

# PENGARUH TEMPERATUR *QUENCHING* PADA PROSES AUSTEMPERING TERHADAP KEKUATAN LELAH *AUSTEMPERING GREY IRON*

Agus Suprihanto<sup>1)</sup>, Miftakhul Ilmi<sup>2)</sup>

## Abstrak

*Kegagalan lelah adalah hal yang sangat membahayakan karena terjadi tanpa petunjuk awal. Kelelahan mengakibatkan patah yang terlihat rapuh tanpa terjadi deformasi pada patahan. Untuk meningkatkan sifat-sifat mekanis besi cor kelabu juga dilakukan proses perlakuan panas.*

*Dalam penelitian ini, proses perlakuan panas yang dilakukan adalah Austempering. Temperatur quenching pada proses austempering yang dilakukan yaitu : 350°, 400°, dan 500°C. Dari pengujian siklus tinggi yang dilakukan dengan mesin uji fatigue rotating bending terjadi kenaikan kekuatan lelah sebesar 8,5% dari 94 MPa untuk material tanpa austemper menjadi 102 MPa untuk material dengan austemper 350°C.*

*Dari pengujian struktur mikro terlihat bentuk grafitnya serpih tipe VII dengan distribusi tipe A. Untuk struktur mikro yang telah di etsa nital 5% terlihat perubahan fasa matrik, dari perlit menjadi bainit, dan sedikit ferrit.*

*Kata kunci : kekuatan lelah, austempering grey iron (AGI)*

## PENDAHULUAN

Diantara macam-macam besi cor, yang paling banyak digunakan adalah besi cor kelabu (*grey cast iron*) yaitu besi cor dengan grafit berbentuk *flake* (serpihan, berbentuk lempengan melengkung). Besi cor kelabu memiliki keuletan dan kekuatan tarik rendah yang disebabkan oleh grafitnya yang berbentuk *flake*, dimana setiap *flake* merupakan takikan yang dapat menurunkan kekuatan, keuletan, dan ketangguhan. Kegagalan *fatigue* semakin menonjol sejalan dengan perkembangan peralatan teknologi. Hingga kini sering dinyatakan bahwa kelelahan meliputi paling tidak 90% dari seluruh kegagalan oleh hal-hal yang bersifat mekanis (E. Dieter, 1988)

Untuk meningkatkan sifat-sifat mekanis besi cor kelabu selain dilakukan penambahan unsur paduan juga bisa dilakukan proses perlakuan panas yang sesuai. Dalam penelitian ini, perlakuan panas yang dilakukan adalah Austemper dengan variasi temperatur *quench*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh temperatur *quench* pada proses austemper terhadap sifat mekanis (kekuatan lelah) dan struktur mikro pada besi cor kelabu non paduan

## DASAR TEORI

Besi cor kelabu adalah salah satu jenis besi cor yang paling banyak digunakan. Hal ini disebabkan karena ada sifat-sifat tertentu yang menguntungkan pada besi cor kelabu. Kekuatan tarik besi cor kelabu bervariasi antara 100 sampai 400 MPa dan memiliki kekuatan tekan (*compressive strength*) 3 sampai 4 kali kekuatan tariknya, serta modulus elastisitasnya 75 sampai 150 Gpa (E. Shigley, 1989). Dalam besi cor

kelabu, grafit terdistribusikan dalam matriks, dan apabila ada tegangan akan terjadi konsentrasi tegangan di sekitar grafit yang akan menyebabkan retak. Kekuatan dari besi cor kelabu juga dipengaruhi oleh jumlah, bentuk, dan distribusi grafit.

