

# PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU AUSTEMPER TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 1045

Fahmi Deniyasa<sup>1</sup>, Budi Santoso<sup>2</sup>, Novi Laura Indrayani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Strata Satu Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Islam “45” Bekasi

<sup>2</sup>Tim Pengajar Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Islam “45” Bekasi

Jl. Cut Mutia No.83, Margahayu, Bekasi Tim., Kota Bks, Jawa Barat 17113

E-mail Penulis: [fahmideniyasa@yahoo.co.id](mailto:fahmideniyasa@yahoo.co.id) dan [budisd@gmail.com](mailto:budisd@gmail.com)

## Abstrak

Baja karbon sedang AISI 1045 banyak digunakan sebagai bahan baku utama komponen mesin kendaraan seperti poros, spur gear, dan batang penghubung piston. Spur gear merupakan salah satu komponen yang paling sering mengalami keausan yang disebabkan oleh sifat kekerasan dan ketahanan aus yang kurang baik. Dampak dari keausan tersebut spur gear menjadi rusak dan tidak berfungsi normal. Untuk meminimalisasi keausan tersebut perlu dilakukan proses perlakuan panas hardening pada temperatur 845°C ditahan selama 60 menit, lalu di quenching dengan air garam serta dilanjutkan dengan proses austemper pada variasi temperatur 295°C, 330°C, dan 365°C serta waktu tahan selama 30 menit, 60 menit, dan 90 menit. Menggunakan spesimen 1 yang merupakan raw material baja AISI 1045 sebagai pembanding hasil tanpa heat treatment. Pengujian yang dilakukan yaitu uji kekerasan, uji struktur mikro, dan uji tahan aus. Hasil pengujian menunjukkan kekerasan meningkat menjadi 200 HB dari awalnya hanya 182 HB, naik sebesar 9.89 % pada spesimen nomer 3. Pengujian keausan menunjukkan hasil terendah nilai volume material terabrasi sebesar 5.5643747 mm<sup>3</sup>/mm dan nilai keausan spesifik sebesar 0.006603292 mm<sup>2</sup>/Kg pada spesimen nomer 3. Perubahan struktur mikro terjadi dari ferrite dan perlite menjadi struktur mikro martensite dan bainite setelah proses heat treatment pada penelitian ini.

**Kata kunci:** Baja AISI 1045, Spur Gear, Hardening, Austempering, Quenching, Kekerasan, Struktur Mikro, Ketahanan Aus.

## Abstract

AISI 1045 carbon steel is being used as the main raw material vehicle engine components such as shafts, spur gears, pistons and connecting rods. Spur gear is one component that experiences the most wear and tear caused by the properties of hardness and wear resistance are poor. The impact of the spur gear wear becomes damaged and does not function normally. To minimize wear of the necessary process of hardening heat treatment at a temperature of 845°C was detained for 60 minutes, then quenching with brine and continued with the process of austempering at 295°C temperature variation, 330°C, and 365°C and the holding time 30 minutes, 60 minutes and 90 minutes. Use the specimen 1 which is raw material of AISI 1045 steel as the compare results without heat treatment. Tests conducted is hardness test, test microstructure and wear-resistant test. The test results showed increased to 200 HB hardness of HB 182 initially, rose by 9.89% on the specimen number 3. Testing of wear showed the lowest yield value of 5.5643747 abraded material volume mm<sup>3</sup> / mm and a specific wear value of 0.006603292 mm<sup>2</sup> / Kg in the specimen No. 3. Changes occur on the microstructure of ferrite and perlite into martensite and bainite microstructure after heat treatment in this study.

**Keywords:** Steel AISI 1045, Spur Gear, Hardening, Austempering, Quenching, Hardness, Micro Structure, Wear Resistance.

## PENDAHULUAN

Dalam industri otomotif terdapat berbagai macam jenis proses manufaktur yang diberikan pada suatu produk. Tujuan dari proses manufaktur tersebut adalah untuk membentuk komponen ataupun memperbaiki sifat mekanik yang digunakan pada komponen tersebut. Baja AISI 1045 merupakan baja karbon sedang dengan presentasi karbon sebesar 0.30 – 0.60 %. Baja karbon sedang jenis AISI 1045 banyak digunakan sebagai bahan baku utama komponen mesin kendaraan seperti poros, spur gear, dan batang penghubung piston.

*Spur gear* merupakan salah satu komponen yang banyak menggunakan material baja karbon sedang AISI 1045. Dalam penggunaannya *spur gear* berfungsi untuk mentransmisikan daya besar dan putaran yang tepat. Namun karena fungsi *spur gear* yang harus meneruskan putaran dan daya besar yang bervariasi maka timbulah masalah keausan yang terjadi pada *spur gear*. Untuk meminimalisasi masalah tersebut maka diperlukanlah suatu proses perlakuan panas. Perlakuan panas adalah proses memaskan bahan sampai suhu tertentu (Amanto,1999:63). Perlakuan panas diperlukan untuk memperoleh sifat-sifat mekanik yang diinginkan sesuai dengan penggunaannya, mendapatkan keuletan, kekerasan dan sifat mekanik lainnya.

*Hardening* merupakan salah satu proses yang digunakan untuk memperbaiki sifat mekanik pada komponen yang dibuat oleh industri otomotif. Proses *hardening* tersebut memiliki tujuan agar material memiliki kekerasan dan ketangguhan yang tinggi untuk digunakan pada komponen mesin. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan ASTM (*American Society for Testing and Material*) baja AISI 1045 dapat menerima perlakuan panas dengan berbagai metode salah satunya dengan metode *hardening* pada kisaran temperatur 830°C – 850°C, dilanjutkan dengan proses *quenching* maka akan menghasilkan nilai kekerasan sekitar 322 – 552 HB. Selanjutnya berdasarkan pernyataan teknis dari *asm international* mengenai proses austempering yang dapat dilakukan pada baja karbon sedang AISI 1045 dengan kisaran temperatur 260 °C – 400 °C. Baja karbon sedang merupakan salah satu material yang banyak di produksi karena memiliki sifat dapat di modifikasi, sedikit ulet (*ductile*) dan tangguh (*thoughness*) (Davis, 1982).

Berdasarkan sifat tersebut maka penggunaan baja AISI 1045 menjadi pilihan dalam penelitian ini. Metode perlakuan panas yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *hardening* dengan pendinginan cepat yang dilanjutkan dengan proses *austemper*, proses ini bertujuan untuk meningkatkan nilai kekerasan dan keuletan pada material baja AISI 1045. Penelitian ini mencakup variasi temperatur dan waktu austemper yang berbeda-beda pada setiap spesimen material. Tujuan dari variasi tersebut untuk mengetahui perbedaan hasil spesimen material yang sudah mengalami pemanasan temperatur austemper dengan lama waktu yang telah ditentukan. Selain itu, dilakukannya variasi perbedaan temperatur dan waktu agar penelitian ini menghasilkan kekerasan, ketahanan aus, serta struktur mikro yang baik.

