



PERUBAHAN MIKROSTRUKTUR BAJA 12% Cr SELAMA CREEP

Didin S. Winatapura, Elman Panjaitan, A. Arslan dan Sulistioso G. S
Pusat Penelitian Sains Materi - BATAN

ABSTRAK

PERUBAHAN MIKROSTRUKTUR BAJA 12% Cr SELAMA CREEP. Perubahan mikrostruktur pada baja 12% Cr atau DIN X20CrMoV 12 1 selama *creep* telah dipelajari dengan mikroskop optik dan TEM. Pengujian *creep* pada 650 °C dihubungkan dengan pembebanan konstan pada 650 MPa. Perlakuan panas cuplikan sebelum *creep* terdiri dari austenisasi yang diikuti oleh *temper* selama 2 jam. Mikrostruktur yang diperoleh merupakan mikrostruktur martensit *temper* yang tersusun dari *lath-lath* martensit dan terdistribusikan secara acak di dalam matrik. Selama *temper*, partikel-partikel karbida khrom (Cr_7C_6) berukuran lebih kecil dari 0,2 μm terbentuk di dalam dan atau pada bidang batas sub butir dan *lath* martensit. Partikel-partikel karbida khrom (Cr_7C_6) tersebut bertransformasi dan kemudian diendapkan menjadi presipitat karbida khrom, $Cr_{23}C_6$ selama uji *creep*. Pembentukan lompong (*void*) terjadi pada tahap *creep* kedua, yang selanjutnya berkembang menjadi retakan *creep*. Pada tahap *creep* ketiga selama 3554 jam, cuplikan mengalami kegagalan. Retak *creep* yang terbentuk merupakan model retakan *transgranular* dan *intergranular* yang merambat hampir tegak lurus terhadap sumbu *stress*. Dari hasil pengamatan ini dapat diperkirakan bahwa partikel-partikel karbida khrom Cr_7C_6 yang terbentuk selama perlakuan *temper* menyebabkan mikrostruktur martensit ulet yang meningkatkan ketahanan terhadap *creep* baja 12% Cr.

ABSTRACT

MICROSTRUCTURE CHANGE IN 12% Cr STEEL DURING CREEP. The microstructure change in steel containing of 12% Cr or DIN X20CrMoV 12 1 during *creep* has been studied by means of optical microscopy and Transmission Electron Microscope (TEM). The *creep* testing at 650 °C was conducted under constant load of 650 MPa. The heat treatment of the specimen before *creep* testing was austenization, followed by tempering for 2 hours. The obtained microstructure was tempered martensitic. This microstructure consisted of the martensite laths, and distributed randomly in the matrix. During tempering, chromium carbide particles of Cr_7C_6 less than 0,2 μm -size were precipitated on or and in the subgrain and lath martensite grain-boundary. During *creep* testing, those particles transformed and precipitated as chrome carbide precipitates of $Cr_{23}C_6$. At the secondary *creep* stage, the void formation occurred, and then it developed into the *creep* cracks. At tertiary *creep* stage for 3554 hours, the specimen was failure. The *creep* cracks were informs of *transgranular* and *intergranular* modes which propagated almost perpendicular to the *stress* axis. From this observation, it is suggested that tempering caused the ductility of martensitic microstructure, which increased the *creep* resistant of Cr 12 % steel.

PENDAHULUAN

Uji tarik pada suhu kamar dari kebanyakan logam teknik pada umumnya tidak bergantung terhadap waktu. Pengujian tersebut hanya membutuhkan waktu relatif singkat sekitar 2 menit sampai 2 jam. Namun pada suhu tinggi, pengujian menjadi sangat bergantung pada kecepatan regangan dan waktu pengujian. Logam yang diberikan pembebanan tarik konstan pada suhu tinggi akan mengalami *creep* dan perpanjangan yang meningkat bergantung waktu. Baja 12% Cr atau DIN X20CrMoV 12 1 digunakan dalam instalasi nuklir seperti turbin *blade* dalam suatu reaktor atau dalam instalasi suhu tinggi

