

# KARAKTERISTIK LELAH POROS BAJA S45C BERTAKIK V AKIBAT BEBAN AMPLITUDO KONSTAN DAN BEBAN TIBA-TIBA

Kuncoro Diharjo<sup>1</sup>, Jamasri<sup>2</sup>

## ABSTRACT

*This study aims to investigate the effects of sudden loads on the fatigue characteristic 60° V-notched shaft of S45C steel under constant and sudden amplitude loads, and to identify the fracture surface.*

*The fatigue tests were performed using rotary bending machine that was equipped by the sudden load equipment. The cyclic load was varied in three configurations, i.e constant amplitude load and two combination of sudden loads. The combination of sudden loads were designed with 84 and 52 cycles ON and OF periodically. The sudden load causes the stress increase to 76 MPa. The stress concentration factor on the V-notched shaft was determined using finite element model.*

*The S-N curve of three load configurations shows that stress amplitude of 154 MPa (35%  $\sigma_y$  or 21%  $\sigma_u$ ), 108 MPa (25%  $\sigma_y$  or 15%  $\sigma_u$ ) and 28 MPa (6%  $\sigma_y$  or 4%  $\sigma_u$ ) cause the materials fail above  $1,6 \cdot 10^6$  cycles. In that cycle, the value of stress amplitude under combination loads decreases 70,13% and 18,18% compared to constant amplitude load. The fracture surfaces under sudden load have rougher and more brilliance of beach mark. Similarly, the failures under higher stress have rougher fracture surface.*

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Kegagalan akibat beban dinamis disebut dengan kegagalan lelah. Kegagalan ini mempunyai andil sekitar 50-90% dari seluruh kegagalan mekanis. Pada tahun 1960-1970, di Negeri Inggris tercatat 200 jiwa manusia meninggal karena kecelakaan yang disebabkan oleh kegagalan lelah pada bagian roda dan poros kendaraan.

Mayoritas peralatan teknologi bekerja menggunakan komponen putar dinamis, seperti poros. Umur poros dipengaruhi oleh jenis beban dan konsentrasi tegangan ( $K_t$ ).

Beban yang diderita poros dapat berupa beban tetap, beban kejut atau kombinasi beban-beban tersebut.

Kurva S-N merupakan salah satu kurva untuk memprediksi umur lelah material. Berbagai jenis material poros telah beredar di pasaran, termasuk baja S45C. Oleh karena itu, penelitian umur lelah baja poros S45C yang menderita konsentrasi tegangan akibat beban kombinasi penting untuk dilakukan. Penaksiran umur poros untuk menjamin aman adalah pekerjaan penting di masa sekarang dan yang akan datang.

### Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh penambahan beban tiba-tiba terhadap karakteristik lelah baja poros S45C bertakik V dengan sudut takik 60° yang diberi beban amplitudo konstan dan mengidentifikasi penampang patahannya.

### TEORI

Kegagalan lelah dapat ditunjukkan oleh aspek-aspek sebagai berikut :

1. Sisi-sisi retak awal jelas (*initial crack*).
2. Adanya perambatan retak yang ditunjukkan oleh adanya *beach mark*.
3. Daerah patah akhir jelas (*final failure*).

### Kurva S-N

Hasil pengujian kelelahan umumnya dipaparkan dalam bentuk kurva S-N, yang dinyatakan dalam skala semi-log atau skala log. Umur lelah adalah jumlah siklus beban dinamis untuk melengkapi tahapan kelelahan, sedangkan batas ketahanan lelah adalah tegangan dimana material mampu menahan beban dinamis dalam waktu yang tidak terbatas tanpa menunjukkan tanda-tanda kerusakan. Persamaan umum kurva S-N adalah sebagai berikut:

<sup>1</sup> Kuncoro Diharjo, S.T., M.T., Dosen Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik UNS

<sup>2</sup> Ir. Jamasri, Ph.D, Dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UGM.

$$NS_a^m = C \quad (1)$$

dengan:  $N$  = siklus lelah,  
 $S_a$  = amplitudo tegangan,  
 $C$  dan  $m$  adalah konstanta material.

