PENGARUH KOMBINASI VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TAHAN TERHADAP SIFAT MEKANIK BAJA KARBON DENGAN METODE *QUENCHING*

Amrin [1], Musa B. Palungan [1], Atus Buku [1], Muhammad Aris Kastian [2]

[1] Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia Paulus

Jl. Perintis Kemerdekaan KM. 13 Daya, Kec. Tamalanrea, Kota Makassar Sulawesi Selatan, 90245

[2] Program Studi Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal, Politeknik Maritim AMI Makassar

Jl. Nuri Baru No. 1 Sambung Jawa, Kec. Mamajang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan, 90121

polimarimamrin@gmail.com [1]

Abstrak

Baja karbon merupakan material teknik yang banyak digunakan dalam industri manufaktur dan permesinan karena kekuatan mekaniknya dapat ditingkatkan melalui perlakuan panas (*heat treatment*). Proses austenisasi dan quenching menjadi metode yang paling umum digunakan untuk menghasilkan struktur martensit yang keras dan kuat, di mana parameter temperatur dan waktu tahan berperan besar dalam menentukan kualitas akhir material. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi temperatur austenisasi (650°C, 750°C, dan 850°C) serta waktu tahan (30, 60, dan 90 menit) terhadap kekuatan tarik dan kekerasan *Vickers* baja karbon menggunakan media pendingin air. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan signifikan pada kedua sifat mekanik seiring meningkatnya temperatur dan durasi pemanasan. Nilai kekuatan tarik tertinggi 1.269 MPa dan kekerasan maksimum 380 HV diperoleh pada temperatur 850 °C dan waktu tahan 90 menit. Hal ini diduga karena terbentuknya martensit yang lebih padat dan homogen setelah *quenching*. Analisis ANOVA dua arah mengonfirmasi bahwa temperatur dan waktu tahan memberikan pengaruh signifikan ($p < 0.05$) terhadap sifat mekanik, sementara interaksi keduanya tidak signifikan, sehingga kedua faktor bekerja secara independen. Kondisi optimum perlakuan panas ditetapkan pada 850 °C selama 90 menit untuk meningkatkan performa mekanik baja karbon secara maksimal.

Kata kunci : baja karbon; *heat treatment*; waktu tahan; *quenching*.

Abstract

Carbon steel is an engineering material widely utilized in the manufacturing and machining industries because its mechanical strength can be enhanced through heat treatment. The austenitization and quenching processes are the most common methods used to produce a hard and strong martensitic structure, where temperature parameters and holding time play a major role in determining the final quality of the material. This study aims to analyze the effect of variations in austenization temperature (650°C, 750°C, and 850°C) and holding time (30, 60, and 90 minutes) on the tensile strength and Vickers hardness of carbon steel using water as a cooling medium. The test results showed a significant increase in both mechanical properties with increasing temperature and heating duration. The highest tensile strength value of 1,269 MPa and a maximum hardness of 380 HV were obtained at a temperature of 850°C and a holding time of 90 minutes, which is presumably due to the formation of a denser and more homogeneous martensite after quenching. Two-way ANOVA analysis confirmed that temperature and holding time provided a significant effect ($p < 0.05$) on mechanical properties, while their interaction was not significant, indicating that both factors operate independently. The optimum heat treatment condition was determined at 850°C for 90 minutes to maximize the mechanical performance of the carbon steel.

Key words : *carbon steel; heat treatment; holding time; quenching.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi manufaktur dan permesinan menuntut penggunaan material dengan performa mekanik yang tinggi, terutama pada komponen yang bekerja di bawah beban tarik, gesekan, dan kondisi dinamis [1], [2]. Baja karbon merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan karena karakteristiknya yang mudah diproses, memiliki kekuatan yang baik, serta sifat mekaniknya dapat dimodifikasi melalui proses perlakuan panas (*heat treatment*) sehingga dapat memenuhi kebutuhan aplikasi teknik yang semakin kompleks [3], [4].

Sifat mekanik baja karbon—khususnya kekuatan tarik dan kekerasan—sangat dipengaruhi oleh kadar karbon dan parameter perlakuan panas yang diterapkan [5], [6]. Salah satu metode *heat treatment* yang umum digunakan adalah austenisasi yang diikuti proses *quenching*, yaitu pemanasan baja hingga mencapai fase austenit kemudian didinginkan cepat menggunakan media pendingin seperti air atau oli. Pendinginan cepat ini menghasilkan struktur martensit yang keras dan kuat sehingga meningkatkan kekuatan tarik serta kekerasan baja secara signifikan [1], [7], [8]. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa variasi media pendingin dapat menghasilkan sifat mekanik berbeda karena perbedaan laju pendinginan [9], [10].

