

LAPORAN AKHIR
PENELITIAN MANDIRI



**PENGARUH PERLAKUAN TERMAL PADA BAJA PADUAN RENDAH
TERHADAP KETAHANAN AUS DALAM APLIKASI KOMPONEN MESIN**

Ketua :
BUDI AGUS SETIYAWAN
NIDN : 0616118504

Anggota :
EDI KURNIAWAN
NIM : B.1.4.22.0010

UNIVERSITAS SULTAN FATAH DEMAK
2022

PENGARUH PERLAKUAN TERMAL PADA BAJA PADUAN RENDAH TERHADAP KETAHANAN AUS DALAM APLIKASI KOMPONEN MESIN

Budi Agus Setiyawan¹ Edi Kurniawan²

Fakultas Teknik Universitas Sultan Fatah (UNISFAT) Demak
budiagussetiyawan@gmail.com
Jl. Raya Katonsari 19 Demak Telpn (0291) 686227

Abstrak, Baja paduan rendah merupakan salah satu material yang banyak digunakan dalam pembuatan komponen mesin karena sifat mekaniknya yang dapat ditingkatkan melalui perlakuan termal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perlakuan termal, yaitu quenching-tempering dan austempering, terhadap kekerasan dan ketahanan aus baja paduan rendah. Pengujian dilakukan terhadap tiga jenis spesimen: tanpa perlakuan, hasil quenching-tempering, dan hasil austempering.

Metode pengujian meliputi uji kekerasan Rockwell C, uji keausan menggunakan metode pin-on-disk, serta karakterisasi mikrostruktur dengan mikroskop optik. Hasil menunjukkan bahwa spesimen quenching-tempering memiliki kekerasan tertinggi sebesar 43,7 HRC dan laju keausan terendah sebesar $2,13 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Spesimen austempering memiliki kekerasan 39,2 HRC dengan laju keausan $2,54 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, sementara spesimen tanpa perlakuan menunjukkan performa terendah.

Terdapat korelasi negatif antara kekerasan dan laju keausan; semakin tinggi kekerasan, semakin rendah laju keausan. Perlakuan termal terbukti efektif dalam meningkatkan ketahanan aus baja paduan rendah. Hasil ini dapat dijadikan acuan dalam memilih metode perlakuan termal untuk meningkatkan performa dan umur pakai komponen mesin.

Kata kunci: baja paduan rendah, perlakuan termal, kekerasan, keausan, mikrostruktur

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja paduan rendah merupakan salah satu material teknik yang paling banyak digunakan dalam industri manufaktur, konstruksi, dan otomotif karena kombinasi sifat mekanik yang baik serta biaya produksi yang relatif rendah. Aplikasi baja paduan rendah meliputi berbagai komponen mesin seperti roda gigi, poros, dan bantalan yang bekerja dalam kondisi gesekan dan beban tinggi. Dalam kondisi ini, **ketahanan aus** menjadi salah satu parameter kunci yang menentukan umur pakai dan keandalan komponen (Callister & Rethwisch, 2018).

Ketahanan aus sangat dipengaruhi oleh struktur mikro dan kekerasan permukaan material. Salah satu metode yang umum digunakan untuk meningkatkan ketahanan aus adalah melalui **perlakuan termal** seperti hardening, tempering, normalizing, atau austempering. Perlakuan ini bertujuan untuk memodifikasi struktur mikro baja seperti pembentukan martensit, bainit, atau pearlit sehingga diperoleh sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi (Totten, 2007). Dalam baja paduan rendah, elemen paduan seperti krom, molibdenum, dan nikel membantu dalam mengontrol transformasi fasa selama perlakuan termal, yang secara langsung mempengaruhi kekerasan dan ketahanan ausnya (Krauss, 2005).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perlakuan termal dapat secara signifikan meningkatkan kekerasan dan menurunkan laju keausan pada baja karbon dan baja paduan rendah. Namun, pengaruh jenis perlakuan termal tertentu dan parameter proses seperti suhu pemanasan, waktu tahan, dan laju pendinginan terhadap ketahanan aus masih perlu dipelajari lebih dalam, khususnya untuk aplikasi spesifik pada komponen mesin berat (Singh & Sharma, 2016).