Penelitian ini sebelumnya telah dilakukan oleh Yusuf Umardani yaitu Pengaruh waktu *Austempering* terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro *Austempered Ductile Iron* Paduan 0,5% Cu + 0,3% Mo dan 0,5% Cu + 0,6 % Mo. Penelitian tersebut menggunakan variabel waktu austempering yang akan berpengaruh pada sifat mekanik dan struktur mikro *austempered ductile iron*, ditambahkan dengan variabel paduan tembaga, dan molybdenum dengan presentase yang berbeda. Berdasarkan penelusuran studi literature, penulis tertarik untuk menggunakan temperatur dan waktu sebagai variabel dengan judul penelitian “Pengaruh Temperatur dan Waktu Austemper Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja AISI 1045”. Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut: Mendapatkan perubahan nilai kekerasan, nilai keausan dan struktur mikro pada material baja AISI 1045; Mempelajari perubahan sifat mekanik yang terjadi setelah proses austemper dengan variasi temperatur dan waktu tahan.

## METODE

### Proses Hardening

Spesimen yang akan dilakukan proses heat treatment dibersihkan dari kotoran lalu diberi idenitas pada tiap-tiap spesimen. Tujuan dari proses ini untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan material. Berdasarkan ASTM (*American Society for Testing and Material*) baja AISI 1045 dapat menerima perlakuan panas dengan berbagai metode salah satunya dengan metode *hardening* pada kisaran temperatur 830°C – 850°C. Adapun tahap-tahap yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Masukkan spesimen kedalam tungku dengan posisi yang tepat dan benar agar panas merata pada spesimen.
2. Atur temperatur tungku pada 845°C.
3. Proses pemanasan spesimen pada temperatur austenite 845°C dengan waktu tahan 60 menit agar pada fasa austenite agar mendapatkan kekerasan maksimal.
4. Spesimen didinginkan cepat saat proses *quenching* dengan media air garam. Tujuan dari proses ini untuk menghasilkan struktur martensit sehingga kekerasannya meningkat.
5. Spesimen diberi identitas setelah proses selesai agar tidak tertukar.

### Proses Quenching

Proses *quenching* bertujuan untuk meningkatkan kekerasan baja dengan cara mendinginkannya secara cepat seperti mencelupkan baja yang telah di *heat treatment* kedalam cairan/fluida yang berupa oli, minyak, atau air garam. Penggunaan larutan garam untuk media pendingin proses *quenching* telah dimulai pada Abad 18. Pada saat itu keuntungan menggunakan larutan garam diantaranya adalah mudah mengontrol dan pemeliharaan hasilnya memiliki kualitas yang konsisten. Keuntungan lain memakai air garam karena suhu pada air garam merata sehingga pendinginan dapat merata pada seluruh bagian logam. Garam dipakai sebagai media pendingin disebabkan memiliki sifat mendinginkan yang teratur dan cepat. Bahan yang didinginkan dalam cairan garam yang akan mengakibatkan ikatannya menjadi lebih keras karena pada permukaan benda kerja tersebut akan meningkat zat arang. Kemampuan suatu jenis media dalam

mendinginkan spesimen bisa berbeda-beda, perbedaan kemampuan media pendingin disebabkan oleh temperatur, kekentalan, kadar larutan, dan bahan dasar media pendingin. (Murtiono, 2012).

Garam dapur yang digunakan adalah garam dapur kasar dengan butiran yang besar-besar yang terdapat di pasar umum/tradisional. Campuran kandungan air dan garam diukur melalui berat air yang dimasukkan kedalam bak. Dari ketentuan tersebut maka jumlah air yang digunakan saat proses *quenching* adalah 5 liter, dan garam yang digunakan sebesar 1.5 kg. Berikut prosedur proses *quenching*:

1. Siapkan peralatan yang akan digunakan untuk proses *quenching*.
2. Gunakan sarung tangan anti panas serta helm pelindung yang menutupi wajah.
3. Atur bak dan pastikan campuran air garam sudah larut.
4. Ambil spesimen yang telah di proses heat treatment menggunakan tuas penjepit
5. Segera masukan spesimen kedalam bak yang berisi campuran air dan garam, tunggu sampai temperatur menurun.
6. Proses *quenching* selesai, dan spesimen siap untuk proses austemper.

### **Proses Austemper**

*Austemper* merupakan proses *heat treatment* celup terputus yang diikuti dengan terbentuknya struktur bainite. Pada proses ini spesimen yang sudah mencapai temperatur austenite didinginkan dan dibiarkan bertransformasi secara isothermal pada temperatur dan waktu tahan yang tetap. Berdasarkan pernyataan teknis dari asm international temperatur *austempering* biasanya berada pada kisaran 260°C – 400°C. Proses *heat treatment* ini akan menghasilkan struktur bainite seluruhnya yang dipengaruhi oleh waktu transformasi isothermalnya. Tujuan dari proses ini adalah meningkatkan keuletan, ketahanan impact, dan mengurangi distorsi.

Berikut tahapan proses *austemper*:

1. Pemanasan spesimen sampai pada temperatur 845°C dan ditahan selama 60 menit, lalu didinginkan dengan cepat sampai temperatur diatas garis Ms pada diagram *austempering*.
2. Setelah proses *quenching* selesai lalu spesimen dipanaskan kembali dengan proses *austemper* pada temperatur 295°C, 330°C, dan 365°C dan waktu tahan 30, 60 menit, dan 90 menit. Pada proses *austemper* ini variasi temperatur dan waktu tahan dilakukan pada tiap spesimen.
3. Setelah temperatur dan waktu tahan tercapai spesimen didinginkan dengan udara sampai temperatur ruang.
4. Spesimen diberi identitas sesuai temperatur dan waktu tahan yang diberikan saat proses *austemper* agar tidak tertukar.

### **Proses Pengujian Kekerasan**

Pada penelitian ini dilakukan uji kekerasan roda gigi dengan metode brinell. Tujuan dari uji kekerasan ini yaitu untuk mengetahui perubahan nilai kekerasan roda gigi yang sudah melewati proses *heat treatment*. Hasil yang didapat pada uji kekerasan akan berbeda-beda pada setiap sampel roda gigi, hal ini dikarenakan variasi temperatur dan waktu *austemper* yang dilakukan pada penelitian ini. Berikut ini adalah prosedur pengujian kekerasan metode brinell:

1. Persiapkan alat uji dan bahan pengujian:
2. Siapkan mesin uji kekerasan Brinell (Brinell Hardness Test).
3. Siapkan intendor bola (bola baja).
4. Spesimen yang sudah di gerinda.
5. Amplas halus.
6. Stopwatch.
7. Intendor di tekankan ke spesimen benda uji dengan gaya tertentu
8. Tunggu hingga 10 – 30 detik
9. Bebaskan gaya dan lepaskan intendor dari spesimen benda uji
10. Ukur diameter lekukan yang terjadi menggunakan mikroskop pengukur ukur beberapa kali di beberapa tempat dan posisi lalu ambill nilai pengukuran yang paling besar).
11. Masukan data-data tersebut ke dalam rumus.

