



Analysis of the Tempering Process Results with Temperature Variations on the Mechanical Properties of AISI 4340 Material Hardness

Jordy Giano¹, Risal Abu², Mukhnizar³

Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Dan Perencanaan Universitas Ekasakti

Email: jordygianoo@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to determine the effect of tempering temperature variations on the hardness of AISI 4340 steel after undergoing a quenching process. AISI 4340 is a high-strength low-alloy steel widely used in manufacturing industries, making the control of its mechanical properties through heat treatment crucial. In this study, the steel specimens were initially heated to 800°C and rapidly cooled (quenched) in water. Subsequently, the specimens were subjected to tempering at three different temperatures—200°C, 400°C, and 600°C—with a holding time of 60 minutes. The mechanical properties were evaluated using the Rockwell hardness test (HRC scale) with three measurement points on each specimen. The results indicate that variations in tempering temperature significantly affect the hardness of the steel. Tempering at 200°C produced the highest hardness value of 22.00 HRC due to the presence of tempered martensite with fine carbide precipitation. At 400°C, the hardness decreased to 15.90 HRC, attributed to the transformation of martensite into ferrite and fine cementite (troostite). Meanwhile, tempering at 600°C resulted in a hardness value of 17.80 HRC, characterized by a more stable and ductile sorbite structure. Overall, the findings show that increasing tempering temperature generally decreases hardness while enhancing the ductility of AISI 4340 steel.

Keywords: AISI 4340, tempering, quenching, Rockwell hardness, martensite, microstructure.

PENDAHULUAN

Baja AISI 4340 merupakan salah satu baja paduan rendah berkekuatan tinggi yang banyak digunakan dalam berbagai sektor industri, terutama pada komponen mesin, alat berat, poros, roda gigi, dan bagian yang mengalami pembebanan dinamis. Kelebihannya terletak pada kombinasi antara kekuatan, ketangguhan, serta kemampuan yang baik untuk diolah melalui proses perlakuan panas. Dalam aplikasi industri, performa baja tidak hanya ditentukan oleh komposisi kimianya, tetapi juga oleh perlakuan panas yang diterapkan untuk memodifikasi struktur mikro dan sifat mekaniknya. Salah satu proses perlakuan panas yang memiliki pengaruh signifikan terhadap perilaku mekanik baja adalah tempering, yang dilakukan setelah quenching untuk mengurangi kerapuhan martensit dan menyesuaikan tingkat kekerasan sesuai kebutuhan desain.

Pengaturan temperatur tempering menjadi penting karena setiap tingkat suhu mampu menghasilkan transformasi mikrostruktur yang berbeda, sehingga menghasilkan sifat mekanik yang variatif. Pada suhu rendah, kekerasan material cenderung tetap tinggi karena struktur martensit masih dominan, sedangkan pada suhu menengah hingga tinggi terjadi pembentukan struktur ferrit dan karbida yang lebih stabil sehingga kekerasan menurun namun keuletan meningkat. Oleh sebab itu, memahami hubungan antara temperatur tempering dan perubahan kekerasan menjadi aspek penting dalam proses manufaktur dan rekayasa material.

Berdasarkan hal tersebut, permasalahan utama dalam penelitian ini adalah *bagaimana pengaruh variasi temperatur tempering terhadap kekerasan material baja AISI 4340*. Variasi temperatur tempering diduga akan menghasilkan nilai kekerasan yang berbeda karena perubahan struktur mikro yang terjadi selama proses pemanasan dan pendinginan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui secara empiris hubungan antara temperatur tempering dengan tingkat kekerasan baja AISI 4340 setelah proses quenching. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kondisi tempering yang tepat untuk memperoleh sifat mekanik sesuai kebutuhan.

