

PENINGKATAN KEKUATAN LELAH BESI COR KELABU DENGAN PENAMBAHAN KROMIUM DAN TEMBAGA

Agus Suprihanto¹, Dwi Basuki Wibowo¹, Djoeli Satrijo¹, Rochim Suratman²

¹Jurusan Teknik Mesin UNDIP, agusm90@yahoo.com

²Guru besar Teknik Mesin ITB

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan Cr dan Cu terhadap kekuatan lelah siklus rendah (low cycle fatigue/LCF) besi cor kelabu. Besi cor kelabu FC 20 dan tiga besi cor kelabu FC20 yang ditambah Cr (0,23%, 0,32% & 0,47% wt) dan Cu (0,67%-0,7%) diuji lelah pada mesin servo pulser MTS810. Dimensi spesimen uji dibuat dengan mesin CNC sesuai dengan standar ASTM E466. Hasil pengujian menunjukkan bahwa terdapat peningkatan kekuatan lelah yang signifikan. Analisis data menggunakan metode Downing (1983) dan Fash (1982) menghasilkan strength coefficient (A) antara 2,336 – 2,896 dan fatigue strength exponent antara -0,251s/d -0,266

Kata kunci : besi cor kelabu, low cycle fatigue, metode Downing

Pendahuluan

Besi cor kelabu merupakan material teknik yang banyak digunakan pada saat ini. Dalam pemakaiannya material ini seringkali menerima beban yang berfluktuasi. Meskipun demikian sebagaimana dinyatakan oleh DeLaO et.al (2003) perilaku besi cor kelabu terhadap beban dinamis tidak banyak diteliti. Informasi yang terbatas tersebut menyebabkan -sebagaimana dikutip dari ASM Handbook (1990)- besi cor kelabu lazimnya tidak dikenakan beban dinamis, atau apabila ada maka besarnya beban yang bekerja tidak boleh lebih dari 25% kekuatan tariknya.

Keberadaan grafit pada besi cor kelabu menyebabkan material ini tidak memiliki daerah elastis yang linier. Grafit juga menyebabkan terdapatnya bagian yang mengalami plastis meskipun besi cor

tersebut dibebani oleh gaya yang rendah. Hal ini disebabkan karena pada ujung-ujung grafit terjadi tegangan yang sangat besar sebagai akibat adanya konsentrasi tegangan. Kenyataan 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 ϵ_t , ϵ_e , dan ϵ_p menyatakan besarnya regangan total, elastis dan plastis. Besarnya regangan elastis dapat dinyatakan sebagai σ/E dimana σ 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 σ 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. Untuk menggambarkan kurva regangan tegangannya, Downing 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* (ϵ_S) yang merupakan regangan elastis dan regangan plastis dan *remaining plastic strain* (ϵ_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.

Pada regangan plastis yang tinggi, harga *secant modulus* menjadi sangat rendah. Apabila hal ini terjadi maka besarnya harga *secant modulus* dapat diabaikan dari perhitungan. Estimasi bentuk kurva pada daerah plastis tinggi ini merupakan kontribusi dari *remaining plastic strain* (ϵ_R). Downing selanjutnya menganalogikan hal tersebut ke dalam persamaan *Romberg-Osgood* sehingga 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 ϵ_S . Harga ϵ_R dapat diperoleh dengan mengurangkan regangan total ϵ_t dengan ϵ_S . Dengan telah diketahuinya harga ϵ_R , maka harga K dan “n” dapat dihitung.

Menyadari bahwa pada besi cor kelabu sifat tarik dan tekannya berbeda, Downing menguraikan hal yang sama untuk pembebanan tekannya. Dengan demikian 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. 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 di atas untuk memodelkan pengaruh tiap-tiap faktor yang mengontrol respon tegangan-regangan pada besi cor akibat pembebanan siklus.

