



**TUGAS AKHIR – TL 141584**

**ANALISA PENGARUH TEMPERATUR  
*TEMPERING* TERHADAP STRUKTUR  
MIKRO DAN SIFAT MEKANIK BAJA AAR-  
M201 GRADE E**

IMAM AHMAD SURYANA  
NRP. 2712 100 068

Dosen Pembimbing  
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc  
Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc.

PROGRAM STUDI SARJANA  
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2016



**FINAL PROJECT – TL 141584**

**ANALYSIS OF TEMPERING  
TEMPERATURE EFFECT ON  
MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL  
PROPERTIES OF AAR-M201 GRADE E  
STEEL**

**IMAM AHMAD SURYANA**  
NRP. 2712 100 068

Advisor

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc

Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc.

**DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL  
ENGINEERING**

Faculty of Industrial Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2016

**LEMBAR PENGESAHAN**

**ANALISA PEGARUH TEMPERATUR *TEMPERING*  
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT  
MEKANIK BAJA AAR-M201 GRADE E**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur  
Program Studi S1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:  
**IMAM AHMAD SURYANA**  
NRP. 2712 100 068

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. .... (Pembimbing 1)
2. Tubagus Noor R., ST., M.Sc. .... (Pembimbing 2)



## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas Rahmat dan Hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “**Analisa Pengaruh Temperatur *Tempering* terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E**”

Pada kesempatan kali ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas nikmat dan hidayahnya yang senantiasa tercurahkan pada penulis;
2. Keluarga penulis yang selalu memberikan doa, semangat dan motivasi yang tiada henti;
3. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M. Eng, selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS;
4. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc dan Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc selaku dosen pembimbing tugas akhir;
5. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng, Bapak Wikan Jatimurti, ST., M.Sc. dan Ibu Diah Susanti, ST., MT., Ph.D., sebagai tim penguji;
6. Bapak Beny Andhika, ST., dan PT. Barata Indonesia (Persero);
7. Seluruh dosen dan jajarannya staff jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS;
8. Keluarga kedua penulis di kampus, MT 14, yang telah sepenuhnya mendukung penulis;
9. Seluruh pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari adanya keterbatasan di dalam penyusunan laporan ini. Besar harapan penulis akan saran dan kritik yang sifatnya membangun. Selanjutnya semoga tulisan ini dapat selalu bermanfaat. Amin.

Surabaya, Juli 2016  
Penulis

# **Analisa Pengaruh Temperatur *Tempering* terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E**

**Nama Mahasiswa : Imam Ahmad Suryana**

**NRP : 2712100068**

**Dosen Pembimbing: Ir. Rochman Rochiem, M.Sc**

**Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc.**

## **Abstrak**

*Coupler* adalah salah satu komponen dalam kereta api yang berfungsi untuk menyambungkan antar gerbong kereta. Komponen ini terbuat dari *low alloy cast steel* yang sesuai dengan spesifikasi dari AAR-M201 grade E. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh temperatur *tempering* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E. Proses perlakuan panas yang dilakukan adalah *hardening* pada temperatur 925 °C selama 3 jam, kemudian dilanjutkan dengan *tempering* pada variasi temperatur 550, 600, dan 650 °C selama 3 jam. Pengujian yang dilakukan adalah metalografi, uji tarik, uji kekerasan, dan uji impak. Hasil yang didapatkan, baja AAR-M201 Grade E mempunyai struktur mikro bainit, perlit, dan ferrit setelah dilakukan proses *hardening*, dan menjadi bainit temper setelah dilakukan *tempering*. Hasil sifat mekanik yang paling optimal didapat saat temperatur *tempering* yang digunakan 600°C, menghasilkan nilai kekuatan tarik 828,88 MPa, kekuatan luluh 735,64 MPa, elongasi 11%, reduksi area 31,35%, kekerasan 27 HRc, dan kekuatan impak sebesar 34 Joule pada temperatur -40°C. Nilai yang dihasilkan hampir seluruhnya memenuhi standar AAR, kecuali nilai elongasi.

**Kata kunci:** baja AAR-M201 Grade E, *hardening*, *tempering*, temperatur

# **Analisa Pengaruh Temperatur *Tempering* terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E**

**Nama Mahasiswa : Imam Ahmad Suryana**

**NRP : 2712100068**

**Dosen Pembimbing: Ir. Rochman Rochiem, M.Sc**

**Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc.**

## **Abstract**

Coupler is a component that used to connect each wagon in a train. It is made of low alloy cast steel under spesification from AAR-M201 Grade E. This research aiming to know tempering temperature effect to microstructures and mechanical properties of AAR-M201 Grade E steel. Heat treatment used in this research is hardening – tempering. Steel hardened at 925°C for 3 hours, and tempered at 550, 600, and 650°C for 3 hours. Test was done to know the microstructures and properties is metallographic test, tensile test, hardness test, and impact test. The result shows that AAR-M201 Grade E steel has microstructure identified as bainit, perlit, and ferrit after hardened. The microstructure transform into tempered bainit after steel was tempered. Optimum mechanical properties was gotten from tempering temperature 600°C, producing tensile strength of 828,88 MPa, yield strength of 735,64 MPa, 11% elongation, 31,35% of area reduction, hardness 27 HRc, and impact strength of 34 Joule at -40°C.

**Keyword:** AAR-M201 Grade E steel, hardening, tempering, temperature

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1    Latar Belakang.....	1
1.2    Rumusan Masalah.....	2
1.3    Batasan Masalah.....	2
1.4    Tujuan Penelitian.....	3
1.5    Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1    Coupler pada Kereta Api.....	5
2.2    Baja Paduan.....	7
2.3    Pengaruh Unsur Paduan.....	9
2.3.1    Pengaruh terhadap Diagram Fase.....	10
2.3.2    Pengaruh terhadap Tempering.....	12
2.4    AAR-M201.....	12
2.5    Perlakuan Panas.....	14
2.5.1    Hardening.....	15
2.5.2    Tempering.....	16
2.5.3    Diagram Transformasi.....	20
2.5.4    Fase Hasil Transformasi.....	22
2.6    Kajian Penelitian Sebelumnya.....	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1    Diagram Alir Penelitian.....	31
3.2    Bahan Penelitian.....	32
3.3    Peralatan Penelitian.....	33
3.4    Metode Penelitian.....	33
3.4.1    Persiapan Spesimen.....	33
3.4.2    Perlakuan Panas pada Spesimen.....	34
3.4.3    Pengujian Tarik.....	35

3.4.4	Pengujian Impak.....	36
3.4.5	Pengujian Kekerasan .....	36
3.4.6	Pengamatan Struktur Mikro.....	36
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN .....		39
4.1	Analisis Data .....	39
4.1.1	Struktur Mikro .....	39
4.1.2	Pengujian Tarik.....	43
4.1.3	Pengujian Kekerasan .....	45
4.1.4	Pengujian Impak.....	46
4.2	Pembahasan .....	48
4.2.1	Pengaruh Temperatur Tempering terhadap Struktur Mikro Baja AAR-M201 Grade E .....	48
4.2.2	Pengaruh Temperatur Tempering terhadap Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E .....	50
BAB V KESIMPULAN .....		53
5.1	Kesimpulan.....	53
5.2	Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....		55
LAMPIRAN .....		57
BIODATA PENULIS.....		61



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> <i>Screw Coupler</i> pada Kereta Api.....	5
<b>Gambar 2. 2</b> <i>Knuckle Coupler</i> (kiri), dan komponen penyusunnya (kanan) (United States, Department of The Army 1990).....	6
<b>Gambar 2. 3</b> Mekanisme penguncian pada <i>Knuckle Coupler</i> (Janney 1873).....	7
<b>Gambar 2. 4</b> Pengaruh Penambahan Unsur Paduan terhadap Temperatur eutektoid dan komposisi eutektoid (Callister 2007).....	11
<b>Gambar 2. 5</b> Pengaruh unsur Mn dan C terhadap daerah Austenit (Thelning 1984).....	12
<b>Gambar 2. 6</b> Kurva Perlakuan Panas pada <i>manganese steel</i> (Brunhuber 1988).....	14
<b>Gambar 2. 7</b> Rentang temperatur austenisasi dan struktur mikro yang terbentuk (Campbell 2008).....	16
<b>Gambar 2. 8</b> Struktur mikro martensit dan tempered martensit.	17
<b>Gambar 2. 9</b> Kurva hubungan temperatur <i>tempering</i> dengan sifat mekanik baja paduan (Callister 2007).....	18
<b>Gambar 2. 10</b> Skema perlakuan panas martempering dan austempering.....	18
<b>Gambar 2. 11</b> Diagram transformasi isothermal untuk baja paduan rendah. A: Austenit; F: Ferrit; P: Perlit; B: Bainit; M: Martensit. (Callister 2007).....	21
<b>Gambar 2. 12</b> Diagram CCT baja paduan mangan (0,2% C, 0,85% Mn, 0,45% Cr, 0,45% Mo). M: Martensit; F: Ferrit; B: Bainit; P: Perlit. (Thelning 1984).....	22
<b>Gambar 2. 13</b> Struktur mikro baja UNS G10150, yang terdiri atas ferrit (terang) dan perlit (gelap) (ASM International 2004).....	23

<b>Gambar 2. 14</b> Struktur mikro baja paduan UNS G10200. Strukturnya dinamakan <i>Widmanstatten</i> (ASM International 2004) .....	23
<b>Gambar 2. 15</b> Struktur mikro baja paduan UNS G10400. Strukturnya berupa sementit berbentuk bulat (spheroid) dalam matriks ferrit (ASM International 2004) .....	24
<b>Gambar 2. 16</b> Struktur mikro baja karbon UNS G10800. Strukturnya terdiri atas butir-butir perlit (ASM International 2004) .....	25
<b>Gambar 2. 17</b> Struktur mikro <i>lath martensite</i> (kiri) dan <i>plate martensite</i> (kanan). Struktur martensit didapat dari proses quenching (ASM International 2004).....	25
<b>Gambar 2. 18</b> Struktur mikro martensit temper (ASM International 2004) .....	26
<b>Gambar 2. 19</b> Struktur mikro bainit dari baja paduan rendah yang telah mengalami perlakuan panas (ASM International 2004) .....	27
<b>Gambar 2. 20</b> Perbedaan <i>upper bainit</i> (B <sub>1</sub> ) (kiri), dan <i>lower bainit</i> (B <sub>2</sub> ) (kanan) (Bramfit 1998).....	28
<b>Gambar 2. 21</b> Struktur mikro <i>granular bainit</i> (B <sub>3</sub> ) (ASM International 2004) .....	28
<b>Gambar 3. 1</b> Diagram Alir Penelitian.....	32
<b>Gambar 3. 2</b> Skematik Y-Block Baja AAR-M201 Grade E .....	34
<b>Gambar 3. 3</b> Spesimen Uji Tarik .....	35
<b>Gambar 4. 1</b> Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E setelah <i>quenching</i> dari temperatur 925 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x. B: Bainit; F: Ferrit; P:Perlit.....	39
<b>Gambar 4. 2</b> Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E dengan perlakuan <i>quenching – tempering</i> pada temperatur 550 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x.....	40
<b>Gambar 4. 3</b> Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E dengan perlakuan <i>quenching – tempering</i> pada temperatur 600 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x.....	41

<b>Gambar 4. 4</b>	Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E dengan perlakuan <i>quenching</i> – <i>tempering</i> pada temperatur 650 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x.....	42
<b>Gambar 4. 5</b>	Pengaruh perlakuan pada baja AAR-M201 Grade E terhadap kekuatan luluh dan kekuatan maksimum .....	43
<b>Gambar 4. 6</b>	Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR-M201 Grade E terhadap persen elongasi dan reduksi area.....	44
<b>Gambar 4. 7</b>	Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR-M201 Grade E terhadap kekerasan (HRC).....	46
<b>Gambar 4. 8</b>	Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR-M201 Grade E terhadap kekuatan impak pada berbagai temperatur (0 °C, -40 °C, -60 °C).....	47
<b>Gambar 4. 9</b>	Pengaruh perlakuan pada baja AAR-M201 Grade E terhadap kekuatan impak pada temperatur -40 °C .....	48

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Perbandingan Sifat Mekanik dan Komposisi AAR-M201 dari Masing-masing Grade.....	13
<b>Tabel 3. 1</b> Komposisi Kimia Baja AAR-M201 Grade E.....	32
<b>Tabel 3. 2</b> Dimensi Spesimen Uji Tarik.....	35
<b>Tabel 4. 1</b> Perbandingan sifat mekanik baja AAR hasil <i>tempering</i> dari tiga temperatur berbeda.....	50

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Ada banyak jenis baja paduan yang digunakan dalam dunia industri. Salah satunya adalah baja paduan mangan (*manganese steel*) dengan standar penamaan AAR-M201. Baja standar ini khusus digunakan pada konstruksi komponen kereta api. Baja ini dibedakan menjadi beberapa grade, berdasarkan komposisi kimia dan sifat mekanik yang telah ditentukan oleh *AAR Manual of Standards and Recommended Practices: Couplers and Freight Car Draft Components*.

Komposisi kimia dan proses perlakuan panas akan menentukan fasa yang terbentuk dalam struktur mikro baja paduan. Fasa yang berbeda dari struktur mikro akan menghasilkan sifat mekanik yang berbeda. Sifat mekanik baja menunjukkan respon baja terhadap beban mekanik yang bekerja. Respon ini berupa deformasi (perubahan bentuk) baja yang bersifat sementara ataupun permanen.

Untuk dapat menahan beban yang relatif berat tentunya baja paduan yang digunakan haruslah memiliki sifat mekanik yang baik, agar tidak terjadi kegagalan pada material baja (patah). Untuk mendapatkan sifat mekanik yang baik dan sesuai spesifikasi yang diinginkan, maka dilakukan proses perlakuan panas. Proses perlakuan panas ini dilakukan dengan tujuan untuk merubah struktur mikro dalam baja paduan sehingga sifat mekanik dari baja paduan juga akan berubah. Beberapa perlakuan panas yang dilakukan adalah *annealing*, *normalizing*, *quenching* dan *tempering*. Namun perlakuan panas tidak selalu membawa hasil yang diinginkan karena dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya temperatur pemanasan, waktu tahan pemanasan, dan laju pendinginan. Sifat mekanik yang baik akan



dihasilkan apabila parameter yang digunakan dalam perlakuan panas dirasa sudah sesuai.