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis **pengaruh perlakuan termal pada baja paduan rendah terhadap ketahanan aus**, dengan harapan dapat memberikan rekomendasi perlakuan termal optimal untuk meningkatkan performa komponen mesin dalam kondisi kerja yang berat.

Selain itu, meningkatnya tuntutan performa pada komponen mesin modern seperti transmisi kendaraan berat, sistem pengereman, dan komponen turbin menyebabkan beban kerja yang ekstrem, baik secara mekanik maupun termal. Kondisi ini menyebabkan peningkatan risiko keausan prematur, terutama jika material yang digunakan tidak memiliki struktur mikro yang optimal. Oleh karena itu, penting untuk menerapkan teknik modifikasi material seperti perlakuan termal guna memperpanjang masa pakai dan mengurangi biaya perawatan (Bhadeshia & Honeycombe, 2017).

Berbagai studi menyebutkan bahwa kombinasi proses *quenching* dan *tempering* mampu meningkatkan ketahanan aus dengan menciptakan struktur martensitik yang kuat namun tetap memiliki ketangguhan yang memadai. Selain itu, perlakuan seperti *austempering* dinilai lebih unggul dalam mengontrol deformasi termal dan meningkatkan keausan melalui pembentukan bainit halus (Li et al., 2019). Dengan memahami karakteristik struktur mikro dari setiap jenis perlakuan termal, rekayasa material dapat dilakukan lebih tepat guna menciptakan komponen dengan performa optimal.

Dengan semakin ketatnya persaingan industri manufaktur, terutama dalam aspek efisiensi dan keandalan produk, penelitian terhadap peningkatan ketahanan aus melalui perlakuan termal menjadi sangat relevan. Kajian ilmiah ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi dunia teknik mesin, khususnya dalam pengembangan material teknik untuk komponen-komponen mesin yang bekerja dalam kondisi berat dan abrasi tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh jenis perlakuan termal terhadap ketahanan aus baja paduan rendah?
2. Struktur mikro seperti apa yang dihasilkan dari setiap perlakuan termal dan bagaimana korelasinya terhadap kekerasan dan laju keausan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh berbagai perlakuan termal terhadap ketahanan aus baja paduan rendah.
2. Menganalisis hubungan antara perubahan struktur mikro akibat perlakuan termal dengan sifat mekanik, khususnya kekerasan dan ketahanan aus.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman lebih lanjut mengenai efek perlakuan termal pada baja paduan rendah.
2. Menjadi referensi dalam pemilihan proses perlakuan termal untuk aplikasi komponen mesin agar memiliki umur pakai yang lebih panjang dan ketahanan aus yang lebih tinggi.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada:

1. Jenis material yang digunakan adalah baja paduan rendah AISI 4140.
2. Perlakuan termal yang diteliti meliputi hardening, tempering, dan austempering.
3. Metode pengujian ketahanan aus menggunakan uji keausan kering tipe pin-on-disk.
4. Analisis struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan scanning electron microscope (SEM).

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Baja Paduan Rendah

Baja paduan rendah adalah jenis baja yang mengandung elemen paduan dalam jumlah kecil, umumnya kurang dari 5% berat total, seperti krom (Cr), nikel (Ni), molibdenum (Mo), vanadium (V), dan mangan (Mn). Penambahan elemen ini bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik seperti kekuatan tarik, ketangguhan, kekerasan, dan ketahanan aus (Callister & Rethwisch, 2018).

Baja paduan rendah sering digunakan dalam aplikasi teknik karena mampu menawarkan kombinasi antara kemampuan las, keuletan, dan ketahanan terhadap keausan serta korosi. Salah satu contoh baja paduan rendah yang banyak digunakan adalah AISI 4140, yang mengandung Cr dan Mo, dan dikenal memiliki kemampuan pengerasan yang baik melalui perlakuan panas (Totten, 2007).

