

VARIASI MEDIA PENDINGINAN TERHADAP KEKERASAN MATERIAL LOGAM HASIL TEMPA TEMPA PANAS PANDAI BESI

Nufal Akbar¹, Djoko Andrijono², Mardjuki³

Abstraksi

Pandai besi merupakan proses pembentukan logam dengan cara memanaskan baja bekas terdiri dari baja karbon rendah (plat) dan baja karbon tinggi (batangan) pada dapur pemanas dengan menggunakan bahan bakar arang kayu jati sampai mencapai temperatur rekristalisasi dan ditempa panas secara bertahap sampai kedua baja bekas menyatu sampai membentuk produk yang diinginkan serta selanjutnya dilakukan proses pendinginan cepat. Pengujian meliputi komposisi kimia, pengamatan struktur mikro dan uji kekerasan. Permasalahan meliputi: (a) temperatur pembakaran arang kayu jati di bawah temperatur rekristalisasi, (b) hasil tempa panas setelah proses pendinginan cepat sangat getas dan retak. Tujuan penelitian membandingkan dan menganalisa sifat kekerasan serta struktur mikro hasil tempa panas setelah proses pendinginan oli SAE 50, SAE 90, SAE 140. Hasil uji komposisi kimia pada baja karbon rendah mengandung 0,13285% C dan baja karbon menengah mengandung 1,2617% C. Hasil penelitian menunjukkan baja bekas, angka kekerasan tertinggi pada SAE 50 dan terendah pada SAE 140 dan struktur mikro yang terbentuk lebih dominan fasa ferit yang sifatnya ulet dibanding fasa perlit yang sifatnya keras dan getas. Kesimpulan penelitian sifat kekerasan hasil tempa panas dan pendinginan oli: SAE 50, SAE 90, SAE 140 semakin menurun dan fasa yang terbentuk fasa ferit lebih dominan dibanding fasa perlit.

Kata Kunci : Baja Bekas, Tempa Panas, Pendinginan

PENDAHULUAN

Pandai besi (*black smith*) merupakan tukang atau usaha kerajinan umumnya berlokasi di dusun atau di desa dengan berbagai produk kerajinan dan peralatan pertanian. Proses tempa (*forging process*) pada pandai besi teknologi prosesnya sangat sederhana dan tidak memerlukan pengetahuan (*knowledge*) khusus tetapi ketrampilan (*skill*) sangat dibutuhkan. Pandai besi merupakan proses pembentukan logam dengan cara memanaskan material logam bekas jenis baja bekas (*scrap steel*) (gambar 1) pada dapur pemanas dengan menggunakan bahan bakar arang kayu jati sampai di atas temperatur rekristalisasi (gambar 9) dan ditempa

panas secara bertahap sesuai dengan bentuk produk yang diinginkan serta selanjutnya dilakukan proses pendinginan cepat. Temperatur rekristalisasi merupakan perubahan struktur kristal akibat pemanasan pada temperatur kritis di mana untuk temperatur kritis pada baja karbon adalah pada 723°C, sehingga dapat diartikan lebih lanjut bahwa temperatur rekristalisasi adalah suatu proses dimana butir logam yang terdeformasi digantikan oleh butiran baru yang tidak terdeformasi yang intinya tumbuh sampai butiran asli termasuk didalamnya. Logam yang ditempa bertujuan agar terjadi perubahan bentuk (*plastis*) dan pendinginan cepat agar

¹ Mahasiswa Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang

² Dosen Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang

³ Dosen Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang

logam mengalami perubahan sifat kekerasan (*hardness tester*).

Peralatan penunjang pandai besi meliputi: (a) dapur pemanas, (b) *blower*, (c) palu, (d) landasan, (e) bak pendinginan, (f) tang penjepit, dan (g) gerinda tangan. Produk pandai besi umumnya berupa alat-alat pertanian seperti: (a) cangkul, (b) pisau, (c) sabit (d) martil (e) linggis, (f) kapak, (g) tombak, (h) belati, dan (i) garpu penggaruk tanah.



