

ANALISIS PENGARUH VARIASI WAKTU TEMPER TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO BAJA S45CIrfan Maulana¹, Margono Sugeng²^{1,2}Universitas Dian NusantaraEmail: 511202034@mahasiswa.undira.ac.id¹, margono.sugeng@undira.ac.id²

Abstrak: Baja karbon menengah S45C banyak digunakan pada komponen mesin seperti poros, roda gigi, dan komponen struktural karena memiliki keseimbangan antara kekuatan dan keuletan. Namun, sifat mekanik baja S45C sangat dipengaruhi oleh perlakuan panas yang diberikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi waktu tempering terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja S45C setelah proses quenching. Proses perlakuan panas diawali dengan austenitisasi, kemudian quenching menggunakan media pendingin, dan dilanjutkan dengan tempering pada variasi waktu penahanan 15 menit, 30 menit, dan 45 menit. Pengujian yang dilakukan meliputi uji kekerasan Rockwell, uji tarik, serta pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop metalografi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan waktu tempering menyebabkan penurunan nilai kekerasan dari kondisi setelah quenching, sementara sifat keuletan material meningkat dibandingkan kondisi quenching. Struktur mikro yang terbentuk setelah quenching didominasi oleh martensit, sedangkan setelah tempering berubah menjadi tempered martensite yang lebih stabil. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa variasi waktu tempering berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja S45C.

Kata Kunci: Baja S45C, Perlakuan Panas, Quenching, Tempering, Sifat Mekanik, Struktur Mikro.

Abstract: Medium carbon steel S45C is widely used for machine components such as shafts, gears, and structural parts due to its balanced strength and ductility. However, the mechanical properties of S45C steel are strongly influenced by the applied heat treatment process. This study aims to investigate the effect of tempering time variation on the mechanical properties and microstructure of S45C steel after quenching. The heat treatment process consisted of austenitizing followed by quenching using a cooling medium, and subsequent tempering with holding times of 15 minutes, 30 minutes, and 45 minutes. The tests conducted included Rockwell hardness testing, tensile testing, and microstructural observation using a metallurgical microscope. The results show that increasing tempering time leads to a decrease in hardness compared to the as-quenched condition, while the ductility of the material increases relative to the quenched condition. The microstructure after quenching is dominated by martensite, whereas tempering results in the formation of more stable tempered martensite. It can be concluded that variations in tempering time significantly affect the mechanical properties and microstructure of S45C steel.

Keywords: S45C Steel, Heat Treatment, Quenching, Tempering, Mechanical Properties, Microstructure.

PENDAHULUAN

Baja karbon menengah seperti S45C banyak digunakan pada berbagai komponen teknik, seperti poros, roda gigi, komponen alat angkat dan angkut, serta bagian struktural mesin. Hal ini disebabkan oleh keseimbangan yang baik antara kekuatan, keuletan, serta kemudahan dalam proses manufaktur. Sifat mekanik baja S45C, khususnya kekerasan, sangat dipengaruhi oleh kondisi struktur mikro yang terbentuk selama proses manufaktur maupun perlakuan panas. Oleh karena itu, pengendalian parameter perlakuan panas menjadi penting untuk memperoleh sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi industri.

Perlakuan panas baja S45C umumnya meliputi proses pemanasan hingga temperatur austenisasi, penahanan pada temperatur tertentu, serta pendinginan menggunakan media tertentu. Variasi temperatur dan waktu penahanan akan mempengaruhi homogenitas austenit serta transformasi fasa selama pendinginan, yang selanjutnya menentukan struktur mikro yang terbentuk, seperti ferrit, perlit, bainit, atau martensit. Perbedaan struktur mikro tersebut berpengaruh langsung terhadap kekerasan, ketahanan aus, dan potensi kerapuhan material.

Berbagai penelitian dalam lima tahun terakhir telah mengkaji pengaruh perlakuan panas terhadap baja S45C atau baja setara AISI 1045. Tsamroh dkk. (2024) melaporkan bahwa kombinasi quenching dan perlakuan kriogenik mampu meningkatkan kekerasan akibat meningkatnya fraksi martensit. Putra dkk. (2022) menyatakan bahwa variasi temperatur dan waktu penahanan mempengaruhi pembentukan bainit dan sifat mekanik baja S45C. Son Minh dkk. (2024) menunjukkan bahwa perlakuan panas permukaan meningkatkan kekerasan permukaan baja S45C, sedangkan Parmita dkk. (2023) melaporkan bahwa proses quenching dan tempering pada baja AISI 1045 menghasilkan peningkatan kekerasan yang bergantung pada temperatur dan durasi perlakuan panas.

Selain perlakuan panas, perubahan sifat baja juga dapat terjadi akibat deformasi plastis. Andri Fato dan Margono Sugeng (2020) menjelaskan bahwa deformasi plastis merupakan deformasi permanen yang dimanfaatkan untuk mengubah bentuk baja tanpa mengubah komposisi kimianya, dan diikuti oleh perubahan struktur mikro. Proses deformasi plastis seperti tarik, stamping, dan pembengkokan banyak digunakan dalam proses pembentukan material.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih membahas pengaruh parameter perlakuan panas secara terpisah. Kajian yang mengintegrasikan variasi temperatur austenisasi dan waktu penahanan terhadap kekerasan dan struktur mikro baja S45C masih

terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh temperatur dan waktu perlakuan panas terhadap kekerasan serta struktur mikro baja S45C guna memperoleh parameter perlakuan panas yang optimal untuk aplikasi industri.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur perlakuan panas terhadap kekerasan baja S45C?
2. Bagaimana pengaruh variasi waktu temper terhadap struktur mikro baja S45C?
3. Bagaimana hubungan antara temperatur dan waktu perlakuan panas terhadap perubahan kekerasan dan struktur mikro baja S45C?

Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh temperatur perlakuan panas terhadap nilai kekerasan baja S45C.
2. Menganalisis pengaruh waktu penahanan perlakuan panas terhadap struktur mikro baja S45C.
3. Mengetahui hubungan antara temperatur dan waktu perlakuan panas terhadap kekerasan baja S45C.

