

Pengaruh Variasi Temperatur Annealing terhadap Nilai Kekerasan Rockwell Baja AISI 1045

Alfharizi Riznu Ritonga , Muhammad Hasan Albana

Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknik Mesin

Jl. Ahmad Yanni, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

E-mail: : alfhariziritonga@gmail.com

Abstrak

Baja karbon sedang AISI 1045 banyak digunakan pada komponen permesinan struktural, namun tingkat kekerasan awalnya yang tinggi sering menyulitkan proses pengerjaan lanjutan (machinability). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur perlakuan panas full annealing terhadap penurunan nilai kekerasan baja AISI 1045. Metode penelitian dilakukan dengan memanaskan spesimen di dalam tungku (furnace) pada temperatur 800°C, 850°C, dan 900°C menggunakan holding time tunggal selama 90 menit, dilanjutkan dengan pendinginan lambat di dalam tungku (furnace cooling). Pengujian kekerasan material diukur menggunakan metode Rockwell B (HRB). Hasil pengujian menunjukkan bahwa full annealing secara konstan menurunkan kekerasan material dari kondisi awal (raw material) sebesar 86,40 HRB. Nilai rata-rata kekerasan pasca-perlakuan turun berturut-turut menjadi 75,76 HRB pada temperatur 800°C, 73,80 HRB pada temperatur 850°C, dan mencapai nilai terendah sebesar 72,10 HRB pada temperatur 900°C. Ditinjau dari aspek metalurgi, penurunan kekerasan ini dipicu oleh pelepasan tegangan dalam serta pertumbuhan butir ferit dan perlit yang melunak pada temperatur tinggi. Kesimpulan penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pemanasan berbanding lurus dengan tingkat pelunakan material. Penurunan kekerasan ini secara teoritis berimplikasi positif terhadap peningkatan keuletan (ductility) dan kemudahan permesinan baja AISI 1045 berdasarkan literatur metalurgi.

Kata Kunci: Annealing, AISI 1045, Temperatur Pemanasan, Holding Time, Kekerasan Rockwell.

Abstract

AISI 1045 medium carbon steel is widely used in structural machining components, but its high initial hardness often impedes further processing operations (machinability). This study aims to analyze the effect of temperature variations during the full annealing heat treatment process on the hardness reduction of AISI 1045 steel. The research method was conducted by heating the specimens inside a furnace at temperatures of 800°C, 850°C, and 900°C using a single holding time of 90 minutes, followed by a slow cooling process inside the furnace (furnace cooling). Material hardness testing was measured using the Rockwell B (HRB) method. The test results indicated that full annealing consistently reduced the material hardness from the initial raw material condition of 86.40 HRB. The post-treatment average hardness values sequentially decreased to 75.76 HRB at 800°C, 73.80 HRB at 850°C, and reached the lowest value of 72.10 HRB at 900°C. From the metallurgical perspective, this hardness reduction was triggered by internal stress relief and the growth phenomenon of softened ferrite and pearlite grains at elevated temperatures. The conclusion of this study confirms that higher heating temperatures are directly proportional to the overall softening level of the material, which theoretically yields a positive implication toward enhancing the ductility of AISI 1045 steel.

Keywords: Annealing, AISI 1045, Heating Temperature, Holding Time, Rockwell Hardness

1 Pendahuluan

Baja merupakan logam paduan besi (Fe) dan karbon (C) yang vital dalam manufaktur dan elemen mesin industri. Sifat mekanis baja alami dipengaruhi kadar karbon, semakin tinggi karbon, kekuatan dan kekerasan meningkat namun keuletannya menurun. Industri memanfaatkan proses perlakuan panas (*heat treatment*) berupa pemanasan dan pendinginan terkontrol untuk merekayasa struktur mikro tanpa mengubah komposisi kimia dasarnya sebagainya,[1]

kendala utama material AISI 1045 dalam kondisi awal tingkat kekerasan yang seringkali tidak ideal untuk proses fabrikasi, kekerasan awal yang terlalu tinggi akan menurunkan tingkat machinability dan mempercepat keausan pahat potong, jika kekerasan terlalu rendah, komponen tidak akan mampu menahan aus (*wear resistance*)[2] maka di perlukan proses full annealing pemanasan hingga fase austenit dan pendinginan lambat di dalam tungku untuk melunakkan material, meningkatkan keuletan, dan menghilangkan tegangan sisa agar baja siap memasuki tahap pemesinan.[3]