### Beban Uji Lelah

Beban uji lelah adalah beban dinamis yang dapat dikontrol dengan tegangan maupun regangan. Pengujian lelah dilakukan dengan cara memberikan *stress level* tertentu sehingga spesimen uji patah pada siklus tertentu pula, kemudian *stress level* diturunkan dan seterusnya.

Untuk mendapatkan kurva S-N dibutuhkan 8–12 spesimen (Dieter, 1986). *Stress level* yang penting dalam pengujian kelelahan adalah tegangan maksimum ( $S_{mak}$ ) dan tegangan minimum ( $S_{min}$ ), amplitudo tegangan ( $S_a$ ), dan rasio tegangan ( $R$ ), seperti pada persamaan berikut (Fuch, 1980):

$$S_m = \frac{S_{mak} + S_{min}}{2} \quad (2)$$

$$S_{eff} = S_a = S_{mak} - S_m \quad (3)$$

$$R = \frac{S_{min}}{S_{mak}} \quad (4)$$

### Beban Lebih

Beban lebih tarik menyebabkan pelunakan butiran di ujung retak, sedangkan beban lebih tekan menyebabkan pengerasan di ujung retak. Butiran lunak di ujung retak merupakan struktur yang menghambat perambatan retak. Kehadiran beban lebih tekan berulang menyebabkan terjadinya *cyclic hardening*, sehingga merubah butiran lunak menjadi keras dan getas. Radius ujung retak menjadi runcing dan retak merambat lebih cepat. Berdasarkan analisis tersebut di atas maka dapat dikatakan bahwa beban lebih tekan akan menurunkan umur lelah material (DuQuesnay dkk, 1995).

Tegangan yang dirasakan batang ketika beban uniaksial tiba-tiba jatuh adalah dua kali tegangan statis akibat beban tersebut. Penambahan beban tiba-tiba pada pengujian *rotary bending* menyebabkan penambahan momen tiba-tiba pula, sehingga material menderita tegangan lebih yang dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

- Momen akibat beban tetap :

$$M_1 = M_w \quad (5)$$

- Momen akibat beban tetap dan beban tiba-tiba saat jatuh :

$$M_2 = M_w + 2M_w' \quad (6)$$

- Momen akibat beban tetap dan beban tiba-tiba:

$$M_3 = M_w + M_w' \quad (7)$$

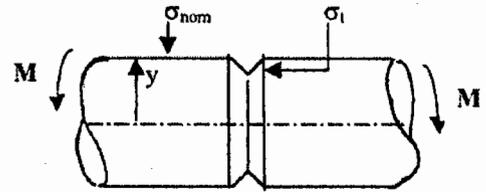
dengan catatan :

$M_w$  = momen akibat beban tetap,

$M_w'$  = momen akibat beban tiba-tiba.

### Konsentrasi Tegangan

Kehadiran takik menyebabkan munculnya konsentrasi tegangan ( $K_t$ ). Harga  $K_t$  pada poros bertakik yang menderita momen lentur dapat dihitung dengan persamaan (8), sedangkan tegangan maksimum di ujung takik dihitung dengan persamaan (9) sebagai berikut (Benham dan Crawford, 1987) :



Gambar 1. Poros bertakik menderita momen lentur

$$K_t = \frac{\sigma_T}{\sigma_{nom}} \quad (8)$$

$$\sigma_T = K_t \cdot \sigma_{nom} = K_t \cdot \frac{My}{I} = K_t \cdot \frac{M \cdot d/2}{\pi/64 \cdot d^4} = K_t \cdot \frac{32 \cdot M}{\pi \cdot d^3} \quad (9)$$

Dengan catatan :

$\sigma_{nom}$  = tegangan nominal.

$\sigma_t$  = Tegangan di ujung takik (maks).

$y$  = jarak dari sumbu poros ( $1/2d$ ).

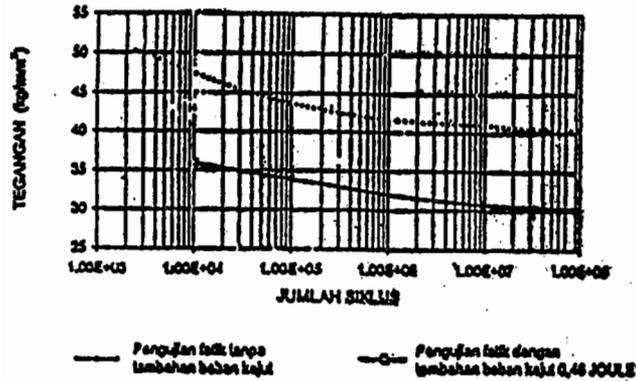
$I$  = momen ketahanan lengkung.