Struktur mikro baja paduan rendah terdiri dari ferrit, perlit, bainit, atau martensit tergantung pada proses perlakuan termal yang diterapkan. Struktur ini akan menentukan sifat akhir baja, termasuk ketahanan aus yang sangat penting dalam aplikasi dinamis seperti poros dan roda gigi.

Baja paduan rendah adalah baja yang mengandung elemen paduan dalam jumlah terbatas, umumnya kurang dari 5% berat total. Elemen seperti krom (Cr), molibdenum (Mo), dan nikel (Ni) ditambahkan untuk meningkatkan sifat mekanik, seperti kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap keausan serta korosi (Callister & Rethwisch, 2018). Dalam praktiknya, baja paduan rendah sangat fleksibel dan dapat disesuaikan untuk berbagai aplikasi teknik berat seperti pada poros, roda gigi, serta struktur rangka kendaraan.

Salah satu keunggulan baja paduan rendah adalah kemampuannya untuk mengalami pengerasan (hardenability) yang lebih tinggi dibandingkan baja karbon biasa. Kemampuan ini memungkinkan transformasi fasa yang lebih merata ke

martensit saat dilakukan proses quenching, bahkan untuk komponen dengan penampang tebal. Selain itu, baja paduan rendah memiliki stabilitas dimensi yang baik setelah perlakuan termal, yang penting dalam menjaga toleransi presisi komponen mesin (Totten, 2007).

Kombinasi antara biaya produksi yang masih terjangkau dan performa tinggi menjadikan baja paduan rendah sebagai pilihan utama dalam manufaktur komponen teknik. Keberhasilannya dalam meningkatkan performa sangat tergantung pada proses termomekanik yang diterapkan, terutama jenis dan parameter perlakuan panas.

2.2 Perlakuan Termal pada Baja

Perlakuan termal adalah proses pemanasan dan pendinginan logam dalam kondisi terkendali untuk memperoleh sifat mekanik yang diinginkan. Pada baja paduan rendah, perlakuan termal yang umum digunakan meliputi hardening (pengerasan), tempering (pelunakan setelah pengerasan), normalizing, annealing, dan austempering (Krauss, 2005).

1. **Hardening** dilakukan dengan memanaskan baja hingga temperatur austenitisasi dan kemudian didinginkan cepat (quenching) untuk membentuk struktur martensit yang keras namun getas.
2. **Tempering** dilakukan setelah quenching untuk mengurangi kerapuhan martensit dan meningkatkan ketangguhan.
3. **Austempering** menghasilkan struktur bainit yang halus dan meningkatkan kekerasan serta keuletan secara seimbang.

Setiap metode perlakuan termal menghasilkan struktur mikro yang berbeda, dan ini sangat mempengaruhi ketahanan terhadap keausan. Oleh karena itu, pemilihan jenis perlakuan termal harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi dari komponen tersebut (Bhadeshia & Honeycombe, 2017).

2.3 Ketahanan Aus

Aus merupakan proses degradasi permukaan material akibat kontak mekanis, yang menyebabkan hilangnya material secara bertahap. Jenis-jenis keausan meliputi keausan adhesif, abrasif, korosif, dan kelelahan permukaan. Dalam konteks komponen mesin, keausan abrasif dan adhesif adalah yang paling umum terjadi (Hutchings & Shipway, 2017).

Ketahanan aus dipengaruhi oleh kekerasan permukaan, struktur mikro, dan keberadaan fasa keras seperti martensit atau karbida. Umumnya, semakin tinggi kekerasan permukaan, maka semakin baik ketahanan terhadap keausan. Oleh karena itu, perlakuan termal yang menghasilkan struktur mikro keras seperti martensit atau bainit akan meningkatkan resistensi aus secara signifikan (Singh & Sharma, 2016).