seperti *steam power* sebagai komponen generator dan turbin uap. Dalam penggunaannya sebagai turbin *blade* dalam suatu reaktor, pada saat beroperasi akan mengalami gaya sentrifugal yang cukup besar disertai dengan kenaikan suhu yang cukup tinggi. Hal ini akan mengalami *creep* yang dapat menyebabkan perubahan pada mikrostruktur yaitu terjadinya pergeseran batas butir. Hal ini mengakibatkan turbin *blade* akan mengalami penyusutan dengan arah sejajar terhadap arah gaya sentrifugal. Keberadaan *lath-lath* martensit yang terdistribusi di dalam matrik baja 12 % Cr akan memperkecil terjadinya resiko tersebut di atas.

Untuk mendapatkan baja 12% Cr tahan *creep*, perlakuan panas austenisasi dilakukan

pada 1050°C yang kemudian diikuti dengan pencelupan ke dalam minyak (*oil quenched*). Perlakuan tersebut menghasilkan mikrostruktur martensit yang mengandung mikrostruktur austenit dan δ -ferit serta memiliki kerapatan dislokasi cukup tinggi [1-5]. Mikrostruktur martensit ini getas (*brittle*) dan kekuatannya tinggi, tetapi ketahanan terhadap *creep* rendah. Oleh karena itu, perlakuan *temper* dilakukan pada 750°C selama 2 jam agar dapat meningkatkan ketahanan *creep* pada mikrostruktur martensit. Hasil perlakuan *temper* menunjukkan adanya partikel-partikel karbida khrom, Cr₇C₆ dengan ukuran tampang lintang beberapa mikrometer di dalam mikrostruktur martensit. Berdasarkan hasil pengamatan ini diperkirakan bahwa partikel-partikel karbida khrom, Cr₇C₆ yang terbentuk selama *temper* ikut berkontribusi ketahanan terhadap *creep*. Penambahan sejumlah kecil unsur-unsur seperti vanadium, niobium dan tungsten juga

dapat meningkatkan ketahanan terhadap *creep* baja 12% Cr [3,4].

Penelitian ini merupakan bagian dari pengujian yang telah dilakukan untuk memprediksi waktu pakai (*life time*) baja 12% Cr. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan perubahan mikrostruktur selama perlakuan *temper* dan *creep* dengan menggunakan mikroskop optik dan TEM.

TATA KERJA

Penelitian ini dilakukan di Institut Bahan Reaktor (IRW) KFA-Juelich, Jerman dalam rangka kerja sama bilateral antara BATAN, Indonesia dan KFA, Jerman.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja 12% Cr atau DIN 20CrMoV 12 1 yang memiliki komposisi kimia seperti ditunjukkan dalam Tabel 1. Tata kerja penyediaan cuplikan dan pengujian *creep* ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi kimia baja 12% Cr atau DIN 20CrMoV 12 1

UNSUR	C	Cr	Ni	Mo	V	Si	S	Mn	P
% BERAT	0,19	11,7	0,62	0,96	0,30	0,45	0,017	0,54	0,16

Tabel 2. Tata kerja perlakuan panas dan pengujian *creep* baja 12% Cr atau DIN 20CrMoV 12 1

No.	Kondisi perlakuan dan pengujian
1.	Austenisasi pada 1050 °C selama 1 jam dan <i>temper</i> pada 750 °C selama 2 jam, diikuti pendinginan udara sampai suhu kamar.
2.	<i>Creep</i> selama 100 jam
3.	<i>Creep</i> selama 705 jam
4.	<i>Creep</i> selama 3000 jam
5.	<i>Creep</i> selama 3554 jam
	Pengujian <i>creep</i> dilakukan pada 650 °C dengan beban konstan 650 MPa.

Pengujian *creep* dilakukan menggunakan mesin *creep* Mayes TC 30. Suhu masing-masing cuplikan diukur dengan termokopel Ni/CrNi (tipe K). Cuplikan hasil *temper* dan *creep* diamati menggunakan mikroskop optik dan TEM. Pengujian cuplikan berupa

cuplikan transparan TEM (*thin foil*) dikerjakan dengan teknik *double jet polishing* dengan ukuran *disk* berdiameter 3 mm di dalam campuran asam asetat dan perkhlorat pada suhu 7-10 °C.