Kekuatan lelah semakin turun apabila terdapat alat konsentrasi tegangan, seperti takik. Pengaruh konsentrasi tegangan tersebut biasanya diteliti dengan menggunakan benda uji yang bertakik V atau takik lingkaran.

### Perilaku Baja S45C

Semakin tinggi kekuatan tarik material semakin tinggi pula batas ketahanan lelahnya. Hal ini dibuktikan oleh Goto dan Nisitani (1994) dengan pengujian lelah momen lentur putar poros baja S45C dan SNCM439 dengan perlakuan *normalizing* dilanjutkan *quenching* dan *tempering*. Baja S45C dengan kekuatan tarik 833 MPa mempunyai batas ketahanan lelah 450 MPa ( $54\% \sigma_u$ ), sedangkan baja SNCM439 dengan kekuatan tarik 1.002 MPa mempunyai batas ketahanan lelah 510 MPa ( $51\% \sigma_u$ ).

Berbagai konstruksi mesin menggunakan poros baja S45C tanpa perlakuan, sehingga perlu diketahui karakteristik lelahnya. Wardoyo (1996) membuktikan bahwa penambahan energi impak 0,46 joule menurunkan batas ketahanan lelah poros baja S45C tanpa perlakuan dengan  $K_t = 1$ , sebesar 70% dibanding beban amplitudo konstan,  $R=-1$ , pada pengujian *rotary bending*, seperti ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Kurva S-N poros baja S45C akibat momen lentur putar,  $R=-1$  (Wardoyo, 1996)

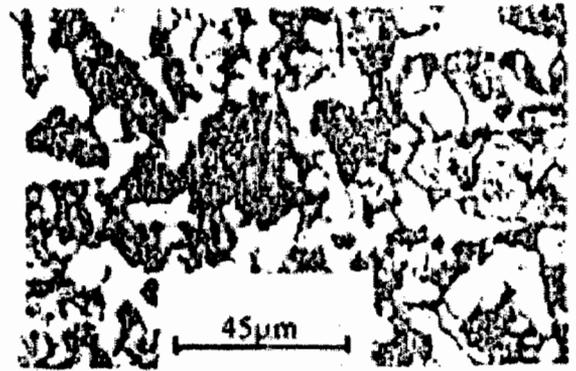
## CARA PENELITIAN

### Bahan Penelitian

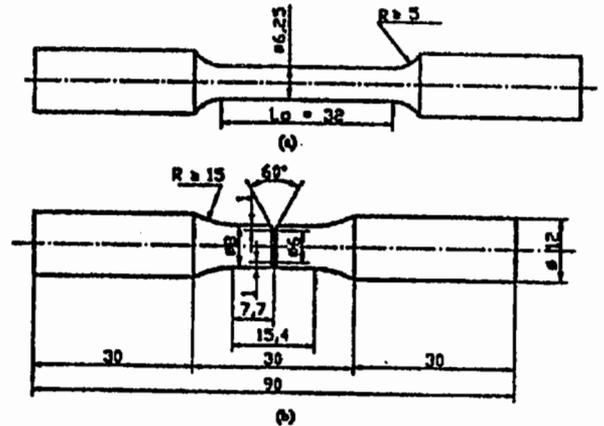
Bahan penelitian adalah baja poros S45C tanpa perlakuan panas, dengan komposisi kimia seperti ditunjukkan pada tabel 1. Struktur mikro material uji ditunjukkan pada gambar 3. Material tersebut mempunyai kekuatan luluh 436 MPa, kekuatan tarik 721 MPa, dan modulus elastisitasnya 132,86 GPa. Pembuatan spesimen uji tarik mengacu pada ASTM A-370, sedangkan spesimen uji lelah disesuaikan dengan alat uji seperti ditunjukkan pada gambar 4. Mesin uji utama yaitu mesin *rotary bending* yang beroperasi pada putaran 2850 rpm dan dilengkapi peralatan tambahan untuk mengatur naik-turun beban tiba-tiba, serta software *Catia Elfini* untuk menghitung faktor konsentrasi tegangan. Peralatan pendukung yang lain adalah alat uji tarik statis, alat uji kekerasan, alat uji metalografi dan spektrometer.

