakan dengan rumus :

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (R > 0) \quad \dots\dots (2),$$

$$\Delta K = K_{\max} \quad (R \leq 0) \quad \dots\dots (3),$$

dengan :

K_{\max} = nilai terbesar faktor intensitas tegangan,

K_{\min} = nilai terkecil faktor intensitas tegangan,

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \text{perbandingan tegangan.}$$

Faktor percepatan (R_{ac}) yang disebabkan oleh 2 level tegangan dinamik dengan amplitudo berubah, secara fisis dapat ditulis sebagai berikut (Koterazawa, 1985) :

$$R_{ac} = \frac{\Delta a}{\left[\left(\frac{da}{dN} \right)_{\Delta K_2} \times n_2 \right] + \left[\left(\frac{da}{dN} \right)_{\Delta K_1} \times n_1 \right]} \dots (4),$$

dengan :

Δa = panjang retak sebenarnya yang disebabkan oleh 2 level intermittent overstress, mm

$\left[\left(\frac{da}{dN} \right)_{\Delta K_2} \times n_2 \right]$ = laju perambatan retak lelah/saikel ($\frac{mm}{saikel}$) x jumlah saikel yang disebabkan oleh tegangan dinamik amplitudo konstan pada bagian overstress, mm

$\left[\left(\frac{da}{dN} \right)_{\Delta K_1} \times n_1 \right]$ = laju perambatan retak lelah/saikel ($\frac{mm}{saikel}$) x jumlah saikel yang disebabkan oleh tegangan dinamik amplitudo konstan pada bagian understress, mm.

Bagian ruas kanan penyebut pada persamaan (4), understress bekerja di bawah tegangan batas ambang, sehingga secara teoritis tidak mempengaruhi keretakan. Oleh karena itu, hal ini dapat diabaikan dan persamaan (4) menjadi :

$$R_{ac} = \frac{\Delta a}{\left[\left(\frac{da}{dN} \right)_{\Delta K_2} \times n_2 \right]} \dots (5),$$

Selanjutnya, dalam kenyataan tegangan yang bekerja pada suatu konstruksi mesin sangat kompleks. Untuk itu percepatan perambatan retak lelah dapat diperhitungkan dengan persamaan:

$$R_{ac}^* = \frac{\sum_i \left[\frac{1}{2} \left(\sum_j \frac{n_{1j}}{n_{1i}} R_{ac} (K_{2i}, n_{2i}, K_{1j}, n_{1i}) + \sum_k \frac{n_{1k}}{n_{1(i+1)}} R_{ac} (K_{2i}, n_{2i}, K_{1k}, n_{1(i+1)}) \right) \left(\frac{da}{dN} \right)_{K_{2i}} \times n_{2i} \right]}{\sum_i \left[\left(\frac{da}{dN} \right)_{K_{2i}} \times n_{2i} \right]} \dots (6).$$

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki percepatan perambatan retak lelah dengan intermittent overstress dan

variasi tegangan rata-rata yang disebabkan oleh 2 level dan banyak level tegangan dinamik intermittent dengan amplitudo yang berubah.

CARA PENELITIAN

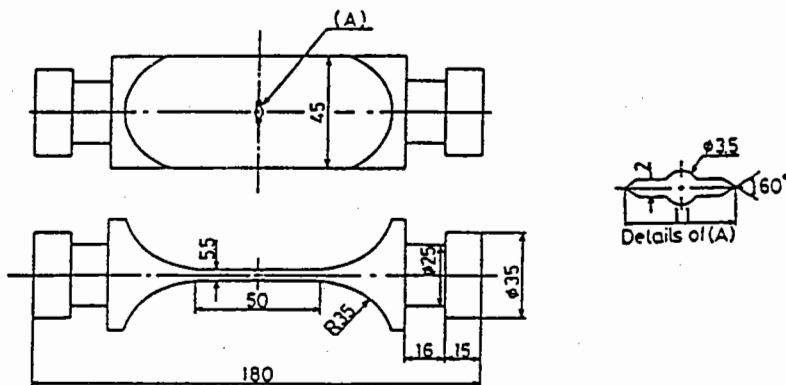
Bahan penelitian berupa baja karbon rendah S15C yang banyak digunakan dalam konstruksi mesin. Bahan liat ini akan menampakkan beach mark yang jelas pada permukaan patahan hasil pengujian percepatan perambatan retak lelah dengan intermittent overstress dan variasi tegangan rata-rata. Komposisi dan sifat-sifat mekanik baja S15C pada temperatur kamar disajikan pada daftar I dan II. Ukuran dan bentuk benda uji ditunjukkan pada gambar 1 sesuai dengan standar ASTM-E647 (1988) dengan takik di tengah dibuat dengan Electro Discharge Machining (EDM). Pengujian dilakukan dengan mesin Servopulser (kapasitas 10 ton) di Laboratorium Fracture Mechanics dan Fractography, Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba Jepang, pada lingkungan udara kering ($RH < 20\%$), yang dikendalikan oleh komputer dengan skema yang ditunjukkan pada gambar 2. Komputer mengendalikan faktor intensitas tegangan (K) pada ujung retak. Di bagian takik dipasang clip gage, yaitu sebuah alat ukur regangan dinamik yang mengukur sinyal Crack Opening Displacement (COD). Grafik hubungan beban (P) dengan rentangan pembukaan retak (COD) dalam 1 saikel dapat ditentukan dengan X-Y recorder. Dari grafik ini dapat ditentukan beban pembukaan retak P_{op} (Elber, 1971).