### **Pengujian Struktur Mikro**

Sebelum memulai proses uji struktur mikro material harus dibersihkan terlebih dahulu menggunakan air dan sikat halus. Setelah itu dapat diuji struktur mikronya dengan bantuan mikroskop. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk melihat, menganalisa dan membandingkan perubahan struktur mikro roda gigi yang telah melewati proses *heat treatment*. Agar dapat diamati struktur mikronya maka terlebih dahulu spesimen dipotong dibagian yang telah melewati proses *heat treatment*. Berikut ini adalah prosedur pengujian struktur mikro:

1. Spesimen yang telah dipotong dan dibingkai kemudian di grinding dengan amplas grade 120 dan 240 selama 15 menit, dilanjutkan dengan grade 400, 600, 800,1000, dan 1500.
2. Spesimen dipolish dengan magnesium oxide (MgO) agar tidak terdapat goresan pada permukaan spesimen.

3. Etsa nital dituangkan kedalam wadah kemudian spesimen dicelupkan kedalam etsa selama 5 – 10 detik pada larutan nital tersebut kemudian dicuci dengan air bersih lalu dikeringkan.
4. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan alat mikroskop optik OLYMPUS BX41M yang disambungkan ke program pada komputer.
5. Spesimen diletakan diatas bidang uji atau meja mikroskop kemudian didekatkan dengan mikroskop optik.
6. Pemakaian pembesaran 200 kali sampai 500 kali dan diambil foto dari masing-masing spesimen.
7. Setelah didapatkan fokus dan pencahayaan yang baik, diambil foto dari spesimen dengan mengklik icon capture frame pada program.

### Pengujian Ketahanan Aus (Wear Resistance Test)

Keausan dapat didefinisikan sebagai rusaknya permukaan padatan, umumnya melibatkan kehilangan material yang progresif akibat adanya gesekan/friksi antar permukaan padatan. Tujuan dari proses pengujian tahan aus adalah untuk mengetahui tingkat perubahan keausan roda gigi yang telah di proses *heat treatment*. Pengujian keausan dapat dilakukan dengan berbagai macam metode dan teknik yang semuanya bertujuan untuk mensimulasikan kondisi keausan aktual. Salah satunya dengan metode Ogoshi dimana benda uji memperoleh beban gesek dari cincin yang berputar (*revolving disc*). Pembebanan gesek ini akan menghasilkan kontak antar permukaan yang berulang-ulang yang pada akhirnya akan mengambil sebagian material pada permukaan benda uji.

Berikut ini prosedur pengujian ketahanan aus metode ogoshi:

1. Siapkan spesimen dan perlengkapan
2. Ukur tebal cincin pemutar
3. Pasang spesimen pada spesimen holder
4. Atur parameter pengujian dengan setting variasi gigi
5. Atur skala lubang intip pada posisi nol
6. Sentuhkan sampel dengan revolving disc
7. Atur pasangan roda gigi beban pada skala 4,5
8. Bersihkan benda uji dari benda membahayakan
9. Tekan tombol switch on
10. Lepas spesimen bila mesin telah mati
11. Ukur lebar celah, sketsa jejak
12. Selesai

Pada metode ogoshi mengedepankan harga keausan yang dipengaruhi oleh faktor lebar, jari-jari dan jarak, dengan rumus secara lengkap sebagai berikut :

Nilai keausan spesifik spesimen hasil pengujian keausan dihitung dengan menggunakan Persamaan 1 berikut:

$$W_s = \frac{B \times bo^3}{8 \times r \times Po \times Lo} \quad \frac{mm}{Kg} \quad (1)$$

Dimana :

- B : Diameter cincin pengaus
- bo<sup>3</sup> : Lebar jejak keausan pada benda uji
- r : Jari-jari cincin pengaus
- Po : Gaya tekan pada proses
- Lo : Jarak luncur pada proses

Nilai volume material yang terabrasi hasil pengujian keausan dihitung dengan menggunakan Persamaan 2 berikut:

$$w = \frac{B \cdot bo^3}{12 \cdot r} \quad (2)$$

Dimana :

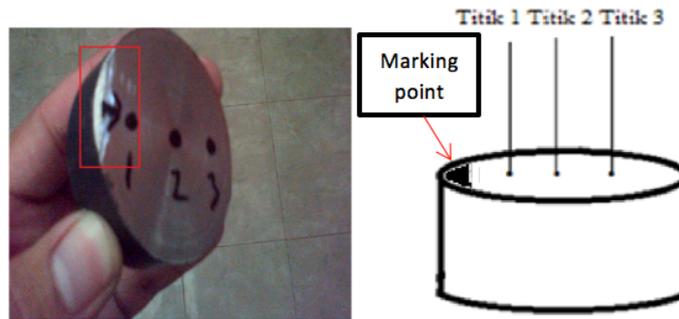
- B : Diameter cincin pengaus
- bo<sup>3</sup> : Lebar jejak keausan pada benda uji
- r : Jari-jari cincin pengaus

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Pengujian Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan sebanyak 4 kali, hal ini karena spesimen penelitian yang berjumlah sebanyak 4 buah. Selain itu 3 dari 4 spesimen telah mengalami proses perlakuan panas *austemper* dengan temperatur dan waktu tahan yang berbeda dan akan menghasilkan kekerasan yang berbeda pula. Tiap spesimen mendapat

penjejakan sebanyak 3 kali pada 3 titik (Gambar 1.) yang berbeda dengan beban 1000 Kg/f. Pengujian kekerasan ini menggunakan metode *Brinnel* dengan standar ASTM E10 pada mesin uji LECO LCB 3100.



Gambar 1. A. Marking point awal titik penjejakan pada spesimen. B. Contoh sketsa 3 titik penjejakan pada specimen.

Berikut adalah tabel kekerasan spesimen yang telah di uji kekerasan.

1. Spesimen 1 (Tanpa *heat treatment*).

Tabel.1 menunjukkan hasil uji kekerasan spesimen 1 raw material baja AISI 1045.

Tabel 1. Kekerasan Spesimen 1

No. Spesimen	Kode	Titik Penjejakan	Nilai Kekerasan HB	Keterangan
1.	Raw	Titik 1	179	Beban BHN: 1000 Kg/f
		Titik 2	182	
		Titik 3	185	

2. Spesimen 2 (*Austemper 295°C/30 menit*)

Tabel. 2 menunjukkan hasil uji kekerasan spesimen 2 dengan proses *heat treatment*.

Tabel 2. Kekerasan Spesimen 2

No. Spesimen	Kode	Titik Penjejakan	Nilai Kekerasan HB	Keterangan
2.	295/30	Titik 1	195	Beban BHN: 1000 Kg/f
		Titik 2	193	
		Titik 3	196	

3. Spesimen 3 (*Austemper 330°C/60 menit*)

Tabel. 3 menunjukkan hasil uji kekerasan spesimen 3 dengan proses *heat treatment*.