Besi cor kelabu dapat mempunyai struktur mikro perlitik, ferritik, martensitik, dan bainitik setelah proses perlakuan panas yang sesuai. Besi cor kelabu yang dipanaskan sampai temperatur 750<sup>0</sup> C akan menghasilkan fasa austenit (0,75% C) dan grafit. Pendinginan perlahan-lahan pada besi cor kelabu akan menghasilkan fasa perlit dari austenit (Vlack, 1986). Pertumbuhan perlit menyangkut pembentukan ferit dan karbida C sekaligus. Struktur besi cor ditentukan oleh komposisi dari besi dan karbon. Dari diagram keseimbangan besi karbon, dapat dipelajari bagaimana fasa berubah dan struktur apa yang terjadi, apabila besi cor mengandung persentasi karbon tertentu membeku dan didinginkan pada temperatur kamar. Dari diagram besi-karbon dapat dilihat besi cor yang mengandung 3% karbon, pembekuan paduan C dimulai pada titik a dan berakhir pada titik b yang berarti bahwa ada daerah temperatur pembekuan dimana temperatur berubah selama pembekuan paduan tersebut.

Sifat-sifat mekanis besi cor kelabu menunjukkan kecocokan sebagai material untuk bagian-bagian mesin. Sifat-sifat mekanis besi cor kelabu antara lain : kekuatan tarik, perpanjangan, kekerasan, kekuatan tekan, kekuatan lentur, kekuatan lelah, tahanan aus, mampu mesin, sifat meredam getaran dan sebagainya.

Sedangkan kegagalan lelah adalah hal yang sangat membahayakan karena terjadi tanpa petunjuk awal yang bisa saja terjadi pada besi cor kelabu. Ada tiga faktor dasar yang dapat menyebabkan kegagalan lelah yaitu :

1. Tegangan tarik maksimum yang cukup tinggi.
2. Variasi atau fluktuasi tegangan yang cukup besar.
3. Siklus penerapan tegangan yang cukup besar.

<sup>1)</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP

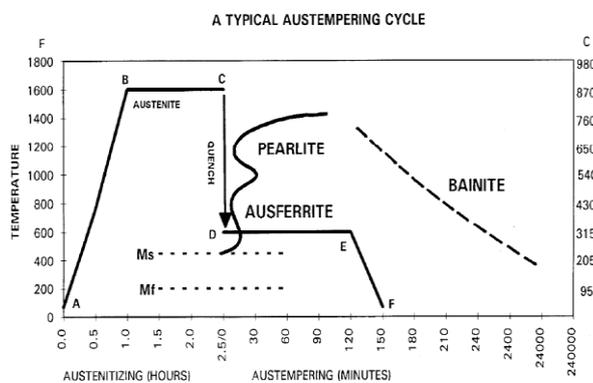
<sup>2)</sup> Alumni Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP

Selain ketiga hal di atas terdapat juga variabel-variabel lain yang menyebabkan kegagalan lelah antara lain : konsentrasi tegangan, suhu, korosi, struktur metalurgi, tegangan-tegangan sisa, dan tegangan kombinasi yang cenderung untuk mengubah kondisi kelelahan.

Penelitian mengenai perubahan-perubahan struktur dasar yang terjadi apabila logam mengalami tegangan berulang atau proses kelelahan logam dapat dibagi menjadi tahap-tahap berikut :

1. Permulaan pertumbuhan retak, termasuk pembentukan awal kerusakan yang dapat dibayangkan dengan pelunakan atau anil termal yang sesuai.
2. Pertumbuhan retak pergelinciran pita (*slip band crack growth*), melibatkan pertumbuhan lebih lanjut retakan awal pada bidang dimana dengan tegangan geser yang tinggi. Tahap ini sering disebut pertumbuhan retak tahap I.
3. Pertumbuhan retak pada bidang-bidang dengan tegangan tarik tinggi, meliputi pertumbuhan retak pada arah tegak lurus tegangan tarik maksimum. Biasanya dinamakan pertumbuhan retak tahap 2.
4. Kegagalan ulet ultimate, terjadi apabila retak mencapai panjang yang cukup besar sedemikian sehingga penampang yang tersisa tidak mampu menahan beban yang ada.