Tabel 1. Komposisi unsur baja S45C.

Unsur	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Kandungan (%)	97,84	0,451	0,301	0,283	0,02	0,009	0,047	0,017	0,04	0,007
Unsur	B	Co	Cu	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W	
Kandungan (%)	0,002	0,013	0,126	0,054	0,005	0,032	0,133	0,190	0,25	



Gambar 3. Struktur mikro material uji.



Gambar 4. Spesimen uji (a) tarik standar ASTM A-370 dan (b) lelah *rotary bending*.

### Prosedure Penelitian

Faktor konsentrasi tegangan ( $K_t$ ) dihitung menggunakan model elemen hingga dengan *software Catia Elfini*. Harga  $K_t$  digunakan untuk menghitung besarnya beban tetap ( $w$ ) yang menyebabkan tegangan di ujung takik mencapai tegangan luluh, dan besarnya beban tiba-tiba ( $w'$ ) direncanakan kurang dari 0,5  $w$ .

Pola pembebanannya terdiri dari beban amplitudo konstan dan dua variasi beban tiba-tiba. Beban tiba-tiba naik-turun diangkat oleh *cam* berbentuk oval, seperti ditunjukkan pada gambar 5. Penambahan beban tiba-tiba diatur dengan menaikkan atau menurunkan beban tetap sehingga waktu beban tiba-tiba *ON* dan *OF* untuk kedua pola beban kombinasi adalah 84 dan 52 siklus secara periodik. Pengaturan waktu kerja beban tiba-tiba tersebut dikontrol dengan *dial indicator* dan *stopwatch*.

Laju penambahan beban tiba-tiba dan konfigurasi pembebanan yang dilakukan dalam penelitian ini ditunjukkan dalam gb.6 dan gb.7.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Faktor Konsentrasi Tegangan dan Kurva S-N

Distribusi tegangan spesimen uji yang menderita momen lentur dan dianalisis dengan metoda elemen hingga untuk menghitung harga  $K_t$ , ditunjukkan seperti pada gambar 8. Besarnya  $K_t$  dihitung dengan menggunakan persamaan (8) adalah 3,10.

Persamaan kurva S-N untuk ketiga konfigurasi beban seperti yang ditunjukkan pada gambar 7 adalah sebagai berikut :

- Uji kelelahan dengan konfigurasi siklus beban 1 (kurva A)

$$N.S_a^{4,2776} = 5.10^{15}$$

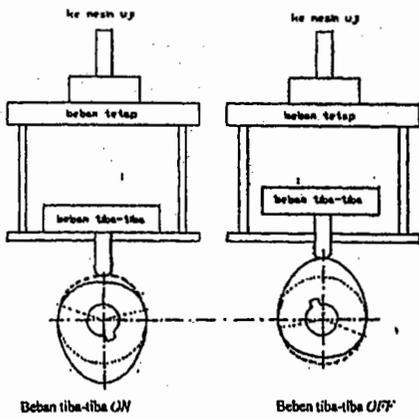
- Uji kelelahan dengan konfigurasi siklus beban 2 (kurva B)

$$N.S_a^{4,4364} = 2.10^{15}$$

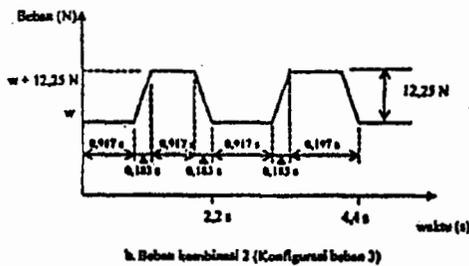
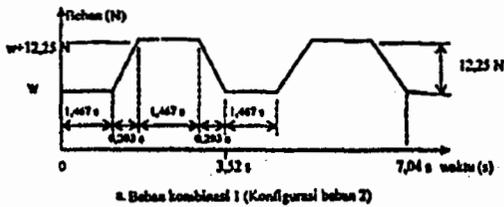
- Uji kelelahan dengan konfigurasi siklus beban 3 (kurva C)