Tabel 1. Kekerasan Spesimen 3

No. Spesimen	Kode	Titik Penjejakan	Nilai Kekerasan HB	Keterangan
3.	330/60	Titik 1	200	Beban 1000 Kg/f
		Titik 2	200	
		Titik 3	200	

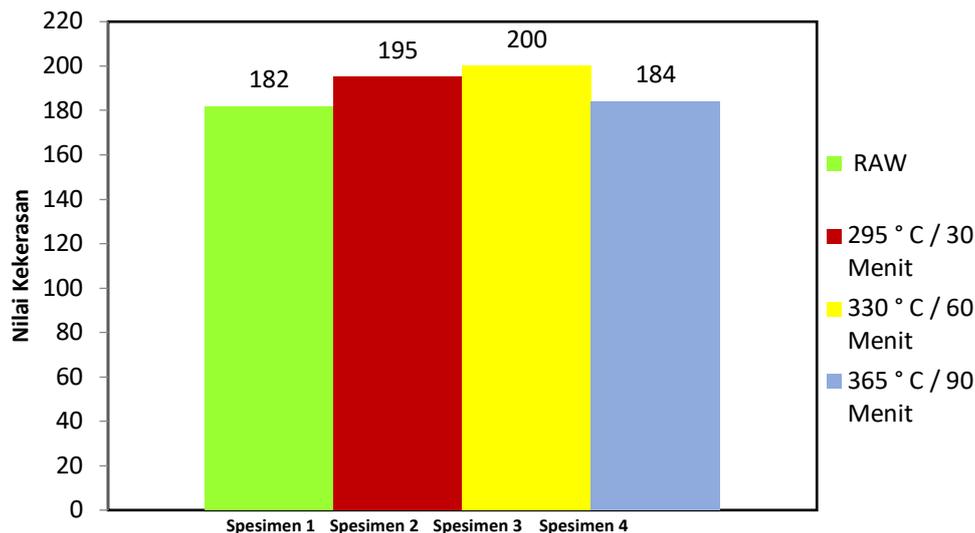
4. Spesimen 4 (*Austemper 365°C / 90 menit*)

Tabel. 4. menunjukkan hasil uji kekerasan spesimen 4 dengan proses *heat treatment*.

Tabel 2. Kekerasan Spesimen 4

No. Spesimen	Kode	Titik Penjejakan	Nilai Kekerasan HB	Keterangan
4.	365/90	Titik 1	183	Beban 1000 Kg/f
		Titik 2	185	
		Titik 3	185	

Berdasarkan data yang telah diperoleh dari tabel diatas maka selanjutnya nilai rata-rata dari kekerasan spesimen tersebut akan ditampilkan ke dalam bentuk grafik pada Gambar 2. seperti berikut ini:



Gambar 2. Grafik nilai kekerasan rata-rata

#### Kekerasan Spesimen 1 (Tanpa *Heat treatment*)

Spesimen 1 dengan kode pengujian raw merupakan baja karbon sedang AISI 1045. Berdasarkan pengujian kekerasan yang telah dilakukan maka dapat diketahui nilai kekerasan spesimen 1 pada 3 titik yang berbeda. Kekerasan di titik 1 sebesar 179 HB, titik ke 2 sebesar 182 HB, titik ke 3 sebesar 185 HB dengan nilai kekerasan rata-rata sebesar 182 HB. Spesimen 1 ini merupakan raw material yang tidak diproses *heat treatment*. Nilai kekerasan yang didapat dari spesimen ini relatif sesuai dengan kekerasan baja karbon sedang pada umumnya karena tidak mengalami proses *heat treatment*.

#### Kekerasan Spesimen 2 (295°C/30 menit)

Spesimen 2 dengan kode pengujian 295/30 merupakan spesimen yang telah mengalami proses *hardening* pada temperatur 845°C ditahan selama 60 menit kemudian di *quenching* dengan media air garam serta dilanjutkan dengan proses *austemper* pada temperatur 295°C dan ditahan selama 30 menit. Hasil dari pengujian kekerasan yang diperoleh pada spesimen ini berbeda dengan spesimen 1, dimana pada spesimen 2 terjadi peningkatan kekerasan pada masing-masing titik penjejakannya. Di titik 1 nilai kekerasan yang diperoleh sebesar 195 HB, titik ke 2 sebesar 193 HB dan titik ke 3 sebesar 196 HB dengan nilai rata-rata kekerasan sebesar 195 HB. Selisih nilai kekerasan spesimen 2 dengan spesimen 1 sebesar 13 HB. Hal ini menunjukkan spesimen 2 yang telah diproses perlakuan panas tersebut dapat meningkat kekerasannya. Peningkatan kekerasan ini adalah pengaruh dari media *quenching*, temperatur, dan waktu tahan (*holding time*).

#### Kekerasan Spesimen 3 (330°C/60 menit)

Berdasarkan pengujian kekerasan yang telah dilakukan, maka diperoleh hasil nilai kekerasan dari spesimen 3 dengan kode pengujian 330/60. Spesimen 3 telah mengalami proses *hardening* pada temperatur 845°C ditahan selama 60 menit kemudian di *quenching* dengan media air garam serta dilanjutkan dengan proses *austemper* pada temperatur 330°C yang ditahan selama 60 menit. Pada penjejakan di titik 1 nilai kekerasan dari spesimen ini sebesar 200 HB, dititik

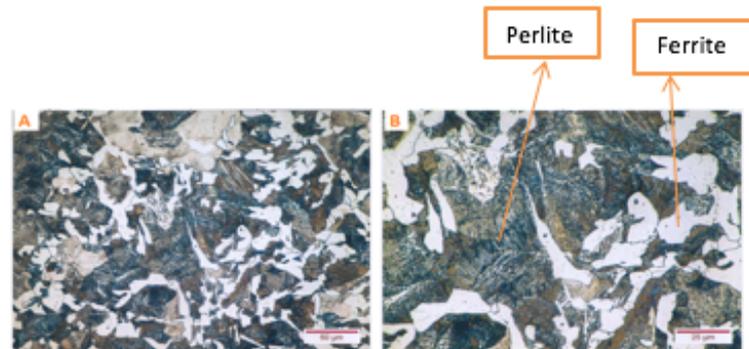
ke 2 sebesar 200 HB, dan dititik ke 3 sebesar 200 HB dengan nilai kekerasan rata-rata sebesar 200 HB. Selisih nilai kekerasan rata-rata antara spesimen 3 dengan spesimen 2 sebesar 5 HB dan spesimen 3 dengan spesimen 1 sebesar 18 HB. Nilai kekerasan meningkat secara signifikan dibandingkan dengan spesimen 2 dan 4, nilai kekerasan serta keseragaman yang terjadi pada spesimen 3 merupakan nilai yang paling tinggi, hal ini menunjukkan pengaruh dari media *quenching*, temperatur dan waktu tahan yang tepat akan menghasilkan kekerasan yang seragam pada tiap titik penjejakannya.

#### Kekerasan Spesimen 4 (365°C / 90 menit)

Spesimen 4 merupakan spesimen yang telah melalui proses *hardening* pada temperatur 845°C ditahan selama 60 menit kemudian di *quenching* dengan media air garam serta dilanjutkan dengan proses *austemper* dengan temperatur paling tinggi dan waktu tahan yang paling lama yaitu 365°C ditahan selama 90 menit. Pada penjejakan di titik 1 nilai kekerasan sebesar 183 HB, titik ke 2 sebesar 185 HB, dan titik ke 3 sebesar 185 HB dengan nilai kekerasan rata-rata sebesar 184 HB. Selisih nilai kekerasan rata-rata antara spesimen 4 dan spesimen 2 sebesar 11 HB, dan selisih spesimen 4 dengan spesimen 3 sebesar 16 HB. Hasil dari pengujian kekerasan yang dilakukan terjadi peningkatan nilai kekerasan yang tidak signifikan dibanding dengan spesimen 3 dan 2. Hal ini menunjukkan waktu tahan pada proses *austemper* yang terlalu lama berpengaruh pada nilai kekerasan yang dihasilkan akan menurun. Selisih nilai kekerasan rata-rata spesimen 4 dengan spesimen 1 hanya sebesar 2 HB, terlihat bahwa spesimen spesimen 4 masih memiliki nilai kekerasan diatas spesimen 1.