Selain media pendingin, parameter temperatur austenisasi memiliki pengaruh besar terhadap homogenisasi struktur austenit sebelum transformasi martensit terjadi. Temperatur yang lebih tinggi meningkatkan difusi karbon sehingga menghasilkan martensit yang lebih padat dan keras setelah *quenching* [3], [7], [11]. Faktor *holding time* atau waktu tahan juga menjadi parameter penting dalam proses austenisasi karena memengaruhi kestabilan fase austenit dan distribusi karbon, yang kemudian berdampak pada sifat mekanik setelah pendinginan [12]. Kombinasi variasi suhu dan waktu tahan terbukti memengaruhi struktur mikro serta performa mekanik baja karbon, sebagaimana dilaporkan dalam berbagai studi terdahulu [2], [3], [13].

Walaupun penelitian mengenai heat treatment telah banyak dilakukan, sebagian besar berfokus pada variasi media pendingin atau perlakuan lanjutan seperti tempering, sementara kajian tentang kombinasi variasi temperatur austenisasi dan waktu tahan menggunakan media pendingin tunggal seperti air masih terbatas. Selain itu, banyak penelitian sebelumnya belum menggunakan pendekatan statistik seperti analisis varians (ANOVA) untuk memastikan apakah variasi parameter proses memberikan pengaruh signifikan terhadap perubahan sifat mekanik material.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi temperatur austenisasi 650°C, 750°C, dan 850°C serta waktu tahan 30, 60, dan 90 menit terhadap sifat mekanik baja karbon melalui proses *quenching* menggunakan air. Penelitian ini juga menggunakan analisis ANOVA untuk menentukan signifikansi pengaruh masing-masing parameter, sehingga hasil yang diperoleh lebih valid dan dapat dijadikan dasar dalam penentuan kondisi *heat treatment* optimal untuk aplikasi teknik.

METODE PENELITIAN

1. Persiapan Material

Metode Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja karbon menengah (AISI 1042) berbentuk batang yang dipotong menjadi beberapa spesimen uji. Spesimen dipersiapkan sesuai standar pengujian mekanik dengan proses pemotongan, penggerindaan, dan perataan permukaan untuk memastikan dimensi uji sesuai persyaratan pengujian tarik dan kekerasan.

Proses *heat treatment* dimulai dengan tahap austenisasi, di mana setiap spesimen dipanaskan di dalam *furnace* listrik hingga mencapai temperatur yang telah ditentukan, yaitu 650°C, 750°C, dan 850°C. Setelah temperatur tercapai, spesimen ditahan (*holding time*) selama 30, 60, dan 90 menit untuk memastikan terbentuknya fasa austenit secara homogen.

Setelah waktu tahan terpenuhi, spesimen diambil dari *furnace* dan langsung dilakukan proses *quenching* menggunakan media pendingin air pada suhu kamar. Pendinginan cepat ini bertujuan untuk mengubah struktur mikro austenit menjadi martensit sehingga menghasilkan peningkatan kekerasan dan kekuatan mekanik.

Tabel 1 Parameter perlakuan panas material

No	Temp (°C)	Waktu Tahan (Menit)	Media Pendingin
1	650	30	Air
2	650	60	Air
3	650	90	Air
4	750	30	Air
5	750	60	Air
6	750	90	Air

2. Uji Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk menentukan kekuatan tarik maksimum material setelah perlakuan panas. Pengujian dilakukan menggunakan Galdabini *Tensile Testing Machine*

sesuai standar ASTM E8 hingga spesimen mengalami patah.

Kekuatan tarik dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$TS = \frac{F_{max}}{A} \quad \text{.....(1)}$$

dengan TS adalah kekuatan tarik (MPa), Fmax adalah Gaya maksimum saat spesimen putus (N), dan A adalah Luas penampang awal spesimen (mm^2).

3. Uji Kekerasan *Vickers* (HV)

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *Vickers* sesuai standar ASTM E92 menggunakan alat uji kekerasan *Vickers* merek 402MVDS. Pengujian dilakukan dengan menekan indentor berbentuk *diamond pyramid* ke permukaan spesimen dengan beban tertentu, kemudian mengukur diagonal bekas indentasi.

Setiap spesimen diukur pada tiga titik permukaan yang berbeda dan nilai rata-rata digunakan sebagai hasil akhir.

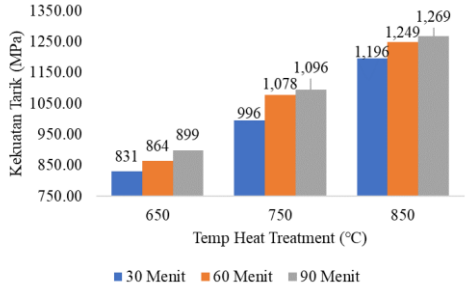
4. Analisis Statistik

Data hasil uji tarik dan kekerasan dianalisis menggunakan *two-way Analysis of Variance* (ANOVA) dengan tingkat signifikansi 0.05 untuk mengetahui apakah variasi temperatur austenisasi dan waktu tahan memberikan pengaruh signifikan terhadap perubahan sifat mekanik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Perancangan Uji Tarik

Gambar 1 menunjukkan nilai kekuatan tarik baja karbon pada tiga temperatur heat treatment (650°C, 750°C, dan 850°C) dengan variasi waktu tahan 30, 60, dan 90 menit. Secara umum, grafik memperlihatkan tren peningkatan kekuatan tarik seiring bertambahnya temperatur *heat treatment* pada semua waktu tahan. Nilai kekuatan tarik meningkat dari 831–899 MPa pada 650°C, menjadi 996–1.096 MPa pada 750°C, dan mencapai nilai tertinggi 1.196–1.269 MPa pada 850°C.



Gambar 1 Kekuatan Tarik

Peningkatan ini menunjukkan bahwa temperatur austenisasi yang lebih tinggi memberikan kesempatan lebih besar bagi difusi karbon, sehingga struktur austenit menjadi lebih homogen sebelum proses quenching dilakukan. Struktur austenit yang stabil kemudian berubah menjadi martensit yang lebih keras dan padat setelah pendinginan cepat, yang berdampak pada meningkatnya kekuatan tarik material. Hal ini sejalan dengan hasil temuan dari penelitian Mukhrim et al., [7], serta Lestari et al., [3], adanya peningkatan temperatur pemanasan berkontribusi pada pembentukan martensit dengan densitas dislokasi tinggi.

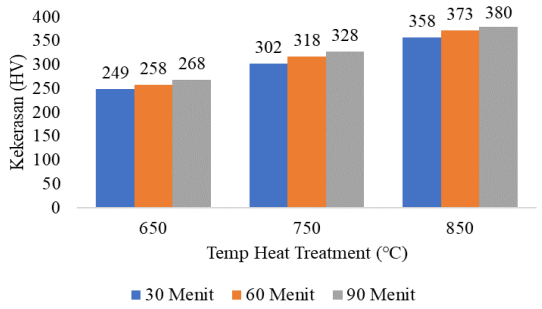
Selain itu, variasi waktu tahan juga memberikan pengaruh positif, meskipun peningkatannya tidak sebesar pengaruh temperatur. Pada ketiga temperatur, waktu tahan 90 menit secara konsisten menghasilkan nilai *tensile strength* tertinggi. Sebagai contoh, pada 850°C, kekuatan tarik meningkat dari 1.196 MPa (30 menit) menjadi 1.249 MPa (60 menit) dan mencapai 1.269 MPa (90 menit). Hal ini mengindikasikan bahwa waktu tahan yang lebih lama mendukung homogenisasi struktur austenit sebelum *quenching*.

Hasil analisis ANOVA dua arah pada tabel 2 menunjukkan bahwa temperatur *heat treatment* dan waktu tahan sama-sama memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai kekuatan tarik material. Faktor temperatur memiliki nilai F = 343.343 dengan $p < 0.001$, sedangkan faktor waktu tahan memiliki nilai F = 11.797 dengan $p < 0.001$, yang berarti keduanya secara statistik memengaruhi perubahan *tensile strength*. Sementara itu, interaksi antara temperatur dan waktu tahan menunjukkan nilai F = 1.650 dengan p = 0.205, sehingga dapat disimpulkan bahwa keduanya tidak saling berinteraksi, dan masing-masing bekerja secara independen dalam memengaruhi kekuatan tarik baja karbon.

2. Uji Kekerasan

Gambar 2 menunjukkan nilai kekerasan *Vickers* (HV) baja karbon pada tiga temperatur *heat treatment* (650°C, 750°C, dan 850°C) dengan variasi waktu tahan 30, 60, dan 90 menit. Secara umum, grafik memperlihatkan tren peningkatan kekerasan yang jelas pada setiap kenaikan temperatur, di mana nilai kekerasan meningkat dari 249–268 HV pada 650°C menjadi 302–328 HV pada 750°C, dan mencapai nilai tertinggi 358–380 HV pada 850°C. Peningkatan ini menunjukkan bahwa temperatur austenisasi yang lebih tinggi memberikan kesempatan lebih besar bagi karbon untuk berdifusi dan larut secara homogen dalam fasa austenit sebelum menjalani proses *quenching*, sehingga struktur martensit yang terbentuk menjadi lebih

keras dan stabil. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian oleh Lestari et al., [3], adanya peningkatan temperatur mampu menghasilkan martensit dengan densitas dislokasi tinggi. Pembentukan karbida halus pada temperatur tinggi juga berperan dalam meningkatkan ketahanan terhadap deformasi plastis.



Gambar 2 Kekerasan

Selain temperatur, waktu tahan juga memberikan kontribusi terhadap meningkatnya nilai kekerasan. Pada setiap temperatur, durasi pemanasan yang lebih lama menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi, yang terlihat jelas pada temperatur 850°C dengan peningkatan dari 358 HV (30 menit) menjadi 373 HV (60 menit) dan 380 HV (90 menit). Penambahan waktu tahan memberi kesempatan bagi karbon untuk berdifusi secara lebih merata dan memungkinkan relaksasi tegangan internal sebelum pendinginan cepat, sehingga menghasilkan struktur martensit yang lebih seragam dan kuat. Secara keseluruhan, pola peningkatan yang konsisten ini mengindikasikan bahwa temperatur merupakan faktor dominan, sedangkan waktu tahan memperkuat efek perlakuan panas, sehingga kombinasi keduanya mampu meningkatkan performa kekerasan material secara signifikan.

Hasil analisis ANOVA dua arah pada tabel 2 untuk nilai kekerasan menunjukkan pola yang serupa dengan uji tarik, di mana faktor temperatur memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap kekerasan material, dengan nilai $F = 4090.199$ dan $p < 0.001$. Hal ini menegaskan bahwa peningkatan temperatur *heat treatment* secara nyata mengubah kekerasan baja karbon. Faktor waktu tahan juga memiliki pengaruh signifikan dengan nilai $F = 162.844$ dan $p < 0.001$, yang menunjukkan bahwa lamanya waktu pemanasan turut memperkuat kontribusi proses perlakuan panas terhadap kenaikan nilai kekerasan. Sementara itu, interaksi antara temperatur dan waktu tahan menunjukkan nilai $F = 1.949$ dengan $p = 0.146$, yang berarti tidak terdapat interaksi signifikan antara kedua faktor tersebut. Dengan demikian, temperatur dan waktu tahan mempengaruhi kekerasan secara independen, dan perubahan nilai kekerasan terjadi tanpa adanya pengaruh bersama antara kedua variabel.

3. Uji ANOVA

Analisis ANOVA dilakukan untuk mengevaluasi apakah variasi temperatur heat treatment dan waktu tahan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik baja karbon, yaitu kekuatan tarik dan kekerasan (HV). ANOVA digunakan untuk memastikan bahwa perubahan nilai pada kedua pengujian tersebut benar-benar disebabkan oleh perlakuan panas yang diberikan, dan bukan terjadi secara acak. Hasil ANOVA pada Tabel 2 menunjukkan bahwa baik temperatur maupun waktu tahan memiliki nilai $p < 0.05$ pada uji tarik dan uji kekerasan, yang berarti keduanya memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan sifat mekanik material. Sementara itu, nilai p untuk interaksi antara temperatur dan waktu tahan lebih besar dari 0.05, sehingga dapat disimpulkan bahwa kedua faktor tersebut tidak saling berinteraksi dan memengaruhi sifat mekanik secara independen. Dengan demikian, ANOVA mengonfirmasi bahwa peningkatan sifat mekanik terutama disebabkan oleh pengaruh langsung dari temperatur dan lamanya waktu tahan selama proses *heat treatment*.

