

PENGARUH PENAMBAHAN KROMIUM DAN TEMBAGA TERHADAP KEKUATAN LELAH BESI COR KELABU¹

Agus Suprihanto², Darmawan Harsokoesoemo³, Rochim Suratman³

Abstract

The mechanical properties of grey cast irons can be modified with alloying elements. Cr and Cu have been known as elements that can improve tensile strength of grey cast irons. The improvement of tensile strength can be influence of fatigue strength. The goal of this research is to study the effect of alloying Cr and Cu on the fatigue strength.

Four materials of grey cast irons have been conducted to high cycle fatigue testing on the rotating bending machine. The first material is grey cast irons without added Cr and Cu, and the other have added. The percentages of Cr have been added are 0,23% wt, 0,32%wt and 0,47%wt and Cu 0,6%wt to 0,7%wt. The metallographic examinations and tensile test also have been conducted.

The result of this research are the material has the same microstructure. The microstructures of its materials are pearlitic grey cast irons with graphite type VII, distribution A and size of graphite 3-5. The tensile, endurance and fatigue strength of materials, which added Cr and Cu significantly rising, compared with base materials. The tensile strength rose from 191MPa to 232MPa and the endurance strength raised from 94 MPa to 110MPa. However three modified materials, which added Cr, and Cu has the same effects.

Key word: grey cast irons, high cycle fatigue test, endurance strength, fatigue strength

PENDAHULUAN

Salah satu komponen kendaraan Bus/Truk yang secara rutin memerlukan penggantian adalah tromol rem. Dengan mengingat jumlah kendaraan transportasi masal ini setiap tahun semakin bertambah, tentunya permintaan akan tromol rem tersebut akan semakin meningkat. Data dari BPS pada thn. 1998 menyebutkan bahwa jumlah kendaraan bus/truk sebanyak 2 juta dan setiap tahun cenderung meningkat 5 – 12%. Tentunya hal ini merupakan peluang usaha yang sangat menjanjikan apalagi harga tromol rem impor/lisensi sangat mahal. Peluang tersebut telah dimanfaatkan oleh beberapa industri kecil-menengah (UKM) pengecoran dengan memproduksi komponen tersebut. Sayangnya kualitas produk yang dihasilkan masih rendah yaitu ditandai dengan timbulnya retak pada beberapa tempat setelah produk tersebut dipakai selama 3 bulan, sementara produk impor/lisensi mencapai 1 – 2 tahun.

Dari kenyataan tersebut, maka pada tahun 2001 diusulkan suatu penelitian yang berjudul “Pengembangan Desain, Material dan Proses Produksi Tromol Rem Bus/Truk Produk Lokal untuk Meningkatkan Kualitas dan Daya Saing”. Penelitian tersebut telah berhasil mendapatkan pendanaan dari program Riset Unggulan Kemitraan (RUK) selama 2 tahun yaitu dari tahun 2001 sampai tahun 2002. Tim yang melaksanakan penelitian tersebut adalah peneliti dari Lab. Perancangan dan Lab. Logam ITB, Peneliti dari industri mitra yaitu PT Suyuti Sido Maju yang ter-

letak di Ceper Jawa Tengah, peneliti dari MIDC Bandung dan peneliti dari UNDIP.

Salah satu hasil dari penelitian tersebut adalah telah berhasil dikembangkan suatu material besi cor yang memiliki kekuatan tarik yang tinggi dengan cara menambahkan unsur paduan kromium (Cr) dan Tembaga (Cu) sampai persentase tertentu. Kekuatan tarik yang diperoleh bahkan mampu melampaui kekuatan tarik besi cor yang digunakan untuk pembuatan tromol rem produk impor/lisensi.

Dari data-data penelitian yang telah diperoleh, penyebab mudah retaknya tromol rem produk lokal tersebut adalah rendahnya kekuatan tarik material, desain dari cetakan dan proses produksinya. Data-data tersebut juga menunjukkan adanya faktor lain yang menyebabkan mudahnya timbul retak pada tromol rem produk lokal tersebut adalah distribusi dan ukuran grafit serpih yang terdapat pada besi cor kelabu. Keberadaan grafit diketahui merupakan sumber retak awal yang akan merambat apabila komponen tersebut menerima beban luar. Dengan demikian, keberadaan grafit dapat dianggap sebagai suatu cacat yang sangat merugikan. Meskipun demikian untuk pemakaian sebagai suatu elemen yang bergesekan, keberadaan grafit sangat menguntungkan karena mampu bertindak sebagai pelumas, media perpindahan panas yang baik, penyerap getaran dan bertindak sebagai lapisan *anti welding*. Alasan terakhir ini merupakan salah satu kriteria terpenting dipertahankannya besi cor kelabu sebagai material tromol rem.

