ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR, WAKTU TAHAN DAN METODE PENDINGINAN TERHADAP SIFAT MEKANIK BAJA KARBON RENDAH PADA PROSES *HEAT TREATMENT*

Anwar T. [1], Corvis L. Rantererung [1], Yafet Bontong [2], Muhammad Aris Kastian [3]

[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 Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Toraja

Jl. Jenderal Sudirman No. 9, Bombongan, Kec. Makale Kab. Tana Toraja, Sulawes Selatan, 91811

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

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

anwarthr@gmail.com [1]

Abstrak

Baja karbon rendah ST37 banyak digunakan dalam industri, namun sifat mekaniknya yang terbatas perlu ditingkatkan melalui perlakuan panas. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh temperatur austenitisasi (750°C, 800°C, 850°C) dan metode pendinginan (quenching air dan tempering pada 400°C selama 60 menit) terhadap kekuatan tarik, energi impak, dan kekerasan baja ST37, serta signifikansinya berdasarkan analisis ANOVA. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan temperatur austenitisasi meningkatkan kekuatan tarik hingga 624 MPa dan kekerasan hingga 190 HV pada kondisi quenching, sedangkan tempering memberikan ketangguhan yang lebih tinggi dengan energi impak mencapai 88 J. Analisis ANOVA mengonfirmasi bahwa temperatur dan metode pendinginan berpengaruh signifikan terhadap seluruh sifat mekanik ($p < 0,05$), sementara interaksi keduanya hanya signifikan pada energi impak. Secara keseluruhan, perlakuan panas pada temperatur tinggi diikuti oleh tempering menghasilkan kombinasi sifat mekanik yang lebih seimbang untuk aplikasi struktural baja karbon rendah ST37.

Kata kunci : baja karbon rendah; perlakuan panas; quenching; tempering.

ABSTRACT

ST37 low-carbon steel is widely used in industry, but its limited mechanical properties need to be improved through heat treatment. This study evaluates the effect of austenitizing temperatures (750°C, 800°C, 850°C) and cooling methods (water quenching and tempering at 400°C–60 minutes) on the tensile strength, impact energy, and hardness of ST37 steel, as well as their significance based on ANOVA analysis. The results show that increasing the austenitizing temperature increases the tensile strength up to 624 MPa and hardness up to 190 HV in the quenching condition, while tempering provides higher toughness with impact energy reaching 88 J. ANOVA analysis confirms that temperature and cooling methods have a significant effect on all mechanical properties ($p < 0.05$), while their interaction is only significant for impact energy. Overall, heat treatment at high temperatures followed by tempering produces a more balanced combination of mechanical properties for structural applications of ST37 low-carbon steel.

Key words **:** *low carbon steel; heat treatment; quenching; tempering.*

PENDAHULUAN

Baja karbon rendah banyak digunakan dalam bidang manufaktur, otomotif, dan konstruksi karena sifatnya yang mudah dibentuk, memiliki kemampuan las yang baik, serta biaya produksinya yang relatif rendah [1], [2]. Namun demikian, sifat dasar baja karbon rendah yang cenderung lunak dan memiliki ketangguhan tinggi sering kali tidak mencukupi untuk aplikasi yang membutuhkan kekerasan, ketahanan terhadap keausan, maupun ketahanan terhadap beban kejut yang lebih tinggi. Oleh karena itu, proses perlakuan panas (*heat treatment*) menjadi langkah penting untuk memodifikasi mikrostruktur dan meningkatkan sifat mekaniknya [3], [4], [5].

Proses *heat treatment* umumnya melibatkan pemanasan baja hingga mencapai temperatur austenitisasi, ditahan pada waktu tertentu untuk mencapai homogenisasi difusi karbon, kemudian didinginkan menggunakan metode pendingin tertentu [6]. Variasi temperatur, waktu tahan, dan laju pendinginan sangat berpengaruh terhadap transformasi fasa dari *austenit* menjadi *ferrit, perlit, bainit,* maupun *martensit*, yang selanjutnya menentukan perilaku mekanik material tersebut [7], [8]. Berbagai penelitian menyatakan bahwa penggunaan media pendingin seperti air, minyak, udara, air garam, solar, maupun coolant akan menghasilkan tingkat pendinginan yang berbeda sehingga berdampak langsung pada kekerasan, ketangguhan impak, serta penyempurnaan mikrostruktur baja [9], [10]. Pendinginan cepat cenderung membentuk *martensit* yang keras tetapi rapuh, sementara pendinginan lebih lambat menghasilkan mikrostruktur campuran yang memberikan kompromi antara kekuatan dan keuletan [11].

