



TUGAS AKHIR - TL141584

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

MOCHAMMAD GHULAM ISAQ KHAN  
NRP 2711100089

Dosen Pembimbing  
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.  
Wikan Jatimurti, S.T.,M.Sc.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2015

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TL141584**

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

**MOCHAMMAD GHULAM ISAQ KHAN**  
NRP 2711100089

Advisor  
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.  
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALURGICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2015

*Halaman ini sengaja di kosongkan*

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

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**MOCHAMMAD GHULAM ISAQ KHAN**

NRP 2711 100 089

Disetujui oleh Tim Pembimbing Tugas Akhir

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. .... (Pembimbing I)

Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. .... (Pembimbing II)



**SURABAYA  
AGUSTUS 2015**



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

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

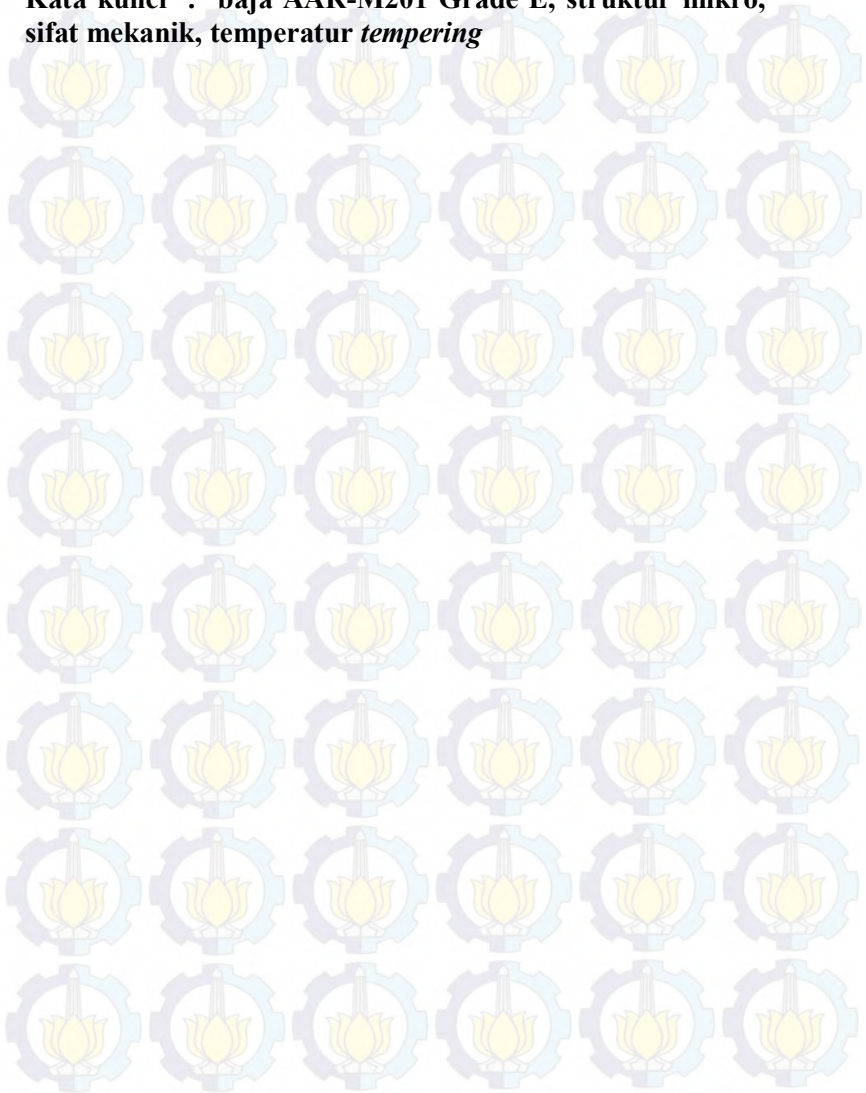
Nama Mahasiswa : Mochammad Ghulam Isaq Khan  
NRP : 2711100089  
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi  
Dosen Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.  
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

## Abstrak

*Baja paduan banyak digunakan pada konstruksi komponen-komponen kereta api. Baja yang umum digunakan adalah baja paduan mangan (manganese steel) dengan seri penamaan baja AAR-M201. Struktur mikro pada suatu baja paduan tergantung pada beberapa variabel seperti unsur paduan, konsentrasi unsur paduan, dan proses perlakuan panas. Pada penelitian ini menggunakan baja AAR-M201 Grade E as cast, perlakuan hardening, dan perlakuan hardening-tempering. Hardening dilakukan pada temperatur austenitisasi 925 °C, selama 45 menit, dan media pendingin air. Hardening-tempering dilakukan pada temperatur tempering 625, 650, dan 675 °C, selama 45 menit. Temperatur tempering mempengaruhi struktur mikro baja AAR-M201 Grade E, dengan terbentuknya struktur mikro yaitu bainit temper, berupa bilah-bilah ferit dan partikel-partikel karbida sementit ( $Fe_3C$ ). Peningkatan temperatur tempering menghasilkan struktur bainit temper yang semakin kasar dan karbida sementit semakin banyak. Temperatur tempering mempengaruhi sifat mekanik baja AAR-201 Grade E. Peningkatan temperatur tempering, menurunkan kekuatan luluh, kekuatan maksimum, kekerasan dan meningkatkan keuletan dan energi impact.*



**Kata kunci : baja AAR-M201 Grade E, struktur mikro,  
sifat mekanik, temperatur *tempering***





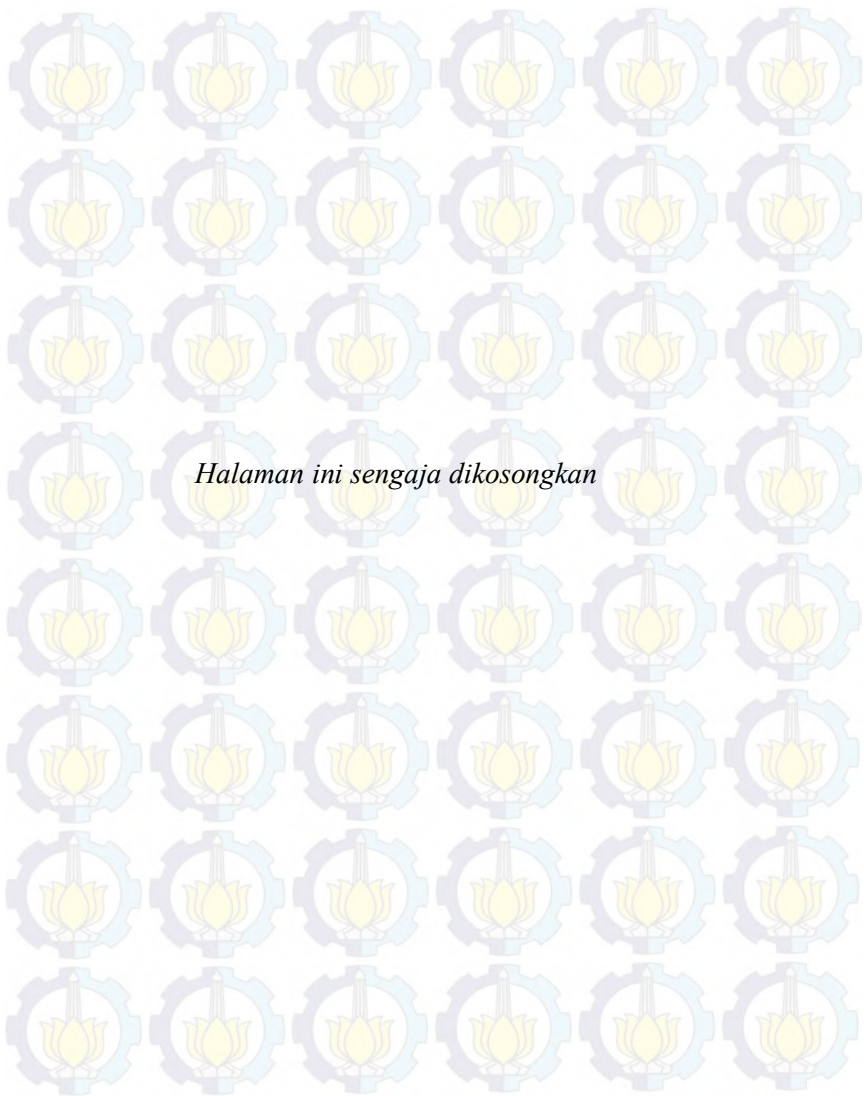
**ANALYSIS ON THE EFFECT OF TEMPERING  
TEMPERATURE TO MICROSTRUCTURE AND  
MECHANICAL PROPERTIES OF  
AAR-M201 GRADE E STEEL**

**Name** : Mochammad Ghulam Isaq Khan  
**NRP** : 2711100089  
**Department** : Materials and Metallurgical Engineering  
**Advisor** : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.  
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

**Abstract**

*Alloy steels are commonly used in railway components construction. Steel that commonly used is manganese steel, AAR-M201 standard. Microstructures of an alloy steel depends on the alloying elements, concentration, and heat treatment. This research used AAR-M201 Grade E steel, as cast, hardened, and hardened-tempered. Hardening was done at austenitization temperature, 925 °C, for 45 minutes, and cooled in water. Hardening-tempering process was done at varying tempering temperature of 625, 650, and 675 °C, for 45 minutes each. Tempering temperature influences microstructure of AAR-M201 Grade E, the microstructure formed is tempered bainite which consists of ferrite lath and particles of cementite carbide ( $Fe_3C$ ). With increasing tempering temperature, the microstructure consists of more coarse tempered bainite and more cementite carbide. Tempering temperature influences mechanical properties of AAR-M201 Grade E. With increasing tempering temperature, the yield strength, ultimate tensile strength, and hardness decreases, while the ductility and impact energy increases.*

**Keywords:** *AAR-M201 Grade E steel, microstructure, mechanical properties, tempering temperature*



## KATA PENGANTAR

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

Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri (FTI), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

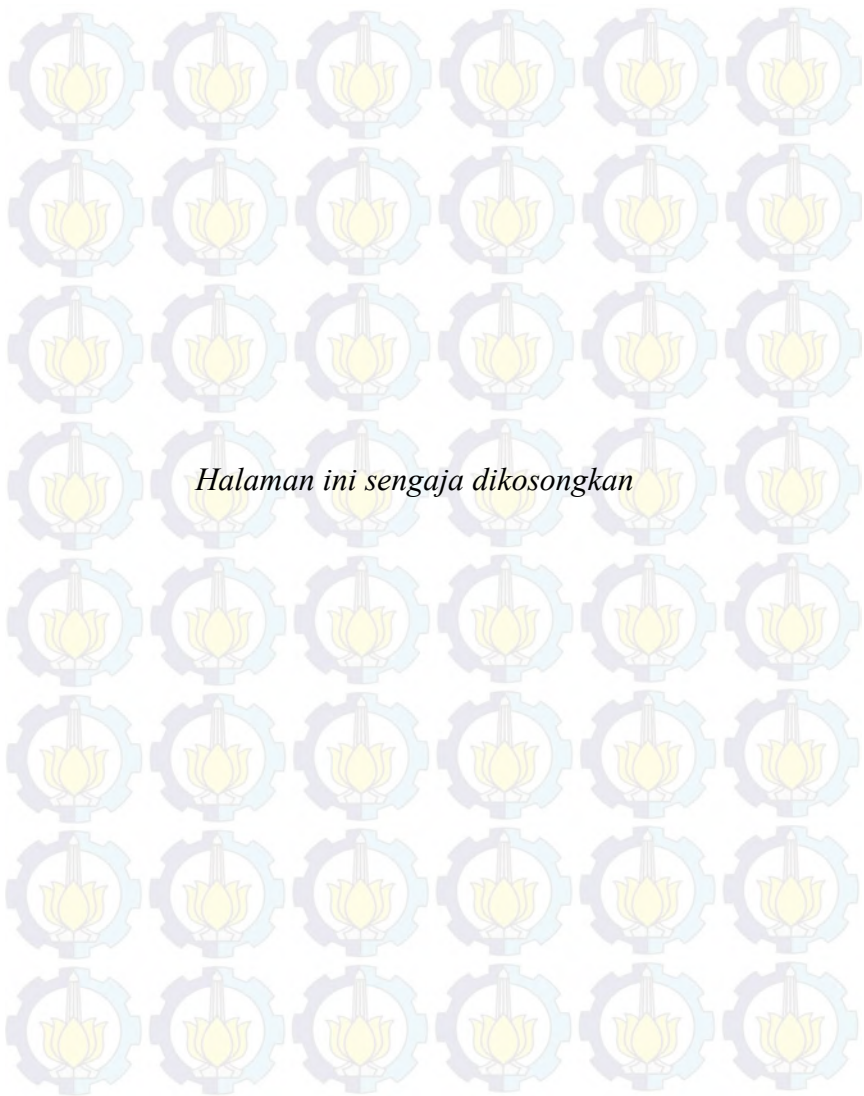
Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada :

1. Kedua orang tua dan kakak yang memberikan doa dan dukungan selama ini.
2. Dr. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
3. Ir. Rochman Rochiem M.Sc dan Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang membimbing penulis menyelesaikan Tugas Akhir.
4. Dosen-dosen Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, yang memberikan ilmu selama penulis menempuh pendidikan S1..
5. Karyawan Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi dan Teknik Mesin FTI ITS.
6. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2011, 2012, dan 2013.
7. Pihak-pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena adanya keterbatasan kemampuan penulis. Untuk itu, saran dan kritik yang konstruktif sangat diharapkan.