$$N.S_a^{2,2465} = 1.10^{10}$$

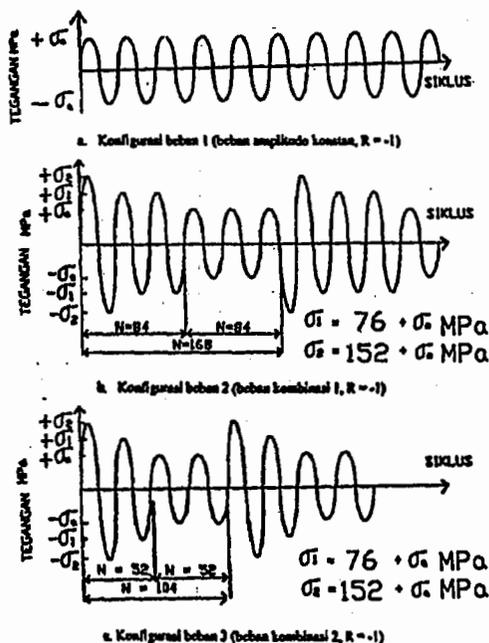
Berdasarkan hasil perhitungan teoritis, tegangan di ujung takik mencapai tegangan luluh (436 MPa) pada saat besarnya beban amplitudo konstan ( $w$ ) = 7,07 kg<sub>f</sub>, dan besarnya beban tiba-tiba ( $w'$ ) ditentukan 1,225 kg<sub>f</sub> (17,35% dari  $w$ ). Dengan mengasumsikan saat penambahan tegangan tidak terjadi efek beban impact, dan memenuhi kriteria teori mekanika bahan tentang beban tiba-tiba maka besarnya tegangan lebih di ujung takik sesaat ketika beban tiba-tiba ON adalah 152 MPa dan kemudian menurun menjadi 76 MPa hingga beban tersebut OFF.



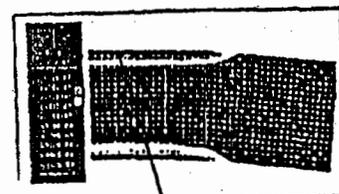
Gambar 5. Mekanisme kerja cam.



Gambar 6. Laju penambahan beban tiba-tiba dan



Gambar 7. Konfigurasi beban uji lelah



$$\sigma_{nom} = 198.10^2 \text{ MPa}$$

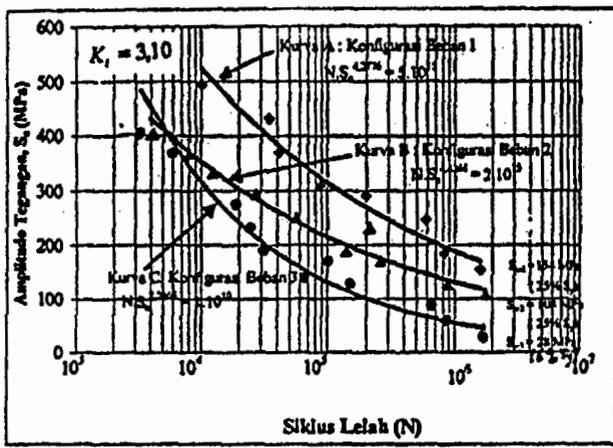
$$\sigma_{mak} = 614.10^2 \text{ MPa}$$

$$K_t = \frac{\sigma_{mak}}{\sigma_{nom}} = \frac{614.10^2}{198.10^2} = 3,10$$



$K_t$  diasumsikan 3,10

Gambar 8. Distribusi tegangan poros bertakik V dengan sudut takik 60° akibat momen lentur.



Gambar 9. Kurva S-N Pengujian rotary bending akibat beban amplitudo konstan dan beban tiba-tiba,  $R = -1$ ,  $K_t = 3,10$

Gambar 9 menunjukkan bahwa material uji akan mengalami kegagalan di atas  $1,6 \cdot 10^6$  siklus untuk konfigurasi beban 1, 2 dan 3 masing-masing pada saat stress level ( $S_a$ ) sebesar 154 MPa (35%  $\sigma_y$  atau 21%  $\sigma_u$ ), 108 MPa (25%  $\sigma_y$  atau 15%  $\sigma_u$ ) dan 28 MPa (6%  $\sigma_y$  atau 4%  $\sigma_u$ ). Kurva A mempunyai umur lelah paling tinggi karena spesimen uji tidak menderita tegangan lebih.