Tabel 2 ANOVA

No	Pengujian	Faktor	F	p
1	Uji Tarik	Temp	343.343	<.001
2	Uji Tarik	Waktu Tahan	11.797	<.001
3	Uji Tarik	Temp x Waktu Tahan	1.65	0.205
4	Uji Kekerasan	Temp	4090.199	<.001
5	Uji Kekerasan	Waktu Tahan	162.844	<.001
6	Uji Kekerasan	Temp x Waktu Tahan	1.949	0.146

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur austenisasi dan waktu tahan memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik baja karbon setelah proses heat treatment. Peningkatan temperatur dari 650°C menjadi 850°C secara konsisten meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan material, dengan nilai tertinggi diperoleh pada temperatur 850°C dan waktu tahan 90 menit, hal ini diduga akibat terbentuknya struktur martensit

yang lebih padat dan homogen setelah quenching. Waktu tahan juga berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik, meskipun pengaruhnya tidak sebesar temperatur. Analisis ANOVA dua arah mengonfirmasi bahwa baik temperatur maupun waktu tahan memiliki nilai $p < 0.05$ pada uji tarik dan uji kekerasan, sehingga keduanya terbukti berpengaruh signifikan dan bekerja secara independen tanpa interaksi antarvariabel. Secara keseluruhan, kombinasi temperatur 850°C dan waktu tahan 90 menit merupakan kondisi perlakuan panas yang paling optimal dalam meningkatkan performa mekanik baja karbon.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Andreas, "Analisa Pengaruh Media Pendingin pada Perlakuan Panas Terhadap Kekuatan Tarik Baja Aisi 1040," *PISTON*, vol. 6, no. 2, pp. 72–0, May 2022.

[2] D. Joko Purnomo, S. Jokosisworo, and U. Budiarto, "Analisa Pengaruh Holding Time Tempering Terhadap Kekerasan, Keuletan, Ketangguhan dan Struktur Mikro Pada Baja ST 70," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 07, no. 1, pp. 49–8, Jan. 2019, [Online]. Available: https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval.

[3] E. Nugroho, S. Dri Handono, Asroni, and Wahidin, "Pengaruh Temperatur dan Media Pendingin pada Proses Heat Treatment Baja AISI 1045 terhadap Kekerasan dan Laju Korosi," *TURBO: Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro*, vol. 8, no. 1, pp. 99–110, 2019.

[4] Erizal, "Kajian Eksperimen Pengujian Tarik Baja Karbon Medium yang Disambung dengan Las Smaw dan Quenching dengan Air Laut".

[5] G. A. Mukhrim, Jasman, H. Nurdin, Z. Abadi, and E. Indrawan, "Pengaruh Proses Quenching Terhadap Kekuatan Tarik Baja Karbon Sedang AISI 1045," *VOMEK*, vol. 4, no. 4, pp. 56–62, Nov. 2022, [Online]. Available: http://vomek.ppj.unp.ac.id.

[6] G. Gundara, "Karakteristik Kelelahan Baja Karbon S 45 C Dianil dengan Suhu 850 0 selama Satu Jam," *Al Jazari Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 25–28, 2016.

[7] Lestari, H. Purwanto, and M. Dzulfikar, "Analisis Sifat Mekanis Baja Karbon Menengah Akibat Proses Austenisasi Tempering," *Momentum*, vol. 17, no. 2, pp. 127–132, Oct. 2021.

[8] M. Andreansyah, R. Dewi Anjani, and V. Naubnome, "Pengaruh Proses Heat Treatment (Quenching dan Tempering) Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Baja Karbon Menengah," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. IX, no. 1, pp. 7864–7872, Jan. 2024.

[9] M. Rahman and F. Kurniawan, "Analisa Kekuatan Material Bahan Carbon Steel AISI 1018 dan Baja Tulangan Polos SNI P40 Sebagai Angkur Pada Tower dengan Metode Uji Tarik," *Buletin Utama Teknik*, vol. 17, no. 3, p. 291, May 2022.

[10] M. Rizal Afandi and A. Akbar, "Pengaruh Variasi Kadar Karbon Baja Terhadap Kekuatan Tarik," *Prosiding SEMNAS INOTEK*, vol. 9, pp. 2549–7952, 2025.

[11] Margono, B. H. Priyambodo, and K. C. Nugroho, "Pengaruh Laju Pendingin Pada Proses Heat Treatment Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Baja Karbon S45C," *Jurnal Creative Research in Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 60–66, Jul. 2021.

[12] T. J. Saktisahdan, U. Asahan, J. J. A. Yani, T. / Fax, and P. T. Mesin, "Pengaruh Proses Heat Treatment Terhadap Perubahan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah," *Jurnal Laminar*, vol. 1, no. 1, pp. 28–33, Dec. 2019.

[13] W. Pebrianto, Mashudi, and J. Wayan Dika, "Analisa Pengaruh Variasi Media Pendingin Air Es Dan Air Garam Terhadap Uji Tarik Pada Sambungan Las Baja ST 37," *JSNu : Journal of Science Nusantara*, vol. 1, no. 2, pp. 36–46, Dec. 2021.