Ruang lingkup penelitian dibatasi pada proses quenching pada temperatur 800°C menggunakan media pendingin air, kemudian dilanjutkan dengan tempering pada tiga variasi temperatur yaitu 200°C, 400°C, dan 600°C dengan waktu tahan 60 menit. Pengujian sifat mekanik difokuskan pada uji kekerasan menggunakan metode Rockwell (HRC) untuk mengevaluasi perubahan kekerasan pada setiap perlakuan panas yang diberikan.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen laboratoris dengan pendekatan *post-test only*, di mana setiap sampel baja AISI 4340 diberikan perlakuan panas yang berbeda pada tahap tempering. Penelitian difokuskan untuk mengetahui perubahan kekerasan akibat variasi temperatur tempering. Empat kelompok perlakuan diuji, yaitu:

1. Tanpa perlakuan (raw material)
2. Tempering pada 200°C
3. Tempering pada 400°C
4. Tempering pada 600°C

Setiap kelompok terdiri dari tiga spesimen, kecuali kelompok kontrol (tanpa perlakuan) yang terdiri dari satu spesimen. Semua pengujian dilakukan di laboratorium dengan kondisi terkontrol.

Alat dan Bahan

1. Alat

Penelitian ini menggunakan beberapa alat pendukung, yaitu:

- a. Tungku pemanas (furnace) untuk proses quenching dan tempering.
- b. Termometer digital untuk mengukur suhu pemanasan secara presisi.
- c. Tangki quenching berisi air, digunakan sebagai media pendingin cepat.
- d. Mesin Uji Rockwell Future Tech FR-3e, digunakan untuk mengukur nilai kekerasan (HRC).
- e. Peralatan tambahan: gerinda tangan, ragam, jangka sorong, amplas, dan alat pelindung diri (APD).

2. Bahan

Bahan utama adalah baja AISI 4340 berbentuk silinder diameter 22 mm, panjang 20 mm, dipotong menjadi 10 spesimen. Semua spesimen diberi perlakuan panas kecuali satu sampel kontrol.

Prosedur Penelitian

1. Persiapan dan Pemotongan Spesimen
Baja AISI 4340 dipotong menjadi 10 spesimen menggunakan gerinda tangan. Setiap potongan diratakan permukaannya untuk memastikan area kontak optimal pada uji Rockwell.
2. Proses Quenching
Seluruh sembilan spesimen perlakuan dipanaskan hingga suhu 800°C di dalam furnace, kemudian langsung didinginkan cepat (quenching) pada media air. Proses ini menghasilkan struktur martensit yang keras namun getas.
3. Proses Tempering
Setelah quenching, spesimen dibagi ke dalam tiga kelompok:
 - a. Kelompok 1: Tempering pada 200°C
 - b. Kelompok 2: Tempering pada 400°C
 - c. Kelompok 3: Tempering pada 600°C
 Prosedur tempering dilakukan sebagai berikut:
 - a. Spesimen dimasukkan ke dalam furnace.
 - b. Dipanaskan hingga mencapai suhu tempering sesuai kelompok.
 - c. Holding time dijaga selama 60 menit untuk memastikan stabilisasi mikrostruktur.
 - d. Spesimen dikeluarkan dan didinginkan secara alami (pendinginan udara).
4. Pengujian Kekerasan Rockwell
Setiap spesimen diuji menggunakan skala Rockwell C (HRC) dengan beban 150 kg. Untuk setiap spesimen, pengujian dilakukan pada tiga titik yang berbeda dengan jarak antar titik 3–5 mm. Nilai akhir kekerasan diperoleh dari perhitungan nilai rata-rata.

Teknik Analisis

1. Perhitungan Rata-Rata Kekerasan
Nilai rata-rata setiap spesimen dihitung menggunakan rumus:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}$$

dengan:

\bar{X} = nilai kekerasan rata-rata spesimen

X_1, X_2, X_3 = nilai kekerasan pada tiga titik pengujian

2. Perhitungan Rata-Rata Setiap Kelompok Perlakuan
Rata-rata kelompok dihitung dengan rumus:

$$\bar{X}_{kelompok} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i}{n}$$

dengan:

n = jumlah spesimen dalam kelompok ($n = 3$)

3. Analisis Perbandingan

Nilai rata-rata kekerasan antar kelompok dibandingkan untuk melihat:

- Pengaruh kenaikan temperatur tempering terhadap penurunan kekerasan.
- Pola perubahan sifat mekanik setelah perlakuan panas.

