

## **Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Parameter Perlakuan Panas terhadap Kekerasan Baja Tulangan Polos BJTP280**

**Imam Rudi Sugara<sup>1\*</sup>, Dwi Wahyu Hardiyanto<sup>2</sup>, Faizah Ali<sup>3</sup>, Elvira Wahyu Arum Fanani<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jember, Indonesia

Email: <sup>1</sup>irsugara@unej.ac.id

### **Abstract**

*The construction and manufacturing industries require materials with optimal mechanical properties, particularly hardness and toughness. BJTP280 structural steel, classified as low-carbon steel, has the potential to enhance its mechanical properties through heat treatment. This study aims to analyze the effect of variations in austenitizing temperature, holding time, and cooling medium on the hardness and microstructure of the steel. Specimens measuring 10 × 8 mm were heated at temperatures of 750°C, 800°C, and 850°C with holding times of 60, 90, and 120 minutes, followed by cooling in air, oil, and water. Hardness tests were conducted using the Brinell method, while the microstructure was observed with an optical microscope. The results showed that the cooling medium had a significant effect. The highest hardness values were obtained with water quenching at 178 HB, oil quenching at 174 HB, and air cooling at 144 HB. Hardness tended to decrease with increasing holding time due to austenite grain growth. An austenitizing temperature of 800°C produced the optimum condition with the highest hardness value, while 850°C resulted in lower hardness because of excessively coarse grain structures. In conclusion, the best heat treatment was achieved at 800°C, water quenching, and a holding time of 60 minutes.*

**Keywords:** Heat Treatment, Brinell Hardness, BJTP280 Structural Steel, Microstructure.

### **Abstrak**

Industri konstruksi dan manufaktur membutuhkan material dengan sifat mekanik optimal, khususnya kekerasan dan ketangguhan. Baja BJTP280 merupakan baja karbon rendah yang potensial ditingkatkan sifat mekaniknya melalui perlakuan panas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi suhu austenisasi, waktu tahan, dan media pendingin terhadap kekerasan serta mikrostruktur baja. Spesimen baja berukuran 10 × 8 mm dipanaskan pada suhu 750°C, 800°C, dan 850°C dengan variasi waktu tahan 60, 90, dan 120 menit, kemudian didinginkan menggunakan udara, oli, dan air. Uji kekerasan dilakukan dengan metode Brinell, sedangkan struktur mikro diamati menggunakan mikroskop optik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa media pendingin memberikan pengaruh signifikan. Nilai kekerasan yang paling tinggi terjadi pada pendinginan air 178 HB, penginginan oli 174 HB, dan pendinginan udara 144 HB. Kekerasan cenderung menurun seiring bertambahnya waktu tahan yang diakibatkan adanya pertumbuhan butir austenit. Suhu austenisasi 800°C menghasilkan kondisi optimum dengan nilai kekerasan tertinggi, sementara 850°C menurunkan kekerasan karena struktur butir terlalu kasar. Kesimpulannya, perlakuan panas terbaik diperoleh pada suhu 800°C, pendinginan air, dan waktu tahan 60 menit.

**Kata Kunci:** Perlakuan Panas, Kekerasan Brinell, Baja BJTP280, Mikrostruktur.

## **1. PENDAHULUAN**

Industri konstruksi dan manufaktur membutuhkan material dengan sifat mekanik yang optimal seperti kekuatan, kekerasan, dan keuletan agar mampu menahan beban dan kondisi kerja yang berat. Baja menjadi pilihan utama karena ketersediaannya melimpah serta sifatnya dapat dimodifikasi melalui perlakuan panas. Proses ini mengubah struktur mikro baja dan memungkinkan peningkatan sifat mekanik sesuai kebutuhan. Baja BJTP280 merupakan baja karbon rendah dengan mutu signifikan yang banyak digunakan

dalam konstruksi dan aplikasi struktural. Baja ini mengandung sekitar 0,25% karbon serta unsur paduan lain seperti Mn, Si, P, dan S. Karakteristik mekaniknya dapat dimodifikasi secara signifikan melalui perlakuan panas, sehingga material ini sangat relevan untuk dikaji dalam konteks pengaruh parameter perlakuan panas terhadap sifat mekanis. Perlakuan panas diketahui mampu memodifikasi sifat mekanik baja sekaligus menginduksi perubahan fasa pada struktur mikro (Dubey et al., 2020; Mashhadikarimi et al., 2025). Proses ini umumnya ditujukan untuk meningkatkan kekerasan, kekuatan, maupun keuletan, sehingga kombinasi sifat unggul dapat diperoleh sesuai kebutuhan aplikasi. Parameter utama yang berperan dalam perlakuan panas meliputi suhu pemanasan, waktu penahanan, dan laju pendinginan yang masing-masing berpengaruh terhadap hasil akhir sifat mekanis (Jovičević-Klug et al., 2022); Saktisahdan et al., 2019). Oleh karena itu, penting untuk menelaah secara sistematis bagaimana variasi parameter tersebut memengaruhi karakteristik baja, sebagaimana telah ditunjukkan pada berbagai penelitian terdahulu mengenai baja sejenis.

Berbagai penelitian mengenai baja karbon rendah maupun baja paduan menunjukkan bahwa perlakuan panas berperan penting dalam memodifikasi sifat mekaniknya. Penelitian yang dilakukan oleh Hasil et al., (2019) melaporkan bahwa perlakuan normalizing pada baja SS400 hasil las SMAW mempengaruhi kekuatan tarik, tekuk, serta struktur mikro, di mana suhu 900°C menghasilkan sifat mekanik lebih baik dibandingkan 975°C. Nugroho et al., (2025) menyoroti bahwa pada baja ST40 menggunakan proses quenching mampu meningkatkan kekuatan tarik dibanding annealing meskipun keuletan material cenderung menurun. Pada penelitian lain menerangkan bahwa perlakuan *hardening* dengan media pendingin air garam menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi daripada oli, serta kenaikan suhu pemanasan juga berbanding lurus dengan peningkatan kekerasan (Nurlina et al., 2019). Hakim et al., (2023) menyimpulkan bahwa perlakuan panas quenching pada baja karbon rendah berpengaruh terhadap laju permesinan, dimana peningkatan suhu perlakuan panas menurunkan kecepatan drilling secara signifikan. Sementara itu, Irmaya et al., (2020) menyoroti aspek ketahanan lingkungan dengan menunjukkan bahwa baja karbon rendah hasil las yang diberi perlakuan panas tetap rentan mengalami korosi dalam media air laut, dengan laju korosi meningkat seiring lamanya perendaman. Sintesis dari berbagai studi tersebut menegaskan bahwa meskipun perlakuan panas mampu meningkatkan sifat tertentu seperti kekerasan atau kekuatan tarik, terdapat *trade-off* berupa penurunan keuletan, kecepatan permesinan, maupun ketahanan korosi. Sehingga pemilihan metode perlakuan panas harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi spesifik material.

Selain itu, beberapa penelitian juga menyoroti perlakuan panas pada baja melalui pendekatan yang lebih spesifik. Pada penelitian sebelumnya menggunakan metode *flame hardening* pada baja ST40 dengan berbagai media pendingin dan menemukan bahwa pendinginan menggunakan air garam dan air tawar mampu menghasilkan nilai kekerasan permukaan lebih tinggi dibandingkan oli (Anzarih & Dullah, 2017). Saefuloh et al., (2021) mengkaji lapisan *electroless* Ni-P pada baja ASTM A36 dengan variasi kecepatan pengadukan dan perlakuan panas, hasilnya menunjukkan bahwa perlakuan panas mampu menurunkan laju korosi secara signifikan meskipun tidak terlalu memengaruhi nilai kekerasan. Penelitian lainnya menerangkan bahwa pada baja martensitik AISI 420 menunjukkan bahwa quenching mampu meningkatkan kekerasan hingga 551 kg/mm<sup>2</sup> dan menurunkan laju korosi, sedangkan tempering pada 300°C justru menurunkan kekerasan karena terbentuknya karbida berukuran besar (Anggoro et al., 2017). Selain itu, pada proses *pack carburizing* dengan kalsium karbonat dan batubara sub-bituminous pada baja AISI 3115 yang diikuti quenching dapat meningkatkan kandungan karbon dan menghasilkan kekerasan serta ketahanan aus yang lebih tinggi dengan kondisi optimal

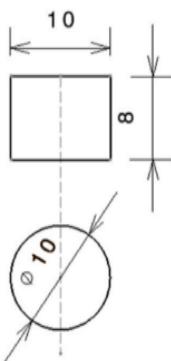
pada suhu 850–950°C (Satria et al., 2019). Sintesis dari temuan-temuan ini menunjukkan bahwa baik metode pengerasan permukaan sederhana, pelapisan, quenching, tempering, maupun karburisasi, semuanya memberikan kontribusi berbeda terhadap sifat mekanik dan ketahanan korosi baja. Sehingga pemilihan metode harus mempertimbangkan keseimbangan antara kekerasan, keuletan, dan ketahanan lingkungan sesuai kebutuhan aplikasinya.

Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa perlakuan panas mampu meningkatkan sifat mekanik maupun ketahanan korosi baja, sebagian besar kajian berfokus pada baja jenis tertentu seperti SS400, ST40, ASTM A36, AISI 420, atau AISI 3115, dengan kondisi eksperimen yang berbeda-beda. Kajian yang secara khusus menganalisis baja BJTP280 masih sangat terbatas, terutama terkait pengaruh kombinasi variasi suhu dan waktu tahan perlakuan panas terhadap nilai kekerasannya. Padahal, parameter tersebut berperan penting dalam mengendalikan transformasi mikrostruktur baja yang pada gilirannya menentukan performa mekanik untuk aplikasi industri. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menganalisis secara sistematis bagaimana variasi suhu dan waktu tahan memengaruhi kekerasan baja BJTP280. Sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah sekaligus praktis bagi penerapan material ini pada kebutuhan teknik dan manufaktur.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Persiapan Spesimen

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja BJTP280 yang termasuk baja karbon rendah dengan aplikasi luas di bidang konstruksi. Batang baja dipotong menjadi ukuran seragam  $10 \times 8$  mm sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Pemilihan dimensi tersebut dipertimbangkan agar memudahkan proses perlakuan panas dalam furnace, sekaligus memastikan spesimen dapat diuji secara konsisten pada pengujian kekerasan dan diamati secara detail pada analisis mikrostruktur. Seluruh rangkaian penelitian dilaksanakan di Laboratorium Manufaktur dan Laboratorium Uji Material, Fakultas Teknik, Universitas Jember.



Gambar 1. Dimensi Spesimen Uji (Mudda et al., 2025)

Untuk melengkapi karakterisasi material, komposisi kimia baja BJTP280 mengacu pada standar SNI 07-2052-2002, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Kandungan karbon sekitar 0,25% menegaskan bahwa baja ini termasuk kategori baja karbon rendah.

Tabel 1. Komposisi kimia baja BJTP280 menurut SNI 07-2052-2002

Unsur	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P maks (%)	S maks (%)
Nilai	$\leq 0,25$	$\leq 1,60$	$\leq 0,30$	$\leq 0,050$	$\leq 0,050$

## 2.2 Perlakuan Panas

Perlakuan panas pada penelitian ini dilakukan dengan memanaskan spesimen menggunakan furnace listrik pada tiga variasi suhu austenisasi yaitu 750°C, 800°C, dan 850°C, dengan tiga variasi waktu tahan masing-masing 60, 90, dan 120 menit untuk memastikan homogenisasi fasa austenit. Setelah mencapai suhu dan waktu tahan yang ditentukan, spesimen kemudian didinginkan menggunakan tiga media pendingin berbeda yaitu air, oli, dan udara. Pendinginan cepat dengan air diharapkan menghasilkan martensit dominan, pendinginan sedang dengan oli membentuk campuran martensit-perlit halus, sedangkan pendinginan lambat dengan udara memunculkan struktur ferit-perlit kasar.

Sebelum dilakukan pengamatan mikrostruktur, setiap spesimen dimounting dengan resin untuk memudahkan proses preparasi metalografi. Permukaan spesimen digosok secara bertahap menggunakan kertas amplas mulai dari gradasi 150 hingga 2000, kemudian dipoles menggunakan autosol hingga mencapai permukaan cermin yang ideal untuk observasi. Tahap akhir berupa proses etsa menggunakan larutan nital  $\text{HNO}_3$  dan etanol 98% yang bertujuan memperlihatkan batas butir dan fasa mikrostruktur. Gambar 2 memperlihatkan permukaan spesimen setelah proses poles dan etsa.



Gambar 2. Spesimen uji

## 2.3 Pengujian Kekerasan Brinell

Pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode Brinell yang mengacu pada standar ASTM E10. Setiap spesimen diuji sebanyak tiga kali pada lokasi berbeda untuk memperoleh nilai rata-rata yang lebih representatif serta meminimalkan pengaruh kesalahan lokal. Pengujian dilakukan dengan cara menekan bola indentor yang terbuat dari karbida tungsten berdiameter 10 mm ke permukaan spesimen menggunakan beban sebesar 187,5 kgf. Setelah beban dilepaskan, terbentuk jejak indentasi berbentuk lingkaran pada permukaan logam. Diameter jejak tersebut kemudian diukur secara teliti menggunakan mikroskop optik dengan tingkat akurasi tinggi. Hasil pengukuran ini menjadi dasar perhitungan nilai kekerasan Brinell (HB) menggunakan persamaan matematis yang mempertimbangkan beban uji, diameter indentor, serta diameter rata-rata jejak tekan. Dengan metode ini, diperoleh gambaran kuantitatif mengenai tingkat kekerasan material setelah mengalami variasi perlakuan panas yang selanjutnya dapat dikorelasikan dengan perubahan mikrostruktur yang terjadi. Untuk menghitung nilai kekerasan Brinell menggunakan persamaan 1.

$$HB = \frac{2p}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

dengan keterangan:

P = beban uji (kgf)

D = diameter bola indentor (mm)

d = diameter jejak rata-rata (mm)

## 2.4 Pengamatan Mikrostruktur

Pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop optik setelah spesimen selesai proses etsa dengan larutan nital. Hasil etsa kemudian diamati pada tingkat perbesaran 200x dan 1000x untuk mengidentifikasi karakteristik butir yang

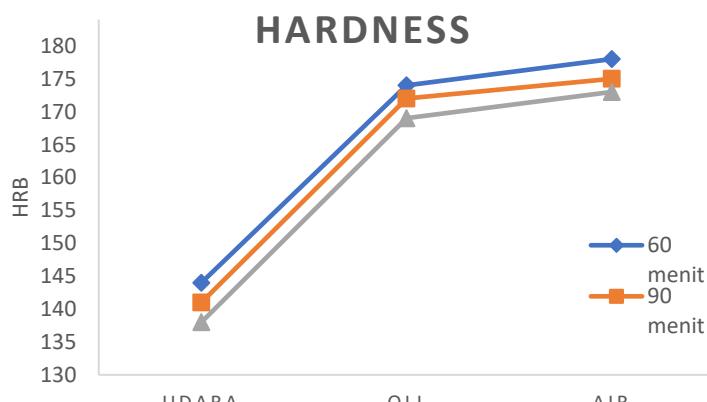
meliputi ukuran, bentuk, distribusinya, sekaligus mendeteksi perubahan fasa akibat variasi perlakuan panas. Analisis ini memungkinkan perbedaan struktur mikro antara pendinginan udara, oli, dan air dapat ditelusuri dengan jelas.

Data pengamatan mikrostruktur selanjutnya dikorelasikan dengan hasil uji kekerasan, sehingga diperoleh pemahaman lebih komprehensif mengenai hubungan kondisi austenisasi, media pendingin, dan sifat mekanik baja BJTP280. Dengan demikian, kombinasi hasil pengamatan mikrostruktur dan uji kekerasan memberikan dasar ilmiah untuk menjelaskan fenomena transformasi fasa yang terjadi pada baja BJTP280.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Pengaruh Variasi Waktu Tahan dan Media Pendingin

Hasil uji kekerasan Brinell pada suhu austenisasi 800°C dengan variasi media pendingin udara, oli, dan air menunjukkan adanya perbedaan nilai yang signifikan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Pada pendinginan media udara, nilai kekerasan relatif rendah dengan nilai 144 HB pada waktu tahan 60 menit, kemudian menurun menjadi 141 HB pada 90 menit, dan mencapai 138 HB pada 120 menit. Penurunan ini berkaitan erat dengan terbentuknya struktur ferit-perlit kasar akibat laju pendinginan yang lambat. Sementara itu, pendinginan dengan oli menunjukkan nilai yang lebih tinggi, yaitu 174 HB pada 60 menit, 172 HB pada 90 menit, dan 169 HB pada 120 menit. Struktur mikro yang dihasilkan berupa campuran ferit, perlit halus, dan sebagian bainit jarum yang berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan dibanding pendinginan udara. Pendinginan dengan air memberikan nilai kekerasan tertinggi, yakni 178 HB pada 60 menit, kemudian menurun menjadi 175 HB pada 90 menit, dan 173 HB pada 120 menit. Kondisi ini menunjukkan dominasi fasa martensit dengan sisipan ferit, yang menjadikan baja memiliki kekerasan paling tinggi. Secara umum, hasil ini menegaskan bahwa media pendingin berperan penting dalam menentukan sifat mekanik baja, dengan laju pendinginan yang lebih cepat menghasilkan nilai kekerasan lebih tinggi.



Gambar 3. Pengaruh variasi waktu dan media pendingin pada suhu 800°C

Dari grafik pada Gambar 3, dapat dilihat bahwa terdapat dua tren yang berbeda. Pertama, nilai kekerasan cenderung menurun seiring bertambahnya waktu tahan, baik pada pendinginan udara, oli, maupun air. Hal ini disebabkan karena pertumbuhan butir yang semakin besar ketika waktu tahan diperpanjang, sehingga mengurangi kekuatan hambatan pergerakan dislokasi. Kedua, media pendingin memberikan pengaruh nyata terhadap kekerasan baja. Pada pendinginan cepat menggunakan air membentuk martensit dominan yang sangat keras, media pendingin oli menghasilkan campuran martensit-perlit halus dengan kekerasan menengah, sedangkan udara menghasilkan ferit-perlit kasar

dengan kekerasan paling rendah. Hasil ini konsisten dengan penelitian Satria et al., (2019) yang menemukan bahwa variasi media pendingin pada baja karbon rendah menghasilkan perbedaan nilai kekerasan signifikan, dengan menggunakan air sebagai media yang menghasilkan martensit dominan dan udara menghasilkan struktur ferit-perlit. Hal serupa juga ditunjukkan oleh penelitian Mudda et al., (2025) bahwa media pendingin berpengaruh langsung pada transformasi fasa, dimana pendinginan cepat membentuk martensit keras dan pendinginan lambat membentuk ferit-perlit dengan ketangguhan lebih baik.

Fenomena penurunan kekerasan akibat pertumbuhan butir pada waktu tahan yang lebih lama dapat dijelaskan melalui prinsip metalurgi fisik. Dimana semakin lama austenit dipertahankan pada suhu tinggi, difusi atom karbon dan unsur paduan lain menjadi lebih intensif sehingga memungkinkan butir tumbuh lebih besar. Pertumbuhan butir ini mengurangi jumlah batas butir yang berperan sebagai penghalang pergerakan dislokasi, sehingga logam menjadi lebih mudah mengalami deformasi plastis dan nilai kekerasannya menurun. Sebaliknya, pendinginan cepat dengan air menghasilkan laju transformasi tinggi yang menyebabkan austenit berubah menjadi martensit berstruktur tetragonal terdistorsi. Struktur ini sangat keras namun bersifat getas. Pendinginan dengan oli menghasilkan keseimbangan antara martensit dan perlit halus, sehingga nilai kekerasan tidak setinggi pendinginan air, tetapi ketangguhannya lebih baik. Pendinginan lambat di udara memungkinkan difusi karbon yang lebih sempurna, membentuk ferit-perlit kasar dengan sifat ulet namun nilai kekerasan paling rendah.

### 3.2 Pengaruh Variasi Suhu Austenisasi

Pengujian pada media pendinginan air dengan variasi suhu 750°C, 800°C, dan 850°C ditunjukkan pada Gambar 4. Pada suhu 750°C, kekerasan tercatat 165 HB pada 60 menit, 163 HB pada 90 menit, dan 160 HB pada 120 menit. Pada suhu 800°C, nilai kekerasan meningkat menjadi 178 HB pada 60 menit, 175 HB pada 90 menit, dan 173 HB pada 120 menit. Namun pada suhu 850°C, kekerasan sedikit menurun dengan nilai 174 HB pada 60 menit, 172 HB pada 90 menit, dan 168 HB pada 120 menit. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa pada suhu 800°C merupakan kondisi optimum yang menghasilkan kekerasan tertinggi. Pada suhu 750°C menghasilkan austenit yang belum sepenuhnya homogen sehingga transformasi martensit tidak maksimal. Sementara itu, pada suhu 850°C terjadi pertumbuhan butir yang lebih besar meskipun martensit terbentuk, sehingga ukurannya lebih kasar yang dapat menurunkan nilai kekerasan. Tren penurunan kekerasan dengan meningkatnya waktu tahan pada masing-masing suhu kembali menegaskan bahwa pertumbuhan butir adalah faktor utama penurunan kekerasan.



Gambar 4. Pengaruh suhu dan waktu penahanan dengan pendinginan air

Hasil ini sesuai dengan teori metalurgi fisik yang menyebutkan bahwa kenaikan suhu austenisasi memperbaiki homogenitas larutan padat austenit, namun pada suhu terlalu tinggi akan terjadi pertumbuhan butir berlebihan yang merugikan sifat mekanik. Penelitian Adeleke et al., (2019) pada baja AISI 1021 memperkuat temuan ini dengan menunjukkan bahwa butir ultra-halus yang dihasilkan melalui perlakuan panas siklik cepat dapat meningkatkan kekerasan, sedangkan butir kasar dapat menurunkan kekerasan. Penelitian lain oleh Ronneberg et al., (2020) juga menegaskan bahwa perlakuan panas mampu mengendalikan evolusi butir dan mengoptimalkan sifat mekanik pada paduan hasil manufaktur aditif.

Selain itu, keterkaitan antara suhu austenisasi, ukuran butir, dan sifat mekanik baja juga penting dipahami dalam konteks aplikasi industri. Pada suhu yang terlalu rendah, austenit tidak terbentuk secara homogen sehingga transformasi ke martensit saat pendinginan tidak maksimal, menghasilkan kekerasan yang relatif rendah. Sebaliknya, pada suhu terlalu tinggi, meskipun austenit terbentuk sempurna, pertumbuhan butir yang berlebihan menyebabkan menurunnya kekerasan sekaligus menurunkan ketangguhan material. Oleh karena itu, terdapat kisaran suhu optimum yang harus dipertahankan agar diperoleh kombinasi sifat mekanik yang seimbang. Temuan ini sejalan dengan prinsip Hall-Petch, yang menyatakan bahwa semakin kecil ukuran butir, semakin tinggi kekuatan dan kekerasan material akibat peningkatan hambatan pergerakan dislokasi. Dengan demikian, pengendalian suhu austenisasi dan waktu tahan menjadi faktor kritis dalam menentukan kualitas akhir baja. Sehingga perlakuan panas harus dirancang dengan cermat sesuai kebutuhan aplikasi spesifik.

### 3.3 Analisis Mikrostruktur

Proses pendinginan pada baja karbon rendah sangat mempengaruhi pembentukan struktur mikro serta sifat mekaniknya. Setiap media pendingin memiliki laju pendinginan yang berbeda, sehingga menghasilkan kombinasi fasa yang bervariasi. Pada Gambar 5 menampilkan struktur mikro baja dengan pemanasan 800°C media pendinginan udara. Terlihat bahwa proses pendinginan yang lambat menyebabkan austenit bertransformasi sempurna menjadi ferit dan perlit kasar. Fasa ferit tampak lebih dominan dengan morfologi butir berwarna terang, sedangkan perlit tampak lebih gelap dengan distribusi yang relatif jarang. Struktur ini memberikan sifat mekanik yang lunak dan ulet, dengan kekerasan rendah karena ukuran butirnya relatif besar. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Nurlina et al., (2019) yang melaporkan bahwa pendinginan lambat menghasilkan dominasi fasa ferit-perlit dengan nilai kekerasan rendah, namun sifat keuletannya cukup tinggi. Penelitian lain oleh Mudda et al., (2025) juga menegaskan bahwa laju pendinginan berperan penting dalam menentukan fasa akhir baja karbon. Dimana pendinginan lambat menghasilkan struktur ferit-perlit yang lebih kasar dibandingkan pendinginan cepat yang membentuk martensit. Selain itu, Adeleke et al., (2019) menyebutkan bahwa ukuran butir halus yang diperoleh dari pendinginan lebih cepat mampu meningkatkan kekuatan dan kekerasan melalui mekanisme penghalang dislokasi. Dengan demikian, struktur mikro hasil pendinginan udara pada penelitian ini konsisten dengan teori metalurgi fisik dan penelitian terdahulu yang menekankan pentingnya laju pendinginan terhadap sifat mekanik baja.



Gambar 5. Struktur mikro pendinginan udara 200x dan 1000x

Anzarih & Dullah, (2017) Pada Gambar 6 terlihat bahwa struktur mikro hasil pendinginan oli terdiri atas campuran ferit, perlit halus, dan sebagian bainit. Pendinginan dengan oli memiliki laju lebih cepat dibanding udara, namun lebih lambat daripada air, sehingga menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dengan distribusi perlit yang lebih rapat. Kehadiran bainit berbentuk jarum halus diantara ferit. Hal ini meningkatkan kekerasan material tanpa mengorbankan seluruh sifat ketangguhan. Kondisi ini menjadikan baja memiliki sifat mekanik yang lebih seimbang, yakni kekerasan sedang dengan ketangguhan yang masih cukup baik. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Anzarih & Dullah, (2017) yang menyatakan bahwa media pendingin berpengaruh langsung pada kekerasan, dimana oli memberikan nilai menengah antara air dan udara. Hal serupa juga ditunjukkan oleh Satria et al., (2019) bahwa pendinginan dengan media oli menghasilkan kombinasi fasa martensit–perlit halus yang mampu meningkatkan kekerasan sekaligus mempertahankan sebagian keuletan material.



Gambar 6. Struktur mikro pendingin oli 200x dan 1000x

Sementara pada Gambar 7 diperlihatkan struktur mikro hasil pendinginan air, di mana laju pendinginan yang sangat cepat menyebabkan austenit berubah menjadi martensit berbentuk jarum halus. Namun, karena baja BJTP280 termasuk baja karbon sedang–rendah ( $\approx 0,3\%$ C), jumlah martensit yang terbentuk tidak sebanyak pada baja karbon tinggi, sehingga masih dijumpai fasa ferit dengan sisipan martensit. Kombinasi ini menghasilkan nilai kekerasan yang tinggi, namun sifat getas material juga meningkat akibat dominasi martensit yang cenderung rapuh. Hasil ini sejalan dengan penelitian Nugroho et al., (2025) yang melaporkan bahwa *quenching* pada baja ST40 meningkatkan kekuatan tarik secara signifikan, namun menurunkan keuletan. Nurlina et al., (2019) juga menunjukkan bahwa media pendingin air garam menghasilkan nilai kekerasan lebih tinggi dibanding oli, karena terbentuk martensit dalam jumlah lebih besar. Lebih lanjut, penelitian Anggoro et al., (2017) pada baja AISI 420 martensitik menegaskan bahwa *quenching* mampu meningkatkan kekerasan hingga lebih dari 500 HB, namun diikuti dengan penurunan ketangguhan akibat pertumbuhan karbida besar. Dengan demikian, penggunaan air sebagai media pendingin terbukti paling efektif dalam meningkatkan kekerasan baja BJTP280. Meskipun perlu diimbangi dengan proses tempering apabila aplikasi membutuhkan kekerasan dan keuletan yang lebih baik.



Gambar 7. Struktur mikro pendingin air 200x dan 1000x

Fenomena pembentukan martensit pada pendinginan cepat dengan air juga dapat dijelaskan melalui diagram *Time Temperature Transformation* (TTT) maupun diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT). Pada baja karbon sedang–rendah, laju pendinginan air cukup untuk melewati kurva “hidung” perlit dan bainit, sehingga sebagian besar austenit langsung bertransformasi menjadi martensit saat mencapai suhu  $M_s$ . Namun, karena kandungan karbon hanya sekitar 0,3%, jumlah martensit yang

terbentuk tidak penuh sehingga masih ada fasa ferit yang terbentuk lebih awal. Kondisi ini menghasilkan sifat mekanik yang khas, yakni peningkatan signifikan pada kekerasan namun diiringi dengan penurunan ketangguhan. Temuan ini diperkuat oleh penelitian Sun et al., (2018) yang menyatakan bahwa quenching cepat pada baja karbon sedang cenderung meningkatkan kekerasan hingga dua kali lipat dibanding pendinginan oli, tetapi menurunkan ketahanan impak secara drastis. Selain itu, penelitian Haryadi et al., (2021) menegaskan bahwa pertumbuhan martensit jarum halus mampu memperkuat material melalui mekanisme penghambatan pergerakan dislokasi, meskipun ketahanan terhadap fraktur menjadi berkurang. Oleh karena itu, untuk aplikasi struktural yang membutuhkan keseimbangan antara kekerasan dan ketangguhan, baja hasil *quenching* air sangat disarankan untuk dilanjutkan dengan perlakuan tempering guna memperhalus tegangan internal dan mengurangi kerapuhan.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil uji kekerasan Brinell dan pengamatan mikrostruktur pada baja BJTP280 dengan variasi suhu austenisasi, waktu tahan, dan media pendinginan dapat disimpulkan bahwa media pendingin memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan. Pendinginan dengan air menghasilkan nilai tertinggi yaitu 178 HB pada waktu tahan 60 menit, pendinginan oli memberikan nilai menengah sebesar 174 HB, sedangkan pendinginan udara menghasilkan kekerasan terendah yaitu 144 HB. Selain itu, variasi waktu tahan menunjukkan hubungan berbanding terbalik dengan nilai kekerasan, di mana semakin lama waktu tahan maka nilai kekerasan pada semua media pendingin cenderung menurun akibat pertumbuhan butir austenit yang semakin besar. Sementara itu, pengaruh variasi suhu austenisasi dengan pendinginan air memperlihatkan bahwa suhu 800°C merupakan kondisi optimum dengan nilai kekerasan tertinggi, sedangkan suhu 750°C menghasilkan austenit yang belum homogen dan suhu 850°C menurunkan kekerasan akibat adanya pertumbuhan butir yang berlebihan. Dengan demikian, perlakuan panas terbaik untuk meningkatkan kekerasan baja BJTP280 adalah pada suhu austenisasi 800°C dengan pendinginan air dan waktu tahan selama 60 menit.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Jember atas dukungan fasilitas dan pendanaan yang telah diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga ditujukan kepada rekan-rekan dosen dan teknisi laboratorium di Laboratorium Manufaktur dan Laboratorium Uji Material yang telah memberikan bantuan teknis, diskusi ilmiah, serta dukungan dalam proses pengujian dan analisis. Penghargaan khusus disampaikan kepada mahasiswa bimbingan yang turut berpartisipasi dalam persiapan spesimen dan pengumpulan data, sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar. Segala bentuk dukungan, kerja sama, dan kontribusi yang diberikan sangat berarti bagi terselesaikannya penelitian ini.

#### REFERENCES

- Adeleke, A. A., Ikubanni, P. P., Orhadahwe, T. A., Aweda, J. O., Odusote, J. K., & Agboola, O. O. (2019). Microstructural assessment of AISI 1021 steel under rapid cyclic heat treatment process. *Results in Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100044>
- Anggoro, S., Lingkar, J., Tamantirto, S., & Bantul, K. (2017). PENGARUH PERLAKUAN PANAS QUENCHING DAN TEMPERING TERHADAP LAJU KOROSI PADA BAJA AISI 420. In *Jurnal ENGINE* (Vol. 1, Issue 2).

- Anzarih, A. M., & Dullah, J. (n.d.). *Prosiding Seminar Hasil Penelitian (SNP2M)*.
- Bagul, A. D., & Kumar Dubey, D. (2020). Effects on hardness by various heat treatments processes on HSS tool bit. *Materials Today: Proceedings*, 43, 694–699. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.619>
- Haryadi, G. D., Fredy Utomo, A., Made, I., & Ekaputra, W. (2021). Pengaruh Variasi Temperatur Quenching dan Media Pendingin terhadap Tingkat Kekerasan Baja AISI 1045. In *Jurnal Rekayasa Mesin* (Vol. 16, Issue 2). <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/rekayasa>
- Hasil, J., Ilmiah, K., Anggigi, H., Budiarto, U., & Fauzan Zakkii, A. (2019). JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Analisa Pengaruh Temperatur Normalizing Pada Sambungan Las SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Terhadap Kekuatan Tarik, Tekuk dan Mikrografi Baja Karbon Rendah. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 7(4), 504. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- Indah Irmaya, A., & Yunita, L. (n.d.). Analisa Laju Korosi dengan Media Air Laut pada Hasil Pengelasan Logam Baja Karbon Rendah dengan Proses Perlakuan Panas. *Jurnal OFFSHORE*, 4.
- Jovičević-Klug, P., Puš, G., Jovičević-Klug, M., Žužek, B., & Podgornik, B. (2022). Influence of heat treatment parameters on effectiveness of deep cryogenic treatment on properties of high-speed steels. *Materials Science and Engineering: A*, 829. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142157>
- Mashhadikarimi, M., Aghayar, Y., Moazzen, P., Masoumi, M., Shamsdini, S., & Mohammadi, M. (2025). Hybrid Additive Manufactured Tool Steels: Microstructural Modifications and Mechanical Enhancements Through Heat Treatments. *Materialia*, 102552. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2025.102552>
- Mudda, S., Hegde, A., Sharma, S., & Gurumurthy, B. M. (2025). Optimization of various heat treatment parameters for superior combination of hardness and impact energy of AISI 1040 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 38, 3900–3908. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.228>
- Nurlina, N., Pengujian Hardening pada Baja Karbon Rendah Sebagai Solusi Peningkatan Kualitas Material, P., Nurlina Program Studi Perawatan dan Perbaikan Mesin, N., Kediri Jl Mayor Bismo No, P., & Kediri, K. (2019). (elektronik) Fakultas Teknik Universitas Islam Balitar. In *Blitar Jurnal Qua Teknika* (Vol. 9, Issue 1).
- P. S., Rendah, K., Ilyas Nugroho, M., & Sindy Pramesti, Y. (n.d.). *Prosiding SEMNAS INOTEK (Seminar Nasional Inovasi Teknologi) 2025 936* (Vol. 9). Online.
- Rahman Hakim, A., Nurlaila, Q., & lase, Z. (2023). PENGARUH PERLAKUAN PANAS TERHADAP PROSES PERMESINAN BAJA KARBON RENDAH. *Sigma Teknika*, 6(2), 436–447.
- Ronneberg, T., Davies, C. M., & Hooper, P. A. (2020). Revealing relationships between porosity, microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion 316L stainless steel through heat treatment. *Materials and Design*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108481>
- Saktisahdan, T. J., Asahan, U., Yani, J. J. A., Fax, T. /, & Mesin, P. T. (2019). PENGARUH PROSES HEAT TREATMENT TERHADAP PERUBAHAN STRUKTUR MIKRO BAJA KARBON RENDAH. In *Jurnal Laminar* (Vol. 1, Issue 1).
- Satria, D., Setiawan, I., Rosyadi, I., Listijorini, E., Lusiani, R., Jurusan Teknik Mesin, A., Teknik, F., Sultan Ageng Tirtayasa Jl Jenderal Sudirman Km, U., & Purwakarta, K. (2019). Pengaruh Waktu Tahan Proses Pack Carburizing Baja AISI 3115 dengan Menggunakan Calcium Carbonat dan Batubara Sub Bituminous dan Mendapatkan Perlakuan Panas Quenching Media Pendingin Air (Vol. 21, Issue 2).
- Sun, S. H., Zhao, A. M., Ding, R., & Li, X. G. (2018). Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of quenching and partitioning steel. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 31(2), 216–224. <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0667-3>
- P., Saefuloh, I., Rohmat, A., Lusiani, R., Jannah, M., & Setiawan, I. (2021). Electroless Ni-P terhadap Laju Korosi dan Kekerasan Permukaan Baja Karbon Rendah ASTM A36. In *Jurnal Rekayasa Mesin* (Vol. 16, Issue 2). <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/rekayasa>