Keberadaan grafit, selain berdampak menurunkan kekuatan tarik material, juga akan mempengaruhi pula kekuatan lelehnya. Informasi yang diperoleh dari penulurusan pustaka diperoleh bahwa kekuatan leleh suatu logam cenderung menurun secara

1) *Didanai oleh Program Penelitian Hibah PEKERTI tahun 2003 No : 311/P4T/DPPM/PHP/IV/2003*
2) *Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP*
3) *Guru besar Jurusan Teknik Mesin ITB*

drastis apabila terdapat cacat pada material tersebut. Hal ini dapat dipahami bahwa dengan adanya cacat tersebut akan menimbulkan konsentrasi tegangan yang tinggi di daerah sekitarnya. Mengingat pola pembebanan yang terjadi pada tromol rem tersebut berupa beban dinamis, maka grafit yang merupakan sumber retak awal tersebut akan dengan mudah merambat sampai suatu saat retakan yang terjadi pada tromol rem tersebut terlihat dengan jelas pada saat dilakukan perawatan rutin.

Retak yang dijumpai dari sample tromol rem lokal yang diperoleh menunjukkan panjang retaknya mencapai 15 cm. Retak ini tentunya tidak terjadi secara tiba-tiba (*catastrophic*), tetapi retak tersebut merambat akibat adanya pembebanan. Proses kegagalan demikian merupakan suatu awal dari modus kegagalan akibat lelah (*fatigue*). Agar dapat diupayakan prediksi kegagalan material besi cor tersebut, tentunya tidak hanya kekuatan tarik saja yang diperlukan, tetapi sangat diperlukan pula data yang akurat tentang kekuatan lelahnya.

METODE 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 kupola asam. Dimensi *test bar* berdiameter 30mm dan panjang 600mm. Penambahan unsur paduan dapat dilakukan di *ladle*. Agar komposisi kimia besi cor kelabu yang dihasilkan dapat homogen, maka ukuran unsur paduan tersebut dihaluskan terlebih dahulu. Proses penambahan unsur paduan dilakukan pada saat *ladle* baru terisi sepertiganya, kemudian dengan dituangkannya logam cair selanjutnya maka akan terjadi efek pengadukan.

2. Penyiapan spesimen uji.

Kegiatan ini meliputi proses-proses pemesinan untuk membuat spesimen uji yang diperlukan yaitu spesimen uji tarik dan lelah. Proses pemesinan menggunakan mesin bubut manual untuk proses pemesinan kasar dan mesin bubut CNC untuk menghasilkan dimensi akhir yang diharapkan. Untuk menghilangkan pengaruh proses pemesinan terhadap spesimen uji, maka tahapan-tahapan proses pemesinannya baik dengan menggunakan mesin bubut manual maupun CNC parameter proses pemotongannya dibuat seragam.

3. Pengujian.

Kegiatan ini meliputi pengujian komposisi kimia, metalografi, kekerasan, uji tarik dan uji lelah siklus

tinggi. Pengujian komposisi kimia dimaksudkan untuk mengetahui apakah komposisi kimia material besi cor kelabu yang dibuat sesuai dengan material yang telah dikembangkan sebelumnya. Pengujian metalografi dimaksudkan untuk mengetahui distribusi dan ukuran grafit serpih dan fasa-fasa yang ada pada material. Pengujian kekerasan dimaksudkan untuk mengetahui keseragaman sifat mekanik *test bar*. Hal ini dilakukan karena *test bar* yang dibuat jumlahnya banyak. Pengujian tarik dimaksudkan untuk mengetahui kekuatan tarik material besi cor kelabu yang dihasilkan. Data ini digunakan sebagai acuan untuk menentukan besarnya tegangan yang akan dikenakan pada spesimen uji lelah. Selanjutnya setelah besarnya tegangan yang akan dipakai pada pengujian lelah ditetapkan, maka dapat dihitung besarnya masa pemberat yang akan digunakan pada pengujian lelah. Pengujian lelah siklus tinggi dimaksudkan untuk mengetahui ketahanan material saat dikenai beban yang berfluktuatif yang telah ditentukan sebelumnya. Ketahanan tersebut dinyatakan dengan jumlah siklus sampai spesimen lelah patah. Apabila spesimen mampu bertahan sampai 10^6 siklus, maka pengujian dihentikan.

