

PENGARUH MEDIA PENDINGIN TERHADAP KEKERASAN BAJA KARBON: STUDI EKSPERIMENTAL PADA VARIASI QUENCHING MEDIA

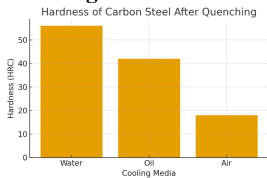
(Effect of Cooling Media on the Hardness of Carbon Steel: An Experimental Study on Quenching Media Variations)

Sis Nanda Kus Andrianto^{1*}, Tata Andromeda², Muhammad Ilman Nur Sasongko³, Cepi Yazirin⁴

^{1,2,3}) Program Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang

⁴) Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang

*Corresponding Author: sis.nanda.fv@um.ac.id

Article Info	ABSTRACT
Page : 101 – 106 Submission Date: 20 / Desember / 2025 Accepted Date: 27 / Desember / 2025 Published Date: 31 / Desember / 2025	<i>This research analyzes the effect of cooling media types on the hardness of carbon steel through the quenching process using water, oil, and air. Variations of cooling media are selected based on differences in cooling rates that theoretically affect the transformation of microstructures, especially the formation of martensite. The research method is experimental by heating carbon steel to 850 °C, followed by quenching on three different media. The Rockwell C hardness test shows a significant difference between the three media. Water-cooled samples have the highest hardness value, followed by oil, while air cooling produces the lowest hardness. This result is in line with the cooling rate theory and phase transformation kinetics (TTT/CCT diagram). Research findings contribute to the optimization of the heat treatment process in the manufacturing industry to choose a cooling medium that is suitable for the strength and toughness of the components.</i>
Keywords: <i>quenching, cooling media, hardness, carbon steel, martensite, heat treatment</i>	
EMAIL	ABSTRAK
¹sis.nanda.fv@um.ac.id ²tata.andromeda.2409337@students.um.ac.id ³ilman.sasongko.fv@um.ac.id ⁴cepiyazirin10@unisma.ac.id	
Kata kunci: <i>quenching, media pendingin, kekerasan, baja karbon, martensit, heat treatment.</i> Main Figure  	Penelitian ini menganalisis pengaruh jenis media pendingin terhadap kekerasan baja karbon melalui proses quenching menggunakan air, oli, dan udara. Variasi media pendingin dipilih berdasarkan perbedaan laju pendinginan yang secara teoritis memengaruhi transformasi mikrostruktur, khususnya pembentukan martensit. Metode penelitian bersifat eksperimental dengan melakukan pemanasan baja karbon hingga 850 °C, diikuti quenching pada tiga media berbeda. Pengujian kekerasan Rockwell C menunjukkan perbedaan signifikan antara ketiga media. Sampel yang didinginkan dengan air memiliki nilai kekerasan tertinggi, diikuti oli, sementara pendinginan udara menghasilkan kekerasan terendah. Hasil ini sejalan dengan teori laju pendinginan dan kinetika transformasi fasa (diagram TTT/CCT). Temuan penelitian berkontribusi pada optimasi proses heat treatment pada industri manufaktur untuk memilih media pendingin yang sesuai dengan kebutuhan kekuatan dan keuletan komponen.

PENDAHULUAN

Baja karbon merupakan salah satu material logam yang paling luas penggunaannya dalam industri manufaktur, konstruksi, dan rekayasa mesin [1]. Tingginya tingkat pemanfaatan baja karbon terutama disebabkan oleh kemudahan prosesing, biaya produksi yang relatif rendah, serta

kemampuan material ini untuk dimodifikasi sifat mekaniknya melalui berbagai proses perlakuan panas [2]. Di antara sifat mekanik yang sering ditingkatkan adalah kekerasan, ketahanan aus, dan kekuatan tarik, yang sangat penting pada komponen-komponen seperti poros, gear, alat potong, dan elemen konstruksi lainnya. Salah satu metode paling efektif untuk meningkatkan kekerasan baja adalah melalui proses quenching, yaitu pendinginan cepat dari kondisi austenitisasi untuk mengubah struktur mikro menjadi martensit—fasa supersaturasi yang keras dan rapuh [3].

