

# PENGUJIAN LELAH SIKLUS RENDAH BESI COR KELABU

Agus Suprihanto, Dwi Basuki Wibowo, Djoeli Satrijo

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Diponegoro  
Kampus Undip Tembalang, Semarang 50275, Indonesia  
Phone: +62-24-7460059, FAX: +62-24-7460058, E-mail: agussupri@yahoo.com

## Abstrak

Bus dan truk merupakan moda transportasi darat untuk penumpang dan barang yang terpenting. Keandalan operasional bus/truk ditentukan oleh komponen-komponen pendukungnya misalnya tromol rem. Komponen ini dibuat dari besi cor kelabu. Pada saat pengereman, energi kinetik diserap menjadi panas lewat gesekan antara kanvas rem dengan tromol rem. Pola pengereman yang berbeda-beda, menyebabkan tromol rem ini menerima beban dinamis. Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui kekuatan lelah siklus rendah besi cor kelabu yang akan digunakan untuk tromol rem bus/truk.

Pada penelitian ini besi cor kelabu FC200 dan 3 paduan besi cor kelabu FC200 dengan Cr (0,23%, 0,32% & 0,47% wt) dan Cu (0,6%-0,7%) dilakukan pengujian lelah siklus rendah. Dimensi spesimen uji mengacu pada standar ASTM E739. Sebanyak 60 spesimen berdiameter 8mm diuji pada lelah pada servo pulser dengan amplitudo regangan antara 0,15 s/d 0,5%. Spesimen dibuat dengan mesin CNC dengan tujuan meminimalkan efek proses pemesinan terhadap sifat mekanisnya.

Data pengujian diolah menggunakan metoda yang diajukan oleh Downing (1983) and Fash (1982). Hasil pengujian menunjukkan bahwa koefisien kekuatan lelah (A) antara 2,336 –2,896 dan eksponen kekuatan lelah antara –0,251 to –0,266.

Kata kunci : besi cor kelabu, pengujian lelah siklus rendah, Downing method

## 1. PENDAHULUAN

Bus/truk adalah moda transportasi darat untuk penumpang dan barang yang terpenting. Keandalan operasional bus/truk ditentukan oleh sistem-sistem pembentuknya. Sistem rem merupakan salah satu sistem yang penting dalam bus/truk. Sistem rem yang digunakan pada bus/truk umumnya menggunakan rem tromol pada keempat rodanya. Rem ini berfungsi untuk mengatur laju kendaraan dengan cara mengubah energi kinetik menjadi energi panas akibat adanya gesekan antara tromol rem dengan kanvas rem. Beban angkut yang berat dan terkadang kelebihan beban menjadikan tromol rem mengalami pembebanan yang berlebih.

Tromol rem bus/truk dibuat dari besi cor kelabu dengan proses pengecoran dan diikuti proses pemesinan untuk mencapai dimensi akhir. Besi cor kelabu merupakan material teknik yang banyak digunakan pada saat ini. Dalam pemakaiannya material ini seringkali menerima beban dinamis seperti halnya untuk tromol rem bus/truk. Data pengujian perilaku besi cor kelabu terhadap beban dinamis tidak banyak diteliti<sup>[1]</sup>. Informasi yang terbatas tersebut menyebabkan besi cor kelabu lazimnya tidak dikenakan beban dinamis, atau apabila ada maka besarnya beban yang bekerja tidak melebihi 25% kekuatan tariknya.<sup>[2]</sup> Guna meningkatkan sifat mekaniknya, dilakukan pepaduan dengan kromium dan tembaga sampai persentase tertentu.

Pada saat dibebani, ujung grafit pada besi cor kelabu menjadi tempat terjadinya konsentrasi tegangan. Oleh karena itu, meskipun beban yang diberikan rendah, besi cor kelabu telah mengalami plastis. Hal ini sangat menyulitkan untuk menentukan seberapa besar regangan elastis dan plastisnya. Hal ini menyebabkan kurva tegangan-regangan untuk besi cor kelabu ini tidak dapat didekati dengan persamaan *Ramberg-Osgood*. Persamaan ini menyatakan bahwa regangan total pada kurva regangan-tegangan dapat dinyatakan sebagai :

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p = \sigma/E + (\sigma/K)^{1/n} \quad 1$$

Dalam persamaan tersebut  $\epsilon_t$ ,  $\epsilon_e$ , dan  $\epsilon_p$  menyatakan besarnya regangan total, elastis dan plastis. Besarnya regangan elastis dapat dinyatakan sebagai  $\sigma/E$  dimana  $\sigma$  menyatakan besarnya tegangan pada daerah elastis dari kurva tarik dan  $E$  adalah modulus elastisitas bahan. Regangan plastis dapat dinyatakan sebagai  $(\sigma/K)^{1/n}$ , dimana  $\sigma$  menyatakan tegangan, “K” adalah koefisien kekuatan dan “n” adalah koefisien pengerasan regangan.