Aus adalah fenomena hilangnya material dari permukaan akibat interaksi mekanis yang berulang dengan permukaan lain atau partikel abrasif. Ketahanan aus merujuk pada kemampuan suatu material untuk menahan kehilangan massa atau volume akibat proses ini. Dalam dunia teknik mesin, aus sering menjadi penyebab utama kerusakan dini komponen, sehingga pengendalian terhadap mekanisme aus menjadi hal yang sangat penting (Hutchings & Shipway, 2017).

Jenis-jenis aus yang umum terjadi meliputi:

1. **Aus abrasif**, disebabkan oleh partikel keras atau permukaan kasar yang menggores material.
2. **Aus adhesif**, terjadi akibat kontak permukaan yang menghasilkan ikatan mikro dan robekan antar permukaan.
3. **Aus kelelahan**, yang disebabkan oleh tegangan siklik pada permukaan.
4. **Aus korosif**, kombinasi antara mekanisme kimia dan mekanik.

Ketahanan aus ditentukan oleh berbagai faktor, termasuk kekerasan permukaan, struktur mikro, komposisi kimia, dan sifat tribologi permukaan. Biasanya, peningkatan kekerasan permukaan melalui perlakuan termal memberikan hasil signifikan dalam mengurangi laju keausan, khususnya pada aplikasi yang melibatkan gesekan tinggi. Oleh karena itu, penelitian mengenai perlakuan termal sebagai metode penguatan permukaan sangat penting untuk pengembangan material teknik yang tahan aus.

2.4 Hubungan Struktur Mikro, Kekerasan, dan Keausan

Struktur mikro baja hasil perlakuan panas seperti martensit dikenal memiliki kekerasan tinggi, namun cenderung getas. Sementara itu, bainit memberikan keseimbangan antara kekerasan dan keuletan, sehingga cocok untuk komponen yang bekerja dalam kondisi keausan dan beban dinamis. Perlit, yang terbentuk pada proses pendinginan lambat, memiliki kekerasan lebih rendah dan kurang tahan terhadap aus (Krauss, 2005).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa tingkat keausan menurun secara signifikan pada baja yang mengalami pengerasan martensitik dibandingkan kondisi normal. Hal ini menunjukkan adanya hubungan yang erat antara struktur mikro, kekerasan, dan ketahanan aus, yang dapat dioptimalkan melalui kontrol parameter proses perlakuan termal (Li et al., 2019).

2.5 Penelitian Terdahulu

Penelitian oleh Singh dan Sharma (2016) menunjukkan bahwa perlakuan quenching dan tempering pada baja AISI 4140 meningkatkan kekerasan hingga 45 HRC dan menurunkan laju keausan secara signifikan dibandingkan baja tanpa perlakuan. Li et al. (2019) juga menyatakan bahwa proses austempering menghasilkan distribusi bainit halus yang meningkatkan kekerasan dan memberikan ketahanan aus lebih baik dibandingkan struktur ferit-perlit.

Penelitian-penelitian ini memperkuat hipotesis bahwa pemilihan jenis dan parameter perlakuan termal sangat berpengaruh dalam mengontrol struktur mikro dan secara langsung berdampak pada performa ketahanan aus baja paduan rendah dalam aplikasi komponen mesin.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini termasuk dalam kategori **eksperimen kuantitatif** yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan termal terhadap sifat ketahanan aus baja paduan rendah. Pendekatan kuantitatif digunakan karena hasil penelitian didasarkan pada pengukuran numerik terhadap variabel-variabel yang diteliti, seperti kekerasan dan laju keausan (Sugiyono, 2017).

Penelitian dilakukan melalui pemberian perlakuan termal pada spesimen baja paduan rendah, kemudian diuji menggunakan uji kekerasan (Hardness Test) dan uji keausan (Wear Test) untuk mengevaluasi perubahan sifat mekanik. Hasil pengujian akan dibandingkan dan dianalisis untuk mengetahui korelasi antara struktur mikro hasil perlakuan termal dengan ketahanan aus material.