HASIL DAN BAHASAN

Baja 12 % Cr yang memiliki mikrostruktur martensit memiliki kekerasan (*hardness*) dan kekuatan (*strength*) yang tinggi, tetapi ketahanan retak (*fracture strength*) dan ketangguhan (*toughness*) sangat rendah karena baja martensit bersifat getas (*brittle*). Mikrostruktur martensit tersebut dihasilkan dengan perlakuan panas austenisasi pada 1050°C diikuti pencelupan ke dalam minyak (*oil quenched*). Mikrostruktur martensit dari baja 12% Cr yang diamati memiliki kandungan karbon yang rendah ($C = 0,19\%$ berat) dan hanya tersusun dari mikrostruktur martensit *lath*. *Lath* martensit merupakan kristal berbentuk *lath* atau berbentuk papan sejajar (*parallel board*) dengan mikrostruktur yang tersusun dari dislokasi tidak teratur (*tangled dislocations*) dan sejumlah kecil mikrostruktur austenit dan ferit diantara *lath*.

Dalam penelitian ini, guna meningkatkan ketahanan *creep* dan ketangguhan pada mikrostruktur martensit diberikan perlakuan *temper* pada 750°C selama 2 jam. Perlakuan *temper* ini menghasilkan mikrostruktur martensit *temper* dan partikel-partikel karbida. Partikel-partikel tersebut telah diidentifikasi dengan TEM sebagai partikel karbida khrom, Cr_7C_6 yang belum stabil dengan ukuran tampang lintang beberapa mikrometer hingga beberapa puluh mikrometer dan terdistribusi secara acak pada bidang batas butir dan *lath* martensit, seperti ditunjukkan oleh tanda panah pada Gambar 1. Egger [1] telah mengorelasikan pengaruh perlakuan *temper* terhadap tingkat penurunan kekerasan mikrostruktur martensit baja 12% Cr, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Pada Gambar 2 bahwa mikrostruktur martensit turun tajam dengan kenaikan waktu *temper*. Penurunan tingkat kekerasan pada mikrostruktur martensit ini disebabkan oleh terbentuknya partikel-partikel karbida berukuran kecil (*fine carbide particles*) diikuti dengan penurunan kerapatan dislokasi di dalam mikrostruktur.

Selama *temper*, pengintian (*nucleation*) partikel-partikel karbida mendominasi diikuti oleh migrasi batas butir dan transformasi *lath* martensit menjadi sub butir. Secara prinsip, perlakuan *temper* meliputi beberapa proses perubahan mikrostruktur yang saling terkait di antaranya adalah presipitasi karbon dari larutan padat

lewat jenuh (*supersaturated solid solution*), transformasi mikrostruktur martensit menjadi ferit dan *relief residual stress* [5,7,8].

Hasil *creep* baja 12 % Cr pada 650 °C dengan beban konstan 650 MPa ditunjukkan pada Tabel 3. Hasil penjabaran dari Tabel 3 diperoleh kurva *creep* yang ditunjukkan pada Gambar 3. Pada *creep* tahap awal (*primary creep*) hingga 705 jam, regangan yang dihasilkan sekitar 0,97%. Penyesuaian plastis yang cepat pada bidang batas butir dan cacat terjadi dalam tahap *creep* ini. Penyesuaian ini menyebabkan laju regangan lambat diikuti pengerasan regangan (*strain hardening*). Pada *creep* tahap kedua (*secondary creep*) hingga 3000 jam dengan regangan yang dicapai sekitar 6,10%, laju *creep* hampir konstan dan menyebabkan keseimbangan antara pengerasan regangan dan *recovery*. Nilai rata-rata *creep* tahap ini disebut kecepatan *creep* minimum dengan menghasilkan perubahan mikrostruktur seperti *necking* atau pembentukan *void*. Keadaan ini terus berlangsung sampai terjadinya regangan yang cukup besar sekitar 13,7% dan menyebabkan penurunan tampang lintang. Perubahan tampang lintang dan beban konstan menyebabkan laju regangan dipercepat sampai terjadi retakan dan kegagalan *creep* (*creep failure*) pada cuplikan.