Batasan Masalah

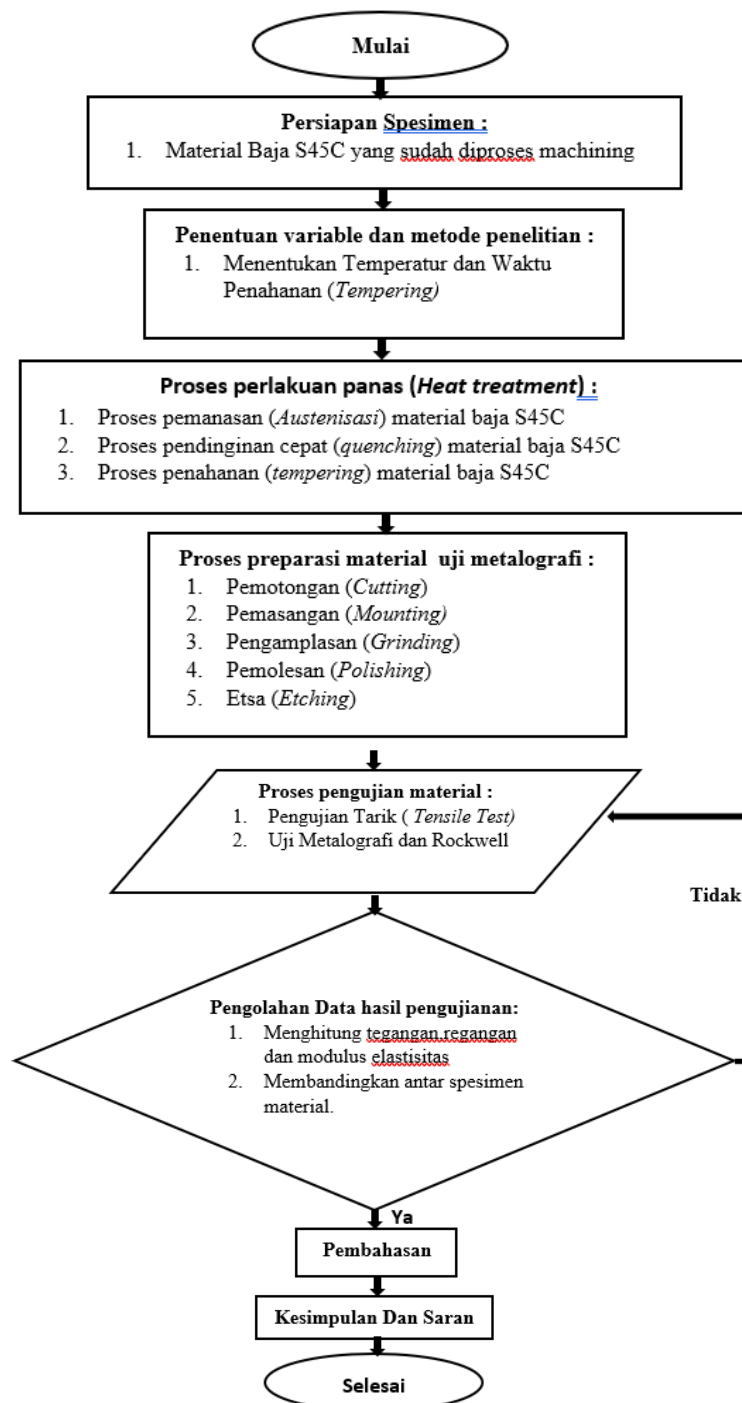
Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon menengah S45C.
2. Mengetahui hubungan antara temperatur dan waktu perlakuan panas terhadap kekerasan baja S45C. Media pendingin yang digunakan dalam proses pendinginan dibuat tetap dan tidak divariasikan.
3. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian uji tarik (*tensile test*) dan pengamatan struktur mikro (Metalografi).
4. Penelitian ini tidak membahas pengaruh perlakuan panas lanjutan seperti perlakuan kriogenik, *surface hardening*, atau perlakuan kimia lainnya.

METODE PENELITIAN

Diagram alir (*flow chart*)

Sebagai gambaran umum mengenai tahapan penelitian yang dilakukan, maka disusunlah diagram alir (*flowchart*) penelitian yang menunjukkan urutan proses penelitian mulai dari tahap awal hingga tahap akhir. Diagram alir ini digunakan sebagai pedoman pelaksanaan penelitian agar setiap tahapan dapat berjalan secara sistematis dan terarah.

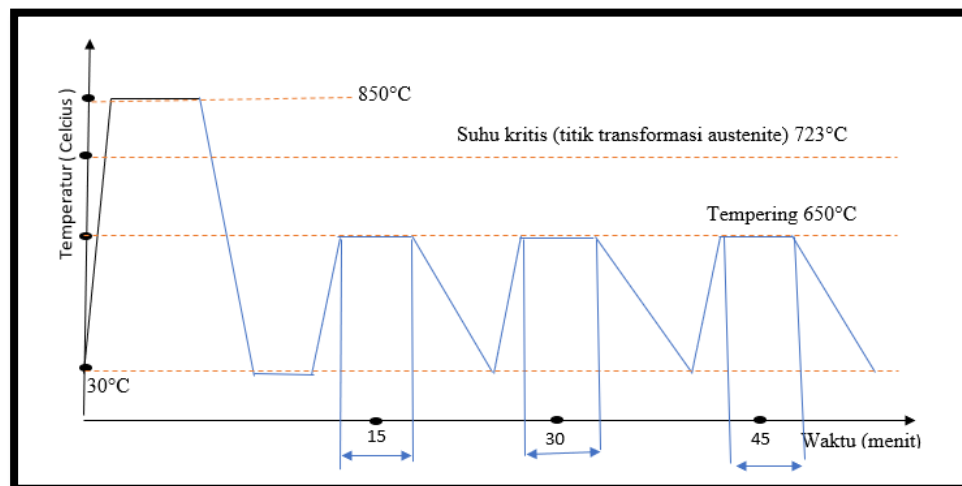


Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Prosedur Pengambilan Data

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh temperatur dan variasi waktu perlakuan panas terhadap kekerasan, sifat mekanik, dan struktur mikro baja S45C. Pengambilan data dilakukan melalui proses perlakuan panas dengan parameter yang telah ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan pengujian mekanik dan pengamatan metalografi.

