

HARDENES PROCES CONTROL BAJA TAMBANG DENGAN QUENCHING METHOD

Oleh :

Ahmad Multazam

Dosen Tetap Fakultas Teknik UNTB

Abstrak: Dengan berkembangnya teknologi otomotif di kanca internasional tentu berkaitan erat terhadap perusahaan menyediakan yang bahan baku di Indonesia. Peningkatan kualitas material logam menjadi upaya penting dalam meningkatkan persaingan terutama dalam hal peningkatan kekuatan mekanik. Salah satu upaya untuk meningkatkan (kekuatan mekanik) kekerasan, ketahanan aus dan kekuatan baja dapat dilakukan dengan proses pengerasan termal, pada proses ini baja mengalami beberapa tahap proses yaitu: pemanasan awal, pemanasan lanjut, *holding time* pada suhu stabil, dan pendinginan. Kekerasan yang dapat dicapai tergantung pada kadar karbon dalam logam baja dan unsur lainnya dalam baja, temperatur pemanasan, *holding time* dan laju pendinginan yang dilakukan saat proses laku panas. Perlu dipahami pada proses pengerasan baja, bahan yang diproses rentan akan kejadian yang tidak kita inginkan, seperti distorsi, retak ataupun tidak tercapainya kekerasan yang kita inginkan. Untuk menanggulangi hal ini perlu dilakukan perencanaan dan pengendalian yang benar, melalui penelitian dengan mengaitkan ilmu teoritis maupun pelaksanaan praktek dalam proses pengerasan

Kata kunci: Pemuaian (Fre-heting), *Penyusutan* (Final heating), Holding Time, Quenching

PENDAHULUAN

Dengan berkembangnya teknologi otomotif di kanca internasional tentu berkaitan erat terhadap perusahaan penyedia bahan baku di Indonesia. Salah satu diantaranya teknologi manufaktur, kebutuhan akan material dengan berbagai bentuk, kekutan dan kekerasan maka bemunculan pula ilmuilmu yang dapat menjawab tantangan yang muncul.

Baja merupakan salah satu material yang mampu memenuhi sebagian dari kebutuhan manufaktur yang sifatnya dapat direkayasa sesuai dengan kemampuan dari baja tersebut. Salah satu upaya yang dapat dilakukan terhadap baja tersebut adalah meningkatkan Proses peningkatan kekerasan yang dimaksudkan tidaklah semudah apa yang akan kita bayangkan, dalam kenyataan operasionalnya tentu banyak yang perlu dipertimbangkan dengan baik untuk memperoleh hasil yang diharapkan.

Untuk mencapai hasil yang optimal perlulah melakukan tindakan yang tepat untuk mendukung pelaksanaan proses tersebut. Dengan adanya kemungkinan kemungkinan yang dapat menghambat tercapainya tujuan dalam melakukan pengerasan baja dengan *quenching*, dalam tulisan ini memberikan penjelasan tentang hal tersebut yang nantinya memberikan solusi/refrensi terhadap penelitian yang serupa.

Dalam upaya peningkatan kekuatan mekanik yaitu kekerasan baja yang efektif dengan metoda *quenching* memerlukan banyak informasi teoritis

dan praktis yang terkait baik terhadap pencapaian kekerasan maupun menghindari kegagalan produk. Pada tulisan ini hanya membahas prihal apa saja yang perlu dipertimbangkan dalam merencanakan bentuk produk dan pelaksanaan/ proses pengerasan baja, dan tidak dibahas masalah inspeksi hasil dari *heat-treatment* tersebut.

Tujuan penulisan ini adalah memberikan ilmu pengetahuan untuk dijadikan pertimbangan (refrensi) dalam peerancang produk baja yang akan dilakukan pengerasan metoda *quenching* sehingga prosesnya menjadi efektif dan efisien dengan hasil yang maksimal.

TINJAUAN PUSTAKA

a. Baja

Baja adalah material yang unsure utamanya mayoritas adalah besi (Fe). Secara umum baja mempunyai komposisi lebih dari 90% adalah besi. Semua baja mengandung suatu unsur kedua yaitu karbon. Banyak unsur-unsur lain yang sengaja ditambahkan sebagai paduan dalam baja untuk mendapatkan sifat yang baru, tetapi karbon satu-satunya unsure yang ada dalam semua baja yang tak pernah tertinggalkan.

b. Baja karbon (*carbon steel*)

Baja karbon adalah paduan antara besi (Fe) dan karbon C dengan sedikit Si, Mn, P, S dan Cu.