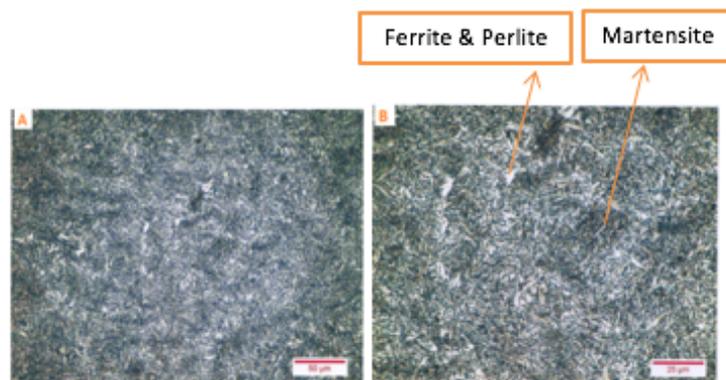
#### Hasil dan Pembahasan Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro pada spesimen penelitian ini menggunakan alat *Inverted Metallurgical Microscope Olympus BX41M-LED* dengan standar pengujian ASTM E3 dan ASTM E407. Etsa nital yang digunakan pada pengujian ini sebanyak 3%. Gambar 3. adalah pengamatan struktur mikro pada spesimen 1.



Gambar 3. Foto struktur mikro spesimen 1: A. Pembesaran 500x dan B. Pembesaran 1000x

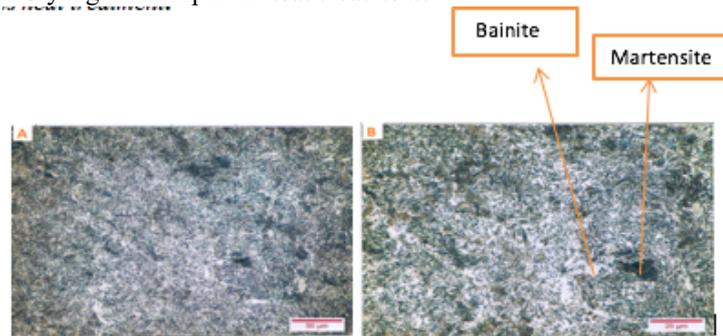
Spesimen 1 (tanpa *heat treatment*) dengan struktur mikro *Pearlite* dan *Ferrite*. Gambar 4. Adalah pengamatan struktur mikro pada spesimen 2 yang telah di proses *heat treatment*.



Gambar 4. Foto struktur mikro spesimen 2: A. Pembesaran 500x dan B. Pembesaran 1000x

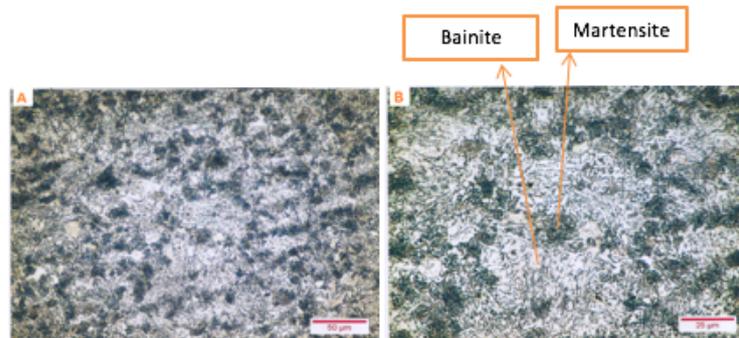
Struktur mikro yang dihasilkan yaitu *martensite* yang banyak terbentuk di selingi beberapa *ferrite* dan *perlite* yang sedikit terbentuk. Struktur *martensite* bersifat keras dan getas akibatnya kekerasan pada spesimen 2 meningkat, maka

dapat diketahui sifat mekanik dari spesimen 2 yaitu sedikit keras dan ulet. Gambar 5. berikut adalah pengamatan struktur mikro pada spesimen 3 yang telah di proses *heat treatment*.



Gambar 5. Foto struktur mikro spesimen 3: A. Pembesaran 500x dan B. Pembesaran 1000x

Struktur mikro yang dihasilkan yaitu *martensite* yang banyak terbentuk dan sedikit *bainite*. Struktur mikro *martensite* bersifat keras dan getas, serta struktur *bainite* bersifat ulet, hasilnya kekerasan dan keuletan pada spesimen 3 meningkat, maka dapat diketahui sifat mekanik dari spesimen 3 yaitu keras dan sedikit ulet. Gambar 6. adalah pengamatan struktur mikro pada spesimen 4 yang telah di proses *heat treatment*.



Gambar 6. Foto struktur mikro spesimen 4: A. Pembesaran 500x dan B. Pembesaran 1000x

Struktur mikro yang dihasilkan yaitu *bainite* yang sangat banyak terbentuk dibandingkan struktur *martensite*. Struktur mikro *bainite* bersifat ulet serta struktur *martensite* bersifat keras dan getas hasilnya kekerasan spesimen 4 menurun namun keuletannya meningkat, maka dapat diketahui sifat mekanik dari spesimen 4 yaitu sangat ulet dan sedikit keras.

Pembahasan Pengamatan Struktur Mikro Sebagai Berikut:

1. Spesimen 1 (tanpa *heat treatment*)  
Seperti terlihat pada gambar 4.3 raw material baja karbon sedang AISI 1045 diketahui struktur mikronya yaitu *perlite* (dengan warna gelap dan hitam), dan *ferrite* (warna terang). *Perlite* merupakan campuran dari *ferrite* dan *sementite*. Spesimen 1 merupakan spesimen tanpa proses *heat treatment* dalam penelitian ini. Hasil pengamatan struktur mikro yang diperoleh pada spesimen 1 tidak dipengaruhi oleh temperatur dan waktu tahan *heat treatment* ataupun media *quenching*, karena spesimen 1 merupakan raw material.
2. Spesimen 2  
Setelah pengamatan struktur mikro pada spesimen 2 yang telah di proses *heat treatment* terlihat pada Gambar 4. bahwa struktur mikro yang terbentuk yaitu *martensite* (berbentuk jarum) yang banyak terbentuk serta sedikit *ferrite* dan *perlite* (warna putih). Proses *heat treatment* yang dilakukan pada spesimen 2 yaitu *hardening* pada temperatur 845°C ditahan selama 60 menit, kemudian dilakukan pendinginan cepat dengan *quenching* air garam saat spesimen 2 masih berada pada fasa *austenite* sehingga bertransformasi menjadi fasa *martensite*. Pada laju pendinginan sangat cepat maka struktur yang terbentuk adalah *martensite*. *Martensite* memiliki sifat yang kuat dan keras namun juga bersifat rapuh dan getas, dari struktur mikro yang terbentuk tersebut maka dapat diketahui sifat mekanik dari spesimen 2 yaitu sedikit keras dan ulet. Selanjutnya spesimen 2 di proses *heat treatment* kembali dengan proses *austemper* pada temperatur 295°C ditahan selama 30 menit. Pada proses ini spesimen 2 dibiarkan bertransformasi secara isothermal pada temperatur tetap atau diatas garis Ms.
3. Spesimen 3  
Berdasarkan pengamatan struktur mikro pada spesimen 3 seperti terlihat pada Gambar 5. bahwa struktur mikro yang terbentuk adalah *martensite* (berbentuk jarum) yang lebih banyak terbentuk dan dengan struktur *bainite*