Penelitian ini membahas tentang efek perlakuan panas pada mikrostruktur dan sifat mekanik baja paduan mangan (*manganese steel*). Baja paduan yang digunakan memiliki kode nama AAR-M201 grade E. Perlakuan panas yang dipakai adalah *quenching* dan *tempering* dengan parameter yang mengacu pada referensi perlakuan panas *quenching* dan *tempering* yang telah dilakukan PT. Barata Indonesia. Namun pada penelitian ini dilakukan variasi pada temperatur *tempering*, dengan tujuan untuk mendapatkan baja paduan dengan sifat mekanik yang sesuai dengan spesifikasi. Kemudian dari hasil perlakuan panas tersebut, dilakukan analisis mengenai sifat mekanik baja paduan apakah sudah sesuai dengan standar ataukah tidak, serta analisis pengaruh perlakuan panas terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik dari baja paduan AAR-M201 grade E.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dapat dirumuskan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Bagaimana pengaruh temperatur *tempering* terhadap struktur mikro baja AAR-M201 Grade E?
2. Bagaimana pengaruh temperatur *tempering* terhadap sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E?

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk membuat penelitian agar menjadi efektif, maka dilakukan pembatasan masalah dan asumsi sebagai berikut:

1. Komposisi kimia pada setiap material uji diasumsikan sama.
  2. Diasumsikan tidak ada penurunan temperatur saat material uji dikeluarkan dari dapur pemanas hingga media pendingin.
  3. Lama waktu pemindahan spesimen uji dari dapur ke media pendingin diasumsikan konstan pada semua spesimen uji.
  4. Pengaruh lingkungan diabaikan.
-



---

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Menganalisis pengaruh temperatur *tempering* terhadap struktur mikro baja AAR-M201 Grade E.
2. Menganalisis pengaruh temperatur *tempering* terhadap sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam proses perlakuan panas baja AAR-M201 Grade E agar diperoleh struktur mikro dan sifat mekanik sesuai dengan spesifikasi *AAR Manual of Standards and Recommended Practices: Couplers and Freight Car Draft Components*.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 *Coupler* pada Kereta Api

*Coupler* merupakan salah satu komponen penting pada kereta api yang berfungsi untuk menghubungkan antara gerbong dengan gerbong, atau antara gerbong dengan lokomotif. Ada 3 jenis *coupler*, yakni *coupler* manual, *semi-automatic* dan *full-automatic*.

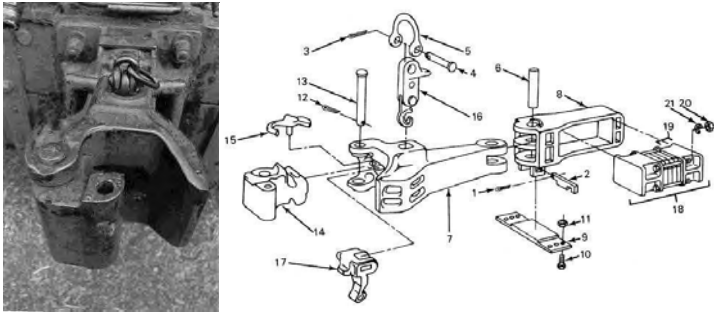


**Gambar 2. 1** Screw Coupler pada Kereta Api

Salah satu jenis *coupler* yang paling sederhana adalah “*Buffer and Chain Coupler*” atau lebih dikenal dengan “*Screw Coupler*”, seperti yang terlihat pada gambar 2.1. *Coupler* ini mempunyai komponen berupa kait pada masing-masing ujung gerbong kereta api, yang kemudian dihubungkan dengan sebuah rantai secara manual oleh tenaga manusia. Selain *screw coupler*, jenis *coupler* manual yang lain yaitu “*Link and Pin Coupler*”. Jika pada *screw coupler* penghubungnya adalah rantai, *link and pin coupler* menggunakan pin sebagai penghubung. Pemasangan *coupler* secara manual dirasa menjadi kurang efisien. Oleh karena itu pada tahun 1873, Eli H. Janney menciptakan *coupler* semi-otomatis yang dikenal dengan nama “*Knuckle Coupler*” atau “*Janney Coupler*”, yang ditunjukkan oleh gambar 2.2. *Coupler* ini memakai sebuah *knuckle* sebagai pengunci

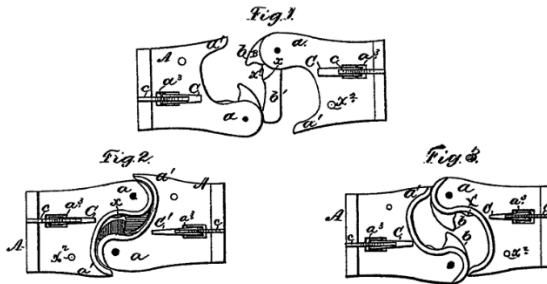


sambungan antar gerbong kereta api. *Couper* jenis ini lah yang digunakan sebagai standard hingga saat ini, dan juga dikembangkan menjadi *coupler* full-otomatis di era modern.



**Gambar 2. 2** Knuckle Coupler (kiri), dan komponen penyusunnya (kanan) (*United States, Department of The Army 1990*)

*Knuckle coupler* terdiri dari tiga komponen utama, yakni *coupler head* (7), *jaw/knuckle* (14), dan *knuckle lock* (16). *Knuckle* pada masing-masing *coupler head* akan saling mengunci ketika gerbong kereta mengalami benturan satu sama lain, sehingga tersambung antar gerbong. Sedangkan untuk melepaskan, pin pada *knuckle lock* harus dilepaskan secara manual, kemudian masing-masing gerbong saling dijauhkan. Mekanisme penguncian pada *Knuckle Coupler* dapat dilihat pada gambar 2.3.



**Gambar 2. 3** Mekanisme penguncian pada Knuckle Coupler  
(Janney 1873)

Coupler pada umumnya dibuat dengan menggunakan material *low alloy cast steel* (baja paduan rendah yang diproduksi dengan proses casting) dengan unsur paduan paling dominan berupa mangan (1,0% – 1,5%) (Association of American Railroads 2007).

## 2.2 Baja Paduan

Berdasarkan komposisi kimianya, baja dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu baja karbon (*plain carbon steel*) dan baja paduan (*alloy steel*). Baja paduan sendiri kemudian dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu baja paduan rendah, dengan unsur paduan kurang dari 10%, dan baja paduan tinggi dengan unsur paduan lebih dari 10% (Avner 1974).

Dalam membedakan jenis-jenis baja, beberapa lembaga mempunyai standar penamaan tersendiri, seperti JIS, AISI, ASTM, SAE, dan SNI. JIS (*Japanese Industrial Standard*) melakukan standarisasi atas dasar aplikasi produksi dan grade (kualifikasi untuk aplikasi tertentu). Sementara itu, AISI (*American Iron and Steel Institute*) dan SAE (*Society of Automotive Engineers*) melakukan standarisasi penomoran berdasarkan komposisi kimia dari baja. Ada beberapa ketentuan dalam sistem penomoran AISI atau SAE, diantaranya:

1. Dinyatakan dalam 4 atau 5 angka;
2. Angka pertama menunjukkan jenis baja;



3. Angka kedua menunjukkan kadar unsur paduan untuk baja paduan sederhana, atau modifikasi jenis baja paduan untuk baja paduan yang kompleks;
4. Dua atau tiga angka terakhir menunjukkan presentase kadar karbon; dan
5. Bila terdapat huruf di depan angka, huruf tersebut menunjukkan proses pembuatan baja.

Contoh: AISI 1045

AISI merupakan standar yang digunakan. Angka 1 menunjukkan bahwa jenis baja adalah baja karbon. Angka 0 menunjukkan tidak adanya unsur paduan yang ditambahkan. Angka 45 menunjukkan bahwa kadar karbon dalam baja adalah 0,45%. Sistem penamaan ini awalnya diterima luas di Amerika Serikat dan banyak negara lainnya. Tetapi standar AISI tidak mencakup semua jenis logam, dan tidak begitu informatif mengenai properties beberapa logam. Maka dari itu dua organisasi standar Amerika lainnya, ASTM (*American Society for Testing and Materials*) bersama SAE menyempurnakannya dalam sistem penamaan baru, UNS (*The Unified Numbering System*). Sistem penamaan UNS menggunakan 6 angka yang berisi informasi mengenai komposisi kimia logam, proses manufaktur, dan perlakuan panas.

Bila standar AISI, SAE, dan JIS melakukan standarisasi penamaan baja secara umum, ada juga lembaga yang melakukan standarisasi secara khusus, salah satunya adalah AAR (*American Association of Railroads*). AAR merupakan organisasi standar Amerika yang melakukan penelitian dan standarisasi untuk meningkatkan keamanan, efisiensi, dan pelayanan dalam industri kereta api. Standarisasi ini mencakup berbagai hal, mulai dari prosedur *assembly* dan *maintenance*, standarisasi komponen, hingga spesifikasi material yang digunakan. Sistem penomoran yang digunakan oleh AAR terdiri dari kombinasi satu huruf yang diikuti oleh tiga atau empat angka di belakangnya. Hanya terdapat 3 jenis huruf yang digunakan, “M” untuk menunjukkan spesifikasi, “S” menunjukkan standarisasi, dan “RP” yang menunjukkan prosedur. Huruf ini kemudian diikuti angka “0-9”



yang menunjukkan di bab mana standarisasi terkait bisa ditemukan dalam *AAR Manual of Standard and Recommended Practices*. Sementara dua angka terakhir merupakan urutan penerbitan. Salah satu jenis baja standarisasi AAR yang umum digunakan untuk komponen kereta api adalah baja AAR-M201 (Association of American Railroads 2007).

Selain dengan kode nama yang telah ditetapkan oleh beberapa lembaga resmi, pada umumnya baja paduan diberi nama sesuai dengan unsur padua yang palig dominan. Misalnya, baja paduan mangan (*manganese steel*) adalah baja paduan dengan unsur paduan paling dominan adalah Mn, baja paduan vanadium mempunyai unsur paduan paling dominan berupa vanadium, dan lain-lain.

Adanya unsur mangan pada *manganese steel* dapat menaikkan kekuatan dan kekerasan. Pengaruh ini akan menjadi lebih efektif pada kadar karbon yang lebih tinggi. Pada kondisi *annealed*, baja mangan memiliki kekuatan dan keuletan yang relatif rendah, tetapi apabila dilakukan perlakuan panas hardening berupa quenching pada temperatur sekitar 1000 °C maka nilai kekuatan, keuletan, dan kekerasannya akan naik cukup signifikan (Avner 1974).

### 2.3 Pengaruh Unsur Paduan

Baja karbon biasanya sudah dirasa cukup untuk digunakan bila sesuai dengan persyaratan sifat mekanik yang dikehendaki dan serta baja karbon cukup baik untuk digunakan pada temperatur kamar dan pada kondisi lingkungan yang tidak terlalu korosif, harganya yang relatif murah dan mempunyai hardenability yang umumnya memang rendah. Tetapi dalam beberapa hal baja karbon tidak memenuhi syarat untuk dipergunakan. Karena hal tersebut merupakan kesulitan dalam penggunaan baja karbon maka dengan menambahkan satu atau beberapa unsur paduan tertentu agar mampu diperoleh sifat-sifat yang diinginkan. Baja dengan tambahan beberapa unsur paduan



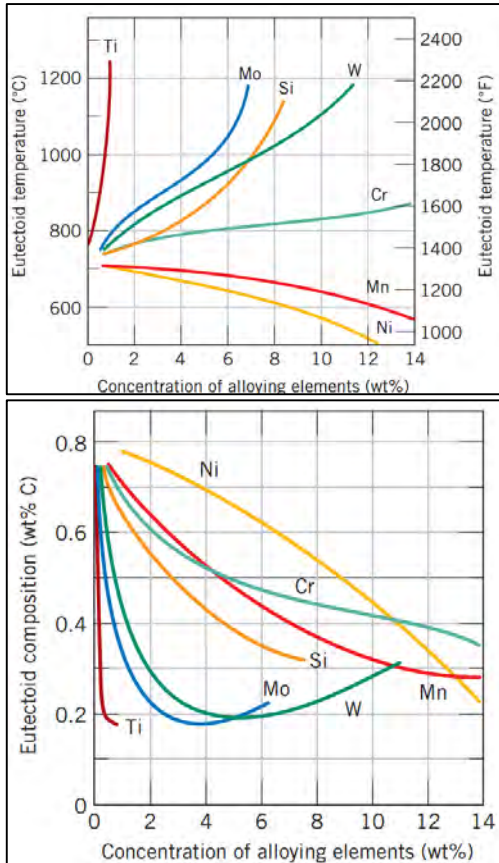
---

dinamakan baja paduan (Campbell 2008). Unsur paduan ditambahkan ke dalam baja dengan tujuan, sebagai berikut:

1. Meningkatkan hardenability.
2. Memperbaiki sifat mekanik baik pada temperatur tinggi maupun rendah.
3. Meningkatkan sifat tahan aus dan tahan korosi.