Sifat baja karbon sangat kuat tergantung pada kadar karbonnya.

c. Baja paduan (*alloy steel*)

Baja paduan adalah baja cor yang ditambah unsur-unsur paduan. Tujuan dari pemberian unsur-unsur paduan seperti mangan, nikel atau *molibden*, khrom untuk memberikan sifat-sifat khusus pada baja paduan tersebut. Sebagai contoh sifat-sifat ketahanan aus, ketahanan asam dan korosi atau menambah ketangguhan / *toughness* (Surdia dan Chijiiwa, 1996).

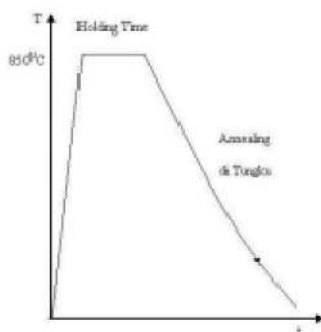
d. Perlakuan Panas

Perlakuan panas atau *Heat-treatment* dapat didefinisikan suatu kombinasi proses pemanasan dan pendinginan logam/ paduannya dalam keadaan padat secara terkontrol. Tujuannya adalah mempersiapkan material logam sebagai produk setengah jadi agar layak diproses lanjut untuk meningkatkan umur pakai material logam sebagai produk jadi.

Pertimbangan lain, dengan biaya perlakuan panas yang relatif rendah, umur pemakaian komponen akan lebih lama. Secara umum, proses perlakuan panas adalah sebagai berikut :

- Memanaskan logam / paduannya sampai suhu tertentu dengan kecepatan tertentu, (*Heating-temperature*)
- Mempertahankan pada temp. pemanasan tersebut dalam waktu / tempo tertentu, (*Holding time*).
- Mendinginkan dengan media pendingin dan laju tertentu.

Proses ini dapat pula di tunjukan melaluidiagram temperatur VS waktu seperti seperti gambar 1.



Gambar 1 Prinsip Perlakuan Panas Temp. vs waktu

Ketiga kondisi proses diatas tergantung dari sifat yang ingin dicapai. Selama pemanasan dan pendinginan diharapkan didalam logam terjadi perubahan struktur mikro yang pada akhirnya akan diperoleh sifat baru yang kita inginkan. Perlu kita ketahui bahwa struktur mikro yang terjadi pada akhir proses perlakuan panas dipengaruhi oleh :

- Komposisi unsur dalam material dan hardenability.

- Proses perlakuan panas yang dilakukan pada bahan.
- Struktur/ kondisi awal material.

Dalam prakteknya terdapat banyak macam proses perlakuan panas yang dilakukan terhadap berbagai jenis logam/paduannya. Secara garis besar macam proses perlakuan panas dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu :

- Perlakuan panas yang menghasilkan struktur mikro yang ekuilibrium seperti : *annealing*, *Normalizing* dan *Tempering*.
- Perlakuan panas yang menghasilkan struktur yang *non ekuilibrium* seperti *Hardening*. Untuk dapat mempelajari lebih mendalam proses perlakuan panas perlu memahami hal yang menyangkut perubahan struktur mikro logam selama terjadi perlakuan terhadap logam tersebut terutama :
 - Ekuilibrium (keseimbangan) yang berkaitan dengan difusi.
 - Transformasi fasa (selama pemanasan dan pendinginan).
 - Perpindahan panas dan reaksi kimia.

e. Pengerasan Termal

Tujuan pengerasan termal adalah membentuk struktur martensite/ bainit yang memiliki kekerasan tinggi. Pengerasan termal terdiri dari tiga tahap operasi yaitu;

1. **Pemanasan (heating)** meliputi : *Preheating*, *Final heating*, *Soaking / holding*.

Preheating.

Pada saat logam/ material mengalami *preheating*, kondisi material akan mengalami pemuaiannya..