Transformasi dari austenit ke martensit sangat bergantung pada laju pendinginan, yang secara langsung dipengaruhi oleh jenis media pendingin yang digunakan [4]. Media pendingin dengan konduktivitas termal dan kapasitas konveksi tinggi—seperti air—mampu menurunkan suhu baja dengan sangat cepat sehingga mendorong pembentukan martensit secara lebih dominan. Sebaliknya, media seperti oli memberikan laju pendinginan yang lebih lambat, sehingga menghasilkan campuran martensit parsial, bainit, atau bahkan perlit tergantung kondisi termal dan komposisi material. Pendinginan udara merupakan media paling lambat, yang umumnya menghasilkan struktur perlitik atau feritik dengan tingkat kekerasan lebih rendah [5].

Meskipun mekanisme transformasi fasa pada baja telah banyak dijelaskan melalui diagram TTT dan CCT, penelitian mengenai pengaruh langsung variasi media pendingin terhadap kekerasan baja karbon tetap menjadi topik yang relevan [6]. Hal ini disebabkan oleh variasi komposisi baja karbon, perbedaan kondisi proses industri, serta kebutuhan aplikasi yang semakin spesifik, baik dari sisi kekuatan maupun keuletan. Banyak studi sebelumnya berfokus pada dua jenis media pendingin tanpa penyajian perbandingan sistematis yang menghubungkan hasil kekerasan dengan teori kinetika transformasi fasa secara komprehensif [7].

Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk memberikan pemahaman yang lebih terukur mengenai bagaimana perbedaan laju pendinginan dari air, oli, dan udara memengaruhi kekerasan akhir baja karbon. Kajian empiris ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis bagi industri dalam menentukan media pendingin yang paling sesuai dengan kebutuhan performa komponen, sekaligus memperkuat hubungan antara teori metalurgi dan hasil eksperimental.

METODE

2.1 Bahan dan Peralatan

Penelitian ini menggunakan baja karbon dengan kandungan karbon sekitar 0,40–0,45%, yang tergolong baja karbon medium dan umum digunakan untuk komponen yang membutuhkan kombinasi kekuatan dan keuletan. Material awal dibentuk menjadi spesimen uji dengan dimensi sesuai standar pengujian kekerasan Rockwell [8].

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian meliputi:

1. Furnace listrik dengan kontrol suhu digital dan kemampuan pemanasan hingga 900 °C. Furnace ini digunakan untuk proses austenitisasi, dengan kontrol keseragaman suhu guna memastikan seluruh bagian spesimen mencapai kondisi austenit penuh.
2. Media pendingin, yaitu:
 - Air, sebagai media pendingin cepat dengan koefisien perpindahan panas tinggi.
 - Oli SAE 40, sebagai media pendingin sedang yang memberikan laju penurunan suhu lebih lambat dibanding air.
 - Udara bebas, sebagai media pendingin lambat yang memungkinkan terjadinya pendinginan secara natural.
3. Mesin uji kekerasan Rockwell tipe C (HRC), yang digunakan untuk mengukur tingkat kekerasan spesimen setelah perlakuan panas menggunakan indenter *diamond cone* dengan beban total 150 kgf.