Tabel 1 Sefesifikasi Material AISI 1045

Unsur kimia	Simbol	Kandungan Standar (%)
Carbon (Karbon)	C	0.43 – 0.50 %
Manganese (Mangan)	Mn	0.60 – 0.90 %
Phosphorus (fosfor)	P	0.040 %
Sulfur (Balerang)	S	0.050 %

Berdasarkan ASTM A29 terkait sefesifikasi Material dan sifat mekanis AISI 1045 kekerasan (*hardness*) 84 – 90 HRB atau setara dengan 170 – 210 HB kekuatan tarik 570 – 700 MPA, permukaan baja tidak terlalu keras, dan termasuk kedalam baja karbon sedang perlakuan panas (*heat treatment*) sangat di butuhkan untuk pelunakan, peningkatan keuletan, pengurangan tegangan sisa, dan tidak merubah sifat asli baja tersebut. [4]

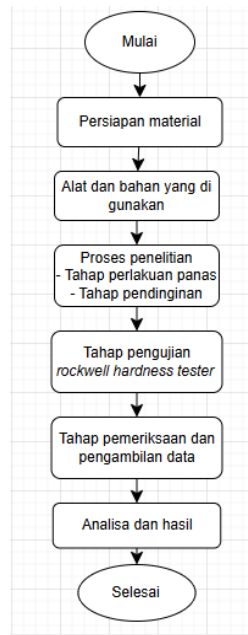
Efektivitas pelunakan lewat full annealing bergantung pada kombinasi suhu pemanasan di atas suhu kritis atas (A_3) dan durasi penahanan (*holding time*). Untuk memastikan transformasi fasa menjadi austenit secara sempurna, temperatur pemanasan dipilih di atas suhu kritis tersebut, yaitu 800°C, 850°C, dan 900°C. Holding time konstan selama 90 menit diterapkan guna menjamin distribusi panas yang homogen dari permukaan hingga ke inti material. Selanjutnya, pengujian kekerasan dilakukan menggunakan Rockwell Hardness Tester karena mampu membaca kedalaman penetrasi secara otomatis, cepat, dan akurat.cepat. [5]

Batasan dari penelitian ini menggunakan material baja karbon AISI 1045, dengan variasi temperatur pemanasan sebesar 800 °C, 850 °C, 900 °C, dengan metode full annealing waktu penahanan (*holding time*) 90 menit, dengan pengujian *rockwell hardness tester*, fokus penelitian terbatas pada nilai perubahan kekerasan mekanis tanpa melakukan analisi komposisi kimia, dan struktur mikro.

Tujuan dari penelitian ini di bagi menjadi 3 ialah :

1. menganalisis pengaruh kombinasi variasi suhu 800 °C, 850 °C, 900 °C terhadap perubahan nilai uji kekerasan baja AISI 1045,
2. membandingkan penurunan nilai kekerasan antara material awal (*raw materia*) dengan material hasil proses *annealing*,
3. menentukan parameter suhu dan yang paling efektif dalam menghasilkan pelunakan material.

2 Metodologi Penelitian



Gambar 1 diagram alir penelitian

Penelitian ini di bagi menjadi 4 tahapan di mulai dari persiapan material baja AISI 1045, pemotongan material menjadi 9 spesimen uji, melakukan perlakuan panas full annealing menggunakan variasi temperatur 800 °C, 850 °C, 900 °C dengan holding time 90 menit, melakukan pendinginan di dalam tungku dan terakhir tahapan pengujian menggunakan rockwell B (HRB).

2.1 Ovservasi lokasi pengujian

Pengujian di lakukan di workshop 1 metalurgi politeknik negeri batam menggunakan peralatan utama yang di gunakan meliputi mesin tungku pemanas (*furnace*) untuk proses annealing dan alat *rockwell hardness tester* sebagai insrumen pengukuran nilai kekerasan material. standar pengujian yang di acu adalah ASTM E18 (*standard test methods for rockwell hardness of metallic materials*)[6]

2.2 Persiapan material

Pada Gambar 2 dapat dilihat tentang drawing 2D spesimen yang akan di uji, adapun ukuran dimensi yaitu diameter 10mm, ketinggian 20mm, kemudian dipotong menjadi 9 spesimen, dan telah memenuhi kelayakan ruang uji anvil rockwell B, validasi spesifikasi material dilakukan melalui konfirmasi nilai awal kekerasan *raw material* yang di dibandingkan dengan acuan ASM HandBook sebesar 170 – 210 HBW 84 – 90 HRB sebagai mana di tunjukkan pada pengujian *raw material* 86,40 HRB, serta batasan komposisi kimia berdasarkan ASTM A29 dengan komposisi kimia carbon 0,43 0,50 % dan kadar mangan 0,60 – 0,90 %. [7]

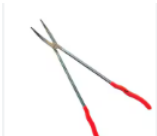


Gambar 2 Spesimen material uji

2.3 Alat dan bahan yang di gunakan

Peralatan yang digunakan disaat persiapan material spesimen uji dan proses pemanasan di dalam tungku pemanas, dan pengujian kekerasan sebelum proses pemanasan dan setelah proses pemanasan sampai dengan hasil akhir pengambilan data hasil pengujian benda kerja.

Tabel 2 Alat dan bahan yang di gunakan

No	Alat dan bahan yang di gunakan	Gambar alat dan bahan	Spesifikasi alat dan bahan
1	Spesimen uji (AISI 1045)		Carbon :0.43 – 0.50 % Mangan : 0.60 – 0.90 % Fosfor : 0,040 % sulfur 0.050 % kekerasan (hardness) 84 – 90 HRB
2	Amplas		Penyiapan permukaan spesimen sebelum uji <i>rockwell</i> Grit : 600, 800, dan 1000
3	Mesin / furnance (tungku pemanas)		Bahan : baja anti-karat (<i>stainless steel</i>) Batas suhu : antara 300°C hingga 1.200°C elemen pemanas : (paduan Fe-Cr-Al), <i>Silicon Carbide</i> (SiC), atau <i>Molybdenum Disilicide</i> (MoSi ₂).
4	Rockwell hardness tester		Mitutoyo Rockwell Hardness Tester, Model HR-400, S/N 300061911, Diversifikasi menggunakan block kalibrasi Blok Set B S/N 90 HRB (Has been verified with Blok Set B Standardized Block, S/N 90 HRB)
5	Stopwatch		Untuk menghitung waktu yang tentukan
6	Sarung tangan tahan panas		Material utama; kulit, alumunium foil (untuk melapisi bagian luar) ketaanan suhu 60 ⁰ C, - 500 ⁰ C
7	Tang penjepit logam		Terbuat dari material baja carbon stell untuk meletakkan spesimen di dalam tungku

8	Caliper		Mengukur dimensi pemotongan spesimen tingkat ketelitian (resolusi) 0,02mm.
9	Mesin pemotong (<i>bandsaw</i>)		Pemotongan material awal (<i>raw material</i>), jenis pisau potong standar untuk <i>medium carbon steel</i>
10	Media pendingin		Material di letakkan ke dalam tungku pemanas dan suhu di turunkan menjadi 30 ⁰ - 100 ⁰ C

2.4 Tahapan penelitian

Penelitian ini dibagi kedalam 4 tahapan yaitu, tahapan perlakuan panas *heat treatment full annealing*, tahap penahan suhu, tahap pendinginan lambat, dan tahapan pengujian kekerasan.

2.4.1 Tahap perlakuan panas full annealing

Sepesimen yang telah siap dimasukkan ke dalam mesin tungku pemanas (*furnace*), proses annealing dilakukan dengan menaikkan suhu tungku secara bertahap hingga mencapai variasi temperatur yang ditentukan, yaitu 800 °C, 850 °C, 900 °C.



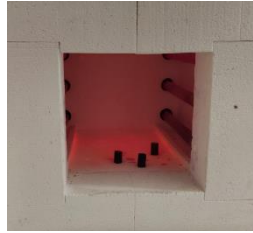
2.4.2 Tahap penahanan suhu (*holding time*)

Setelah mencapai temperatur target masing – masing variasi suhu dipertahankan secara konstan selama waktu penahanan (*holding time*) 90 menit, tahapan ini bertujuan untuk memastikan pemerataan panas yang homogen serta transformasi fasa menjadi austenit sempurna dari permukaan hingga ke inti material



2.4.3 Tahap pendinginan lambat

Setelah masa penahanan suhu (holding time) selesai, mesin furnace dimatikan dan spesimen dibiarkan mendingin secara lambat di dalam tungku yang tertutup rapat (furnace cooling) guna memberikan waktu bagi pembentukan kembali struktur mikro yang lebih lunak. Proses pendinginan di dalam tungku berlangsung selama kurang lebih 15 jam hingga temperatur tungku mencapai $90 - 100^{\circ}\text{C}$, kemudian spesimen dikeluarkan dan dibiarkan mendingin di udara terbuka selama 10 menit hingga mencapai temperatur ruang, sebelum dilakukan proses pengamplasan.



2.5 Tahap pengujian kekerasan (*Rockwell hardness tester*)

Spesimen hasil annealing dan material (*raw material*) di uji tingkat kekerasannya menggunakan alat *rockwel*, pengujian dilakukan sebanyak 3 titik uji pada setiap spesimen untuk memastikan validasi dan kerataan nilai data yang diperoleh.



2.6 Tahap pengambilan data

Pengambilan data nilai kekerasan dilakukan melalui pengukuran langsung pada permukaan spesimen uji menggunakan alat *rockwell hardness tester* skala B (HRB), pada masing – masing variasi temperatur annealing (800°C , 850°C , 900°C) serta material awal (*raw material*), dilakukan pengulangan (*replicates*) pengukuran sebanyak 3 titik uji secara acak, nilai yang terbaca secara otomatis pada instrumen uji untuk setiap titik penetrasi akan langsung dicatat secara manual ke dalam lembar matriks kerja, seluruh hasil perekaman data mentah tersebut dihipunkun menggunakan format tabulasi seperti yang di tunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2 Matriks pengumpulan data uji kekerasan *rockwell*

Suhu	Spesimen	Rata-rata (HRB)	Std dev per spesimen	Rata-rata (HRB)	Std dev variasi suhu	Holding time		
800°C	A					90 Menit		
	B							
	C							
850°C	A						90 Menit	
	B							
	C							
900°C	A							90 Menit
	B							
	C							
Raw material	A							

2.7 Tahap pengolahan data

Data mentah hasil pengukuran kekerasan *rockwell* (HRB) yang telah dihimpun ke dalam matriks pencatatan selanjutnya diproses melalui dua tahap pengolahan statistik deskriptif untuk mendapatkan nilai akhir yang representatif, analisis data hasil pengujian kekerasan dalam penelitian ini dilakukan secara deskriptif berbasis nilai rata – rata tanpa menggunakan uji signifikansi statistik seperti annova.