Untuk meningkatkan sifat-sifat mekanis besi cor kelabu juga dilakukan proses perlakuan panas (*heat treatment*). Dalam penelitian ini, proses perlakuan panas yang dilakukan adalah *Austempering* yaitu proses perlakuan panas yang dilakukan untuk membentuk struktur *bainit* dalam besi cor kelabu yang memiliki sifat-sifat mekanis yang lebih baik dibanding dengan struktur *perlit*. Proses ini dilakukan dengan menahan spesimen pada temperatur *austenit* ( 850 °C – 950 °C ) selama beberapa saat, kemudian dicelupkan pada cairan pendingin pada temperatur tertentu ( 300 °C – 450 °C ) dan dilanjutkan dengan pendinginan pada udara terbuka seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Siklus Austemper (Hayrynen dkk,2002)

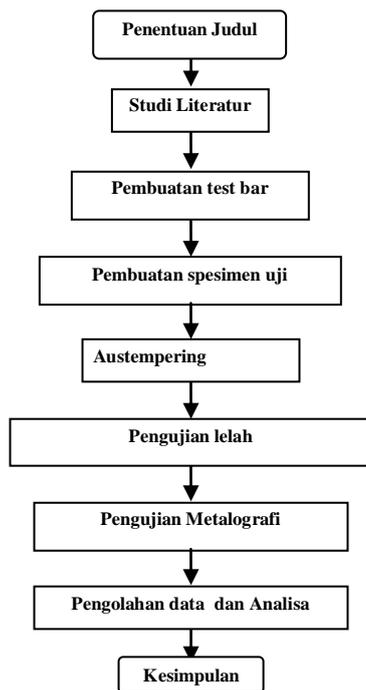
Pada gambar diatas, proses austemper terdiri dari dua tahap, yaitu:

1. Austenitisasi  
Proses pemanasan besi pada temperatur antara 840°C - 950°C (dari A ke B) kemudian ditahan selama 15 menit sampai 2 jam agar matrik austenit dalam besi homogen.
2. Austemper  
Pada proses ini, material dicelup cepat dari temperatur austenit ke temperatur austemper (dari C ke D) dalam salt bath dengan temperatur salt bath antara 350 °C sampai 500 °C dan ditahan selama 0,5 sampai 3 jam (dari D ke E). Kemudian material didinginkan dalam temperatur kamar (dari E ke F).

Pengujian lelah yang paling banyak dilakukan adalah pengujian lelah dengan metode *rotating bending*, dimana benda uji mengalami beban *bending* murni sehingga tidak ada gaya lintang yang bekerja pada spesimen. Karena menerima beban lentur maka satu sisi dari benda uji akan mengalami tegangan tarik dan sisi yang lain akan mengalami tegangan tekan. Dan karena juga diputar maka setiap bagian dari benda uji akan mengalami perubahan tegangan dari tegangan tarik ke tegangan tekan dan juga sebaliknya dari tegangan tekan ke tegangan tarik secara berulang-ulang. Dengan memberikan variasi beban dan benda uji dalam jumlah yang banyak pada pengujian lelah memungkinkan terjadinya tegangan pada berbagai tingkatan. Dari setiap pengujian, dicatat besarnya tegangan yang bekerja dan jumlah siklus yang terjadi sampai benda uji mengalami kegagalan atau patah. Dari data yang diperoleh dibuat dalam sebuah grafik tegangan-jumlah siklus (*S-N curve*).

Metode dasar dalam penyajian data kelelahan rekayasa adalah menggunakan kurva S-N, yaitu pemetaan tegangan (S) terhadap jumlah siklus (N) hingga terjadi kegagalan. Setiap titik pada kurva S-N menunjukkan *fatigue strength* pada jumlah siklus tertentu. Sedangkan batas ketahanan (*endurance strength*) merupakan suatu pernyataan tentang batas tegangan maksimum tertinggi yang tidak akan menyebabkan keggalan lelah pada bahan. Untuk besi cor kelabu batas ketahanan teoritis antara 35% sampai 50% dari kekuatan tariknya (*tensile strength*). Pada baja akan dijumpai suatu batas minimum tegangan yang masih dapat mengakibatkan kelelahan, pada tegangan di bawah batas ini kegagalan lelah tidak akan terjadi atau dapat dikatakan kelelahan akan terjadi pada siklus tak terhingga. Batas ini dinamakan *fatigue limit* yang menyatakan besarnya tegangan minimum yang akan menyebabkan kelelahan atau dapat dikatakan *fatigue strength* pada jumlah siklus tak terhingga.

## METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

### Pembuatan Spesimen Uji

Material awal yang digunakan dalam penelitian ini berupa besi cor kelabu berbentuk silinder pejal dengan diameter 32 mm dan panjang 600 mm. Sebelum dilakukan proses permesinan, material yang masih mengandung pasir dari hasil pengecoran, pada permukaannya dilakukan penggrindaan untuk mempermudah proses permesinan. Untuk proses permesinan kasar menggunakan mesin bubut konvensional atau manual, untuk memperoleh dimensi akhir yang diharapkan menggunakan mesin bubut CNC (jenis mesin yang digunakan CNC TU 2A). Untuk keperluan pengujian lelah dimensi spesimen uji mengacu pada standar ASTM E 466-82 tipe *continuous radius* dengan diameter kecil 9,3 mm, diameter besar 16 mm, panjang 200 mm, dan *radius curvature* 800 mm.

Spesimen yang telah melalui proses permesinan kemudian dibagi menjadi 3 untuk selanjutnya dilakukan proses austemper. Media yang digunakan sebagai media pendingin dalam proses austemper adalah garam  $KNO_3$  dan  $NaNO_2$ . Temperatur austenit yang digunakan adalah  $850^\circ C$  dengan waktu penahanan 2 jam dan variasi temperatur austemper adalah  $350^\circ C$ ,  $400^\circ C$ , dan  $500^\circ C$

### Proses Pengujian

#### a. Pengujian Lelah

Pengujian lelah dilakukan dengan menggunakan mesin uji *fatigue rotating bending* dengan kapasitas pembebanan maksimum 100 kg, dilaksanakan di laboratorium Proses Produksi Jurusan Teknik Mesin UNDIP.

#### b. Pengujian Struktur Mikro

Pengujian mikrografi berhubungan dengan diagram fasa dan untuk mendapatkan foto fasa dari material digunakan mikroskop, dimana koefisien perbesarannya sangat bervariasi. Untuk pengujian mikrografi dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik Teknik Mesin Universitas Diponegoro Semarang dengan menggunakan mikroskop bermerek Olympus U-MSSP4.

## DATA DAN ANALISA HASIL PENGUJIAN

### Data Hasil Pengujian Lelah

Hasil pengujian lelah dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 1. Hasil Uji Lelah Besi Cor Non Paduan tanpa Austemper (Yogi, 2004).

No	ID Spesimen	W(kg)	Sigma (Mpa)	N	Log N	Log S
1.	1.10a	15,53	194	3.648	3,56	2,29
2.	1.3a			3.529	3,55	2,29
3.	1.7a			3.106	3,49	2,29
4.	1.8a	12,6	158	23.320	4,37	2,20
5.	1.1a			7.800	3,89	2,20
6.	1.1b			5.231	3,72	2,20
7.	1.9b	10,5	131	69.381	4,84	2,12
8.	1.6b			61.771	4,79	2,12
9.	1.7b			45.658	4,66	2,12
10.	1.6a	9,25	116	71.660	4,86	2,06
11.	1.4a			194.332	5,29	2,06
12.	1.2a			207.402	5,32	2,06
13.	1.3b	8,82	110	75.448	4,88	2,04
14.	1.4b			373.068	5,57	2,04
15.	1.2b			158.797	5,20	2,04
16.	1.8b	7,55	94	1.005.215	6,00	1,97
17.	1.10b			1.007.152	6,00	1,97
18.	1.9a			1.005.308	6,00	1,97

Tabel 2. Hasil Uji Lelah Besi Cor Non Paduan Austemper  $350^\circ C$

No	ID Spesimen	W (kg)	Sigma (MPa)	N	Log N	Log S
1	1.a.1	16,6	206	742	2,87	2,31
2	1.a.2			970	2,99	2,31
3	1.a.3			1.057	3,02	2,31
4	1.b.1	13,8	171	25.715	4,41	2,23
5	1.b.2			6.953	3,84	2,23
6	1.b.3			7.382	3,87	2,23
7	1.c.1	10,9	135	33.698	4,53	2,13
8	1.c.2			122.127	5,09	2,13
9	1.c.3			55.823	4,75	2,13
10	1.d.1	8,2	102	1.020.565	6,01	2,01
11	1.d.2			1.055.936	6,02	2,01

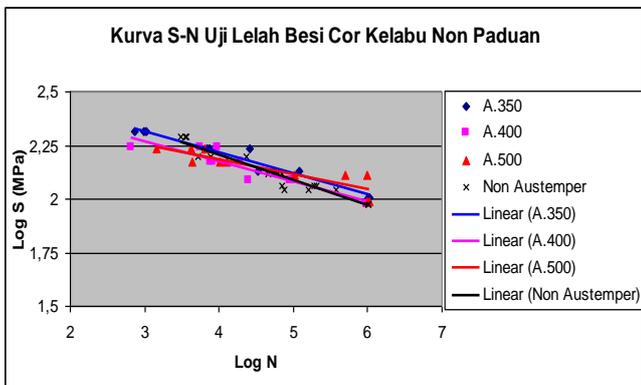
**Tabel 3** Hasil Uji Lelah Besi Cor Non Paduan

No	ID Spesimen	W (kg)	Sigma (MPa)	N	Log N	Log S
1	2.a.1	14	174	5.529	3,74	2,24
2	2.a.2			9.585	3,98	2,24
3	2.a.3			655	2,82	2,24
4	2.b.1	11,9	148	7.758	3,89	2,17
5	2.b.2			19.698	4,29	2,17
6	2.b.3			8.268	3,92	2,17
7	2.c.1	9,8	122	104.544	5,02	2,09
8	2.c.2			24.739	4,39	2,09
9	2.c.3			89.924	4,95	2,09
10	2.d.1	7,7	95	1.002.915	6,00	1,98
11	2.d.2			1.003.260	6,00	1,98

**Tabel 4.** Hasil Uji Lelah Besi Cor Non Paduan Austemper 500°C

No	ID Spesimen	W (kg)	Sigma (MPa)	N	Log N	Log S
1	3.a.1	13,8	171	4.206	3,62	2,23
2	3.a.2			6.418	3,81	2,23
3	3.a.3			1.446	3,16	2,23
4	3.b.1	11,9	148	10.460	4,02	2,17
5	3.b.2			4.384	3,64	2,17
6	3.b.3			12.806	4,11	2,17
7	3.c.1	10,4	129	498.319	5,70	2,11
8	3.c.2			103.450	5,01	2,11
9	3.c.3			1.000.212	6,00	2,11
10	3.d.1	7,8	97	1.003.261	6,00	1,99
11	3.d.2			1.052.586	6,02	1,99

Dari keempat tabel diatas, dapat dibuat grafik S-N sebagai berikut:

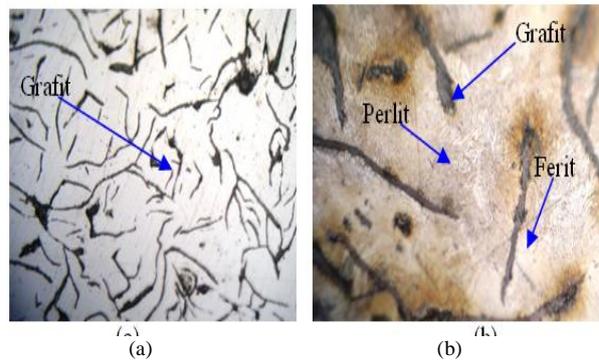


**Gambar 3.** Grafik Hasil Pengujian Lelah

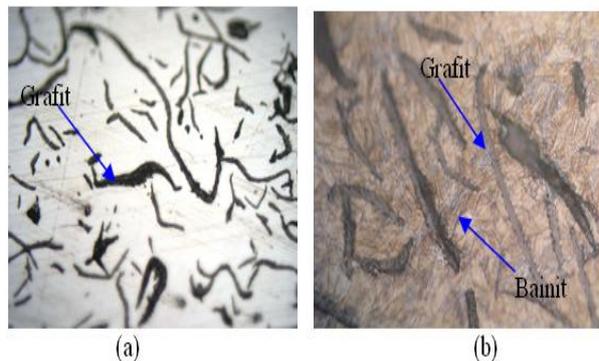
Dari Gambar 3 diatas, dapat diketahui bahwa hasil pengujian lelah menunjukkan adanya peningkatan kekuatan lelah setelah dilakukan proses austemper pada besi cor kelabu non paduan. Besarnya peningkatan kekuatan lelah adalah 8,5% dari 94 MPa untuk besi cor kelabu non paduan tanpa austemper, menjadi 102 MPa untuk austemper 350°C.

**Pengujian Metalografi**

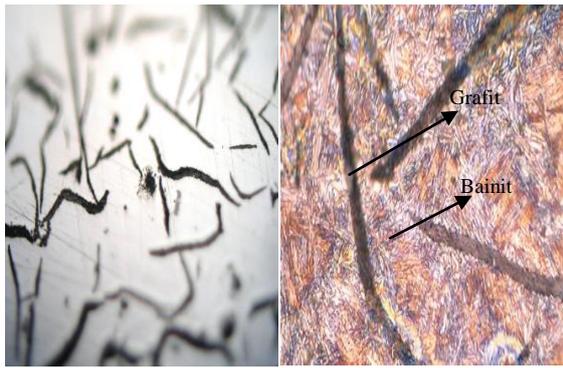
Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terjadi pada material sebelum perlakuan dan setelah mengalami perlakuan panas austemper, juga sebagai pendukung dalam menganalisa terjadinya penurunan kekuatannya.



**Gambar 4.** Struktur mikro besi cor kelabu non paduan tanpa austemper; (a) aspolish perbesaran 500x dan (b) etsa, perbesaran 1000x

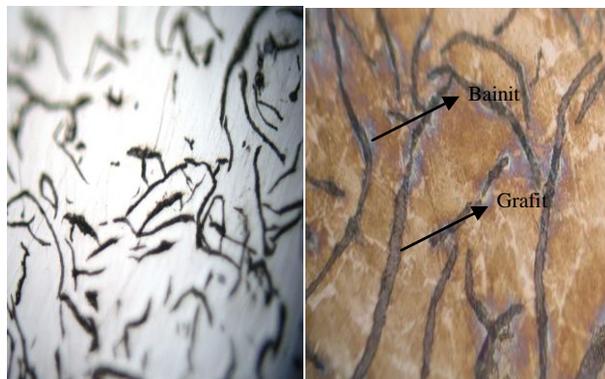


**Gambar 5.** Struktur mikro besi cor kelabu non paduan dengan austemper 350°C; (a) aspolish perbesaran 500x dan (b) etsa, perbesaran 1000x



(a) (b)

**Gambar 6** Struktur mikro besi cor kelabu non paduan dengan austemper 400°C; (a) aspolish perbesaran 500x dan (b) etsa, perbesaran 1000x



(a) (b)

**Gambar 7.** Struktur mikro besi cor kelabu non paduan dengan austemper 500°C; (a) aspolish perbesaran 500x dan (b) etsa, perbesaran 1000x

Dari hasil pengujian struktur mikro diatas terlihat bentuk gafitnya serpih tipe VII dengan ditribusi sebarang untuk semua besi cor, baik dengan perlakuan austemper maupun tanpa austemper.

Dari gambar sturktur mikro material yang telah dietsa menggunakan nital 5% terlihat fasa matrik yang terdapat pada material uji. Untuk besi cor non paduan tanpa austemper terlihat fasa matrik berupa perlit, serta ferrit bebas dengan jumlah sedikit. Untuk besi cor non paduan dengan temperatur austemper 350°C terlihat matrik perlit berubah menjadi bainit dengan jumlah yang banyak. Sedangkan untuk material uji dengan temperatur austemper 400°C, jumlah matrik bainit lebih sedikit dibandingkan dengan austemper 350°C. Begitu juga untuk material uji dengan temperatur 500°C, matrik bainit tidak begitu terlihat, lebih banyak ferrit bebas yang tersebar. Perubahan fasa matrik dari perlit menjadi bainit telah menaikkan kekuatan lelah besi cor kelabu.