Gambar 1. **Baja Bekas**

Permasalahan yang muncul meliputi: (a) temperatur pembakaran arang kayu jati di bawah temperatur rekristalisasi, (b) hasil tempa panas setelah proses pendinginan cepat sangat getas dan retak. Tujuan penelitian membandingkan dan menganalisa sifat kekerasan serta struktur mikro hasil tempa panas setelah proses pendinginan oli SAE 50, SAE 90, SAE140.

KAJIAN PUSTAKA

Teknologi proses yang digunakan pandai besi (*black smith*) melalui beberapa tahapan proses produksi

meliputi: tahap 1, proses pemanasan dua baja bekas (satu per-satu) di atas temperatur rekristalisasi di dalam dapur pemanas (gambar 2) menggunakan arang kayu (gambar 3). Arang kayu merupakan bahan bakar padat yang dapat diubah dari energi kimia menjadi energi panas. Arang kayu merupakan limbah hitam yang mengandung unsur karbon tidak murni yang dihasilkan dengan cara menghilangkan kandungan air, hewan dan tumbuh-tumbuhan. Arang kayu umumnya diperoleh dengan cara memanaskan kayu yang berwarna hitam yang mempunyai sifat seperti: (a) ringan, (b) mudah hancur, (c) unsur karbonnya tinggi, dan (d) menyerupai batu bara. Sifat-sifat arang kayu yang lain seperti: (a) kadar air 14,14%, (b) nilai kalor 230,58 kcal/gram, (c) kecepatan pembakaran 135 gram/detik, (d) penyalaan awal sampai timbul bara api 5 detik, dan (e) penyalaan sampai menjadi abu 109,45 menit.



Gambar 2. **Dapur Pemanas**



Gambar 3. Arang Kayu Jati

Tahap ke 2, baja bekas (*scrap steel*) yang telah dipanaskan dilakukan proses tempa panas dengan palu (*hammer*) untuk memberikan gaya dari luar (*external force*) di atas landasan (*anvil*) secara bertahap sampai membentuk produk (gambar 4) dan selanjutnya dilakukan proses pendinginan cepat. Baja bekas yang digunakan pandai besi terdiri dari baja karbon rendah dan baja karbon tinggi memiliki sifat kekerasan, komposisi kimia serta struktur mikro yang berbeda.



Gambar 4. Proses Tempa Panas

Tempa panas merupakan proses pengerjaan panas (*hot working*), di mana gaya deformasi yang diperlukan lebih rendah dan sifat mekanis tidak mengalami perubahan yang besar, sedangkan pada pengerjaan dingin (*cold*

working), diperlukan gaya yang besar dan kekerasan material logam meningkat semakin tinggi. Pengerjaan panas pada logam merupakan proses deformasi pada logam yang dilakukan pada kondisi temperatur dan laju regangan tertentu, sehingga proses deformasi dan proses recovery terjadi secara bersamaan. Proses deformasi dilakukan di atas temperatur rekristalisasi. Pada temperatur ini, pengerasan regangan dan struktur butir yang terdeformasi akan segera tergantikan dengan struktur baru yang bebas regangan atau pengerjaan panas dapat didefinisikan sebagai proses merubah bentuk logam tanpa terjadi pencairan volume benda kerja tetap dan tak adanya geram atau tatal (*chip*). Pengerjaan panas umumnya dilakukan pada temperatur di atas 0.6 temperatur lebur dengan laju regangan antara 0.5 - 500 detik, sedangkan temperatur rekristalisasi dapat ditentukan dengan rumus: $T_{rek} = 0.5 T_{mel} (^{\circ}K)$ dimana T_{rek} adalah temperatur rekristalisasi dan T_{mel} adalah temperatur lebur bahan logam. Selama proses deformasi akan terjadi proses rekristalisasi dari butir-butir yang terdeformasi, sehingga material logam tidak mengalami pengerasan regangan atau selalu dalam keadaan bebas regangan dan lunak. Dengan demikian tingkat deformasi yang dapat dilakukan