Selain metode pendingin, temperatur pemanasan berperan besar terhadap kestabilan *austenit* dan mekanisme transformasi fasa. Peningkatan temperatur dari 700°C hingga di atas 850°C terbukti meningkatkan kelarutan karbon dalam matriks *austenit* dan mempercepat kinetika transformasi, sehingga meningkatkan kekerasan; namun temperatur yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan pertumbuhan butir dan menurunkan ketangguhan [12]. Waktu tahan yang konstan memungkinkan mikrostruktur mencapai kesetimbangan termal sebelum proses *quenching* dilakukan, sehingga distribusi fasa lebih homogen [4], [6].

Meskipun banyak penelitian telah membahas pengaruh variasi temperatur atau variasi metode pendinginan terhadap baja karbon rendah dan baja karbon sedang, masih terbatasnya penelitian yang secara simultan menguji kombinasi tiga variasi temperatur (750°C, 800°C, 850°C), waktu tahan konstan 60 menit, serta dua kategori metode pendinginan (air dan *tempering*) melalui pengujian mekanik yang lengkap berupa uji tarik, uji kekerasan, dan uji impak. Pendekatan terpadu ini penting karena interaksi antara temperatur dan laju pendinginan dapat menghasilkan gradien mikrostruktur yang kompleks dan berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik material.

Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur pemanasan, waktu tahan konstan, serta perbedaan metode pendingin terhadap sifat mekanik baja karbon rendah. Hasil penelitian diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan struktur–sifat pada baja yang mengalami perlakuan panas serta memberikan rekomendasi parameter optimasi untuk aplikasi industri.

METODE PENELITIAN

1. Persiapan Material

Material baja karbon yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ST37 yang memiliki kadar karbon maksimum sebesar 0,17% dan mangan maksimum sebesar 1,40%, sehingga tergolong sebagai baja karbon rendah (*low carbon steel*). Material berbentuk batang komersial kemudian dipotong menjadi beberapa spesimen sesuai standar pengujian mekanik. Proses perlakuan panas dimulai dengan tahap austenitisasi. Seluruh spesimen dipanaskan di dalam *furnace* listrik hingga mencapai tiga level temperatur, yaitu 750°C, 800°C, dan 850°C. Setelah mencapai temperatur yang ditetapkan, spesimen dipertahankan selama 60 menit untuk memastikan terjadi difusi karbon yang merata dan pembentukan struktur austenit yang homogen.

Usai waktu tahan terpenuhi, spesimen segera dikeluarkan dari *furnace* dan dilakukan pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan media air pada suhu kamar. Pendinginan cepat ini bertujuan mengubah struktur *austenit* menjadi *martensit* sehingga meningkatkan kekerasan dan kekuatan material.

Untuk spesimen *tempering*, perlakuan dilakukan setelah proses *quenching*. Semua spesimen yang dipilih kemudian dipanaskan kembali pada temperatur 400 °C selama 60 menit di dalam *furnace*. Tahap *tempering* ini bertujuan menurunkan tegangan internal akibat *quenching*, menstabilkan struktur *martensit* melalui pembentukan karbida

halus, serta meningkatkan keuletan material tanpa menurunkan kekerasan secara signifikan.

Rangkuman parameter perlakuan panas serta jenis pengujian yang dilakukan ditunjukkan pada Tabel 1. penulisannya seperti pada tabel 1.

Tabel 1 Parameter perlakuan panas dan jenis pengujian

No	Temp.	Waktu Tahan (menit)	Metode Pendingin
1	750	60	Air
2	750	60	*Tempering*
3	800	60	Air
4	800	60	*Tempering*
5	850	60	Air
6	850	60	*Tempering*

2. Uji Tarik

Uji tarik dilakukan untuk memperoleh nilai kekuatan tarik maksimum dari setiap spesimen pasca perlakuan panas. Pengujian dilakukan menggunakan Galdabini *Tensile Testing Machine* sesuai standar ASTM E8 hingga spesimen mengalami patah. Pada setiap variasi perlakuan digunakan sebanyak 3 spesimen uji. Nilai *tensile strength* dihitung menggunakan rumus.

dengan bentuk sebagai berikut:

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

di mana, TS merupakan kekuatan tarik (MPa), Fmax merupakan beban maksimum yang diterima spesimen (N), dan A merupakan luas penampang awal spesimen (mm²).

3. Uji Kekerasan *Vickers*

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *Vickers* sesuai standar ASTM E92 menggunakan alat uji kekerasan Vickers merek 402MVDS. Pengujian dilakukan dengan menekan indenter berbentuk piramida berlian pada permukaan spesimen, kemudian panjang diagonal jejak indentasi diukur untuk menentukan nilai kekerasan. Pada setiap variasi perlakuan digunakan sebanyak 3 spesimen uji dan pengukuran dilakukan pada tiga titik berbeda, kemudian dirata-ratakan.

4. Uji Impak

Ketangguhan material dievaluasi melalui pengujian impak metode Charpy sesuai standar ASTM E23. Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji impak MJB-W300B untuk mengukur energi serapan saat pendulum mematahkan spesimen. Pada setiap variasi perlakuan digunakan sebanyak 3 spesimen uji.

5. Analisis Statistik

Seluruh data sifat mekanik (kekuatan tarik, kekerasan, dan ketangguhan impak) dianalisis menggunakan metode *two-way Analysis of Variance* (ANOVA) pada tingkat signifikansi 0.05. Metode ini digunakan untuk menilai apakah perbedaan temperatur austenitisasi dan jenis metode pendinginan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan sifat mekanik. Jika terdapat perbedaan signifikan, analisis lanjutan direncanakan untuk mengidentifikasi pasangan perlakuan yang memiliki pengaruh paling dominan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Uji Tarik

Gambar 1 menunjukkan perubahan nilai kekuatan tarik baja karbon rendah ST37 pada tiga temperatur austenitisasi, yakni 750°C, 800°C, dan 850°C, masing-masing dengan dua kondisi perlakuan panas: *quenching* dan *tempering*. Secara umum, peningkatan temperatur austenitisasi menghasilkan peningkatan *tensile strength* untuk kedua metode perlakuan panas tersebut.

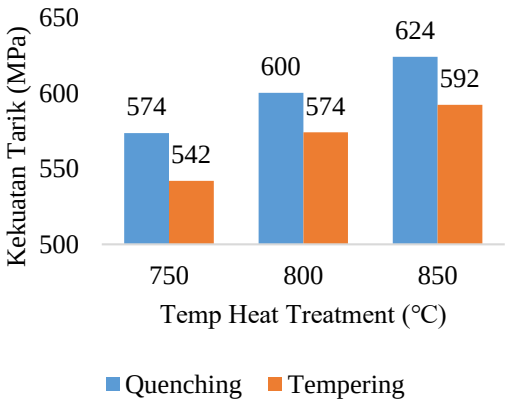
Pada kondisi *quenching*, kekuatan tarik meningkat dari 574 MPa pada 750°C menjadi 600 MPa pada 800°C, dan mencapai nilai tertinggi 624 MPa pada 850°C. Tren serupa juga terlihat pada kondisi *tempering* (400°C, 60 menit), di mana *tensile strength* bertambah dari 542 MPa pada 750°C menjadi 574 MPa pada 800°C, dan mencapai 592 MPa pada 850°C.

Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur austenitisasi, semakin homogen larutan padat *austenit* yang terbentuk sebelum pendinginan. *Austenit* yang lebih seragam mempermudah transformasi menjadi *martensit* selama *quenching*, sehingga menghasilkan peningkatan kekuatan tarik. Pada 850 °C, kondisi austenitisasi baja ST37 telah cukup untuk menghasilkan *martensit* dengan densitas dislokasi tinggi yang berkontribusi langsung terhadap kenaikan *tensile strength*. Hal ini sejalan dengan hasil temuan yang dilakukan oleh Lestari et al., [13], peningkatan temperatur austenitisasi memperbaiki homogenitas *austenit* dan memperkuat mekanisme pembentukan *martensit* sehingga menghasilkan kenaikan kekuatan tarik yang signifikan.

Perbedaan nilai *tensile strength* antara sampel *quenching* dan *tempering* juga sesuai dengan karakteristik metalurgi baja karbon rendah. Pada *tempering* 400°C, sebagian *martensit* mengalami proses pelunakan melalui pengendapan karbida halus, sehingga kekuatan tarik sedikit menurun dibandingkan dengan kondisi *quench*, meskipun

peningkatannya terhadap temperatur austenitisasi tetap terjadi.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa temperatur austenitisasi merupakan faktor dominan yang memengaruhi peningkatan *tensile strength* baja ST37, baik pada kondisi *quenching* maupun *tempering*. *Quenching* memberikan nilai kekuatan tarik tertinggi melalui pembentukan *martensit*, sedangkan *tempering* menghasilkan kombinasi nilai kekuatan dan keuletan yang lebih seimbang.



Gambar 1 Kekuatan Tarik

2. Uji Impak

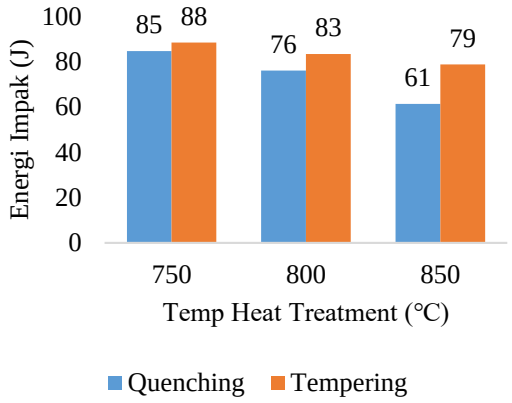
Gambar 2 memperlihatkan perubahan energi impak baja karbon rendah ST37 pada tiga temperatur austenisasi (750°C, 800°C, dan 850°C) untuk dua kondisi perlakuan, yaitu *quenching* dan *tempering*. Secara umum, terlihat bahwa proses tempering memberikan nilai ketangguhan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *quenching* pada seluruh temperatur pemanasan.

Pada temperatur 750°C, energi impak spesimen *quenching* sebesar 85 J, sedangkan sampel *tempering* sedikit lebih tinggi, yaitu 88 J. Peningkatan ini menunjukkan bahwa proses *tempering* pada 400°C mampu menurunkan tegangan internal yang terbentuk akibat pendinginan cepat, sehingga struktur mikro menjadi lebih stabil dan mampu menyerap energi benturan dengan lebih baik.

Ketika temperatur dinaikkan menjadi 800°C, energi impak *quenching* menurun menjadi 76 J, sedangkan energi impak *tempering* meningkat menjadi 83 J. Penurunan energi impak pada *quenching* ini mengindikasikan bahwa pembentukan *martensit* yang lebih dominan membuat material menjadi lebih getas. Sebaliknya, *tempering* berhasil mengubah sebagian *martensit* menjadi struktur yang lebih ulet melalui presipitasi karbida halus yang mengurangi kerapuhan.

Pada temperatur tertinggi 850 °C, perbedaan kedua perlakuan menjadi semakin jelas. Energi impak *quenching* turun secara signifikan hingga 61 J, sedangkan energi *tempering* meningkat menjadi 79 J. Nilai impak *quenching* yang rendah ini menunjukkan bahwa temperatur austenisasi tinggi menghasilkan *martensit* kasar dengan densitas dislokasi besar yang menyebabkan material semakin rapuh. Proses *tempering* kembali memperbaiki ketangguhan dengan mengurangi kerapuhan dan menghaluskan struktur mikro.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur austenisasi cenderung menurunkan ketangguhan pada proses *quenching*, tetapi meningkatkan ketangguhan setelah *tempering*. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Darmawan [9], *martensit* yang terbentuk pada temperatur austenitisasi tinggi cenderung bersifat lebih getas. Kondisi tersebut menyebabkan kemampuan material dalam menyerap energi kejut menurun sehingga nilai energi impak mengalami penurunan. Selain itu, peningkatan temperatur austenitisasi juga dapat menyebabkan pertumbuhan butir yang lebih besar sehingga retakan lebih mudah terjadi dan merambat saat pengujian impak dilakukan.



Gambar 2 Energi Impak

3. Uji Kekerasan

Gambar 3 memperlihatkan perubahan nilai kekerasan baja karbon rendah ST37 pada tiga temperatur austenisasi, yaitu 750°C, 800°C, dan 850°C, masing-masing diuji untuk dua kondisi perlakuan panas: *quenching* dan *tempering*. Secara umum, grafik menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pemanasan memberikan kecenderungan naik terhadap nilai kekerasan, baik pada kondisi *quench* maupun *temper*. Namun, sampel hasil

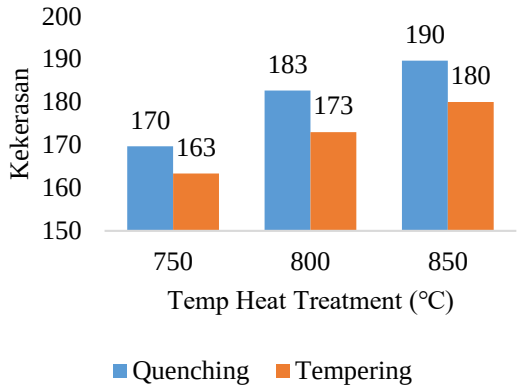
quenching secara konsisten memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel *temper* pada setiap variasi temperatur.

Pada temperatur 750°C, kekerasan material mencapai 170 HV untuk sampel *quenching*, sedangkan pada kondisi *tempering* nilainya sedikit lebih rendah, yaitu 163 HV. Ketika temperatur dinaikkan menjadi 800°C, nilai kekerasan meningkat menjadi 183 HV pada *quenching* dan 173 HV pada *tempering*. Peningkatan kemudian terjadi pada 850 °C, di mana kekerasan mencapai 190 HV pada spesimen *quenching* dan 180 HV pada spesimen *temper*.

Pola peningkatan ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi temperatur austenisasi, semakin besar difusi karbon yang terjadi di dalam fasa *austenit*. Pada saat pendinginan cepat (*quenching*), larutan padat *austenit* yang kaya karbon berubah menjadi *martensit* yang keras dan bersifat supersaturasi. Transformasi ini berkontribusi langsung terhadap meningkatnya nilai kekerasan. Pada kondisi *tempering*, sebagian *martensit* mengalami reorientasi struktur melalui presipitasi karbida halus dan relaksasi tegangan internal, sehingga kekerasannya sedikit menurun dibandingkan dengan *quenching*, tetapi tetap lebih tinggi dibandingkan dengan material tanpa perlakuan.

Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Lestari et al., [13], kenaikan temperatur austenisasi meningkatkan homogenitas *austenit* dan memperbesar peluang terbentuknya martensit saat pendinginan cepat.

Secara keseluruhan, tren yang muncul menunjukkan bahwa temperatur austenisasi memiliki peran dominan dalam penguatan material melalui pembentukan *martensit*. Sementara itu, perlakuan *tempering* pada 400°C selama 60 menit tetap mempertahankan sebagian sifat keras *martensit*, namun memberikan kombinasi kekerasan dan keuletan yang lebih seimbang dibandingkan dengan kondisi *quenching*. Temuan ini menegaskan bahwa interaksi antara temperatur pemanasan dan perlakuan akhir sangat menentukan karakter kekerasan pada baja karbon rendah ST37.



Gambar 3 Kekerasan (HV)

6. ANOVA

Hasil analisis ANOVA pada Tabel 2 menunjukkan bahwa temperatur austenitisasi dan metode pendinginan memberikan pengaruh signifikan terhadap seluruh sifat mekanik yang diuji, yaitu kekuatan tarik, energi impak, dan kekerasan baja karbon ST37. Pada uji tarik dan kekerasan, baik temperatur maupun metode pendinginan berpengaruh nyata ($p < 0,05$), sementara interaksi keduanya tidak signifikan, menandakan bahwa pola peningkatan sifat mekanik akibat temperatur berlangsung konsisten pada *quenching* maupun *tempering*. Sebaliknya, pada uji impak, seluruh variabel termasuk interaksi temperatur × metode pendinginan signifikan ($p < 0,001$), yang menunjukkan bahwa perubahan temperatur memberikan respons ketangguhan yang berbeda antara kedua metode pendinginan. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa temperatur pemanasan merupakan faktor dominan dalam memodifikasi sifat mekanik baja, sedangkan metode pendinginan menentukan arah perubahan sifat secara spesifik, terutama pada ketangguhan material.

Tabel 2 ANOVA

No	Pengujian	Faktor	F	p
1	Uji Tarik	Temp	10.654	0.002
2	Uji Tarik	Metode Pendinginan	18.039	0.001
3	Uji Tarik	Temp x Metode Pendinginan	0.273	0.766
4	Uji Impak	Temp	86.31	<0.001
5	Uji Impak	Metode Pendinginan	84.01	<0.001
6	Uji Impak	Temp x Metode Pendinginan	15.71	<0.001

No	Pengujian	Faktor	F	p
7	Uji Kekerasan	Temp	41.453	<0.001
8	Uji Kekerasan	Metode Pendinginan	26.587	<0.001
9	Uji Kekerasan	Temp x Metode Pendinginan	0.448	0.649

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan panas memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik baja karbon rendah ST37. Peningkatan temperatur austenitisasi dari 750°C hingga 850°C menghasilkan kenaikan kekuatan tarik, kekerasan, dan perubahan energi impak yang konsisten dengan mekanisme transformasi fasa pada baja karbon. Proses *quenching* menghasilkan nilai kekuatan tarik dan kekerasan tertinggi karena terbentuknya *martensit* dengan densitas dislokasi tinggi, namun menurunkan ketangguhan material. Sebaliknya, proses *tempering* pada 400 °C selama 60 menit meningkatkan ketangguhan secara signifikan melalui pembentukan *tempered martensite* dan presipitasi karbida halus. Analisis ANOVA menunjukkan bahwa temperatur austenitisasi dan metode pendinginan berpengaruh signifikan terhadap seluruh sifat mekanik, sedangkan interaksi kedua faktor hanya berpengaruh pada energi impak. Secara keseluruhan, kombinasi temperatur austenitisasi tinggi dan proses *tempering* terbukti memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan dan keuletan, sehingga direkomendasikan untuk aplikasi yang membutuhkan performa mekanik optimal.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Mersilia, P. K. Karo, D. Yayat, and I. Supriyatna, "Pengaruh Heat Treatment Dengan Variasi Media Quenching Air Garam dan Oli Terhadap Struktur Mikro dan Nilai Kekerasan Baja Pegas Daun AISI 6135," *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, vol. 4, no. 02, pp. 175–180, Jul. 2016.

[2] A. Prayogi and Suhardiman, "Analisa Pengaruh Variasi Media Pendingin Pada Perlakuan Panas Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah," *Jurnal Polimesin*, vol. 17, no. 2, pp. 29–36, Aug. 2019.

[3] Basori and A. Iswandi, "Fenomena Kekerasan, Impak, dan Struktur Mikro Baja 0.074 Wt.% Karbon Pasca Quenching Coolant," *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 7, no. 1, pp. 35–41, Jan. 2022.

[4] D. Darmawan, "Pengujian Ketangguhan dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah yang telah Mengalami Proses Perlakuan Panas (Heat Treatment)," *Jurnal Teknik Mesin UBL*, vol. 5, no. 2, pp. 5–8, Apr. 2018, [Online]. Available: http://jurnal.ubl.ac.id/index.php/JTM.

[5] E. Gunawan, "Analisa Pengaruh Temperatur Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Pada Baja Karbon Rendah (St41) dengan Metode Pack Carbirizing," *Teknika: Engineering and Sains Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 117–124, Dec. 2017.

[6] 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, Accessed: Nov. 24, 2025. [Online]. Available: https://ojs.ummetro.ac.id/index.php/turbo.

[7] H. Nur, A. Siti Nurrohkayati, A. Nugroho, U. H. Muhammadiyah Kalimantan Timur Jl Ir Juanda No, and K. Timur, "Pengaruh Variasi Temperatur Pemanasan Terhadap Kekuatan Impact Baja Karbon Per-Daun Jis G 4801 Sup9," *Journal Technology Urgency Breakthrough in Engineering*, vol. 1, no. 1, p. 2023, 2023.

[8] H. Purwanto, "Analisa Quenching Pada Baja Karbon Rendah dengan Media Solar," *Momentum*, vol. 7, no. 1, pp. 36–40, Apr. 2011.

[9] Lelawati, "Pengaruh Pemanasan dan Quenching dengan Air Laut Terhadap Struktur Mikro Baja Karbon Sedang," *Jurnal Redoks*, vol. 7, no. 1, pp. 62–70, Jan. 2022, doi: doi.org/10.31851/redoks.v7i1.8148.

[10] M. Sidiq, W. Galuh, O. H. Hendra, and S. Luthfianto, "Perlakuan Panas Bertingkat sebagai Upaya Meningkatkan Kekuatan Mekanik Baja Karbon Rendah," *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 11, no. 1, pp. 117–124, Apr. 2022, doi: 10.23887/jst-undiksha.v11i1.

[11] N. 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.

[12] P. Lanyo, G. Lubis, and M. Ivanto, "Analisis Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Perubahan Nilai Kekerasan Baja Karbon AISI 1044," *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin (JTRAIN)*, vol. 6, no. 2, pp. 63–70, 2025.

[13] Z. Zaidi and Suhardiman, "Analisis Annealing dan Turning Terhadap Nilai Kekasaran Baja Karbon," *Jurnal Ilmu Teknik*, vol. 2, no. 1, pp. 35–46, Oct. 2024, doi: 10.62017/tektonik.