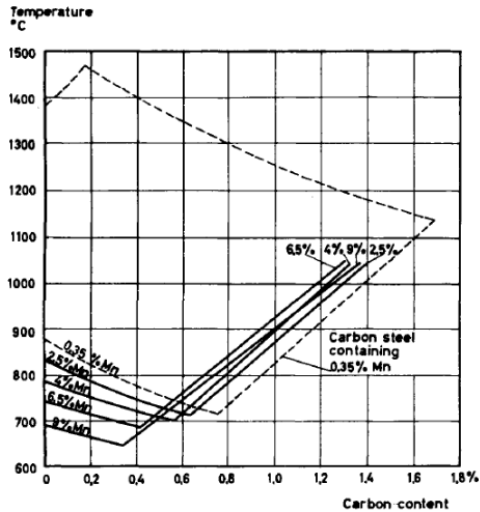
### **2.3.1 Pengaruh terhadap Diagram Fase**

Adanya unsur paduan di dalam baja akan merubah diagram fase baja. Unsur-unsur pembentuk austenit akan menurunkan temperatur eutektoid, sedangkan unsur-unsur pembentuk ferit akan menaikannya. Pada keadaan seperti ini titik eutektoid akan tergeser ke arah kiri, sehingga kadar karbon di dalam perlit akan kurang dari 0,8%. Unsur paduan yang berfungsi sebagai penstabil austenit, yaitu Ni dan Mn menurunkan temperatur eutektoid, sedangkan unsur paduan lain akan menaikkan temperatur eutektoid seperti pada gambar 2.2. Jadi bisa disimpulkan bahwa semua unsur paduan akan menggeser titik eutektoid ke kiri atas, kecuali Ni dan Mn yang menggeser titik eutektoid ke kiri bawah (Thelning 1984).



**Gambar 2. 4** Pengaruh Penambahan Unsur Paduan terhadap Temperatur eutektoid dan komposisi eutektoid (*Callister 2007*)

Pengaruh unsur paduan penstabil austenit seperti Mn akan memperluas daerah austenit, digambarkan dengan makin luasnya daerah austenit dari baja dengan kadar Mangan yang makin besar. Hal ini tentunya harus diperhitungkan dalam melakukan perlakuan panas pada baja paduan (Thelning 1984).



**Gambar 2. 5** Pengaruh unsur Mn dan C terhadap daerah Austenit  
(Thelning 1984)

### 2.3.2 Pengaruh terhadap *Tempering*

Baja yang dikeraskan akan melunak bila dipanaskan kembali (*tempering*). Makin tinggi temperatur *tempering* makin banyak penurunan kekerasan yang terjadi. Semua unsur paduan menghambat laju penurunan kekerasan karena *tempering*. Unsur-unsur yang mudah larut dalam ferit, unsur yang tidak membentuk karbida, seperti Ni, Si dan juga Mn pengaruhnya kecil sekali. Unsur pembentuk karbida mempunyai pengaruh yang lebih kuat, apalagi unsur pembentuk karbida kompleks, seperti Cr, W, Mo, V dan lain-lain, pengaruhnya kuat sekali. Bukan saja akan menghambat penurunan kekerasan, bahkan bila terdapat dalam jumlah besar dapat menaikkan kekerasan pada *tempering* pada temperatur tinggi (Thelning 1984).

## 2.4 AAR-M201

Baja AAR-M201 merupakan jenis baja paduan yang sering digunakan untuk komponen mobil dan kereta api. Unsur paduan yang dominan dalam baja ini adalah unsur mangan. Berdasarkan



komposisi kimia dan sifat mekaniknya, baja ini dapat dibagi dalam 5 jenis, dari Grade A hingga E. Grade A dan B merupakan baja dengan paduan mangan yang relatif sedikit, bila dibandingkan dengan grade C, D, dan E. Selain itu baja AAR-M201 Grade C, D, dan E pada umumnya telah mengalami perlakuan panas hardening untuk mendapatkan kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi. Berikut ini adalah perbandingan baja AAR-M201 dari setiap grade:

**Tabel 2. 1** Perbandingan Sifat Mekanik dan Komposisi AAR-M201 dari Masing-masing Grade

Grade dan Perlakuan Panas		Sifat Mekanik				
Grade	Perlakuan Panas*	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekuatan Luluh (MPa)	Elongasi (%)	Reduksi Area (%)	Kekerasan (BHN)
A	A/N	413,68	206,84	26	38	108
B	N/NT	482,63	262,00	24	36	208
C	NT/QT	620,52	413,68	22	45	241
D	QT	723,94	586,05	17	35	285
E	QT	827,37	689,47	14	30	311
Grade	Komposisi Kimia (%)					
	C	Mn	Si			
A	0,32	0,90	1,50			
B	0,32	0,90	1,50			
C	0,32	1,85	1,50			
D	0,32	1,85	1,50			
E	0,32	1,85	1,50			

(Association of American Railroads 2007)

\*A = *Annealing*

N = *Normalising*

NT = *Normalising – Tempering*

QT = *Quenching – Tempering*

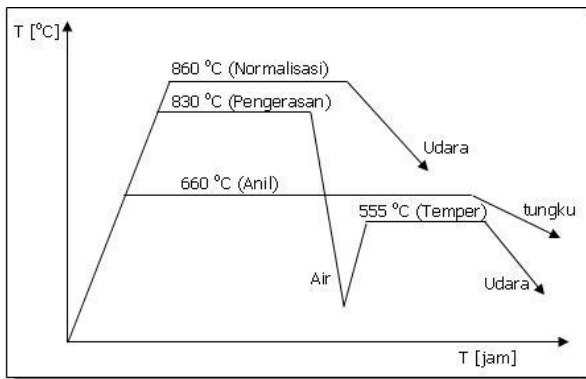
Selain 5 grade yang terdapat di dalam tabel, terdapat satu lagi grade dari baja AAR-M201, yaitu grade B+. Baja ini memiliki komposisi kimia yang sama dengan grade B namun mempunyai sifat mekanik yang lebih baik dari grade B.



Baja AAR yang umum digunakan untuk komponen *coupler* adalah AAR-M201 Grade D dan Grade E. Selain untuk *coupler* kereta api, aplikasi lain dari dua *grade* baja ini adalah sebagai *bolster* dan juga kerangka truk.

## 2.5 Perlakuan Panas

Untuk mendapatkan sifat logam yang sesuai dengan keinginan dan kebutuhan, terkadang penambahan unsur paduan saja tidaklah cukup. Perlu dilakukan perlakuan lain untuk membuatnya mempunyai sifat yang diinginkan, salah satunya adalah melalui perlakuan panas. Perlakuan panas didefinisikan sebagai kombinasi operasi pemanasan dan pendinginan terhadap logam dalam keadaan padat selama waktu tertentu untuk mendapatkan sifat tertentu. Dalam melakukan proses perlakuan panas, logam dipanaskan hingga temperatur tertentu dan menahannya pada temperatur tersebut untuk suatu waktu tertentu kemudian mendinginkannya dengan laju pendinginan tertentu. Laju pendinginan ini akan sangat tergantung pada media pendingin yang digunakan (Avner 1974).



**Gambar 2. 6** Kurva Perlakuan Panas pada *manganese steel* (Brunhuber 1988)

Berdasarkan tujuannya, proses perlakuan panas dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu proses pelunakan dan proses

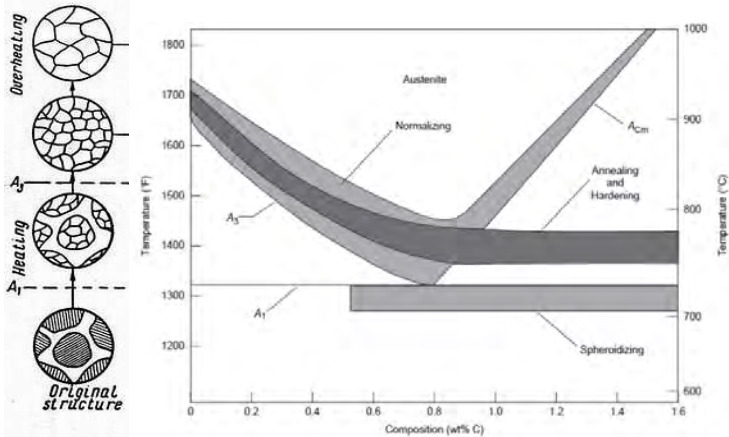


pengerasan. Proses pelunakan bertujuan untuk menurunkan kekerasan baja, memperbaiki keuletan, dan meningkatkan *machinability* baja. Sementara proses pengerasan bertujuan untuk menaikkan kekerasan dan kekuatan baja, serta memperbaiki sifat tahan aus dan tahan lelah baja. Selain dari tujuan, perbedaan dari kedua proses perlakuan ini terletak pada proses pendinginannya. Proses pelunakan membutuhkan laju pendinginan yang lambat, sementara proses pengerasan membutuhkan laju pendinginan yang cepat.

### 2.5.1 *Hardening*

Proses pengerasan atau *hardening* merupakan suatu proses perlakuan panas yang dilakukan untuk meningkatkan kekuatan dan memperbaiki sifat tahan lelah dari baja. Tahapan proses *hardening* pada Baja Paduan Mangan menurut Brunhubber (1988), adalah sebagai berikut:

1. Pemanasan hingga temperturnya mencapai sedikit diatas temperatur kritis tinggi ( $A_3$ ) supaya struktur baja menjadi austenit (austenisasi).
2. Temperatur dipertahankan konstan selama waktu tertentu agar struktur baja menjadi homogen.
3. Pendinginan dilakukan dengan menggunakan medium yang memiliki laju pendinginan cepat (*quenching*).



**Gambar 2. 7** Rentang temperatur austenisasi dan struktur mikro yang terbentuk (*Campbell 2008*)

### 2.5.2 Tempering

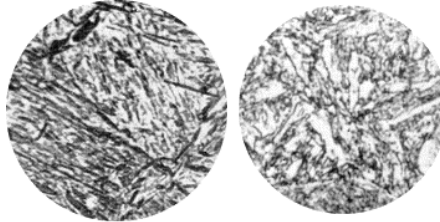
Baja hasil proses *hardening* akan mempunyai sifat mekanik berupa kekuatan dan kekerasan yang relatif tinggi, namun keuletan dan ketangguhannya menurun sehingga akan mempunyai efek yang buruk saat baja digunakan. Karena itulah, pada proses perlakuan *hardening* biasanya selalu diikuti dengan *tempering*. *Tempering* adalah proses pemanasan kembali baja yang telah dikeraskan sampai temperatur dibawah temperatur kritis terendah ( $A_1$ ), lalu didinginkan pada laju yang diinginkan. Proses ini bertujuan untuk mengembalikan sebagian keuletan/ketangguhan, berakibat turunnya kekerasan, dan melepas tegangan dalam untuk memperoleh keuletan yang lebih baik (Clark dan Varney 1962).

*Quenching* yang dilakukan selama proses *hardening*, akan menghasilkan struktur mikro martensit. Struktur ini memiliki struktur BCT (*Body Centered Tetragonal*) dan bersifat metastabil. Apabila dilakukan pemanasan kembali secara bertahap, maka karbon yang terperangkap dalam struktur BCT akan keluar dan menjadi karbida, sehingga strukturnya akan berubah menjadi



BCC (*Body Centered Cubic*). Perubahan struktur mikro ini dapat terjadi pada proses *tempering*, melalui reaksi berikut:

Martensit (BCT, fasa tunggal)  $\rightarrow$  martensit temper ( $\alpha + Fe_3C$ )  
fasa tunggal martensit BCT, yang jenuh dengan karbon, bertransformasi menjadi martensit temper yang terdiri dari ferrit stabil dan sementit (Callister 2007).

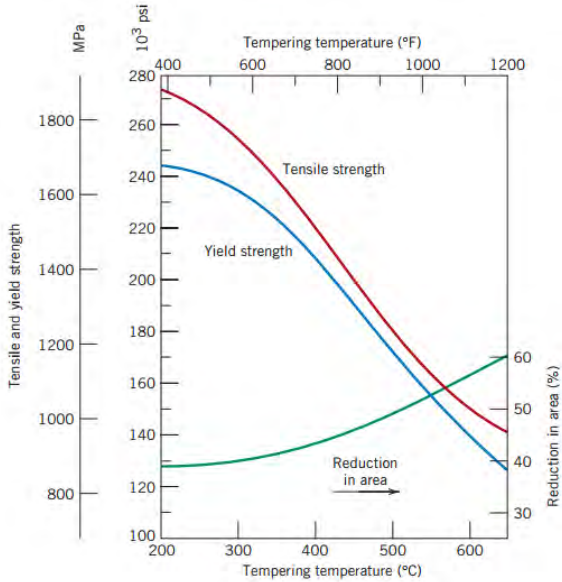


Martensite

Tempered Martensite

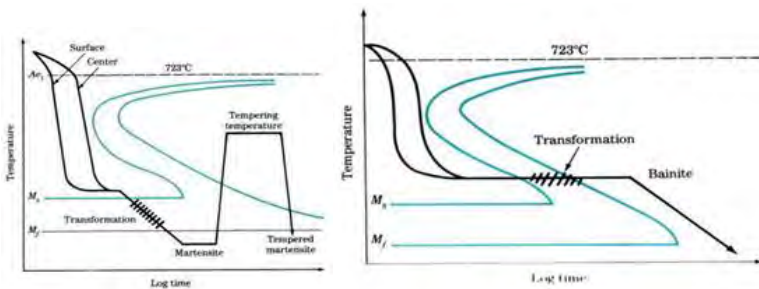
### **Gambar 2. 8** Struktur mikro martensit dan tempered martensit

Karbon yang keluar dari struktur martensit akan menyebabkan tegangan didalam BCT berkurang sehingga kekerasan dan kekuatannya juga berkurang. Di samping itu, saat kekerasan dan kekuatannya berkurang, sifat keuletan dan ketangguhannya justru semakin meningkat. Sehingga secara umum *tempering* berguna untuk memperbaiki sifat keuletan dan ketangguhan baja setelah dilakukan pengerasan. Namun dalam proses ini, temperatur *tempering* perlu diperhatikan karena bila temperatur penemperan semakin tinggi maka kekerasannya akan semakin rendah (Avner 1974).



**Gambar 2. 9** Kurva hubungan temperatur *tempering* dengan sifat mekanik baja paduan (*Callister 2007*)

Selain menggunakan metode *quenching – tempering* seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, proses pengerasan juga dapat dilakukan dengan menggunakan metode martempering dan austempering.



**Gambar 2. 10** Skema perlakuan panas martempering dan austempering



Martempering adalah suatu proses pengerasan, dimana saat proses pendinginan, temperatur dijaga agar tetap berada diatas temperatur pembentukan martensit (Ms) selama waktu tertentu dengan tujuan untuk mengurangi distorsi. Namun waktu untuk menahan temperatur ini tidak boleh terlalu lama, karena dapat menyebabkan perubahan struktur mikro menjadi perlit ataupun bainit. Proses Austempering hampir sama dengan proses martempering, hanya saja waktu penahanan temperatur agar konstan diatas temperatur pembentukan martensit (Ms) lebih lama dari proses martempering, yaitu hingga austenit selesai bertransformasi seluruhnya. Struktur akhir yang dihasilkan dari proses ini adalah struktur bainit (Callister 2007).

Proses *tempering* pada martensit melewati beberapa tahap. Pada temperatur temper yang masih rendah, di bawah 205 °C, karbon yang keluar masih sangat sedikit, karbida yang terjadi, dinamakan karbida epsilon ( $\epsilon$ -carbide), masih sangat kecil, belum tampak di mikroskop (*submicroscopic*), martensit tampak lebih hitam, dinamakan black martensite. Pada tahap ini terjadi penurunan tegangan dalam, sedang kekerasan hampir tidak berkurang (masih 60–64 HRC), bahkan dapat terjadi sedikit kenaikan (untuk baja dengan kadar karbon tinggi). Pada temperatur temper yang lebih tinggi, 205 – 400 °C, karbida epsilon mulai berubah menjadi sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), sementara austenit sisa bertransformasi menjadi bainit atau martensit. Struktur yang terjadi dinamakan *troostite*, terdiri dari partikel sementit yang sangat halus (*submicroscopic*) dengan matriks ferrit dan austenit yang telah bertransformasi. Mulai tampak penurunan kekerasan (40 – 60 HRC) dan kenaikan keuletan yang berarti. Pada temperatur temper yang lebih tinggi lagi, 400 – 650 °C, sementit tumbuh menjadi lebih besar, berbentuk spheroid yang halus dan BCT menjadi BCC sempurna. Struktur ini dikenal dengan nama *sorbite*, terdiri dari spheroid sementit yang sangat halus yang tersebar dalam matriks ferrit, kekerasan lebih rendah (20 – 40 HRC) dan keuletan/ketangguhan makin tinggi. Bila



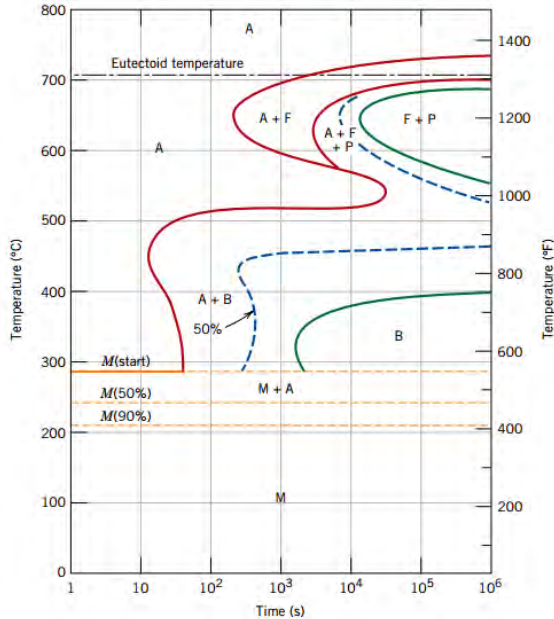
---

pemanasan diteruskan lebih tinggi lagi spheroid sementit tumbuh lebih besar dengan matriks ferrit. Struktur ini sama dengan yang diperoleh dengan proses spheroidisasi, kekerasannya rendah (5 – 10 HRc) dan keuletan/ketangguhannya tinggi. Sebenarnya perubahan struktur selama penemperan sangat gradual, sehingga tidak jelas perbedaan struktur yang satu dengan yang berikutnya. Karenanya ada yang menamakan semua produk dekomposisi martensit ini sebagai *martensit temper*. Karbon yang keluar dari struktur martensit maka tegangan didalam BCT akan berkurang sehingga kekerasan/kuatannya juga berkurang selain itu keuletan/ketangguhan semakin meningkat. Secara umum dapat dikatakan bahwa bila temperatur penemperan makin tinggi maka kekerasannya akan makin rendah (Avner 1974).

### 2.5.3 Diagram Transformasi

Untuk mengetahui proses transformasi yang terjadi pada mikrostruktur baja selama proses perlakuan panas, digunakan diagram transformasi. Diagram transformasi menunjukkan hubungan antara laju pendinginan dengan struktur mikro yang terbentuk. Ada dua jenis diagram transformasi yang sering digunakan yaitu:

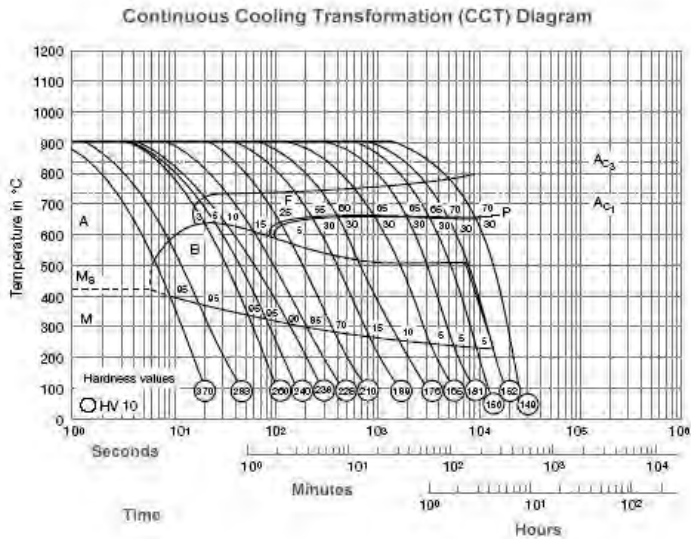
- Diagram Transformasi Isothermal  
Diagram transformasi isothermal menunjukkan transformasi struktur mikro baja pada kondisi temperatur yang konstan. Diagram ini lebih digunakan pada proses perlakuan panas tertentu seperti martempering ataupun austempering.



**Gambar 2. 11** Diagram transformasi isothermal untuk baja paduan rendah. A: Austenit; F: Ferrit; P: Perlit; B: Bainit; M: Martensit. (*Callister 2007*)

- Diagram Transformasi Pendinginan Kontinu/Continuous Cooling Transformation (CCT)  
Diagram CCT digunakan pada proses perlakuan panas yang memiliki pendinginan kontinu, seperti *quenching*.





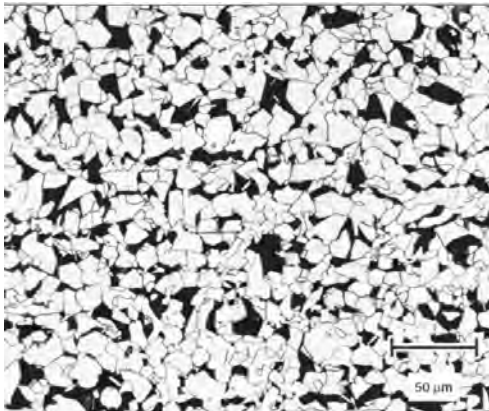
**Gambar 2. 12** Diagram CCT baja paduan mangan (0,2% C, 0,85% Mn, 0,45% Cr, 0,45% Mo). M: Martensit; F: Ferrit; B: Bainit; P: Perlit. (Thelning 1984)

### 2.5.4 Fase Hasil Transformasi

Proses perlakuan panas akan menghasilkan beberapa jenis fasa. Fasa yang terbentuk akan dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya komposisi kimia, temperatur transformasi, dan laju pendinginan. Jenis fasa yang tercipta pada baja adalah sebagai berikut:

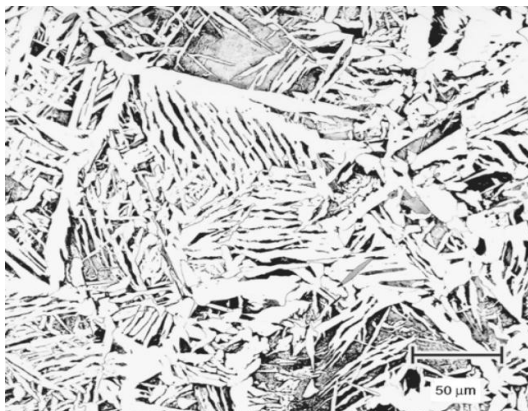
#### *Ferrit*

Ferrit ( $\alpha$ -iron) merupakan fase yang stabil pada temperatur ruang, tercipta pada kondisi equilibrium. Ferrit mempunyai struktur BCC (Body Centered Cubic) dengan kekerasan yang relatif rendah. Ada juga jenis ferrite yang stabil pada temperatur tinggi yaitu delta ferrit ( $\delta$ -iron). Ferrit jenis ini bersifat isomorph terhadap ferrit alpha.



**Gambar 2. 13** Struktur mikro baja UNS G10150, terdiri atas ferrit (terang) dan perlit (gelap) (*ASM International 2004*)

Ferrit pada umumnya mempunyai ukuran butir yang relatif besar dengan bentuk poligonal. Namun ada juga struktur ferrit yang berbentuk *accicular* (seperti jarum) yang disebut struktur *Widmanstätten*.



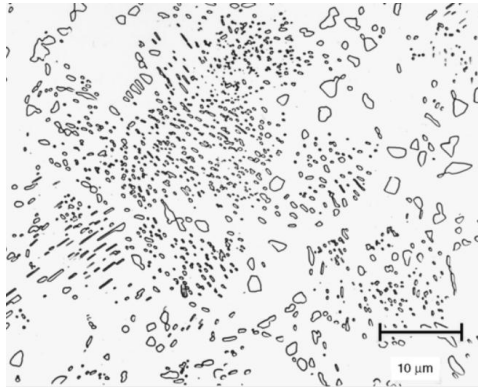
**Gambar 2. 14** Struktur mikro baja paduan UNS G10200. Strukturnya dinamakan *Widmanstätten* (*ASM International 2004*)

### *Austenite*

Austenite ( $\gamma$ -iron) merupakan fase yang stabil pada temperatur yang relatif tinggi. Austenit memiliki kelarutan karbon yang cukup tinggi, jauh lebih tinggi dibanding ferrit. Austenit memiliki struktur kristal FCC (Face Centered Cubic).

### *Sementit*

Sementit merupakan fasa yang terbentuk dari senyawa  $Fe_3C$ . Sementit mempunyai struktur kristal ortorombik yang cukup kompleks, dengan nilai kekerasan yang tinggi. Bersifat metastabil.



**Gambar 2. 15** Struktur mikro baja paduan UNS G10400.

Strukturanya berupa sementit berbentuk bulat (*spheroid*) dalam matriks ferrit (*ASM International 2004*)

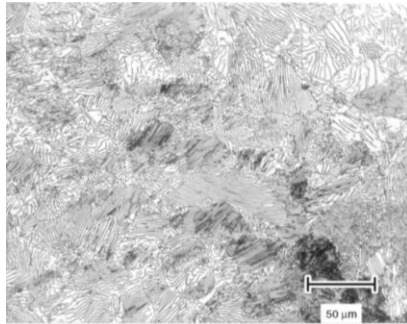
Struktur sementit dengan bentuk *spheroid* seperti pada Gambar 2.15 terbentuk dengan proses pemanasan dengan temperatur dibawah  $A_1$  selama beberapa jam.

### *Grafit*

Grafit mempunyai struktur kristal heksagonal dan bersifat stabil. Kekerasan yang dimiliki grafit cukup tinggi.

### *Perlit*

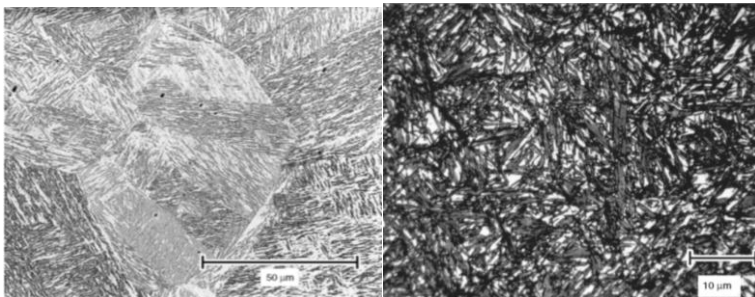
Perlit merupakan struktur yang bersifat metastabil, terdiri dari campuran ferrit dan sementit dengan bentuk *lamellar*.



**Gambar 2. 16** Struktur mikro baja karbon UNS G10800. Strukturnya terdiri atas butir-butir perlit (*ASM International 2004*)

### *Martensite*

Martensite memiliki struktur kristal BCT (Body Centered Tetragonal). Martensit mempunyai kandungan karbon yang sangat jenuh dalam ferritnya. Bersifat metastabil, dengan kekerasan yang tinggi. Morfologinya berbentuk *lath* saat kadar karbon besi  $<0,6$  wt% dan berbentuk *plate* saat kadar karbon  $>1,0$  wt%.

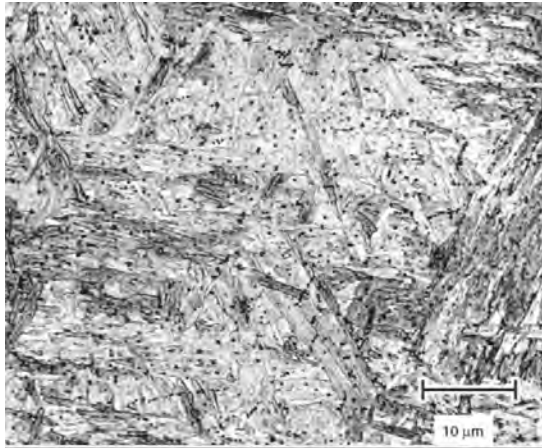


**Gambar 2. 17** Struktur mikro *lath martensite* (kiri) dan *plate martensite* (kanan). Struktur martensit didapat dari proses *quenching* (*ASM International 2004*)

Saat martensit mengalami proses *tempering*, maka struktur yang terbentuk adalah martensit temper. Struktur ini terdiri atas



martensit dengan bilah yang lebih kasar dan butiran-butiran kecil karbida yang mengalami presipitasi.



**Gambar 2. 18** Struktur mikro martensit temper (*ASM International 2004*)

### *Bainit*

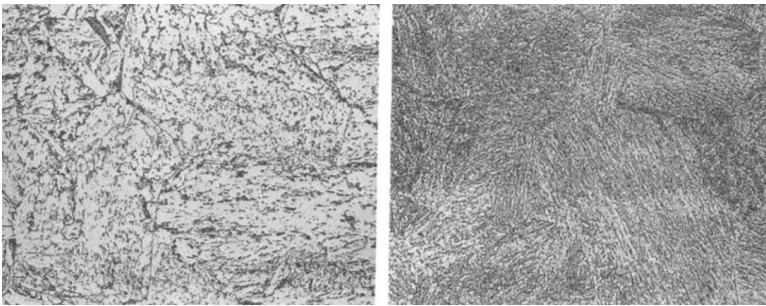
Bainit adalah struktur yang terbentuk dari ferrit dan sementit dengan ukuran sangat halus. Namun tidak seperti perlit, strukturnya tidak berbentuk *lamellar*. Bainit dibagi menjadi dua, *lower bainite* dengan bentuk *feathery* (menyerupai bulu) dan *upper bainite* dengan bentuk *accicular* (menyerupai jarum). *Upper bainite* terbentuk pada temperatur transformasi yang cenderung tinggi, sementara *lower bainite* terbentuk pada temperatur yang lebih rendah, saat pendinginan berlangsung secara isothermal. Kekerasan pada bainit akan meningkat seiring dengan turunnya temperatur transformasinya (ASM International 2004).



**Gambar 2. 19** Struktur mikro bainit dari baja paduan rendah yang telah mengalami perlakuan panas (*ASM International 2004*)

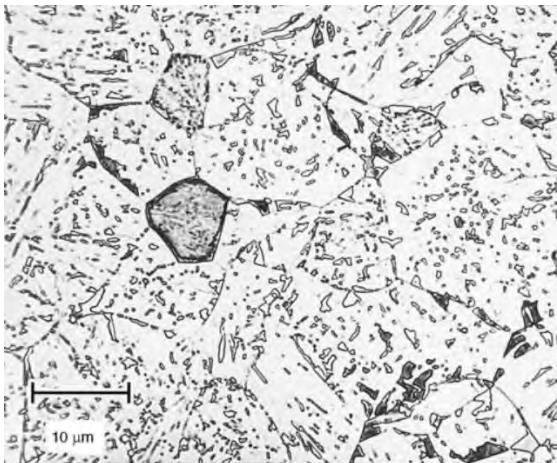
Namun pada proses manufaktur, umumnya baja mengalami pendinginan secara kontinyu, bukan isothermal. Sehingga istilah *upper bainite* dan *lower bainit* tidak lagi relevan dalam proses pendinginan kontinyu. Bainit kemudian diidentifikasi berdasarkan morfologinya, dan dibedakan menjadi bainit *Class 1* ( $B_1$ ), *Class 2* ( $B_2$ ), dan *Class 3* ( $B_3$ ).  $B_1$  mempunyai morfologi matrix ferrit yang berbentuk bilah (*accicular*) disertai dengan sementit yang berada di dalam bilah ferrit.  $B_2$  terdiri dari matrix bilah ferrit disertai dengan sementit yang berada di batas butir antar bilah ferrit (grain boundary).  $B_1$  dapat mewakili istilah *upper bainit*, sementara  $B_2$  mewakili *lower bainit* (Bramfit 1998).





**Gambar 2. 20** Perbedaan *upper bainite* ( $B_1$ ) (kiri), dan *lower bainite* ( $B_2$ ) (kanan) (Bramfit 1998)

$B_3$  terdiri atas matriks ferrit dengan partikel-partikel yang terdiri dari martensit ataupun austenit sisa.  $B_3$  biasa dikenal dengan istilah *granular bainite* (Bramfit 1998).



**Gambar 2. 21** Struktur mikro granular bainit ( $B_3$ ) (ASM International 2004)



## 2.6 Kajian Penelitian Sebelumnya

Penelitian yang akan dilakukan, berlandaskan beberapa kajian penelitian sebelumnya, diantaranya sebagai berikut,

- Fransiskus G. Damanik (2010) melakukan penelitian pengaruh proses perakuan panas *hardening*, *normalising*, dan *tempering* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR M201 Grade E. *Hardening* pada temperatur 910 °C kemudian dilakukan lagi *tempering* dengan temperatur 650, 600, dan 550 °C. Selanjutnya material tersebut didinginkan dengan laju pendinginan yang berbeda, pada *hardening* didinginkan dengan media oli dan *tempering* pada media udara. Berdasarkan hasil pengujian, baja AAR-M201 Grade E pada *hardening* pada temperatur 910 °C dilanjutkan *tempering* pada temperatur 600 °C memiliki sifat mekanik yang persyaratan standar baja AAR-M201 Grade E.
- Darmawan Alan Atari R (2012) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur *annealing* terhadap perubahan sifat mekanik dan struktur mikro *Bolster* (AARM201 Grade D) dengan variasi temperatur *annealing* 650, 800, dan 930 °C dengan waktu tahan 60 menit. Berdasarkan penelitian tersebut disimpulkan bahwa pada perlakuan dengan temperatur *annealing* 800 °C dan 930 °C menghasilkan baja dengan sifat mekanik yang sesuai persyaratan, struktur mikro yang diperoleh adalah ferit dan perlit.
- Jin Huang dkk. (2013) melakukan investigasi kegagalan pada *steel knuckle* yang terbuat dari baja AAR-M201 Grade E. Pada proses perlakuan panas yang dilakukan, baja ini pada awalnya dinormalisasi pada 900-920 °C selama 3,5-4 jam dan didinginkan di udara. kemudian dipanaskan sampai 870-880 °C dan waktu tahan selama 3-3,5 jam, diquench di air, dan diikuti *tempering* pada 510-550 °C selama 3,5-4 jam. Pada analisis penyebab kegagalan, sifat





---

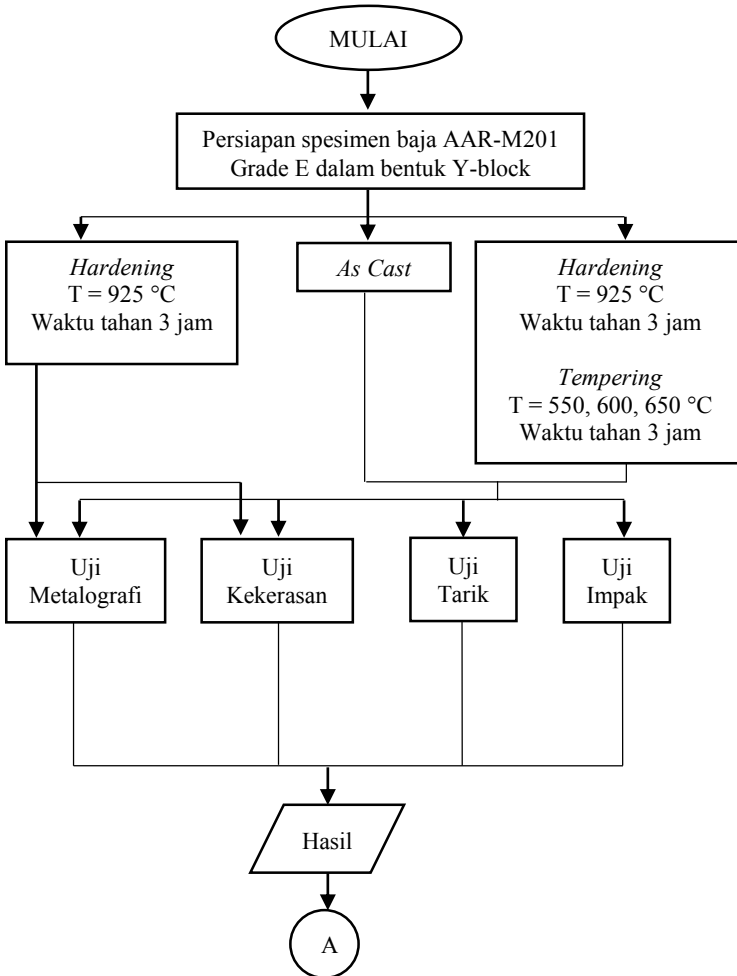
mekanis *steel knuckle* tidak memenuhi standar baja AAR-M201, khususnya pada elongasi dan ketangguhan impak *Charpy*.

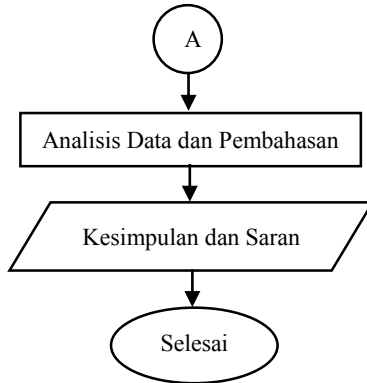
- M. Ghulam Isaq Khan (2010) melakukan penelitian pengaruh proses perlakuan panas *hardening-tempering* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR M201 Grade E. *Hardening* pada temperatur 925 °C selama 45 menit kemudian dilakukan *tempering* dengan temperatur 625 , 650, dan 675 °C selama 45 menit. Berdasarkan hasil pengujian, baja AAR-M201 Grade E dari proses perlakuan panas *hardening-tempering* pada 625 °C dan 650 °C menghasilkan sifat mekanik yang sebagian besar memenuhi spesifikasi.



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian





**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah baja cor AAR-M201 Grade E, dengan komposisi kimia pada Tabel 3.1.

**Tabel 3. 1** Komposisi Kimia Baja AAR-M201 Grade E

Unsur	Berat (%)
C, maks 0,32	0,282
Si, maks 1,50	0,425
Mn, maks 1,85	1,469
P, maks 0,04	0,02
S, maks 0,04	0,001
Cr	0,47
Mo	0,308
Cu	0,021
Ni	0,368
Al	0,077
Fe	<i>Balanced</i>
CE, maks 0,88	0,779



---

### 3.3 Peralatan Penelitian

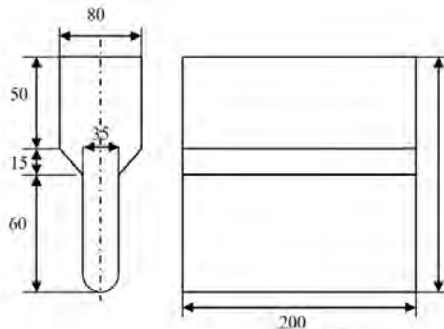
Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapur Pemanas  
Dapur pemanas yang digunakan adalah *dielectric heating furnace* dengan kapasitas 400V/60 Hz dan pemanasan maksimum 1280°C.
2. Mesin Uji Tarik  
Mesin uji tarik yang digunakan adalah *Universal Testing Machine* MFL System tipe UPD-20 dengan kapasitas maksimum 200 kN.
3. Mesin Uji Kekerasan  
Mesin uji kekerasan yang digunakan adalah *Universal Hardness Tester* HBRV seri 187.52 dengan kapasitas pembebanan maksimum 1000 kgf.
4. Mesin Uji Impact  
Mesin uji impact yang digunakan adalah mesin uji impak *Charpy* Wolpert tipe PW15 kapasitas 150 J.
5. Mikroskop Optik  
Mikroskop optik yang digunakan adalah mikroskop optik *Olympus* seri GX71 dengan perbesaran maksimum 1000 X.
6. Peralatan lain seperti gerinda, gergaji, jangka sorong, mesin polis, mesin bubut, dan termometer.

### 3.4 Metode Penelitian

#### 3.4.1 Persiapan Spesimen

Sampel uji baja AAR-MA201 Grade E berupa *Y-block*.



\*satuan dalam mm

**Gambar 3. 2** Skematik Y-Block Baja AAR-M201 Grade E

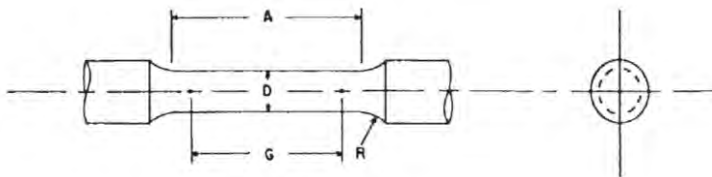
### 3.4.2 Perlakuan Panas pada Spesimen

Perlakuan panas dilakukan dengan melakukan pemanasan pada temperatur  $925^{\circ}\text{C}$  selama waktu tertentu kemudian didinginkan cepat dengan media air, lalu dilakukan pemanasan kembali (*tempering*) pada temperatur  $550$ ,  $600$ , dan  $650^{\circ}\text{C}$ , ditahan selama waktu tertentu dan didinginkan dimedia udara. Langkah-langkah perlakuan panas pada spesimen sebagai berikut,

1. Menyiapkan *Y-block* baja AAR-M201 Grade E dengan kondisi belum mengalami perlakuan panas.
2. Memotong *Y-block* menjadi 9 buah spesimen untuk uji tarik, 27 buah spesimen uji impak, dan spesimen uji kekerasan serta metalografi.
3. Melakukan proses perlakuan panas pada setiap spesimen, dengan waktu tahan bergantung pada dimensi spesimen. Waktu tahan yang digunakan adalah 1 jam/inch.
4. Setelah proses perlakuan panas selesai, spesimen dikeluarkan untuk dilakukan pendinginan.

### 3.4.3 Pengujian Tarik

Pengujian tarik digunakan untuk mengetahui sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E setelah dilakukan proses perlakuan panas. Sifat mekanis yang akan ditinjau adalah kekuatan luluh, kekuatan maksimum (*Ultimate Tensile Strength*), elongasi, dan reduksi area. Pengujian tarik berdasarkan ASTM E8M *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, spesifikasi spesimen yang digunakan seperti pada gambar 3.3 dengan dimensi yang ditunjukkan pada tabel 3.2.



**Gambar 3. 3** Spesimen Uji Tarik

**Tabel 3. 2** Dimensi Spesimen Uji Tarik

Bagian	Ukuran (mm)
G – Gage Length	50,0 ± 0,10
D – Diameter	12,5 ± 0,25
R – Radius of Fillet	10
A – Length of reduced section, min	60

Langkah-langkah pengujian tarik untuk baja AAR-M201 Grade E sebagai berikut,

1. Menyiapkan 1 buah spesimen tanpa perlakuan, dan 3 buah spesimen untuk masing-masing perlakuan panas.
2. Membersihkan seluruh spesimen dengan kertas gosok grade 250 untuk mengantisipasi adanya pengotor yang menempel pada permukaan spesimen.
3. Melakukan pengujian tarik pada masing-masing spesimen.
4. Menganalisis hasil kurva P-Δl.



5. Mengukur panjang akhir patahan, untuk menentukan elongasi.
6. Mengitung luas akhir penampang patahan, untuk menentukan reduksi area.

#### 3.4.4 Pengujian Impak

Pengujian impak dilakukan untuk mengetahui ketangguhan dari baja AAR-M201 Grade E, yang ditunjukkan dari hasil kekuatan impaknya. Pengujian dilakukan sesuai standar ASTM E23 *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. Spesimen yang digunakan sesuai standar batang uji impak Charpy tipe A. Pengujian menggunakan metode Charpy, pada tiga temperatur yang berbeda yaitu 0, -40, -60 °C.

#### 3.4.5 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan digunakan untuk menentukan kekerasan baja AAR-M201 Grade E awal dan setelah dilakukan proses perlakuan panas. Pengujian kekerasan yang digunakan menggunakan metode Brinell dengan menggunakan standar ASTM E10 *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*. Spesifikasi pengujian yang digunakan sebagai berikut,

Indentor	: Bola baja yang dikeraskan
Beban Uji	: 187,5 kgf
Waktu indentasi	: 10 detik
Satuan uji	: BHN

#### 3.4.6 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro (Metalografi) dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk sehingga dapat digunakan untuk analisis proses dan sifat mekanik. Standar yang digunakan untuk preparasi spesimen adalah ASTM E3 *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*.

Langkah-langkah pengujian struktur mikro sebagai berikut,

1. Melakukan pemotongan spesimen dan *mounting* spesimen uji dalam resin.





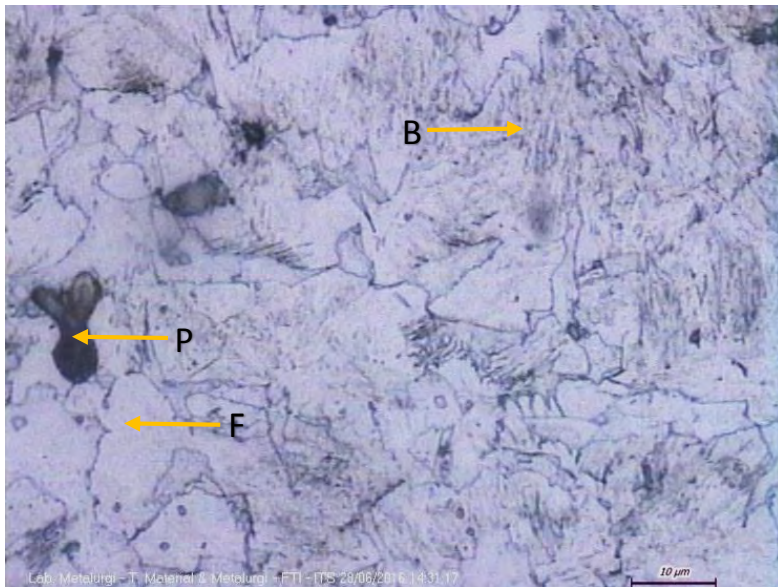
- 
2. Menghaluskan spesimen dengan menggunakan kertas gosok, mulai grid 200 sampai 2000.
  3. Melakukan pemolesan dengan menggunakan alumina.
  4. Melakukan penetsaan pada spesimen menggunakan etsa pikral 4%, dengan komposisi 4 ml *picric acid* dan 96 ml ethanol.
  5. Melakukan pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik dengan perbesaran 200-1000 X.
  6. Melakukan analisis pada struktur mikro yang terbentuk.

## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisis Data

#### 4.1.1 Struktur Mikro

Struktur mikro pada baja AAR-M201 Grade E kondisi perlakuan *hardening* dengan temperatur austenisasi 925 °C, waktu tahan 3 jam, media pendingin air, adalah seperti pada Gambar 4.1.



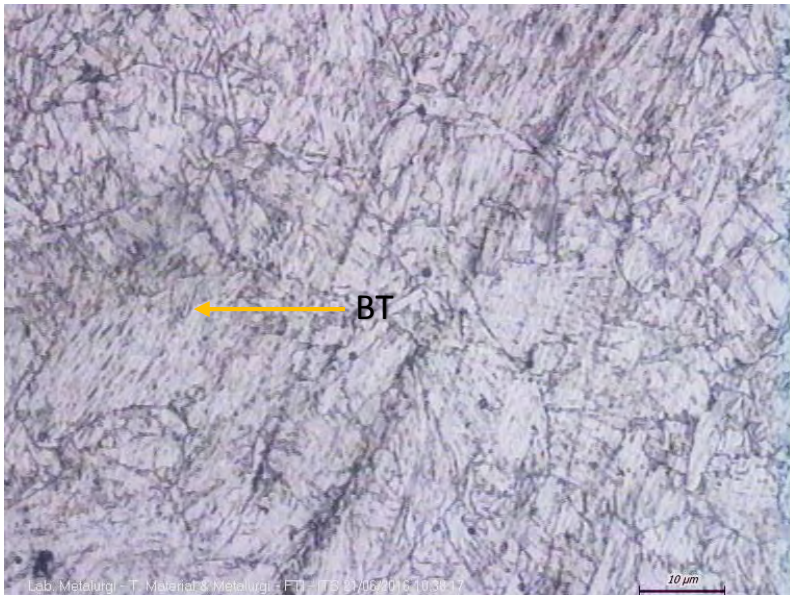
**Gambar 4. 1** Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E setelah *quenching* dari temperatur 925 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x. B: Bainit; F: Ferrit; P:Perlit

Struktur yang terbentuk terdiri atas beberapa fasa yang berbeda, yaitu kombinasi antara ferrit-perlit dan bainit. Struktur ini terbentuk akibat laju pendinginan yang relatif cepat, sehingga



strukturnya tidak hanya menjadi ferrit-perlit saja namun juga terbentuk bainit.

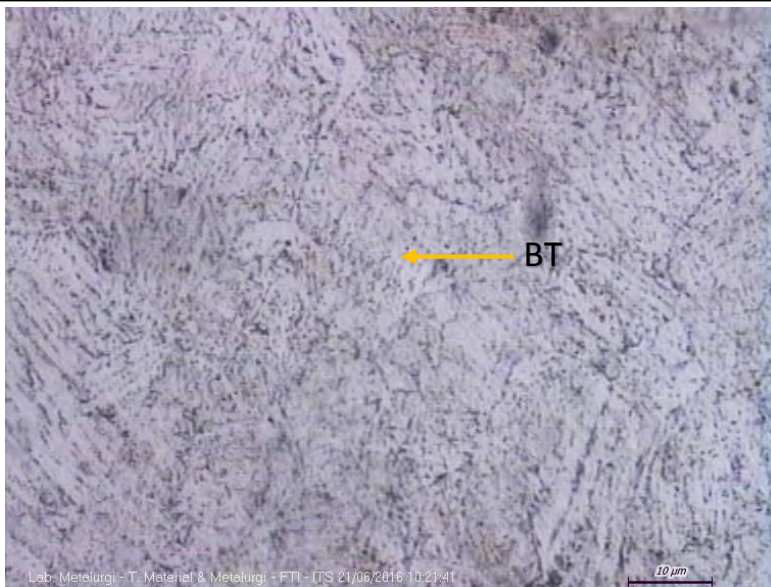
Struktur mikro pada baja AAR-M201 Grade E kondisi perlakuan *hardening* dengan temperatur austenisasi 925 °C, waktu tahan 3 jam, media pendingin air, kemudian dilanjutkan perlakuan *tempering* dengan temperatur 550 °C dan waktu tahan 3 jam, adalah seperti pada Gambar 4.2.



**Gambar 4. 2** Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E dengan perlakuan *quenching* – *tempering* pada temperatur 550 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x. BT: Bainit temper

Struktur mikro yang terbentuk adalah bainit temper. Strukturnya terdiri atas ferrit dengan partikel-partikel sementit non lamellar di dalamnya.

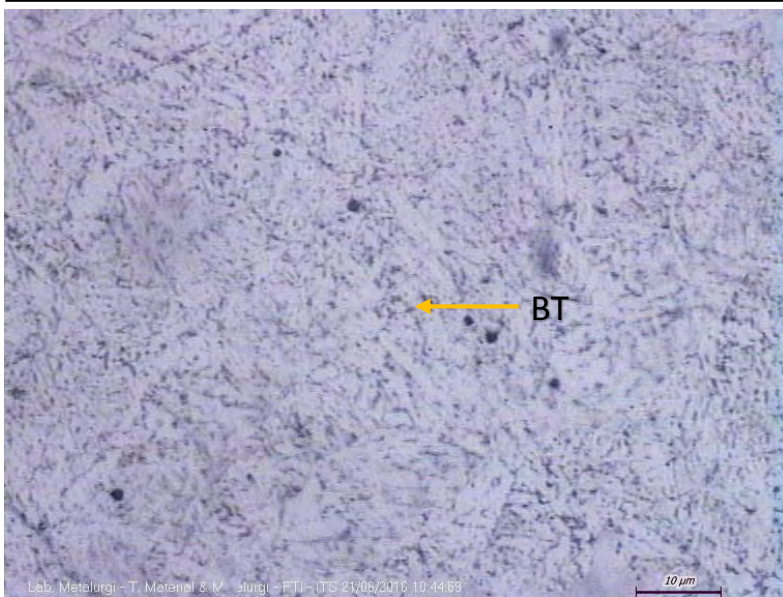
Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E kondisi perlakuan *hardening* dengan parameter yang sama, kemudian dilanjutkan *tempering* pada tempertur 600 °C dengan waktu tahan 3 jam, adalah seperti pada Gambar 4.3.



**Gambar 4.3** Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E dengan perlakuan *quenching* – *tempering* pada temperatur 600 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x. BT: Bainit temper

Struktur mikro yang terbentuk adalah bainit temper dengan struktur lebih kasar. Bilah-bilah ferrit yang terdapat pada Gambar 4.2 saling menyatu dan membentuk butir yang lebih besar, seiring dengan naiknya temperatur *tempering*. Partikel sementit tersebar semakin merata.

Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E kondisi perlakuan *hardening*, dilanjutkan perlakuan *tempering* pada temperatur 650 °C, waktu tahan 3 jam, adalah seperti pada Gambar 4.4.



**Gambar 4. 4** Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E dengan perlakuan *quenching* – *tempering* pada temperatur 650 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x. BT: Bainit temper

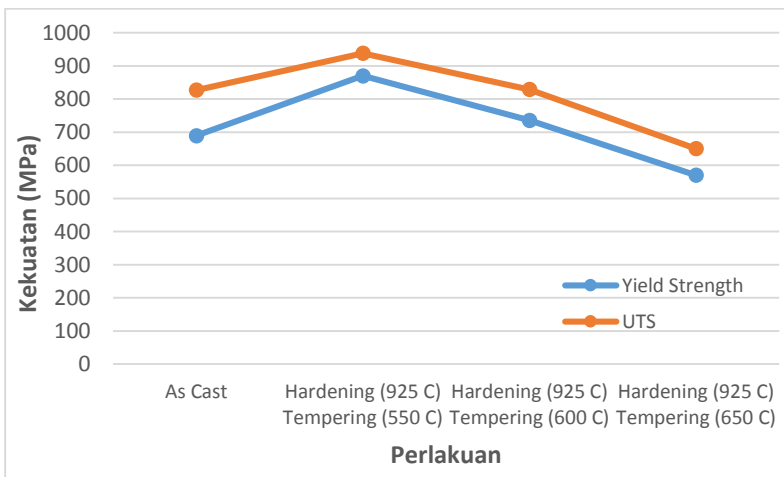
Struktur yang terbentuk adalah bainit temper. Area terang yang merupakan ferrit menjadi semakin luas dan partikel-partikel sementit yang terbentuk tidak lagi berbentuk pipih, namun cenderung berbentuk titik-titik dan bulatan kecil dengan distribusi yang lebih merata, bila dibandingkan dengan struktur pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3. Tingginya temperatur *tempering* menyebabkan terjadinya difusi unsur C dari ferrit dan presipitasi karbida dari austenit, sehingga sementit yang terbentuk lebih merata dan cenderung berbentuk bulat.



### 4.1.2 Pengujian Tarik

Uji tarik dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik material. Sifat mekanik material yang dapat diketahui dari uji tarik adalah kekuatan dan keuletan. Kekuatan material ditinjau dari kekuatan maksimum dan kekuatan luluh, sementara keuletan ditinjau dari persen elongasi dan reduksi area yang terjadi pada material setelah uji tarik.

Kekuatan maksimum merupakan kemampuan material untuk menerima beban tanpa terjadi putus. Kekuatan luluh adalah kemampuan material untuk menerima beban tanpa mengalami deformasi plastis. Gambar 4.5 menunjukkan hubungan perlakuan spesimen AAR-M201 Grade E terhadap kekuatan luluh dan kekuatan maksimum.



**Gambar 4. 5** Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR-M201 Grade E terhadap kekuatan luluh dan kekuatan maksimum

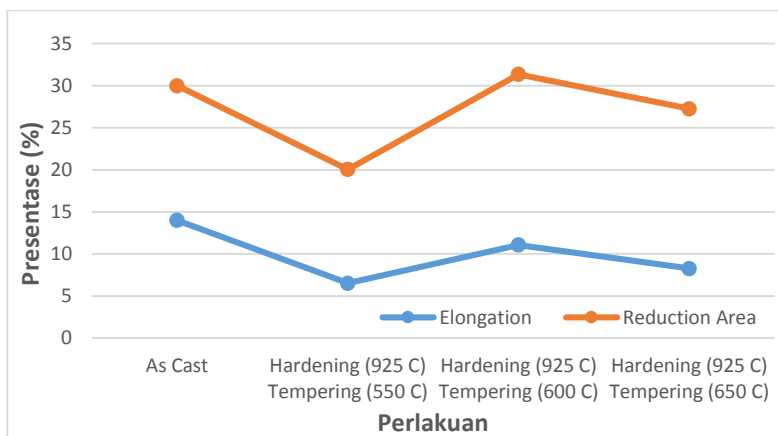
Pada gambar, terlihat kekuatan luluh dan kekuatan maksimum terbesar diperoleh pada spesimen yang mengalami perlakuan *hardening-tempering* dengan temperatur *tempering* 550 °C. Kekuatan material kemudian menurun, seiring dengan semakin tingginya temperatur *tempering* yang digunakan.





Berdasarkan spesifikasi American Association of Railroads (AAR), spesifikasi minimum kekuatan yang harus dimiliki oleh baja AAR-M201 Grade E adalah sebesar 689,476 MPa untuk kekuatan luluh dan 827,371 MPa untuk kekuatan tarik maksimum. Proses perlakuan yang tidak menghasilkan kekuatan sesuai spesifikasi standar adalah *hardening-tempering* pada temperatur 650 °C, dengan kekuatan luluh 570,095 MPa dan kekuatan maksimum 650,472 MPa, yang mana belum mencapai spesifikasi minimum standar AAR.

Keuletan menyatakan kemampuan suatu material untuk berdeformasi plastis tanpa terjadi patah. Nilai keuletan material dapat ditinjau dari persentase elongasi dan reduksi area. Pada Gambar 4.6, ditunjukkan hubungan perlakuan spesimen AAR-M201 Grade E terhadap keuletan (persen elongasi dan reduksi area).



**Gambar 4. 6** Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR-M201 Grade E terhadap persen elongasi dan reduksi area

Pada gambar, terlihat spesimen *hardening-tempering* dengan temperatur 550 °C memiliki keuletan paling rendah. Keuletan kemudian naik pada spesimen yang ditemper pada temperatur 600 °C. Namun kembali turun ketika temperatur *tempering* 650 °C.



---

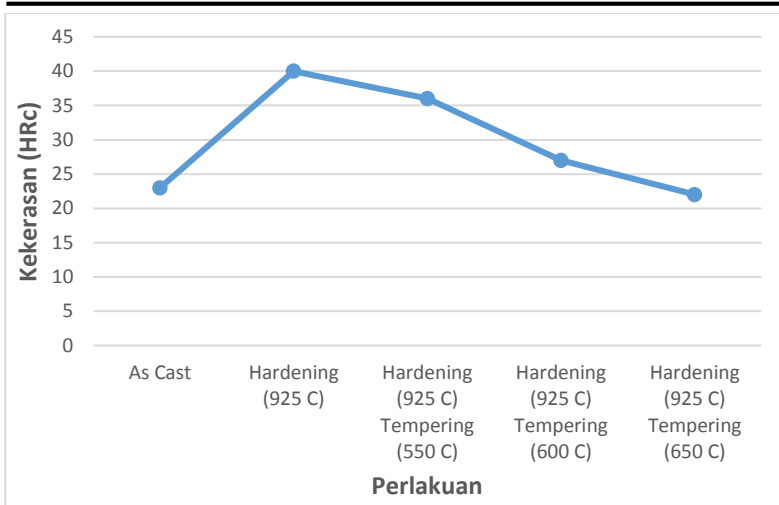
Berdasarkan spesifikasi American Association of Railroads (AAR), spesifikasi minimum keuletan baja AAR-M201 Grade E adalah memiliki elongasi minimal 14% dan reduksi area minimal 30%. Dari ketiga perlakuan yang dilakukan, tidak ada yang memenuhi spesifikasi minimum standar AAR. Elongasi spesimen *hardening-tempering* pada temperatur 550 °C, 600 °C, 650 °C, berturut-turut adalah 6,520%, 11,070%, dan, 8,270%. Ketiganya memiliki nilai yang kurang dari spesifikasi minimum, yaitu 14%. Sementara reduksi area spesimen *hardening-tempering* pada temperatur 550 °C, 600 °C, 650 °C, berturut-turut adalah 20,055%, 31,354%, dan, 27,262%. Hanya spesimen yang ditemper pada temperatur 600 °C yang memiliki persen reduksi area melebihi 30%.

#### 4.1.3 Pengujian Kekerasan

Kekerasan adalah kemampuan suatu material untuk menahan goresan dan tusukan/indentasi. Kekerasan pada baja sangat dipengaruhi oleh komposisi, terutama kadar karbon, dan struktur mikro yang terbentuk.

Pada Gambar 4.7 ditunjukkan hubungan perlakuan spesimen AAR-M201 Grade E terhadap kekerasan, yang ditunjukkan dalam skala HRC.





**Gambar 4. 7** Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR-M201 Grade E terhadap kekerasan (HRC)

Pada gambar, terlihat kekerasan terbesar diperoleh saat spesimen diberi perlakuan *hardening* dan nilainya menurun ketika diberi perlakuan *tempering*. Penurunan nilai kekerasan terjadi seiring dengan meningkatnya temperatur *tempering*.

Berdasarkan spesifikasi American Association of Railroads (AAR), kekerasan yang harus dimiliki baja AAR-M201 Grade E berada pada rentang 22,6 – 33 HRC. Proses perlakuan yang tidak menghasilkan kekerasan sesuai spesifikasi adalah *hardening-tempering* 650 °C dengan nilai kekerasan sebesar 22 HRC.

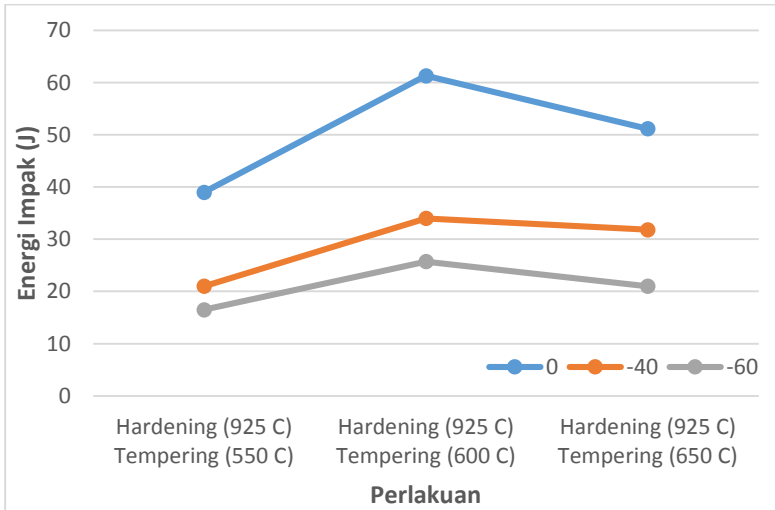
#### 4.1.4 Pengujian Impak

Kekuatan impak merupakan ketahanan suatu material terhadap beban pukulan (*impact*) yang dinyatakan dengan besar energi yang diperlukan untuk mematahkan suatu material. Energi impak memberi suatu indikasi yang baik pada energi yang diperlukan untuk inisiasi dan penjaralan suatu retak. Kekuatan



impak menunjukkan salah satu sifat mekanik material, yaitu ketangguhan.

Pada Gambar 4.8, ditunjukkan hubungan perlakuan spesimen baja AAR-M201 Grade E terhadap energi impact pada berbagai temperatur. Pengujian dilakukan pada temperatur 0, -40, dan -60 °C.



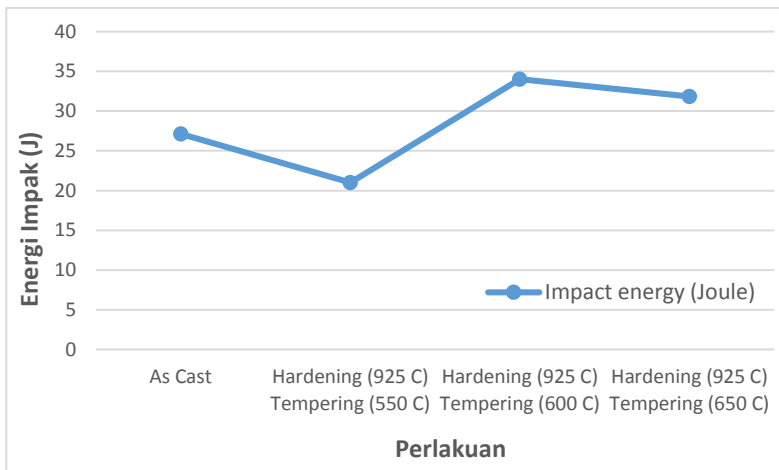
**Gambar 4. 8** Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR-M201 Grade E terhadap kekuatan impact pada berbagai temperatur (0, -40, -60 °C)

Pada temperatur 0 °C, kekuatan impact paling tinggi dimiliki oleh spesimen *hardening-tempering* 600 °C dengan nilai energi impact sebesar 61,333 Joule, diikuti oleh spesimen *hardening-tempering* 650 °C dan spesimen *hardening-tempering* 550 °C dengan nilai energi impact sebesar 51,167 Joule dan 39 Joule. Pada temperatur -40 °C, spesimen *hardening-tempering* 600 °C memiliki kekuatan impact paling tinggi, sebesar 34 Joule, disusul spesimen *hardening-tempering* 650 °C, sebesar 31,833 Joule, dan paling rendah adalah spesimen *hardening-tempering* 550 °C dengan energi impact sebesar 21 Joule. Pada temperatur -60 °C, kekuatan



impak paling tinggi dimiliki oleh spesimen *hardening-tempering* 600 °C, diikuti spesimen *hardening-tempering* 650 °C, dan spesimen *hardening-tempering* 550 °C dengan nilai masing-masing 25,733 Joule, 21 Joule, dan 16,5 Joule.

Berdasarkan spesifikasi *Association of American Railroads* (AAR), energi impact minimum yang harus dimiliki oleh baja AAR-M201 Grade E adalah sebesar 27,116 Joule pada temperatur -40 °C. Gambar 4.9 menunjukkan kekuatan impact spesimen pada temperatur -40 °C.



**Gambar 4. 9** Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR-M201 Grade E terhadap kekuatan impact pada temperatur -40°C

Spesimen yang tidak memenuhi standar AAR adalah spesimen *hardening-tempering* pada temperatur 550 °C dengan kekuatan impact sebesar 21 Joule.

## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 Pengaruh Temperatur *Tempering* terhadap Struktur Mikro Baja AAR-M201 Grade E

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh temperatur *tempering* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik



baja AAR-M201 Grade E. Spesimen diberi perlakuan *hardening – tempering*. Parameter *hardening* yang digunakan pada ketiga spesimen adalah sama, yaitu dengan temperatur austenisasi 925 °C, waktu tahan 3 jam, dan media pendingin menggunakan air. Masing-masing spesimen kemudian ditemper pada temperatur yang berbeda, yaitu 550, 600, dan 650 °C namun dengan waktu tahan yang sama, yaitu 3 jam.

Pada pengamatan struktur mikro, struktur mikro yang terbentuk setelah proses *hardening* terdiri atas ferrit, perlit, dan bainit. Sementara setelah proses *tempering* struktur yang terbentuk adalah bainit temper. Bainit temper adalah struktur yang terbentuk ketika bainit mengalami proses penemperan. Bainit adalah struktur yang terbentuk ketika baja mengalami laju pendinginan yang cukup cepat. Secara teoritis, saat baja didinginkan cepat, maka struktur yang terbentuk adalah martensit. Namun, pada penelitian ini struktur yang terbentuk adalah bainit, ferrit, dan perlit. Martensit tidak terbentuk karena kadar karbon yang terdapat dalam baja cukup rendah, tidak cukup banyak untuk membentuk struktur martensit.

Transformasi bainit terjadi akibat laju pendinginan yang cepat. Pendinginan yang cepat mengakibatkan austenit tidak mempunyai waktu yang cukup untuk bertransformasi menjadi perlit, sehingga struktur yang terbentuk hampir menyerupai perlit, yaitu bainit. Pada proses transformasinya, austenit mengalami *driving force* yang besar untuk berubah dari FCC (*Face Centered Cubic*) menjadi BCC (*Body Centered Cubic*), sehingga terbentuk ferit. Ferrit mempunyai nilai kelarutan karbon yang kecil, sehingga karbon yang tidak mampu dilarutkan ferit berdifusi keluar membentuk karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Austenit yang bertransformasi menjadi ferit dan karbon yang berdifusi keluar membentuk karbida, menghasilkan struktur berupa bilah-bilah ferit yang saling terhubung dan didalamnya terdapat partikel sementit yang memanjang dengan arah hampir sejajar dengan sumbu pertumbuhannya. Jumlah dan kontinuitas layer sementit dipengaruhi oleh kadar karbon baja. Struktur mikro bainit yang



terbentuk pada baja ini adalah bainit atas (Bhadhesia dan Honeycombe 2006).

Pada proses *tempering*, dilakukan proses pemanasan pada temperatur *tempering* 550, 600, dan 650 °C. Temperatur *tempering* yang relatif tinggi menyebabkan terjadinya *recovery*, menghilangkan batas butir diantara bilah-bilah yang mempunyai sudut yang kecil, menyebabkan bilah-bilah yang berdekatan saling menyatu, sehingga strukturnya menjadi lebih kasar (Li dkk. 2012). Semakin tinggi temperatur *tempering* maka semakin besar ukuran ferit dan semakin banyak jumlah karbida sementit. Selain itu bentuk karbida berubah dari memanjang menjadi cenderung bulat (*sphere*). Hal ini karena semakin tinggi temperatur *tempering* mengakibatkan difusi unsur C dari ferit jenuh, juga presipitasi karbida dari austenit yang kaya (dekomposisi austenit) (Bhadhesia dan Honeycombe 2006).

#### 4.2.2 Pengaruh Temperatur *Tempering* terhadap Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E

Sifat mekanik baja dipengaruhi oleh komposisi kimia dan struktur mikro yang dimilikinya. Dalam penelitian ini, sifat mekanik yang ditinjau adalah kekuatan, keuletan, kekerasan, dan ketangguhan. Penelitian ini menggunakan spesimen dengan komposisi kimia yang sama namun dengan perlakuan panas yang berbeda. Spesimen diberikan perlakuan *hardening-tempering*, masing-masing pada temperatur 550, 600, dan 650 °C. Perbedaan perlakuan panas yang diterima spesimen menyebabkan struktur mikro yang berbeda, sehingga sifat mekaniknya pun berbeda. Tabel 4.1 menunjukkan perbandingan sifat mekanik yang dihasilkan dari tiga proses *tempering*.

**Tabel 4. 1** Perbandingan sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E hasil *tempering* dari tiga temperatur berbeda

Sifat Mekanik	Standar AAR	<i>Tempering</i> 550°C	<i>Tempering</i> 600°C	<i>Tempering</i> 650°C
Kekuatan Tarik (MPa)	827,37	938,43	828,88	650,47



Kekuatan Luluh (MPa)	689,47	870,22	735,64	570,09
Elongasi (%)	14	6,52	11,07	8,27
Reduksi Area (%)	30	20,05	31,35	27,26
Kekerasan (HRC)	22,6 – 31	36	27	22
Kekuatan impak (Joule) pada -40°C	27,12	21	34	31,83

Hasil yang paling optimal didapat dari proses *tempering* pada temperatur 600 °C, dimana hampir semua sifat mekaniknya memenuhi standar AAR, kecuali nilai elongasi. Sementara hasil yang paling tidak sesuai didapat dari proses *tempering* pada temperatur 650 °C, dimana hanya kekuatan impak yang memenuhi standar.

Semakin tinggi temperatur yang digunakan dalam proses *tempering* maka semakin menurun nilai kekuatan dan kekerasannya. Hal ini disebabkan karena pada temperatur *tempering* yang tinggi, terjadi *recovery* yang menyebabkan hilangnya batas butir dan membuat ukuran butir semakin besar sehingga strukturnya semakin kasar (Li dkk. 2012). Batas butir menyimpan tegangan yang tinggi, sehingga ketika batas butir menghilang, berakibat pada berkurangnya kekuatan dan kekerasan yang dimiliki baja. *Tempering* pada temperatur tinggi juga mengubah bentuk karbida dari yang semula memanjang (*elongated*) menjadi bulat (*sphere*). Karbida dengan bentuk memanjang menyimpan tegangan yang lebih tinggi bila dibanding karbida berbentuk bulat, sehingga saat karbida berubah bentuk menjadi bulat maka kekuatan dari baja menjadi turun. *Tempering* pada temperatur diatas 500 °C menyebabkan pelarutan kembali unsur paduan (Li dkk. 2012). Unsur paduan seperti kromium (Cr) dan Molibden (Mo) yang sebenarnya dapat menghambat penurunan kekerasan saat proses *tempering*, larut dalam ferrit dan sulit untuk membentuk karbida karena kadar unsur paduan dan kadar karbon yang rendah, sehingga penurunan nilai kekerasan tidak dapat dihindari.



---

Semakin tinggi temperatur *tempering* yang digunakan maka akan semakin baik keuletan dan ketangguhan baja. Nilai keuletan dan ketangguhan baja dari *tempering* pada temperatur 600 °C lebih tinggi daripada yang dihasilkan dari *tempering* pada temperatur 550 °C. Hal ini disebabkan karena struktur mikro menjadi semakin kasar dan butir yang menjadi semakin besar, akibat *recovery*, saat temperatur *tempering* yang digunakan semakin tinggi. Semakin tinggi temperatur yang digunakan dalam proses *tempering*, maka akan semakin kasar struktur mikro yang dihasilkan, berakibat pada keuletan dan ketangguhan baja yang menjadi semakin baik. Namun nilai keuletan dan ketangguhan yang dihasilkan dari *tempering* pada temperatur 650 °C lebih rendah daripada yang dihasilkan dari *tempering* pada temperatur 600 °C. Pada proses *tempering* diatas 600 °C, *recovery* yang terjadi pada bainit sangat kecil, sehingga tidak ada perubahan yang signifikan pada struktur mikro, terutama pada morfologi ferrit dan ukuran butir (Irvine dkk. 1957). Akibatnya, tidak terjadi peningkatan yang signifikan pada keuletan dan ketangguhan. Pada penelitian ini, nilai ketangguhan dan keuletan justru semakin rendah saat temperatur *tempering* yang digunakan 650 °C, karena *tempering* pada temperatur 650 °C menyebabkan distribusi karbida menjadi semakin merata, mengakibatkan nilai keuletan dan ketangguhannya menurun. Nilai keuletan dan ketangguhan paling optimal didapat saat temperatur *tempering* yang digunakan 600 °C.

## LAMPIRAN

- Hasil Pengujian Impak

Temp (°C)	Spesimen	L (mm)	W (mm)	T (mm)	Impact Energy (Joule)	Wd1 (mm)
0	A1	55,69	10,00	8	39	10,11
	A2	57,04	10,02	8	39	10,13
	B1	55,70	10,18	8	70	10,76
	B2	57,20	10,08	8	60	10,72
	B3	55,83	10,09	8	54	10,48
	C1	55,85	10,06	8	42,5	10,23
	C2	56,13	9,84	8	61	10,24
	C3	54,73	10,00	8	50	10,18
-40	A1	56,63	9,96	8	22	10,21
	A2	56,23	10,08	8	20	10,43
	B1	56,37	10,07	8	35	10,29
	B2	55,66	10,01	8	30	10,18
	B3	55,82	10,09	8	37	10,26
	C1	55,33	9,84	8	29	10,08
	C2	55,94	10,06	8	31,5	10,24
	C3	55,98	10,06	8	35	10,24
-60	A1	56,47	10,04	8	13	10,19
	A2	56,23	10,06	8	20	10,35
	B1	56,28	9,92	8	25,5	10,07
	B2	56,39	10,04	8	19,3	10,21
	B3	55,77	10,22	8	32,4	10,36



	C1	56,54	9,52	8	28	9,91
	C2	56,05	9,95	8	18	10,16
	C3	56,30	10,06	8	17	10,23

- Hasil pengujian kekerasan

Kode	Side (HB)	D1	D2	Medium (HB)	D1	D2	Centre (HB)	D1	D2
A.2	307	0,857	0,879	322	0,853	0,844	322	0,835	0,862
	333	0,844	0,825	329	0,848	0,830	344	0,835	0,808
	322	0,839	0,857	335	0,825	0,839	362	0,808	0,795
	341	0,830	0,821	327	0,839	0,844	354	0,839	0,781
	325,75			328,25			345,5		
B.1	261	0,938	0,938	259	0,955	0,929	283	0,897	0,911
	259	0,955	0,929	266	0,964	0,915	270	0,945	0,902
	264	0,955	0,911	274	9,42	0,893	255	0,960	0,938
	279	0,915	0,902	272	0,945	0,893	269	0,929	0,920
	265,75			267,75			269,25		
C.1	232	1.004	0,982	234	1.009	0,969	235	1.004	0,969
	232	0,996	0,991	236	0,987	0,982	237	0,987	0,978
	234	1.000	0,978	239	0,991	0,969	235	0,996	0,987
	229	1.018	0,982	230	1.018	0,978	234	0,991	0,987
	231,75			234,75			235,25		

- Hasil Uji Tarik

<b>Spec</b>	<b>D0 (mm)</b>	<b>A0 (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>L0 (mm)</b>	<b>D1 (mm)</b>	<b>A1 (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>L1 (mm)</b>	<b>F Yield (N)</b>	<b>F UTS (N)</b>	<b>Yield Stress (MPa)</b>	<b>UTS (MPa)</b>	<b>Elongasi (%)</b>	<b>Red Area (%)</b>
A1	12,100	114,932	50	11,680	107,092	52,370	101000	106000	878,782	922,286	4,740	6,822
A2	12,280	118,377	50	10,030	78,972	54,150	102000	113000	861,656	954,579	8,300	33,288
B1	12,100	114,932	50	9,560	71,744	57,020	84000	96000	730,868	835,278	14,040	37,577
B2	11,950	112,100	50	10,340	83,929	54,050	83000	92200	740,411	822,480	8,100	25,130
C1	12,430	121,286	50	10,820	91,902	55,550	75500	87500	622,494	721,433	11,100	24,227
C2	12,840	129,419	50	10,720	90,211	52,720	67000	75000	517,696	579,511	5,440	30,296

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan tentang analisis pengaruh temperatur *tempering* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut,

1. Temperatur *tempering* mempengaruhi struktur mikro baja AAR-M201 Grade E. *Tempering* pada baja AAR-M201 Grade E menghasilkan struktur mikro bainit temper. Peningkatan temperatur *tempering* mengakibatkan struktur menjadi semakin kasar dan mengakibatkan perubahan bentuk pada karbida sementit ( $Fe_3C$ ), yang semula cenderung memanjang (*elongated*) menjadi cenderung berbentuk bulat (*sphere*).
2. Temperatur *tempering* mempengaruhi sifat mekanik baja AAR-201 Grade E. Semakin tinggi temperatur pada proses *tempering* menyebabkan kekuatan luluh, kekuatan maksimum, dan kekerasan menurun, serta keuletan dan energi impak meningkat. Hasil sifat mekanik paling optimal didapat dari proses *tempering* pada temperatur 600 °C, menghasilkan nilai kekuatan tarik 828,88 MPa, kekuatan luluh 735,64 MPa, elongasi 11%, reduksi area 31,35%, kekerasan 27 HRc, dan kekuatan impak sebesar 34 Joule pada temperatur -40 °C. Nilai yang dihasilkan hampir seluruhnya memenuhi standar AAR, kecuali nilai elongasi.

#### **5.2 Saran**

Berdasarkan hasil yang didapatkan maka saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut,

1. Hasil paling optimal didapat dari proses *tempering* pada temperatur 600 °C, dimana hampir semua sifat mekanik sesuai standar kecuali elongasi. Untuk itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pada temperatur *tempering* sekitar 600 °C, untuk mendapatkan baja dengan sifat mekanik sesuai standar AAR.

## DAFTAR PUSTAKA

- \_\_\_\_\_. 1990. *Intermediate Direct Support and General Support Repair Parts and Special Tool List Unit*. Washington D.C.: HEADQUARTERS, DEPARTMENT OF THE ARMY.
- \_\_\_\_\_. 2007. *Manual of Standards and Recommended Practices*. Washington D.C.: The Association of American Railroads.
- \_\_\_\_\_. 2004. *ASM Handbook vol. 4: Heat Treating*. ASM International.
- \_\_\_\_\_. 2004. *ASM Handbook vol. 9: Metallography and Microstructure*. ASM International.
- \_\_\_\_\_. 2010. *ASTM E10 : Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*. ASTM International.
- \_\_\_\_\_. 2002. *ASTM E23 : Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. ASTM International.
- \_\_\_\_\_. 2007. *ASTM E3 : Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. ASTM International.
- \_\_\_\_\_. 2007. *ASTM E8/E8M : Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International.
- Atari, Darmawan Alan. 2012. "Pengaruh Variasi Temperatur Annealing Terhadap Perubahan Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Bolster."
- Avner, Sidney H. 1974. *Introduction to Physical Metallurgy*. New York: Mc.Graw Hill Publishing Co. Inc.
- Bhadhesia, H. K. D. H., dan R. W. K. Honeycombe. 2006. *Steels: Microstructure and Properties*. Oxford: Elsevier.
- Bramfit, Bruce L. 1998. "Structure/Property Relationship in Irons and Steels." *Metal Handbook Desk Edition, Second Edition*, 153 - 173. ASM International.

- Brunhuber, Ernst. 1988. *Giesserei Lexikon*. Berlin: Fachverlag Schiele & Schoen.
- Callister, William D. 2007. *Materials Science and Engineering an Introduction*. Vol. 7. New York: John Wiley & Sons. Inc.
- Campbell, F.C. 2008. *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. New York: ASM International.
- Clark, Donald S., dan W.R. Varney. 1962. *Physical Metallurgy for Engineers*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Damanik, Fransiskus G. 2010. "Pengaruh Proses Perlakuan Panas Hardening, Normalising, dan Tempering Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E."
- Huang, Jin, Lu Xia, Youshou Zhang, dan Sinian Li. 2014. "Investigation on Brittle Fracture Mechanism of a Grade E Cast Steel Knuckle." *Case Studies in Engineering Failure Analysis*: 15-24.
- Irvine, K. J, F. B. Pickering, dan W. C. Heselwood. 1957. *J. Iron Steel Institute* 186: 54–67.
- Janney, Eli H. 1873. Improvement in car-couplings. United States of America Paten US 138405 A.
- Khan, M. Ghulam Isaq. 2015. "Analisa Pengaruh Temperatur Tempering terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik pada Baja AAR M201 Grade E."
- Li, Defa, Feng Huang, Shisen Wang, Yhuzang Xiong, Shuqing Xing, dan Tao Xiong. 2012. "Effect of tempering temperature on microstructures and properties of niobium and titanium microalloying low carbon bainite steel." *2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. Paris: Atlantis Press.
- Thelning, Karl-Erik. 1984. *Steel and Its Heat Treatment*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

## BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Imam Ahmad Suryana, namun lebih akrab disapa dengan panggilan Imam, Sur, atau Yana. Penulis dilahirkan di Kab. Rembang, 8 Nopember 1994, dan merupakan anak ketiga dari 4 bersaudara. Penulis memulai pendidikan formal di SD N 1 Pamotan, kemudian lanjut ke SMP N 1 Pamotan, dan SMA N 1 Rembang. Setelah tamat dari SMA, penulis melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh

Nopember, lebih tepatnya di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi – Fakultas Teknologi Industri.

Selama perkuliahan, penulis cukup aktif dalam berorganisasi, diantaranya sebagai staff Departemen Hubungan Luar HMMT FTI – ITS (2013-2014), staff Badan Khusus Dana dan Usaha JMMI TPPI ITS (2013-2014), kepala divisi Dana dan Usaha LDJ Ash-Haabul Kahfi (2014-2015), dan Ketua Badan Khusus Muslimpreneur JMMI TPPI ITS (2015-2016). Selain berorganisasi, penulis juga mengikuti program *On the Job Training* di PT. ECOLAB INTERNATIONAL INDONESIA (2015) dan di PT. SMELTING (2016).