semakin besar dengan semakin tingginya temperatur. Keuntungan pengerjaan panas meliputi: (a) porositas dalam logam dapat dikurangi, (b) sifat fisis logam akan meningkat, akibat penghalusan butir logam, (c) jumlah energi untuk menghasilkan kerja dalam mengubah bentuk baja lebih sedikit dibandingkan dengan proses pembentukan dingin, (d) ketidakmurnian dalam bentuk inklusi terpecah-pecah dan tersebar dalam logam, (e) butir yang kasar dan butir berbentuk kolom diperhalus, karena hal ini berlangsung di daerah rekristalisasi, pengerjaan panas berlangsung terus sampai limit bawah tercapai dan menghasilkan struktur butir yang halus. Kerugian pengerjaan panas meliputi: (a) terjadi oksidasi pada permukaan logam, kehilangan sebagian logam menjadi karat, (b) terjadi dekarburisasi pada permukaan, khususnya baja, (c) dimensi produk kurang akurasi karena sulit memperhitungkan faktor ekspansi dan kontraksi yang terjadi, (d) ada kemungkinan terjadi rapuh panas (*hot shortnes*), dan (e) terjadi ketidak homogenan struktur pada permukaan bagian dalam akibat perbedaan temperatur dan deformasi. Pengerjaan dingin pada logam merupakan proses deformasi yang dilakukan pada temperatur di bawah temperatur

rekristalisasi. Pada deformasi ini, temperatur akan mengakibatkan timbulnya distorsi pada butir. Pengerjaan dingin dapat meningkatkan sifat kekuatan, memperbaiki mampu mesin, meningkatkan ketelitian dimensi, dan menghaluskan permukaan logam. Secara umum proses pengerjaan dingin berakibat: (a) terjadinya tegangan dalam logam, tegangan tersebut dapat dihilangkan dengan suatu perlakuan panas, (b) struktur butir mengalami distorsi atau perpecahan. (c) kekerasan dan kekuatan meningkat, namun keuletan akan menurun, (d) suhu rekristalisasi baja meningkat, (e) penyelesaian permukaan lebih baik, (f) dapat diperoleh toleransi dimensi yang lebih ketat. Keuntungan proses pengerjaan dingin meliputi: (a) tidak perlu pemanas, (b) kekuatan tarik akan lebih baik dari benda asalnya, (c) ketelitian atau dimensi yang lebih baik, (d) hasil permukaan benda kerja lebih baik, (e) bisa menghasilkan benda dengan ukuran seragam. Kerugian proses pengerjaan dingin meliputi: (a) daya pembentukan yang diperlukan lebih besar, (b) peralatan yang diperlukan umumnya besar dan kuat, (c) struktur kristal besar dan kasar sehingga lebih keras tetapi rapuh, dan (d) waktu proses yang lebih lama. Baja karbon rendah (*low carbon steel*) dan baja karbon karbon

tinggi (*high carbon steel*) merupakan kelompok baja karbon (*carbon steel*) atau baja karbon biasa (*plain carbon steel*) terdiri dari paduan unsur besi (*Fe*) dan karbon (*C*) dengan unsur-unsur lain seperti: (a) silikon (*Si*), (b) mangan (*Mn*), (c) phosphor (*P*), (d) sulfur (*S*), dan (e) Copper (*Cu*). Sifat mekanis baja karbon sangat dipengaruhi oleh unsur karbon (*C*). Unsur *C* merupakan satu unsur utama yang dapat meningkatkan sifat kekerasan dan kekuatan, tetapi menurunkan sifat keuletan, ketangguhan (*toughness*) dan mampu las (*weldability*). Penambahan unsur mangan (*Mn*) melebihi persentase pada baja karbon dapat meningkatkan sifat kekerasan dan keuletan. Unsur sulfur (*S*) pada baja karbon dapat meningkatkan sifat kekerasan, ketahanan terhadap beban impak dan sifat mampu las. Unsur *S* yang diizinkan adalah sampai 0,03% dengan perimbangan unsur *Mn*. Unsur *S* melebihi 0,05% dapat menurunkan sifat mampu panas, karena unsur *S* akan bereaksi dengan membentuk senyawa *FeS* dan titik cairnya rendah. Untuk mengatasi hal tersebut, dapat dilakukan dengan penambahan unsur *Mn*, sehingga akan terbentuk *MnS* yang mempunyai titik cair yang tinggi. Unsur silikon (*Si*) sebaiknya tidak melebihi 0,3%, karena di atas persentase tersebut, dapat menyebabkan