Menyadari bahwa besi cor kelabu memiliki karakteristik yang unik, Downing (1983) mengajukan usulan metode baru untuk material ini<sup>[3]</sup>. Kurva regangan tegangan besi cor kelabu diperoleh dengan memodifikasi persamaan *Ramberg-Osgood* menjadi berikut :

$$\epsilon_t = \epsilon_S + \epsilon_R = \sigma / (E_o + m\sigma) + (\sigma/K)^{1/n} \quad 2$$

Pada persamaan ini regangan total terdiri dari *secant strain* ( $\epsilon_S$ ) yang merupakan regangan elastis dan regangan plastis dan *remaining plastic strain* ( $\epsilon_R$ ).  $E_o$  pada persamaan tersebut adalah *secant modulus* mula-mula dan “m” adalah kemiringan kurva *secant modulus* vs tegangan pada bagian linier pada kurva alir dari rendah sampai menengah. Dengan demikian harga *secant strain* diperoleh dengan membagi tegangan dengan *secant modulus* pada tegangan tersebut. Dengan menganalogikan hal tersebut ke dalam persamaan *Romberg-Osgood* sehingga untuk besi cor kelabu persamaannya berbentuk :

$$\sigma = K (\epsilon_R)^n \quad 3$$

Dengan demikian respon besi cor kelabu terhadap beban monotonik dinyatakan dengan 4 parameter ( $E_o$ , m, K dan n). Harga  $E_o$  dan “m” diperoleh dari regresi linier terhadap kurva *secant modulus* vs tegangan. Kedua harga ini selanjutnya digunakan untuk menghitung  $\epsilon_S$ . Harga  $\epsilon_R$  dapat diperoleh dengan mengurangkan regangan total  $\epsilon_t$  dengan  $\epsilon_S$ . Harga  $\epsilon_R$  yang diperoleh digunakan untuk menghitung harga K dan “n”. Sifat tarik dan tekan besi cor berbeda, maka untuk menggambarkan respon material besi cor terhadap beban tarik dan tekan dibutuhkan 7 parameter ( $E_o$ ,  $m_T$ ,  $K_T$ ,  $n_T$ ,  $m_C$ ,  $K_C$  dan  $n_C$ ). Dimana subscript “T” dan “C” menunjukkan tarik dan tekan.

Eksperimen akhir yang dilakukan ditujukan untuk mengetahui respon *cyclic stress-strain* yang merupakan suatu fungsi yang tergantung pada harga *unloading modulus* ( $E_U$ ) pada penerapan tegangan yang maksimum. Gilbert dan Kemp (1980) menunjukkan bahwa *unloading modulus* merupakan fungsi yang menurun secara linier dari tegangan maksimum yang mana *unloading* mulai terjadi<sup>[4]</sup>. Downing melakukan regresi terhadap kurva *unloading modulus* vs tegangan maksimum sebagaimana dinyatakan pada persamaan berikut :

$$E_U = E_o + m_U \sigma_{max} \quad 4$$

Dimana  $m_U$  dapat diperoleh dari pemberian pembebanan secara bertahap (*incremental loading test*) Untuk mengestimasi kurva *cyclic stress strain*, Downing menggunakan 8 parameter diatas untuk memodelkan pengaruh tiap-tiap faktor yang mengontrol respon tegangan-regangan pada besi cor akibat pembebanan siklus. Analisis kelelahan dengan metode yang diusulkan Downing menggunakan parameter Smith-Watson-Topper (SWT). Fash (1982) menunjukkan hubungan linier logaritmik antara parameter SWT dengan umur untuk besi cor kelabu. Hubungan tersebut secara sederhana dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut<sup>[5]</sup> :

$$SWT = \sigma_{max} * \epsilon_t / 2 = A (N_f)^b \quad 5$$

dimana

A adalah koefisien umur kelelahan

b adalah eksponen umur kelelahan

Hanya 2 parameter yang dibutuhkan untuk mengestimasi umur kelelahan untuk besi cor. Penggunaan hubungan yang diusulkan oleh Fash (1982) ini menghindari problem klasik penentuan besarnya regangan elastis dan plastis pada besi cor. Dimana tahapan ini merupakan pokok dari analisis data pengujian lelah dengan metode *strain based*. Lebih lanjut parameter SWT juga menyediakan suatu mekanisme yang siap digunakan untuk menganalisis pengaruh tegangan rata-rata pada analisis kelelahan.