Spesimen baja S45C dipanaskan hingga temperatur austenisasi, kemudian ditahan selama waktu tertentu (*holding time*) untuk memastikan homogenisasi struktur austenit. Setelah itu, spesimen didinginkan secara cepat menggunakan media pendingin (*quenching*) guna membentuk struktur martensit. Proses selanjutnya adalah tempering pada temperatur 650 °C dengan variasi waktu penahanan 15 menit, 30 menit, dan 45 menit, yang bertujuan untuk mengurangi kerapuhan dan meningkatkan kestabilan struktur mikro.



Gambar 3.2 Diagram proses perlakuan panas proses temper

Sumber : Dokumentasi pribadi, 2026

Gambar tersebut menunjukkan diagram hubungan temperatur terhadap waktu pada proses perlakuan panas baja yang meliputi tahap pemanasan, pendinginan cepat, dan tempering dengan variasi waktu penahanan.

Alat dan Bahan Penelitian

Berikut merupakan alat dan bahan yang diperlukan dalam proses penelitian :

1. Alat Penelitian

Alat yang digunakan meliputi:

1) Tungku perlakuan panas (*heat treatment furnace*)

Tungku perlakuan panas adalah perangkat pemanas industri yang dirancang untuk mengubah sifat mekanik dan struktur mikro logam melalui siklus suhu yang terkontrol secara presisi. Alat ini berfungsi menjalankan berbagai proses krusial seperti pengerasan (*hardening*), pelunakan (*annealing*), dan penghilangan tegangan sisa tanpa mengubah bentuk fisik benda kerja.

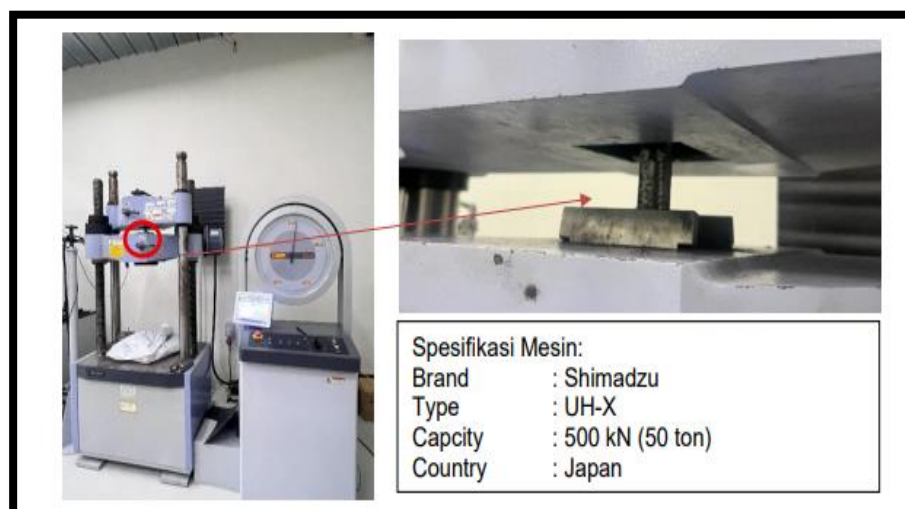
2) Media pendingin (*quenching*)

Media pendingin (*quenching*) adalah zat atau fluida yang digunakan untuk menurunkan suhu logam secara cepat setelah dipanaskan hingga fase austenit guna mencapai sifat mekanik tertentu, seperti kekerasan yang tinggi.

3) Mesin uji kekerasan (*Rockwell*)

Mesin uji kekerasan *Rockwell* adalah instrumen standar yang digunakan untuk mengukur ketahanan material (umumnya logam) terhadap penetrasi dengan mengukur perbedaan kedalaman lekukan yang dihasilkan oleh dua beban berbeda. Pengujian ini cepat, tidak merusak secara signifikan, dan hasilnya dapat langsung terbaca pada skala mesin.

4) Mesin uji tarik (*Universal Testing Machine*)



Gambar 3.3 Mesin uji tarik

Sumber : Laboratorium PT Intec Instrumen, 2026

Mesin uji tarik, adalah peralatan pengujian elektromekanik serbaguna yang menerapkan gaya terkontrol pada material untuk menentukan berbagai sifat mekanik seperti kekuatan tarik, tekan, lentur, dan geser.

5) Mesin pemotong spesimen

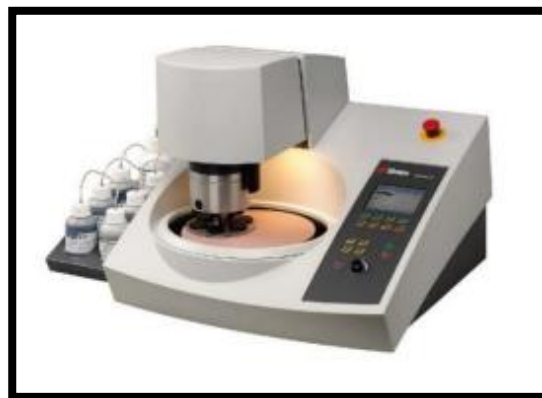


Gambar 3.4 Mesin Potong (*cutting*)

Sumber : Dokumentasi pribadi, 2026

Mesin pemotong spesimen adalah peralatan laboratorium khusus yang digunakan untuk mengiris atau memotong sampel material menjadi ukuran dan bentuk yang presisi untuk keperluan pengujian fisik atau analisis metalografi.

6) Mesin amplas dan poles (*grinding and polishing machine*)



Gambar 3.5 Mesin *Grinding Polishing*

Sumber : Laboratorium PT Intec Instrumen, 2026

Mesin amplas dan poles (*grinding and polishing machine*) dalam konteks laboratorium material adalah perangkat yang digunakan untuk menghaluskan permukaan spesimen logam guna menghilangkan goresan kasar akibat proses pemotongan. Proses ini merupakan tahap akhir persiapan sampel sebelum pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop metalurgi.