keretakan pada baja karbon dan mengganggu kestabilan unsur *S* dan unsur *P*. Unsur *P* pada baja karbon yang rendah dapat memperbaiki sifat mekanis dan tahan korosi, unsur *P* pada baja karbon biasanya 0,045%. Unsur *Cu* 0,15% dapat menaikkan tahan korosi, unsur *Cu* lebih dari 0,5% dapat mengurangi sifat mekanis pada pengerjaan panas. Baja karbon rendah merupakan jenis baja yang mempunyai unsur karbon kurang dari 0,3% *C*. Baja karbon rendah memiliki sifat ketangguhan (*toughness properties*) dan keuletan tinggi (*high ductility*) akan tetapi memiliki sifat kekerasan (*hardness properties*) dan ketahanan aus (*wear resistance*) yang rendah. Baja karbon rendah digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan komponen struktur bangunan, pipa gedung, jembatan, bodi mobil. Baja karbon tinggi merupakan jenis baja yang mempunyai unsur karbon 0,6% *C* – 1,4% *C*. Baja karbon tinggi memiliki sifat tahan panas (*heat resistance*), kekerasan serta kekuatan tarik (*tensile strength*) sangat tinggi, tetapi sifat keuletannya lebih rendah dibanding baja karbon tinggi, sehingga baja karbon ini memiliki sifat lebih getas (*brittle*). Baja karbon tinggi tidak dapat dilakukan proses perlakuan panas (*heat treatment*) untuk meningkatkan sifat

kekerasan, hal ini dikarenakan baja karbon tinggi memiliki jumlah martensit yang cukup tinggi, sehingga tidak dapat dilakukan proses pengerasan permukaan. Aplikasi baja karbon tinggi digunakan untuk pembuatan alat-alat perkakas seperti: palu, gergaji, kikir, dan pisau cukur.

Diagram alir penelitian (gambar 5) merupakan tahapan penelitian yang diawali dengan penyiapan material logam jenis baja bekas terdiri dari: baja karbon rendah dan baja karbon tinggi yang diperoleh di pasaran. Kedua baja tersebut, dipanaskan ke dalam dapur pemanas sampai mencapai temperatur 800°C satu-persatu (bergantian) yang selanjutnya ditempa sampai kedua baja bekas menyatu dan setelah dan selanjutnya dilakukan proses pendinginan oli: SAE 50, SAE 90 dan SAE 140. Baja bekas yang telah menyatu dilakukan uji kekerasan dan uji pengamatan struktur mikro untuk diperoleh data uji kekerasan dan data foto hasil pengamatan struktur mikro.

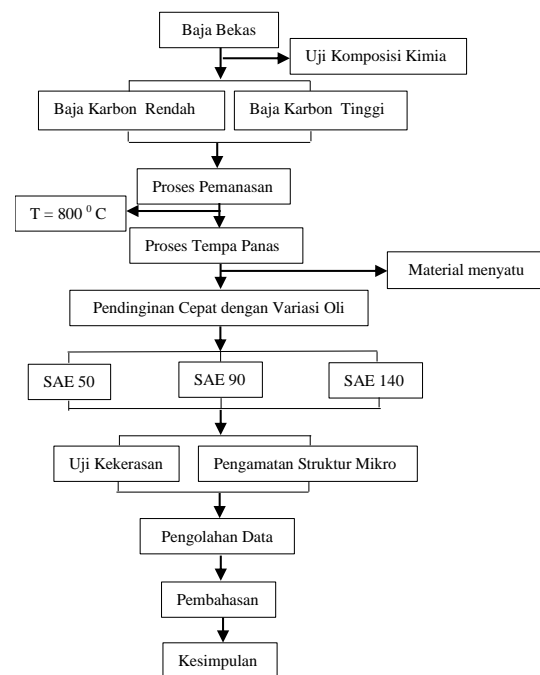
METODOLOGI PENELITIAN

Variabel Pengujian

1. Spesimen uji: baja bekas terdiri dari baja karbon rendah dan baja karbon tinggi.
2. Pendinginan oli SAE : 50, 90, dan 140.

3. Gaya penempaan : 5 kg.
4. Temperatur dapur : 800°C .
5. Larutan etsa : HNO_3 2%; 98% Alcohol.
6. Resin furan : $\frac{1}{2}$ liter.
7. Bahan bakar padat : arang kayu jati.
8. Putaran *blower* : 1500 rpm.

Diagram Alir Penelitian



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

Peralatan Penunjang Penelitian

1. Mesin-mesin: *blower*, mikroskop logam, gerinda tangan, *pregrinder*, *polishing*, *mounting press*, *film processing apparatus*, *quantometer*, dan *rockwell hardness tester*.
2. Peralatan penunjang lain: kertas gosok, kaleng, tang penjepit, landasan, jangka sorong, palu, bak pendinginan, dan termokopel.

Batasan dan Metode Pengujian

1. Uji komposisi kimia menggunakan mesin *quantometer* (gambar 6) bertujuan untuk mengetahui unsur dan komposisi kimia baja bekas sebelum proses tempa panas dan pendinginan oli SAE: 50, 90, dan 140.



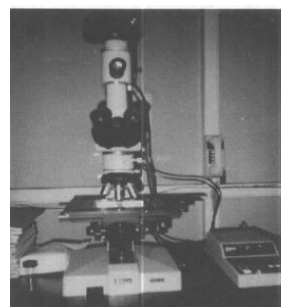
Gambar 6. **Mesin *Quantometer***

2. Uji kekerasan menggunakan mesin uji kekerasan *rockwell hardness tester* dengan indentor bola baja yang mempunyai diameter $1/16$ inch (gambar 7). Beban yang digunakan pada uji kekerasan terdiri dari: beban minor (P_o) = 10 kg dan beban mayor (P) = 100 kg bertujuan untuk memperoleh angka kekerasan spesimen uji sebelum dan setelah proses tempa panas dan pendinginan oli: SAE 50, SAE 90, dan SAE 140. Pada masing-masing spesimen uji sebelum dan sesudah proses tempa panas dilakukan pengujian kekerasan sebanyak 10 kali pengujian kemudian diambil rata-rata angka kekerasan.



Gambar 7. ***Rockwell Hardness Tester***

3. Uji pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop logam bertujuan untuk mengetahui fasa, pada logam bekas setelah proses tempa panas dan pendinginan oli SAE: 50, 90, dan 140 (gambar 8).



Gambar 8. **Mikroskop Logam**

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Hasil Penelitian

Tabel 1. **Data Hasil Uji Komposisi Kimia**

No	Unsur kimia	Simbol	Material	
			Plat (luar)	Batangan (dalam)
1	karbon	C	0,13285	1,2617
2	Mangan	Mn	0,36519	0,3113
3	Fosfor	P	0,00787	0,01384
4	Sulfur	S	0,00571	0,00512
5	Silicon	Si	0,19235	0,23081
6	Timah	Sn	0,00880	0,0058
7	Alumunium	Al	0,03318	0,00705
8	Crom	Cr	0,01138	0,04172
9	Tembaga	Cu	0,01207	0,0929
10	Nikel	Ni	0,00618	0,02409
11	Niobium	Nb	0,00255	0,00255
12	Vanadium	V	0,00313	0,00049
13	Kalsium	Ca	0,00032	0,00066
14	Molybdenum	Mo	0,00924	0,014445
15	Kobalt	Co	0,00264	0,0077
16	besi	Fe	99,34	97,9617

Sumber : PT. Ispat Indo Sidoarjo

Tabel 1 merupakan data hasil uji komposisi kimia menggunakan mesin *Quantometer* pada baja bekas yang berbentuk plat (luar) dan batangan (dalam).

Tabel 2. Data Hasil Uji Kekerasan

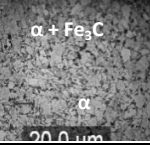
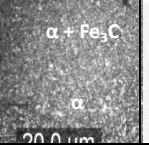

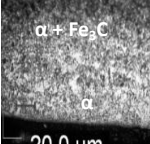
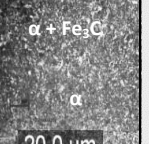


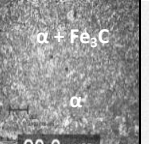

No	Spesimen Uji Hasil Tempa Panas	Angka Kekerasan (HR _B)	Rata-rata Kekerasan (HR _B)
1	Plat (Sebelum Tempa Panas)	85	70
		86	
		85	
		88	
		87	
		88	
		86	
2	Batangan (Sebelum Tempa Panas)	29	28 HR _C = 104 HR _B
		28	
		31	
		25	
		27	
		31	
		29	
3	Tempa Panas dengan Pendinginan SAE 50	27	94,6
		26	
		31	
		95	
		99	
		97	
		94	
4	Tempa Panas dengan Pendinginan SAE 90	95	86,8
		94	
		95	
		95	
		92	
		90	
		5	
82			
84			
88			
85			
88			
88			
5	Tempa Panas dengan Pendinginan SAE 140	82	81,4
		81	
		80	
		79	
		82	
		84	
		82	
5	Tempa Panas dengan Pendinginan SAE 140	80	81,4
		81	
		83	

Sumber : Lab. Uji Logam Jurusan Teknik Mesin FT. UNMER Malang

Tabel 2 merupakan data hasil uji kekerasan pada kedua baja bekas setelah proses tempa panas dan pendinginan oli: SAE 50, SAE 90, dan SAE 140 menggunakan metode dinamik jenis *Rockwell Hardness Tester* menggunakan

indentor bola baja (*steel*) dan kerucut intan (*diamond cone*).

Tabel 3. Data Hasil Uji Pengamatan Struktur Mikro

No	Baja Karbon Rendah (plat)	Baja Karbon Tinggi (batangan)	Hasil Tempa Panas
1			
3			
4			

Sumber : Lab. Uji Logam Jurusan Teknik Mesin FT. UNMER Malang.

Tabel 3 merupakan data hasil uji pengamatan struktur mikro sebelum dan sesudah proses tempa panas dan pendinginan oli: SAE 50, SAE 90, SAE 140 dengan metode dinamik jenis *Rockwell Hardness Tester* menggunakan indentor bola baja (*steel*) dengan diameter 1/16 inch dan kerucut intan (*diamond cone*).

Pembahasan

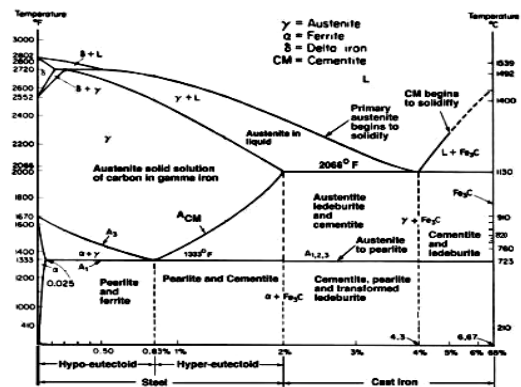
Tempa panas (*hot forging*) merupakan proses pembentukan logam (*metal forming*) dengan cara memanaskan baja bekas terdiri dari baja karbon rendah (plat) dan baja karbon tinggi (batangan) ke dalam dapur pemanas sampai di atas temperatur rekristalisasi (A_1) 800⁰ C menggunakan

energi panas hasil pembakaran arang kayu jati. Hasil tempa panas selanjutnya dilakukan pembebanan sebesar 5 kg sebagai gaya luar (*external force*) secara bertahap dan dilanjutkan pendinginan oli: SAE 50, SAE 90, dan SAE 140 dengan kekentalan (viskositas) yang berbeda sampai temperatur 800°C . Viskositas merupakan ukuran kekentalan suatu fluida yang menyatakan besar kecilnya gesekan di dalam fluida. Makin besar viskositas suatu fluida, maka makin sulit suatu fluida mengalir dan makin sulit suatu benda bergerak di dalam fluida tersebut. Di dalam zat cair, viskositas dihasilkan oleh gaya kohesi antara molekul zat cair. Sedangkan dalam gas, viskositas timbul sebagai akibat tumbukan antara molekul gas. Satuan system internasional (SI) untuk koefisien viskositas adalah $\text{Ns/m}^2 = \text{Pa}\cdot\text{s}$ (pascal sekon). Satuan CGS (centimeter gram sekon) untuk SI koefisien viskositas adalah $\text{dyn}\cdot\text{s/cm}^2 = \text{poise (p)}$. Viskositas juga sering dinyatakan dalam sentipoise (cp). $1 \text{ cp} = 1/1000 \text{ p}$. Hasil uji komposisi kimia baja bekas yang digunakan untuk tempa panas terdiri dari: baja karbon rendah 0,13285% karbon (C) termasuk kelompok baja karbon rendah (*low carbon steel*) mempunyai sifat: lunak, mudah dibentuk, kekerasannya rendah, tetapi keuletannya tinggi dan baja karbon

menengah 1,2617% C termasuk kelompok baja karbon tinggi mempunyai sifat kekerasan yang tinggi tetapi ketangguhannya (*toughness*) rendah (tabel 1). Unsur-unsur lain yang bersifat pengotor (*impurities*) pada baja karbon rendah seperti: 0,00787% phosphor (P), 0,00571% sulphur (S), 0,033% aluminium (Al), 0,01138% chrom (Cr), 0,01207% cuprum (Cu) dan 99,1934% besi (Fe) pada baja karbon rendah termasuk logam besi (*ferrous metal*) (tabel 1) (Smith, 1990, Surdia, 1995). Unsur Mn sebesar 0,36519% pada baja karbon rendah dapat mengikat unsur C, sehingga membentuk karbida mangan (Mn_3C) yang dapat meningkatkan sifat kekerasan baja karbon rendah, sehingga unsur Mn terhadap unsur S harus dijaga dengan perbandingan antara 10 : 1 (Anonim), sedangkan pada kombinasi FeS dapat menimbulkan retak pada hasil tempa panas (tabel 1). Unsur lain yang dapat meningkatkan sifat kekerasan baja karbon rendah adalah 0,19235% Si tetapi mudah rapuh, sehingga unsur Si dibatasi tidak melebihi 0,1% (Anonim dan Polukhin, 1977) (tabel 1). Demikian juga unsur-unsur lain yang bersifat pengotor pada baja karbon tinggi mendekati sama dengan baja karbon rendah seperti: 0,00512% S, % Al, 0,00705% Cr, 0,0929% Cu dan 97,9617% Fe pada baja

karbon tinggi termasuk logam besi (tabel 1) (Smith, 1990). Unsur 0,3113% *Mn* pada baja karbon tinggi dapat mengikat unsur *C*, sehingga membentuk karbida mangan (Mn_3C) yang akibatnya meningkatkan sifat kekerasan baja karbon tinggi, sehingga unsur *Mn* terhadap unsur *S* harus dijaga dengan perbandingan antara 10 : 1 (Anonim) (tabel 1). Unsur lain yang dapat meningkatkan sifat kekerasan baja karbon tinggi adalah 0,23081% *Si* tetapi mudah rapuh, sehingga unsur *Si* dibatasi tidak melebihi 0,1% (Anonim dan Polukhin, 1977) dan unsur 0,01384% *P* pada baja karbon tinggi tidak mudah rapuh karena masih di bawah 0,047% *P* (Polukhin, 1977) (tabel 1). Baja karbon rendah 0,13285% *C* mempunyai angka kekerasan rata-rata 70 HR_B dan angka kekerasan baja karbon tinggi 1,2617% *C* rata-rata 28 HR_C atau 104 HR_B (tabel 3). Perbedaan kekerasan tersebut, dipengaruhi oleh unsur *C* sehingga mempengaruhi sifat kekerasan, keuletan dan kekuatannya. Menurut diagram keseimbangan *Fe-Fe₃C* baja karbon rendah 0,132% *C* termasuk baja *hipoeutektoid* (*hypoeutectoid steel*) < 0,83% *C* yang mempunyai fasa ferit (α) sifatnya lunak, ulet serta fasa perlit ($\alpha + Fe_3C$) sifatnya keras, kuat, getas dan baja karbon tinggi 1,2617% *C* termasuk baja

hipereutektoid (*hypereutectoid steel*) > 0,83% *C* yang mempunyai fasa perlit ($\alpha + Fe_3C$) dan karbida besi (Fe_3C) berupa *network* (gambar 9).