## 2. PROSEDUR PENGUJIAN

Besi cor kelabu yang digunakan dibuat pada tungku induksi frekuensi menengah. Komposisi kimia besi cor kelabu yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 1. Masing-masing bahan dibuat 3 buah spesimen uji tarik dan 15 buah spesimen uji lelah. Dimensi spesimen uji tarik berdiameter 6,25mm dibuat menurut standar ASTM E8. Dimensi spesimen uji lelah mengacu pada standar ASTM E466 dengan tipe diameter seragam 8mm. Pembuatan spesimen menggunakan mesin bubut CNC dengan tujuan meminimalkan pengaruh parameter proses pemotongan terhadap sifat mekanik spesimen uji.

Tabel 1. Hasil pengujian komposisi kimia (%berat)

% Unsur	FC200	Paduan I	Paduan II	Paduan III
Fe	balance	balance	balance	balance
C	3,46	3,53	3,54	3,67
Si	2,33	2,50	2,70	2,84
Mn	0,348	0,403	0,422	0,456
P	0,135	0,163	0,176	0,232
S	0,181	0,172	0,165	0,161
Cr	0,061	0,231	0,324	0,468
Cu	0,116	0,549	0,647	0,775

Pengujian tarik dan pengujian lelah dilakukan pada servopulser MTS810. Kecepatan *cross head* pada pengujian tarik ditetapkan 0,5mm/menit. Penentuan pembebanan pada saat pengujian lelah didasarkan pada 2 metode. Metode pertama adalah dengan memberikan pembebanan pada spesimen uji yang secara khusus dipersiapkan untuk uji coba. Pembebanan yang diterapkan diharapkan dapat memberikan rentang data  $<10^4$  siklus. Metode ke dua adalah dengan memperhatikan besarnya regangan besi cor yaitu kurang dari 2%. Dengan demikian, pembebanan amplitudo regangan yang akan diterapkan berkisar antara 0,15% s/d 0,5%.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian tarik ditunjukkan pada tabel 2. Dari tabel 1 dan 2 ini dapatlah diketahui apabila penambahan kromium dan tembaga mampu meningkatkan kekuatan tarik besi cor kelabu FC200 mencapai 20%. Evaluasi pengaruh penambahan kromium dan tembaga terhadap perilaku lelah siklus rendah ini dapat diperoleh dengan membandingkan kurva-kurva yang terbentuk dalam satu grafik seperti ditunjukkan pada gambar 1.

Tabel 2. Hasil pengujian tarik

No	Material Uji	Pengujian ke			Rata-rata (MPa)
		1	2	3	
1	FC200	195	214	189	198
2	Paduan I	222	242	212	226
3	Paduan II	240	231	214	228
4	Paduan III	235	223	236	231

Gambar 1 menunjukkan bahwa garis regresi untuk material FC200 terletak paling bawah. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan lelah FC200 lebih rendah dibandingkan dengan 3 paduan lainnya. Hasil ini menunjukkan konsistensi dengan data kekuatan tariknya dimana kekuatan tarik FC200 lebih rendah dibandingkan dengan ketiga material paduannya. Gambar 1 juga menunjukkan bahwa garis-garis regresi untuk paduan I, paduan II dan paduan III berhimpit. Hal ini menunjukkan bahwa pada pengujian siklus rendah untuk ketiga campuran tersebut memiliki kekuatan yang hampir sama.

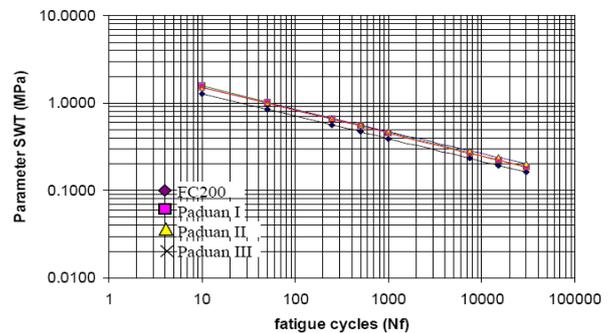
Koefisien umur kelelahan (A) dan eksponen umur kelelahan (b) pada persamaan SWT diperoleh dengan menentukan persamaan regresi yang terbentuk oleh masing-masing kurva. Harga-harga koefisien dan eksponen umur kelelahan untuk tiap material yang diuji ditabelkan pada tabel 3 berikut. Pada tabel tersebut terlihat bahwa nilai koefisien A berkisar antara 2,3 s/d 2,8 sedangkan koefisien b berkisar pada harga -0,26.