Umur lelah kurva B dan kurva C lebih rendah dibanding kurva A, karena spesimen uji menderita tegangan lebih tarik dan tekan secara berulang-ulang. Tegangan lebih tekan menyebabkan butiran disekitar retak mengeras (*cyclic hardening*), sehingga saat menderita tegangan tarik ujung retak menjadi runcing. Hal ini menyebabkan terjadinya deformasi plastis yang terkonsentrasi secara lokal dan mempermudah terjadinya slip antar butir, akibatnya retak merambat lebih cepat. Semakin tinggi frekuensi penambahan beban tiba-tiba, semakin tinggi pula frekuensi terjadinya *cyclic hardening* dan deformasi plastis, akibatnya retak merambat lebih cepat. Umur lelah spesimen uji yang menderita konfigurasi beban 3 menjadi sangat pendek.

Kurva B dan kurva C bertemu di titik pada amplitudo tegangan ( $\sigma_a$ ) 400 Mpa karena material menderita deformasi plastis yang terkonsentrasi secara lokal yang besar, sehingga pengaruh tegangan amplitudo konstan terhadap umur lelah lebih dominan dibandingkan dengan frekuensi naik-turun beban tiba-tiba.

#### Permukaan Patahan.

Patahan uji tarik statis menunjukkan ciri-ciri patahan liat yaitu adanya reduksi luas penampang sebesar 55,99%, permukaan patahan yang berbentuk

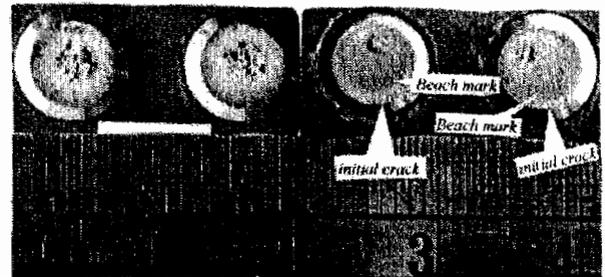
cawan dan berserabut, seperti ditunjukkan pada gambar 10a. Hadirnya takik pada penujian tarik statis mengubah perilaku material ulet menjadi getas, seperti ditunjukkan pada gambar 10b. Hal ini disebabkan oleh peningkatan konsentrasi tegangan yang tinggi di ujung takik.

Penampang patah lelah menunjukkan *initial crack*, *beach mark* dan *final failure*, seperti ditunjukkan pada gambar 11, gambar 12 dan gambar 13. *Initial crack* muncul di ujung takik yang ditunjukkan oleh garis melingkar di bagian tepi, sedangkan *beach mark* ditunjukkan oleh bayangan garis yang membentuk lingkaran atau ellips yang terletak di antara *initial crack* dan *final failure*. Daerah *final failure* ditunjukkan oleh patahan yang mengkilap, kasar dan berserabut. Tegangan yang besar menyebabkan *beach mark* yang terjadi lebih kasar, daerah *final failure* yang semakin besar dan permukaan patahan yang lebih kasar, karena terjadi tahapan perambatan retak yang lebih panjang dan tidak stabil



a. Specimen uji tarik standar ASME A-370 b. Spesimen uji tarik

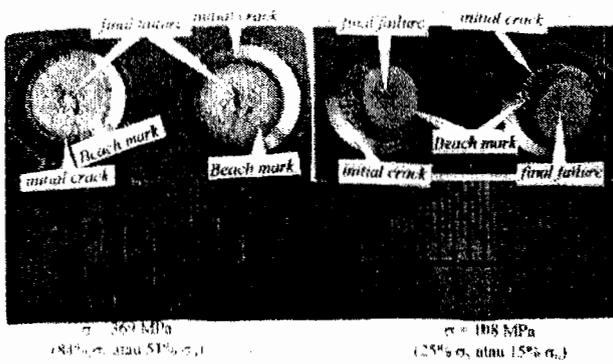
Gambar 10. Permukaan patahan uji tarik statis.