Pada akhirnya analisis kelelahan dengan metode yang diusulkan Downing didasarkan pada penggunaan 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 :

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

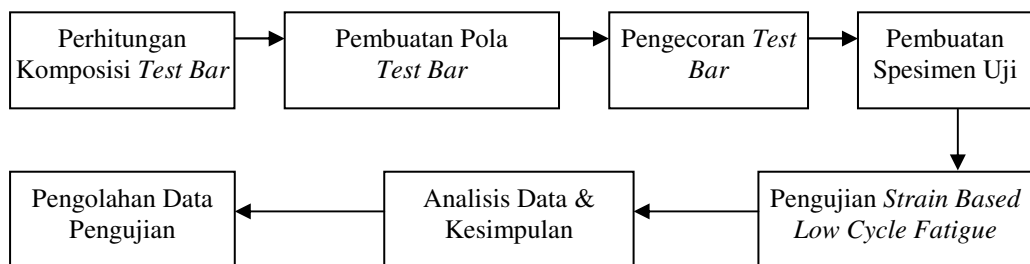
dimana A : koefisien umur kelelahan
b : eksponen umur kelelahan

Hanya dua 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.

Metode Penelitian

Untuk mengetahui pengaruh unsur Cr dan Cu terhadap kekuatan besi cor kelabu FC20, maka pada komposisi material dasar ditambah Cr dan Cu sampai persentase tertentu. Penambahan Cr direncanakan mulai dari 0,1% sampai 0,5% dan penambahan Cu direncanakan sebesar 0,6% sampai 0,7% saja. Tahap-tahap penelitian digambarkan dalam gambar 1 sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram tahapan penelitian

1. Pembuatan test bar

Kegiatan ini meliputi penentuan dimensi *test bar*, disain pola & cetakan, pengaturan komposisi kimia, peleburan, penuangan dan pembongkaran cetakan. Pada kegiatan ini dibuat pula spesimen *chill* yang akan digunakan untuk pengujian komposisi kimia besi cor yang dihasilkan. Pola dibuat dari kayu, cetakan yang digunakan adalah cetakan pasir dan proses peleburan dilakukan dengan menggunakan tanur kupola asam.

Dimensi *test bar* yang akan digunakan adalah berdiameter 30mm dengan panjang

600mm. Dari dimensi *test bar* yang telah ditetapkan tersebut, kemudian dibuat pola cetakan yang terbuat dari kayu yang direncanakan terdapat 2 *test bar* untuk tiap cetakan. Pola ini berupa silinder dengan diameter bagian bawah 31mm dan bagian atas 33mm serta panjang 600mm. Pola yang direncanakan mempunyai *kup* dan *drag* dengan bidang pisah tepat setengah diameternya. Peletakan cetakan ini direncanakan dengan kemiringan 30° dari vertikal.

Setelah pola selesai dikerjakan, langkah selanjutnya adalah membuat

cetakan. Cetakan yang digunakan adalah cetakan pasir. Cetakan ini diletakkan pada permukaan tanah. Pasir yang digunakan adalah pasir kwarsa ukuran 60 dan dengan ditambah *bentonit* 1-2%, air 5% dan *seacoal/grafit*.

Setelah pembuatan cetakan selesai dilakukan, langkah selanjutnya adalah melakukan peleburan bahan baku. Material dasar yang digunakan adalah pig iron, skrap baja, besi hancuran, foundry return, FeSi75, FeMn. Pig iron yang digunakan adalah pig iron dengan komposisi Mn-0.17, Si-1.74, S-0.0057, P-0.042. Skrap baja yang digunakan memiliki komposisi C-0.7, Si-0.2, Mn-0.4, P-0.03, S-0.03. Besi hancuran adalah material bekas yang sebagian besar berasal dari mesin-mesin tekstil. Foundry return adalah material yang berasal dari sisa-sisa proses pengecoran yang sebagian besar adalah FC15 - FC20 (besi cor dengan kekuatan 15-20 kg/mm²). FeSi75 memiliki komposisi Si-79.76, C-0.077, S-0.0029, Al-1.12. FeMn yang digunakan memiliki komposisi C-6.70, Si-0.71, Mn-75.50, P-0.30, S-0.20. Untuk memperbaiki distribusi grafit digunakan inokulan yang ditambahkan ke logam cair pada saat logam cair berada di ladle. Sedangkan untuk meningkatkan kekuatan dilakukan penambahan krom (Cr) dan tembaga (Cu). Krom yang ditambahkan adalah *ferrochrome low carbon* dengan komposisi Si-0.77, C-0.1, S-0.008, P-0.04, Cr-69.22. Sedangkan tembaga yang ditambahkan adalah tembaga yang terdapat dalam kabel listrik, dengan menggunakan anggapan Cu-90%.

Dengan bahan baku yang telah diketahui tersebut, langkah berikutnya adalah menyusun rencana pengaturan komposisi kimia. Sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan

sebelumnya, penambahan kromium dilakukan antara 0,3 s/d 0,5% dan tembaga sebesar 0,6 s/d 0,7%. Pengaturan dilakukan dengan menambahkan *ferrochrome low carbon* dan tembaga dengan berat tertentu kedalam 50kg material dasar. Material dasar yang digunakan ini adalah besi cor kelabu yang tanpa dipadu dengan kromium dan tembaga. Untuk mengetahui pengaruh unsur paduan, maka dibuat 4 modifikasi komposisi paduannya.

Penambahan unsur paduan dilakukan pada saat dalam *ladle*. Untuk keperluan ini maka *ferrochrome LC* dan kawat tembaga dihaluskan terlebih dahulu. Penghalusan untuk *ferrochrome LC* ini dilakukan dengan menumbuk bongkahan *ferrochrome LC* menjadi butiran-butiran halus berdiameter kurang dari 1mm. Sedangkan untuk kawat tembaga dipotong-potong dengan ukuran dibawah 0,5cm. Langkah ini perlu dilakukan karena temperatur lebur paduan yang akan ditambahkan sangat tinggi. Pengalaman dari penelitian sebelumnya menunjukkan apabila masih terdapat butiran yang berukuran besar, tidak akan larut dalam logam cair. Untuk mengetahui apakah komposisi kimia yang telah direncanakan telah terpenuhi maka akan dilakukan pengujian komposisi kimia. Guna keperluan ini, maka perlu disiapkan suatu cetakan *chill* yaitu terbuat dari baja berbentuk segiempat berdimensi 2x2 cm.

Setelah semua alat dan bahan untuk pengecoran *test bar* dipersiapkan, langkah selanjutnya adalah pengecoran. Langkah ini diawali dengan meleburkan bahan baku yang digunakan untuk material dasar dengan tanur kupola asam. Logam yang telah cair dan keluar dari penampungannya pada kupola kemudian ditampung dalam sebuah *ladle* berkapasitas 60kg. Temperatur logam cair pada saat tersebut

diharapkan diatas 1200°C. Penambahan unsur paduan dilakukan pada saat *ladle* terisi sepertiganya. Tujuan dari upaya ini adalah agar diperoleh efek pengadukan akibat adanya aliran logam cair dalam *ladle*.

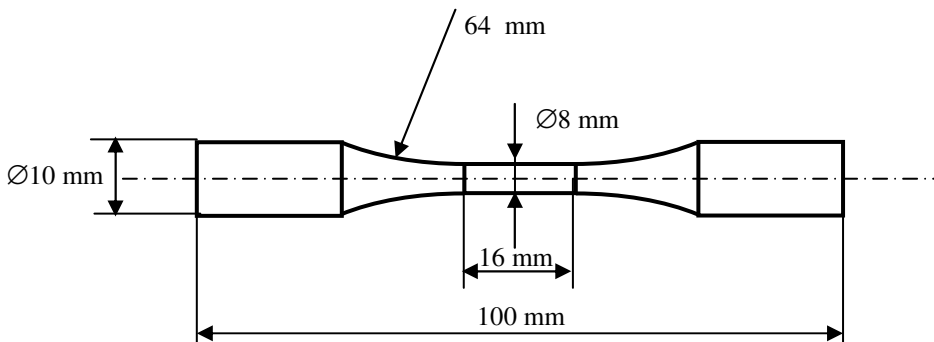
Logam cair dalam *ladle* kapasitas 60kg kemudian dipindahkan ke dalam *ladle* berkapasitas 20kg untuk mempermudah penuangan dan memperoleh efek pengadukan lebih lanjut.

Setelah semua cetakan telah diisi seluruhnya dan telah dingin, kemudian dibongkar dan ditandai. Penandaan ini menggunakan penomoran yaitu nomor 1 untuk *base material*, nomor 2 untuk campuran I dst. *Test bar* dipisahkan dengan logam yang berada pada saluran masuk. Pasir dibersihkan dari permukaan dengan cara digosok dengan kawat baja. Apabila masih terdapat pasir pada permukaan, maka akan digunakan gerinda.

Penyiapan Spesimen Uji

Untuk kepentingan pengujian diperlukan penyiapan spesimen uji. Adapun spesimen uji yang disiapkan adalah spesimen uji komposisi kimia, uji tarik dan uji lelah. Spesimen uji komposisi kimia dibuat dari sisa logam cair yang digunakan untuk penuangan di cetakan dituang dalam cetakan baja berbentuk segiempat dengan ukuran 2cm x 2cm. Dengan dicetak pada cetakan baja ini maka akan terbentuk coran *chill*.

Spesimen uji tarik dibuat berdasarkan standar ASTM E8 dengan diameter nominal 6,25mm. Untuk spesimen uji lelah dipilih tipe *uniform gage* dengan diameter 8mm sesuai dengan standar ASTM E466 seperti ditunjukkan pada gambar 2. Guna menghindari pengaruh proses pemesinan terhadap sifat mekanis bahan, maka pembuatan spesimen menggunakan mesin CNC.



Gambar 2. Bentuk dan dimensi spesimen uji lelah

Pengujian

Pengujian-pengujian yang dilakukan meliputi pengujian komposisi kimia dan pengujian lelah *strain-based*. Pengujian komposisi kimia menggunakan spektrometri. Pengujian tarik dilakukan dengan mengatur kecepatan *cross head* 0,5mm/menit. Kecepatan penarikan yang rendah ini dimaksudkan untuk memperoleh

data gaya tarik vs perpanjangan yang banyak. Data ini selanjutnya digunakan untuk menentukan besarnya beban pada pengujian lelah. Pengujian lelah menggunakan *servopulser* MTS 810.

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 yang lazim dicapai oleh besi cor pada pengujian tarik yaitu kurang dari 2%. Dengan memperhatikan kedua hal tersebut, pembebanan amplitudo regangan yang akan diterapkan berkisar antara 0,2% s/d 1%.

Hasil dan Pembahasan

Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian komposisi kimia yang dilakukan. Dari komposisi kimia tersebut dapat dihitung angka ekuivalen karbon (CE) untuk masing-masing campuran berturut-turut adalah 4,28%, 4,42%, 4,49%, 4,60% dan 4,69%.

Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian tarik yang dilakukan. Dari tabel 1 dan 2 ini dapatlah diketahui apabila penambahan kromium dan tembaga mampu meningkatkan kekuatan tarik besi cor kelabu mencapai 20%.

Tabel 1. Hasil pengujian komposisi kimia

% Unsur	Base Material	Campuran I	Campuran II	Campuran III
Fe	92,97	92,03	91,06	90,97
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

Tabel 2. Hasil pengujian tarik

No	Material Uji	Pengujian ke (MPa)			Rata-rata
		1	2	3	
1	Base Material (BM)	177	214	184	191
2	Campuran I (C1)	222	242	212	226
3	Campuran II (C2)	240	231	214	228
4	Campuran III (C3)	235	223	236	231

Tabel 3 s/d 6 menunjukkan data hasil pengujian lelah yang dilakukan. Data ini kemudian diolah untuk selanjutnya diplot pada kurva log parameter SWT vs jumlah

siklus. Kurva-kurva yang diperoleh disajikan pada gambar 3.

Tabel 3. Data pengujian untuk base metal

Specimen ID	Diameter (mm)	Maximum Strain Amplitude ($\Delta\epsilon/2$)	Maximum Initial Stress (σ_{max}) [MPa]	SWT Paramter ($\sigma_{max} * \epsilon_a$) [MPa]	Cycles (Nf)
1.3a	8.00	0.150%	107.48	0.161	16,440
1.4a	8.00	0.150%	103.50	0.155	16,550
3.3a	8.00	0.150%	91.56	0.137	13,700
1.3b	8.00	0.200%	141.32	0.283	5,457
3.3b	8.00	0.200%	141.32	0.283	7,055
4.2a	8.00	0.200%	137.34	0.275	11,425
1.4b	8.00	0.300%	147.29	0.442	1,640
1.6a	8.00	0.300%	143.31	0.430	2,520
3.3c	8.00	0.300%	149.28	0.448	1,470
1.3c	8.00	0.450%	155.25	0.699	148
1.6b	8.00	0.450%	163.22	0.734	150
1.6c	8.00	0.450%	161.23	0.726	120
1.3d	8.00	0.475%	163.22	0.775	40
1.4c	8.00	0.475%	169.19	0.804	35
4.2b	8.00	0.475%	165.21	0.785	32
1.6d	8.00	0.500%	195.06	0.975	15
4.2c	8.00	0.500%	201.04	1.005	20
4.2d	8.00	0.500%	203.03	1.015	10

Tabel 4. Data pengujian untuk campuran I

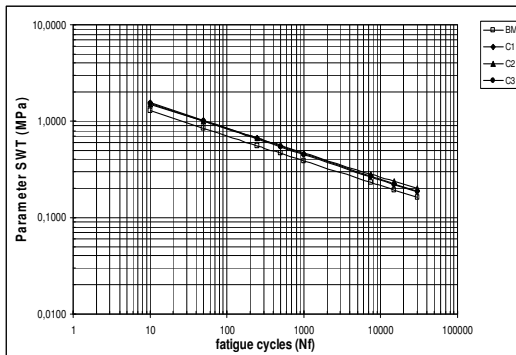
Specimen ID	Diameter (mm)	Maximum Strain Amplitude ($\Delta\epsilon/2$)	Maximum Initial Stress (σ_{max}) [MPa]	SWT Paramter ($\sigma_{max} * \epsilon_a$) [MPa]	Cycles (Nf)
2.2a	8.00	0.1750%	133.36	0.233	10,420
2.2b	8.00	0.1750%	123.41	0.216	10,820
4.5a	8.00	0.1750%	129.38	0.226	11,210
3.5a	8.00	0.2000%	141.32	0.283	4,212
4.5b	8.00	0.2000%	139.33	0.279	6,830
4.5c	8.00	0.2000%	143.31	0.287	3,765
3.5b	8.00	0.2500%	149.28	0.373	3,488
3.6a	8.00	0.2500%	145.30	0.363	3,785
4.5d	8.00	0.2500%	149.28	0.373	3,862
4.1	8.00	0.3000%	149.28	0.448	1,752
2.6a	8.00	0.3000%	151.27	0.454	1,859
3.6b	8.00	0.3000%	151.27	0.454	2,288
2.2c	8.00	0.4750%	171.18	0.813	85
2.6b	8.00	0.4750%	163.22	0.775	102
2.6c	8.00	0.4750%	165.21	0.785	65

Tabel 5. Data pengujian untuk campuran II

Specimen ID	Diameter (mm)	Maximum Strain Amplitude ($\Delta\epsilon/2$)	Maximum Initial Stress (σ_{max}) [MPa]	SWT Paramter ($\sigma_{max} * \epsilon_a$) [MPa]	Cycles (Nf)
2.2a	8.00	0.1750%	139.33	0.244	13,625
2.2c	8.00	0.1750%	135.35	0.237	13,825
2.3a	8.00	0.1750%	137.34	0.240	12,320
2.3b	8.00	0.2000%	145.30	0.291	6,429
2.4a	8.00	0.2000%	147.29	0.295	6,754
2.5b	8.00	0.2000%	147.29	0.295	6,389
2.1a	8.00	0.2500%	149.28	0.373	1,762
2.1a	8.00	0.2500%	149.28	0.373	3,373
2.1b	8.00	0.2500%	143.31	0.358	2,441
2.5a	8.00	0.3000%	161.23	0.484	1,240
2.7b	8.00	0.3000%	157.25	0.472	1,232
2.1c	8.00	0.3000%	155.25	0.466	1,664
2.6b	8.00	0.4750%	163.22	0.775	110
2.7c	8.00	0.4750%	167.20	0.794	98
2.1d	8.00	0.4750%	159.24	0.756	142

Tabel 6. Data pengujian untuk campuran III

Specimen ID	Diameter (mm)	Maximum Strain Amplitude ($\Delta\epsilon/2$)	Maximum Initial Stress (σ_{max}) [MPa]	SWT Paramter ($\sigma_{max} * \epsilon_a$) [MPa]	Cycles (Nf)
3.4a	8.00	0.1750%	133.36	0.233	10,244
3.4b	8.00	0.1750%	133.36	0.233	14,210
3.1a	8.00	0.1750%	135.35	0.237	12,243
3.3b	8.00	0.2500%	147.29	0.368	1,852
3.5b	8.00	0.2500%	149.28	0.373	1,652
3.2b	8.00	0.2500%	149.28	0.373	1,465
3.5a	8.00	0.3000%	157.25	0.472	942
3.1a	8.00	0.3000%	155.25	0.466	1,360
3.6c	8.00	0.3000%	151.27	0.454	1,187
3.3c	8.00	0.4750%	167.20	0.794	126
3.6a	8.00	0.4750%	167.20	0.794	137
3.7b	8.00	0.4750%	171.18	0.813	75



Gambar 3. Kurva SWT vs Nf gabungan

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 3. Garis-garis pada kurva tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk $SWT = \sigma_{max} * \epsilon / 2 = A (N_f)^b$. Dari persamaan tersebut dapat diperoleh dimana koefisien umur kelelahan (A) dan eksponen umur kelelahan (b) seperti ditabelkan pada tabel 7.

Dari gambar tersebut terlihat bahwa garis-garis kurva untuk campuran I, campuran II dan campuran III berhimpit dan kurva untuk *base material* berada paling bawah. Hal ini menunjukkan bahwa pada pengujian siklus rendah ketiga campuran tersebut memiliki kekuatan yang hampir sama dan lebih besar dari *base material*. Hasil yang sama diperoleh juga dari pengujian lelah siklus tinggi (Suprihanto dkk, 2004)

James DeLa O dari Climax Research Services/CRS (2003) telah melakukan pengujian lelah *strain based* untuk berbagai *grade material* besi cor kelabu. Tabel 8 ini adalah data hasil pengujian pada penelitian hibah PEKERTI/PHP dan CRS.

Dari tabel diatas 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. Dari data yang disajikan pada tabel 8, terlihat tidak ditemukan hubungan yang erat antara kekuatan tarik dengan variabel “A” dan “b”.

Tabel 7. Parameter SWT

Komposisi	A	b
<i>Base material</i>	2,336 (MPa)	-0,259
Campuran I	2,896 (MPa)	-0,266
Campuran II	2,662 (MPa)	-0,251
Campuran III	2,812 (MPa)	-0,265

Tabel 8. Tabel kekuatan tarik, “A” dan “b” untuk besi cor kelabu

Kekuatan tarik (MPa)	A (MPa)	B	Keterangan
143	2,350	-0,370	CRS
165	1,280	-0,275	CRS
187	1,970	-0,265	CRS
191	2,336	-0,259	PHP
192	3,760	-0,378	CRS
226	2,896	-0,266	PHP
228	2,662	-0,251	PHP
231	2,812	-0,265	PHP
245	2,29	-0,254	CRS
279	2,870	-0,267	CRS
287	2,530	-0,232	CRS

Kesimpulan dan Saran

Dari hasil-hasil pengujian yang diperoleh dapat ditarik kesimpulan bahwa besi cor kelabu yang dipadu dengan kromium dan tembaga memiliki kekuatan tarik dan lelah yang lebih tinggi. Meskipun dari grafik SWT vs Nf yang dihasilkan terlihat bahwa garis-garis regresinya sejajar, tidak ditemukan hubungan antara kekuatan tarik dengan koefisien dan eksponen umur kelelahan.

Penghargaan

Penelitian ini didanai dari Program Penelitian Hibah Pekerti DP3M DIKTI

DEPDIKNAS 1/2 Tahun 2004 dengan kontrak No. : 064/P4T/DPPM/HPTP, PHP/III/2004 Tanggal 1 Maret 2004

DAFTAR PUSTAKA

ASM, 1990, *Properties and Selection Materials : Ferrous and Ferrous Alloy*, ASM Handbook, Vol 1, edisi 10

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

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)

Downing, Sthepen Douglas, 1983, *Modelling Cyclic Deformation and Fatigue Behavior of Cast Iron Under Uniaxial Loading*, University Microfilms International, Ann Arbor,

Fash, J W; Socie, DF; 1982, *Fatigue Behavior and Mean Effects in Gray Cast Iron*, International Journal of Fatigue, vol 4, no.3, pp. 137-142

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

Suprihanto, A; Harsokoesoemo, D; Suratman, Rochim; 2004, *The Influences of Cr and Cu On the Fatigue Strength of Grey Cast Irons*, Proceeding International Conference On Fracture & Strength of Solids, Bali, Indonesia, part 2, pp. 947-952