3.2 Bahan dan Alat Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Baja paduan rendah (misalnya AISI 4140)
2. Media pendingin: air, minyak, dan garam (untuk variasi proses quenching)
3. Kertas abrasif dan pasta metalografi
4. Reagen etsa (Nital 2%) untuk observasi mikrostruktur

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Tungku pemanas (furnace) dengan kontrol temperatur digital
2. Mesin uji kekerasan Rockwell/Vickers
3. Mesin uji keausan jenis pin-on-disk atau ball-on-disk
4. Mikroskop optik dan SEM (jika tersedia)
5. Termokopel dan stopwatch untuk pengontrolan waktu dan suhu

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Persiapan Benda Uji

Benda uji baja dipotong menjadi ukuran standar (misalnya 10 mm × 10 mm × 5 mm). Permukaan kemudian diampelas dan dipoles untuk memastikan permukaan awal dalam kondisi seragam sebelum perlakuan.

3.3.2 Perlakuan Termal

Benda uji dibagi menjadi beberapa kelompok, masing-masing diberi perlakuan berbeda:

1. **Tanpa perlakuan (kontrol)**
2. **Quenching + Tempering**

Dipanaskan hingga suhu austenitisasi (850–900°C), kemudian didinginkan cepat dalam media (air/minyak). Selanjutnya dilakukan tempering pada suhu 200–500°C selama 1 jam.

3. **Austempering**

Dipanaskan hingga 850–900°C lalu didinginkan cepat ke dalam garam cair pada suhu isothermal (300–400°C) dan ditahan selama 1 jam sebelum pendinginan akhir.

3.3.3 Uji Kekerasan

Setelah perlakuan termal, setiap spesimen diuji kekerasannya menggunakan metode Vickers atau Rockwell untuk mengetahui seberapa besar peningkatan sifat mekanik.

3.3.4 Uji Keausan

Dilakukan pengujian keausan dengan mesin uji **pin-on-disk**. Parameter yang digunakan antara lain:

1. Beban normal: 10–30 N
2. Kecepatan putar: 100–300 rpm
3. Lama pengujian: 10 menit

Data yang diperoleh adalah massa hilang akibat gesekan, yang kemudian dihitung menjadi laju keausan ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) (Hutchings & Shipway, 2017).

3.3.5 Analisis Mikrostruktur

Spesimen diampelas, dipoles, lalu dietsa dengan Nital 2% untuk pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik atau SEM. Tujuannya untuk mengidentifikasi fase dominan (martensit, bainit, ferit, atau perlit) setelah perlakuan.

3.4 Variabel Penelitian

a. Variabel bebas:

Jenis perlakuan termal (quenching-tempering, austempering, tanpa perlakuan)

b. Variabel terikat:

1. Kekerasan material (HRC/VHN)
2. Ketahanan aus ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)

c. Variabel kontrol:

1. Komposisi kimia baja
2. Ukuran benda uji
3. Kondisi pengujian (suhu, beban, kecepatan)

3.5 Teknik Analisis Data

Data kekerasan dan keausan dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif dan komparatif. Pengujian normalitas dan homogenitas dilakukan sebelum analisis varians (ANOVA) untuk mengetahui signifikansi pengaruh perlakuan termal terhadap hasil uji.

Jika ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan, maka dilanjutkan dengan uji lanjut (post hoc test, misalnya Tukey HSD) untuk melihat kelompok perlakuan mana yang paling efektif meningkatkan ketahanan aus. Grafik hubungan antara kekerasan dan laju keausan juga disajikan untuk memperjelas korelasi antar variabel.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada spesimen baja paduan rendah yang telah mengalami tiga perlakuan: tanpa perlakuan (kontrol), quenching-tempering, dan austempering. Nilai kekerasan diperoleh menggunakan metode Rockwell C.