Final Heating

Fasa struktur mikro material bertransformasi γ ke α , baja mengalami penyusutan.

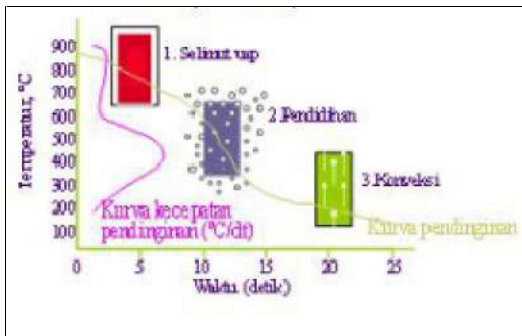
Holding

Pada saat mencapai temperatur austenisasi, pada material sebagian telah bertransformasi membentuk fasa γ dan sebagian masih fasa α + γ karbida sisa dan fasa lain. Setelah berakhirnya proses *holding* diharapkan semua bagian didalam baja mempunyai fasa struktur mikro tunggal γ yang stabil, baja menjadi sangat lunak.

2. **Quenching** adalah suatu proses pendinginan cepat dengan media pendingin yang bertujuan untuk mendapatkan nilai kekerasan optimum dari baja (struktur martensit).

Mekanisme Pendinginan (Media cair).

Pada saat material dilakukan proses kuens, maka mekanisme pendinginan yang dialami material tersebut adalah digambarkan seperti gambar 2.



Gambar 2 Mekanisme Pendinginan Media Cair

Selimut Uap (Vapor Blanket) : Kondisi ini Kecepatan Pendinginan relatif lambat akibat seluruh permukaan ditutupi oleh uap. Temperatur transisi menuju mekanisme pendidihan (*leidenfrost temperture*) tidak dipengaruhi oleh temperatur awal saat dikuens.

Pendidihan (Boiling) : Kondisi ini Kecepatan Pendinginan sangat tinggi ditandai oleh gelembung-gelembung uap pada permukaan komponen.

Konveksi : Kecepatan pendinginan kembali menjadi lambat melalui rambatan konveksi. Kecepatan perpindahan panas pada kondisi ini sangat dipengaruhi oleh viskositas cairan, agitasi dan temperatur cairan pendingin.

PEMBAHASAN

Ada banyak cara dalam peningkatan kekuatan mekanik diantaranya *thermal hardness*. Pengerasan thermal merupakan salah satu upaya yang dapat diterapkan pada logam baja untuk meningkatkan kekerasannya. Dalam pelaksanaan prosesnya, logam tersebut akan mengalami kondisi dari temperatur ruang menjadi kondisi temperatur tinggi dan akhirnya dikondisikan lagi dalam keadaan dingin.

Dengan perlakuan ini tentu logam akan mengalami suatu perubahan baik yang memang diharapkan maupun tidak diharapkan.

Harapan yang ingin dicapai:

Baja menjadi lebih keras dari sebelumnya (sesuai dengan yang diharapkan). Perubahan ini diupayakan melalui proses pemanasan dan pendinginan secara terkontrol (sebagai upaya untuk merubah fasa struktur mikro ferrite pearlit ke fasa g dan akhirnya menjadi fasa Martensit 100 %). Kejadian yang tidak diinginkan :

Baja yang diproses tidak tercapai kekerasan yang diinginkan, rapuh, terjadi sisa austenit dan ketidakseragaman mikrostruktur.

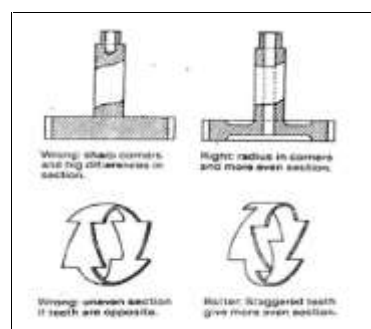
- Baja yang diproses mengalami distorsi dan bahkan menjadi *crack* dan *fracture*

- Kehilangan Kandungan elemen ada permukaan komponen (dekarburisasi dan oksidasi) Kejadian yang tidak diinginkan ini akan muncul apabila dalam pelaksanaannya tidak dilakukan perencanaan yang baik.