2.2 Prosedur Eksperimen

a. Persiapan Spesimen

Spesimen baja karbon dipotong menggunakan mesin potong logam hingga menghasilkan ukuran yang seragam sesuai standar pengujian kekerasan. Setiap permukaan spesimen dibersihkan dari kotoran, minyak, atau oksida untuk memastikan proses pemanasan dan pendinginan berlangsung merata. Jumlah spesimen dibagi menjadi tiga kelompok, masing-masing untuk perlakuan quenching yang berbeda.

b. Proses Austenitisasi

Setiap spesimen dipanaskan dalam furnace hingga mencapai suhu 850 °C, yaitu suhu yang berada di atas garis A3 untuk baja karbon medium, sehingga struktur mikro berubah sepenuhnya menjadi austenit. Waktu tahan (*holding time*) ditetapkan selama 30 menit agar transformasi austenit homogen. Pemanasan dilakukan secara bertahap untuk mencegah gradien suhu berlebih yang dapat menyebabkan distorsi.

c. Proses Quenching

Segera setelah waktu tahan tercapai, spesimen dipindahkan dengan cepat dari furnace ke media pendingin sesuai variasi perlakuan:

- Sampel A (*Quenching Air*): Spesimen dicelupkan ke air pada suhu kamar. Pendinginan cepat ini dirancang untuk menghasilkan martensit dominan.
- Sampel B (*Quenching Oli SAE 40*): Spesimen dicelupkan ke oli SAE 40 dengan suhu awal sekitar 28–30 °C. Oli memberikan pendinginan moderat yang berpotensi menghasilkan campuran martensit dan bainit.
- Sampel C (Pendinginan Udara): Spesimen dibiarkan mendingin pada udara bebas tanpa media tambahan. Pendinginan lambat ini diperkirakan menghasilkan struktur ferit-perlit.

Seluruh proses *quenching* dilakukan secara konsisten dengan durasi pencelupan yang seragam, dan setiap spesimen dipegang menggunakan penjepit logam tahan panas untuk menghindari kontaminasi atau cedera.

d. Pengujian Kekerasan Rockwell C

Setelah pendinginan selesai, setiap spesimen diuji menggunakan mesin uji Rockwell C. Pengujian dilakukan pada tiga titik berbeda pada permukaan spesimen untuk mendapatkan nilai rata-rata yang representatif. Jarak antar titik uji dijaga agar tidak terjadi pengaruh bekas indentasi sebelumnya terhadap pengujian berikutnya. Nilai kekerasan dicatat dalam satuan HRC.

2.3 Analisis Data

Data hasil pengujian kekerasan dari setiap sampel dihitung dalam bentuk nilai rata-rata dan standar deviasi untuk masing-masing media pendingin. Perbandingan antar kelompok dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif untuk melihat perbedaan tren berdasarkan variasi laju pendinginan. Selain itu, interpretasi hasil dikaitkan dengan teori transformasi fasa pada baja, termasuk pengaruh laju pendinginan terhadap pembentukan martensit, bainit, ferit, dan perlit, sebagaimana dijelaskan oleh diagram TTT (*Time-Temperature-Transformation*) dan CCT (*Continuous Cooling Transformation*). Hubungan antara struktur mikro dan kekerasan dianalisis untuk mendukung penjelasan empiris dari hasil eksperimen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

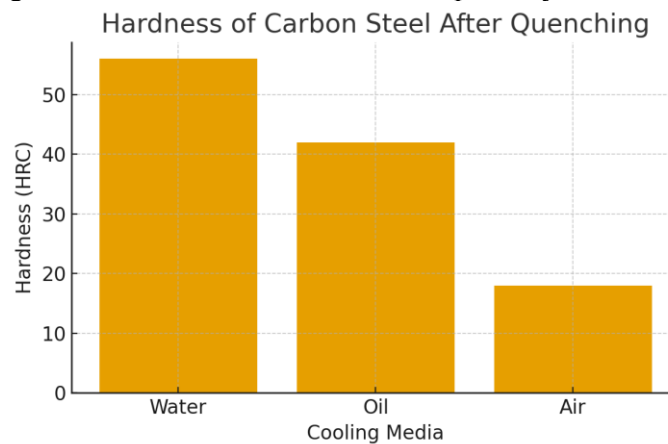
3.1 Hasil Pengujian Kekerasan Rockwell C

Pengujian kekerasan dilakukan pada tiga titik untuk setiap spesimen guna mendapatkan nilai rata-rata yang representatif. Hasil pengukuran menunjukkan adanya variasi kekerasan yang signifikan antar media pendingin. Tabel berikut menyajikan nilai kekerasan masing-masing sampel.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kekerasan Baja Karbon Setelah Quenching

Media Pendingin	Titik Uji 1 (HRC)	Titik Uji 2 (HRC)	Titik Uji 3 (HRC)	Rata-rata (HRC)
Air	55	57	56	56
Oli	41	43	42	42
Udara	18	19	17	18

Dari data ini terlihat bahwa media pendingin air menghasilkan kekerasan tertinggi, diikuti oleh oli, dan pendinginan udara menghasilkan kekerasan paling rendah. Nilai rata-rata ini konsisten dengan teori laju pendinginan serta kinetika transformasi fasa pada baja karbon.



Gambar 1. Grafik Hasil Pengujian Kekerasan

3.2 Analisis Efektivitas Pendinginan Berdasarkan Nilai Kekerasan

a. Media Air (Pendinginan Cepat)

Spesimen yang didinginkan menggunakan air menunjukkan nilai kekerasan rata-rata tertinggi, yaitu 56 HRC. Air memiliki koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi dibandingkan oli maupun udara, sehingga laju pendinginan meningkat secara drastis. Laju pendinginan yang tinggi memungkinkan struktur austenit berubah hampir sepenuhnya menjadi martensit, struktur kristal tetragonal terdistorsi yang sangat keras akibat terjebakannya atom karbon di dalam kisi besi [9].

Hasil pengujian menunjukkan bahwa ketiga titik uji pada spesimen air relatif konsisten, menandakan bahwa pendinginan berlangsung merata dan minim terjadi gradien termal yang dapat menyebabkan variasi mikrostruktur. Konsistensi nilai ini mengindikasikan keberhasilan proses quenching cepat.

b. Media Oli (Pendinginan Sedang)

Nilai kekerasan rata-rata spesimen oli adalah 42 HRC, lebih rendah 14 poin dibandingkan pendinginan air. Oli menghasilkan pendinginan dengan laju sedang karena viskositasnya tinggi dan perpindahan panas berlangsung lebih lambat. Kondisi ini menyebabkan tidak semua austenit berubah menjadi martensit; sebagian berubah menjadi bainit atas, struktur hasil transformasi pada laju pendinginan menengah yang memiliki kekerasan lebih rendah dibanding martensit [9].

Rentang nilai pada titik uji yang relatif sempit menunjukkan bahwa meskipun pendinginan slower daripada air, prosesnya tetap cukup stabil untuk menghasilkan struktur mikro yang cukup seragam. Penurunan kekerasan dibanding air menunjukkan bahwa laju pendinginan oli tidak cukup cepat untuk melewati *nose* pada diagram TTT sehingga menghambat pembentukan martensit penuh.

c. Media Udara (Pendinginan Lambat / Normalizing)

Spesimen yang dibiarkan mendingin di udara menunjukkan nilai kekerasan rata-rata paling rendah, yaitu 18 HRC. Pendinginan udara memiliki laju paling lambat sehingga memungkinkan struktur austenit mengalami transformasi menjadi perlit dan ferrit, yang jauh lebih lunak daripada martensit maupun bainit [10].

Nilai kekerasan rendah menunjukkan bahwa pendinginan tidak cukup cepat untuk membentuk struktur martensitik sama sekali. Dalam kondisi industri, pendinginan udara lebih sering menghasilkan sifat mekanik yang lebih ulet dibanding keras, sehingga cocok untuk komponen yang membutuhkan ketangguhan dan tidak memerlukan kekerasan tinggi.

3.3 Perbandingan Hasil Berdasarkan Teori Transformasi Fasa

Hasil penelitian menunjukkan tren yang sesuai dengan teori metalurgi. Diagram TTT dan CCT menjelaskan bahwa pembentukan martensit membutuhkan pendinginan sangat cepat untuk menghindari nose perlitik. Air mampu memenuhi syarat tersebut, sementara oli berada pada laju intermediate. Udara berada jauh di bawah laju pendinginan kritis sehingga tidak memungkinkan pembentukan martensit [11]. Proses ini menunjukkan hubungan langsung antara energi pendinginan, kinetika transformasi, dan sifat mekanik akhir.

Tabel 2. Hasil Mikrostruktur Spesimen

Laju Pendinginan	Mikrostruktur Dominan	Kekerasan
Cepat (Air)	Martensit	Tinggi
Sedang (Oli)	Martensit + Bainit	Sedang
Lambat (Udara)	Perlit + Ferrit	Rendah

3.4 Dampak Variasi Media Pendingin terhadap Aplikasi Komponen

Perbedaan nilai kekerasan yang dihasilkan dari masing-masing media pendingin memiliki implikasi langsung terhadap kesesuaian material untuk berbagai aplikasi teknik. Pada pendinginan menggunakan air, kekerasan yang dicapai berada pada tingkat tertinggi akibat terbentuknya martensit hampir penuh. Kondisi ini menjadikan baja sangat keras namun juga getas. Oleh karena itu, baja hasil quenching air umumnya digunakan pada komponen yang membutuhkan ketahanan aus tinggi tetapi tidak mengalami pembebanan kejut yang besar, seperti alat potong sederhana, punch, dan dies berskala kecil. Namun demikian, sifat getas yang tinggi menjadikan material ini rentan terhadap retak apabila tidak diikuti dengan proses tempering sebagai perlakuan lanjutan [12].

Berbeda dengan air, pendinginan menggunakan oli menghasilkan kekerasan tingkat menengah dengan struktur mikro berupa campuran martensit dan bainit. Kombinasi ini memberikan keseimbangan antara kekerasan dan keuletan, sehingga baja hasil quenching oli lebih mampu menahan beban dinamis tanpa mengalami kegagalan getas. Karakteristik tersebut membuat proses quenching menggunakan oli cocok diterapkan pada komponen mesin seperti gear, poros, atau bagian lain yang memerlukan kekuatan dan ketangguhan dalam porsi seimbang [9].