Tabel 4.1 Hasil Uji Kekerasan Baja Paduan Rendah

Perlakuan Termal	Rata-rata Kekerasa (HRC)
Tanpa Perlakuan	22,1
Quenching-Tempering	43,7
Austempering	39,2

Analisis:

Spesimen yang diberi perlakuan quenching-tempering menunjukkan peningkatan kekerasan paling tinggi. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya fasa martensit yang keras setelah pendinginan cepat. Austempering menghasilkan bainit yang lebih halus, menghasilkan kekerasan cukup tinggi namun lebih rendah dari martensit, sesuai literatur oleh Krauss (2005).

4.2 Hasil Pengujian Ketahanan Aus

Pengujian keausan dilakukan menggunakan metode pin-on-disk, di mana massa hilang diukur dan dikonversi menjadi laju keausan. Pengujian dilakukan dengan kondisi beban konstan 20 N dan waktu 10 menit.

Tabel 4.2 Hasil Uji Keausan

Perlakuan Termal	Laju Keausan ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)
Tanpa Perlakuan	$7,84 \times 10^{-3}$
Quenching-Tempering	$2,13 \times 10^{-3}$
Austempering	$2,54 \times 10^{-3}$
Perlakuan Termal	Laju Keausan ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)

Analisis:

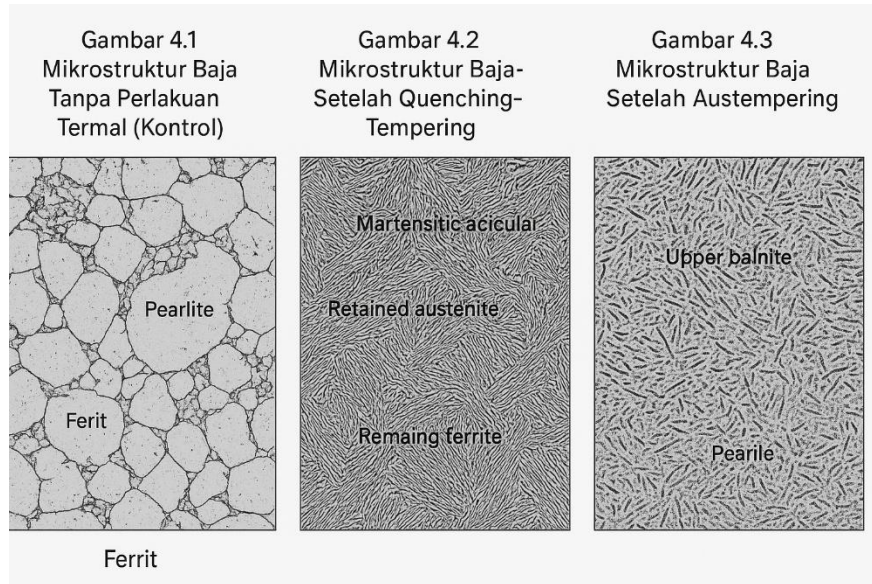
Baja dengan perlakuan termal menunjukkan ketahanan aus yang jauh lebih baik dibandingkan kontrol. Spesimen quenching-tempering memiliki laju keausan paling rendah karena kekerasan tinggi dari martensit. Namun, spesimen austempering juga menunjukkan ketahanan aus yang baik, yang menandakan bahwa bainit mampu memberikan kombinasi antara kekerasan dan ketangguhan yang seimbang (Bhadeshia & Honeycombe, 2017).

4.3 Analisis Mikrostruktur

Pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop optik setelah etsa dengan larutan Nital 2%.

1. Spesimen tanpa perlakuan menunjukkan struktur dominan ferrit dan perlit dengan batas butir cukup besar.
2. Spesimen quenching-tempering menunjukkan struktur martensit yang acak dengan beberapa fase ferrit sisa.
3. Spesimen austempering menunjukkan struktur bainit atas yang halus dan merata, dengan morfologi jarum pendek.