4. Pengolahan dan analisa data.

Kegiatan ini meliputi pengumpulan, pengolahan dan analisis terhadap data pengujian yang telah diperoleh. Pengolahan data menggunakan metode-metode statistik yang sesuai. Representasi data yang telah diolah berupa tabel, grafik dan foto. Selanjutnya setelah data selesai diolah, maka dianalisis untuk mengetahui pengaruh unsur paduan kromium dan tembaga terhadap kekuatan lelah besi cor kelabu.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Dari pengujian komposisi kimia diperoleh bahwa komposisi kimia yang diharapkan yaitu dapat dicapai. Pengaturan komposisi kimia *test bar* diperoleh dengan cara menambahkan pada tiap 50kg material dasar dengan perhitungan sebagai berikut :

Campuran I : penambahan 0,2kg *ferrochrome LC* dan 0,25kg tembaga.

Campuran II : penambahan 0,275kg *ferrochrome LC* dan 0,25kg tembaga.

Campuran III : penambahan 0,425kg *ferrochrome LC* dan 0,25kg tembaga.

Unsur kromium yang ditambahkan berasal dari *ferrochrome LC* yang komposisi kimianya adalah 69,2%Cr, 0,1%C dan 0,77%Si. Tabel berikut ini menunjukkan hasil hasil pengujian komposisi kimia yang dilakukan di Laboratorium Logam Ceper Klaten Jawa Tengah.

Untuk tiap-tiap komposisi diatas diperoleh 10 batang uji dengan diameter 30mm dan panjang 600mm. Dengan mengacu dimensi spesimen uji lelah dan uji

tarik yang memiliki panjang masing-masing 200mm dan 100mm, maka untuk tiap batang uji akan diperoleh 2 spesimen uji lelah dan 1 spesimen uji tarik. Dengan demikian akan diperoleh 20 spesimen uji lelah dan 10 spesimen uji tarik. Untuk mengetahui keseragaman sifat mekanisnya, maka dilakukan pengujian kekerasan dengan metode Rockwell C (HRC) disepanjang spesimen uji lelah. Setiap campuran komposisi kimia diambil 6 batang dan tiap batang diuji kekerasannya

sebanyak 3 kali. Hasil pengujian kekerasan tersebut ditabalkan pada Tabel 2 sampai dengan tabel 5.

Dari pengujian kekerasan tersebut diatas dapat disimpulkan bahwa untuk tiap-tiap komposisi material yang dihasilkan memiliki keseragaman sifat mekanik. Pengujian tarik untuk tiap-tiap material yang dihasilkan menunjukkan peningkatan kekuatan tarik seperti yang diharapkan.

Tabel 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Komposisi Kimia	Persentase Unsur									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Ni	V	W
Base Material	3,46	2,33	0,348	0,181	0,135	0,061	0,116	0,048	0,059	0,074
Campuran I	3,53	2,50	0,403	0,172	0,163	0,231	0,549	0,063	0,065	0,078
Campuran II	3,54	2,54	0,422	0,165	0,205	0,324	0,647	0,052	0,069	0,081
Campuran III	3,67	2,67	0,456	0,232	0,232	0,468	0,775	0,046	0,075	0,062

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan base material

ID Spesimen	Kekerasan skala HRC titik pengujian ke						Rata ²	Deviasi
	1	2	3	4	5	6		
1.1a	34	36	35	35	31	40	35	2,67
1.3b	38	39	36	34	37	34	36	1,89
1.4a	33	39	35	36	34	40	36	2,54
1.6a	31	35	34	38	33	35	34	2,13
1.8a	32	33	32	31	33	34	33	0,96
1.2a	33	32	37	34	35	38	35	2,11

Tabel 3. Hasil pengujian kekerasan campuran I

ID Spesimen	Kekerasan skala HRC titik pengujian ke						Rata ²	Deviasi
	1	2	3	4	5	6		
2.1a	39	37	38	39	38	37	38	0,82
2.2a	40	43	35	44	42	43	41	3,02
2.3a	38	42	41	40	43	42	41	1,63
2.4a	38	45	41	42	41	42	42	2,06
2.5a	41	44	49	40	41	42	43	3,02
2.6a	46	42	38	42	40	42	42	2,43