Tabel 3. Ringkasan hasil pengujian lelah

	A	B
FC200	2,336 (MPa)	-0,259
Paduan I	2,896 (MPa)	-0,266
Paduan II	2,662 (MPa)	-0,251
Paduan III	2,812 (MPa)	-0,265

Merujuk pada hasil penelitian DeLaO dkk, koefisien A berkisar antara 1,28 s/d 3,76 dan koefisien b berkisar antara -0,378 s/d -0,23.<sup>[1]</sup> Kompilasi data pengujian pada penelitian ini dengan data pada referensi 1 disajikan pada tabel 4.

Dari tabel tersebut terlihat bahwa harga koefisien umur kelelahan untuk besi cor berkisar antara 1,9 s/d 3,7 dan eksponen umur kelelahannya berkisar -0,232 s/d -0,378.



Gambar 1. Kurva SWT vs Nf keempat paduan

Tabel 4. Tabel kekuatan tarik, koefisien “A” dan “b” untuk besi cor kelabu

Kekuatan tarik (MPa)	A (MPa)	b	Sumber
143	2,350	-0,370	*
165	1,280	-0,275	*
187	1,970	-0,265	*
192	3,760	-0,378	*
198	2,336	-0,259	#
226	2,896	-0,266	#
228	2,662	-0,251	#
231	2,812	-0,265	#
245	2,29	-0,254	*
279	2,870	-0,267	*
287	2,530	-0,232	*

#: data penelitian & \*: data dari referensi 1,

Data pada tabel 4 tidak menunjukkan adanya suatu kecenderungan yang dapat digunakan untuk memprediksi besarnya koefisien “A” dan “b” sebagai fungsi dari kekuatan tarik besi cor kelabu. Hal ini tentunya sangat menyulitkan penentuan kekuatan lelah siklus rendah untuk kepentingan perancangan komponen yang terbuat dari besi cor kelabu. Ketiadaan kecenderungan tersebut dapat disebabkan oleh bentuk, ukuran dan distribusi grafit pada besi cor kelabu. Sebagaimana diketahui, terjadinya patah pada besi cor kelabu dimulai dari ujung-ujung grafit tempat terjadinya konsentrasi tegangan.

Dipandang dari sisi mekanika retak, grafit pada besi cor kelabu dapat dianggap sebagai material dengan awal retakan yang jamak. Perambatan retak pada material ini sangat dipengaruhi oleh distribusi, ukuran, bentuk grafit dan ketajaman pada ujung grafit.

Distribusi grafit yang acak ditenggarai sebagai faktor yang menyebabkan tidak diperolehnya kecenderungan tersebut.

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil-hasil pengujian yang diperoleh dapat ditarik suatu kesimpulan bahwa besi cor kelabu yang dipadu dengan kromium dan tembaga memiliki kekuatan tarik dan lelah yang lebih tinggi. Prediksi koefisien A dan b pada persamaan SWT tidak dapat secara langsung ditentukan dari kekuatan tarik besi cor kelabu.

Penggunaan besi cor kelabu untuk komponen yang menerima beban dinamis sebaiknya menerapkan faktor keamanan yang tinggi. Pembebanan sampai dengan 25% dari kekuatan tarik besi cor kelabu, secara konservatif telah mencukupi untuk pembebanan dinamis. Penerapan faktor keamanan yang tinggi dapat menyebabkan dimensi komponen menjadi berlebihan dan menyebabkan pemborosan. Oleh karena itu, untuk pembebanan dinamis secara spesifik, menuntut dilakukannya pengujian lelah tersendiri.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. DeLaO, James D; Gundlach, Richard B; Tartaglia, John M; 2003, Strain Life Fatigue Properties Database for Cast Iron, Climax Research Services-American Foundry Society (CRS-AFS)
2. ASM, 1990, Properties and Selection Materials : Ferrous and Ferrous Alloy, ASM Handbook, Vol 1, edisi 10
3. Downing, Sthepen Douglas, 1983, Modelling Cyclic Deformation and Fatigue Behavior of Cast Iron Under Uniaxial Loading, University Microfilms International, Ann Arbor, MI
4. Gilbert, GNJ; Kemp, SD; 1980, The Cyclic Stress/Strain Properties of a Flake Graphite Cast Iron A Progress Report, BCIRA Journal, vol. 28, no. 1384, pp. 284-296
5. Fash, J W; Socie, DF; 1982, Fatigue Behavior and Mean Effects in Gray Cast Iron, International Journal of Fatigue
6. C Guillemer-Neel, V Bobet, M Clavel, 1999, Cyclic Deformation Behavior and Bauschinger Effect in Ductile Cast Iron, Material Science & Engineering A, vol. A272, pp. 431-442