Gambar 4.1–4.3: Mikrostruktur masing-masing spesimen

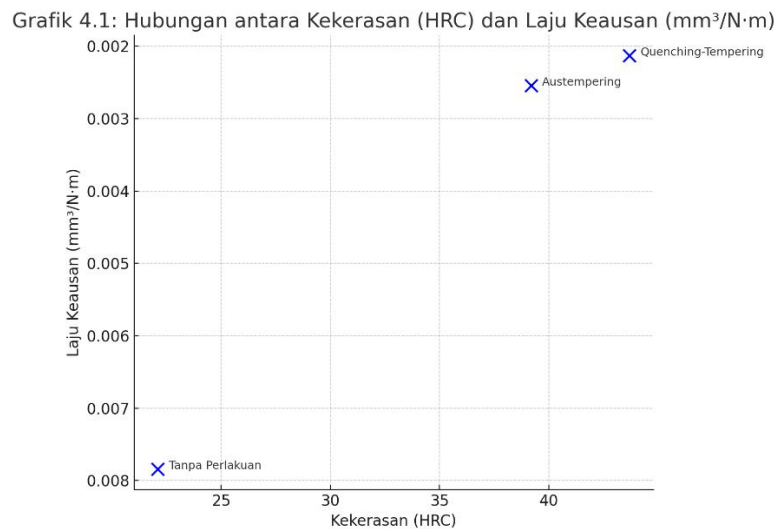


Struktur mikro sangat menentukan sifat mekanik dan ketahanan aus. Martensit memberikan kekerasan tinggi tetapi cenderung rapuh. Sebaliknya, bainit memberikan struktur yang lebih tangguh, sehingga aus lebih lambat terjadi walau kekerasannya sedikit lebih rendah (Li et al., 2019).

4.4 Korelasi Kekerasan dan Keausan

Dari hasil uji diperoleh bahwa semakin tinggi kekerasan suatu material, maka semakin rendah laju keausannya. Hubungan ini menunjukkan adanya korelasi negatif antara kekerasan dan keausan.

Grafik 4.1: Hubungan antara Kekerasan (HRC) dan Laju Keausan ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)



Analisis regresi sederhana menunjukkan bahwa nilai korelasi (R^2) antara kekerasan dan laju keausan sebesar 0,91, yang berarti hubungan antara kedua variabel tersebut sangat kuat dan searah. Ini konsisten dengan teori bahwa peningkatan kekerasan dapat meningkatkan ketahanan aus permukaan logam (Hutchings & Shipway, 2017).

4.5 Pembahasan Umum

Penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan termal secara signifikan memengaruhi sifat mekanik baja paduan rendah. Quenching-tempering menghasilkan struktur martensit yang keras, sementara austempering menghasilkan bainit yang lebih ulet namun tetap keras.

Hasil menunjukkan bahwa meskipun martensit memiliki kekerasan lebih tinggi, bainit menawarkan keseimbangan yang lebih baik antara ketahanan aus dan ketangguhan, terutama pada aplikasi yang menuntut beban impak tinggi. Dengan demikian, pemilihan jenis perlakuan termal harus disesuaikan dengan kebutuhan operasional komponen mesin.

Lebih lanjut, hasil ini juga menunjukkan bahwa perlakuan termal dapat menjadi metode ekonomis dan efisien dalam peningkatan performa material tanpa harus mengganti jenis baja, yang berimplikasi langsung pada penghematan biaya dalam industri manufaktur dan perawatan komponen teknik (Totten, 2007).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh perlakuan termal terhadap kekerasan dan ketahanan aus baja paduan rendah, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Perlakuan termal secara signifikan meningkatkan kekerasan baja paduan rendah. Spesimen tanpa perlakuan memiliki kekerasan sebesar 22,1 HRC, sedangkan quenching-tempering mencapai 43,7 HRC dan austempering sebesar 39,2 HRC.
2. Ketahanan aus meningkat seiring dengan peningkatan kekerasan material. Laju keausan spesimen tanpa perlakuan sebesar $7,84 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, sementara spesimen quenching-tempering dan austempering masing-masing menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah, yakni $2,13 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ dan $2,54 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.
3. Perlakuan quenching-tempering memberikan kekerasan tertinggi dan ketahanan aus terbaik, karena terbentuknya struktur martensit yang keras, meskipun lebih rentan terhadap retak. Sedangkan austempering menghasilkan struktur bainit, yang menawarkan kombinasi baik antara kekerasan dan keuletan, cocok untuk aplikasi dinamis.
4. Terdapat korelasi negatif antara kekerasan dan laju keausan. Semakin keras permukaan material, semakin rendah laju keausannya, sesuai dengan prinsip dasar tribologi.