Surabaya, Agustus 2015

Penulis



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR ISI

	Hal
Halaman Judul .....	i
Lembar Pengesahan .....	v
Abstrak .....	vii
Abstract .....	ix
Kata Pengantar .....	xi
Daftar Isi .....	xiii
Daftar Gambar .....	xv
Daftar Tabel .....	xix
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Baja Paduan .....	5
2.2 Pengaruh Unsur Paduan .....	5
2.3 Baja Mangan .....	6
2.4 Baja AAR-M201 Grade E .....	10
2.5 Pengerasan ( <i>Hardening</i> ) .....	13
2.5.1 Austenitisasi .....	14
2.5.2 <i>Quenching</i> .....	16
2.6 <i>Tempering</i> .....	17
2.7 <i>Tempering</i> pada Bainit .....	23
2.8 Pola Patahan Impak <i>Charpy</i> .....	27
2.9 Kajian Penelitian Sebelumnya .....	29
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>33</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	33
3.2 Bahan Penelitian .....	34
3.3 Peralatan Penelitian .....	35
3.4 Metode Penelitian .....	35
3.4.1 Persiapan Spesimen .....	35

3.4.2 Perlakuan Panas pada Spesimen .....	36
3.4.3 Pengujian Tarik .....	37
3.4.4 Pengujian Kekerasan.....	38
3.4.5 Pengujian Impak.....	38
3.4.6 Pengamatan Struktur Mikro .....	39
3.4.7 Pengamatan Fraktografi .....	40
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>41</b>
4.1 Analisa Data .....	41
4.1.1 Pengamatan Struktur Mikro .....	41
4.1.2 Kekuatan Luluh dan Kekuatan Maksimum.....	46
4.1.3 Keuletan .....	47
4.1.4 Kekerasan.....	49
4.1.5 Ketangguhan Impak.....	50
4.1.6 Evaluasi Hasil Perlakuan Panas.....	51
4.1.7 Pengamatan Fraktografi .....	53
4.2 Pembahasan.....	58
4.2.1 Pengaruh Temperatur <i>Tempering</i> terhadap Struktur Mikro Baja AAR-M201 Grade E.....	58
4.2.2 Pengaruh Temperatur <i>Tempering</i> terhadap Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E.....	60
4.2.3 Pengaruh Temperatur <i>Tempering</i> pada Fraktografi Impak .....	62
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>65</b>
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran .....	65
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>67</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja AAR-M201 .....	11
Tabel 2.2 Sifat Mekanik pada Baja AAR-M201 Grade E.....	11
Tabel 2.3 Karakteristik Pola Patahan pada Pengujian Impak.....	29
Tabel 3.1 Komposisi Kimia Baja AAR-M201 Grade E.....	34
Tabel 3.2 Dimensi Spesimen Uji Tarik.....	37
Tabel 3.3 Komposisi Etsa Pikral.....	40
Tabel 4.1 Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E Hasil Perlakuan Panas .....	46





*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Fase Fe-Mn.....	7
Gambar 2.2	Pengaruh penambahan unsur paduan pada temperatur eutektoid dan kandungan karbon eutektoid.....	8
Gambar 2.3	Pengaruh Mn dan C pada daerah austenit .....	9
Gambar 2.4	Diagram CCT pada baja AAR-M201 Grade E ...	12
Gambar 2.5	Kurva <i>hardenability</i> baja AAR-M201 Grade E..	12
Gambar 2.6	Perlakuan panas <i>hardening-tempering</i> pada baja.....	14
Gambar 2.7	Rentang temperatur austenitisasi pada perlakuan panas .....	15
Gambar 2.8	Tiga tahapan pada <i>quenching</i> .....	17
Gambar 2.9	Skema produk transformasi austenit pada pendinginan dan transformasi martensit pada pemanasan ( <i>tempering</i> ).....	19
Gambar 2.10	Hubungan temperatur <i>tempering</i> pada kekuatan luluh, tarik, dan keuletan (%RA) (pada temperatur kamar) untuk paduan baja 4340 <i>oil quench</i> .....	21
Gambar 2.11	Perbandingan kekuatan impak pada berbagai temperatur pengujian dari baja dengan tiga macam struktur temper yang menghasikan kekuatan sama, 125.000 psi .....	22
Gambar 2.12	Ilustrasi skematika struktur mikro bainit atas dan bainit bawah .....	23
Gambar 2.13	Evolusi bainit sebagai fungsi waktu.....	23
Gambar 2.13	Struktur mikro bainit pada baja bainit karbon rendah (0,05%C, 1,65%Mn, 0,35%Si, 0,013%P, 0,06%Nb,0,03%Ti) .....	23
Gambar 2.14	Skematik transformasi pada bainit .....	24
Gambar 2.15	Skala waktu yang berhubungan dengan beberapa fenomena <i>tempering</i> pada bainit.....	25
Gambar 2.16	Struktur mikro bainit pada baja bainit karbon rendah (0,05%C, 1,65%Mn, 0,35%Si,	

	0,013%P, 0,06%Nb,0,03%Ti), saat dilakukan temper pada temperatur 550°C.....	23
Gambar 2.17	Skematik ilustrasi permukaan patahan <i>charpy</i> ....	28
Gambar 2.18	Mikrografi mikroskop stereo permukaan impak <i>charpy</i> pada baja bainit-ferit temperatur uji 0°C .....	29
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	34
Gambar 3.2	Skematik <i>Y-block</i> baja AAR-M201 Grade E .....	36
Gambar 3.3	Spesimen uji tarik .....	37
Gambar 3.4	Spesimen uji impak.....	39
Gambar 4.1	Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi <i>as cast</i> terdiri dari ferit (F) dan perlit (P). Dietsa dengan pikral .Pembesaran 1000 X .....	41
Gambar 4.2	Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi <i>hardening</i> , terdiri dari bainit (B) dan perlit (P). Dietsa dengan pikral. Pembesaran 1000 X..	42
Gambar 4.3	Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi <i>hardening</i> dan <i>tempering</i> , Temperatur austenitisasi pada 925°C, ditahan 45 menit, di- <i>quenchi</i> air, ditemper pada 625°C selama 45 menit.Struktur mikro yang dihasilkan adalah bainit temper (BT) terdiri dari ferit ( $\alpha$ )dan karbida sementit ( $Fe_3C$ ). Dietsa dengan pikral. Pembesaran 1000 X .....	37
Gambar 4.4	Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi <i>hardening</i> dan <i>tempering</i> , Temperatur austenitisasi pada 925°C, ditahan 45 menit, di- <i>quenchi</i> air, ditemper pada 650°C selama 45 menit.Struktur mikro yang dihasilkan adalah bainit temper (BT) ) terdiri dari ferit ( $\alpha$ )dan karbida sementit ( $Fe_3C$ ). Dietsa dengan pikral. Pembesaran 1000 X .....	38
Gambar 4.5	Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi <i>hardening</i> dan <i>tempering</i> , Temperatur austenitisasi pada 925°C, ditahan 45 menit, di-	



*quenchi* air, ditemper pada 675°C selama 45 menit. Struktur mikro yang dihasilkan adalah bainit temper (BT) ) terdiri dari ferit ( $\alpha$ ) dan karbida sementit ( $Fe_3C$ ). Dietsa dengan pikral. Pembesaran 1000 X ..... 39

Gambar 4.6 Pengaruh kondisi *as cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap kekuatan luluh dan kekuatan maksimum ..... 46

Gambar 4.7 Pengaruh kondisi *as cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap persentase elongasi dan reduksi area ..... 48

Gambar 4.8 Pengaruh kondisi *as cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap kekerasan (HRC) ..... 49

Gambar 4.9 Pengaruh kondisi *as cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap energi impak pada temperatur uji -40°C ..... 51

Gambar 4.10 Mikrografi mikroskop stereo pada permukaan impak *charpy* baja AAR-M201 Grade E *as cast*, temperatur uji -40°C ..... 53

Gambar 4.11 Mikrografi mikroskop stereo pada permukaan impak *charpy* baja AAR-M201 Grade E *hardening*, temperatur austenitisasi 925°C, waktu tahan 45 menit, media pendingin air, temperatur uji -40°C ..... 54

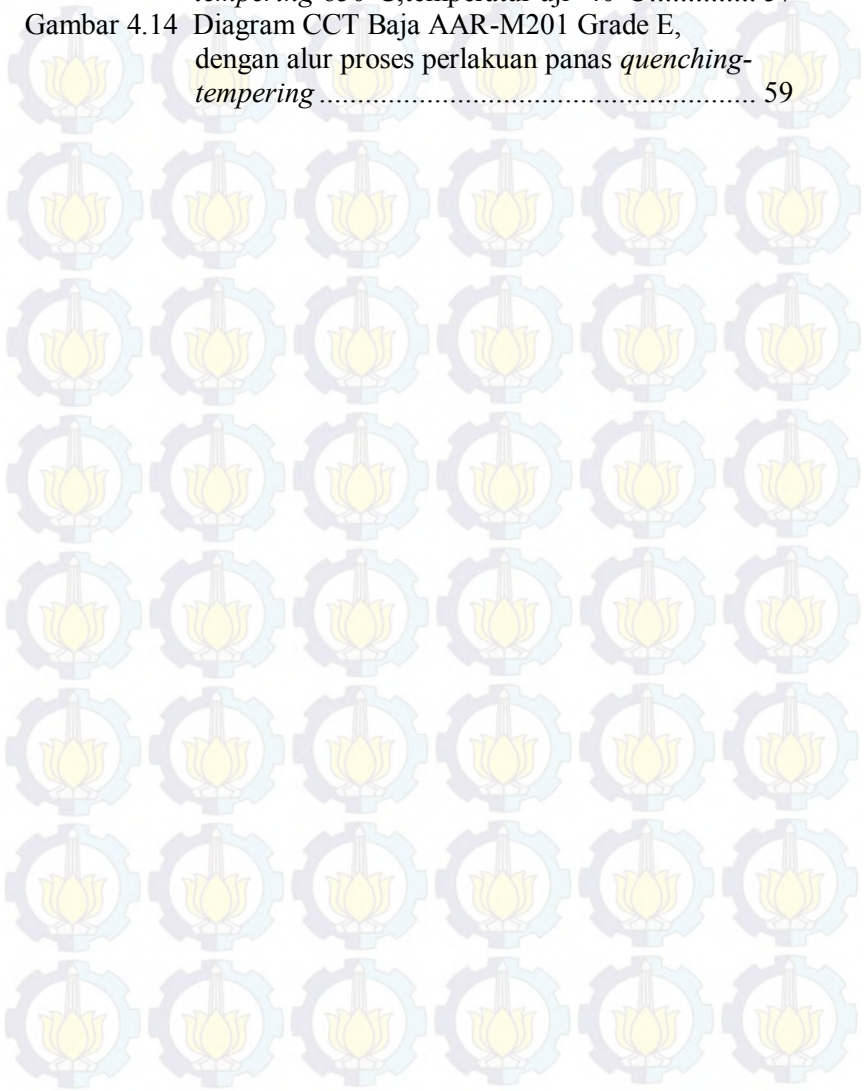
Gambar 4.12 Mikrografi mikroskop stereo pada permukaan impak *charpy* baja AAR-M201 Grade E *hardening* dan *tempering*, pada temperatur *tempering* 625°C, temperatur uji -40°C ..... 55

Gambar 4.12 Mikrografi mikroskop stereo pada permukaan impak *charpy* baja AAR-M201 Grade E *hardening* dan *tempering*, pada temperatur *tempering* 650°C, temperatur uji -40°C ..... 56

Gambar 4.13 Mikrografi mikroskop stereo pada permukaan impak *charpy* baja AAR-M201 Grade E

*hardening dan tempering*, pada temperatur  
*tempering* 650°C, temperatur uji -40°C..... 57

Gambar 4.14 Diagram CCT Baja AAR-M201 Grade E,  
dengan alur proses perlakuan panas *quenching-*  
*tempering* ..... 59





## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Baja paduan banyak digunakan pada konstruksi komponen-komponen kereta api. Baja yang umum digunakan adalah baja paduan mangan (*manganese steel*) dengan seri penamaan baja AAR-M201. Baja ini memiliki grade A,B,C,D, dan E sesuai spesifikasi komposisi kimia dan sifat mekanik yang telah ditentukan oleh *AAR Manual of Standards and Recommended Practices Couplers and Freight Car Draft Components*.