Analisis dilakukan secara deskriptif dengan mengamati tren perubahan dari grafik perbandingan antar-perlakuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian kekerasan dilakukan terhadap baja AISI 4340 menggunakan metode Rockwell skala C (HRC) pada tiga titik pengujian untuk setiap spesimen. Nilai kekerasan yang diperoleh kemudian dirata-ratakan untuk menggambarkan respons mekanik material terhadap variasi temperatur tempering. Secara umum, hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan kekerasan yang signifikan antara spesimen tanpa perlakuan dan spesimen yang mengalami proses quenching serta tempering pada tiga variasi temperatur yang diuji.

Pada spesimen tanpa perlakuan, nilai kekerasan rata-rata berada pada angka 11,05 HRC, menunjukkan karakteristik baja AISI 4340 dalam kondisi awal dengan struktur mikro yang belum mengalami perubahan akibat perlakuan panas. Kondisi ini menjadi acuan dasar untuk membandingkan peningkatan atau penurunan kekerasan setelah perlakuan panas diterapkan.

Setelah dilakukan proses quenching dan tempering, terjadi perubahan nilai kekerasan yang cukup mencolok. Pada temperatur tempering 200°C, nilai kekerasan rata-rata meningkat secara signifikan menjadi 22,00 HRC. Peningkatan ini disebabkan oleh terbentuknya martensit hasil quenching yang masih memiliki tingkat kejenuhan karbon tinggi, dan proses tempering pada suhu rendah hanya mengurangi sebagian tegangan internal tanpa merombak struktur martensit secara drastis. Hal ini menjadikan spesimen pada temperatur ini memiliki kekerasan tertinggi dibandingkan kelompok perlakuan lainnya.

Pada temperatur tempering 400°C, nilai kekerasan rata-rata menurun menjadi 15,90 HRC. Penurunan kekerasan pada suhu menengah ini menunjukkan bahwa sebagian struktur martensit mulai mengalami penguraian menjadi ferrit dan karbida halus (troostite). Proses ini membuat material menjadi lebih ulet namun mengurangi tingkat kekerasannya. Kondisi ini sesuai dengan karakteristik umum tempering menengah yang menghasilkan kompromi antara kekuatan dan keuletan.

Pada temperatur tempering 600°C, nilai kekerasan rata-rata kembali mengalami perubahan dan berada pada 17,80 HRC. Meskipun kekerasan naik sedikit dibandingkan suhu 400°C, nilai ini masih lebih rendah dibandingkan suhu tempering rendah (200°C). Pada temperatur tinggi seperti ini, struktur martensit semakin terurai dan membentuk sorbite, yang secara umum menurunkan kekerasan namun meningkatkan ketangguhan dan keuletan material. Variasi ini menunjukkan bahwa sifat mekanik baja AISI 4340 pada kondisi tempering tinggi cenderung stabil, sehingga kekerasan tidak turun drastis dibandingkan perlakuan pada 400°C.

Secara keseluruhan, hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa temperatur tempering memiliki pengaruh langsung terhadap nilai kekerasan material. Semakin tinggi temperatur tempering, kecenderungan penurunan kekerasan semakin terlihat, meskipun pada suhu 600°C terdapat sedikit kenaikan kembali yang menunjukkan adanya kestabilan struktur mikro baru. Temuan ini memperlihatkan pentingnya pengaturan temperatur tempering untuk menyesuaikan kebutuhan kekuatan, keuletan, dan kekerasan baja dalam aplikasi teknik.

Pembahasan

Analisis Perubahan Kekerasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses tempering memberikan pengaruh yang nyata terhadap nilai kekerasan baja AISI 4340. Pada temperatur rendah (200°C), nilai kekerasan tercatat sebagai yang tertinggi, yaitu 22,00 HRC. Pada tahap ini, struktur martensit

hasil quenching masih mendominasi, hanya mengalami sedikit relaksasi tegangan internal. Tempering pada suhu rendah memicu presipitasi karbida sangat halus (ϵ -carbide) yang terdistribusi di dalam matriks martensit. Karbida halus ini meningkatkan kekerasan karena memperkuat material melalui mekanisme *precipitation hardening*. Hasil ini sesuai dengan teori bahwa tempering pada suhu rendah tidak menghilangkan martensit, tetapi hanya mengurangi sedikit kerapuhan dan mempertahankan kekerasan tinggi.