Tabel 4. Hasil pengujian kekerasan campuran II

ID Spesimen	Kekerasan skala HRC titik pengujian ke						Rata ²	Deviasi
	1	2	3	4	5	6		
4.1a	43	45	39	43	45	41	43	2,13
4.2a	44	45	43	42	37	41	42	2,58
4.3a	37	38	44	40	40	40	40	2,19
4.4a	40	36	38	42	40	40	40	2,13
4.5a	41	37	38	42	40	39	39	1,80
4.6a	38	37	40	42	41	39	39	2,16

Tabel 5. Hasil pengujian kekerasan campuran III

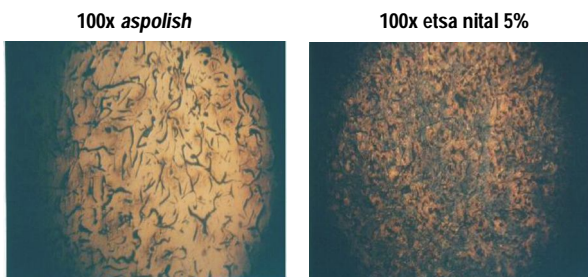
ID Spesimen	Kekerasan skala HRC titik pengujian ke						Rata ²	Deviasi
	1	2	3	4	5	6		
5.1a	37	45	33	38	38	40	39	3,59
5.2a	41	34	35	42	41	39	39	3,09
5.4a	42	42	43	42	39	38	41	1,83
5.5a	41	38	35	38	42	40	39	2,31
5.6a	42	36	44	43	43	38	41	2,94
5.7a	37	36	44	41	38	39	39	2,67

Tabel.6. Kekuatan Tarik Material

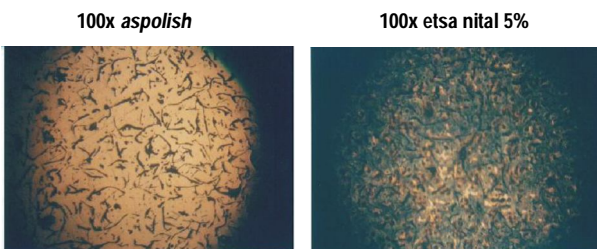
No	Material Uji	Pengujian ke (MPa)			Rata-rata
		1	2	3	
1	Base Material	177	214	184	191
2	Campuran I	222	242	212	226
3	Campuran II	240	231	214	228
4	Campuran III	235	223	236	231

Dimensi spesimen uji tarik yang dipakai sesuai dengan standart ASTM E8 dengan diameter nominal 6,25mm. Pengujian tarik dilakukan dengan kecepatan penarikan 2mm/menit Pengujian tarik dilakukan dengan mesin uji tarik INSTRON 1195 yang ada di Laboratorium Logam ITB. Tabel 6. berikut menunjukkan hasil kekuatan tarik yang diperoleh.

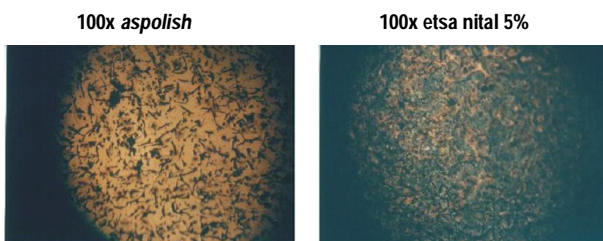
Pengujian metalografi menunjukkan bahwa grafit besi cor kelabu yang diperoleh adalah grafit serpih tipe A dengan ukuran 3-5. Adapun fasa-fasa yang diperoleh adalah pearlit 95%-98% dan ferrit. Berikut ini adalah hasil-hasil pengujian metalografi yang telah dilakukan.



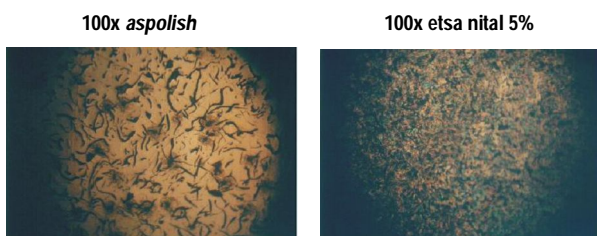
Gambar 1. Struktur Mikro Base Material



Gambar 2. Struktur Mikro Campuran I



Gambar 3. Struktur Mikro Campuran II



Gambar 4. Struktur Mikro Campuran III

Dari hasil struktur mikro tersebut terlihat bahwa terdapat perbaikan apabila dibandingkan dengan riset sebelumnya dimana distribusi grafitnya terdapat tipe D.