Sifat mekanik merupakan sifat yang menyatakan kemampuan baja ketika menerima beban mekanik seperti gaya, momen, dan energi mekanik. Beban mekanik dapat menimbulkan deformasi/perubahan bentuk sementara, permanen, bahkan sampai patah. Maka dari itu, sifat mekanik menggambarkan hubungan respon deformasi terhadap beban yang bekerja. Komponen kereta api pada aplikasinya menerima gaya atau beban mekanik, maka dari itu perlu diketahui karakteristik pembebanan yang menghasilkan deformasi berlebihan bahkan sampai patah, kemudian bisa ditentukan sifat mekanik yang sesuai agar tidak terjadi kegagalan pada material. Sifat mekanik pada suatu baja dipengaruhi oleh struktur mikro. Struktur mikro pada suatu baja paduan tergantung pada beberapa variabel seperti unsur paduan, konsentrasi unsur paduan, dan proses perlakuan panas (temperatur pemanasan, waktu tahan pemanasan, dan laju pendinginan).

Proses perlakuan panas merupakan suatu kombinasi pemanasan dan pendinginan dengan waktu tertentu yang dilakukan pada baja untuk memperoleh struktur mikro dan sifat tertentu. Selama proses perlakuan panas terjadi perubahan struktur mikro sehingga menyebabkan terjadinya perubahan sifat baja tersebut. Baja AAR-M201 pada umumnya dilakukan proses perlakuan panas setelah proses pengecoran (*as cast*), hal ini

---





mengacu pada standar spesifikasi yang telah ditentukan. Beberapa perlakuan panas yang dilakukan adalah *annealing*, *normalizing*, *quenching* dan *tempering*. Perlakuan panas tersebut bertujuan untuk menghasilkan sifat mekanik yang sesuai dengan spesifikasi *AAR Manual of Standards and Recommended Practices Couplers and Freight Car Draft Components*.

Pada penelitian ini menggunakan baja AAR-M201 Grade E dengan perlakuan panas yang digunakan adalah *quenching* dan *tempering*. Proses perlakuan panas pada baja AAR-M201 Grade E, seringkali menghasilkan sifat mekanik yang tidak sesuai dengan standar. Hal ini disebabkan karena parameter perlakuan panas yang digunakan tidak sesuai. Pada penelitian ini akan membahas mengenai pengaruh temperatur *tempering* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E. Latar belakang pemilihan parameter temperatur *tempering*, mengacu pada data referensi perlakuan panas *quenching* dan *tempering* yang telah dilakukan PT.X yang menghasilkan sifat mekanik kurang sesuai. Berdasarkan data tersebut, dilakukan penelitian dengan variasi temperatur *tempering* untuk memperoleh sifat mekanik yang sesuai standar *AAR Manual of Standards and Recommended Practices Couplers and Freight Car Draft Components*. Pada penelitian juga akan dianalisa mengenai pengaruh temperatur *tempering* yang diberikan terhadap struktur mikro dan sifat mekanik.

## 1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan diteliti 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

Batasan masalah dan asumsi yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut,

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

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut,

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

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini diharapkan 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*.



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Baja Paduan

Baja pada dasarnya adalah paduan besi-karbon, dengan kadar karbon kurang dari 2%. Selain terdiri dari karbon, baja juga terdiri dari unsur lain, sebagian berasal dari pengotor pada bijih besi ( belerang dan fosfor), yang biasanya kadarnya ditekan serendah mungkin, sebagian lagi dari unsur yang digunakan pada proses pembuatan besi/baja (silikon dan mangan). Berdasarkan komposisi kimianya baja dapat dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu baja karbon (*plain carbon steel*) dan baja paduan. Baja karbon, selain terdiri dari besi dan karbon juga terdiri dari mangan kurang dari 0,8%, silikon kurang dari 0,5%, dan unsur lain yang sangat sedikit. Baja paduan adalah baja karbon yang ditambahkan unsur-unsur tertentu dengan tujuan modifikasi sifat mekanik yang diinginkan. (Avner,1974).

Baja paduan terdiri dari dua jenis yaitu baja paduan rendah dan baja paduan tinggi. Baja paduan rendah (*Low alloy steel*) adalah baja paduan dengan kadar unsur kurang dari 10%, mempunyai kekuatan dan ketangguhan lebih tinggi daripada baja karbon dengan kadar yang sama, selain itu mempunyai keuletan lebih tinggi daripada baja karbon dengan kekuatan yang sama, *hardenability* dan sifat tahan korosi lebih baik. Baja paduan tinggi (*High alloy steel*) adalah baja paduan dengan kadar unsur lebih dari 10%, pada umumnya mempunyai sifat khusus tertentu seperti baja tahan karat, baja perkakas, baja tahan panas, dan lain-lain (Avner, 1974)

#### 2.2 Pengaruh Unsur Paduan

Baja karbon memiliki kelebihan seperti kemudahan pada perlakuan panas dan harga murah, tetapi juga memiliki keterbatasan, seperti *hardenability* rendah, ketahanan oksidasi dan korosi rendah, kekuatan rendah pada temperatur tinggi. Di

---





lain sisi, baja paduan digunakan karena memiliki sifat-sifat yang tidak bisa diperoleh dari baja karbon. Maka dari itu, sangat penting untuk menentukan unsur paduan dan komposisi unsur yang sesuai untuk memperoleh sifat-sifat yang diinginkan. Unsur-unsur paduan ditambahkan pada baja untuk beberapa tujuan, seperti berikut:

1. Meningkatkan *hardenability*.
2. Meningkatkan ketahanan pada korosi dan oksidasi.
3. Meningkatkan sifat pada temperatur tinggi.
4. Meningkatkan ketahanan pada abrasi.

Unsur-unsur paduan yang ditambahkan pada baja karbon secara umum dapat mempengaruhi beberapa hal berikut, seperti :

1. Unsur paduan dapat membentuk larutan padat atau senyawa intermetalik.
2. Unsur paduan dapat mengubah temperatur transformasi fasa terjadi.
3. Unsur paduan dapat mengubah kelarutan karbon dalam austenit dan ferit
4. Unsur paduan dapat mengubah laju reaksi transformasi austenit menjadi produk dekomposisi dan laju pelarutan sementit menjadi austenit selama pemanasan.
5. Adanya unsur paduan dapat mengurangi penghalusan pada *tempering*.

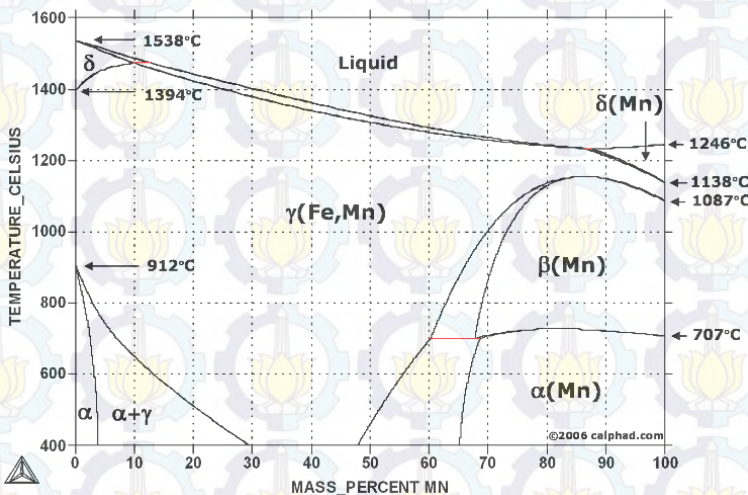
### 2.3 Baja Mangan

Mangan merupakan salah satu unsur yang selalu ada pada baja sebagai deoksidiser. Mangan mengurangi kecenderungan terjadinya *hot shortness* yang ditimbulkan oleh belerang (S). Mangan mencegah terjadinya FeS yang membentuk eutektik dengan besi yang menghasilkan baja mengalami *hot shortness* (kegetasan baja pada rentang *hot forming*). Mangan dan belerang berikatan membentuk MnS, yang memiliki titik lebur tinggi,



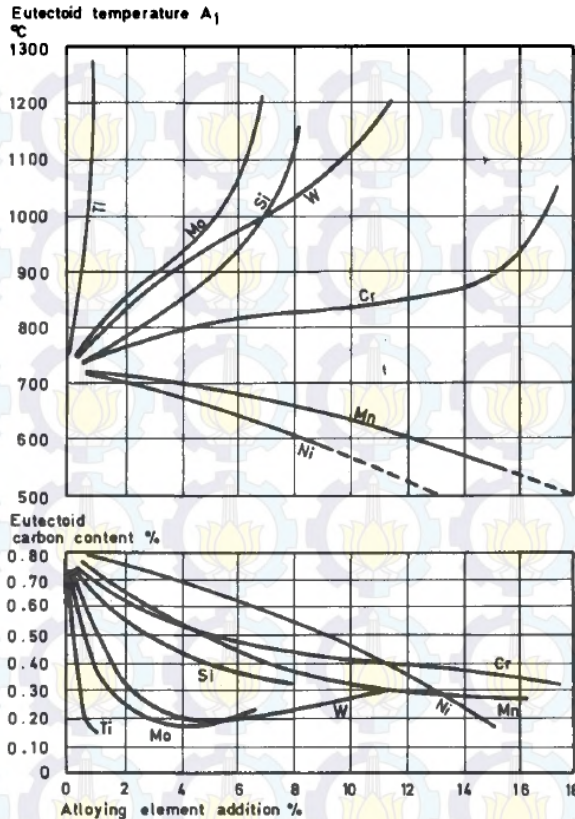
kemungkinan terjadi retak pada pengerjaan ditemperatur tinggi dapat dicegah.

Baja dikatakan baja paduan mangan bila mengandung Mn lebih dari 0,8%. Unsur mangan bila dipadukan dengan unsur Fe menghasilkan diagram fasa seperti pada Gambar 2.1. Bila dilihat dari diagram fase Fe-Mn, pada kandungan Mn lebih dari 0,8% cenderung larut pada Fe dengan membentuk larutan pada (*solid solution*) berupa  $\alpha$  atau  $\gamma$  atau kombinasi keduanya.



Gambar 2.1 Diagram fase Fe-Mn

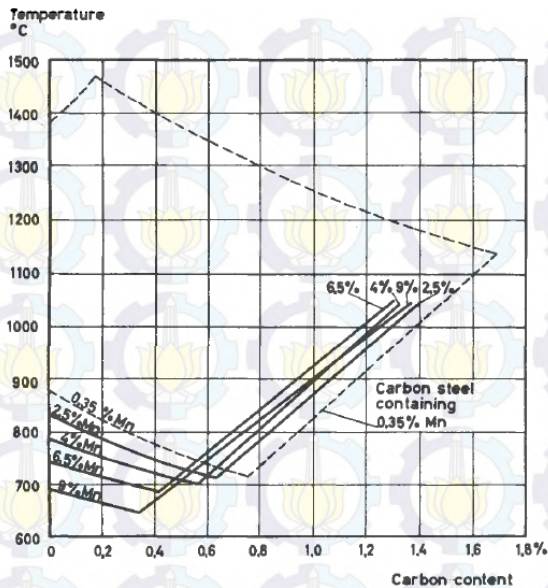
Mangan menaikkan kekuatan dan kekerasan, dan ini lebih efektif pada kadar karbon yang lebih tinggi. Mangan merupakan penstabil austenit sehingga unsur paduan ini akan membuat austenit lebih stabil pada temperatur yang lebih rendah. Adanya unsur Mn menurunkan temperatur kritis dan mengurangi kadar karbon pada eutektoid, seperti pada Gambar 2.2



**Gambar 2.2** Pengaruh penambahan unsur paduan pada temperatur eutektoid dan kandungan karbon eutektoid (Thelning, 1984)

Pengaruh unsur seperti mangan, pada temperatur transformasi dan komposisi eutektoid seperti pada Gambar 2.3. Pada kasus ini, posisi normal temperatur kritis dinyatakan garis putus-putus. Temperatur kritis semakin rendah dan eutektoid terjadi dengan komposisi karbon yang lebih rendah dari komposisi karbon normal. Temperatur kritis akan turun lebih jauh ketika jumlah unsur paduan Mn meningkat.





**Gambar 2.3** Pengaruh Mn dan C pada daerah austenit  
(Thelning, 1984)

Pengaruh unsur mangan tidak hanya mengubah temperatur transformasi austenit menjadi perlit pada kondisi setimbang tetapi juga temperatur pada transformasi struktur yang lain. Pengaruh sebagian besar unsur paduan adalah pada laju pendinginan kritis yang lebih rendah daripada laju pendinginan pada baja karbon. Hal ini karena diagram transformasi isothermal bergeser kekanan, sehingga membutuhkan waktu yang lebih banyak untuk memulai dan mengakhiri transformasi austenit. (Clark, 1962)





---

#### 2.4 Baja AAR M201 Grade E

Baja AAR-M201 Grade E merupakan baja paduan yang komponen mobil dan kereta api. Baja ini menggunakan penamaan AAR (*American Association Railroad*) grade E menunjukkan produk coran harus diberi perlakuan panas *quenching* dan *tempering*.