Pada temperatur menengah (400°C), nilai kekerasan menurun menjadi 15,90 HRC. Penurunan ini disebabkan oleh transformasi martensit menjadi struktur mikro baru berupa campuran ferrit dan sementit halus, yang dikenal sebagai troostite. Pada temperatur ini, karbon dalam martensit mulai berdifusi keluar dari kisi tetragonal, membentuk karbida Fe_3C (sementit) yang lebih stabil. Akibatnya, struktur martensit luntur secara bertahap sehingga sifat keras dan rapuhnya berkurang. Proses ini menurunkan kekerasan namun meningkatkan keuletan dan ketangguhan material. Perubahan ini sejalan dengan teori metalurgi bahwa troostite memiliki kekerasan lebih rendah dibandingkan martensit temper rendah.

Pada temperatur tinggi (600°C), nilai kekerasan meningkat sedikit menjadi 17,80 HRC setelah sebelumnya turun pada temperatur menengah, namun tetap jauh lebih rendah dibandingkan tempering pada 200°C . Pada suhu ini, struktur mikro berubah menjadi sorbite, yaitu ferrit dengan distribusi karbida yang lebih kasar. Karbida-karbida ini lebih besar dibandingkan presipitasi pada suhu rendah, sehingga penguatan akibat presipitasi berkurang. Namun demikian, sorbite menawarkan stabilitas mikrostruktur yang lebih baik dan meningkatkan keuletan secara signifikan. Karena itu, pada temperatur tinggi, kekerasan cenderung stabil dalam kisaran menengah, sementara sifat keuletannya meningkat. Hal ini membuktikan bahwa proses tempering tinggi mengutamakan stabilitas struktur dan peningkatan ketangguhan ketimbang kekerasan maksimal.

Secara keseluruhan, kecenderungan penurunan kekerasan sejalan dengan teori bahwa semakin tinggi temperatur tempering, semakin rendah kandungan martensit dan semakin besar pembentukan karbida yang lebih stabil. Variasi kekerasan pada setiap suhu tempering menunjukkan bahwa proses difusi karbon, perubahan struktur mikro, dan ukuran karbida sangat menentukan sifat mekanik akhir baja AISI 4340.

Pengaruh Temperatur terhadap Sifat Mekanis

Perubahan sifat mekanik baja AISI 4340 dapat dipahami melalui evolusi struktur mikro yang terjadi pada setiap tahap tempering. Setelah proses quenching, struktur martensit yang terbentuk sangat keras namun bersifat getas. Ketika tempering dilakukan pada temperatur rendah (200°C), martensit hanya mengalami sedikit pelunakan sehingga menghasilkan martensit temper dengan presipitasi karbida halus. Struktur ini meningkatkan kekerasan dan mempertahankan kekuatan tinggi, namun keuletan hanya meningkat sedikit.

Pada temperatur menengah (400°C), difusi karbon lebih aktif sehingga martensit mengalami transformasi menjadi troostite. Troostite memiliki karakteristik lebih ulet dan kurang keras dibanding martensit temper rendah. Perubahan struktur ini menjelaskan mengapa kekerasan menurun secara signifikan pada suhu 400°C . Pada tahap ini, keseimbangan antara kekerasan dan keuletan mulai terbentuk.

Pada temperatur tinggi (600°C), struktur mikro berubah menjadi sorbite, yaitu fase ferrit dengan presipitasi sementit yang sudah membesar dan terdistribusi merata. Sorbite memiliki ketangguhan yang lebih tinggi karena karbida yang lebih besar tidak lagi memberikan hambatan kuat terhadap pergerakan dislokasi. Dengan demikian, meskipun kekerasannya tidak setinggi pada suhu rendah, struktur sorbite mampu memberikan keuletan dan ketahanan terhadap beban dinamis yang jauh lebih baik.

Stabilitas struktur mikro pada temperatur tinggi juga menjadikan baja lebih tahan terhadap deformasi plastis dan retak akibat beban berulang, sehingga cocok untuk aplikasi

yang memerlukan kombinasi kekuatan dan keuletan yang seimbang. Secara ilmiah, hubungan antara martensit temper, troostite, dan sorbite menunjukkan bahwa kenaikan temperatur tempering menggeser sifat mekanik dari kekerasan tinggi menuju ketangguhan tinggi, sesuai dengan prinsip dasar perlakuan panas baja paduan.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur tempering terhadap kekerasan baja AISI 4340, dapat disimpulkan bahwa proses tempering memberikan perubahan signifikan terhadap sifat mekanik material. Spesimen tanpa perlakuan memiliki nilai kekerasan yang paling rendah, yaitu 11,05 HRC, menunjukkan karakteristik dasar baja sebelum mengalami perlakuan panas. Setelah dilakukan quenching dan tempering, terjadi peningkatan dan penurunan kekerasan tergantung pada temperatur yang digunakan. Tempering pada suhu 200°C menghasilkan nilai kekerasan tertinggi, yakni 22,00 HRC, karena struktur martensit masih dominan dan presipitasi karbida halus terbentuk, sehingga memberikan penguatan signifikan terhadap material.

Pada tempering 400°C, nilai kekerasan menurun menjadi 15,90 HRC akibat transformasi martensit menjadi ferrit dan sementit halus (troostite) yang lebih ulet namun kurang keras. Sementara itu, tempering pada suhu 600°C menghasilkan nilai kekerasan 17,80 HRC, sedikit lebih tinggi dibandingkan suhu menengah, namun tetap lebih rendah dari suhu tempering rendah. Pada suhu ini, struktur sorbite terbentuk, yang memberikan keuletan dan stabilitas mikrostruktur yang lebih baik. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur tempering, kecenderungan kekerasan baja semakin menurun, namun ketangguhan dan keuletannya meningkat. Dengan demikian, pemilihan temperatur tempering yang tepat menjadi faktor penting dalam menyesuaikan sifat mekanik baja AISI 4340 sesuai kebutuhan aplikasi teknik.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, Zainal, Ilmu Perawatan Logam Mesin Industri. Bandung: Tarsito, 1979.

Almughni, Mahfudz. 2007. "Pengaruh Media Pendingin Terhadap Kekerasan Benda Hasil Pengerasan." Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Bush, R.A. Dkk. 1977. "Material Hand Book." Department Of Defence, USA Edition. McGraw Hill Book Company Inc. New York.

Cimanggis, PT Wyamha Karya Industri. 1994. "Prosedur Kerja Pengujian Kekuatan Tarik Besi Cor Kelabu." Departemen Pengujian Material. Jakarta.

Guy, Alan Gordon. 1972. Fisika Bahan. Bandung: ITB.

Hernando. 2004. "Pengaruh Media Pendingin Terhadap Kekerasan Benda Hasil Pengerasan." Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.



Karmono. 1978. Teknologi Mekanik. Bandung: Tarsito.

Kosasih, A. 1987. Teknologi Mekanik. Bandung: Tarsito.

Lihawa, Fransiska Wahid. 2014. "Pengaruh Variasi Temperatur Tempering Terhadap Kekerasan Baja AISI 4340." Jurnal Mekanikal. Universitas Sam Ratulangi.

Putra, Fauzan Arif. 2018. "Pengaruh Temperatur Tempering Terhadap Kekerasan Material AISI 4140." Skripsi. Universitas Riau.

Surdia, T. dan Saito, Shiro. 1999. Pengetahuan Bahan Teknik. Jakarta: Erlangga.

Sularso. 2004. Elemen Mesin. Jakarta: PT Pradnya Paramita.

Sumanto, R. 2002. Ilmu Bahan. Jakarta: Bumi Aksara.

Sutrisno. 1991. Pengujian Bahan Teknik. Surabaya: ITS Press.

Wirjosumarto, H. dan Okumura. 1984. Teknologi Pengelasan Logam. Jakarta: Pradnya Paramita.