Gambar 9. Diagram Keseimbangan *Fe-Fe₃C*

Sifat baja *hypereutectoid* kekerasannya tinggi, tetapi sifat kekuatannya lebih rendah dibanding dengan baja *eutektoid* 0,8% *C* (gambar 9) (Avner, 1987, Chadwick, 1972). Baja bekas hasil tempa panas dan dilanjutkan pendinginan oli: SAE 50, SAE 90, SAE 140, secara umum angka kekerasannya cenderung semakin menurun (tabel 2). Angka kekerasan tertinggi pada pendinginan SAE 50 sebesar 94,6 HR_B dan terendah pada pendinginan SAE 140 sebesar 81,4 HR_B (tabel 2). Angka kekerasan semakin menurun disebabkan pengaruh viskositas oli, sehingga menghambat laju pendinginan (*cooling rate*) semakin lambat akibatnya besar butir semakin kasar (*coarse*) atau butir-butir kristalnya berbentuk kolom masih

kasar dan porositas baja bekas hasil tempa panas belum berkurang, tetapi besar butir semakin kasar sehingga mengakibatkan baja bekas lebih mudah dilakukan tempa panas karena sifatnya semakin ulet. Struktur mikro hasil tempa panas dengan pendinginan oli: SAE 50, SAE 90, SAE 140 dengan pembesaran 400 x secara umum kecenderungan fasa ferit (α) (warna terang) lebih dominan dibanding dengan fasa perlit ($\alpha + Fe_3C$) (warna gelap) (tabel 3). Sifat fasa α mempunyai sifat ulet dan kekerasannya rendah dan fasa $\alpha + Fe_3C$ mempunyai sifat keras dan getas. Pendinginan hasil tempa panas dengan media jenis oli SAE 50, SAE 90, SAE 140 tidak terbentuk fasa martensit yang sifatnya sangat keras dan getas dibanding fasa $\alpha + Fe_3C$, hal ini disebabkan fasa austenit (γ) tidak dapat bertransformasi menjadi fasa martensit yang sifatnya keras dan getas. Fasa α mempunyai sel satuan Kubus Pemusat Ruang (*Body Centered Cubic*) (BCC) pada temperatur di bawah 910^0 C. BCC merupakan larutan padat (*solid solution*) terdiri atas beberapa atom C yang ada pada besi murni (*pure iron*) dan kelarutan unsur C pada fasa α maksimum 0,025% terjadi di bawah temperatur 723^0 C, tetapi pada temperatur kamar kelarutan C sekitar 0,008%. Fasa

$\alpha + Fe_3C$ merupakan campuran eutektoid terdiri dari fasa α dan fasa Fe_3C yang mengandung 0,8% C terbentuk pada temperatur 723^0 C dengan sel satuan BCC (Broek, 1986, Dowling, 1993).

SIMPULAN

Angka kekerasan terendah hasil tempa panas dengan pendinginan SAE 50 mencapai 94,6 HR_B, sedangkan angka kekerasan terendah dengan pendinginan SAE 140 mencapai 81,4 HR_B.

Fasa hasil tempa panas fasa $\alpha + Fe_3C$ lebih dominan dibanding fasa α pada pendinginan SAE 50, SAE 90, sedangkan pendinginan SAE 140 fasa α lebih dominan dibanding fasa $\alpha + Fe_3C$.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, *Effects of Mn, P, S, Si & V on the Mechanical Properties of Steel*, <http://www.leonghuat.com/articles/elemelem.htm>
- Askeland, D. R., 1984, *The Science and Engineering of Materials*, University of Missouri-Rolla, California, USA.
- ASTM International E 399-90, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428 – 2959, United States.
- Avner, S.H., 1987. *Introduction to Physical Metallurgy*, Singapore: Graw Hill International.
- Broek, D., 1986, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.

- Chadwick, G.A., 1972. *Metallography of Phase Transformation*. London: Butterworth.
- Dieter, G.E., 1981. *Mechanical Metallurgy*. Second Edition. Tokyo: McGraw-Hill International Book Company.
- Dowling, N. E., 1993, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice Hall, New Jersey.
- Hosford, W, F, dan Caddel, R, M. 1983, *Metal Forming Mechanics and Metalurgy*, Prenticehall, Inc.
- Jastrzebski, Z. D., 1980, *The Nature and Properties of Engeneering Materials*, Third editions, New York.
- Polukhin, P. 1977. *Metal Process Engineering*. Fourth Printing. Mir Publishers: Moscow.
- Smith, W.F. 1990. *Principles of Materials Science and Enginnering*. Second Edition. McGraw-Hill International Editions.
- Surdia, T. 1995. **Pengetahuan Bahan Teknik**. PT. Erlangga: Jakarta.