Adapun pendinginan udara menghasilkan nilai kekerasan paling rendah karena struktur mikro didominasi oleh perlit dan ferrit yang bersifat sangat ulet. Meski tidak memberikan kekerasan tinggi, baja yang didinginkan secara natural memiliki ketangguhan unggul, sehingga sesuai untuk komponen struktur, bracket, atau bagian mesin yang mengalami pembebanan dinamis tanpa membutuhkan kekerasan ekstrem. Sifat ulet ini memungkinkan material menyerap energi lebih besar sebelum mengalami deformasi, membuatnya ideal untuk aplikasi yang membutuhkan fleksibilitas dan ketahanan terhadap beban berulang. Secara keseluruhan, variasi media pendingin memengaruhi tidak hanya sifat mekanik tetapi juga menentukan jenis aplikasi paling tepat untuk setiap kondisi perlakuan panas, sehingga pemilihan media pendingin menjadi langkah strategis dalam desain dan produksi komponen manufaktur.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa jenis media pendingin memiliki pengaruh signifikan terhadap kekerasan akhir baja karbon setelah proses quenching. Pendinginan menggunakan air menghasilkan nilai kekerasan tertinggi akibat laju pendinginan yang sangat cepat, yang mendorong terbentuknya martensit hampir penuh. Pendinginan menggunakan oli menghasilkan kekerasan tingkat menengah karena laju pendinginan yang lebih moderat, sehingga struktur mikro yang terbentuk berupa kombinasi martensit dan bainit. Sementara itu, pendinginan udara memberikan kekerasan terendah akibat terbentuknya perlit dan ferrit sebagai hasil dari pendinginan lambat. Perbedaan ini memiliki implikasi langsung terhadap pemilihan aplikasi komponen. Quenching air sesuai untuk komponen yang membutuhkan kekerasan dan ketahanan aus tinggi, quenching oli lebih cocok untuk komponen yang membutuhkan keseimbangan antara kekuatan dan keuletan, sedangkan pendinginan udara sesuai untuk komponen struktur yang membutuhkan ketangguhan tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pramuko Ilmu Purboputro, Sartono Putro, Djoeli Satrijo. The analysis of carburizing with 15, 30, 40, 45, 60 minutes holding time due to hardness and microstructure on ST 60 Steel. *JTTM J Terap Tek Mesin* 2023;4:55–63. <https://doi.org/10.37373/jttm.v4i1.448>.
- [2] Suprpto A, Mokhtar A. Analisis Kemampuan Bahan St 37 Dan Scm 440 Untuk Dikeraskan Pada Produk Gear. *Semin Keinsinyuran Progr Stud Progr Profesi Ins* 2021;1:8–13. <https://doi.org/10.22219/skpsppi.v1i0.4192>.
- [3] Gunawan E. Analisa Pengaruh Temperatur Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Pada Baja Karbon Rendah (St41) Dengan Metode Pack Carburizing. *Tek Eng Sains J* 2017;1:117. <https://doi.org/10.51804/tesj.v1i2.133.117-124>.
- [4] Utama DA. Pengaruh Quenching Terhadap Laju Korosi pada Baja Karbon Tinggi. *Univeristas Sriwijaya*, 2022.
- [5] Wisnujati A. Analisis Perlakuan Carburizing Terhadap Sifat Fisik Dan Mekanik Pada Bahan Sprocket Imitasi Sepeda Motor. *Simetris J Tek Mesin, Elektro Dan Ilmu Komput* 2017;8:127–34. <https://doi.org/10.24176/simet.v8i1.844>.
- [6] Subeki N, Ilman MN, Iswanto PT. Minimizing Distortion by Transient Thermal Tensioning and Its Effect on Fatigue Crack Growth Behavior of Flux Cored Arc Steel Weld Joints 2017;9:378–85. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i1/170902316>.
- [7] Kristiadi S, Lesmanah U, Raharjo A. Pengaruh Variasi Media Pendingin Terhadap Kekerasan dan Mikrostruktur Pada Pengecoran Aluminium 6061. *J Tek Mesin* 2023;6–13.
- [8] Sundari E, Fahlevi R, Besar B. Mekanis Sprocket Imitasi Sepeda Motor Menggunakan Katalisator. *J Austenit* 2018;10:72–8.
- [9] Dermawan A, Mustaqim, Sidiq F. Pengaruh Temperatur Carburizing Pada Proses Pack Carburizing Terhadap Sifat – Sifat Mekanis Baja S 21 C. *Engineering* 2017;14:7–14.
- [10] Suriansyah S, Pratikto, Suprpto A, Irawan YS. The effect cryogenic cooling, martemper and temper of micro structure and hardness ductile cast iron (FCD-45). *Int J Appl Eng Res* 2015;10:19389–400.
- [11] Buntain R, Alexandrov B, Viswanathan G. Characterization of the interpass microstructure in low alloy steel/Alloy 625 HW-GTAW narrow groove welds. *Mater Charact* 2020;170:110638. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110638>.
- [12] Fattah RN, Sugiyanto S, Priyambodo BH, Nurhidayat A, Yaqin RI. Rekayasa Peningkatan Kekerasan Permukaan Gear Sprocket Sepeda Motor dengan Metode Quenching Variasi Media Pendingin. *Quantum Tek J Tek Mesin Terap* 2023;5:8–13. <https://doi.org/10.18196/jqt.v5i1.19418>.