7) Mikroskop optik metalografi



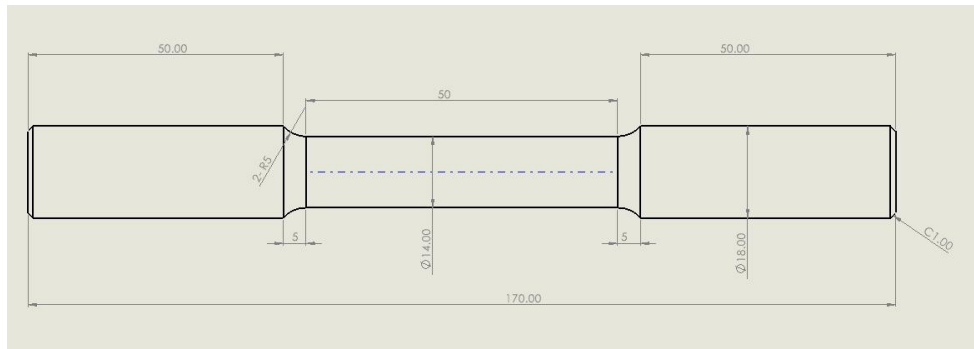
Gambar 3.6 Microscop photomicro

Sumber : Laboratorium PT Intec Instrumen, 2026

Mikroskop optik metalografi adalah instrumen optik khusus yang dirancang untuk mengamati dan menganalisis struktur mikro material yang tidak tembus cahaya, khususnya logam dan paduan. Berbeda dengan mikroskop biologi, mikroskop ini menggunakan prinsip cahaya pantul (*reflected light*) karena permukaan logam bersifat legap dan harus dipoles hingga mengkilap sebelum diamati.

2. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon menengah S45C dalam bentuk spesimen uji yang telah dipotong dan dibentuk sesuai standar pengujian ASTM E8.



Gambar 3.7 Desain spesimen (dog bone)

Sumber : ASTM International, 2020

Standar ASTM E8/E8M yang merupakan standar internasional untuk pengujian tarik material logam. Spesimen dibuat dengan bentuk *dog bone*, yaitu menyempit pada bagian tengah dan melebar pada bagian ujung, dengan tujuan untuk memastikan terjadinya deformasi dan patahan pada daerah ukur (*gauge section*) selama proses pengujian.

Bagian spesimen terdiri atas daerah penjepit (*grip section*), daerah transisi dengan radius tertentu (*fillet*), dan daerah ukur (*gauge section*) yang memiliki penampang seragam. Daerah ukur berfungsi sebagai lokasi utama terjadinya regangan plastis akibat pembebanan tarik, sehingga data tegangan dan regangan yang diperoleh merepresentasikan sifat mekanik material secara akurat.



Gambar 3.8 Material S45C dibentuk sesuai standar ASTM E8

Sumber : Dokumentasi pribadi, 2026

Pada gambar diatas material S45C telahn dipotong dan dibentuk sesuai standar ASTM E8 dengan menggunakan mesin bubut. Tetapi material tersebut belum dilakukan proses perlakuan panas (*heat treatment*).



Gambar 3.9 Material S45C setelah diproses perlakuan panas (*heat treatment*)

Sumber : Dokumentasi pribadi, 2026

Pada gambar diatas, setelah sampel material baja S45C melewati proses perlakuan panas (*heat treatment*), kemudian sampel diberikan penandaan agar tidak tertukar.

Tempat dan Waktu Penelitian

- a. Tempat pemilihan bahan dan proses bubut (*turning*) : PT Tri Ekadaya Engineering, Jl. Raya Serang Cibarusah No.81, Cikarang Selatan, Kabupten Bekasi, Jawa Barat 17530. Pada tanggal 22 Desember 2025.
- b. Tempat proses perlakuan panas (*heat tretment*), preparasi sampel uji metalografi dan Pengujian kekerasan rockwell : PT Kanetsu Tekno Indonesia, Jl. Johar Delta Silikon 2 Lippo Cikarang Blok. F6 Kabupaten Bekasi, Jawa Barat 17530. Pada tanggal 28 Desember 2025.
- c. Tempat uji tarik dan uji metalografi : PT Intec Instrument, Kawasan Sentra Bizhub Blok C-10 Teluk Jambe Timur, Karawang Barat, Jawa Barat 41361. Pada tanggal : 06 Januari 2026

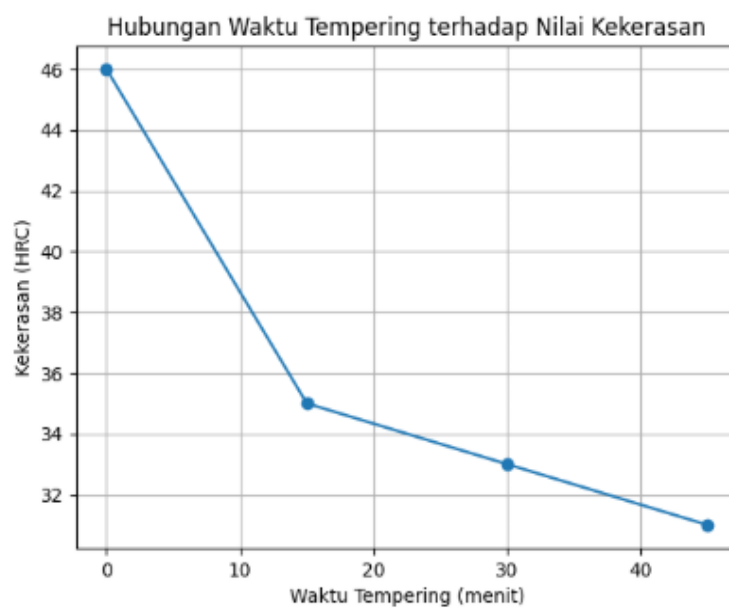
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Kekerasan Rockwell

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Rockwell dengan skala C (HRC). Setiap spesimen diuji pada beberapa titik pengujian untuk memperoleh nilai kekerasan rata-rata yang merepresentasikan kondisi material secara menyeluruh. Seperti yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.1 Hasil pengujian kekerasan Rockwell pada baja S45C dengan variasi temperatur dan waktu penahanan perlakuan panas.

No.	Sampel	Waktu Tempering	Kekerasan
1.	After Quench	0	46 HRC
2.	Tempering 1	15	35 HRC
3.	Tempering 2	30	33 HRC
4.	Tempering 3	45	31 HRC



Gambar 4.1 Grafik hubungan waktu tempering terhadap nilai kekerasan

Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2026

Grafik tersebut menunjukkan tren penurunan nilai kekerasan seiring dengan bertambahnya waktu *tempering*. Pada kondisi setelah *quenching* tanpa tempering (0 menit),

kekerasan mencapai nilai tertinggi, kemudian menurun secara bertahap pada waktu tempering 15, 30, dan 45 menit.

Berdasarkan hasil pengujian, diketahui bahwa nilai kekerasan baja S45C mengalami perubahan yang signifikan setelah dilakukan perlakuan panas. Peningkatan temperatur perlakuan panas cenderung meningkatkan nilai kekerasan material, terutama pada spesimen dengan waktu penahanan yang lebih lama.

B. Pembahasan Hasil Uji Tarik (Tensile Test)

Hasil pengujian tarik pada baja karbon S45C yang meliputi nilai tegangan tarik maksimum (ultimate tensile strength), tegangan luluh (yield strength), serta regangan atau perpanjangan (elongation). Pembahasan difokuskan pada pengaruh perlakuan panas terhadap perubahan sifat mekanik material, khususnya kekuatan dan keuletan. Perubahan nilai kekuatan tarik dan regangan dianalisis berdasarkan teori metalurgi serta perubahan struktur mikro yang terjadi akibat perlakuan panas.



Gambar 4.2 Sampel sebelum dan sesudah dilakukan uji tarik

Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2026

Gambar tersebut merupakan gambar perbandingan sampel sebelum dilakukan uji tarik dan sesudah dilakukan uji tarik.

Tabel 4.2 Hasil Uji Tarik (*Tensile Test*)

Name	Max_Force	Tensile_Strength	YS1_Stress	Elongation	Modulus Elastisitas
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	0.2 %		
Unit	kN	N/mm2	N/mm2	%	N/mm2
15	183.373	1233.13	362.446	11.6000	106.304
30	164.069	1166.88	1166.33	10.0000	60.1485
45	175.326	1162.07	410.795	11.7000	99.3222
AC	245.469	1622.29	166.978	15.6000	103.993

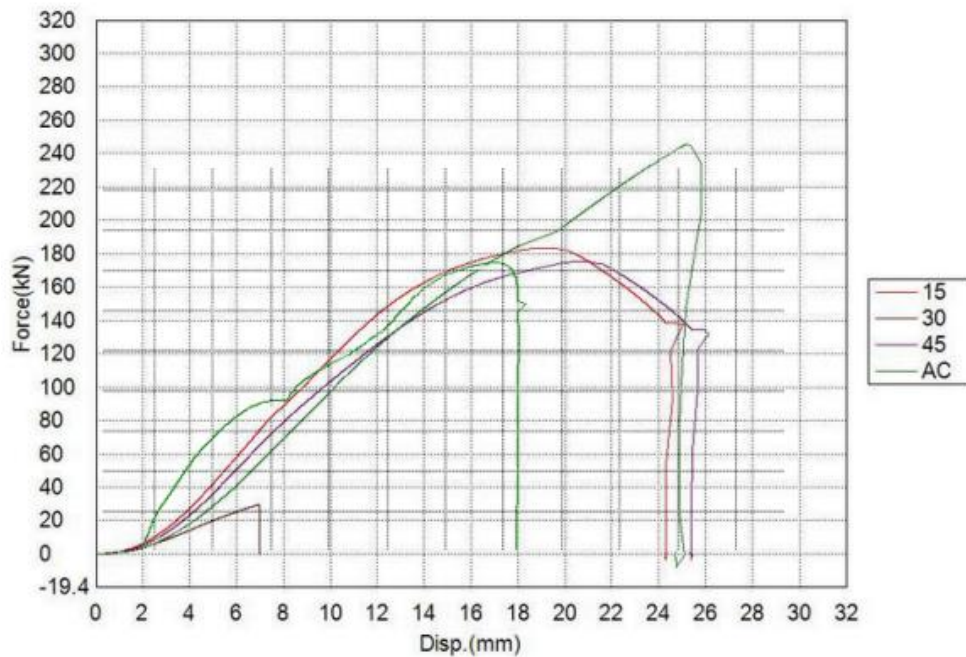
Berdasarkan hasil uji tarik yang ditunjukkan pada tabel 4.2 diatas, dapat diketahui bahwa setiap variasi perlakuan menghasilkan karakteristik mekanik yang berbeda. Spesimen dengan variasi 15 menunjukkan gaya maksimum sebesar 183,373 kN dengan nilai kekuatan tarik sebesar 1233,13 N/mm². Tegangan luluh 0,2% yang dihasilkan sebesar 362,446 N/mm² dengan regangan putus sebesar 11,6%. Nilai modulus elastisitas pada kondisi ini tercatat sebesar 106,304 N/mm², yang menunjukkan material memiliki kekakuan relatif tinggi.

Pada spesimen dengan variasi 30, gaya maksimum yang dihasilkan menurun menjadi 164,069 kN, disertai dengan penurunan kekuatan tarik menjadi 1166,88 N/mm². Tegangan luluh 0,2% tercatat sebesar 1166,33 N/mm², sementara regangan putus sebesar 10%. Nilai modulus elastisitas pada kondisi ini merupakan yang terendah, yaitu 60,1485 N/mm², yang menunjukkan penurunan kekakuan material dibandingkan variasi lainnya.

Spesimen dengan variasi 45 menghasilkan gaya maksimum sebesar 175,326 kN dan kekuatan tarik sebesar 1162,07 N/mm². Tegangan luluh 0,2% meningkat menjadi 410,795 N/mm² dengan regangan putus sebesar 11,7%. Modulus elastisitas yang diperoleh sebesar 99,3222 N/mm², menunjukkan sifat elastis material yang cukup baik dan lebih stabil dibandingkan variasi 30.

Sementara itu, spesimen tanpa perlakuan atau kondisi awal (AC) menunjukkan performa mekanik tertinggi. Gaya maksimum yang dihasilkan mencapai 245,469 kN dengan kekuatan tarik sebesar 1622,29 N/mm². Tegangan luluh 0,2% pada kondisi ini sebesar 166,978 N/mm² dan regangan putus mencapai 15%, yang merupakan nilai tertinggi di antara seluruh spesimen. Modulus elastisitas sebesar 103,993 N/mm² menunjukkan kombinasi yang baik antara kekuatan dan keuletan material.

Secara umum, hasil uji tarik ini menunjukkan bahwa variasi perlakuan memberikan pengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik, tegangan luluh, regangan, dan modulus elastisitas material. Perubahan parameter tersebut mengindikasikan terjadinya perubahan struktur mikro akibat perlakuan yang diberikan, yang selanjutnya memengaruhi sifat mekanik material secara keseluruhan.



Gambar 4.3 Grafik gaya perpindahan (*force displacement curve*)

Sumber : Laboratorium PT Intec Instrumen, 2026

Pada spesimen variasi 15, kurva menunjukkan kenaikan gaya yang relatif stabil hingga mencapai gaya maksimum sekitar 180 kN pada perpindahan sekitar 18–20 mm. Setelah melewati titik maksimum, kurva mengalami penurunan gaya yang cukup tajam hingga terjadi patah, yang menunjukkan terjadinya deformasi plastis diikuti kegagalan material.

Spesimen variasi 30 memperlihatkan gaya maksimum yang lebih rendah dibandingkan variasi lainnya. Kurva mencapai puncak gaya sekitar 160–165 kN dengan perpindahan yang relatif lebih kecil. Penurunan gaya setelah titik maksimum terjadi lebih cepat, mengindikasikan kemampuan deformasi plastis dan keuletan yang lebih rendah dibandingkan variasi 15 dan 45.

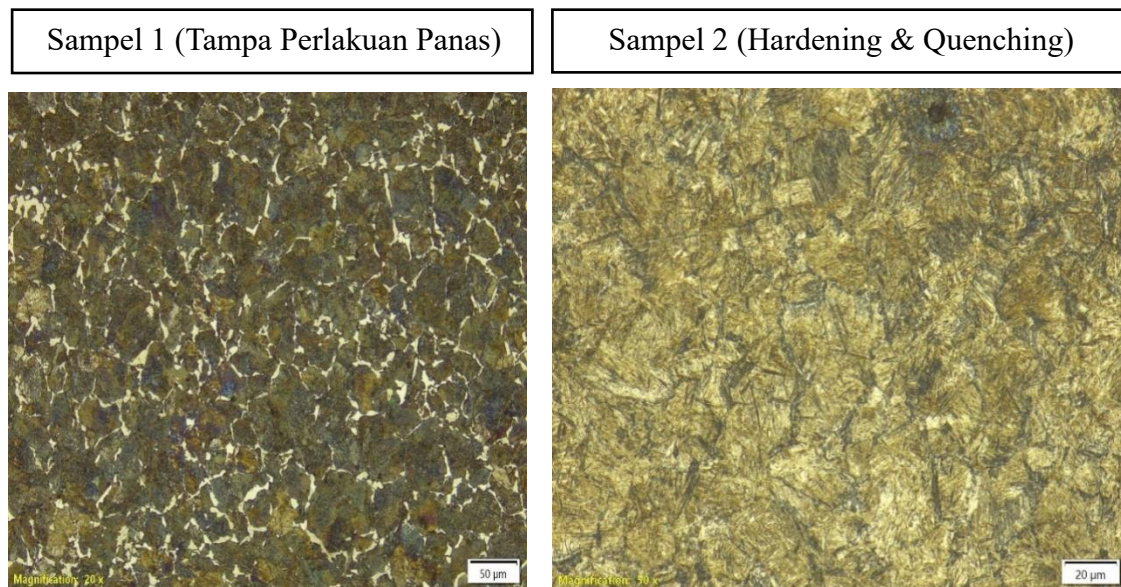
Pada variasi 45, kurva menunjukkan karakteristik yang lebih stabil dengan gaya maksimum mendekati 175 kN. Perpindahan hingga patah sedikit lebih besar dibandingkan variasi 30, yang menunjukkan peningkatan keuletan material. Penurunan gaya setelah titik

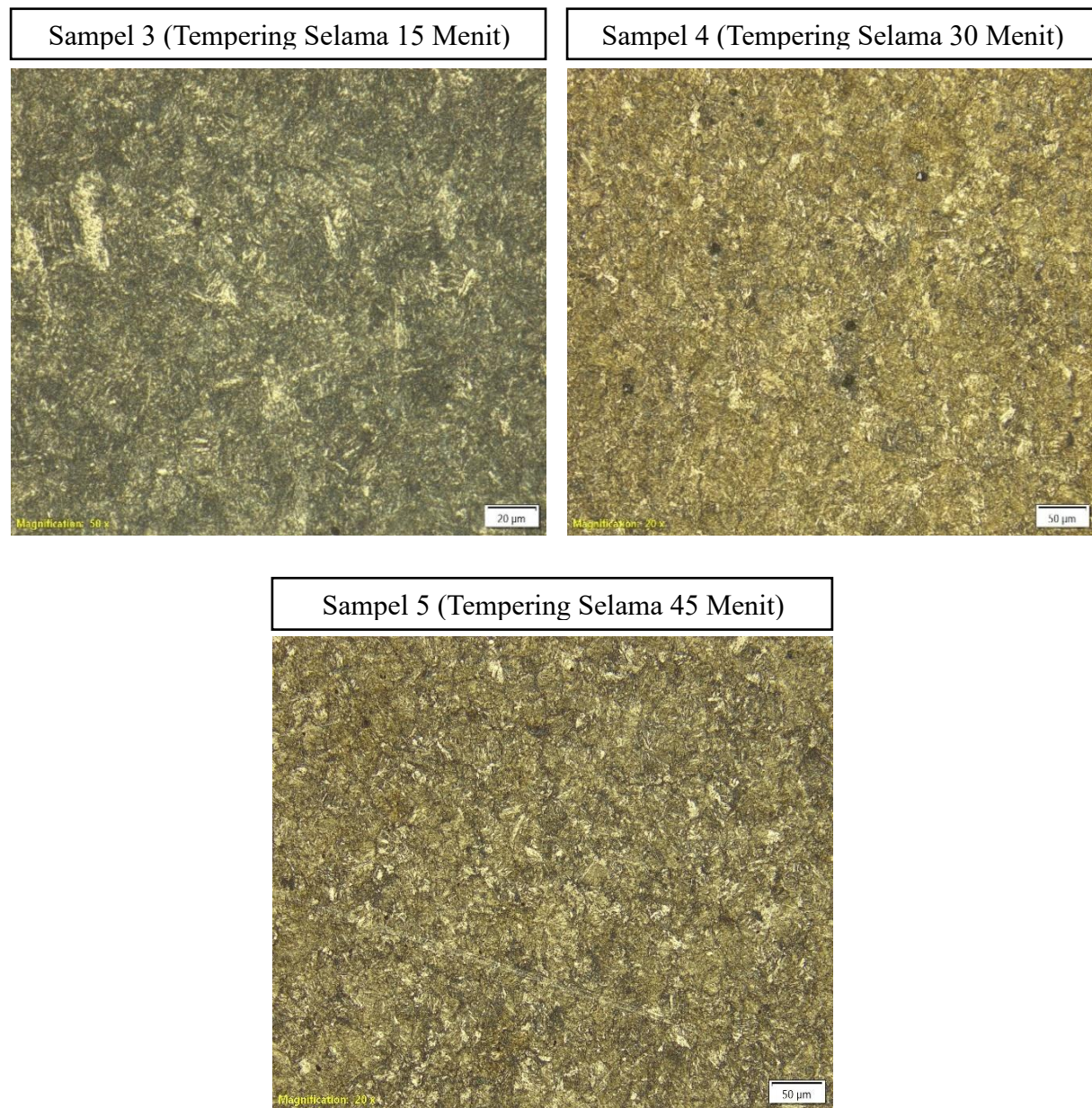
maksimum berlangsung lebih bertahap, menandakan material masih mampu menahan deformasi sebelum mengalami kegagalan total.

Sementara itu, spesimen *after quench* (AC) menunjukkan performa terbaik. Kurva AC mencapai gaya maksimum tertinggi, yaitu sekitar 245 kN, dengan perpindahan yang paling besar sebelum patah. Hal ini menunjukkan bahwa material pada kondisi awal memiliki kombinasi kekuatan dan keuletan yang paling baik, serta mampu menyerap energi deformasi yang lebih besar dibandingkan spesimen dengan perlakuan lainnya.

C. Hasil Pengamatan Struktur Mikro (Metalografi)

Hasil pengamatan struktur mikro baja karbon S45C sebelum dan sesudah perlakuan panas menggunakan mikroskop metalografi. Ditampilkan foto struktur mikro beserta penjelasan mengenai fasa yang terbentuk, seperti ferit, perlit, dan martensit, serta perubahan ukuran butir akibat variasi temperatur dan waktu penahanan, Sebagai berikut :





Gambar 4.4 Hasil pengamatan struktur mikro baja karbon S45C

Sumber : Laboratorium PT Intec Instrumen, 2026

Berikut merupakan benjelasan Dari hasil pengamatan struktur mikro baja karbon S45C :

Sampel 1: Tanpa Perlakuan Panas (*Raw Material*) Terlihat struktur campuran antara Ferrite (fase terang/putih) dan Pearlite (fase gelap/hitam). Butiran cenderung kasar dan terdistribusi secara alami hasil dari proses pengerjaan panas sebelumnya. Struktur ini memiliki keseimbangan antara kekuatan dan keuletan yang standar.

Sampel 2: *Hardening & Quenching* Setelah dipanaskan hingga fase austenit dan didinginkan secara cepat (*quench*), struktur berubah drastis menjadi Martensit. Secara

visual, struktur tampak lebih tajam, menyerupai jarum (*acicular*), dan lebih rapat. Pada tahap ini, baja mencapai tingkat kekerasan tertinggi namun bersifat sangat getas.

Sampel 3: Tempering Selama 15 Menit Proses tempering mulai mengubah Martensit yang getas menjadi Tempered Martensite. Pada durasi 15 menit, tegangan internal mulai berkurang. Struktur terlihat sedikit lebih halus dan butiran martensit mulai mengalami dekomposisi awal, namun sisa-sisa struktur jarum masih tampak cukup dominan.

Sampel 4: Tempering Selama 30 Menit Seiring bertambahnya waktu tempering, proses presipitasi karbida semakin merata. Warna pada foto metalografi tampak lebih seragam dan tekstur "jarum" martensit mulai mengabur. Hal ini mengindikasikan peningkatan keuletan (*ductility*) dan ketangguhan (*toughness*) material dengan sedikit penurunan nilai kekerasan dibanding sampel sebelumnya.

Sampel 5: Tempering Selama 45 Menit Pada durasi terlama, struktur mikro menunjukkan fase Tempered Martensite yang lebih stabil dan matang. Butiran-butiran karbida terdistribusi lebih halus dan merata di seluruh matriks. Secara mekanis, sampel ini akan memiliki ketangguhan paling tinggi dan risiko retak paling rendah dibandingkan sampel yang di-quench saja.

D. Analisis Hubungan Struktur Mikro dengan Sifat Mekanik

Hasil pengujian menunjukkan adanya keterkaitan yang jelas antara struktur mikro, nilai kekerasan, dan kekuatan tarik pada baja S45C akibat perlakuan panas quenching dan tempering. Pada kondisi setelah quenching (AC), struktur mikro didominasi oleh martensit yang bersifat sangat keras dan getas. Kondisi ini menghasilkan nilai kekerasan tertinggi sebesar 46 HRC serta kekuatan tarik maksimum sebesar 1622,29 N/mm².

Pemberian perlakuan tempering menyebabkan terjadinya transformasi martensit menjadi tempered martensite yang lebih stabil. Seiring dengan bertambahnya waktu tempering dari 15 hingga 45 menit, nilai kekerasan menurun secara bertahap dari 35 HRC menjadi 31 HRC. Penurunan ini terjadi akibat difusi atom karbon keluar dari kisi martensit sehingga tegangan internal berkurang.

Penurunan kekerasan tersebut diikuti oleh penurunan kekuatan tarik dari 1233,13 N/mm² menjadi 1162,07 N/mm². Namun, pada saat yang sama, nilai elongasi meningkat dan berada pada kisaran 10–11,7%, yang menunjukkan peningkatan keuletan material. Struktur mikro

tempered martensite dengan presipitasi karbida yang lebih merata membuat material menjadi lebih tangguh dan tidak mudah patah getas.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu tempering, kekerasan dan kekuatan tarik baja S45C menurun, sedangkan keuletan meningkat. Kondisi ini menunjukkan adanya kompromi sifat mekanik yang bertujuan untuk memperoleh material dengan keseimbangan antara kekuatan dan ketangguhan sesuai kebutuhan aplikasi teknik.

E. Pembahasan Kesesuaian dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan panas quenching menghasilkan peningkatan kekerasan dan kekuatan tarik yang signifikan pada baja S45C akibat terbentuknya struktur martensit, sedangkan proses tempering menyebabkan penurunan kekerasan dan kekuatan tarik yang diikuti peningkatan keuletan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Tsamroh dkk. (2024) yang melaporkan bahwa peningkatan fraksi martensit, baik melalui quenching maupun perlakuan lanjutan, berkontribusi langsung terhadap peningkatan kekerasan dan stabilitas struktur mikro baja S45C.

Selain itu, hasil penelitian ini juga konsisten dengan Putra dkk. (2022) yang menyatakan bahwa variasi temperatur transformasi dan waktu penahanan berpengaruh terhadap pembentukan fasa mikrostruktur seperti bainit dan tempered martensite, yang selanjutnya memengaruhi sifat mekanik material. Penurunan kekerasan dan kekuatan tarik akibat tempering dalam penelitian ini menunjukkan mekanisme relaksasi tegangan internal dan presipitasi karbida yang serupa dengan hasil penelitian tersebut.

Penelitian Son Minh dkk. (2024) dan Parmita dkk. (2023) juga mendukung hasil yang diperoleh, di mana peningkatan parameter perlakuan panas dan variasi durasi tempering terbukti memengaruhi kekerasan serta perubahan struktur mikro baja S45C dan AISI 1045. Kesamaan tren hasil menunjukkan bahwa pengaruh perlakuan panas pada baja karbon menengah bersifat konsisten meskipun metode dan kondisi pengujian berbeda.

Sementara itu, konsep deformasi plastis yang dijelaskan oleh Andri Fato dan Margono Sugeng (2020) memperkuat pemahaman bahwa perubahan sifat mekanik baja tidak hanya dipengaruhi oleh perlakuan panas, tetapi juga berkaitan erat dengan perubahan struktur mikro akibat pembebanan mekanik. Hal ini relevan dengan hasil uji tarik dalam penelitian ini, di mana peningkatan keuletan setelah tempering menunjukkan kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis yang lebih baik.

Dengan demikian, hasil penelitian ini memiliki kesesuaian yang baik dengan teori metalurgi dan penelitian terdahulu, sehingga dapat memperkuat validitas dan keandalan hasil yang diperoleh dalam menganalisis pengaruh perlakuan panas terhadap sifat mekanik baja S45C.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi temperatur dan waktu penahanan pada proses perlakuan panas memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja S45C. Perlakuan panas mampu meningkatkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik material dibandingkan dengan kondisi awal, yang disebabkan oleh perubahan struktur mikro dari ferit–perlit menjadi struktur yang lebih keras seperti perlit halus, bainit, dan martensit. Peningkatan fraksi martensit berbanding lurus dengan peningkatan nilai kekerasan dan kekuatan tarik, namun diikuti dengan penurunan keuletan material. Hal ini menunjukkan adanya kompromi antara kekuatan dan keuletan yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan parameter perlakuan panas. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa pengaturan temperatur dan waktu penahanan yang tepat sangat berperan dalam menentukan karakteristik mekanik baja S45C sesuai dengan kebutuhan aplikasinya.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji pengaruh variasi media pendingin, temperatur tempering, serta waktu tempering terhadap sifat mekanik dan ketahanan aus baja S45C. Selain itu, pengujian lanjutan seperti uji impak atau uji kelelahan dapat dilakukan untuk memperoleh gambaran performa material yang lebih komprehensif. Keterbatasan penelitian ini terletak pada ruang lingkup variasi parameter perlakuan panas dan jenis pengujian yang dilakukan, sehingga hasil penelitian masih dapat dikembangkan lebih lanjut pada penelitian mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

Andri Fato, & Margono Sugeng. (2020). Pengaruh deformasi plastis terhadap perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik baja karbon. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(2), 85–92.

- Parmita, N. P., Putra, I. G. A. P., & Suryawan, I. W. (2023). Pengaruh proses quenching dan tempering terhadap kekerasan dan struktur mikro baja AISI 1045. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 17(1), 45–53.
- Putra, R. A., Hidayat, T., & Prasetyo, E. (2022). Pengaruh variasi temperatur transformasi dan waktu penahanan terhadap pembentukan bainit pada baja S45C. *Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, 6(2), 101–108.
- Son Minh, N., Pham, T. Q., & Le, H. D. (2024). Effect of surface heat treatment parameters on microstructure and hardness of S45C steel. *Materials Science and Engineering Journal*, 58(3), 215–223.
- Tsamroh, A., Wijaya, A., & Prakoso, B. (2024). Enhancement of hardness and microstructural stability of S45C steel through quenching and cryogenic treatment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(4), 2890–2898.
- Indotrading. (2024). Universal testing machine Shimadzu UH-X/Fx 200 kN.
- Diakses dari <https://www.indotrading.com/intecinstruments/jual-universal-testing-machine-shimadzu-uh-x-fx-200kn-p700997.aspx>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons.