

Pengaruh Variasi Suhu *Quenching* terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja AISI 4140

Bayu Tri Atmaja^{1*}, Hisyam Ma'mun², Muhammad Faesal Febriandyono³, Yuris Setyoadi⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Mesin, Universitas PGRI Semarang, Semarang 50125, Indonesia

Email: ¹bayutriatmaja05@gmail.com, ²hisyam@upgris.ac.id, ³muhammadfaesalfebriandyono@upgris.ac.id, ⁴yurissetyoadi@upgris.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ¹hisyam@upgris.ac.id

Info Artikel	Abstrak
<p>Kata Kunci: Baja AISI 4140 <i>Quenching</i> Perlakuan panas Kekerasan Uji tarik Struktur mikro</p>	<p>Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu <i>quenching</i> terhadap nilai kekerasan, kekuatan tarik, dan struktur mikro pada baja AISI 4140. Proses perlakuan panas dilakukan menggunakan metode <i>quenching</i> pada suhu 800°C dan 900°C, kemudian dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan panas (<i>raw material</i>). Pengujian yang dilakukan meliputi uji kekerasan Rockwell C (HRC), uji tarik, dan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan <i>quenching</i> meningkatkan sifat mekanik baja AISI 4140. Nilai kekerasan rata-rata pada raw material sebesar 50,83 HRC, meningkat menjadi 52,1 HRC pada suhu 800°C, dan mencapai nilai tertinggi 53,2 HRC pada suhu 900°C. Pada pengujian tarik, spesimen <i>quenching</i> 900°C juga menghasilkan tegangan maksimum tertinggi sebesar 2216,37 MPa. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan transformasi dari fase ferrite dan pearlite pada raw material menjadi dominasi martensit setelah proses <i>quenching</i>, yang berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik material. Berdasarkan hasil tersebut, suhu <i>quenching</i> 900°C direkomendasikan untuk aplikasi yang membutuhkan kekerasan dan kekuatan tarik maksimum, sedangkan suhu 800°C lebih sesuai untuk aplikasi yang memerlukan keseimbangan antara kekuatan dan ketangguhan material.</p>
<p>Keywords: AISI 4140 steel Quenching Heat treatment Hardness Tensile test Microstructure.</p>	<p>This study aims to analyze the effect of quenching temperature variations on hardness, tensile strength, and microstructure of AISI 4140 steel. The heat treatment process was carried out using the quenching method at temperatures of 800°C and 900°C, and then compared with the untreated specimen (<i>raw material</i>). The tests conducted include Rockwell C hardness (HRC) testing, tensile testing, and microstructure observation using an optical microscope. The results show that the quenching treatment improves the mechanical properties of AISI 4140 steel. The average hardness value of the raw material was 50.83 HRC, which increased to 52.1 HRC at 800°C, and reached the highest value of 53.2 HRC at 900°C. In the tensile test, the specimen quenched at 900°C also produced the highest maximum tensile strength of 2216.37 MPa. Microstructural observations revealed a transformation from ferrite and pearlite phases in the raw material to a dominant martensitic structure after the quenching process, which contributed to the improvement of the material's mechanical properties. Based on these results, a quenching temperature of 900°C is recommended for applications requiring maximum hardness and tensile strength, while 800°C is more suitable for applications that require a balance between strength and toughness.</p>

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri manufaktur dan konstruksi modern menuntut penggunaan material logam yang memiliki kombinasi sifat mekanik unggul, seperti kekuatan tarik tinggi, kekerasan yang baik, ketahanan aus, serta ketangguhan yang memadai. Kebutuhan tersebut semakin meningkat seiring berkembangnya teknologi manufaktur yang menuntut komponen mampu bekerja pada kondisi pembebanan tinggi, gesekan berulang, dan lingkungan operasional yang kompleks. Oleh karena itu, pemilihan material tidak hanya ditentukan oleh komposisi kimia, tetapi juga oleh kemampuan material untuk dimodifikasi melalui perlakuan tertentu guna memperoleh performa yang optimal.

Baja AISI 4140 merupakan baja paduan rendah yang mengandung unsur kromium (Cr) dan molibdenum (Mo) yang berperan dalam meningkatkan *hardenability*, kekuatan mekanik, dan ketahanan aus material [1]. Baja ini banyak digunakan pada komponen teknik seperti poros, roda gigi, *crankshaft*, *connecting rod*, dan berbagai komponen mesin lainnya yang bekerja pada kondisi pembebanan tinggi [2]. Karakteristik tersebut menjadikan baja AISI 4140 sebagai salah satu material yang banyak digunakan dalam industri serta menjadi objek penelitian yang penting dalam bidang rekayasa material.

Peningkatan performa baja AISI 4140 umumnya dilakukan melalui proses *heat treatment* yang bertujuan untuk mengendalikan struktur mikro dan sifat mekanik material [3]. Salah satu metode perlakuan panas yang paling banyak digunakan adalah *quenching*, yaitu proses pendinginan cepat setelah material dipanaskan hingga mencapai temperatur austenitisasi [4]. Proses ini memungkinkan terjadinya transformasi fasa yang menghasilkan struktur mikro dengan sifat mekanik yang berbeda dibandingkan kondisi awal material.

Perubahan struktur mikro merupakan faktor utama yang menentukan karakteristik mekanik baja setelah perlakuan panas [5]. Jenis, distribusi, dan morfologi fasa yang terbentuk selama proses pendinginan akan memengaruhi kekerasan, kekuatan tarik, ketangguhan, serta ketahanan aus material [6]. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan antara struktur mikro dan sifat mekanik menjadi aspek penting dalam pengembangan parameter perlakuan panas yang optimal.

Salah satu parameter yang memiliki pengaruh signifikan terhadap hasil proses *quenching* adalah temperatur austenitisasi [7]. Temperatur pemanasan yang sesuai dapat menghasilkan pembentukan austenit yang homogen sehingga transformasi martensit berlangsung lebih efektif selama proses pendinginan [8]. Sebaliknya, temperatur yang terlalu tinggi berpotensi menyebabkan pertumbuhan butir (*grain growth*) yang dapat memengaruhi sifat mekanik material secara negatif.

Selain temperatur austenitisasi, homogenitas pemanasan juga berperan penting dalam menentukan kualitas hasil perlakuan panas [9]. Distribusi temperatur yang tidak merata dapat menyebabkan perbedaan transformasi fasa pada setiap bagian material sehingga menghasilkan struktur mikro yang kurang seragam. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan variasi sifat mekanik pada material setelah proses *quenching*.

Laju pendinginan merupakan parameter penting lainnya yang memengaruhi pembentukan struktur mikro akhir material [10]. Pendinginan yang lebih cepat cenderung meningkatkan pembentukan martensit sehingga menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi. Sebaliknya, pendinginan yang lebih lambat dapat menghasilkan fasa lain yang menyebabkan penurunan kekerasan maupun kekuatan material.

Keberhasilan proses *quenching* tidak hanya ditentukan oleh laju pendinginan, tetapi juga dipengaruhi oleh temperatur pemanasan, waktu penahanan (*holding time*), serta kondisi proses yang digunakan [11]. Variasi parameter tersebut dapat menghasilkan mekanisme transformasi fasa yang berbeda sehingga memengaruhi karakteristik mikrostruktur yang terbentuk [12]. Oleh karena itu, optimasi parameter proses menjadi langkah penting untuk memperoleh kombinasi sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi teknik [13].

Selain memengaruhi struktur mikro, proses *quenching* juga dapat menghasilkan tegangan sisa (*residual stress*) akibat perbedaan laju pendinginan antara bagian permukaan dan inti material [14]. Tegangan sisa yang tinggi dapat memengaruhi stabilitas dimensi, ketahanan lelah, dan umur pakai komponen selama pengoperasian. Oleh karena itu, pengendalian parameter proses menjadi aspek penting dalam penerapan perlakuan panas pada baja paduan.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perlakuan panas mampu meningkatkan sifat mekanik baja AISI 4140 melalui pengendalian transformasi fasa dan perubahan struktur mikro selama proses pemanasan maupun pendinginan [15]. Kombinasi proses *quenching* dan *tempering* dilaporkan dapat menghasilkan keseimbangan antara kekerasan dan ketangguhan material sehingga meningkatkan performa komponen pada kondisi pembebanan yang kompleks [16]. Selain itu, penerapan variasi metode *quenching* seperti *step quenching* juga menunjukkan pengaruh terhadap pembentukan mikrostruktur dan peningkatan karakteristik mekanik baja AISI 4140 [17]. Hasil-hasil penelitian tersebut menegaskan bahwa parameter perlakuan panas memiliki peran yang sangat penting dalam menentukan sifat akhir material. Namun demikian, pengaruh variasi temperatur *quenching* terhadap hubungan antara perubahan struktur mikro dan sifat mekanik masih menunjukkan hasil yang beragam, sehingga memerlukan kajian lebih lanjut untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif.

Meskipun berbagai penelitian mengenai baja AISI 4140 telah banyak dilakukan, sebagian besar studi masih menganalisis sifat material secara terpisah antara kekerasan, kekuatan tarik, dan struktur *microstructure*, sehingga belum memberikan pemahaman yang benar-benar terintegrasi mengenai keterkaitan ketiga aspek tersebut dalam satu kerangka evaluasi material. Selain itu, hasil penelitian terkait pengaruh suhu *quenching* terhadap sifat mekanik baja

AISI 4140 masih menunjukkan kecenderungan yang tidak sepenuhnya konsisten, terutama karena belum adanya kajian yang secara langsung dan seragam membandingkan kondisi *raw material*, *quenching* pada 800°C, dan 900°C menggunakan media pendingin *oil* dalam satu rangkaian eksperimen yang sama, sehingga hubungan antara parameter proses, evolusi struktur mikro, dan respons mekanik masih belum dapat dijelaskan secara utuh dan kuantitatif.

Oleh karena itu, penelitian ini secara khusus dan terarah membandingkan kondisi *raw material* dengan perlakuan *quenching* pada 800°C dan 900°C menggunakan media pendingin *oil* terhadap perubahan struktur mikro, kekerasan, dan kekuatan tarik baja AISI 4140 dalam satu sistem pengujian yang seragam dan terintegrasi. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan pemetaan hubungan yang lebih jelas antara parameter proses perlakuan panas, transformasi struktur mikro, dan respons mekanik material secara kuantitatif, sehingga dapat menjadi dasar yang lebih akurat dalam penentuan parameter *quenching* yang optimal untuk aplikasi teknik pada baja AISI 4140.

2. METODOLOGI PENELITIAN

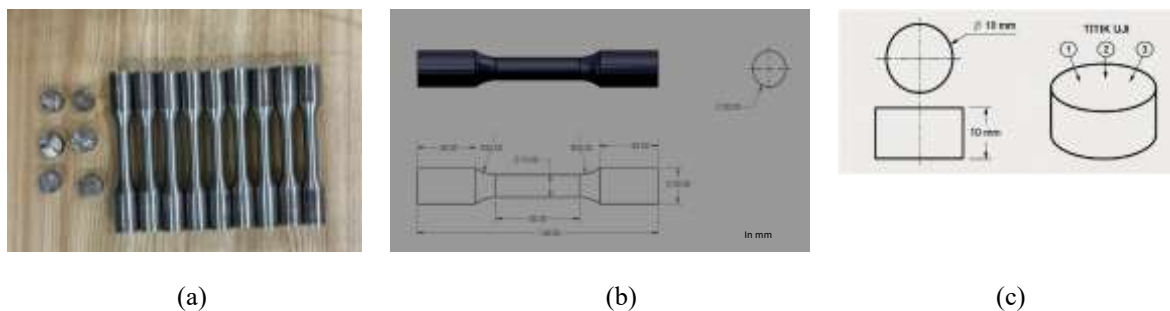
2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menganalisis pengaruh variasi suhu *quenching* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja AISI 4140. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah temperatur *quenching* yaitu 800°C dan 900°C, sedangkan variabel terikat meliputi kekerasan, kekuatan tarik, dan struktur mikro material. Spesimen tanpa perlakuan panas (*raw material*) digunakan sebagai pembanding.

Tahapan eksperimen meliputi proses perlakuan panas (*heat treatment*), pengujian mekanik, serta pengamatan struktur mikro untuk mengetahui hubungan antara perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik material.

2.2 Material dan Spesimen Penelitian

Material yang digunakan adalah baja paduan AISI 4140 berbentuk batang silinder. Spesimen dipotong sesuai standar pengujian kekerasan (ASTM E 18), tarik (ASTM E 8), dan metalografi (ASTM E407). Sebelum perlakuan panas, spesimen dibersihkan dari kotoran dan oksida permukaan untuk memastikan hasil pengujian yang akurat dan konsisten.



Gambar 1. (a) Material specimen uji, (b) Dimensi spesimen uji tarik, (c) Dimensi specimen uji kekerasan

Material baja AISI 4140 adalah baja paduan rendah (*low alloy steel*) yang banyak digunakan pada komponen mesin dan konstruksi yang memerlukan kekuatan, ketangguhan, serta ketahanan aus yang baik. Baja ini mengandung unsur paduan utama berupa kromium (Cr) dan molibdenum (Mo) yang berfungsi meningkatkan kemampuan pengerasan (*hardenability*) serta respons material terhadap perlakuan panas. Karena memiliki sifat mekanik yang baik dan mampu mengalami transformasi mikrostruktur yang signifikan selama proses *quenching*, baja AISI 4140 dipilih sebagai material penelitian untuk menganalisis pengaruh variasi suhu *quenching* terhadap perubahan struktur mikro, kekerasan, dan kekuatan tarik. Adapun komposisi kimia baja AISI 4140 yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Mill Certificate Hunan Valin Xiangtan Iron and Steel Co., Ltd. (2018).

Unsur	Kadar (%)	Unsur	Kadar (%)	Unsur	Kadar (%)
C	0,42	Cr	0,95	V	0,001
Si	0,32	Cu	0,03	Nb	0,0001
Mn	0,78	Al	0,017	Ti	0,0001
P	0,013	Mo	0,17	B	0,0001
S	0,002	Co	0,000	Sn	0,0002

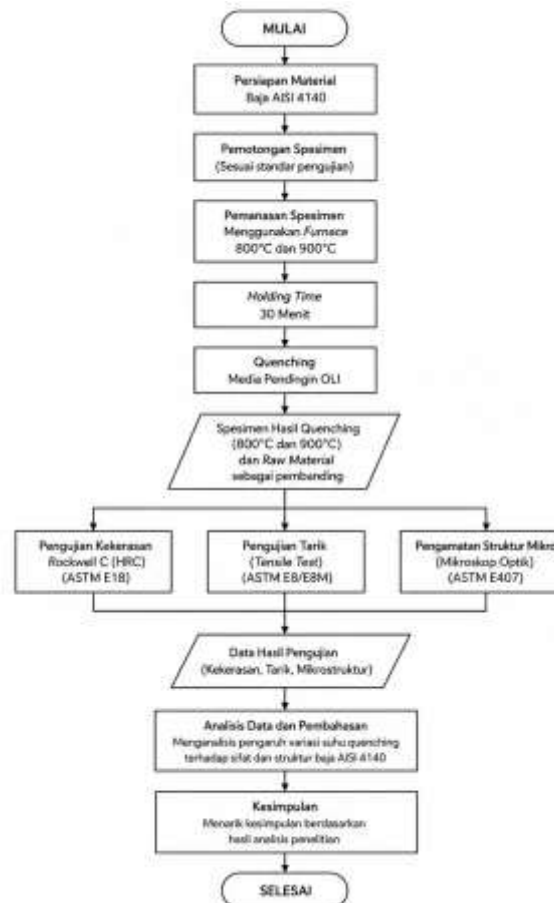
Ni	0,20	Als	0,0001	As	0,0016
Pb	0,0003	Sb	< 0,0003	Bi	< 0,0003
O	< 0,0010	N	< 0,0010	H	< 0,0010

2.3 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis sebagai berikut:

1. Persiapan material baja AISI 4140
2. Pemotongan spesimen uji
3. Pemanasan menggunakan *furnace*
4. Proses *quenching* pada temperatur 800°C dan 900°C
5. Pendinginan cepat menggunakan media oli SAE 10W- 40 (volume 10 Liter, suhu 27 °C)
6. Pengujian kekerasan Rockwell C
7. Pengujian tarik menggunakan UTM
8. Pengamatan struktur mikro
9. Analisis data dan kesimpulan

Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian.

2.4 Proses Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)



Gambar 3. *Electric furnace*

Proses perlakuan panas dilakukan dengan memanaskan spesimen pada temperatur 800°C dan 900°C menggunakan electric furnace hingga mencapai kondisi austenitisasi. Setelah temperatur tercapai, spesimen ditahan (holding time) selama 30 menit agar distribusi panas merata di seluruh bagian material. Selanjutnya dilakukan proses quenching menggunakan media oli sebagai pendingin cepat. Oli dipilih karena memiliki laju pendinginan yang lebih stabil dibandingkan air, sehingga mampu mengurangi risiko retak, distorsi, dan tegangan termal berlebih, sekaligus tetap memungkinkan terbentuknya struktur martensit pada baja AISI 4140 yang memiliki hardenability tinggi

2.5 Media Pendingin Oli

Media oli digunakan sebagai fluida pendingin pada proses *quenching*. Oli bekerja dengan menyerap panas dari spesimen melalui mekanisme konveksi, sehingga laju pendinginan berlangsung lebih terkendali. Penggunaan oli memberikan keseimbangan antara pembentukan martensit dan pengurangan tegangan termal pada material. Pada baja AISI 4140, penggunaan oli masih mampu menghasilkan struktur martensit karena material ini memiliki kemampuan pengerasan (*hardenability*) yang baik. Oli yang digunakan adalah oli SAE 10W- 40 (volume 10 Liter, suhu 27 °C)

2.6 Pengujian Kekerasan



Gambar 4. Alat pengujian kekerasan Rockwell

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Rockwell skala C (HRC) berdasarkan standar ASTM E18. Pengujian dilakukan pada beberapa titik permukaan spesimen untuk memperoleh nilai rata-rata kekerasan. Nilai kekerasan digunakan untuk melihat pengaruh variasi suhu *quenching* terhadap perubahan sifat mekanik material akibat transformasi struktur mikro.

2.7 Pengujian Tarik



Gambar 5. *Universal Testing Machine (UTM)*

Pengujian tarik dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine (UTM)* berdasarkan standar ASTM E8/E8M untuk mengetahui kekuatan tarik maksimum material. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap kemampuan material dalam menahan beban tarik hingga patah.

2.8 Pengamatan Struktur Mikro



Gambar 6. Mikroskop optik

Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik setelah proses preparasi metalografi. Tahapan preparasi meliputi pemotongan spesimen, pengamplasan bertingkat, pemolesan, dan proses etsa menggunakan larutan kimia tertentu.

Pengamatan dilakukan untuk menganalisis perubahan fasa dari kondisi *raw material* hingga setelah proses *quenching*. Struktur mikro awal didominasi oleh ferrite dan pearlite, sedangkan setelah *quenching* terbentuk struktur martensit

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan Rockwell C (HRC) menunjukkan adanya pengaruh signifikan dari variasi suhu *quenching* terhadap sifat mekanik baja AISI 4140. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi yaitu *raw material*, *quenching* 800°C, dan *quenching* 900°C.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kekerasan

Variasi	Harga Kekerasan (HRC)			Rata-rata (HRC)
Raw	49.8	51.4	51.3	50.8
Quench 800°C	52.9	52.2	51.2	52.1
Quench 900°C	57.7	51.2	50.7	53.2

Berdasarkan Tabel 2, nilai kekerasan rata-rata menunjukkan bahwa spesimen hasil quenching pada suhu 900°C memiliki kekerasan tertinggi sebesar 53,2 HRC, diikuti oleh 800°C sebesar 52,1 HRC, sedangkan material awal (raw material) memiliki nilai terendah sebesar 50,8 HRC, dengan peningkatan masing-masing sebesar 2,56% dan 4,92% dibandingkan kondisi awal yang menunjukkan bahwa perlakuan quenching efektif dalam meningkatkan kekerasan baja AISI 4140; secara metalurgi, peningkatan ini berkaitan dengan transformasi fasa austenit menjadi martensit selama pendinginan cepat, di mana pada suhu 900°C diduga terjadi austenisasi yang lebih homogen serta peningkatan kelarutan karbon dalam matriks austenit sehingga menghasilkan martensit dengan fraksi lebih dominan dan tingkat supersaturasi karbon yang lebih tinggi, yang kemudian menyebabkan peningkatan distorsi kisi kristal dan hambatan pergerakan dislokasi sehingga kekerasan meningkat, sedangkan pada suhu 800°C proses austenisasi kemungkinan belum mencapai tingkat homogenitas yang sama dengan 900°C sehingga transformasi martensitik yang terbentuk relatif sedikit lebih rendah dalam kesempurnaan mikrostrukturnya, meskipun demikian kedua perlakuan tetap menunjukkan peningkatan kekerasan dibandingkan material awal, sehingga dapat disimpulkan bahwa suhu 900°C memberikan efektivitas yang lebih tinggi dalam meningkatkan kekerasan baja AISI 4140 melalui mekanisme pembentukan martensit yang lebih dominan dan penguatan akibat supersaturasi karbon.

3.2 Hasil Pengujian Tarik

Hasil pengujian kekerasan tarik menunjukkan adanya pengaruh signifikan dari variasi suhu *quenching* terhadap sifat tarik baja AISI 4140. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi yaitu *raw material*, *quenching* 800°C, dan *quenching* 900°C.

Tabel 3. Hasil Pengujian Tarik

Variasi	Tegangan Maksimum (Mpa)	Regangan Maksimum (%)	Modulus Elastisitas (Mpa)
Raw	1175.412	23.27	66.190562
	1199.037	21.696	75.84041746
	1174.806	20.796	75.19239631
Quench 800°C	1370.2584	22.60999	62.5643058
	1401.418774	27.1363639	51.64357982
	1236.686104	42.19407986	29.54142552
Quench 900°C	2171.223029	33.2216183	72.23596173
	2216.374287	44.36557805	54.53811086
	1535.753521	36.29512324	42.75864