Pada dasarnya dalam proses pengerasan baja dengan metoda kuens ada beberapa hal yang sangat menentukan hasil yaitu perencanaan: a. Material yang akan dikeraskan b. Pelaksanaan Pemanasan, c. Media dan Pelaksanaan pendinginan

a. Material yang akan dikeraskan.

Material yang akan dikeraskan dengan metoda *quench* haruslah memenuhi komposisi tertentu untuk dapat membentuk fasa martensit. Untuk itu pengecekan komposisi kimia material perlu dilakukan sebelum dikeraskan. Komposisi paduan dalam baja yang sangat berperan dalam hal pengaruhnya terhadap kemampuan baja untuk dikeraskan terutama unsur-unsur yang dapat mementuk karbida seperti unsur C, Mo, W dan lainnya. Khusus baja carbón hanya bisa dilakukan pengerasan dengan metoda *quenching* bila memiliki kadar carbón minimal 0,35%. Dimensi dan bentuk material juga perlu dirancang sedemikian rupa dengan mengingat kemungkinan akan terjadinya efek distorsi terhadap material yang diproses. Pada proses pengerasan dengan *quenching*, bila kita tidak diantisipasi yang berkaitan dengan pemanasan, pemuaihan dan penyusutan kemungkinan produk yang diproses akan mengalami distorsi bahkan akan retak atau patah. Distorsi yang Gambar 3 Mekanisme Pendinginan Media Cair



Gambar 3 Contoh Rancangan yang Berkaitan dengan Distorsi

Produk yang diproses dapat dibedakan menjadi 2 yaitu :

Distorsi yang dapat dihindarkan seperti:

- Distorsi yang diakibatkan oleh cara perlakuan panas yang buruk (*thermal stress* akibat perbedaan laju pemanasan/ pendinginan antara permukaan dan bagian dalam).

- Kesalahan penggunaan media kuens menyebabkan tegangan akibat transformasi fasa (transformation stress) pada waktu pendinginan.
- Kesalahan pemilihan material dan rancangan bentuk dan demensi produk

Distorsi yang tidak dapat dihindarkan, seperti : Perubahan mikrostruktur pada waktu pengerasan thermal dan temper.

Tegangan termal akibat kontraksi volume.) Pada gambar 3 berikut ini ditampilkan beberapa contoh perencanaan demensi produk yang baik dan yang cenderung terjadi distorsi maupun retak. Dalam merancang geometri komponen perlu diupayakan supaya tidak terjadi distorsi seperti menghindari perubahan bentuk geometris yang drastis, usahakan bentuk komponen yang mempunyai bentuk yang sederhana, simetris dan seragam serta hindari sudut- sudut yang tajam dengan memperbesar radius lengkungan.

b. Pelaksanaan Pemanasan (*Heating*)

Untuk melakukan pemanasan, haruslah dipilih dapur yang memadai dengan perlengkapan kontrol suhu yang akurasinya dapat diandalkan. Rencanakan mikrostruktur yang ingin diperoleh. Gunakan acuan yang dianjurkan oleh produsen pembuat material atau gunakan referensi yang setara dengan material yang akan diproses. Disamping itu perlu diperhatikan dalam pemanasan seperti : Demensi /ketebalan benda kerja dan kecepatan/ laju pemanasan.

1. *Temperature Austenitising*

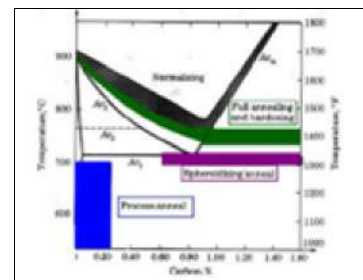
Untuk meperoleh martensite yang keras, maka saat pemanasan haruslah dicapai struktur austenit, karena austenit inilah yang dapat bertransformasi menjadi martensit. Bila saat pemanasan masih terdapat struktur lain, maka setelah diquench struktur tidak seluruhnya menjadi martensit. Tetapi walaupun telah dicapai struktur austenit seluruhnya saat pemanasan, belum tentu kekerasan maksimum dapat dicapai karena mungkin didalam austenit terlalu banyak karbon yang akan menyebabkan terdapatnya austenit sisa setelah diquench.