(warna putih) yang sedikit terbentuk. Terlihat pada pengujian kekerasan spesimen 3 memiliki kekerasan yang paling tinggi diantara spesimen lainnya. Hal ini menunjukkan sifat dari struktur mikro *martensite* yang keras dan getas. Namun karena spesimen 3 memiliki struktur mikro lain yang terbentuk yaitu *bainite* yang bersifat ulet dan kurang stabil maka dapat diketahui sifat mekanik spesimen 3 memiliki kekerasan yang tinggi namun sedikit ulet karena adanya struktur *bainite* tersebut. Proses *heat treatment* pada spesimen ini yaitu *hardening* pada temperatur 845°C ditahan selama 60 menit lalu dilakukan pendinginan cepat dengan *quenching* air garam yang dilanjutkan dengan proses *austemper* pada temperatur 330°C selama 60 menit. Fasa *austenite* saat pemanasan pada temperatur 845°C membentuk struktur atom FCC (*Face Centered Cubic*) namun karena waktu yang sangat singkat dan atom-atomnya terperangkap maka membentuk struktur baru berupa *martensite* yang mempunyai struktur BCT (*Body Centered Tetragonal*).

#### 4. Spesimen 4

Seperti diketahui spesimen 4 merupakan spesimen dengan temperatur *austemper* tertinggi dan waktu tahan terlama selama 90 menit. Berdasarkan foto struktur mikro pada spesimen 4 seperti terlihat pada Gambar 6. bahwa struktur mikro yang paling banyak terbentuk adalah *bainite* (berwarna putih) dibandingkan dengan *martensite* (berbentuk jarum) yang tampak halus dan sedikit. Hal ini dikarenakan temperatur *austemper* yang telah melewati fase *martensite finish* sehingga menghasilkan struktur yang hampir seluruhnya *bainite* dan kekerasannya menurun. Dapat diketahui sifat dari spesimen 4 ini yaitu ulet, lunak, serta sedikit keras karena banyaknya struktur *bainite* yang terbentuk dibanding struktur *martensite*. Proses *heat treatment* pada spesimen 4 terdiri dari *hardening* pada temperatur 845°C ditahan selama 60 menit, lalu dilakukan pendinginan cepat dengan *quenching* air garam, kemudian dilanjutkan dengan proses *austemper* pada temperatur 365°C selama 90 menit.

### Hasil Pengujian Keausan

Pengujian keausan dilakukan pada spesimen raw material dan spesimen yang telah mengalami proses *heat treatment*. Tiap spesimen telah melalui proses *hardening* pada temperatur 845°C selama 60 menit kemudian di *quenching* dengan media air garam serta dilanjutkan dengan proses *austemper* pada temperatur 295°C, 330°C, 365°C dan ditahan selama 30 menit, 60 menit, dan 90 menit. Masing-masing spesimen mendapat temperatur dan waktu tahan yang berbeda pada proses *austemper*. Pengujian keausan dilakukan dengan mesin uji *High Speed Universal Wear Testing Machine Type OAT-U*, pengujian ini mengacu pada *Reinken Ogoshi* dengan diameter cincin pengaus (15 mm), tebal cincin pengaus (3 mm), jari-jari cincin pengaus (7.5 mm), beban pada proses (12.64 Kg), jarak luncur (100 m). Pengujian keausan ini menggunakan standar ASTM G99. Hasil pengujian keausan dapat dilihat pada Tabel. 5 skema pengujian keausan dengan berbagai parameter.

Tabel 5. Skem Pengujian Keausan

No Spesimen	Temperatur Austemper	Diameter Cincin Pengaus	Jari-jari Cincin Pengaus	Beban	Jarak Luncur	Nilai Volume Material Terabrasi	Nilai Keausan Spesifik Spesimen
	(°C)	(d) (mm)	(r) (mm)	(p) (Kg)	(Lo) (m)	(mm <sup>3</sup> /mm)	(mm <sup>2</sup> /Kg)
1	RAW	15	7.5	12.64	100	3.6980068	0.004388457
2	295	15	7.5	12.64	100	6.6086368	0.007842527
3	330	15	7.5	12.64	100	5.5643747	0.006603292
4	365	15	7.5	12.64	100	6.0441152	0.007172605

**Spesimen 1 (Non heat treatment)**, menunjukkan nilai parameter pengujian keausan dan nilai volume material terabrasi pada spesimen 1. Hasil uji keausan pada spesimen 1 menunjukkan nilai volume material yang terabrasi pada raw material baja karbon sedang AISI 1045 dengan nilai volume material yang terabrasi sebesar  $3.6980068 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/mm. Spesimen 1 tidak melalui proses *heat treatment* apapun maka dari itu hasil yang diperoleh pengujian keausan ini tidak dipengaruhi oleh temperatur, waktu tahan serta media *quenching* karena spesimen 1 merupakan raw material.

**Spesimen 2 (295°C/30 menit)**, menunjukkan nilai parameter pengujian keausan dan nilai volume material terabrasi pada spesimen 2. Pengujian keausan pada spesimen 2 yang telah melalui proses *hardening* pada temperatur 845°C ditahan selama 60 menit kemudian di *quenching* dengan media air garam serta dilanjutkan dengan proses *austemper* pada temperatur 295°C selama 30 menit menghasilkan nilai volume material yang terabrasi sebesar  $6.6086368 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/mm.

**Spesimen 3 (330°C/60 menit)**, menunjukkan nilai parameter pengujian keausan dan nilai volume material terabrasi pada spesimen 3. Spesimen 3 yang telah melalui proses *hardening* pada temperatur 845°C ditahan selama 60 menit kemudian di *quenching* dengan media air garam serta dilanjutkan dengan proses *austemper* pada temperatur 330°C selama 60

menit menghasilkan nilai volume material yang terabrasi sebesar  $5.5643747 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$  berdasarkan pengujian keausan yang telah dilakukan.

**Spesimen 4 (365°C/90 menit)**, menunjukkan nilai parameter pengujian keausan dan nilai volume material terabrasi pada spesimen 4. Spesimen 4 merupakan spesimen dengan temperatur *austemper* tertinggi dan waktu tahan terlama, sebelumnya spesimen 4 telah melalui proses *hardening* pada temperatur 845°C ditahan selama 60 menit kemudian di *quenching* dengan media air garam serta dilanjutkan dengan proses *austemper* pada temperatur 365°C selama 90 menit. Setelah pengujian keausan diperoleh hasil nilai volume material yang terabrasi sebesar  $6.0441152 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ .

Hasil pengujian keausan pada penelitian ini menunjukkan bahwa temperatur dan waktu tahan proses *austemper* akan berpengaruh pada nilai volume material yang terabrasi dan pada nilai keausan spesifik tiap spesimen. Spesiennn yang telah di proses *hardening* pada temperatur 845°C ditahan selama 60 menit kemudian di *quenching* dengan media air garam serta dilanjutkan dengan proses *austemper* pada temperatur 295°C selama 30 menit, 330°C selama 60 menit, dan 365°C selama 90 menit merupakan spesimen nomer 2, 3, dan 4. Dari ketiga spesimen tersebut spesimen nomer 3 dengan nilai volume material terabrasi sebesar  $5.5643747 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$  dan nilai keausan spesifik sebesar  $0.006603292 \text{ mm}^2/\text{Kg}$  merupakan spesimen dengan nilai terendah dibandingkan dengan spesimen nomer 2 dan nomer 4. Peningkatan ketahanan aus tersebut disebabkan oleh adanya struktur *martensite* yang bersifat keras dan lebih dominan dibandingkan struktur *bainite* yang ada pada spesimen nomer 3, oleh karena itu spesimen nomer 3 memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi sesuai dengan pengujian kekerasan yang dilakukan dengan nilai kekerasan rata-rata sebesar 200 HB, maka spesimen nomer 3 juga memiliki sifat ketahanan aus terendah diantara spesimen lainnya seiring dengan nilai kekerasan tinggi yang dimiliki oleh spesimen 3.

Perbedaan nilai volume material yang terabrasi dan nilai keausan spesifik terjadi pada spesimen nomer 1 yang merupakan raw material baja karbon sedang AISI 1045. Spesimen nomer 1 tidak melalui proses *heat treatment* apapun namun menghasilkan nilai volume material yang terabrasi dan nilai keausan spesifik terendah dibandingkan spesimen nomer 2, nomer 3, dan nomer 4. Nilai yang diperoleh setelah pengujian ketahanan aus jauh lebih rendah dari spesimen yang telah diproses *heat treatment* dengan nilai volume material yang terabrasi sebesar  $3.6980068 \text{ mm}^3/\text{mm}$  dan nilai keausan spesifik sebesar  $0.004388457 \text{ mm}^2/\text{Kg}$ . Berdasarkan nilai tersebut spesimen nomer 1 yang merupakan raw material memiliki nilai ketahanan aus terendah yang tidak dipengaruhi oleh temperatur dan waktu tahan *heat treatment*. Pada masing-masing spesimen dilihat perbandingan hasil proses *austemper* seperti terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6. menunjukkan secara singkat proses *heat treatment* dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik pada spesimen penelitian.

No	Klasifikasi	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	Spesimen 4
1	Kekerasan	Raw material baja karbon sedang AISI 1045. Nilai kekerasan 182 HB.	Hardening 845°C selama 60 menit, quenching air garam, dilanjutkan proses austemper pada temperatur 295°C selama 30 menit. Nilai kekerasan 195 HB.	Hardening 845°C selama 60 menit, quenching air garam, dilanjutkan proses austemper pada temperatur 330°C selama 60 menit. Nilai kekerasan 200 HB.	Hardening 845°C selama 60 menit, quenching air garam, dilanjutkan proses austemper pada temperatur 365°C selama 90 menit. Nilai kekerasan 184 HB.
2	Struktur Mikro	 Struktur mikro raw material baja karbon sedang AISI 1045 terdiri dari ferrite dan perlite.	 Struktur mikro spesimen 2 banyak terbentuk martensite yang diselingi beberapa ferrite dan perlite.	 Struktur mikro spesimen 3 banyak terbentuk martensite dan sedikit bainite.	 Struktur mikro spesimen 4 sangat banyak terbentuk bainite
3	Keausan	Nilai volume material terabrasi pada raw material baja karbon sedang AISI 1045 sebesar $3.6980068 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . dan nilai keausan spesifik sebesar $0.004388457 \text{ mm}^2/\text{Kg}$ .	Nilai volume material terabrasi pada spesimen 2 sebesar $6.6086368 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . dan nilai keausan spesifik sebesar $0.007842527 \text{ mm}^2/\text{Kg}$ .	Nilai volume material terabrasi pada spesimen 3 sebesar $5.5643747 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . dan nilai keausan spesifik sebesar $0.006603292 \text{ mm}^2/\text{Kg}$ .	Nilai volume material terabrasi pada spesimen 4 sebesar $6.0441152 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ dan nilai keausan spesifik sebesar $0.007172605 \text{ mm}^2/\text{Kg}$ .

## PENUTUP

### Simpulan

Berikut ini adalah beberapa kesimpulan dan saran yang dapat diperoleh dari penelitian ini:

1. Terjadi peningkatan nilai kekerasan yang signifikan pada spesimen nomer 3 dengan nilai kekerasan rata-rata sebesar 200 HB atau naik sekitar 9.89 %.
2. Terjadi perubahan struktur mikro dari *ferrite* dan *perlite* menjadi struktur mikro *martensite* dan *bainite* setelah proses *heat treatment* pada penelitian ini.
3. Nilai terendah hasil uji tahanan aus terjadi pada spesimen nomer 3 yang telah melalui proses *heat treatment* dengan nilai volume material terabrasi 5.5643747 mm<sup>3</sup>/mm dan nilai keausan spesifik sebesar 0.006603292 mm<sup>2</sup>/Kg.
4. Spesimen nomer 3 memiliki sifat mekanis yang keras, kuat, dan sedikit ulet. Karena adanya struktur *martensite* yang lebih dominan dibanding *bainite*.
5. Spesimen nomer 4 memiliki sifat mekanis ulet, sedikit keras, dan tidak stabil akibat adanya struktur *bainite* yang lebih dominan dibanding *martensite*.

### Saran

Agar penelitian selanjutnya bisa mendapatkan hasil yang optimal dan lebih baik maka penulis memberikan masukan berupa saran sebagai berikut :

1. Saat proses *heat treatment*, dari akhir proses *hardening* kemudian *quenching* serta dilanjutkan dengan proses *austemper* disarankan menggunakan 2 tungku yang berbeda. Satu tungku untuk proses *hardening* dengan *setting* temperatur *hardening* dan satu tungku lainnya untuk proses *austemper* dengan *setting* temperatur *austemper* yang sesuai. Hal ini perlu dilakukan agar saat spesimen telah selesai proses *quenching* spesimen tidak perlu dimasukkan lagi kedalam tungku yang temperaturnya masih tinggi karena akan membutuhkan waktu yang sangat lama menunggu penurunan temperaturnya sampai temperatur *austemper*.
2. Saat pemotongan raw material untuk membentuk spesimen. Perlu diperhatikan saat proses pemotongan raw material disarankan agar menggunakan cairan pendingin (*coolant*). Tujuannya agar menghindari permukaan raw material terkena panas akibat gesekan *cutting wheel*, apabila tidak menggunakan cairan pendingin akan berakibat pada berubahnya struktur mikro dan kekerasan raw material sehingga spesimen raw material tidak sesuai lagi kekerasannya dengan standar.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan meningkatkan variasi temperatur dan waktu tahanan proses *heat treatment* agar dapat diperoleh hasil yang optimal dan lebih baik untuk meningkatkan sifat mekanis pada baja.
4. Perlu dilakukan pengujian ketahanan aus dengan metode lain agar memperoleh hasil nilai volume material yang terabrasi dan nilai keausan spesifik yang akurat pada tiap spesimen.
5. Perlu perbanyak spesimen pengujian agar menghindari kesalahan data pengujian yang tidak valid.