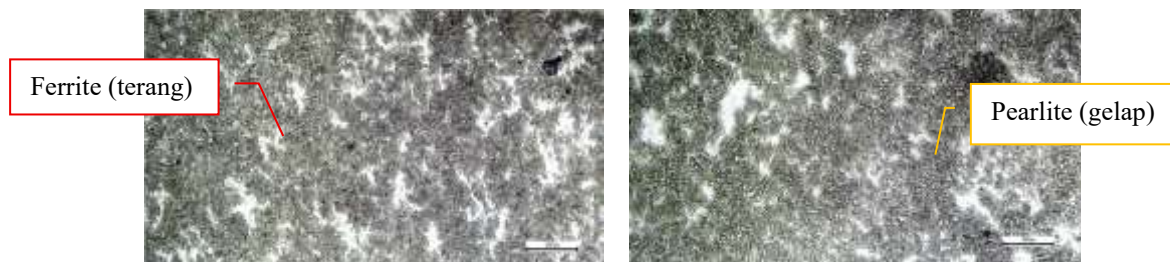
Berdasarkan Tabel 3, spesimen dengan perlakuan quenching pada suhu 900°C menghasilkan tegangan tarik maksimum tertinggi yaitu sebesar 2216,37 MPa, diikuti oleh 800°C dan raw material, yang masing-masing menunjukkan peningkatan kekuatan yang signifikan dibandingkan kondisi awal, sehingga mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur austenisasi berkontribusi terhadap peningkatan strength baja AISI 4140. Peningkatan ini berkaitan dengan terbentuknya austenit yang lebih homogen pada temperatur 900°C dengan distribusi karbon yang lebih seragam, sehingga setelah proses pendinginan cepat (*quenching*) terbentuk struktur martensit yang lebih dominan dan stabil, yang meningkatkan hambatan pergerakan dislokasi serta memperkuat material. Secara kuantitatif, tegangan tarik pada 900°C mengalami peningkatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan raw material, yang menunjukkan efektivitas perlakuan panas dalam meningkatkan kemampuan material menahan beban tarik. Selain itu, nilai regangan maksimum pada kondisi 900°C yang masih relatif tinggi menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan tidak sepenuhnya mengorbankan keuletan material, sehingga terdapat keseimbangan antara strength dan ductility. Sebaliknya, pada 800°C diduga terjadi transformasi martensitik yang lebih heterogen akibat tingkat austenisasi yang belum optimal, yang tercermin dari variasi nilai regangan dan sifat mekanik yang lebih tidak stabil antar spesimen. Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa hubungan antara kekuatan tarik dan keuletan tidak bersifat linier, melainkan sangat dipengaruhi oleh homogenitas austenit awal serta morfologi martensit yang terbentuk selama proses quenching.

3.3 Hasil dan Pembahasan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik untuk melihat perubahan fasa akibat variasi suhu *quenching*. Hasil pengamatan menunjukkan perubahan signifikan dari kondisi awal hingga setelah perlakuan panas.

a. Struktur Mikro Raw Material

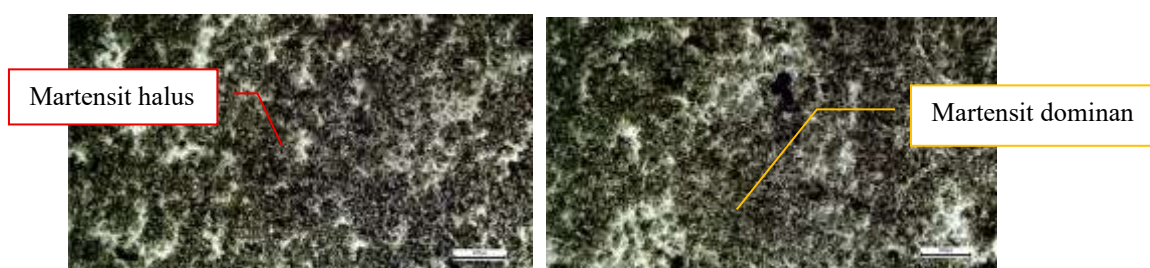
Pada kondisi *raw material*, struktur mikro didominasi oleh fasa ferrite dan pearlite yang tersebar relatif merata. Ferrite terlihat sebagai daerah berwarna terang, sedangkan pearlite tampak lebih gelap akibat adanya lapisan ferrite dan sementit yang tersusun secara lamelar. Struktur ferrite–pearlite merupakan struktur yang umum ditemukan pada baja tanpa perlakuan panas dan memberikan kombinasi sifat kekuatan serta keuletan yang cukup baik. Namun, struktur ini memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan struktur martensit sehingga nilai kekerasan dan kekuatan tarik material masih terbatas.



Gambar 7. Struktur mikro *Raw Material*

b. Struktur Mikro Quenching 800°C

Setelah dilakukan proses quenching pada suhu 800°C menggunakan media pendingin oli, terjadi transformasi struktur mikro dari ferrite–pearlite menjadi martensit yang lebih dominan. Struktur martensit yang terbentuk terlihat lebih halus, rapat, dan tersebar relatif homogen pada seluruh bidang pengamatan. Pembentukan martensit halus ini terjadi karena proses pendinginan cepat mampu menahan difusi karbon, sehingga atom karbon terperangkap di dalam kisi kristal besi dan menghasilkan distorsi kisi yang tinggi. Kondisi ini meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi, yang berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan material sebesar 2,56% dibandingkan kondisi raw material. Hal tersebut tercermin dari nilai kekerasan sebesar 52,1 HRC, sedangkan raw material memiliki nilai 50,8 HRC. Selain itu, pada pengujian tarik, spesimen 800°C menunjukkan peningkatan kekuatan hingga 1401,41 MPa, yang setara dengan peningkatan sekitar 19% dibandingkan kondisi raw material sebesar 1175 MPa. Dengan demikian, suhu 800°C dapat dianggap sebagai kondisi austenisasi yang cukup efektif untuk menghasilkan transformasi martensit dengan morfologi halus dan homogen, tanpa indikasi pertumbuhan butir yang signifikan, sehingga memberikan kombinasi peningkatan kekerasan dan kekuatan tarik yang stabil pada baja AISI 4140.



Gambar 8. Struktur Mikro Quenching 800°C

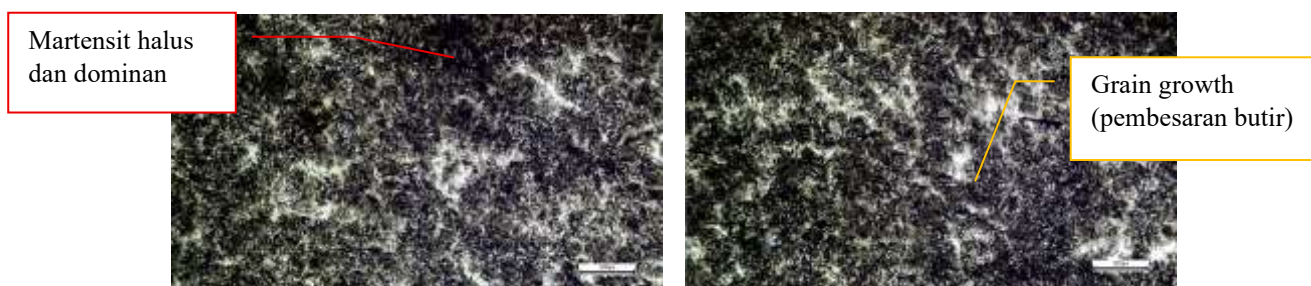
c. Struktur Mikro Quenching 900°C

Berdasarkan hasil pengujian, spesimen baja AISI 4140 yang mengalami perlakuan quenching menunjukkan peningkatan sifat mekanik yang jelas dibandingkan kondisi raw material. Pada suhu 900°C diperoleh nilai kekerasan tertinggi sebesar 53,2 HRC atau meningkat 4,33% dari kondisi awal sebesar 50,8 HRC, sedangkan pada suhu 800°C diperoleh kekerasan sebesar 52,1 HRC atau meningkat 2,56%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur austenisasi dalam rentang pengujian, semakin besar kecenderungan terbentuknya struktur martensit yang lebih dominan akibat homogenitas karbon dalam fasa austenit yang lebih baik sebelum proses pendinginan cepat. Kondisi ini meningkatkan distorsi kisi kristal dan densitas dislokasi, sehingga hambatan terhadap pergerakan dislokasi juga meningkat dan menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi.

Pada suhu 900°C, selain terbentuk martensit yang lebih dominan, terdapat indikasi terjadinya pertumbuhan butir (*grain growth*) akibat tingginya temperatur austenisasi. Namun demikian, efek penguatan dari dominasi martensit dan

tingginya supersaturasi karbon masih lebih dominan sehingga nilai kekerasan tetap menjadi yang tertinggi. Pada pengujian tarik, spesimen 900°C menghasilkan tegangan maksimum tertinggi sebesar 2216,37 MPa atau 89% lebih tinggi dibandingkan raw material dengan nilai 1175 MPa, sedangkan pada 800°C peningkatan kekuatan tarik berada pada rentang 5–19% dengan nilai maksimum 1401,41 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kekerasan sejalan dengan peningkatan kekuatan tarik, yang mengindikasikan hubungan langsung antara struktur martensitik dengan kemampuan material dalam menahan beban tarik.

Dengan demikian, meskipun terdapat kemungkinan grain growth pada suhu 900°C, pengaruh dominan dari pembentukan martensit tetap memberikan kontribusi terbesar terhadap peningkatan kekuatan dan kekerasan, sehingga perlakuan quenching pada suhu tersebut menghasilkan kombinasi sifat mekanik yang paling optimal dibandingkan suhu 800°C.



Gambar 9. Struktur Mikro Quenching 900°C

d. Hubungan Struktur Mikro dengan Sifat Mekanik

Pada baja AISI 4140, hubungan struktur mikro dan sifat mekanik menunjukkan bahwa perubahan fasa sangat memengaruhi kekerasan dan kekuatan tarik material. Pada kondisi awal (raw material), struktur masih berupa ferrite–pearlite yang relatif lunak sehingga mudah mengalami deformasi, dengan kekerasan 50,8 HRC dan kekuatan tarik sekitar 1175 MPa. Setelah proses quenching, struktur berubah menjadi martensit yang lebih keras karena karbon terperangkap dalam kisi kristal sehingga menghambat pergerakan dislokasi. Pada suhu 800°C terbentuk martensit yang lebih halus dan merata dengan kekerasan 52,1 HRC dan kekuatan tarik 1401,41 MPa, sedangkan pada 900°C terbentuk martensit yang lebih dominan sehingga menghasilkan kekerasan tertinggi 53,2 HRC dan kekuatan tarik tertinggi 2216,37 MPa. Dengan demikian, semakin dominan struktur martensit yang terbentuk, semakin tinggi kekerasan dan kekuatan tarik baja AISI 4140.

4. KESIMPULAN

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan panas quenching pada baja AISI 4140 dengan variasi suhu 800°C dan 900°C berhasil meningkatkan sifat mekanik dibandingkan kondisi raw material. Perubahan struktur mikro dari ferrite–pearlite menjadi martensit menyebabkan peningkatan kekerasan dan kekuatan tarik material, di mana suhu 900°C menghasilkan nilai terbaik dengan kekerasan 53,2 HRC dan kekuatan tarik 2216,37 MPa, diikuti oleh 800°C dengan 52,1 HRC dan 1401,41 MPa, sedangkan raw material memiliki nilai terendah yaitu 50,8 HRC dan 1175 MPa. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa suhu 900°C merupakan kondisi paling efektif dalam menghasilkan kombinasi sifat mekanik terbaik pada baja AISI 4140 melalui pembentukan martensit yang lebih dominan dan homogen.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas PGRI Semarang melalui Program Studi Teknik Mesin atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan bimbingan selama proses penelitian dan penyusunan artikel. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan proses perlakuan panas (*quenching*), pengujian kekerasan, pengujian tarik, dan pengamatan struktur mikro baja AISI 4140 sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENCES

- [1] S. Mudda, 'Effect of various heat treatment methods and optimization of parameters on mechanical properties of AISI 4140 steel', *Scientific Reports*, vol. 15, no. 31854, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-17299-1.
- [2] I. Basori, 'The effect of quenching process on the microstructure and hardness of AISI 4140 steel', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2866, 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2866/1/012020.
- [3] B. Laxmi, 'Effect of quenchant oil and tempering on mechanical properties of 42CrMo4 steel', *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 16, pp. 581-587, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.11.152.
- [4] M. M. Bilal, 'Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of AISI 4140 steel', *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.08.042.
- [5] O. Çoban, 'Heat treatment of AISI 1040 and AISI 4140 steels: microstructure–mechanical property relationships', *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, vol. 5, 2025, doi: 10.61112/jiens.1634515.
- [6] P. Schüßler, 'Multiscale simulation of heat treatment effects on AISI 4140 microstructure', *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 18, 2023, doi: 10.1080/17452759.2023.2271455.
- [7] Y. Zhang, 'Austenitizing temperature effect on martensite formation in AISI 4140', *Materials Science and Engineering A*, vol. 812, 2021, doi: 10.1016/j.msea.2021.141067.
- [8] H. Li, 'Microstructure evolution in quenched low alloy steel', *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 896, 2022, doi: 10.1016/j.jallcom.2021.161982.
- [9] X. Wang, 'Effect of heating uniformity on microstructure of AISI 4140 steel', *Materials Characterization*, vol. 198, 2023, doi: 10.1016/j.matchar.2023.113456.
- [10] A. Aranda, 'Cooling rate effects on martensitic transformation', *Metals*, vol. 12, no. 2, 2022, doi: 10.3390/met12020233.
- [11] R. Kumar and P. Singh, 'Influence of quenching parameters on alloy steel', *Metallurgical Research & Technology*, vol. 118, 2021, doi: 10.1051/metal/2021045.
- [12] M. Rahman, 'Phase transformation in heat treated AISI 4140 steel', *Materials Today Communications*, vol. 33, 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104586.
- [13] L. Oliveira, 'Optimization of quenching parameters in low alloy steels', *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 26, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.11.045.
- [14] J. Hernández, 'Residual stress in quenched alloy steels', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 124, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11234-x.
- [15] D. Putra, 'Mechanical properties of AISI 4140 after heat treatment', *Engineering Failure Analysis*, vol. 158, 2024, doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.107812.
- [16] I. Afendi, B. Sugiantoro, and Sakuri, 'Pengaruh Media Quenching Terhadap Sifat Mekanik dan Morfologi dengan Metode Quenching Deformations and Partitioning (QDP) Baja AISI 4140', *Iteks*, vol. 14, no. 1, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal.stt-wiworotomo.ac.id/index.php/iteks/article/view/338>
- [17] O. Halik, 'Effect of step quenching on hardness and microstructure of AISI 4140 steel'. doi: 10.31227/osf.io/7q2m9.