Untuk menentukan temperatur autenisasi material produk yang baru dihasilkan perlu dilakukan penelitian hingga diperoleh temperatur pemanasan dan *quench* yang dapat memberikan kekerasan yang maksimal. Sedangkan untuk produk yang telah distandard dapat kita mengikuti petunjuk dari textbook atau buku petunjuk yang diterbitkan oleh Pabrik, sebagai contoh untuk temperature pemanasan untuk beberapa logam seperti ditampilkan pada table 1:

Tabel 1. Temperatur Austenisasi

Material	Temperatur austenisasi oC
ASSAB 709/ JIS SCM4 /AISI/SAE 4140	840-870
ASSAB705/JIS SNCM 1 /AISI/SAE 4337	830-860
ASSAB XW-42/ AISI D2	1000-1040
Thyrodur 2379/ JIS SKD 11/ AISI D2	1050-1080
EXTRATOUCH & HARD/ JIS SK 3/ AISI W 1	780-800
EMS-35/ AISI 1035	850-880
AMUTIT S/JIS SKS 3/ AISI 01	780-820
SPECIAL K-5/ JIS SKD 12 AISI A2	950 - 980

Secara umum untuk baja karbon , temperatur austenitising yaitu 300 – 500 C diatas tempertur kritis A3 untuk baja hypoeutectoid dan 300 – 500 C diatas tempertur kritis A1 seperti ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Diagram hubungan temperature vs carbon pada *heat treatment*

2. *Holding Time*

Pada saat tercapainya suhu kritis atas, memang fase struktur sudah hamper semuanya austenit tetapi austenit masih berbutir halus dan kadar karbon dan unsur paduannya belum homogen untuk itulah dibutuhkan penahan waktu beberapa saat. Lamanya holding time ini tergantungpada:

- Tingkat kelanjutan karbida dan ukuran butir yang diinginkan. Karena jumlah dan jenis karbida berbeda antara baja yang satu dengan yang lain maka lamanya *holding time* ini tergantung pada jenis baja dan tempratur austenisasi yang dipakai. Sebagai Contoh dari penelitian pengaruh *holding time* terhadap kekerasan baja amutit, sampel ukuran ϕ 32 x 20 mm kekerasan baja amutit yang dapat dicapai kekerasan maksimum, menunjukkan

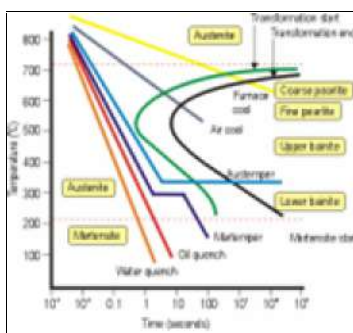
pada *holding time* 10 menit kekerasan naik menjadi rata-rata 60,08 HRC dari 34,24 HRC sebelum dilakukan proses perlakuan panas, kemudian naik menjadi 62,693 HRC pada *holding time* 20 menit, 64,52 HRC pada *holding time* 30 menit dan mencapai maksimum pada *holding time* 40 menit yaitu 65,146 HRC.

b) Laju pemanasan

Misalnya, pemanasan dengan laju pemanasan yang sangat lambat terhadap baja *hypoeutectoid*, pada saat mencapai suhu kritis atas, austenit yang terbentuk sudah homogen sehingga tidak diperlukan lagi *holding time*. Sebaliknya dengan laju pemanasan yang cepat akan diperlukan waktu untuk mencapai austenit yang homogen.

Berikut ini diberikan beberapa pedoman untuk menentukan *Holding time* untuk berbagai jenis baja secara umum :

- Baja konstruksi [Baja karbon dan baja padan rendah yang mengandung karbida yang mudah larut], diperlukan *Holding time* 5 - 15 menit.
- Baja konstruksi [baja paduan menengah], diperlukan *Holding time* 15 -25 menit.
- *Low alloy tool steel*, memerlukan *Holding time* yang tepat agar kekerasan yang diinginkan dapat tercapai. Dianjurkan menggunakan 0,5 menit per millimeter tebal benda alat, 10 - 30 menit.
- *High alloy chrome steel* membutuhkan *holding time* yang paling panjang diantara semua baja perkakas dan juga tergantung pada temperatur pemanasan. Biasanya dianjurkan menggunakan 0,5 menit per millimeter tebal benda dengan minimum 10 menit dan maksimum 1 jam



Gambar 5 Perbandingan Kecepatan Pendinginan dengan Beberapa Media Pendingin

Hal yang perlu dikontrol:

- Lakukan pre-heating pada temperature sekitar 550-650 oC untuk mengeliminasi distorsi yang mungkin timbul akibat pemanasan.