2.7.1 Perhitungan nilai rata – rata per spesimen

Tahapan pertama dilakukan untuk mencari nilai rata – rata kekerasan dari 3 titik pengulangan (*replicates*) pada masing – masing spesimen tunggal, pengolahan ini menggunakan rumus rata rata

$$\bar{x} \text{ specimen} = \frac{X1+X2+X3}{3} \quad (1)$$

2.7.2 Perhitungan nilai rata – rata total per variasi suhu

Tahapan kedua dilakukan untuk mendapatkan satu nilai kekerasan fiks yang merepresentasikan masing - masing variasi temperatur annealing, nilai fiks ini diperoleh dengan menghitung rata – rata akumulatif dari nilai rata – rata tiga spesimen, pada suhu yang sama rumus yang di gunakan

$$\bar{x} \text{ total} = \frac{XA+XB+XC}{3} \quad (2)$$

3 Analisa Data Dan Pembahasan

Sebelum di lakukan pengujian karakteristik mekanis lebih lanjut, dilakukan pengamatan visual terhadap kondisi fisik spesimen baja karbon sedang AISI 1045, pengamatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan kondisi permukaan material antara kondisi awal (*raw material*) dengan spesimen yang telah mengalami perlakuan panas (*heat treatment*), kondisi fisik permukaan spesimen tersebut.



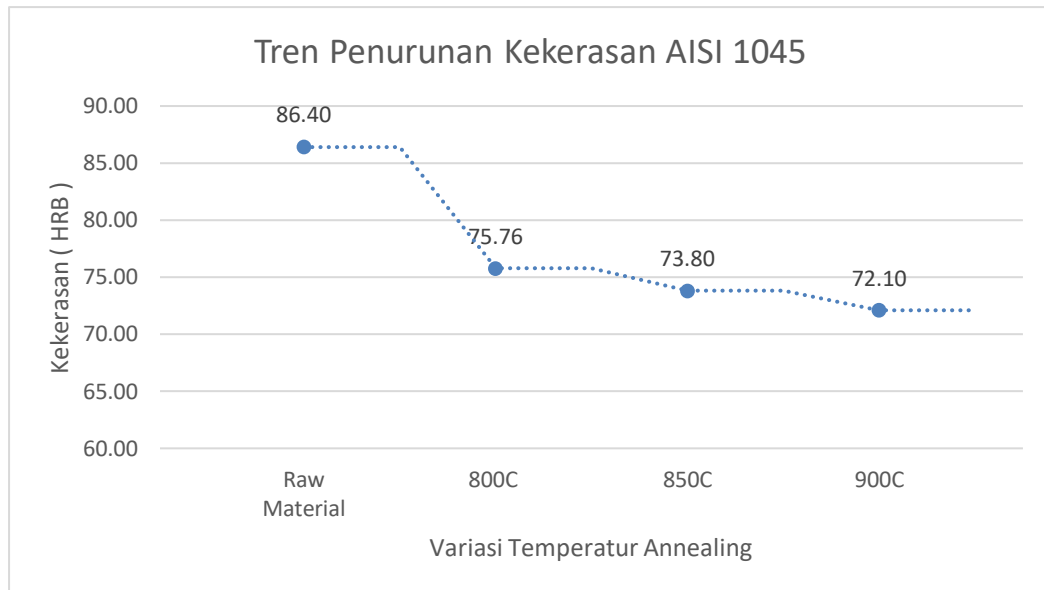
Gambar 5 Kondisi Fisik Permukaan Spesimen Sebelum (*raw material*) Dan Sesudah Perlakuan Panas

Berdasarkan gambar 5, terlihat perbedaan karakteristik visual yang signifikan pada permukaan spesimen sebelum dan sesudah perlakuan panas, kondisi awal material (*raw material*) pada gambar 5(A) menunjukkan permukaan logam yang bersih dan mengkilap setelah melalui proses pemotongan dan pengampelasan. Sebaliknya, pada gambar 5(B), 5(C), 5(D). spesimen yang telah melalui proses *heat treatment* annealing di dalam tungku (*furnace*) dengan waktu penahan (*holding time*) selama 90 menit, menurut (ASM handbook edisi 1998) menunjukkan perubahan warna fisik menjadi kehitaman, disebabkan terjadi akibat adanya reaksi oksidasi termal antara unsur besi (Fe) pada permukaan spesimen dengan oksigen (O_2) yang terkandung di dalam udara tungku selama proses pemanasan temperatur tinggi berlangsung lapisan oksida bertingkat (FeO Fe_3O_4 Fe_2O_3), dimana fase *magnetite* (Fe_3O_4) secara visual memberikan kegelapan pada material yang terbentuk ini mengindikasikan terjadinya interaksi material dengan lingkungan termalnya sebelum spesimen memasuki tahap pengujian kekerasan mekanis.[8]

Tabel 3 Hasil Pengujian Setelah Dan Sebelum Perlakuan Panas (*heat treatment*)

Suhu	Spesimen	Rata-rata (HRB)	Std dev per spesimen	Rata-rata (HRB)	Std dev variasi suhu	Holding time
800°C	A	76.13	1.08	75.76	0.60	90 Menit
	B	76.00	0.17			
	C	75.13	1.31			
850°C	A	74.27	0.42	73.80	0.27	
	B	73.67	0.92			
	C	73.47	0.50			
900°C	A	73.23	0.70	72.10	0.95	
	B	71.57	0.15			
	C	71.50	2.01			
Raw material	A	86.4	0.92	86.40	0.92	

Berdasarkan Tabel 3, proses full annealing terbukti secara konsisten menurunkan kekerasan baja AISI 1045 seiring meningkatnya temperatur. Nilai rata-rata kekerasan tertinggi tercatat pada raw material sebesar 86,40 HRB (SD 0,92 HRB), lalu turun menjadi 75,76 HRB pada 800°C, 73,80 HRB pada 850°C, dan mencapai titik terendah 72,10 HRB pada 900°C. Rendahnya nilai standar deviasi pada setiap suhu (0,60; 0,27; dan 0,95 HRB) mengonfirmasi bahwa transformasi fasa ferit dan perlit kasar telah terjadi secara homogen di seluruh spesimen..[9]



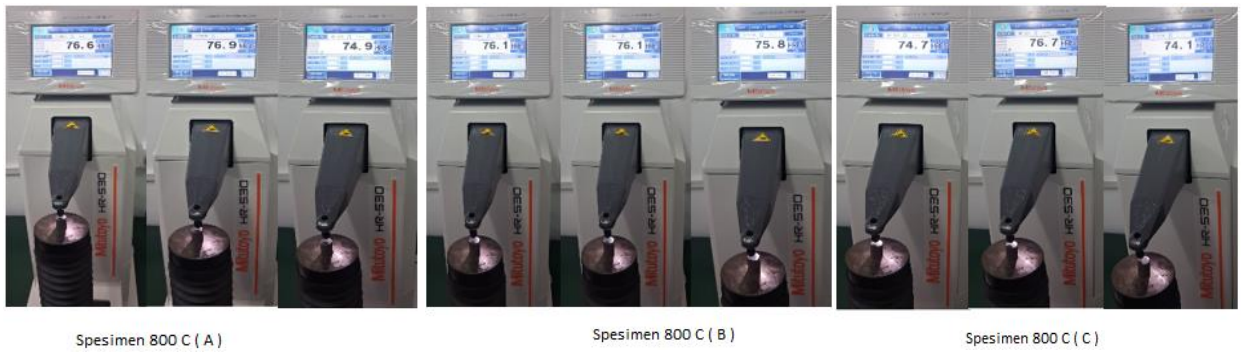
Gambar 6 Grafik Trend Perbandingan Variasi Temperatur Annealing

Gambar 6 memperlihatkan tren penurunan nilai kekerasan baja AISI 1045 yang berbanding terbalik dengan temperatur full annealing, penurunan paling signifikan terjadi dari kondisi *raw material* (86,40) HRB ke temperatur 800⁰ C (75,76) HRB, diikuti penurunan gradual hingga mencapai titik terendah pada temperatur 900⁰ C (72,10) HRB.

Tabel 4 Perbandingan Suhu Rata – Rata kekerasan dan Standar Daviasi

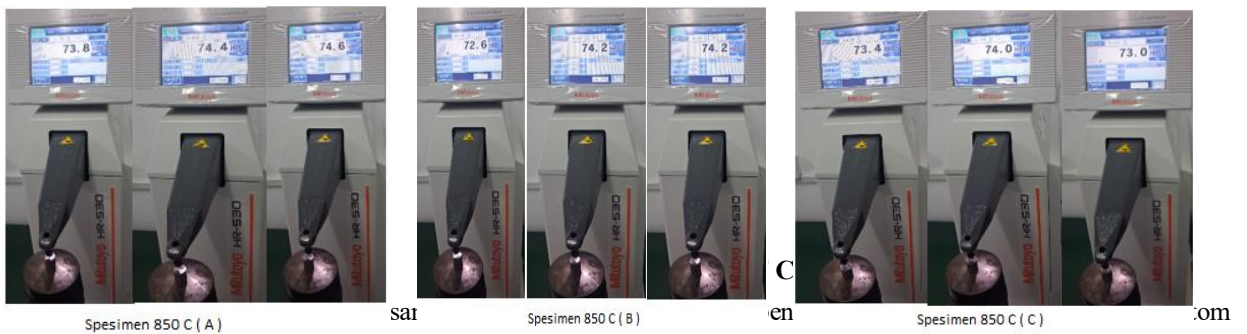
Suhu	Rata - rata Kekerasan (HRB)	Standar daviasi (SD)
800 °C	75.76	0.60
850 °C	73.80	0.27
900 °C	72.10	0.95
Raw Material	86.40	0.92

Berdasarkan tabel 4, dampak temperatur *full annealing* terhadap pelunakan material ditunjukkan oleh tren penurunan kekerasan hingga mencapai titik minimum 72,10 HRB pada kondisi 900⁰ C, Stabilitas data pengujian ini dibuktikan oleh nilai standar deviasi yang minim pada tiap kelompok suhu 800⁰ C (0,60) 850⁰ C (0,27) 900⁰ C (0,95) membuktikan bahwa sebaran data hasil uji bersifat stail, hal ini mengonfirmasi bahwa transformasi fasa ferit dan perlit kasar hasil pendinginan lambat telah terjadi secara homongen di seluruh bagian spesimen.



Gambar 6 Spesimen Uji 800⁰ C

Pemanasan suhu 800⁰ C nilai kekerasan 75,76 (HRB) penurunan kekerasan ini sudah mulai terjadi jika di bandingkan dengan kondisi *raw material* sebesar 86, 40 (HRB), namun karena posisi suhu 800⁰ C pada suhu ini baru mulai untuk mengubah fasa dasar, tetapi pelarutan unsur karbon dan homogenisasi fasa austenit di dalam struktur mikro logam belum berjalan secara menyeluruh.

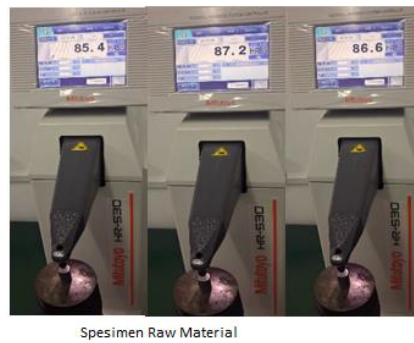


karbon di dalam matriks besi berjalan lebih cepat dan merata, energi panas pada suhu ini mampu melepas tegangan sisa (*stress relieving*) akibat proses pengerolan pabrik sebelumnya dengan baik, sehingga material menjadi lebih lunak.



Gambar 8 Spesimen Uji 900⁰ C

Pemanasan pada suhu 900°C memberikan pasokan energi termal tertinggi untuk mendekomposisi struktur mikro asal secara maksimal menjadi fasa austenit yang homogen selama holding time 90 menit. Penurunan kekerasan hingga titik terendah (72,10 HRB) ini dipicu oleh kombinasi temperatur tinggi dan metode furnace cooling. Melalui pendinginan lambat di dalam tungku, atom besi dan karbon memiliki waktu yang cukup untuk menata ulang strukturnya menjadi fasa ferit dan perlit yang lebih lunak.