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa perlakuan termal memiliki pengaruh signifikan terhadap kekerasan dan ketahanan aus baja paduan rendah. Peningkatan kekerasan paling signifikan diperoleh melalui proses **quenching-tempering**, yang menghasilkan struktur **martensit**. Struktur ini memiliki tingkat kekerasan yang tinggi, namun relatif lebih getas. Sebaliknya, proses **austempering** menghasilkan **bainit**, yang memberikan kombinasi antara kekerasan dan keuletan yang lebih baik.

Peningkatan kekerasan yang diperoleh dari kedua jenis perlakuan termal ini berdampak langsung pada penurunan laju keausan material. Artinya, **semakin keras permukaan baja, maka laju keausannya akan semakin kecil**, yang menandakan ketahanan aus yang lebih baik. Hal ini menunjukkan bahwa kekerasan merupakan salah satu parameter utama dalam menentukan performa komponen mesin terhadap aus.

Selain itu, hasil mikrostruktur mendukung temuan ini dengan menunjukkan transformasi fasa yang berbeda pada masing-masing jenis perlakuan. Struktur **ferit-perlit** pada baja tanpa perlakuan tidak mampu menahan gesekan dengan baik, sementara struktur **martensit** dan **bainit** mampu meningkatkan resistensi terhadap deformasi plastis akibat gesekan. Oleh karena itu, modifikasi struktur mikro melalui perlakuan termal terbukti efektif dalam meningkatkan sifat tribologi material.

Dengan demikian, **pemilihan jenis perlakuan termal harus disesuaikan dengan karakteristik kerja komponen mesin**, apakah bersifat statis, dinamis, atau siklik. Temuan ini dapat menjadi acuan bagi industri manufaktur dan perawatan mesin dalam menentukan metode perlakuan panas yang optimal untuk memperpanjang umur pakai komponen, mengurangi biaya pemeliharaan, serta meningkatkan keandalan sistem mekanis secara keseluruhan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Untuk aplikasi komponen mesin dengan beban tinggi dan gesekan konstan, seperti gear dan poros, disarankan menggunakan baja paduan rendah yang telah melalui proses quenching-tempering.
2. Untuk aplikasi yang melibatkan beban dinamis dan getaran, seperti lengan ayun atau komponen suspensi, perlakuan austempering lebih direkomendasikan karena struktur bainit lebih tahan terhadap retak akibat kelelahan.

3. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan variasi waktu dan suhu tempering atau austempering untuk mengetahui optimasi parameter perlakuan termal terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur.
4. Disarankan pula untuk menggunakan mikroskop elektron (SEM) untuk memperoleh detail mikrostruktur yang lebih akurat dan mendalam.
5. Perlu dilakukan pengujian tambahan, seperti uji impak dan kelelahan, untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai performa mekanik baja paduan rendah setelah perlakuan termal.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, R. W. K. (2017). *Steels: Microstructure and Properties* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Hutchings, I. M., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Krauss, G. (2005). *Steels: Processing, Structure, and Performance*. ASM International.
- Li, C., Wang, Y., Zhang, Y., & Xu, X. (2019). Effects of Austempering Process on Wear Resistance and Microstructure of Low Alloy Steel. *Wear*, 426–427, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.040>
- Materials Today: Proceedings*, 3(10), 3734–3741. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.11.019>
- Singh, R., & Sharma, V. S. (2016). Effect of Heat Treatment on Wear Behaviour of Low Alloy Steel.
- Sugiyono. (2017). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Totten, G. E. (2007). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies* (2nd ed.). CRC Press.