Baja ini diproses menggunakan beberapa proses seperti *open hearth*, *electric furnace*, *crucible*, *converter*, atau *basic oxygen*. Produk coran harus dibersihkan sebelum dilakukan proses perlakuan panas. Prosedur perlakuan panas *quenching* dan *tempering* yang perlu diperhatikan sebagai berikut,

1. Setelah penuangan, baja hasil coran dibiarkan mendingin sampai temperatur dibawah  $538^{\circ}\text{C}$ , sampai dilakukan perlakuan panas pada laju yang tidak berbahaya bagi baja cor.
2. Panaskan sampai temperatur yang seragam di atas rentang temperatur transformasi dan tahan selama waktu tertentu untuk mencapai austenitisasi dan menghaluskan struktur butir.
3. Benda coran dikeluarkan dari *furnace* dan sementara benda cor berada diatas rentang temperatur transformasi, lakukan pendinginan cepat dengan *liquid* sampai temperatur dibawah rentang transformasi.
4. Temper dengan memanaskan kembali sampai temperatur dibawah rentang transformasi, tetapi tidak boleh kurang dari  $430^{\circ}\text{C}$ . Tahan selama waktu yang diperlukan, keluarkan dari *furnace*, dan dibiarkan dingin pada laju tertentu.

Komposisi kimia pada benda kerja yang terbuat dari baja AAR-M201 Grade E harus memiliki komposisi kimia seperti pada Tabel 2.1 dan sifat mekanik seperti pada Tabel 2.2.



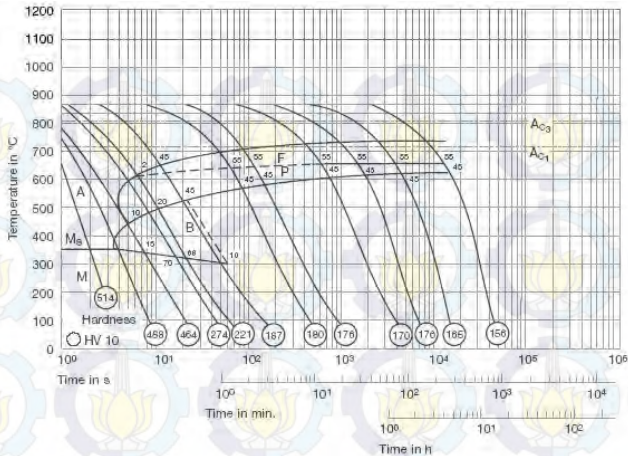
**Tabel 2.1** Komposisi Kimia Baja AAR-M201 Grade E

	Berat (%)
Karbon	0,32
Mangan	1,85
Fosfor	0,04
Sulfur	0,04
Silikon	1,50

**Tabel 2.2** Sifat Mekanik pada Baja AAR-M201 Grade E

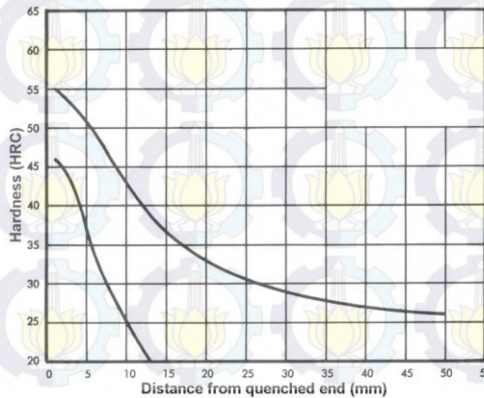
Sifat mekanik	Nilai
Kekuatan tarik, ksi	120
Kekuatan luluh, ksi	100
Elongasi pada 2", %	14
Reduksi area, %	30

Diagram transformasi ( Diagram CCT) yang digunakan sebagai acuan pada rekayasa proses perlakuan baja AAR-M201 Grade E seperti pada Gambar 2.4 dan kurva *hardenability* seperti pada Gambar 2.5. Pada Gambar 2.4, digunakan untuk mengetahui laju pendinginan yang diperlukan untuk menghasilkan suatu struktur mikro dan sifat mekanik (kekerasan) tertentu. Pada Gambar 2.5 menunjukkan kekerasan baja AAR-M201 Grade E pada jarak dari ujung *quench* Jominy.



**Gambar 2.4** Diagram CCT baja AAR-M201 Grade E

Pada Gambar 2.4, ditunjukkan kurva CCT baja AAR-M201 Grade E, serta beberapa kurva pendinginan, kekerasan setelah didinginkan dan struktur mikro yang terbentuk. Berdasarkan Gambar tersebut, proses *hardening* yang menghasilkan full martensit, apabila kecepatan pendinginan minimum/kritis sekitar  $78\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  dan menghasilkan kekerasan setelah hardening sekitar 488 HV.



**Gambar 2.5** Kurva *Hardenability* baja AAR-M201 Grade E



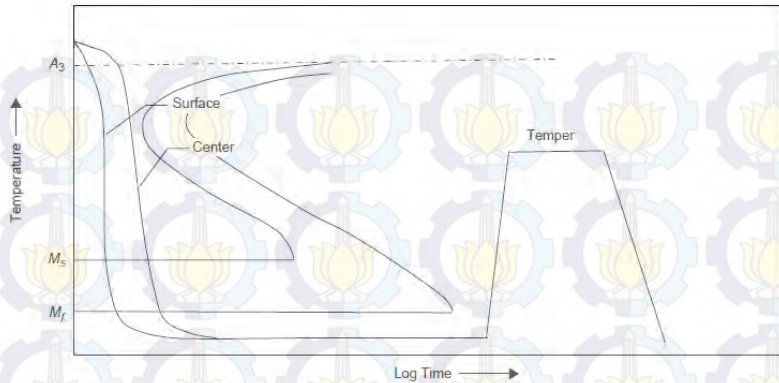


Pada Gambar 2.5, ditunjukkan kurva pita *hardenability* pada baja AAR-M201 Grade E. Dari pita *hardenability* dapat diketahui batas maksimum/minimum kekerasan baja pada jarak Jominy tertentu, atau batas-batas jarak Jominy yang menghasilkan kekerasan tertentu. Kurva *hardenability* atas menggambarkan *hardenability* baja dengan komposisi pada batas maksimum, kurva yang dibawah menggambarkan *hardenability* dengan batas minimum komposisi kimia.

Pada diagram transformasi, pada Gambar 2.4 dapat diramalkan perubahan struktur yang akan terjadi disuatu titik pada benda kerja yang mengalami laju pendinginan tertentu (ekuivalen dengan suatu titik tertentu pada spesimen Jominy), sedangkan dengan kurva *hardenability* dapat diramalkan kekerasannya.

## 2.5 Pengerasan (*Hardening*)

Baja dikeraskan dengan austenitisasi, pendinginan cepat (*quenching*), dan kemudian *tempering* untuk mencapai kekerasan akhir. Baja memiliki komposisi yang berbeda-beda maka dari itu penting untuk memahami ketebalan maksimum yang dapat dikeraskan pada suatu media pendingin yang spesifik, misalnya air atau minyak, dan memperkirakan variasi kekuatan akhir dan keuletan yang dapat diperoleh pada temperatur *tempering* yang berbeda-beda. Prosedur untuk *quenching* dan *tempering* seperti pada Gambar 2.6. *Tempering* tidak digunakan untuk mengeraskan baja. Baja dikeraskan dengan austenitisasi dan *quenching*. *Tempering* dilakukan untuk mengembalikan keuletan yang hilang saat dikeraskan dan biasanya penghalusan (*softening*) diperoleh dengan *tempering*.

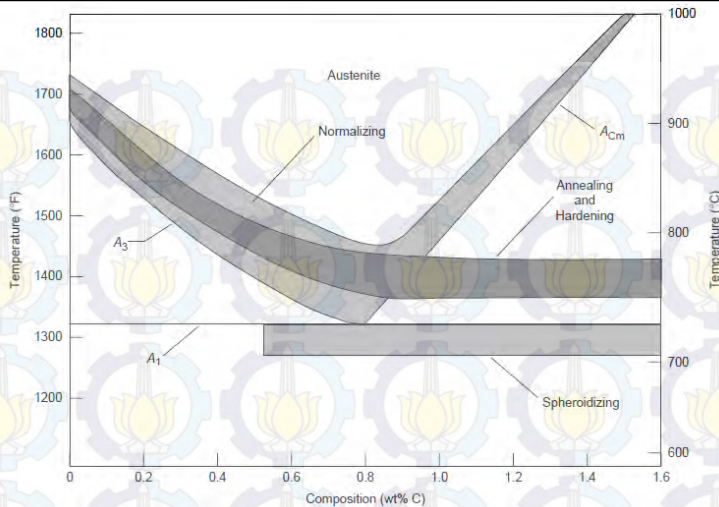


**Gambar 2.6** Perlakuan panas *Hardening-tempering* pada baja (Campbell,2008)

Kandungan karbon sangat penting terhadap kemampuan suatu baja untuk dikeraskan. Keuletan berkurang dengan meningkatnya kandungan karbon, kandungan karbon pada umumnya dijaga sekitar 0,45% pada baja teknik. Penambahan unsur paduan akan menggeser hidung diagram TTT ke kanan, sehingga mempermudah benda kerja yang tebal untuk dikeraskan. Unsur paduan tidak meningkatkan kekerasan martensit secara signifikan, tetapi *hardenability*, kedalaman dari permukaan struktur mikro martensit dapat dihasilkan pada baja (Campbell, 2008).

### 2.5.1 Austenitisasi

Pada proses austenitisasi, baja dipanaskan sampai daerah austenit ( $\gamma$ ) dan ditahan selama beberapa waktu tertentu untuk melarutkan karbida sampai menjadi larutan padat austenit. Temperatur yang dibutuhkan untuk melakukan austenitisasi pada kadar karbon tertentu seperti pada Gambar 2.7



**Gambar 2.7** Rentang temperatur austenitisasi pada perlakuan panas (Campbell, 2008)

Peningkatan kadar karbon, temperatur berkurang sepanjang garis A<sub>3</sub> sampai mencapai minimum pada A<sub>1</sub>, komposisi eutektoid (0,8%), dan kemudian meningkat sepanjang garis A<sub>cm</sub>. Tahap pertama pada pembentukan austenit adalah nukleasi dan pertumbuhan austenit dari perlit (ferit+Fe<sub>3</sub>C). Pembentukan austenit yang homogen dapat dipercepat dengan meningkatkan temperatur dan meningkatkan kehalusan partikel karbida mula-mula. Meskipun begitu, temperatur austenitisasi perlu dijaga serendah mungkin untuk mengurangi retak dan distorsi, mengurangi oksidasi dan dekarburisasi, dan mengurangi pertumbuhan butir (Campbell,2008).

Temperatur yang dibutuhkan untuk mencapai 100% austenit pada baja hipereutektoid cukup tinggi, meskipun begitu austenit untuk pengerasan pada baja dapat diperoleh pada temperatur sekitar 770°C. Karbida yang tidak terlarut dalam jumlah kecil memiliki pengaruh yang kecil pada sifat mekanik akhir baja.





---

### 2.5.2 *Quenching*

Proses perlakuan panas *hardening* dilakukan dengan memanaskan baja hingga mencapai temperatur austenitisasi, ditahan beberapa waktu tertentu pada temperatur tersebut, lalu didinginkan dengan cepat (*quenching*), sehingga diperoleh martensit. Pada suatu benda kerja yang dikeraskan maka kekerasan yang terjadi akan tergantung pada seberapa banyak martensit yang terbentuk dan kekerasan martensit itu sendiri. Banyaknya martensit yang akan terjadi tergantung pada seberapa banyak austenit yang terjadi pada saat pemanasan dan seberapa cepat pendinginannya sedangkan kekerasan martensit tergantung pada kadar karbon dalam baja yang terlarut dalam austenit.

Pada saat baja didinginkan secara cepat dari temperatur austenitisasi (*quench*), karbon tidak memiliki waktu untuk berdifusi dari struktur mikro austenit ketika struktur ini bertransformasi menjadi BCT (*Body Centered Tetragonal*), struktur ini disebut martensit. Proses *quenching* merupakan proses mendinginkan pada laju pendinginan tertentu untuk membentuk martensit. Distorsi struktur BCT menghasilkan kekuatan dan kekerasan yang tinggi pada baja yang di-*quench*. Beberapa baja di-*quench* dengan air atau oli untuk menghasilkan laju pendinginan yang cukup. Pendinginan dengan air menghasilkan laju pendinginan tercepat juga menghasilkan tegangan sisa yang paling tinggi sehingga dapat menghasilkan distorsi dan retak.

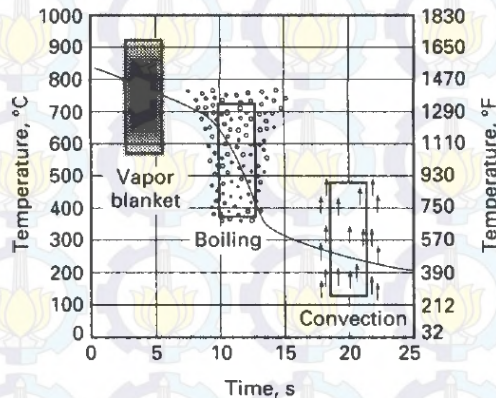
Terdapat tiga tahapan hilangnya panas selama *quenching* pada media liquid, seperti pada Gambar 2.8, yaitu *vapor blanket*, *nucleate boiling*, dan *liquid cooling*. Tahap *vapor blanket* memiliki karakteristik dengan uap air menyelimuti benda kerja. Hal ini terjadi karena suplai panas dari bagian dalam benda kerja yang menuju permukaan melebihi jumlah panas yang dibutuhkan untuk menguapkan *quenchant* dan menghasilkan fasa uap air. Laju pendinginan tertinggi terjadi pada tahap *nucleate boiling*. Selama periode ini uap air terlepas dan laju ekstraksi panas yang dihasilkan berhubungan dengan pendidihan inti (*nucleate boiling*)

---





dari *quenchant* pada logam. Panas secara cepat dilepas dari permukaan akibat kontak cairan pendingin pada logam dan kemudian menguap. Tahap *liquid cooling* dimulai ketika temperatur permukaan logam berkurang sampai dibawah titik didih cairan *quenching*. Dibawah temperatur ini, pendinginan terjadi dengan mekanisme konduksi dan konveksi pada *quenchant*.



**Gambar 2.8** Tiga tahapan pada *quenching*  
(ASM Metal Handbook, Vol4, Heat Treatment)

## 2.6 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, 1962). Struktur martensit dihasilkan dari proses *quenching*, maka dari itu ada tegangan internal besar, diperoleh dari transformasi martensit, sehingga keuletan berkurang. *Tempering* dapat meningkatkan keuletan dan ketangguhan, yang sangat penting untuk meningkatkan penyerapan energi impact dan



---

struktur martensit temper menghasilkan kekuatan dinamik yang baik pada baja (LI Hong-ying, 2013)

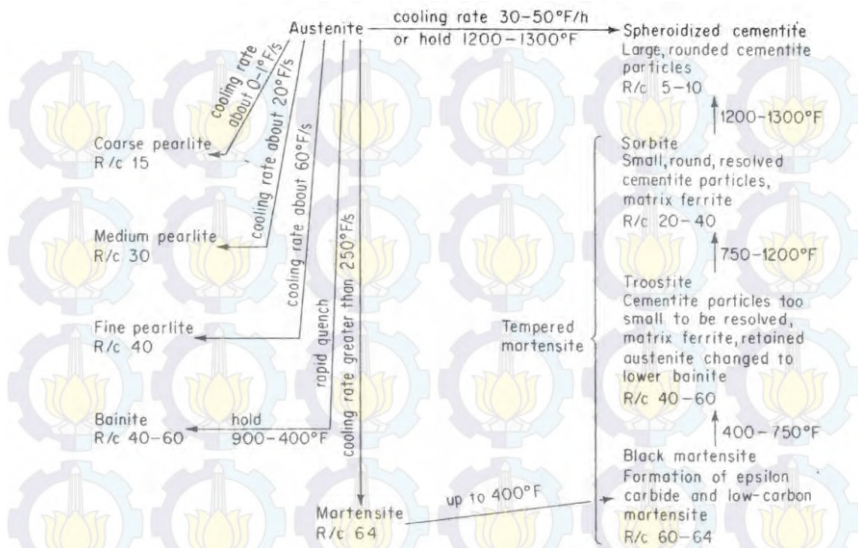
Martensit merupakan suatu struktur yang metastabil, bila dipanaskan kembali secara bertahap karbon yang terperangkap dalam struktur BCT dari martensit tersebut akan keluar menjadi karbida sehingga BCT akan menjadi BCC, ferrit. Proses pemanasan kembali dan pendinginan lambat yang mengikutinya dinamakan *tempering*.

*Tempering* dilakukan dengan memanaskan suatu baja yang memiliki struktur mikro martensit sampai temperatur dibawah eutektoid dalam waktu tertentu. Pada umumnya *tempering* dilakukan pada temperatur antara 250 dan 650°C, meskipun tegangan internal dapat lepas pada temperatur sekitar 200°C. Perlakuan panas melalui mekanisme difusi, pembentukan martensit temper seperti reaksi dibawah ini,

martensit (BCT, fasa tunggal)  $\rightarrow$  martensit temper ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ )

pada reaksi diatas fasa tunggal martensit BCT, yang jenuh dengan karbon, bertransformasi menjadi martensit temper, terdiri dari ferit stabil dan fasa sementit (Callister, 2008)

Perubahan struktur yang terjadi setelah proses *tempering* pada pemanasan temperatur tertentu, secara skematik digambarkan pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Skema produk transformasi austenit pada pendinginan dan transformasi martensit pada pemanasan (*Tempering*) (Avner, 1974)

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,  $Fe_3C$ , dan 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





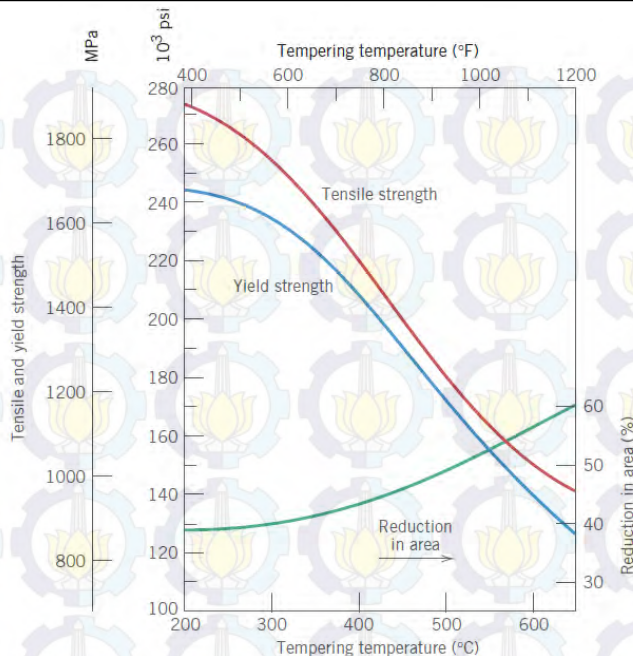
---

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). Pengaruh temperatur penemperan terhadap sifat mekanik seperti pada Gambar 2.10.





**Gambar 2.10** Hubungan temperatur *tempering* pada kekuatan luluh dan tarik dan keuletan (%RA) (pada temperatur kamar) untuk paduan baja 4340 *oil quench* ( Callister, 2008)

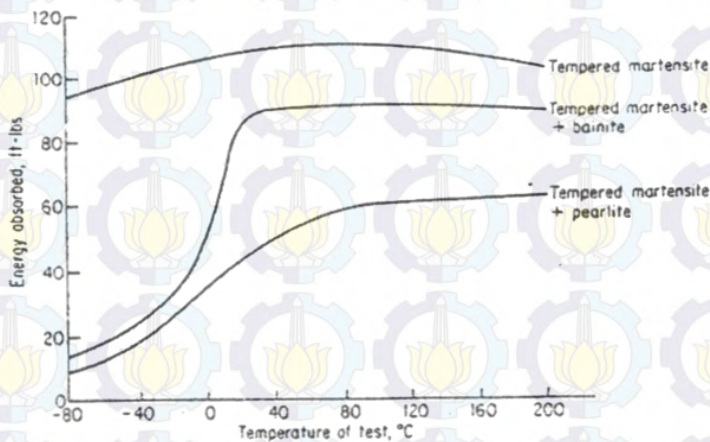
Pada proses temper, kekerasan setelah temper tidak hanya tergantung pada temperatur temper tetapi juga pada waktu tahan pada temperatur tersebut. Hubungan antara temperatur dan waktu tahan dinyatakan sebagai *Hollomon-Jaffe parameter* (HJP). Parameter ini pada umumnya digunakan pada analisa parameter *tempering* martensit dan analisis evolusi sifat mekanik selama *tempering*. Persamaan *Hollomon-Jaffe* seperti persamaan (1) dibawah ini.

$$HJP = T(\log(t) + C) \quad (1)$$



Dimana  $T$  adalah temperatur *tempering* dalam Kelvin,  $t$  adalah waktu dalam jam, dan  $C$  adalah konstanta material, pada baja  $C$  bernilai 20 (Kamp, 2012).

Pada penemperan diharapkan baja menjadi lebih tangguh disamping memiliki kekuatan/kekerasan yang cukup. Baja dengan kekerasan yang cukup tinggi dapat diperoleh dengan membentuk struktur mikro yang seluruhnya martensit, campuran martensit dan bainit atau campuran martensit dan perlit. Untuk membandingkan ketangguhan baja yang satu dengan yang lain maka perbandingan dilakukan pada tingkat kekuatan/kekerasan yang sama dan ketangguhan diuji pada temperatur yang sama, salah satu hasil pengujian seperti pada Gambar 2.11.

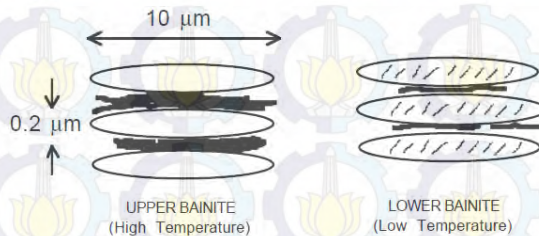


**Gambar 2.11** Perbandingan kekuatan impak pada berbagai temperatur pengujian dari baja dengan tiga macam struktur temper yang menghasilkan kekuatan sama, 125.000 psi (Avner, 1974)

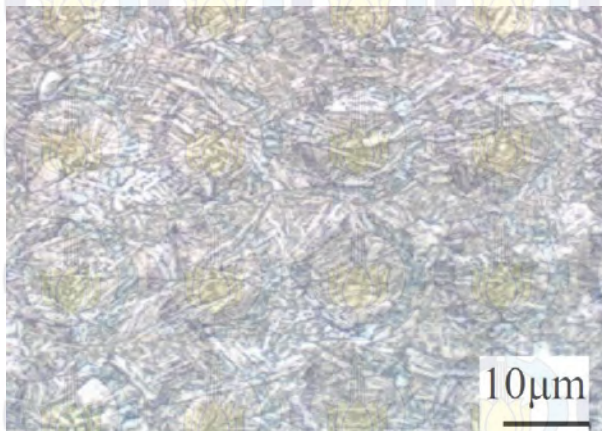


## 2.7 Tempering pada Bainit

Bainit merupakan agregat non-lamellar yang terdiri dari karbida dan ferit yang berbentuk plat. Bainit terdiri dari kluster kluster platelet-platelet ferit yang terhubung satu sama lain dan memiliki orientasi kristalografi yang identik. Partikel sementit yang memanjang berada dibutir platelet ini, jumlah dan kontinuitas layer sementit dipengaruhi oleh kadar karbon baja (Bhadeshia,2001). Skematik struktur mikro bainit seperti pada Gambar 2.12 dan struktur mikro bainit seperti pada Gambar 2.X.



**Gambar 2.12** Ilustrasi skematik struktur mikro bainit atas dan bawah (Bhadeshia, 2001)



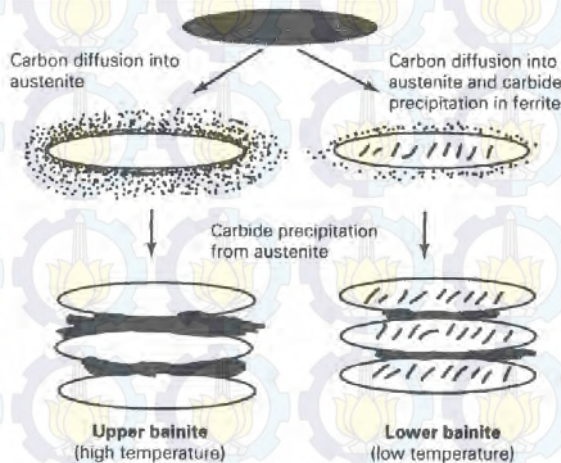
**Gambar 2.13** Struktur mikro bainit pada baja bainit karbon rendah (0,05%C, 1,65%Mn, 0,35%Si, 0,013%P, 0,06%Nb, 0,03%Ti). (Li,2012)





Pada Gambar 2.13, struktur mikro terdiri dari bilah bainit dan butir austenit, banyak struktur yang tidak beraturan dan bilah bainit terdistribusi secara merata. Berdasarkan struktur mikro ini, kekuatan baja relatif tinggi, tetapi plastisitas dan ketangguhan relatif kurang (Li,2012)

Pada proses transformasi bainit diawali dari austenit mengalami *driving force* yang besar untuk berubah dari FCC menjadi BCC, *driving force* ini mengakibatkan atom-atom akan tergeser sehingga menjadi BCC, terbentuk ferit. Karbon yang tidak mampu dilarutkan ferit akan berdifusi keluar membentuk kabadia. Austenit yang bertransformasi menjadi ferit dan karbonnya berdifusi keluar sehingga diperoleh struktur berupa bilah-bilah ferit yang didalamnya terdapat platelet dengan arah hampir sejajar dengan sumbu pertumbuhannya (Thelning, 1984). Skematik transformasi bainit seperti pada Gambar 2.14.



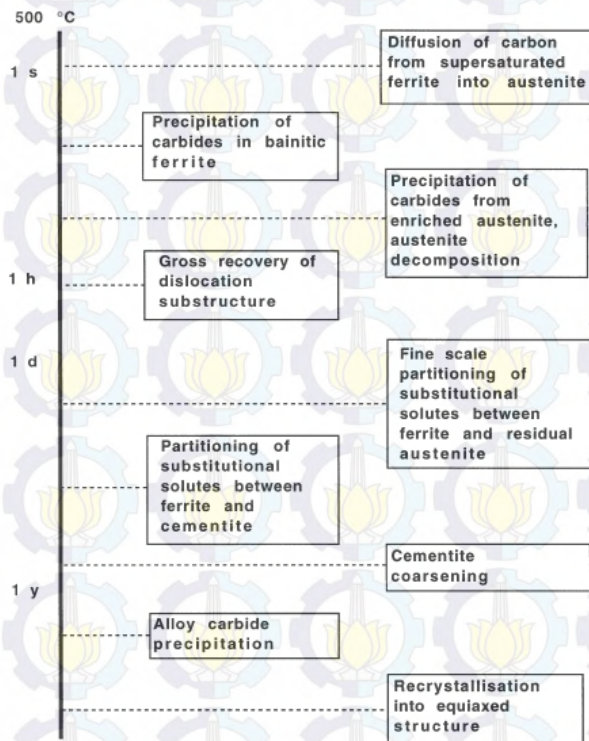
**Gambar 2.14** Skematik transformasi pada bainit (Bhadeshia, 2006)

Fenomena *tempering* pada bainit memiliki perilaku yang sedikit berbeda dengan perilaku *tempering* pada martensit, hal ini





karena adanya pembentukan autotemper selama transformasi. Bainit terbentuk pada temperatur yang lebih tinggi ( $B_s > M_s$ ,  $M_s$  merupakan temperatur martensit *start*) sehingga autotemper merupakan bagian yang tidak dapat dihindari selama transformasi. Redistribusi karbon dari ferit *supersaturated* menuju austenit sisa dan presipitasi karbida selama reaksi bainit terjadi secara cepat dan merupakan pengaruh autotemper (Bhadeshia, 2001). Beberapa fenomena yang terjadi selama proses *tempering* pada bainit seperti pada Gambar 2.15.



**Gambar 2.15** Skala waktu yang berhubungan dengan beberapa fenomena *tempering* pada bainit (Bhadeshia, 2001)

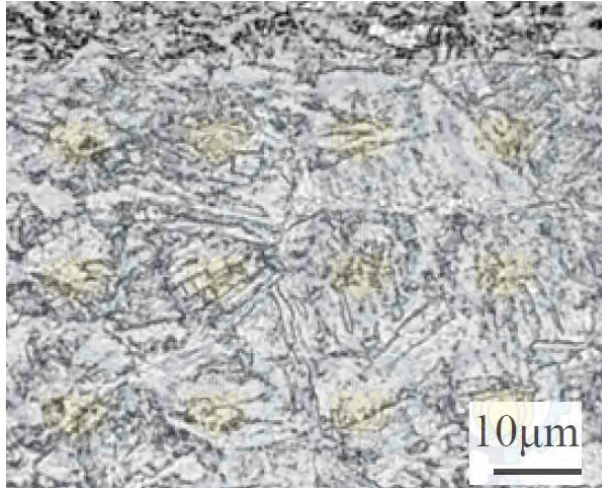


*Tempering* pada bainit tidak terlalu sensitif pada variasi kadar karbon yang sedikit. Kekuatan martensit turun secara drastis ketika karbon meninggalkan larutan padat. Pada bainit sebagian besar karbon menjadi karbida kasar yang berkontribusi kecil pada kekuatan. Baja bainit yang mengandung unsur pembentuk karbida yang kuat akan menghasilkan *secondary hardening* selama anil pada temperatur yang tinggi, sebagai penghalus dan paduan karbida yang lebih stabil selain sementit.

Bainit tumbuh pada temperatur yang tinggi sehingga struktur mikro akan *recovery* selama transformasi. Pada bainit karbon rendah yang dianil pada temperatur tinggi (700°C selama 1 jam), terdapat sedikit peningkatan pada *recovery* dan sedikit perubahan pada densitas partikel karbida.

Kekerasan dan kekuatan tarik pada struktur mikro *full* bainit, berkurang selama *tempering* dengan laju perubahan terbesar untuk bainit atas, yang memiliki nilai awal yang lebih tinggi. Baja kekuatan tinggi menunjukkan perubahan yang besar pada kekuatan selama *tempering*.

Struktur mikro bainit temper, seperti pada Gambar 2.16. Peningkatan temperatur *tempering* mengakibatkan *recovery* meningkat secara bertahap. Tahap-tahap yang terjadi adalah penggabungan dan pengaturan struktur kembali pada dislokasi, beberapa sudut batas butir yang kecil antar bilah tidak terlihat, dan bilah yang bergabung saling mendekat sehingga struktur lebih kasar.



**Gambar 2.16** Struktur mikro bainit temper pada baja bainit karbon rendah (0,05%C, 1,65%Mn, 0,35%Si, 0,013%P, 0,06%Nb, 0,03%Ti), saat dilakukan ditemper pada temperatur *tempering* 550°C.(Li, 2012)

## 2.8 Pola Patahan Impak *Charpy*

Patahan dapat diartikan sebagai terpisahnya satu benda menjadi dua atau beberapa bagian. Patahan dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti pembebanan statis seperti beban titik dan beban tekan, kelelahan material akibat pembebanan siklis dan juga akibat *creep* karena adanya beban dengan kondisi temperatur diatas  $0,4 T_m$  (temperatur lebur) (Callister, 2008). Jenis patah terdiri dari dua jenis yaitu patahan ulet dan patahan getas.

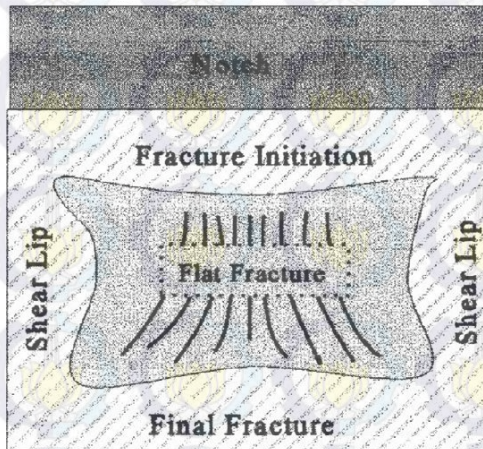
Pengukuran lain dari uji *charpy* yang biasa dilakukan adalah penelaahan permukaan patahan untuk menentukan jenis patahan yang terjadi, patahan berserat (patahan geser), granular (patahan belah), atau campuran dari keduanya. Bentuk-bentuk patahan ini dapat ditentukan dengan mudah, walaupun pengamatan tidak menggunakan perbesaran. Facet permukaan patahan belah yang datar memperlihatkan daya pemantul cahaya yang tinggi serta penampilan yang berkilat. Sementara permukaan





patahan ulet berserat yang berbentuk dimple menyerap cahaya serta penampilan yang buram. Biasanya dibuat suatu perkiraan berapa persen patahan permukaan yang terjadi berupa patahan belah/serat.

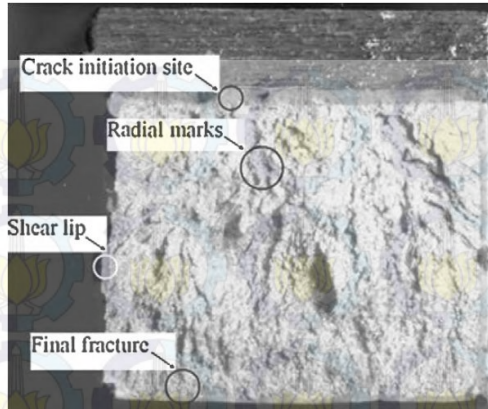
Berdasarkan ASTM E23 permukaan patahan *charpy* seperti pada Gambar 2.17. Terlihat bahwa daerah patahan terdiri dari empat daerah. Inisiasi retak (*crack initiation*) berada dibawah takik (*notch*), daerah tepi geser (*shear lip*) berada disekitar tepi spesimen, daerah patahan akhir (*final fracture*) pada arah berlawanan takik dan pada bagian tengah terdapat patahan datar (*flat fracture*) dengan penampakan *radial mark* yang menunjukkan inisiasi retak atau daerah akar retakan (*crack root*).



**Gambar 2.17** Skematik ilustrasi permukaan patahan *charpy* (ASTM E23)

Pada Gambar 2.18, ditunjukkan patahan impak *charpy* pada baja AISI 4340 yang telah memiliki struktur mikro bainit temper-34%ferit. Pada permukaan patah dapat diketahui *radial mark* yang menunjukkan awal mula retakan.





**Gambar 2.18** Mikrografi mikroskop stereo permukaan dampak *charpy* pada baja bainit-ferit temperatur uji 0°C. (Saeidi, 2010)

Karakteristik patahan pada pengujian dampak secara umum dibagi menjadi tiga, seperti pada Tabel 2.3.

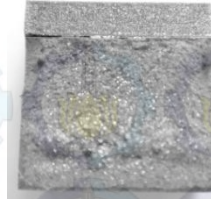
**Tabel 2.3** Karakteristik Pola Patahan pada Pengujian Dampak

No.	Patahan	Ciri-ciri	Penampakan Patahan
1	Getas	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Dihasilkan oleh mekanisme pembelahan (<i>cleavage</i>) pada butir-butir logam.</li><li>2. Ditandai permukaan patahan yang datar dan mampu memberikan daya pantul cahaya.</li></ol>	



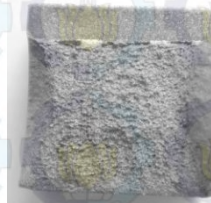
- 2 Campuran (Ulet dan Getas)

1. Kombinasi patahan ulet dan getas.



- 3 Ulet

1. Melibatkan pergeseran bidang-bidang kristal pada logam.  
2. Ditandai permukaan patahan yang berserat berbentuk dimple yang menyerap cahaya dan buram



## 2.9 Kajian Penelitian Sebelumnya

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

1. 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° dilanjutkan tempering pada temperatur 600°C



---

memiliki sifat mekanik yang persyaratan standar baja AAR-M201 Grade E.


2. Aksa Setia Mukti (2010) melakukan penelitian mengenai pengaruh proses perlakuan panas *normalizing* dan pemanasan kembali dengan *annealing* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR-M201 Grade C untuk aplikasi *coupler yoke rotary*. Pada penelitian tersebut disimpulkan pada pemanasan *normalizing* pada temperatur 910°C dilanjutkan pemanasan kembali 650°C dengan waktu tahan masing-masing 60 menit dan perlakuan *annealing* pada 910°C menghasilkan sifat mekanik yang memenuhi persyaratan selain itu struktur mikro yang diperoleh adalah ferit dan perlit.
  3. Darmawan Alan Atari R (2012) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur *annealing* terhadap perubahan sifat mekanik dan struktur mikro *Bolster* (AAR-M201 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.
  4. Arief Dwi Hermawan (2012) melakukan penelitian mengenai pengaruh temperatur *normalizing* pada sifat mekanik dan struktur mikro *Bolster* AAR-M201 Grade B, dengan variasi temperatur *normalizing* 860,895,930, dan 965°C, dari penelitan tersebut disimpulkan pada temperatur *normalizing* 860 sampai 930°C menghasilkan sifat mekanik yang memenuhi persyaratan dan struktur mikro yang dihasilkan adalah ferit dan perlit.
  5. 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 selam 3,5-
-





---

4 jam dan didinginkan diudara. kemudian dipanaskan sampai 870-880°C dan waktu tahan selama 3-3,5 jam, di-*quench* diair, dan diikuti tempering pada 510-550°C selama 3,5-4 jam. Pada analisa penyebab kegagalan, sifat mekanis *steel knuckle* tidak memenuhi standar baja AAR-M201, khususnya pada elongasi dan ketangguhan impak *Charpy*.

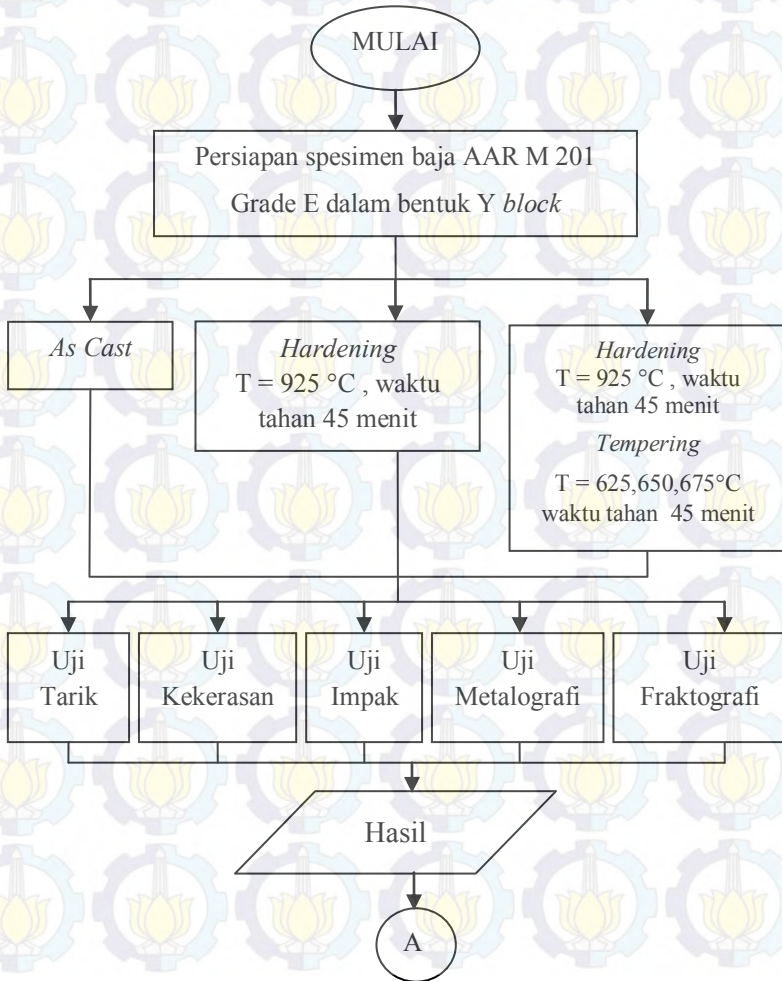


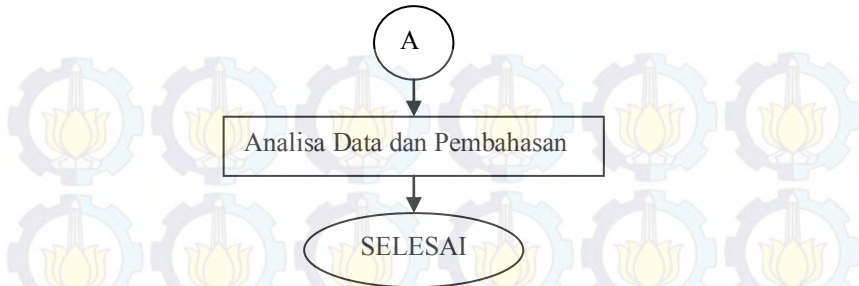




**BAB III**  
**METODOLOGI PENELITIAN**

**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	0,24
Si , maks 1,50	0,49
Mn, maks 1,85	1,6
P , maks 0,04	0,03
S , maks 0,04	0,007
Cr	0,12
Mo	0,18
Cu	0,045
Ni	0,28
Al	0,08
Fe	<i>Balance</i>
CE , maks 0,88	0,67



---

### 3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan penelitian yang digunakan sebagai berikut,

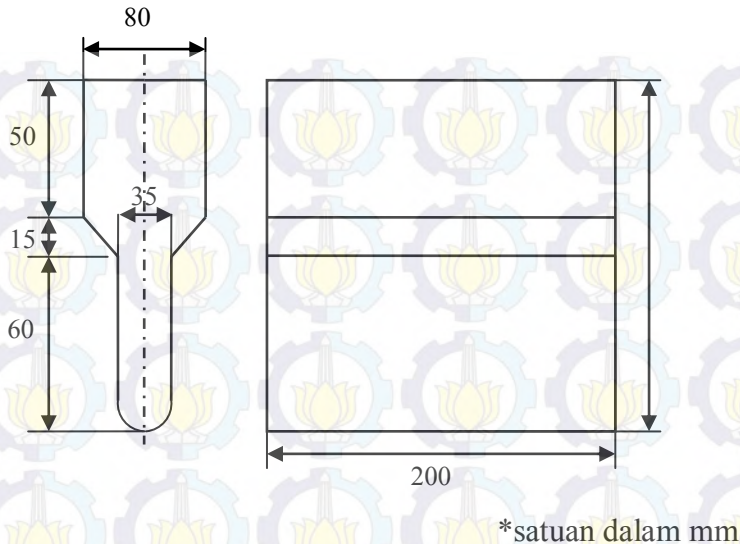
1. Dapur Pemanas  
Dapur pemanas yang digunakan adalah *dielectric heating furnace* dengan kapasitas 400V/60 Hz dan pemanasan maksimum 1280°C.
2. Mesin Uji Tarik  
Mesin uji tarik yang digunakan adalah *Universal Testing Machine* GOTECH seri GT-7001-4C50 dengan kapasitas maksimum 1 ton.
3. Mesin Uji Kekerasan  
Mesin uji kekerasan yang digunakan adalah *Universal Hardness Tester* HBRV seri 187.52 dengan kapasitas pembebanan maksimum 1000 kgf.
4. Mesin Uji Impak  
Mesin uji impak yang digunakan adalah mesin uji impak *Charpy Karl Frank/ 580 M*.
5. Mikroskop Optik  
Mikroskop optik yang digunakan adalah mikroskop optik *Olympus* seri GX71 dengan perbesaran maksimum 1000 X.
6. Mikroskop Stereo  
Mikroskop stereo yang digunakan adalah mikroskop stereo merk *Carl Zeiss Stemi DV 4*.
7. Peralatan lain-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 mengacu pada standar JIS 5101 untuk *steel casting* berupa *Y-block*. Gambar skematik spesimen seperti pada Gambar 3.2.

---



**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 45 menit kemudian didinginkan cepat dengan media air, lalu dilakukan pemanasan kembali (*tempering*) pada temperatur  $625\text{-}675^{\circ}\text{C}$ , ditahan selama 45 menit dan didinginkan di media udara. Langkah-langkah perlakuan panas pada spesimen sebagai berikut,

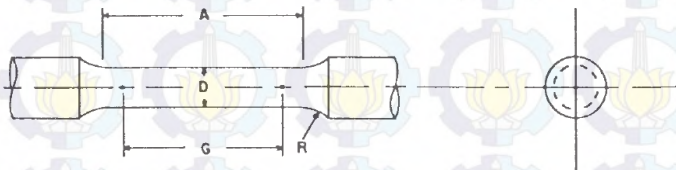
1. Menyiapkan empat buah *Y-block* baja AAR-M201 Grade E dengan kondisi belum mengalami perlakuan panas.
2. Memotong *Y-block* menjadi masing-masing 5 buah spesimen untuk uji tarik dan uji impak
3. Melakukan proses perlakuan panas pada setiap spesimen, sesuai prosedur.
4. Setelah proses perlakuan panas selesai, spesimen dikeluarkan untuk dilakukan pendinginan.





### 3.4.3 Pengujian Tarik

Pengujian tarik digunakan untuk mengetahui sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E awal dan 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 dan Tabel 3.2.



Gambar 3.3 Spesimen uji tarik

Tabel 3.2 Dimensi Spesimen Uji Tarik

Bagian	Ukuran (mm)
G – Gage length	$50,0 \pm 0,10$
D - Diameter	$12,5 \pm 0,25$
R – Radius of fillet	10
A – Lenth 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 4 buah spesimen untuk masing-masing perlakuan panas (variasi temperatur *tempering*).
2. Membersihkan seluruh spesimen dengan kertas gosok grid 250 untuk mengantisipasi adanya pengotor yang menempel pada permukaan spesimen.
3. Melakukan pengujian tarik pada masing-masing spesimen.



4. Menganalisa hasil kurva P- $\Delta$
5. Mengukur panjang akhir patahan, untuk menentukan elongasi.
6. Mengitung luas akhir penampang patahan, untuk menentukan reduksi area.

#### 3.4.4 Pengujian Kekerasan

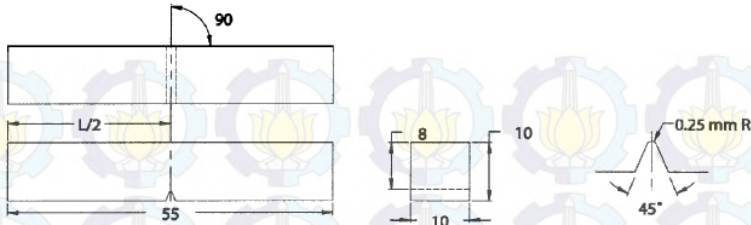
Pengujian kekerasan digunakan untuk menentukan kekerasan baja AAR-M201 Grade E awal dan setelah dilakukan proses perlakuan panas. Pengujian kekerasan yang digunakan menggunakan metode Brinell dengan menggunakan standar ASTM E10 *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*.

Spesifikasi pengujian yang digunakan sebagai berikut,

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

#### 3.4.5 Pengujian Impak

Pengujian impak digunakan untuk mengetahui berapa energi yang dibutuhkan untuk mematahkan benda kerja/spesimen. Pengujian impak yang dilakukan menggunakan metode Charpy sesuai standar ASTM E-23 *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. Mengacu pada standar baja AAR-M201 Grade E maka pengujian dilakukan pada temperatur  $-40^{\circ}\text{C}$ . Spesimen uji yang digunakan pada uji impak seperti pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Spesimen uji impact

Langkah-langkah pengujian uji impact sebagai berikut,

1. Membersihkan seluruh spesimen dengan kertas gosok untuk menghilangkan kotoran yang menempel pada permukaan spesimen.
2. Mengondisikan temperatur seluruh spesimen menjadi  $-40^{\circ}\text{C}$ .
3. Melakukan uji impact setiap spesimen untuk diketahui energi impact.
4. Mencatat energi impact yang digunakan untuk mematahkan spesimen.

### 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. Spesimen yang digunakan adalah spesimen untuk pengujian kekerasan.
2. Spesimen digosok dengan kertas gosok, mulai grid 200 sampai 1200.
3. Melakukan pemolesan dengan menggunakan alumina.
4. Mengambil spesimen kemudian melakukan etsa dengan pikral selama 2-10 detik, dengan komposisi larutan etsa seperti pada Tabel 3.3.



**Tabel 3.3** Komposisi Etsa Pikral

Nama etsa	Komposisi
Pikral	4 gram <i>picric acid</i> ( $(\text{NO}_2)_3\text{C}_6\text{H}_2\text{OH}$ ) 100 mL ethanol

5. Melakukan pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik dengan perbesaran 200-1000 X
6. Melakukan pengamatan struktur mikro yang terbentuk.

### 3.4.7 Pengamatan Fraktografi

Pengamatan fraktografi dilakukan untuk mengamati pola patahan hasil pengujian impak. Langkah-langkah pengamatan fraktografi dengan mikroskop stereo sebagai berikut,

1. Menyiapkan material dan mikroskop stereo yang akan digunakan.
2. Menghubungkan mikroskop stereo dengan PC untuk mengamati hasil pengamatan.
3. Mengatur fokus lensa, pembesaran pengamatan, dan pencahayaan.
4. Melakukan pengamatan fraktografi pada benda kerja.





---

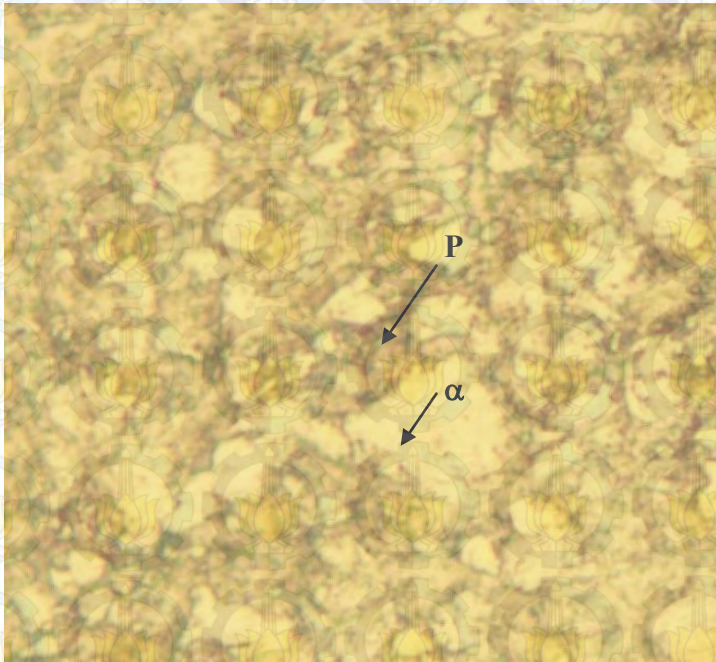
## BAB IV

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisa Data

##### 4.1.1 Pengamatan Struktur Mikro

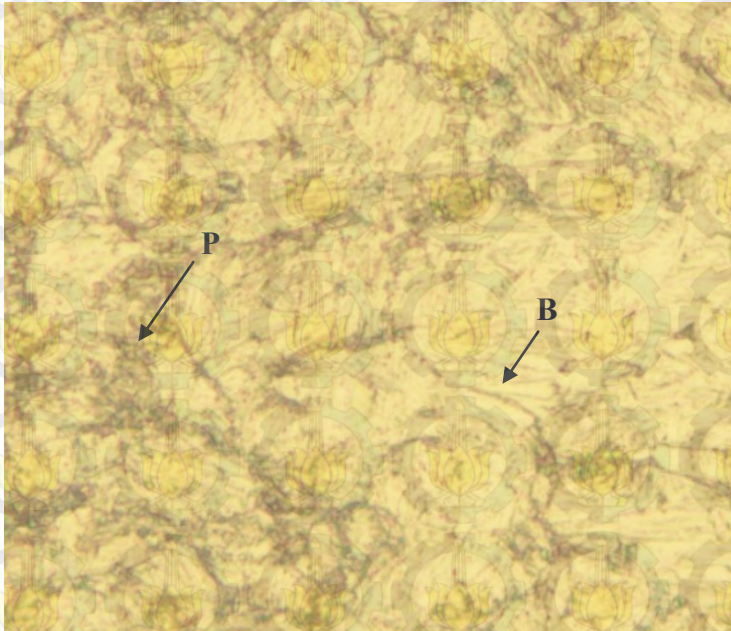
Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi *as cast* seperti pada Gambar 4.1, terdiri dari ferit dan perlit.