## PENUTUP KESIMPULAN

1. Perlakuan panas Austemper telah merubah fasa matrik besi cor kelabu non paduan dari matrik perlit menjadi matrik bainit.
2. Perlakuan panas Austemper juga menaikkan kekuatan lelah besi cor kelabu non paduan sebesar 8,5%.
3. Dari analisa regresi dan analisa korelasi didapat hubungan yang linier antara tegangan dan logaritma jumlah siklus telah sesuai. Besarnya harga  $R^2$  (*r-squared*) mendekati 1 menunjukkan korelasi positif yang kuat antara S dan N. Persamaan garis regresi :

Non Austemper ,  $\text{Log } S = -0,1203 \text{ Log } N + 2,6884$   
 Austemper 350°C  $\text{Log } S = -0,0987 \text{ Log } N + 2,6117$   
 Austemper 400°C  $\text{Log } S = -0,0933 \text{ Log } N + 2,5474$   
 Austemper 500°C  $\text{Log } S = -0,0704 \text{ Log } N + 2,4649$

Koefisien korelasi :

Non Austemper  $R^2 = 0,9364$   
 Austemper 350°C  $R^2 = 0,9579$   
 Austemper 400°C  $R^2 = 0,8754$   
 Austemper 500°C  $R^2 = 0,79$

4. Dari penampang patahan besi cor kelabu non paduan, cukup banyak bagian yang mengalami perambatan retak atau patah lelah, namun masih termasuk ke dalam patahan retak getas.

## SARAN

1. Pada pengujian kekuatan lelah suatu material, spesimen uji perlu disiapkan sehati-hati mungkin, karena banyak faktor yang dapat mempengaruhi kekuatan lelah suatu material.
2. Pada saat pemasangan spesimen uji pada mesin uji *fatigue rotating bending*, diharapkan harus benar-benar tepat, karena pemasangan berulang-ulang akan dapat menimbulkan keretakan awal pada spesimen uji.
3. Celup cepat pada proses austemper harus dilakukan secepat mungkin agar tidak terjadi transformasi dari austenit menjadi ferit atau perlit akibat pendinginan lambat di udara

## DAFTAR PUSTAKA

1. ASM HANDBOOK, Volume 1 “*Properties And Selection : Iron, Steels and High-Performance Alloys*”.
2. ASTM E 206-72, *Standard Definition of Terms Relating to Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data*.
3. ASTM E 739-80, *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ε-N) Fatigue Data*.
4. E.Dieter, George. Sرياتie Djaprie, Metalurgi Mekanik Jilid 2, Erlangga, Edisi Ketiga, 1988.

5. E.Sigley, Joseph. Charles R.Mischke, *Mechanical Engineering Design fifth edition*, McGraw Hill Book Company, 1989.
6. E.Sigley,Joseph. Larry D. Mitchell, *Perencanaan Teknik Mesin Jilid 1*, Erlangga Edisi Keempat, 1994.
7. Surdia,Tata. Kenji Chijiwa, *Teknik Pengecoran Logam*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta, Cetakan Keenam, 1991.
8. Vlack, Van. Sriatie Djaprie, *Ilmu dan Teknologi Bahan*, Erlangga, 1986.
9. K.L. Hayrynen, K.R. Brandenburg, J.R. Keough, 2002, *Applications of Austempered Cast Irons*, Applied Process Technologies Division, Livonia, MI.
10. T. Alp, A. A. Wazzan and F. Yilmaz, F. Yilmaz , 2005, *Microstructure–Property Relationship in Cast*, The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 30, Number 2B. 163.
11. Kuntoro, Yogi. *Pengaruh Penambahan Paduan Kromium (ferrochrome low carbon) dan Tembaga Terhadap Kekuatan Lelah (fatigue strength) Besi Cor Kelabu*, Tugas Akhir. 2004. Teknik Mesin Universitas Diponegoro Semarang.