Daftar I. Komposisi kimia bahan

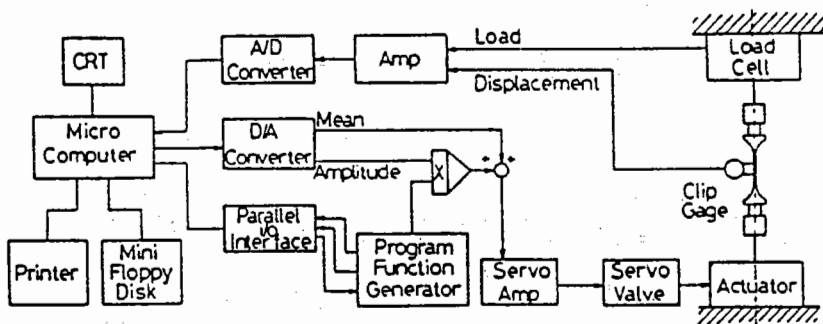
Benda uji	Unsur (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe
S 15 C	0,15	0,28	0,37	0,011	0,06	0,14	0,05	0,08	sisanya

Daftar II. Sifat-sifat mekanik bahan uji

Benda uji	Kekuatan luluh MPa	Kekuatan tarik MPa	Perpanjangan (%)	Reduksi luas (%)	Perlakuan panas
S 15C	327	433	67,4	40,0	920°C, 1 Hr, A.C



Gambar 1. Ukuran-ukuran dan bentuk benda uji



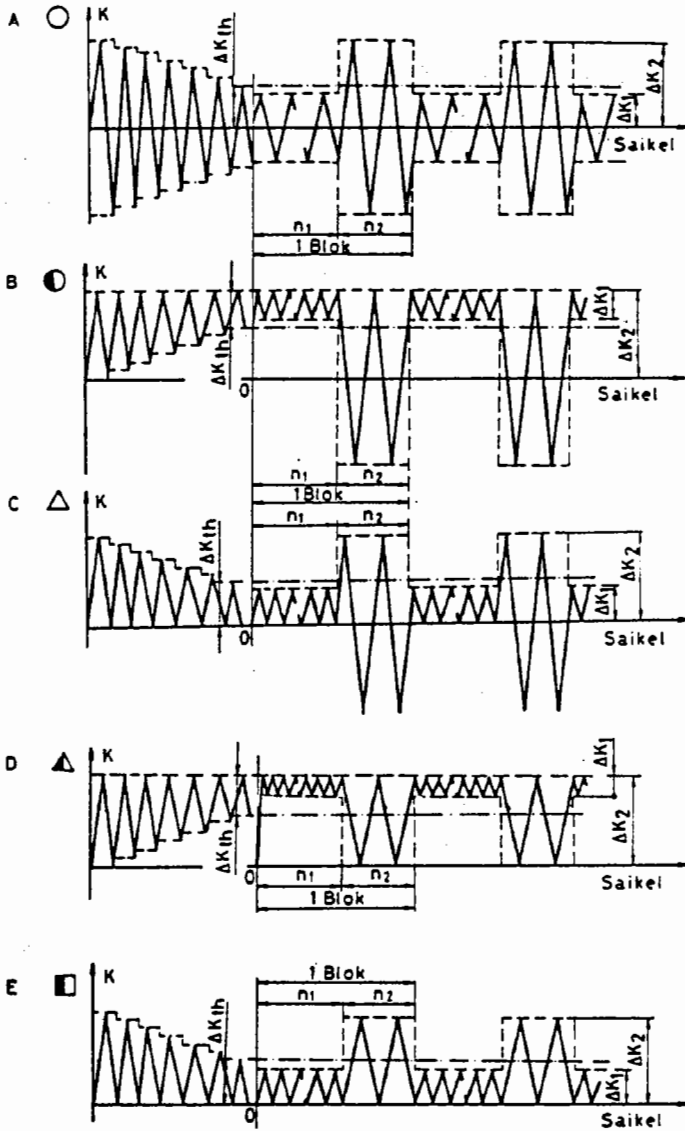
Gambar 2. Sistem pengendalian faktor intensitas tegangan (K) pada pengujian perambatan retak lelah

Sesudah benda uji dipatahkan dengan beban *impulsive* dalam cairan nitrogen, permukaan patahan diamati dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Dari hasil fraktografi, panjang retak total (Δa) dan lebar *beach mark* (Δl) dapat diukur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengaruh tegangan rata-rata

Pengujian *intermittent overstress* dua level tegangan dengan variasi tegangan rata-rata dilakukan dengan program pembebanan, ditunjukkan pada gambar 3. Jumlah saikel *under-stress* dalam 1 program blok $n_1 = 2,2 \times 10^5$, yang menyebabkan



$$n_1 = 2,2 \times 10^5, \quad n_2 = 2,$$

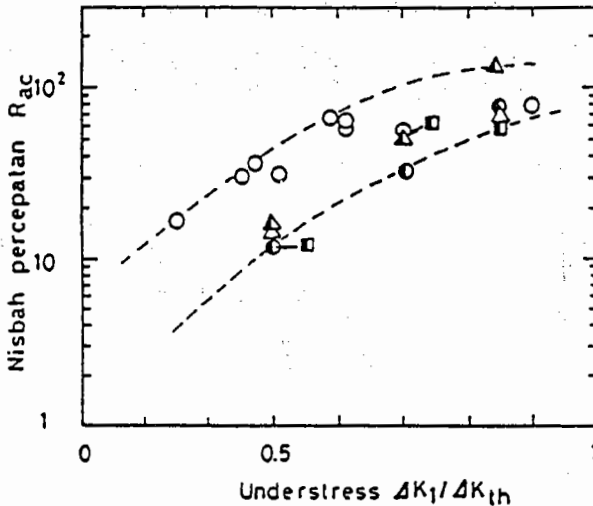
$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\Delta K_2} \cong 3 \times 10^{-5} \text{ mm/saikel}$$

Gambar 3. Beberapa program pembebanan dinamik pada pengujian 2 level intermittent overstress

percepatan perambatan retak lelah cukup besar walaupun secara teoritis understress ini tidak menyebabkan retak karena

nilainya di bawah batas ambang. Jumlah saikel overstress $n_2 = 2$, menyebabkan percepatan perambatan retak lelah cukup berarti. Overstress ini dibuat sama, sebesar $(\frac{da}{dN})_{\Delta K_2} \approx 3 \times 10^{-5}$ mm/saikel. Pengujian dilakukan dengan variasi understress di bawah batas ambang (ΔK_{th}) .

Hasil yang dilukiskan dalam gambar 4 adalah nisbah percepatan R_{ac} , yang merupakan panjang retak yang sebenarnya dalam satu blok program intermittent overstress dibagi dengan panjang retak yang disebabkan oleh overstress yang 1 saikelnnya $\approx 3 \times 10^{-5}$ mm. Nilai $R_{ac} \approx 60$ pada nilai $\Delta K_1 / \Delta K_{th} = 0,7$ (simbol Δ).



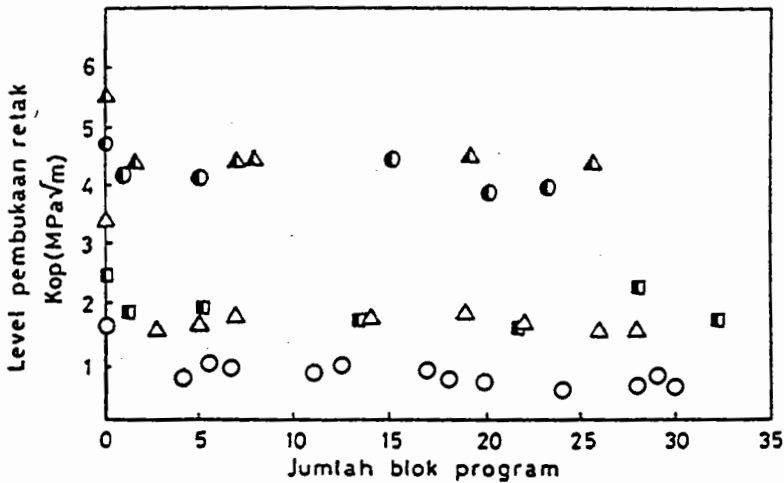
Gambar 4. Nisbah percepatan perambatan retak pada pengujian 2 level intermittent overstress

Percepatan dengan variasi tegangan yang lain agak berbeda; tegangan rata-rata tarik menyebabkan nisbah percepatan lebih kecil (bandingkan lingkaran terbuka untuk tegangan rata-rata = 0 dengan titik-titik data yang lain dengan tegangan rata-rata tarik).

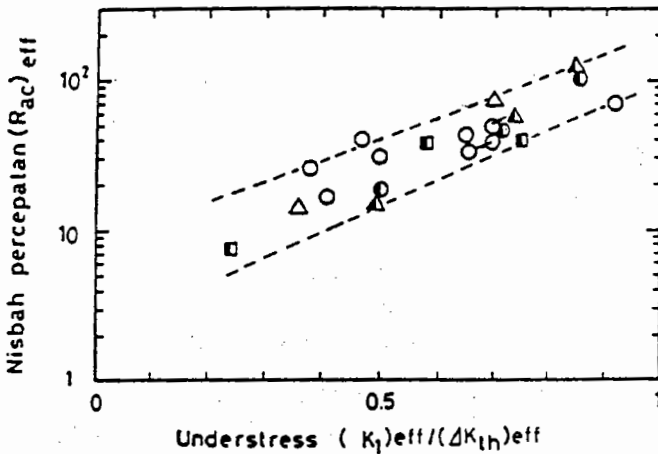
2. Pengaruh penutupan retak

Contoh-contoh level tegangan pembukaan retak yang diperoleh dari hysteresis loop beban-rentangan, ditunjukkan pada gambar 5. Beberapa perbedaan yang diperlihatkan dengan variasi tegangan rata-rata, tegangan pembukaan retak agak lebih tinggi daripada tegangan rata-rata tarik.

Pada gambar 6, nisbah percepatan $(R_{ac})_{eff}$ yang ditun-



Gambar 5. Level pembukaan retak selama pengujian 2 level intermittent overstress



Gambar 6. Percepatan perambatan retak pada pengujian 2 level intermittent overstress sebagai fungsi tegangan efektif

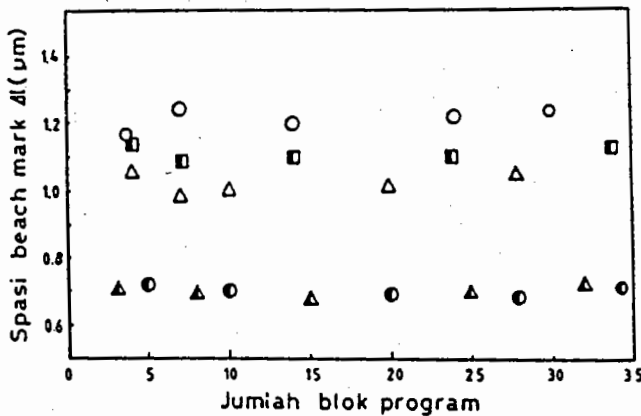
jukkan sebagai fungsi intensitas tegangan efektif, diperoleh dengan menggunakan tegangan pembukaan retak. Pengaruh variasi tegangan rata-rata mempunyai perbedaan (R_{ac})_{eff} lebih kecil dibandingkan dengan gambar 4. Hal ini menunjukkan pengaruh penutupan retak pada perubahan percepatan dengan variasi tegangan rata-rata. Bila diperhatikan, perbedaan itu tidak besar dalam hal scatter data eksperimen dengan band data. Jadi, perbaikan korelasi tidak diperoleh dengan menggunakan tegangan efektif ini.

3. Pengaruh histori tegangan

Benda uji yang dibuat retak awal dengan bermacam-macam beban siklik, ditunjukkan pada gambar 3. Gambar sebelah kiri menunjukkan step pembebanan tekan-tarik atau tarik-tarik menurut kondisi understress pada pengujian intermittent overstress berikutnya. Jadi, kondisi untuk step pembebanan dipilih sedemikian hingga bagian akhir kondisi tegangan mendekati sama dengan kondisi permulaan pengujian intermittent overstress. Hal ini membuat tegangan pembukaan retak mendekati sama.

Pengaruh histori tegangan memungkinkan pengurangan perambatan retak yang melalui daerah plastis yang dihasilkan oleh tegangan sebelumnya. Selama pengujian, tegangan pembukaan retak mendekati konstan, kecuali pada awalnya ada perubahan sedikit yang ditunjukkan pada gambar 5.

Spasi beach mark pada permukaan patahan (yang merupakan laju perambatan retak) juga mendekati konstan seperti yang ditunjukkan pada gambar 7. Jumlah perambatan retak yang disebabkan oleh intermittent overstress lebih besar daripada ukuran plastis yang dihitung dengan mekanika perpatahan. Hal ini menjadi penyebab nisbah percepatan (R_{ac}) tinggi.



Gambar 7. Spasi beach mark pada pengujian 2 level intermittent overstress

4. Pengujian banyak level intermittent overstress

Semua pengujian yang dibicarakan di muka dilakukan dengan 2 level intermittent overstress, yang merupakan kombinasi sebuah overstress dan understress. Dalam praktek, banyak kombinasi level overstress dan understress yang lebih kom-

pleks yang sering tidak diperhitungkan. Sehubungan dengan persoalan ini, peneliti menunjukkan suatu contoh pengujian perambatan retak lelah dengan pembebanan banyak level intermittent overstress dan variasi tegangan rata-rata yang dapat diprediksi dari 2 level intermittent overstress menurut penjumlahan linear.

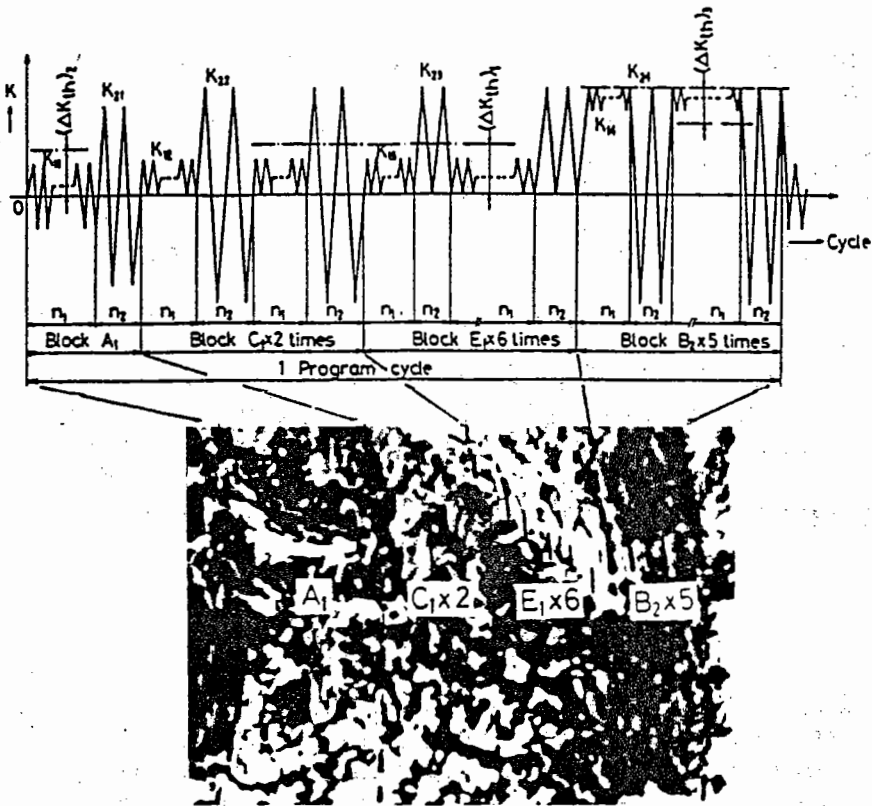
Hasil pengujian percepatan perambatan retak lelah dengan banyak level intermittent overstress disajikan pada daftar III. Nisbah percepatan eksperimen terjadi dengan prediksi $R_{ac}^*/R_{ac} \cong 1$. Ini berarti bahwa percepatan perambatan retak lelah dengan banyak level intermittent overstress dengan variasi tegangan rata-rata dapat diprediksi dengan penjumlahan linear dari pengujian 2 level intermittent overstress dengan variasi tegangan rata-rata. Hal ini disebabkan oleh adanya persamaan mekanisme mikro perambatan retak pada pengujian banyak level dan 2 level intermittent overstress.

Daftar III. Percepatan perambatan retak pada pengujian banyak level intermittent overstress

No. program	Urutan pembebanan	ΔK_1 (MPa \sqrt{m})	ΔK_2 (MPa \sqrt{m})	R_{ac}	R_{ac}^*	$\frac{R_{ac}}{R_{ac}^*}$
1	4(A+6D+2C)	A2,9;D1,7; C3,7	A16,8;D18,1; C18,2	29	24	1,20
2	3(A+2C+6E+5B)	A2,9;C3,8; E3,8;B1,7	A16,9;C18,1; E17,9;B18,1	24	22	1,09
3	3(10E+2C+A)	E2,7;C3,8; A2,9	E18,1;C18,2; A16,9	15	15	1,00
4	4(2D+3B+10E)	D2,4;B2,4; E2,7	D17,9;B18,2; E17,9	25	20	1,20

5. Observasi fraktografi

Contoh analisis fraktografi gambar 8 dengan banyak level intermittent overstress menunjukkan bahwa nilai sebenarnya lebar beach mark dari pengujian (Δl) dibandingkan dengan lebar beach mark dari hasil perhitungan prediksi dari data 2 level intermittent overstress (Δl^*) hasilnya $\cong 1$ (daftar IV). Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa perhitungan prediksi dapat dipakai secara umum tanpa susah payah mengadakan pengujian banyak level intermittent overstress.



Gambar 8. Fraktografi banyak level intermittent overstress (lebar beach mark dapat dilihat pada daftar IV)

Daftar IV. Contoh nilai sebenarnya dan prediksi lebar beach mark

No. program	2 dalam daftar III			
Nilai sebenarnya lebar beach mark Δl (μm)	4,80	4,00	3,80	3,40
Nilai prediksi lebar beach mark Δl^* (μm)	3,96	4,00	3,78	4,00
$\Delta l/\Delta l^*$	1,21	1,00	1,00	0,85

KESIMPULAN

Dari hasil-hasil penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan :

1. Pengujian perambatan retak lelah dengan intermittent overstress dapat menyebabkan percepatan retak (R_{ac}) \cong 60 pada $\Delta K_I/\Delta K_{Ih} = 0,7$. Tegangan rata-rata tarik yang lebih tinggi menghasilkan R_{ac} lebih kecil.

2. Penutupan retak (pembukaan retak, K_{op}) tidak banyak berpengaruh pada R_{ac} .

3. Histori tegangan peretakan awal hanya berpengaruh pada awal pengujian intermittent overstress.

4. Pengujian banyak level intermittent overstress dapat dilakukan dengan mengkombinasikan 2 level intermittent overstress. Hal ini dibuktikan dengan nisbah percepatan eksperimen dibandingkan dengan prediksi $R_{ac}/R_{ac} \cong 1$ dan lebar beach mark eksperimen dibandingkan dengan prediksi $\Delta l/\Delta l \cong 1$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Prof. Koterazawa dan staf yang telah membimbing dalam penelitian ini, Pemerintah Indonesia yang telah mengizinkan peneliti belajar di Jepang dan Pemerintah Jepang atas dana yang telah disediakan untuk pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM-E647, 1988, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", pp. 1-12, ASTM.
- Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure", Damage Tolerance in Aircraft Structure, ASTM STP 486, pp. 230-242, American Society for Testing Materials.
- Fuchs, H.O. and Stephens, R.I., 1980, "Metal Fatigue in Engineering", pp. 56-98, John Wiley & Sons, New York.
- Koterazawa, R., 1985, "Acceleration of Fatigue and Creep Crack Propagation under Variable Stresses, Intl. Conf. and Exp. on Fatigue, Corrosion Cracking, Fract. Mech. and Failures Analysis", pp. 187-193, Salt Lake City, Utah, USA.

- Koterazawa, R. and Nosho, T., 1992, "Acceleration of Crack Growth under Intermittent Overstressing in Different Environments", Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 15, (No.1), 103-113.
- Koterazawa, R. and Shimo, D., 1976, "Fatigue Crack Propagation and Cumulative Damage under Periodic Overstressing", Zairyou, 25, (No.276), 875-880.
- Mudjijana, 1991, "Nidan oyobi Tadan Hendou Ouryoku ka ni okeru Hirou Kiretsu Denpa", Thesis Master, pp. 42-67, University of Tsukuba, Japan (in Japanese).
- Tada, H., Paris, P.C., and Irwin, G.R., 1973, "The Stress Analysis of Cracks Handbook", Del Research Corp., Hellertown, P.A.