- Kecepatan pemanasan harus dikontrol agar tidak menimbulkan gradient temperature yang sangat curam antara bagian dalam dan permukaan. Hal yang perlu diketahui:

- Perbedaan temperatur antara bagian dalam dan permukaan, akibat rambatan panas yang dapat menyebabkan perbedaan pemuaian volume.
- Baja menyusut sampai 4 % (volume) pada kenaikan temperatur mencapai transformasi austenite.

c. Media dan pelaksanaan pendinginan .

Untuk mencapai struktur martensit maka austenit yang terjadi harus didinginkan cukup cepat, setidaknya dapat mencapai laju pendinginan kritis dari baja yang bersangkutan. Untuk ini baja harus didinginkan dengan media pendingin tertentu yang umumnya ditentukan oleh jenis baja/ paduannya. Ada sejumlah media pendingin yang biasa digunakan dalam proses pengerasan baja yaitu:

- Air
Air adalah media pendingin yang paling tua dan murah. Air mempunyai *cooling capacity* yang tinggi sekali (terjadi pada suhu 300oC yaitu temperatur mulainya terbentuk martensit) padahal laju pendinginan tertinggi diperlukan pada saat melewati nose dari kurva transformasi, yaitu sekitar temp 550o C sehingga air murni kurang baik untuk pendinginan baja yang mempunyai *Hardenability* yang tinggi. Untuk memperbaiki/menurunkan *cooling capacity* dapat dilakukan dengan menambahkan sedikit [5 - 10 %] soda atau garam dapur.
- Minyak

Pendingin dengan minyak akan lebih lambat dibanding dengan air. Pada minyak mempunyai *cooling capacity* tertinggi pada temperatur sekitar 600oC dan agak rendah pada sekitar temperatur pembentukan martensit. Untuk menaikkan *cooling capacity* minyak dapat dilakukan dengan menaikkan temperaturnya 50o-80oC. Ada banyak macam minyak yang digunakan untuk pendingin, yang paling murah dan sederhana adalah minyak mineral dengan kekentalan rendah. Minyak biasanya digunakan untuk pendinginan baja paduan rendah dan medium yang ukuran penampangna kecil.

- Udara
Udara mempunyai *cooling capacity* yang rendah, tetapi dalam hal baja paduan justru hal ini menguntungkan karena dengan laju

pendinginan yang rendah, *thermal stees* juga akan rendah sehingga benda kerja akan bebas distorsi maupun retak. Udara digunakan untuk pendinginan baja paduan tinggi dan baja paduan rendah dngan penampang kecil. Pada gambar 6 memperlihatkan perbandingan dan hubungannya dengan kecepatan pendinginan berbagai media pendingin.

Pada saat melakukan proses pendinginan perlu diperhatikan:

- Geometri benda kerja
- Metoda dan media pendinginan
- Jumlah benda uji

Mikrostruktur baja sesudah di kuens.

- Terbentuknya martensite: Baja menjadi keras tetapi rapuh karena fasa g berubah menjadi fasa Martensit stressed g +sisa + karbida sisa + lainnya.
- Sejumlah karbida diperlukan untuk mencegah pertumbuhan butir pada waktu baja diaustenisasi.
- Terdapat sisa austenit yang tidak bertransformasi pada kondisi setelah kuens.
- Sisa austenit terjadi akibat kandungan karbon yang tinggi, dan hadirnya elemen penstabil austenit pada baja paduan.

Penghilangan sisa austenite; Temper à bainit, karbida, Martensit Subzero treatment à 100% Martensit Setelah di kuens baja akan mengalami peningkatan kekerasan yang cukup nyata sebagaimana ditunjukkan dari data-data penelitian terhadap logam AISI 4130 (gambar 7), material menjadi keras tetapi tidak siap digunakan mengingat sifatnya yang rapuh sehingga dibutuhkan perlakuan temper.

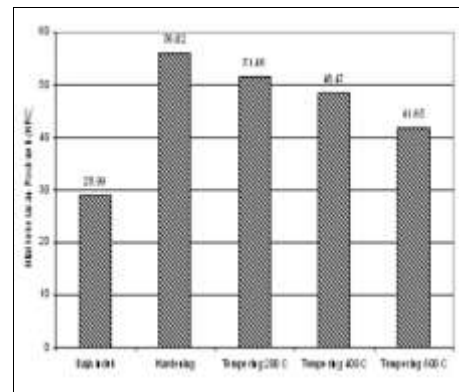
Tempering

Tempering adalah memanaskan kembali baja yang telah dikeraskan untuk menghilangkan tegangan dalam dan mengurangi kekerasan. Proses pemanasan berkisar pada suhu 150 – 6500 C dan didnginkan secara perlahan-lahan tergantung sifat akhir yang diinginkan. Berdasarkan tujuan yang dinginkan, tempering dibagi menjadi tiga daerah suhu pemanasan yaitu :

1. Tempering pada suhu rendah (150 – 300) oC. Tujuannya : Hanya untuk mengurangi tegangan-tegangan kerut dan kerapuhan. Tepering pada suhu ini digunakan untuk bahan yang tak mengalami beban yang berat seperti alat potong dan mata bor yang dipakai untuk kaca dan lain-lain.
2. Tempering pada Suhu Menengah (300 –500) oC. Tujuan : Meningkatkan keuletan dan kekerasannya sedikit berkurang. Tepering pada

suhu ini dilakukan pada alat-alat kerja yang mengalami beban yang berat.

3. Tempering pada Suhu tinggi (500 – 650) oC. Tujuan: Untuk memberikan daya keuletan yang besar dan sekaligus mengurangi kekerasan. Proses ini digunakan pada roda gigi, poros, batang penggerak dan lain-lain. Sebagai contoh diperlihatkan pada gambar 6 dibawah ini merupakan hasil tempering AISI 4130:.



Gambar 6. Penurunan Kekerasan Akibat Tempering

PENUTUP

Peningkatan kekuatan mekanik /kekerasan tentu akan mengalami proses sesuai dengan kaidah yang panjang dengan metode yang sesuai dengan keinginan. seperti pada baja yang selesai di *quenching*, umumnya:

1. Pada perlakuan tempering perlu dipertimbangkan temperatur pemanasan karena tempertur pemanasan tersebut akan sangat menentukan penurunan kekerasan baja.
2. Untuk menghindari pengaruh kecepatan pendinginan akibat terbentuknya selimut uap pada permukaan material diperlukan agitasi/ mengupayakan fluida pendingin mengalir atau bergerak.
3. Kemungkinan terjadi distorsi dan bahkan retak. Untuk itu perlu melakukan pertimbangan :
 - ✓ Perencanaan geometri, Pemilihan Media pendingin. Tegangan sisa akibat machining sebelum perlakuan panas.
 - ✓ Perbedaan laju pemanasan/ pendinginan antara permukaan dan bagian dalam yang merupakan penyebab terjadinya *thermal stress*.

DAFTAR PUSTAKA

- Barney E, Klamechi, 2003, Material and Processes in Manufacturing, Ninth Edition, John Weley & Sons, Inc

- Cherly R Books, 1996, Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels, ASM International
- Daniel A.Brandt, 1985, Metallurgy Fundamentals. The Goodheart Willcox Company, INC.Publisher.
- Mikell P. Groover, 2007, Fundamentals of Modern Manufacturing, Third Edition. John Weley & Sons, Inc.
-Jurnal Natur Indonesia II(I): 12-17 (1999), Pengaruh Perbedaan waktu Penahanan Suhu Stabil (*Holding Time*) Terhadap Kekerasan Logam
-Team, 1997, TIRA AUSTENIT, Materi Pelatihan Perlakuan Panas PEDC Bandung.
- Suherman,W, 1998, Prinsip-prinsip Perlakuan Panas, ITS, Surabaya.
- Willyanto, Internet, 01 Juni 2009, Optimasi Proses Tempering Baja AISI 4140 Untuk Peningkatan Sifat Mekanik Roller Speed