Merujuk pada standart SAE tentang material besi cor kelabu untuk tromol rem yaitu SAE J431 disyaratkan adalah G3500 dengan distribusi grafitnya adalah tipe A dengan ukuran 3-5 dan fasa utamanya adalah perlit dan apabila terdapat sementit dan ferrit jumlahnya tidak melebihi 5%. Dengan demikian material yang diperoleh telah memenuhi spesifikasi material untuk tromol rem seperti yang disyaratkan oleh SAE.

Hasil pengujian lelah dilakukan pada *rotary bending machine*. Spesimen yang dipakai merujuk pada standar ASTM E466 dengan bentuk spesimen yang digunakan tipe *continuous radius* dengan diameter terkecil 9,3mm, diameter besar 16mm dan radius *curvature* 800mm. Hasil pengujian lelah yang diperoleh disajikan pada tabel 7 sampai tabel 10.

Tabel 7. Hasil Uji Lelah Material Dasar

No	ID Spesimen	Beban (kg)	Tegangan Max.	Jumlah Siklus
1	1.10a	15,53	194 MPa	3648
2	1.3a			3529
3	1.7a			3106
4	1.81	12,6	158 MPa	23320
5	1.1a			7800
6	1.1b			5231
7	1.9b	10,5	131 MPa	69381
8	1.6b			61771
9	1.7b			45658
10	1.6a	9,25	116 MPa	71660
11	1.4a			194332
12	1.2a			207402
13	1.3b	8,82	110 MPa	75448
14	1.4b			373068
15	1.2b			158797
16	1.8b	7,55	74 MPa	1005215
17	1.10b			1007152
18	1.9a			1005308

Tabel 8. Hasil Uji Lelah Campuran I

No	ID Spesimen	Beban (kg)	Tegangan Max.	Jumlah Siklus
1	2.5a	15,53	194 MPa	568
2	2.6a			2191
3	2.7a			8617
4	2.2a	12,6	158 MPa	23263
5	2.1a			19504
6	2.3a			38632
7	2.4a	10,5	131 MPa	85355
8	2.9a			115805
9	2.8a			53344
10	2.6b	9,47	118 MPa	445361
11	2.7b			891319
12	2.2b			388141
13	2.9b	9,25	116 MPa	420110
14	2.5b			329849
15	2.10b			280164
16	2.10a	8,82	110 MPa	1003192
17	2.3b			1005536

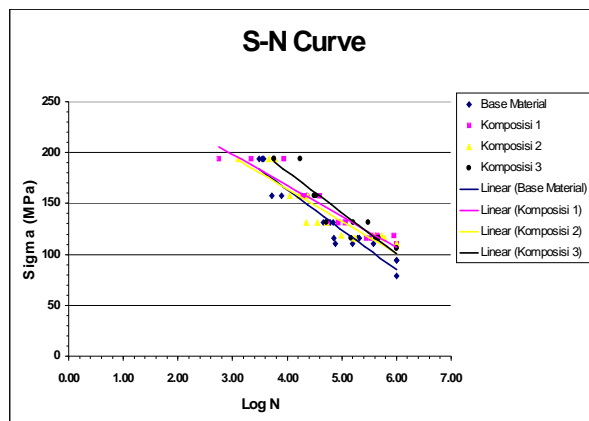
Tabel 9. Hasil Uji Lelah Campuran II

No	ID Spesimen	Beban (kg)	Tegangan Max.	Jumlah Siklus
1	4.1a	15,53	194 MPa	1268
2	4.9a			5847
3	4.5a			4583
4	4.3a	12,6	158 MPa	11237

5	4.4a			23534
6	4.6a			16118
7	4.7a			21971
8	4.8a	10,5	131 MPa	51647
9	4.10a			36061
10	4.6b			97603
11	4.9b	9,47	118 MPa	532254
12	4.1b			390747
13	4.7b			165879
14	4.4b	9,25	116 MPa	180231
15	4.11a			605479
16	4.11b	8,82	110 MPa	1003512
17	4.2a			1004715

Tabel 10. Hasil Uji Lelah Campuran III

No	ID Spesimen	Beban (kg)	Tegangan Max.	Jumlah Siklus
1	5.4b			17427
2	5.5a	15,53	194 MPa	5701
3	5.6a			5685
4	5.1a			33264
5	5.2a	12,6	158 MPa	31775
6	5.3a			31792
7	5.10a			160912
8	5.4a	10,5	131 MPa	51565
9	5.9a			304816
10	5.7a			421219
11	5.8a	9,25	116 MPa	466266
12	5.10b			149336
13	5.3b	8,5	106 MPa	1007530
14	5.5b			1004022



Gambar 5. Kurva S-N material yang diuji

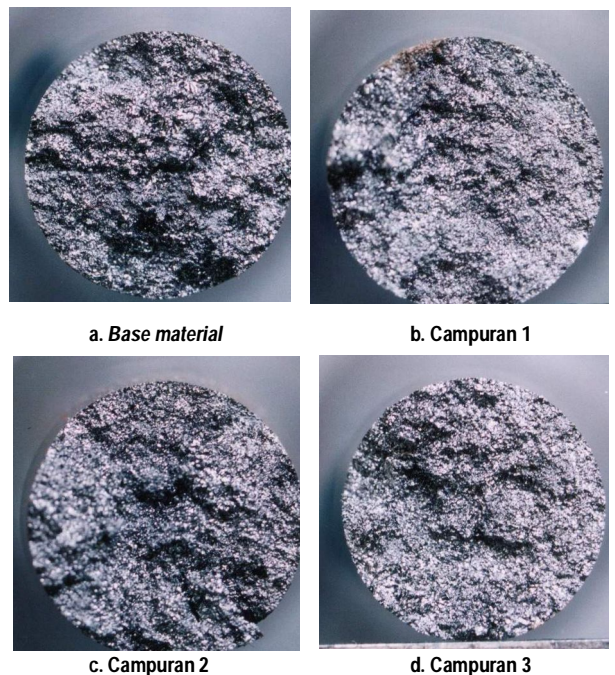
Dari hasil uji lelah siklus tinggi diatas terlihat adanya peningkatan kekuatan lelah antara material dasar dengan material yang ditambah unsur kromium dan tembaga. Meskipun demikian, besarnya persentasi unsur yang ditambahkan tersebut tidak signifikan didalam menaikkan kekutan lelahnya. Hal ini terlihat dari kekuatan lelah campuran I, II dan III yang sama. Peningkatan kekuatan lelah yang diperoleh dari usaha penambahan unsur paduan kromium dan tembaga tersebut adalah sebesar 17% yaitu dari 74MPa menjadi 110MPa.

Dari data uji lelah diatas, kemudian diplot dalam grafik antara tegangan (MPa) vs jumlah siklus (logN). Grafik yang diperoleh ditunjukkan pada gambar 5.

Peningkatan kekuatan lelah tersebut diperoleh dengan adanya penambahan unsur paduan kromium dan tembaga. Kesimpulan ini diperkuat oleh hasil uji

metalografi yang menunjukkan bahwa struktur keempat material diuji adalah sama yaitu memiliki grafit serpih distribusi A dengan ukuran 3-5 dan memiliki fasa pearlit sebanyak 95%-98% dan sisanya ferrit. Besarnya sebaran data jumlah siklus tersebut diatas merupakan suatu hal yang lazim ditemui dalam pengujian lelah. Khusus untuk material besi cor kelabu sebaran data tersebut sangat besar. Hal ini disebabkan oleh adanya grafit yang dalam pandangan mekanika perpatahan dapat dianggap sebagai sumber retak awal.

Permukaan patahan spesimen uji lelah kemudian dilakukan fraktografi. Hasilnya menunjukkan bahwa sangat sedikit sekali bagian yang mengalami perambatan retak. Permukaan retaknya mirip dengan permukaan retak spesimen hasil uji tarik. Hal ini sesuai dengan hasil pengamatan permukaan retak baja yang diuji lelah dimana pada permukaan retaknya pada bagian tengah terlihat sebagai patah getas meskipun baja tersebut bersifat ulet. Telah diketahui bahwa besi cor kelabu adalah material yang getas, dengan demikian wajarlah apabila permukaan patahnya menunjukkan patah getas. Hasil fraktografi yang dilakukan disajikan pada gambar 6.