Gambar 9 Spesimen *Raw material*

Hasil pengujian kekerasan pada 3 titik uji *raw material* menghasilkan nilai rata – rata sebesar 86,4 nilai aktual tersebut berada di dalam rentang 84 – 90 HRB, yang merupakan nilai karakteristik sifat mekanis (*mechanical properties*) untuk material baja karbon sedang.

Penurunan kekerasan baja AISI 1045 setelah annealing dikendalikan oleh perubahan mikrostruktur berdasarkan teori callister (callister & rethwisch, 2015), kondisi *raw material* memiliki kekerasan tertinggi 86,4 HRB akibat tingginya kerapian dislokasi dan tegangan sisa dari pengerolan, pemanasan annealing memicu fase pemulihan yang melepaskan tegangan sisa, serta fase rekristalisasi yang membentuk butir baru bebas regangan dengan kerapian dislokasi rendah, sehingga material melunak.

Nilai kekerasan terendah pada suhu 900°C 72,10 HRB terjadi karena pertumbuhan butir energi termal yang tinggi membuat ukuran butir kristal membesar, sehingga luas area butas butir *grain boundaries* berkurang drastis, karena batas butir berfungsi sebagai penghalang gerakan dislokasi, pembesaran butir ini menyebabkan dislokasi sangat mudah bergerak saat ditekan indenter rockwell, yang menghasilkan tingkat pelunakan paling maksimal. [10]

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan *rockwell* dan analisa data yang telah dilakukan pada proses full annealing material baja karbon sedang AISI 1045, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Penurunan nilai kekerasan perlakuan panas full annealing terbukti secara konstan menurunkan nilai kekerasan mekanis material dari kondisi awal (*rawmaterial*) sebesar 86,40 HRB menuju rentang nilai yang lebih rendah setelah pemanasan.
- Temperatur pelunakan, peningkatan temperatur perlakuan panas berbanding lurus dengan tingkat pelunakan material, temperatur 900°C dengan metode pendinginan di dalam tungku menghasilkan penurunan kekerasan terbesar hingga mencapai nilai terendah yaitu 72,10 HRB
- Implikasi sifat mekanis, Penurunan nilai kekerasan ini secara teoritis berimplikasi positif terhadap peningkatan keuletan (*ductility*) dan kemudahan pengerjaan (*machinability*), sehingga baja AISI 1045 lebih mudah untuk dideformasi atau diproses pada permesinan sekunder berdasarkan literatur metalurgi

5 Daftar Pustaka

- [1] I. Anwar, J. Rahman, and H. Setiawan, "Pengaruh perlakuan panas terhadap sifat mekanik baja AISI 1045 dengan media pendingin air," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 115–122, 2021.
- [2] G. D. Wenish, M. Prince, and J. Maniraj, "Characterization of induction hardened and tempered AISI 1045 steel," *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, no. 4, 2022.
- [3] N. H. Sari, "Perlakuan panas pada baja karbon: Efek media pendinginan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro," *Jurnal Teknologi Komponen*, vol. 5, no. 2, pp. 67–74, 2017.
- [4] S. Kirono, E. Diniardi, and I. Prasetyo, "Analisa perubahan dimensi baja AISI 1045 setelah proses perlakuan panas (heat treatment)," *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 11, no. 3, pp. 204–211, 2022.
- [5] P. Lanyo, G. S. Lubis, and M. Ivanto, "Analisis pengaruh perlakuan panas terhadap perubahan nilai kekerasan baja karbon AISI 1045," *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, vol. 13, no. 1, pp. 88–96, 2025.
- [6] ASTM E18, *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2012.
- [7] ASTM A29/A29M-20, *Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [8] J. R. Davis and ASM International Handbook Committee, *Metals Handbook Desk Edition*, 2nd ed. Metals Park, OH, USA: ASM International, 1998, pp. 225–230.
- [9] M. Hasanah, I. Zahar, and Y. Mulyadi, "Effect of annealing temperature on mechanical properties of AISI 1045 carbon steel," *Journal of Technology and Policy*, vol. 4, no. 1, pp. 45–53, 2024.
- [10] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9th ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2015, pp. 215–220.