## DAFTAR PUSTAKA

- Antajuna, A. 2016. "Pengaruh Media Pendinginan Terhadap Tingkat Kekerasan Pada Proses Hardening Baja AISI 1045". Skripsi. Teknik Mesin. Fakultas Teknik Universitas Islam "45" Bekasi.
- Asm International. Tanpa Tahun "Austempering of Steel". Diambil dari [http://www.asminternational.org/web/hts/home//journal\\_content/56/10192/ASMHBA0001152/PUBLICATION](http://www.asminternational.org/web/hts/home//journal_content/56/10192/ASMHBA0001152/PUBLICATION). Diakses Pada 28 November 2016 10.12 WIB.
- ANONAME. Tanpa Tahun. "Engineering Steel AISI 1045". Diambil dari [www.stainless.steelandtube.co.nz](http://www.stainless.steelandtube.co.nz). Diakses Pada 26 April 2016 08.22 WIB.
- Arda. Tanpa Tahun. Diambil dari <https://ardra.biz/sain-teknologi/metallurgi/besi-baja-iron-steel/diagram-continuous-cooling-transformation-cct-diagram/>. Diakses Pada 16 November 2016 09.22 WIB.
- Azwar. 2014. "Pengujian Kekerasan". Diambil dari <http://pengujiankekerasan.blogspot.co.id/2014/03/uji-kekerasanmaterial.html>. Diakses pada 16 November 2016 10.53 WIB.
- Tim Penyusun. 2015. "Panduan Pelaksanaan dan Penyusunan Skripsi". Fakultas Teknik Universitas Islam "45" Bekasi.
- Chan, Y. 2007. Teori Dasar Roda Gigi. Diambil dari <https://yefrichan.files.wordpress.com/2007/04/teori-dasar-rodagigi.pdf>. Diakses tanggal 8 Mei 2016 10.55 WIB.
- Djafri, S. 1995. *Metallurgi Mekanik*, terjemahan dari *Mechanical Metallurgy*, Jakarta. Erlangga.
- Hamzah, M.H. dan Iqbal, M. 2008. "Peningkatan Ketahanan Aus Baja Karbon Rendah Dengan Metode Carburizing". *Jurnal SMARTek*, 6 (3):196-175.
- Iswadi. 1997. "Studi Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahanan Austemper Dengan Austenisasi 900°C Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Besi Tuang Nodular FCD 50". Skripsi. Teknik Metallurgi. Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok.

---

Fahmi Deniyasa, Budi Santoso "Pengaruh Temperatur dan Waktu Austemper Terhadap Sifat Mekanis AISI 1045"  
Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Vol.6, No.2 Agustus 2018 Universitas Islam 45 Bekasi, <http://ejournal.unismabekasi.ac.id>

- Kurniawan B. E, dan Setiyorini Y. 2014 “Pengaruh variasi Holding Time Pada Perlakuan Panas Quench Annealing Terhadap Sifat mekanik dan Mikro Struktur Pada Baja mangan AISI 3401” Di ambil dari <http://ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/5865>. Diakses tanggal 19 Mei 2017.
- Margono. 2008. “Pengaruh Perbedaan Waktu Penahanan Suhu Stabil (Holding Time) Terhadap Kekerasan Logam”. *Jurnal Litbang Provinsi Jawa Tengah*, 6 (2):157-160.
- Muharram, Y.S. 2015. “Pengaruh Quenching dan Tempering Pada Baja JIS Grade S45C Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Crankshaft”. Skripsi. Teknik Mesin. Fakultas Teknik Universitas Islam “45” Bekasi.
- Nasukha. 2015. “Diagram TTT dan CCT”. Diambil dari <http://nasukhamesin.blogspot.co.id/2015/01/diagram-tttcct.html> diakses pada 16 November 2016 pukul 09.05 WIB.
- Prabhudev, K. H. 1988. “Handbook of Heat Treatment of Steels”. Diambil dari [https://books.google.com/books/about/Handbook\\_of\\_Heat\\_Treatment\\_of\\_Steels.html?id=yu2r5uqJBGIC](https://books.google.com/books/about/Handbook_of_Heat_Treatment_of_Steels.html?id=yu2r5uqJBGIC). diakses pada 15 november 2016 10.34 WIB.
- Rakhit, A.K. 2000. “Heat Treatment of Gears : A Practical Guide for Engineers”. ASM INTERNATIONAL. United States.
- Rismawan, R. dan Syaehudin, D. 2004 “TENTANG DIAGRAM TTT”. Laporan. Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan Universitas Pendidikan Indonesia.
- Sagita R. N, Rochiem R, dan Wibisono A. T. 2017. “Analisa Pengaruh Lama Waktu Tahan Tempering terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Coupler Baja AAR-M201 Grade E” Di ambil dari <http://ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/21248>. Di akses tanggal 19 Mei 2017.
- Septianto B. A, dan Setiyorini Y. 2013 . “Pengaruh Media Pendingin pada Heat Treatment Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Friction Wedge AISI 1340” Di ambil dari <http://www.ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/3846/1223>. Di akses tanggal 19 Mei 2017
- Suherman, W. 1987 Pengetahuan Bahan. Modul Kuliah.
- Surojo, E. Raharjo, W.P dan Purwanto H. 2007. “Pengaruh Temperatur dan Waktu Austempering Pada Proses Austempering Besi Cor Nodular FCD 40”. *Jurnal Gema Teknik*, 1 (x): 17-21.
- Sutyoko. 2014. “Perubahan Sifat Mekanik Material Karena Perbedaan Konsentrasi Larutan Garam NaCl Pada Proses Quenching”. *Jurnal Foundry*, 4 (1): 25-28.
- Setiyanto, I. 2009. “Pengaruh Variasi Temperatur Sintering Terhadap Ketahanan Aus Bahan Rem Sepatu Gesek”. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta. Surakarta.
- Setiaji, R. Tanpa Tahun. “Pengujian Keausan Departemen Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Indonesia” <https://www.scribd.com/doc/52882694/21704473-uji-keausan>. Diakses pada 16 November 2016 14.08 WIB.
- Thelning ,K.E. 1984.”Steel and Its Heat Treatment Second Edition” Butterworth-Heinemann. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP.
- Umardani, Y. 2010. “Pengaruh Waktu Austempering Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Austempered Ductile Iron Paduan 0,5% Cu + 0,3% Mo Dan 0,5% Cu + 0,6 % Mo”. *Jurnal ROTASI*, 12 (2): 14-17.