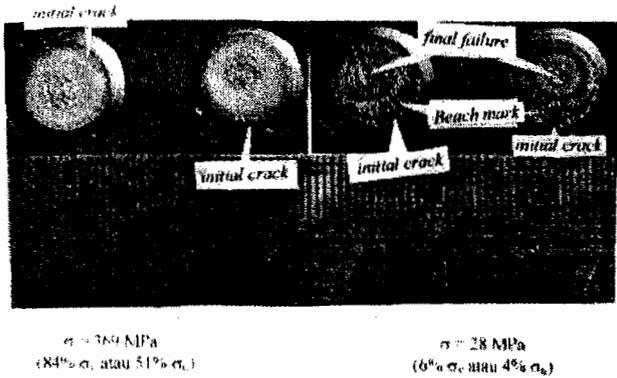
$\sigma = 394 \text{ MPa}$   
(112%  $\sigma_y$  atau 69%  $\sigma_u$ )

$\sigma = 154 \text{ MPa}$   
(35%  $\sigma_y$  atau 21%  $\sigma_u$ )

Gambar 11. Permukaan patahan uji lelah konfigurasi beban 1.



Gambar 12. Permukaan patahan uji lelah konfigurasi beban 2.



Gambar 13. Permukaan patahan uji lelah konfigurasi beban 3.

Mayoritas perpatahan akhir cenderung ke tepi, karena dipengaruhi oleh posisi munculnya *initial crack* dan homogenitas material. Titik pertama kali muncul *initial crack* umumnya merupakan titik terjauh dengan daerah *final failure*. Garis ellips pada gambar 12.b dan gambar 13.b menunjukkan proses penundaan uji lelah. Hal ini dapat disebabkan oleh adanya *internal stress* yang bekerja selama penundaan pengujian.

## KESIMPULAN

Dari uraian pembahasan di atas, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Kurva S-N dari ketiga konfigurasi beban menunjukkan bahwa *stress level* ( $S_a$ ) sebesar 154

MPa ( $35\% \sigma_y$  atau  $21\% \sigma_u$ ), 108 MPa ( $25\% \sigma_y$  atau  $15\% \sigma_u$ ) dan 28 MPa ( $6\% \sigma_y$  atau  $4\% \sigma_u$ ) menyebabkan spesimen uji mengalami kegagalan di atas  $1,6 \cdot 10^6$  siklus pembebanan. Pada siklus tersebut, besarnya *stress level* akibat beban kombinasi menurun 70,13% dan 18,18% dibandingkan dengan beban amplitudo konstan.

2. Besarnya perbandingan *stress level* spesimen bertakik dengan spesimen tak bertakik sebesar 38,5% pada  $1,6 \cdot 10^6$  siklus lelah menunjukkan penurunan umur lelah spesimen uji akibat adanya konsentrasi tegangan sebesar 3,10.
3. Penambahan beban tiba-tiba secara periodik menyebabkan *beach mark* yang lebih kasar dan lebih mengkilap pada permukaan patahan. Hal yang sama, kegagalan akibat tegangan yang lebih tinggi juga menunjukkan penampang patahan yang lebih kasar.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM A 370, 1987, "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Product".
- Dieter, 1986, "Mechanics of Metallurgy", Jilid 1 dan 2, McGraw-Hill Inc., Meryland.
- DuQuesnay D.L., MacDougall C., Dayabeh A., and Topper T.H., 1995, "Notch Fatigue Behavior as Influenced by Periodic Overloads", Int. J. Fatigue, Vol. 17, No. 2. pp. 91-99.
- Fuchs H.O. and Stephens R.L., 1980, "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley & Sons, USA.
- Goto M. and Nissitani H., 1994, "Fatigue Life Prediction of Heat-Treated Carbon Steel and Low Alloy Steels Based on Small Crack Growth Law", Fatigue and Fract. Engng. of Mater. and Struct. Vol. 17, No. 2, pp. 171-185.
- JIS, 1981, "Steel and Cast Iron Product", Japanese International Standards, Jepang.
- Wardoyo B., 1996, "Pengaruh Beban Kejut Berulang Sebagai Tambahan Beban pada Pengujian Fatik Baja Poros" Skripsi, Jurusan Teknik Mesin FT UGM Yogyakarta.