Gambar 6. Permukaan retak spesimen uji lelah

Dari data yang ada diasumsikan bahwa terdapat hubungan yang linier antara logaritma jumlah siklus dengan tegangan. Asumsi tersebut menghasilkan persamaan garis regresi untuk masing-masing besi cor kelabu yang diuji sebagai berikut :

- untuk *base material* $\text{Log N} = -0,0232 S + 7,861$ 1
- untuk campuran II $\text{Log N} = -0,0298 S + 9,083$ 2
- untuk campuran IV $\text{Log N} = -0,0263 S + 8,454$ 3
- untuk campuran V $\text{Log N} = -0,0221 S + 8,108$ 4

Asumsi bahwa terdapat hubungan yang linier tersebut ternyata telah sesuai. Hal ini dapat dilihat dari besarnya

koefisien korelasinya yang ditunjukkan oleh harga R^2 (*r-squared*) yang mendekati 1 yaitu terkecil 0,8329.

Dari keempat data pengujian lelah, terlihat bahwa ketahanan lelah (*endurance strength*) untuk besi cor kelabu yang dipadu dengan kromium dapat dikatakan sama. Kenyataan ini dapat dijelaskan bahwa pengaruh penambahan kromium sebesar 0,3% sampai 0,5% pada dasarnya memberikan efek terhadap kekuatan tarik besi cor kelabu yang tidak berbeda. Hal ini juga sesuai dengan hasil pengujian tarik yang pada dasarnya kekuatan tarik besi cor yang dipadu dengan kromium sebesar 0,3% sampai 0,5% sama.

Selama pengujian berlangsung, teramati beberapa hal-hal seperti meningkatnya temperatur spesimen uji setelah mengalami patah, permukaan spesimen uji berubah warna menjadi agak hangus dan bentuk patahannya berupa patah getas dengan warna patahan kelabu. Warna patahan kelabu ini merupakan penunjuk khas bahwa material besi cor yang diuji merupakan material besi cor kelabu. Pada penelitian ini, peningkatan temperatur pada spesimen uji lelah yang patah tidak dilakukan pengukuran. Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa peningkatan temperatur tersebut disebabkan terdapatnya regangan plastis yang berulang-ulang.

Meskipun informasi awal retak dan perambatannya tidak dapat diketahui, peneliti meyakini bahwa awal retaknya terjadi pada permukaan spesimen uji. Awal retak ini diyakini berasal dari grafit yang berada dipermukaan spesimen uji. Kesimpulan ini didasari bahwa pada umumnya kegagalan akibat lelah diawali pada permukaan elemen mesin/struktur dan pada permukaan terjadi tegangan yang paling tinggi. Mekanisme kegagalan lelah besi cor kelabu ini dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Grafit terdapat pada permukaan spesimen berfungsi sebagai sumber retak awal. Grafit terpanjang pada permukaan spesimen merupakan daerah yang berpeluang menjadi bagian yang kritis.
2. Pada daerah diujung grafit merupakan letak konsentrasi tegangan, sehingga pada daerah disekitar ujung grafit tegangan yang terjadi telah menyebabkan plastis
3. Panjang retak awal ini secara perlahan bertambah panjang sesuai dengan besarnya tegangan yang bekerja. Retak ini merambat pada matrik besi cor kelabu dalam hal ini matrik berfungsi menahan pergerakan retak tersebut.
4. Setelah sekian siklus, retak tersebut bertambah sampai panjang tertentu sehingga menyebabkan spesimen uji patah.

Pertambahan panjang retak pada nomor 4 dimungkinkan dapat terjadi akibat bertemu dengan grafit lainnya atau tetap merambat dalam matrik. Kemungkinan yang pertama dapat terjadi karena grafit terdapat diseluruh besi cor kelabu. Apabila hal ini yang terjadi, pertambahan panjang terjadi secara cepat sehingga spesimen uji secara tiba-tiba patah. Apabila kemungkinan kedua yang terjadi, maka spesimen uji

tidak akan mengalami patah sebelum panjang retaknya dalam matrik mencapai panjang tertentu.

Peneliti meyakini bahwa kemungkinan yang pertamalah yang menjadi penyebab spesimen uji patah. Keyakinan ini diperkuat dengan penampakan permukaan retak spesimen uji menunjukkan permukaan yang tidak rata. Bahkan pada beberapa permukaan lainnya terdapat bukit dan puncak yang tajam. Hal ini menurut peneliti hanya dimungkinkan apabila perambatan awal retak tersebut bertemu dengan grafit lain, sehingga pertambahan panjang retak terjadi secara tiba-tiba. Penjelasan ini memiliki kesesuaian dengan hasil pengujian lelah, dimana data kekuatan lelah yang diperoleh rentangnya sangat lebar.

KESIMPULAN DAN SARAN

Beberapa kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Penambahan paduan kromium dan tembaga mampu meningkatkan ketahanan lelah (*endurance strength*) dan kekuatan lelah (*fatigue strength*) besi cor kelabu.
2. Peningkatan ketahanan dan kekuatan lelah tersebut diperoleh karena unsur kromium dan tembaga mampu memperbaiki sifat dari matrik besi cor kelabu.
3. Peningkatan kekuatan tarik yang diperoleh dengan adanya penambahan unsur paduan kromium dan tembaga sebesar 20% yaitu dari 191 MPa menjadi 228 Mpa.
4. Peningkatan ketahanan lelah (*endurance strength*) sebesar 17% yaitu dari 95 MPa menjadi 110 Mpa.

Beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut :

1. Perlu diteliti lebih lanjut mengenai pengaruh fasa matrik dan panjang, bentuk dan ukuran grafit terhadap kekuatan lelah besi cor kelabu.
2. Besi cor memiliki sifat sensitivitas bagian dengan demikian perlu diteliti pengaruh sifat ini terhadap kekuatan lelahnya.
3. Material besi cor yang diuji ini ditujukan sebagai material untuk pembuatan tromol rem bus/truk yang pada saat beroperasinya terpapar pada temperatur tinggi. Oleh karena itu perlu diketahui pula perubahan sifat mekaniknya terhadap temperatur tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

1. ASTM E206-72, Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data
2. ASTM E466-82, Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials
3. ASTM E467-76, Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamics Loads in An Axial Load Fatigue Testing Machine.

4. ASTM E647–83, Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/Cycle
5. ASTM E739–80, Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data.
6. ASTM E8–83, Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials
7. ASTM E912–83a, Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue Loading
8. Chijiwa K, Hayashi, M, 1979, Mechanical Properties of Grey Cast Iron at Temperature in the Region of Room Temperature to Liquidus, Journal of Faculty Engineering
9. Day, AJ, 1988, An Analysis of Speed, Temperature and Performance Characteristic of Automotive Drum Brake, Transaction of the ASME
10. Harsokoemo, D, 1997, Fatigue Criteria in Mechanical Design, Proceeding Seminar Fatigue and Fracture, ISSN, 1410-2544, Bandung, January 27-28, 1997
11. Hjlem, HE, 1994, Yield Surface for Grey Cast Iron Under Biaxial Stress, Transaction of the ASME
12. Puja, IW, Reza, Ako, Henry, 2001, Analisis Tegangan dan Modifikasi Tromol Rem Truk Kapasitas Angkut 6 Ton, Proceeding Elemen Hingga, pp 50-59
13. Puja, IW, Suprihanto, A, dkk, 2001, Laporan Akhir Tahun I Penelitian : Pengembangan Disain, Material dan Proses Produksi Tromol Rem Bus/Truk Produk Lokal untuk Meningkatkan Kualitas dan Daya Saing, Program Riset Unggulan Kemitraan, ITB
14. Puja, IW, Suprihanto, A, dkk, 2002, Laporan Akhir Tahun II Penelitian : Pengembangan Disain, Material dan Proses Produksi Tromol Rem Bus/Truk Produk Lokal untuk Meningkatkan Kualitas dan Daya Saing, Program Riset Unggulan Kemitraan, ITB
15. Puja, IW, Suratman, R, Aufa, U, Suprihanto, A, 2002, Failure Investigations and Material Improvement for Drums Brakes Produced By Traditional Foundry Industries, Fifth International Conference On Fracture & Strength of Solid, Sendai, Japan
16. Puja, IW, Suratman, R, Suprihanto, A, 2002, Identifikasi Kegagalan Drum Rem Produk UKM, Jurnal Teknik Mesin
17. Suprihanto, A, 2001, Identifikasi Penyebab Retak Tromol Rem Bus/Truk Produk PT SSM, Thesis Magister Teknik Mesin, ITB
18. Weibull, 1949, A Statistical Representation of Fatigue Failures in Solid, Transaction of The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden