

PENGARUH PERLAKUAN PANAS ANNEALING, WATER QUENCHING, DAN TEMPERING TERHADAP TRANSFORMASI FASA DAN KEKERASAN BAJA KARBON SEDANG AISI 1045

Banu Nursanni¹, Surya Silalahi²

banunursanni@unimed.ac.id¹, silalahisurya100@gmail.com²

Universitas Negeri Medan

ABSTRAK

Perlakuan panas (heat treatment) merupakan metode krusial dalam rekayasa material untuk mengontrol mikrostruktur dan sifat mekanis baja. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh siklus perlakuan panas pengerasan melalui metode water quenching dan tempering terhadap transformasi fasa serta karakteristik kekerasan permukaan pada baja karbon sedang AISI 1045. Spesimen dipanaskan hingga temperatur austenitisasi 800 °C dengan waktu penahanan (holding time) selama 2 jam, kemudian didinginkan cepat (water quenching), dan dilanjutkan dengan proses tempering pada temperatur 300 °C selama 15 menit. Karakterisasi material dilakukan melalui pengamatan struktur mikro (metalografi) menggunakan larutan etsa Nital 2% serta pengujian kekerasan mikro Vickers dengan beban tekan 200 gf dan dwell time 10 detik pada tiga titik koordinat yang berbeda. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan terjadinya transformasi fasa dari struktur awal dual fasa ferrite dan pearlite kasar bawaan pabrik menjadi struktur fasa akhir tempered martensite dengan morfologi berserat jarum (acicular) yang halus, rapat, dan homogen. Pengujian kekerasan permukaan menghasilkan nilai rata-rata total sebesar 142,5 HV, dengan sebaran fluktuatif pada setiap titik, yaitu 162,4 HV (Titik 1), 137,6 HV (Titik 2), dan 127,4 HV (Titik 3). Penurunan nilai kekerasan aktual di bawah rentang teoritis standar fasa martensit temper (300–450 HV) disebabkan oleh faktor kesalahan teknis berupa jeda waktu pemindahan sampel (quenching delay) yang memicu transformasi balik menjadi fasa non-martensitis yang lebih lunak, serta terjadinya fenomena dekarburisasi (hilangnya unsur karbon) pada lapisan kulit luar spesimen akibat atmosfer pemanasan yang tidak protektif. Penelitian ini menyimpulkan bahwa meskipun rekayasa termal berhasil memicu perubahan fasa mikrostruktur, presisi pengendalian parameter operasional laboratorium memegang peranan mutlak dalam pencapaian sifat mekanis material yang optimal.

Kata Kunci: Baja AISI 1045, Water Quenching, Tempering, Tempered Martensite, Kekerasan Mikro Vickers, Dekarburisasi.

ABSTRACT

Heat treatment is a crucial method in materials engineering to control the microstructure and mechanical properties of steel. This study aims to analyze the effect of hardening heat treatment cycles via water quenching and tempering methods on the phase transformation and surface hardness characteristics of AISI 1045 medium carbon steel. The specimens were heated to an austenitizing temperature of 800° {C} with a holding time of 2 hours, followed by rapid cooling (water quenching), and subsequent tempering at a temperature of 300 °C for 15 minutes. Material characterization was performed through microstructure observation (metallography) using a 2% Nital etching solution and Micro Vickers hardness testing with a 200 gf indentation load and a 10-second dwell time across three distinct coordinate points. The microstructural observations revealed a distinct phase transformation from the initial commercial coarse ferrite and pearlite dual-phase structure into a final tempered martensite phase, which exhibits a fine, dense, and homogeneous acicular needle-like fiber morphology. The surface hardness testing yielded a total average value of 142.5 HV, with fluctuating distributions at each point: 162.4 HV (Point 1), 137.6 HV (Point 2), and 127.4 HV (Point 3). The reduction of the actual hardness value below the theoretical standard range

of the tempered martensite phase (300 - 450° { HV}) was primarily caused by operational technical errors, specifically the quenching delay during sample transfer which triggered a reverse transformation into soft non-martensitic phases, and the occurrence of surface decarburization (loss of carbon content) on the specimen's outer layer due to a non-protective heating atmosphere. This study concludes that although thermal engineering successfully drives microstructural phase changes, the precise control of laboratory operational parameters plays an absolute role in achieving optimal mechanical properties of the material.

Keywords: AISI 1045 Steel, Water Quenching, Tempering, Tempered Martensite, Micro Vickers Hardness, Decarburization.

PENDAHULUAN

Baja karbon sedang AISI 1045 merupakan salah satu material teknik yang banyak digunakan dalam industri manufaktur, otomotif, konstruksi, dan permesinan karena memiliki kombinasi sifat kekuatan, ketangguhan, serta ketahanan aus yang baik [1]. Baja ini memiliki kandungan karbon sekitar 0,45% sehingga mampu mengalami perubahan struktur mikro dan sifat mekanik yang signifikan melalui proses perlakuan panas (heat treatment) [2]. Karakteristik tersebut menjadikan baja AISI 1045 banyak diaplikasikan pada berbagai komponen mesin, seperti poros, roda gigi, crankshaft, pasak, dan komponen transmisi yang memerlukan kekuatan serta kekerasan tinggi [3].

Dalam penggunaannya, komponen berbahan baja karbon sedang sering mengalami penurunan performa akibat keausan, deformasi plastis, maupun pembebanan berulang selama masa operasi [4]. Kondisi tersebut dapat memengaruhi umur pakai dan keandalan komponen, sehingga diperlukan upaya untuk meningkatkan sifat mekanik material. Salah satu metode yang umum digunakan adalah perlakuan panas, yaitu proses pemanasan dan pendinginan material secara terkontrol untuk memperoleh struktur mikro dan sifat mekanik tertentu [5]. Berbagai metode perlakuan panas, seperti annealing, quenching, dan tempering, telah banyak diterapkan pada baja karbon sedang karena mampu menghasilkan perubahan signifikan pada karakteristik material [6].

Annealing merupakan perlakuan panas yang dilakukan dengan memanaskan material hingga mencapai daerah austenit, kemudian didinginkan secara perlahan dalam tungku [7]. Proses pendinginan lambat memungkinkan terbentuknya struktur ferit dan perlit yang lebih homogen sehingga dapat mengurangi tegangan sisa, meningkatkan keuletan, serta memperbaiki kemampuan deformasi plastis material [8]. Selain itu, annealing juga berperan dalam meningkatkan homogenitas struktur mikro sehingga material lebih mudah diproses pada tahap berikutnya [9].

Setelah proses annealing, peningkatan kekerasan material dapat dilakukan melalui proses water quenching. Pada metode ini, baja yang telah dipanaskan hingga temperatur austenitisasi didinginkan secara cepat menggunakan media air sehingga menghasilkan laju pendinginan yang tinggi [10]. Pendinginan cepat tersebut menghambat proses difusi karbon dan mendorong terbentuknya struktur martensit dengan tingkat kekerasan yang tinggi [11]. Pembentukan martensit sangat dipengaruhi oleh laju pendinginan selama proses quenching, sehingga media pendingin menjadi salah satu faktor penting dalam menentukan sifat akhir material [12].

Meskipun mampu meningkatkan kekerasan secara signifikan, struktur martensit yang terbentuk setelah quenching umumnya bersifat getas dan mengandung tegangan sisa yang tinggi. Oleh karena itu, diperlukan proses tempering untuk meningkatkan sifat mekanik

material. Tempering dilakukan dengan memanaskan kembali baja pada temperatur di bawah temperatur kritis selama waktu tertentu [13]. Selama proses tersebut terjadi relaksasi tegangan sisa dan dekomposisi sebagian martensit menjadi martensit temper yang lebih stabil [14]. Struktur martensit temper memiliki kombinasi sifat kekerasan dan ketangguhan yang lebih baik sehingga lebih sesuai untuk diaplikasikan pada komponen yang menerima beban kerja dinamis [15].

Transformasi fasa yang terjadi selama proses annealing, water quenching, dan tempering berpengaruh langsung terhadap perubahan sifat mekanik baja AISI 1045. Pendinginan lambat pada annealing menghasilkan dominasi struktur ferit dan perlit, sedangkan pendinginan cepat pada quenching menghasilkan martensit yang lebih keras. Setelah dilakukan tempering, struktur martensit mengalami perubahan menjadi martensit temper yang memiliki keseimbangan antara kekerasan dan ketangguhan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan antara perlakuan panas, transformasi fasa, dan perubahan kekerasan menjadi penting dalam pengembangan material untuk kebutuhan industri.

Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada pengaruh quenching atau kombinasi quenching dan tempering terhadap sifat mekanik baja AISI 1045. Namun, kajian yang membahas perubahan struktur mikro dan kekerasan secara berurutan, mulai dari kondisi annealing, water quenching, hingga tempering dalam satu rangkaian perlakuan panas masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh perlakuan panas annealing, water quenching, dan tempering terhadap transformasi fasa serta kekerasan baja karbon sedang AISI 1045 melalui pengamatan metalografi dan pengujian kekerasan mikro Vickers. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai hubungan antara perubahan struktur mikro dan sifat mekanik material sebagai dasar pengembangan proses perlakuan panas untuk aplikasi teknik dan industri.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh perlakuan panas annealing, water quenching, dan tempering terhadap transformasi fasa serta kekerasan baja karbon sedang AISI 1045. Metode eksperimen dipilih karena mampu memberikan data yang akurat mengenai perubahan struktur mikro dan sifat mekanik material akibat perlakuan panas yang diberikan. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Pengujian Material Workshop Teknik Mesin, Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan.

Tahapan penelitian meliputi persiapan material, preparasi spesimen, proses perlakuan panas, pengamatan struktur mikro, pengujian kekerasan mikro Vickers, serta analisis data hasil pengujian. Seluruh tahapan dilakukan secara sistematis untuk memperoleh hasil penelitian yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Pengujian Material, Workshop Teknik Mesin Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan. Laboratorium ini dipilih karena memiliki fasilitas yang memadai untuk pelaksanaan proses perlakuan panas, preparasi metalografi, pengamatan struktur mikro, serta pengujian kekerasan material.

Kegiatan penelitian meliputi proses persiapan spesimen, perlakuan panas menggunakan muffle furnace, preparasi metalografi, pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik, serta pengujian kekerasan menggunakan alat Micro Vickers Hardness Tester. Seluruh rangkaian penelitian dilakukan sesuai dengan prosedur laboratorium dan standar pengujian material yang berlaku.

Material dan Peralatan Penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon sedang AISI 1045. Material tersebut dipilih karena banyak digunakan dalam bidang manufaktur dan permesinan serta memiliki kemampuan untuk mengalami transformasi fasa akibat perlakuan panas. Kandungan karbon yang berada pada kisaran 0,45% memungkinkan terbentuknya berbagai fasa, seperti ferrite, pearlite, martensite, dan tempered martensite yang dapat memengaruhi sifat mekanik material.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi mesin pemotong spesimen, mesin grinding dan polishing, muffle furnace sebagai media pemanasan, bak pendingin berisi air sebagai media quenching, mikroskop optik untuk pengamatan struktur mikro, serta alat Micro Vickers Hardness Tester untuk pengujian kekerasan. Selain itu, digunakan pula bahan pendukung berupa kertas amplas silikon karbida berbagai ukuran grit, pasta alumina untuk polishing, alkohol, serta larutan Nital 2% sebagai bahan etsa metalografi.

Preparasi Spesimen

Preparasi spesimen dilakukan sebagai tahap awal sebelum perlakuan panas dan pengujian material. Baja AISI 1045 dipotong sesuai ukuran yang dibutuhkan untuk pengamatan metalografi dan pengujian kekerasan. Pemotongan dilakukan dengan hati-hati untuk meminimalkan perubahan struktur mikro akibat panas yang timbul selama proses pemotongan.

Setelah proses pemotongan selesai, permukaan spesimen dipersiapkan melalui proses grinding menggunakan kertas amplas silikon karbida secara bertahap. Pengamplasan dilakukan mulai dari grit 200, 400, 600, 800, 1000, 1500, hingga 2000. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan goresan kasar dan menghasilkan permukaan yang lebih halus.

Tahap berikutnya adalah polishing menggunakan kain beludru dan pasta alumina hingga diperoleh permukaan spesimen yang halus dan mengilap (mirror finish). Permukaan yang baik sangat diperlukan agar pengamatan struktur mikro dan pengujian kekerasan dapat dilakukan secara akurat.

Proses Perlakuan Panas

Perlakuan panas diawali dengan proses annealing. Spesimen dimasukkan ke dalam muffle furnace dan dipanaskan hingga mencapai temperatur 800°C. Setelah temperatur tercapai, spesimen ditahan selama 2 jam (holding time) untuk memberikan kesempatan terjadinya homogenisasi struktur mikro. Selanjutnya, spesimen didinginkan secara perlahan hingga mencapai suhu ruang. Setelah proses annealing selesai, spesimen kembali dipanaskan hingga temperatur austenitisasi 800 °C dengan waktu penahanan selama 2 jam. Temperatur tersebut dipilih karena berada pada daerah pembentukan austenit pada baja karbon sedang AISI 1045, sehingga memungkinkan transformasi fasa secara optimal.

Spesimen yang telah mencapai temperatur austenitisasi kemudian dikeluarkan dari furnace dan segera dicelupkan ke dalam media pendingin berupa air pada suhu ruang. Pendinginan cepat menggunakan media air bertujuan menghasilkan laju pendinginan yang tinggi sehingga terbentuk struktur martensit yang memiliki tingkat kekerasan lebih tinggi

dibandingkan dengan struktur awal material. Tahap selanjutnya adalah proses tempering. Spesimen hasil quenching dipanaskan kembali pada temperatur 300 °C selama 15 menit. Setelah waktu penahanan tercapai, spesimen didinginkan dengan udara bebas hingga mencapai suhu ruang. Perlakuan tempering dilakukan untuk mengurangi tegangan sisa yang terbentuk selama proses quenching serta meningkatkan ketangguhan material.

Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui perubahan fasa yang terjadi akibat perlakuan panas. Sebelum dilakukan pengamatan, spesimen terlebih dahulu dipreparasi kembali melalui proses grinding dan polishing ringan untuk membersihkan lapisan oksida yang terbentuk selama proses pemanasan.

Permukaan spesimen kemudian dietsa menggunakan larutan Nital 2% yang terdiri atas campuran asam nitrat dan alkohol. Proses etsa bertujuan untuk menampakkan batas butir dan struktur mikro material sehingga dapat diamati dengan jelas menggunakan mikroskop optik.

Pengamatan dilakukan pada kondisi awal material, setelah proses quenching, dan setelah proses tempering dengan variasi perbesaran 20×, 50×, dan 100×. Hasil pengamatan digunakan untuk mengidentifikasi perubahan struktur mikro yang terjadi selama proses perlakuan panas.

Pengujian Kekerasan Mikro Vickers

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Micro Vickers Hardness Test. Pengujian dilakukan pada spesimen hasil tempering dengan beban sebesar 200 gf dan waktu penekanan (dwell time) selama 10 detik.

Pengambilan data dilakukan pada tiga titik pengujian yang berbeda untuk memperoleh hasil yang lebih representatif. Setiap titik pengujian menghasilkan bekas injakan berbentuk piramida yang kemudian diukur panjang diagonalnya. Nilai kekerasan Vickers dihitung berdasarkan panjang diagonal bekas injakan tersebut dan dinyatakan dalam satuan HV (Vickers Hardness).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Transformasi Fasa Berdasarkan Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro (metalografi) merupakan salah satu parameter kritis dalam teknik material untuk memahami korelasi antara siklus termal yang diaplikasikan dan perubahan fasa internal yang terjadi pada material. Pada penelitian ini, material uji yang digunakan adalah baja karbon sedang AISI 1045, yang secara luas diaplikasikan dalam komponen permesinan karena respons termal rekayasa yang sangat baik.

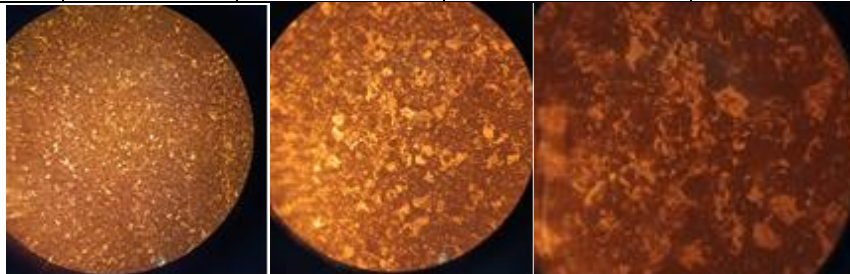
Rangkaian proses preparasi spesimen dilakukan secara ketat melalui tahapan grinding menggunakan kertas amplas silikon karida secara bertahap, mulai dari tingkat kekasaran grit 200, 400, 600, 800, 1000, hingga mencapai grit 2000 untuk menghilangkan goresan makro pada permukaan. Proses kemudian dilanjutkan dengan polishing menggunakan kain beludru (velvet) yang dikombinasikan dengan suspensi alumina (Al_2O_3) berukuran submikron hingga diperoleh kondisi permukaan yang bebas goresan dan reflektif seperti cermin (mirror finish). Guna memunculkan batas butir (grain boundaries) serta membedakan konstituen fasa secara kontras di bawah mikroskop optik metalografi Olympus, permukaan spesimen dietsa secara kimiawi menggunakan larutan Nital 2% (campuran 2% asam nitrat HNO_3 pekat dalam 98% alkohol/etanol) dengan waktu kontak (etching time) berkisar antara 5

hingga 10 detik.

Alur evolusi dan transformasi fasa yang terjadi selama rangkaian eksperimen perlakuan panas (heat treatment) pengerasan diklasifikasikan ke dalam tiga tahapan kondisi sampel utama yang disajikan secara sistematis pada Tabel 3.1.

Tabel 1 Kondisi Spesimen Pengamatan Struktur Mikro

No	Kode Sampel	Kondisi Material	Parameter Perlakuan Panas	Tujuan Metalurgi
1	Ms 1 Tahap 1	Raw Material (Sebelum Dipanggang)	Tanpa perlakuan panas (Kondisi dasar as-received produk manufaktur)	Mengetahui karakteristik fasa awal bawaan pabrik sebagai dasar perbandingan.
2	Ms 2 Tahap 2	Post-Quenching (Setelah Dipanggang I)	Pemanasan austenitisasi 800°C, holding time 2 jam, dicelup cepat (quenching) ke media air	Mengubah fasa austenit menjadi martensit murni yang keras melalui transformasi tanpa difusi.
3	Ms 3 Tahap 3	Post-Tempering (Setelah Dipanggang II)	Quenching + Pemanggang kembali 300°C, holding time 15 menit, pendinginan udara	Mereduksi tegangan sisa internal dan meningkatkan ketangguhan (toughness) material.



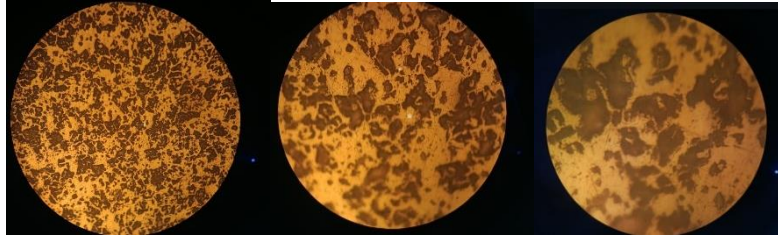
Gambar 1 Struktur Mikro Baja AISI 1045 Kondisi Awal Sebelum Dipanggang

Berdasarkan hasil tangkapan mikroskop optik dengan perbesaran tinggi pada sampel kondisi awal sebelum dipanggang (Gambar 3.1), struktur mikro baja AISI 1045 memperlihatkan morfologi dual fasa konvensional yang didominasi oleh fasa Pearlite (ditunjukkan oleh area matriks bertekstur gelap/lamellar cokelat tua) dan fasa Ferrite (ditunjukkan oleh area berwarna terang/keemasan). Dengan kandungan karbon nominal sekitar 0,45% berat, baja AISI 1045 termasuk dalam kategori baja hipoeutektoid.

Secara termodinamika, fasa ferrite (α) terbentuk terlebih dahulu saat pendinginan dari fase cair melewati garis temperatur kritis A^3 hingga menyusuri batas butir austenit induk (prior austenite grain boundaries) menjadi proeutectoid ferrite. Fasa ferrite memiliki struktur kristal Body-Centered Cubic (BCC) dengan kelarutan karbon yang sangat rendah (maksimal 0,022% pada suhu 727°C), sehingga bersifat lunak dan ulet, namun memiliki kekuatan

mekanis yang rendah.

Sebaliknya, fasa pearlite merupakan struktur lamelar mikro yang terdiri dari lapisan selang-seling antara ferrite dan cementite (Fe_3C) yang terbentuk secara serentak ketika temperatur material mencapai titik eutektoid (727°C). Karbida besi atau cementite bersifat keras dan getas, sehingga keberadaan fasa pearlite kasar yang dominan pada raw material ini memberikan kontribusi utama terhadap batas kekuatan mekanis bawaan material komersial, menjadikannya mudah dikerjakan secara mekanis (machinability), namun belum optimal dalam menahan beban gesek ekstrem.



Gambar 2 Struktur Mikro Baja AISI 1045 Setelah Tahap Akhir Tempering

Transformasi fasa drastis terjadi setelah material dipanaskan hingga temperatur austenitisasi 800°C . Pada temperatur ini, seluruh matriks kristal telah berubah menjadi fasa tunggal Austenit (γ) dengan struktur Face-Centered Cubic (FCC), di mana atom karbon larut secara interstisial dalam jumlah besar. Penahanan panas (holding time) selama 2 jam bertujuan untuk memberikan waktu bagi difusi atom karbon agar terdistribusi secara homogen dalam sel satuan kristal austenit. Ketika spesimen dikeluarkan dan langsung dicelupkan secara kejut ke dalam media air (water quenching), laju pendinginan ekstrem memaksa material melewati temperatur kritis pembentukan fasa perlit maupun ferit dalam diagram Time-Temperature-Transformation (TTT).

Ketiadaan waktu bagi atom karbon untuk berdifusi keluar menyebabkan transformasi berlangsung secara diffusionless (tanpa difusi) melalui pergeseran geser (shear deformation) kisi kristal secara kolektif. Kisi FCC austenit runtuh secara paksa menjadi struktur Body-Centered Tetragonal (BCT) yang tegang, yang dikenal sebagai fasa martensit. Fasa martensit murni (Ms_2 Tahap 2) memiliki kerapatan dislokasi yang sangat tinggi dan tingkat tegangan internal yang masif, sehingga sangat keras namun memiliki sifat kegetasan (brittle) yang ekstrem, sehingga rentan mengalami quenching crack (retak celup).

Guna mengeliminasi kegetasan ekstrem tersebut tanpa mengorbankan kekuatan struktural secara drastis, spesimen segera dimasukkan kembali ke dalam tungku untuk menjalani proses tempering pada suhu 300°C selama 15 menit. Energi termal yang disuplai selama proses tempering memicu dekomposisi parsial struktur BCT martensit yang jenuh. Atom karbon yang terperangkap secara paksa mulai bermigrasi dan berdifusi keluar pada skala atomik untuk membentuk endapan karbida halus (karbida-e atau sementit transisi), sedangkan fase BCT secara perlahan melandai kembali menuju struktur kristal BCC yang lebih stabil.

Hasil pengamatan mikroskopis akhir pada Gambar 3.2 secara visual mengonfirmasi terbentuknya fasa Tempered Martensite (Martensit Temper). Morfologi jarum-jarum tajam (acicular) khas martensit mentah telah melunak menjadi struktur matriks berserat halus rapat, homogen, dan terdistribusi merata di seluruh bidang penampang spesimen. Batas butirnya tampak lebih teratur dan halus jika dibandingkan dengan fasa awal ferrite-pearlite kasar bawaan pabrik.

Tabel 2 Identifikasi Evolusi Struktur Mikro Baja AISI 1045

No	Kode Sampel	Struktur Fasa Dominan	Morfologi & Karakteristik Butir	Sifat Mekanis Representatif	Sifat Fisik Kristal
1	Ms 1 Tahap 1	Ferrite + Pearlite	Struktur lamelar selang-seling, butiran acak dan cenderung kasar, batas butir tebal	Lunak, memiliki keuletan tinggi, ketahanan aus rendah	Struktur dasar campuran BCC (α) dan Ortorombik (Fe_3C)
2	Ms 2 Tahap 2	Martensite	Struktur jarum tajam (acicular structure), sangat rapat, distorsi kisi masif	Kekerasan mekanis ekstrem, sangat getas (brittle)	Struktur kristal Body-Centered Tetragonal (BCT) jenuh
3	Ms 3 Tahap 3	Tempered Martensite	Struktur serat jarum halus, sangat homogen, teratur, endapan karbida sub-mikron	Keras, stabil, tegangan sisa rendah, ketangguhan (toughness) meningkat	Struktur kristal BCC stabil disertai dispersi karbida halus

Analisis Kekerasan Mikro Vickers

Karakterisasi sifat mekanis permukaan spesimen pasca-proses perlakuan panas akhir dilakukan menggunakan metode Micro Vickers Hardness Test dengan alat Microhardness Tester. Pengujian kekerasan mikro Vickers didasarkan pada penekanan indenter intan berbentuk piramida siku-siku dengan sudut permukaan yang berhadapan sebesar 136° . Parameter pengujian ditetapkan secara konstan menggunakan beban tekan uji (test load, P) sebesar 200 gf (setara dengan 1,961 N) dengan durasi penekanan (dwell time) selama 10 detik. Pengambilan data jejak injakan (indentation) dilakukan pada tiga titik koordinat yang berbeda secara terpisah untuk mengevaluasi tingkat homogenitas mekanis pada lapisan permukaan material.

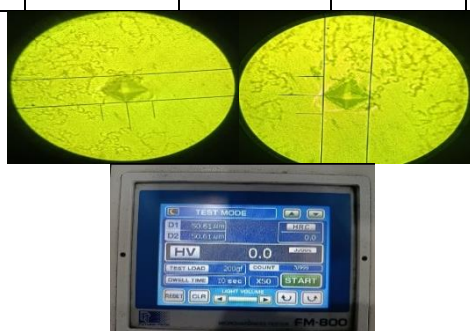
Secara matematis, nilai kekerasan Vickers (HV) dihitung berdasarkan rasio beban uji terhadap luas permukaan jejak injakan berbentuk piramida tersebut, yang dirumuskan melalui persamaan standar berikut:

$$HV = \frac{2P \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2} = \frac{1,8544 \cdot P}{d^2}$$

Di mana P adalah beban uji dalam satuan kilogram-force (kgf) dan d merupakan nilai rata-rata panjang dua garis diagonal jejak injakan (D_1 dan D_2) dalam satuan milimeter (mm). Data kuantitatif hasil pengukuran diagonal jejak injakan beserta nilai kekerasan konkrit yang diperoleh dari alat uji disajikan secara rinci pada Tabel 3.3.

Tabel 3 Hasil Pengujian Kekerasan Mikro Vickers Sampel Akhir

Titik Pengujian	Panjang Diagonal 1	Panjang Diagonal 2	Rata-rata Diagonal 1 (d)	Nilai Kekerasan Akhir (HV)
Titik 1	50,61	44,95	47,78	162,4 HV
Titik 2	51,91	51,91	51,91	137,6 HV
Titik 3	53,61	54,38	54,00	127,4 HV
Rata rata				142,5 HV



Gambar 3 Grafik Distribusi Kekerasan Mikro Vickers pada 3 Titik Uji

Berdasarkan data kuantitatif pada Tabel 3.3 dan visualisasi grafik pada Gambar 3.3, terlihat adanya variasi nilai kekerasan mikro yang cukup fluktuatif pada permukaan spesimen baja AISI 1045 pasca-tempering. Nilai kekerasan mekanis permukaan tertinggi dicapai pada Titik 1, yaitu sebesar 162,4 HV. Secara fisis-mekanis, tingginya nilai kekerasan ini berbanding lurus dengan kecilnya luas penampang jejak injakan, yang ditunjukkan oleh nilai rata-rata diagonal terkecil sebesar 47,78.

Pada koordinat pengujian berikutnya, nilai kekerasan terukur mengalami penurunan secara bertahap. Pada Titik 2, nilai kekerasan tercatat sebesar 137,6 HV dengan geometri diagonal yang simetris sempurna (51,91 pada kedua sisi). Nilai kekerasan mencapai titik terendah pada Titik 3, yaitu sebesar 127,4 HV, yang berkorelasi dengan pembentukan dimensi rata-rata diagonal indenter terbesar sebesar 54,00 akibat ketidakseimbangan penetrasi lokal (53,61 vs 54,38). Melalui akumulasi data dari ketiga koordinat pengukuran tersebut, diperoleh nilai rata-rata kekerasan mikro permukaan total sebesar 142,5 HV.

Variasi angka kekerasan pada setiap titik injakan indenter ini mengindikasikan bahwa distribusi tingkat kekerasan mekanis pada permukaan spesimen hasil rekayasa termal belum sepenuhnya homogen. Fenomena heterogenitas data ini berkaitan erat dengan karakteristik pengujian kekerasan berskala mikro (microhardness test). Karena beban yang diterapkan sangat rendah (200 gf), kedalaman penetrasi indenter intan ke dalam material berkisar pada skala mikron yang sangat dangkal. Akibatnya, geometri injakan indenter menjadi sangat sensitif terhadap konstituen fasa lokal yang tepat berada di bawah titik tekan indenter. Jika indenter menekan area yang dominan berisi karbida atau sisa jarum martensit temper, nilai kekerasan akan melonjak (seperti pada Titik 1). Sebaliknya, jika indenter menekan area

batas butir atau mikro-fasa ferit yang melunak kembali, resistansi material terhadap deformasi plastis akan menurun, sehingga menghasilkan jejak injakan yang lebih lebar dan nilai kekerasan yang lebih rendah (seperti pada Titik 3).

Hubungan Perubahan Fasa Terhadap Karakteristik Kekerasan Material

Evolusi nilai sifat mekanis berupa kekerasan permukaan pada material baja karbon sedang AISI 1045 memiliki korelasi kausalitas metalurgi yang mutlak terhadap transformasi fasa konstituen mikro selama siklus termal berlangsung. Secara teoritis, peningkatan kekerasan pada baja pasca-quenching dikendalikan oleh mekanisme penguatan larutan padat jenuh (solid solution strengthening) serta tingginya kerapatan dislokasi di dalam sel satuan kristal BCT martensit yang terdistorsi. Ketika proses dilanjutkan dengan tempering pada suhu 300°C, terbentuk fasa tempered martensite yang berstruktur serat jarum halus (seperti yang terdokumentasi pada Gambar 3.2) dan secara mekanis berfungsi sebagai penghalang (pinning effect) yang efektif untuk menahan laju pergeseran dislokasi antarbutir saat menerima beban tekan eksternal dari indenter Vickers. Ukuran butiran yang halus dan homogen meningkatkan luas total batas butir per satuan volume, yang berdasarkan Hukum Hall-Petch akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan material secara keseluruhan.

Namun, terdapat anomali data eksperimen yang cukup signifikan dalam penelitian ini. Nilai rata-rata kekerasan riil laboratorium yang diperoleh sebesar 142,5 HV berada jauh di bawah rentang teoritis kekerasan baja AISI 1045 hasil quenching dan tempering pada temperatur 300°C, yang idealnya berkisar antara 300 HV hingga 450 HV. Munculnya perbedaan nilai kekerasan lokal yang fluktuatif di tiap titik (162,4\ HV hingga 127,4\ HV) serta rendahnya akumulasi nilai rata-rata tersebut dianalisis disebabkan oleh dua faktor metalurgi dan kesalahan teknis operasional di laboratorium sebagai berikut:

1. Efek Jeda Waktu Pencelupan (Quenching Delay):

Dimensi spesimen pengujian yang relatif kecil menyebabkan kapasitas penyimpanan panas internalnya rendah, sehingga laju pelepasan panas secara konveksi ke udara bebas berlangsung sangat cepat ketika spesimen dikeluarkan dari muffle tungku pemanas. Adanya jeda waktu (time delay) saat memindahkan spesimen secara manual menggunakan tang penjepit menuju bak media air pendingin memicu penurunan temperatur spesimen secara mendadak sebelum menyentuh air. Penurunan suhu di udara terbuka ini menyebabkan temperatur spesimen sempat turun di bawah garis kritis temperatur austenitisasi (A_1). Akibatnya, fasa austenit yang telah terbentuk secara homogen selama 2 jam tidak memiliki energi dorong termal yang cukup untuk bertransformasi menjadi martensit penuh melalui difusi. Sebagian besar fasa austenit justru mengalami transformasi balik yang normal (berdifusi) menjadi fasa non-martensitis, seperti fasa ferrite atau pearlite halus baru. Karena kuantitas fasa martensit murni yang terbentuk saat pendinginan air sangat minim dan didominasi oleh fasa lunak, proses tempering selanjutnya hanya mematangkan fasa campuran yang pada dasarnya sudah melunak, sehingga secara langsung menurunkan nilai kekerasan akhir material. Ketidakseragaman laju penurunan suhu lokal pada permukaan spesimen selama jeda pemindahan ini pula yang menjadi pemicu utama fluktuasi perbedaan nilai kekerasan yang tajam antara Titik 1, Titik 2, dan Titik 3.

2. Fenomena Dekarburisasi Lapisan Permukaan (Surface Decarburization):

Proses penahanan panas (holding time) dengan durasi mencapai 2 jam pada temperatur tinggi 800°C di dalam ruangan tungku muffle konvensional dilakukan dalam kondisi atmosfer terbuka tanpa perlindungan gas mulia (inert protective gas seperti argon atau

nitrogen). Kondisi ini memicu reaksi kimia oksidasi eksometalurgi yang intens antara atom karbon pada lapisan kulit terluar baja dan molekul oksigen bebas di lingkungan tungku. Reaksi ini membentuk gas karbon monoksida (CO) atau karbon dioksida (CO₂) yang menguap ke udara, sehingga secara progresif menyebabkan hilangnya atau berkurangnya kadar unsur karbon secara drastis pada permukaan luar spesimen baja AISI 1045. Karbon merupakan unsur pepadu utama yang mengendalikan pembentukan kekerasan martensit; tanpa adanya atom karbon yang mengunci kisi kristal, baja akan kembali ke sifat dasarnya yang lunak. Mengingat metode pengujian kekerasan mikro Vickers diaplikasikan dengan pembebanan yang sangat rendah (200 gf), ujung indenter intan hanya melakukan penetrasi dangkal hingga kedalaman beberapa mikron pada lapisan kulit terluar baja yang telah mengalami dekarburisasi parah. Akibatnya, nilai kekerasan yang terekam dan terbaca oleh layar mesin secara semu merepresentasikan area permukaan yang miskin karbon (lunak), meskipun bagian inti dalam material mungkin memiliki fasa martensit temper yang keras sempurna.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa rekayasa termal berupa siklus perlakuan panas water quenching dan tempering memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap pengendalian fasa mikrostruktur baja karbon sedang AISI 1045. Namun, keberhasilan pencapaian sifat mekanis teoritis di lapangan sangat bergantung pada presisi pengendalian parameter teknis laboratorium, terutama pada minimalisasi durasi quenching delay serta proteksi atmosfer pemanasan untuk mencegah dekarburisasi eksternal.

KESIMPULAN

Penerapan siklus perlakuan panas berupa pengerasan melalui metode water quenching dari temperatur austenitisasi 800°C dengan waktu penahanan (holding time) selama 2 jam, dilanjutkan dengan proses tempering pada temperatur 300°C selama 15 menit, terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap transformasi fasa dan mikrostruktur baja karbon sedang AISI 1045. Hal ini ditandai secara visual oleh perubahan total fasa awal ferrite-pearlite kasar komersial menjadi struktur fasa akhir berupa tempered martensite yang memiliki morfologi berserat jarum halus, rapat, dan terdistribusi secara homogen.

Karakteristik sifat mekanis permukaan spesimen hasil perlakuan panas akhir menunjukkan sifat yang heterogen pada setiap titik pengujian koordinat permukaan, dengan capaian nilai kekerasan mikro Vickers sebesar 162,4 HV pada Titik 1, 137,6 HV pada Titik 2, dan 127,4 HV pada Titik 3, sehingga menghasilkan nilai rata-rata kekerasan mikro permukaan total sebesar 142,5 HV.

Penyimpangan nilai kekerasan aktual hasil laboratorium yang berada di bawah rentang standar teoritis fasa martensit temper disebabkan dominan oleh faktor kesalahan teknis berupa quenching delay (jeda waktu pemindahan sampel ke media celup) yang menurunkan temperatur kritis pembentukan fasa martensit murni, serta terjadinya fenomena dekarburisasi permukaan akibat durasi pemanasan yang lama tanpa atmosfer pelindung gas inert, sehingga menurunkan kadar karbon pada lapisan permukaan tempat dilakukannya pengujian penetrasi indenter Vickers.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tama, B. W., & Rosidah, A. A. (2024). Influence of quenching media and holding time on hardness and microstructure of AISI 1045. *Jurnal Teknik Mesin*, 14(1), 8– 12.

- [2] Pangaribawa, M. R., Purboputo, P. I., Wicaksono, B. F., Darmawan, A. S., & Sugito, B. (2024). Effect of quenching and tempering medium carbon steel AISI 1045 on microstructure and hardness. *AIP Conference Proceedings*, 2838(1).
- [3] Martins, C. O. D., Costa Junior, J. C. B., Biehl, L. V., & Medeiros, J. L. B. (2026). Applying nondestructive ultrasonic technique in the metrological control of heat treatment of AISI 1045 steels. *Metrology*, 6(1), 15.
- [4] Kumar, P., & Kumar, D. (2021). Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of AISI 1045 steel. *Materials Today: Proceedings*, 45(6), 5097– 5101.
- [5] Mudda, S., Hegde, A., Sharma, S., & Gurumurthy, B. M. (2026). A review of the latest developments regarding the heat treatment effects on hardness, impact toughness, and microstructure in AISI 1040, 4140, and 4340 medium carbon structural steels. *Discover Materials*, 6, 50.
- [6] Vieira, E. D. R., Biehl, L. V., Medeiros, J. L. B., Costa, V. M., & Macedo, R. J. (2021). Evaluation of the characteristics of an AISI 1045 steel quenched in different concentrations of polymer solutions of polyvinylpyrrolidone. *Scientific Reports*, 11(1), 1313.
- [7] Wibowo, A., Widiastuti, H., Arifin, N. L., & Aryanto, N. P. (2021). Pengaruh holding time annealing terhadap perubahan mikrostruktur baja struktur. *Jurnal Integrasi*, 13(1), 46– 52.
- [8] Hakiki, N., Suryana, & Sudiro, T. (2021). Pengaruh annealing terhadap fasa dan mikrostruktur baja karbon. *Journal Furnace*, 4(2), 45– 53.
- [9] Dhami, H. S., Kumar, N. D., Thomas, T., & Chakravarthy, P. (2022). Microstructural characterization and mechanical property evaluation of martensitic steel subjected to heat treatment. *Materials Science Forum*, 1050, 112– 120.
- [10] Nursanni, B., Jahro, I. S., Efendi, H., Januariyansah, S., Salim, M. A., & Arianda, D. (2026). The effect of quenching and tempering on the hardness of medium carbon steel: AISI 1045. *Proceedings of the International Conference on Innovation in Education, Science, and Culture (ICIESC 2025)*.
- [11] Xia, P., Vercruysse, F., Celada-Casero, C., Verleysen, P., & Petrov, R. H. (2021). Effect of alloying and microstructure on formability of advanced high-strength steels processed via quenching and partitioning. *Materials Science and Engineering A*, 812, 141080.
- [12] Martins, C. O. D., Costa Junior, J. C. B., & Biehl, L. V. (2026). Ultrasonic characterization of heat-treated AISI 1045 steels. *Metrology*, 6(1), 15– 27.
- [13] Rifnaldy, R., & Mulianti, M. (2021). Pengaruh perlakuan panas hardening dan tempering terhadap kekerasan baja AISI 1045. *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 3(2), 1– 7.
- [14] Weriono, W. (2021). Pengaruh media pendingin dalam proses temper-quench terhadap kekuatan impak dan kekerasan AISI 1045. *Journal of Mechanical Engineering Manufactures Materials and Energy*, 5(1), 1– 9.
- [15] Hariningsih, H., Daryanto, T., & Lutiyaatmi, L. (2023). Pengaruh variasi media quenching dan tempering terhadap struktur mikro dan kekerasan baja AISI 1045. *Creative Research in Engineering (CERIE)*, 2(2), 52– 62.