Tabel 3. Hasil uji *creep* baja 12 % Cr atau DIN X20CrMoV 12 1 pada 650°C dengan pembebanan konstan 650 MPa

No.	Nama cuplikan	Pengujian Creep Waktu (Jam)	Regangan (%)	Keterangan
1.	MX20Cr-1	100	0,23	-
2.	MX20Cr-2	705	0,97	-
3.	MX20Cr-3	3000	6,10	-
4.	MX20Cr-4	3554	13,7	Gagal (<i>failure</i>)

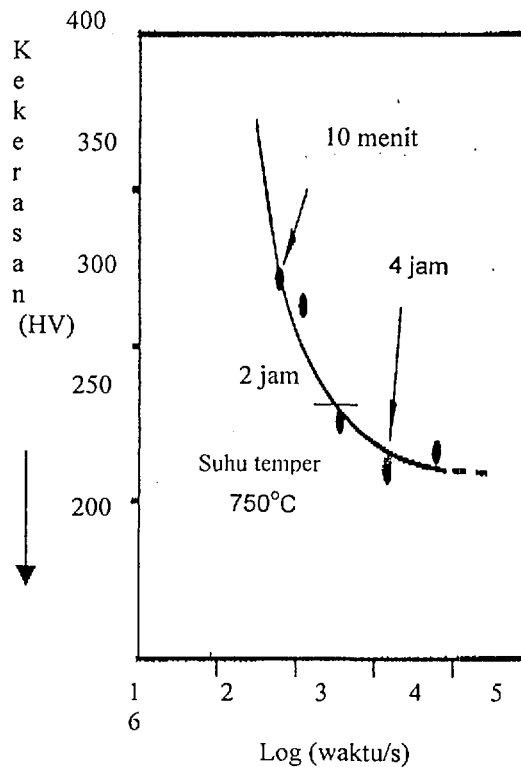
Mikrostruktur baja 12% Cr hasil uji *creep* yang diamati dengan menggunakan mikroskop optik ditunjukkan pada Gambar 4. Pada *creep* tahap awal hingga 705 jam, partikel-partikel karbida khrom, Cr_7C_6 yang terbentuk selama perlakuan *temper*, selanjutnya bertransformasi menjadi karbida khrom, $Cr_{23}C_6$ yang kemudian tumbuh dan diendapkan sebagai presipitat karbida khrom,



Gambar 1. Mikrograf TEM yang menunjukkan partikel-partikel karbida khrom, Cr_7C_6 terdistribusi secara acak pada bidang batas lath martensit pada baja 12 % Cr (tanda panah). Perlakuan panas austenisasi pada 1050 °C, diikuti oleh temper pada 750°C.

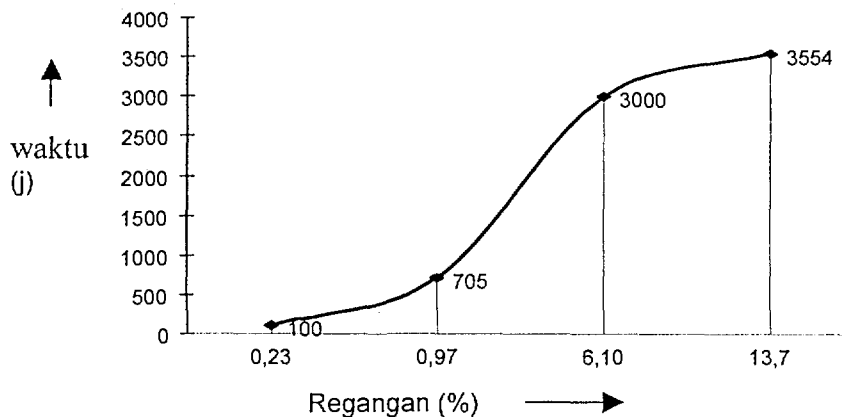
selanjutnya bertransformasi menjadi karbida khrom, $Cr_{23}C_6$ yang kemudian tumbuh dan diendapkan sebagai presipitat karbida khrom, $Cr_{23}C_6$ yang stabil seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Vanadium karbonitrid, V_4C_3 dan Mo_6C_3 tidak dapat diidentifikasi dalam pengamatan ini. Hasil pengamatan terdahulu [8-10], mengemukakan bahwa kedua presipitat tersebut telah tercakup ke dalam presipitat karbida khrom $Cr_{23}C_6$ untuk kandungan vanadium dan molibdenum yang cukup tinggi.

Keadaan mikrostruktur baja 12% Cr pada *creep* tahap kedua selama 3000 jam



Gambar 2. Pengaruh temper terhadap tingkat penurunan kekerasan mikrostruktur pada baja 12% Cr atau DIN X20CrMoV 12 1^[1].

ditunjukkan pada Gambar 4c. Pada *creep* tahap ini terlihat perkembangan lompong (*void*) dapat diamati dengan menggunakan mikroskop optik (tanda panah pada Gambar 4c). Perkembangan lompong ini terus berlangsung dan akhirnya membentuk suatu retakan seperti ditunjukkan oleh tanda panah pada Gambar 4d. Uji *creep* tahap akhir ini berlangsung selama 3554 jam dan cuplikan itu telah mengalami kegagalan *creep* (*creep failure*). Dalam Gambar terlihat bahwa retak *creep* (*creep fracture*) merambat tegak lurus arah penjalanan *stress*. Dalam baja 12 % Cr yang ditemper pada 700 °C^[4],



Gambar 3. Kurva *creep* baja 12% Cr pada 650 °C dengan pembebanan konstan 650 MPa.

lintasan retak *creep* yang teramati merupakan campuran dari retakan *transgranular* dan *intergranular*. Retak *creep* (*creep fracture*) umumnya ditemukan berdekatan dengan retak permukaan (*surface rupture*) dalam setiap cuplikan baja 12% Cr yang diamati dan terbentuk di sekitar daerah *inclusion*.

Hasil pengamatan cuplikan dengan EPMA^[2,4] mengungkapkan bahwa *inclusion* yang terbentuk dalam mikrostruktur baja 12% Cr yang diuji *creep* merupakan oksida, sulfida mangan, silikat dan silikat oksida. *Inclusion* tersebut berperan sebagai pengintian lompong yang berbentuk bulat atau memanjang. Lompong berkembang menjadi retakan mikro (Gambar 4c) merambat sepanjang bidang batas *lath* martensit atau bidang batas butir austenit dan berkembang menjadi retakan dengan kenaikan waktu pengujian (Gambar 4d). Namun demikian hasil pengamatan metalografi terdahulu^[2,4] mengungkapkan bahwa dalam cuplikan baja 12% Cr yang *ditemper* pada 700 dan 750 °C, retakan *creep* yang terbentuk tidak memiliki perbedaan yakni model retakan *transgranular* dan *intergranular*. Berdasarkan hasil pengamatan ini menunjukkan bahwa penjalaran retakan *creep* yang terbentuk hampir tegak lurus arah *stress* tarik, seperti ditunjukkan oleh tanda panah pada Gambar 4d. Hasil pengamatan Gooch^[4] mengungkapkan bahwa retakan *creep* dalam bahan 12% Cr yang *ditemper* pada 750 °C terjadi pada *shear bands* dengan membentuk sudut

hampir 45 °C terhadap arah *stress* tarik maksimum.

Mekanisme yang mendasar dari pengintian lompong dalam mikrostruktur baja 12% Cr adalah oleh dekohesi dari bidang antar muka antara matrik/partikel hasil dari deformasi atau pergeseran bidang batas butir, deformasi bidang batas *lath* martensit dan gerakan dislokasi di dalam butiran. Telah diungkapkan bahwa baja 12% Cr paduan khrom tinggi memiliki ketahanan terhadap pergeseran bidang batas butir *lath* martensit dan *zone shear* relatif lebih tinggi dari pada baja ferit paduan khrom rendah^[5]. Hasil pengamatan terdahulu^[6] menemukan bahwa pengintian *cavity* terjadi pada karbida khrom, $M_{23}C_6$ pada bidang batas austenit. Karbida tersebut lebih potensial berperan sebagai pengintian *cavity* dari pada karbida pada martensit yang terbentuk selama *temper* sehingga laju pertumbuhan retak *creep intergranular* berawal pada bidang batas butir austenit^[10]. Berdasarkan penjelasan di atas jelas bahwa selama uji *creep* pada 12% Cr, tegangan tarik memegang peranan sangat penting dalam pengintian dan atau pertumbuhan retak *creep* model *trans* dan *intergranular* dan meningkat dengan kenaikan waktu pengujian. Dengan demikian pengujian *creep* dapat menyebabkan perubahan mikrostruktur martensit *temper* pada baja 12% Cr dengan terbentuknya retakan-retakan *creep* sebagai hasil deformasi. Pada suatu kasus tertentu, apabila presipitat karbida, $M_{23}C_6$ menghambat gerakan dislokasi maka akan terbentuk suatu daerah

dengan kekerasan meningkat dan pada daerah tersebut, ketahanan *creep* turun.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengamatan uji *creep* baja 12% Cr atau DIN X20CrMoV12 1 pada 650°C dengan beban konstan 650 MPa dapat disimpulkan.

1. Perlakuan austenisasi yang diikuti *temper* menghasilkan mikrostruktur martensit *temper* yang tersusun dari *lath-lath* martensit. Partikel-partikel karbida khrom, Cr₇C₆ kecil berukuran lebih kecil dari 0,2 μm terbentuk pada bidang batas sub butir dan *lath* martensit
2. Uji *creep* baja 12% Cr menyebabkan perubahan mikrostruktur yakni terbentuknya retakan *creep* sebagai hasil deformasi.
3. Partikel-partikel karbida khrom, Cr₇C₆ yang terbentuk selama *temper* pada 750°C berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan *creep*, partikel karbida khrom, Cr₇C₆ tersebut bertransformasi menjadi karbida khrom, Cr₂₃C₆ dan diendapkan sebagai presipitat karbida khrom, Cr₂₃C₆ yang stabil.
4. Retakan *creep* yang dihasilkan merupakan campuran retakan *transgranular* dan *intergranular*.
5. Cuplikan baja 12 % Cr mengalami kegagalan *creep* (*creep failure*) setelah 3554 jam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. H. Nickel selaku Direktur IRW-KFA Jerman, Dr. H. Schuster dan Dr. P. Krautwasser dari Kelompok SANS dan TEM atas kerjasama mereka.

PUSTAKA

- [1]. EGGELER G., NILSVANG N., dan ILSCHNER B., *Microstructure change in 12% Cr steel during creep*, Steel Research Issue, 2 (1987) 97.
- [2]. SANDSTROOM R., KARLSON S., dan MODIN S., *The Residual Life Time of Creep Deformed Materials*, High Temperature Technology, 3 (1985) 71.
- [3]. ANONYM, *Properties and Selection : Iron, Steel, and High-performance*

Alloys, Metal Handbook, ASTM International, 10 ed. (1990) 133.

- [4]. GOOCH D. J., *Creep Fracture of 13,2% Cr-Mo-V steel*, Metal Science, 16 (1982) 79.
- [5]. FUJITA dan TAKAHASHI N., *The Effect of Small Amount of V and Nb of Microstructure and Creep Strength of 12% Cr Heat Resisting Steel*, Steel Research Issue, 2 (1987) 23.
- [6]. DIETER G. E., *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill Book Company, New York, 3 th ed. (1987) 125.
- [7]. JOHANSENN T. dan THALEN A., *The Role of Grain Boundaries in Creep Deformed*, Metals Science Journal, 6 (1972) 189.
- [8]. KRAUTWASSER P., Private discussion.
- [9]. HAM R. K., COOK R. H., PURDY G. R. dan WILLOUGHBY G., *The Influence of Gamma Precipitation upon The Creep of Gamma Prime (Ni₃(Al,Ti)) Single Crystals*, Metals Science Journal, 6 (1972) 205.
- [10]. KEGG G. R. dan SILCOCK J. M., *The Effect of Nickel on Austenit on The Precipitation of Chromium in Austenit*, Metals Science Journal, 6 (1972) 47.

TANYA JAWAB

Mochamad Rochili

- Berapa ukuran sampel yang digunakan dalam penelitian ini ?
- Bagaimana cara pemotongan dalam proses pembuatan sampel ?
- Bagaimana kontribusi panas yang diberikan pada sampel terhadap proses pembentukan karbida khrom?

Didin S. Winatapura

- Sampel yang digunakan berbentuk pelat dengan ukuran panjang = 15 cm dan lebar = 2,5 cm.
- Cara pemotongan dalam proses pembuatan sampel adalah dengan menggunakan *diamond wafering blade* dalam minyak (oli).
- Panas yang diberikan pada sampel mengakibatkan khrom berdifusi untuk mengikat karbon sehingga terbentuk karbida khrom. Karbida khrom terbentuk pada dan atau di dalam batas butir.

Futichah

- Mekanisme apa saja yang terjadi pada proses pengujian *creep* ?
- Apa peran Cr_7C_6 pada mekanisme *creep* ?

Didin S. Winatapura

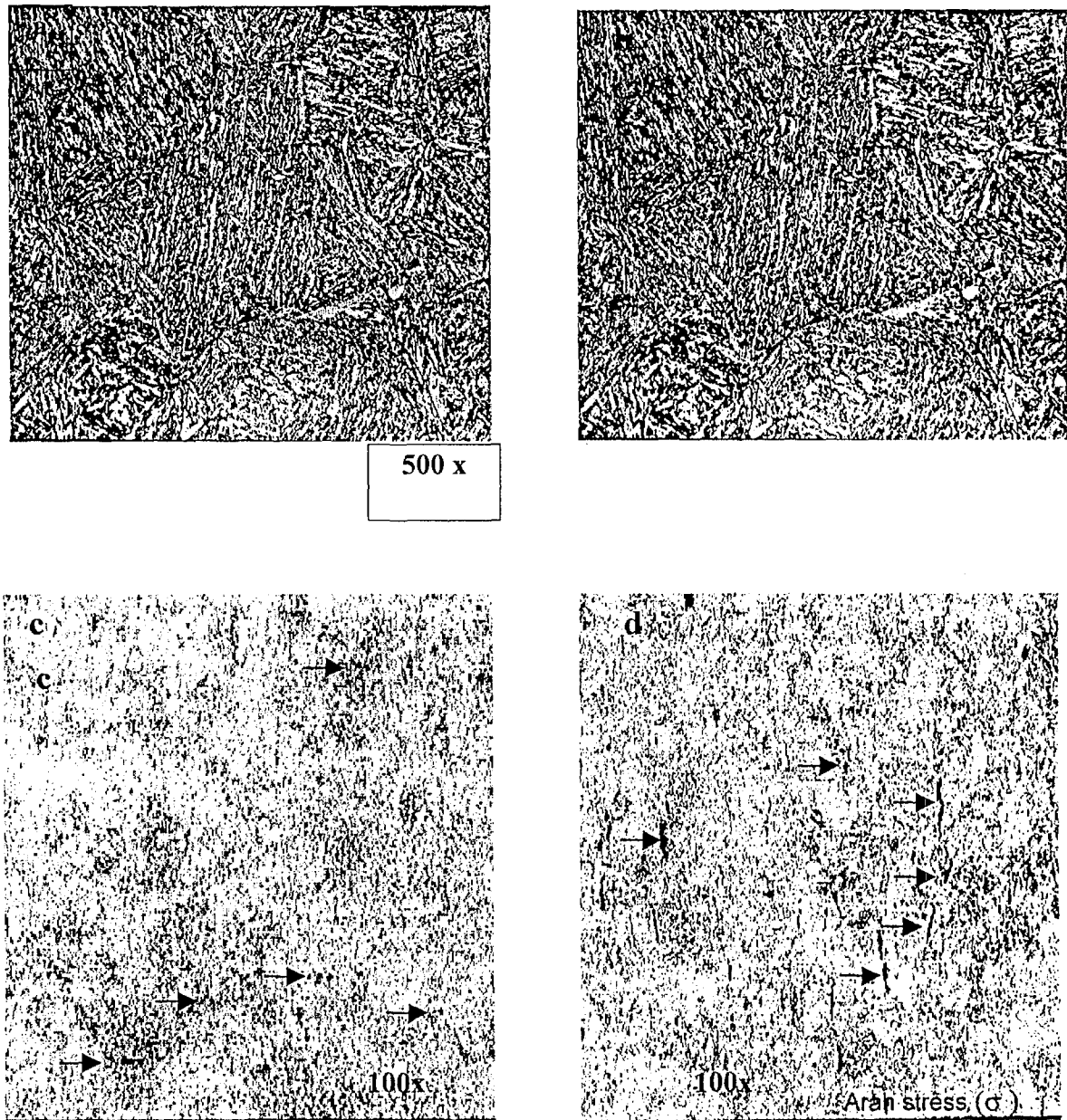
- Mekanisme yang terjadi pada pengujian *creep* adalah pergeseran batas butir dan difusi kekosongan.
- Partikel-partikel Cr_7C_6 terbentuk selama proses temper, kemudian partikel tersebut bertransformasi menjadi partikel Cr_{23}C_6 yang stabil. Karbida khrom berperan dalam menahan atau memperkecil proses pergeseran batas butir.

Hasbullah Nasution

- Mohon dijelaskan latar belakang penelitian ini ?
- Mengapa proses martenisasi didahului oleh austenisasi ?
- Kapan pembentukan Cr_7C_6 terjadi ?
- Apakah sebelum penelitian dilakukan analisis komposisi bahan ?
- Apakah kekuatan martensit dipengaruhi oleh Cr_7C_6 ?

Didin S. Winatapura

- Material yang digunakan sebagai *turbin blade* selalu mendapat beban yaitu gaya sentrifugal tinggi yang diikuti dengan kenaikan temperatur sehingga material mengalami *creep*. Baja 12% Cr mempunyai *lath-lath* martensit yang terdistribusi di dalam matriks. Keberadaan *lath-lath* martensit tersebut dapat memperkecil resiko *creep* pada material.
- Austenisasi dilakukan pada $T = 1050^\circ\text{C}$ yang dimaksudkan untuk menghilangkan tegangan sisa dan memperbanyak kandungan *lath-lath* martensit.
- Presipitat Cr_7C_6 merupakan partikel yang terbentuk selama proses temper pada $T = 750^\circ\text{C}$.
- Analisis komposisi bahan sebelum pengujian dilakukan dengan menggunakan TEM dan EDS.
- Martensit bersifat getas dengan perlakuan temper pada $T = 750^\circ\text{C}$ dapat menurunkan tingkat kekerasan dan meningkatkan keuletan material. Selama temper terbentuk partikel-partikel berukuran $\cong 2 \mu\text{m}$ yang diduga partikel karbida khrom (Cr_7C_6).



Gambar 4. Keadaan mikrostruktur baja 12 % Cr hasil uji *creep* dengan regangan 0,23 % (a) 0,97 % (b) 6,10 % (c) dan 13,7 % (d) untuk waktu masing-masing selama 100 jam, 705 jam, 3000 jam dan 3554 jam.



Gambar 5. TEM mikrograf yang menunjukkan presipitat karbida khrom, $M_{23}C_6$ pada bidang batas *lath* martensit dalam mikrostruktur baja 12 % Cr pada *creep* tahap awal selama 705 jam, dengan regangan 0,97 %.