**Gambar 4.1** Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi *as cast* terdiri dari ferit ( $\alpha$ ) dan perlit (P). Dietsa dengan pikral. Pembesaran 1000 X.



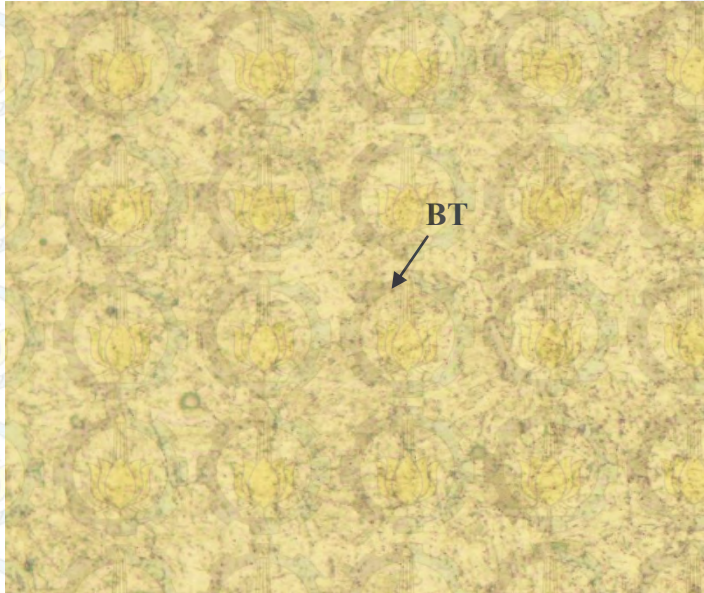
Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi perlakuan *hardening* pada temperatur austenitisasi 925°C, waktu tahan 45 menit, dan pendinginan media air adalah bainit, austenit sisa, dan perlit, seperti pada Gambar 4.2. Bainit ditunjukkan berupa platelet platelet ferit berbentuk bilah dan bagian hitam adalah perlit.



**Gambar 4.2** Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi *hardening*, terdiri dari bainit (B) dan perlit (P). Dietsa dengan pikral. Pembesaran 1000 X



Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi perlakuan *hardening-tempering* pada  $625^{\circ}\text{C}$ , waktu tahan 45 menit, dan pendinginan media air adalah bainit temper, seperti pada Gambar 4.3. Bainit temper yang terbentuk terdiri dari matriks ferit dan partikel karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

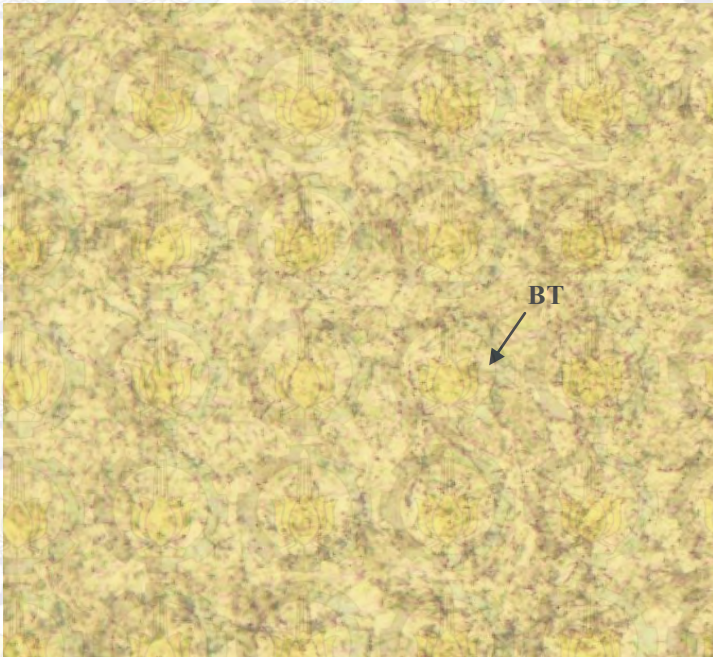


**Gambar 4.3** Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E kondisi *hardening* dan *tempering*. Temperatur austenitisasi pada  $925^{\circ}\text{C}$ , ditahan 45 menit, di-*quench* air, ditemper pada  $625^{\circ}\text{C}$  selama 45 menit. Struktur mikro yang dihasilkan bainit temper (BT) terdiri dari ferit ( $\alpha$ ) dan karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Dietsa dengan pikral. Pembesaran 1000 X.





Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi perlakuan *hardening-tempering* pada  $650^{\circ}\text{C}$ , waktu tahan 45 menit, dan pendinginan media air adalah bainit temper, seperti pada Gambar 4.4. Bainit temper yang terbentuk terdiri dari matriks ferit dan partikel karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Bilah ferit yang terbentuk semakin besar/kasar, bila dibandingkan dengan bainit temper pada Gambar 4.3, ini karena peningkatan temperatur *tempering* menyebabkan bilah ferit bersatu.

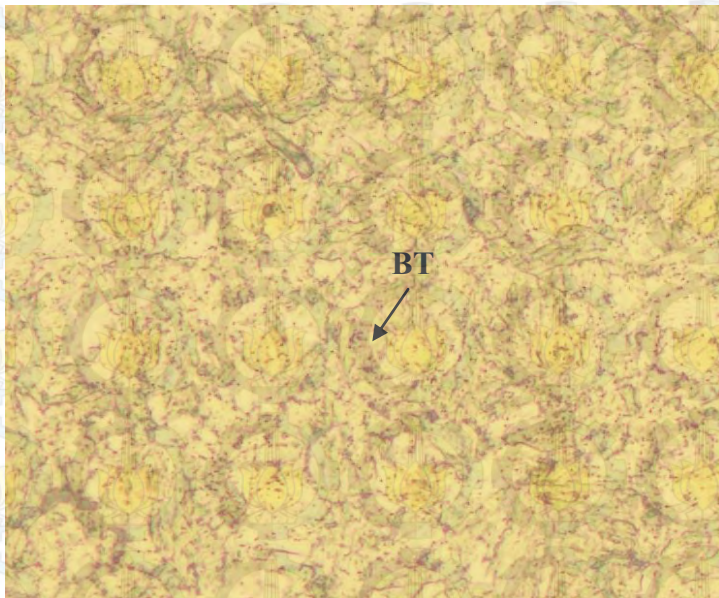


**Gambar 4.4** Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E kondisi *hardening* dan *tempering*. Temperatur austenitisasi pada  $925^{\circ}\text{C}$ , ditahan 45 menit, di-*quench* air, ditemper pada  $650^{\circ}\text{C}$  selama 45 menit. Struktur mikro yang dihasilkan adalah bainit temper, terdiri dari ferit dan karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Dietsa dengan pikral. Pembesaran 1000 X.





Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E pada kondisi perlakuan *hardening-tempering* pada 675°C dan waktu tahan 45 menit adalah bainit temper, seperti pada Gambar 4.5. Bainit temper yang terbentuk terdiri dari matriks bilah ferit dan partikel karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Karbida sementit yang terbentuk semakin banyak dan bilah ferit yang terbentuk semakin besar /kasar, bila dibandingkan dengan bainit temper pada Gambar 4.3 dan 4.4, ini karena peningkatan temperatur *tempering* menyebabkan bilah ferit bersatu dan tumbuh.

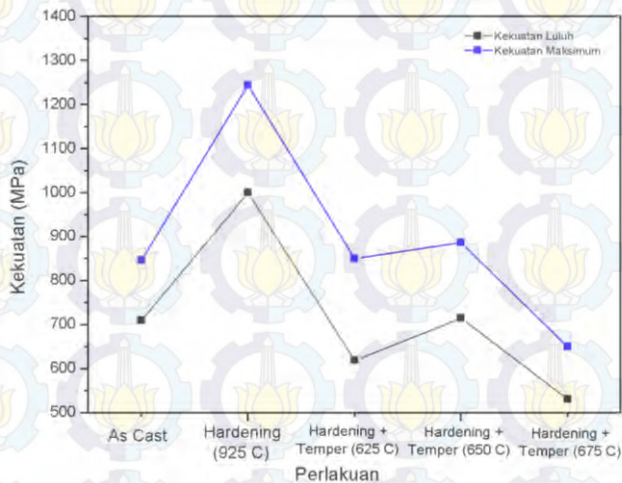


**Gambar 4.5** Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E kondisi *hardening* dan *tempering*. Temperatur austenitisasi pada 925°C, ditahan 45 menit, di-*quench* air, ditemper pada 675°C selama 45 menit. Struktur mikro yang dihasilkan adalah bainit temper (BT), terdiri dari ferit dan karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Dietsa dengan pikral. Pembesaran 1000 X.



#### 4.1.2 Kekuatan Luluh dan Kekuatan Maksimum

Sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E yang diperoleh dari uji tarik adalah kekuatan dan keuletan. Kekuatan yang ditinjau adalah kekuatan luluh dan kekuatan maksimum. Kekuatan luluh adalah kemampuan suatu material untuk menerima beban tanpa terjadi deformasi plastis dan kekuatan maksimum adalah kemampuan suatu material untuk menerima tegangan tanpa terjadi putus.



**Gambar 4.6** Pengaruh kondisi *As cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap kekuatan luluh dan kekuatan maksimum

Pada Gambar 4.6, ditunjukkan hubungan perlakuan spesimen AAR-M201 Grade E, terhadap kekuatan luluh dan maksimum. Baja AAR-M201 Grade E *as cast* memiliki kekuatan luluh dan kekuatan maksimum masing-masing 709,483 MPa dan 846,603 MPa. Pada saat baja di-*hardening* pada temperatur austenitisasi 925°C selama 45 menit dengan media pendingin air, kekuatan luluh dan kekuatan maksimum meningkat menjadi 1000,088 MPa dan 1243,308 MPa, kemudian dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* pada temperatur 625°C selama 45 menit, sehingga kekuatan luluh dan kekuatan maksimum berkurang



menjadi 618,542 MPa dan 850,142 MPa. Pada saat dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* pada temperatur 650°C selama 45 menit kekuatan luluh dan kekuatan maksimum berkurang menjadi 715,234 MPa dan 886,412 MPa. Pada saat dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* pada temperatur 675°C selama 45 menit kekuatan luluh dan kekuatan maksimum berkurang menjadi 531,483 MPa dan 650,212 MPa. Kekuatan luluh dan kekuatan maksimum terbesar diperoleh saat spesimen di *hardening* dan nilainya menurun ketika diberi perlakuan *tempering*. Penurunan kekuatan luluh dan kekuatan maksimum menurun seiring meningkatnya temperatur *tempering*.

Berdasarkan spesifikasi *American Association of Railroads* (AAR) Spec M.201 Grade E, spesifikasi minimum kekuatan luluh 689,645 MPa dan kekuatan maksimum 827,67 MPa. Proses yang tidak menghasilkan kekuatan luluh dan maksimum sesuai spesifikasi adalah *hardening-tempering* 625°C, kekuatan luluh 618,542 MPa, dan *hardening-tempering* 675°C, kekuatan luluh 531,483 MPa dan kekuatan maksimum 650,212 MPa.

#### 4.1.3 Keuletan

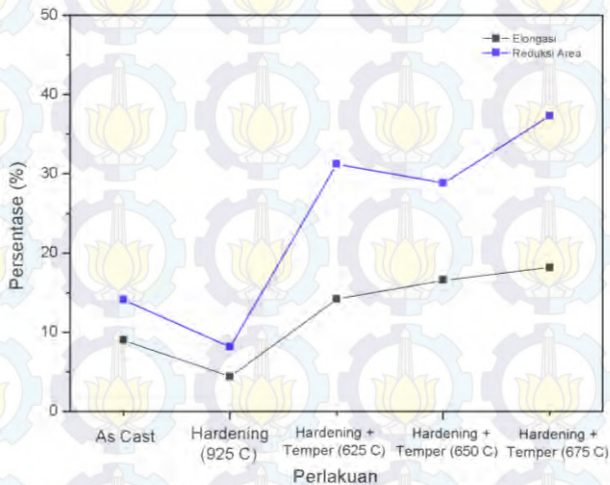
Keuletan menyatakan kemampuan suatu material untuk berdeformasi plastis tanpa terjadi patah. Nilai keuletan material dapat dinyatakan dengan persentase elongasi dan persentase reduksi area.

Pada Gambar 4.7 ditunjukkan hubungan perlakuan spesimen AAR-M201 Grade E, terhadap keuletan (persentase elongasi dan reduksi area). Baja AAR-M201 Grade E *as cast* memiliki persentase elongasi dan reduksi area masing-masing 9,02 % dan 14,13%. Pada saat baja di-*hardening* pada temperatur austenitisasi 925°C selama 45 menit dengan media pendingin air, persentase elongasi dan reduksi area berkurang menjadi 4,44% dan 8,16% , kemudian dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* pada temperatur 625°C selama 45 menit, sehingga persentase elongasi dan reduksi area bertambah menjadi menjadi 14,2% dan 31,25%. Pada saat dilanjutkan dengan perlakuan *tempering*





pada temperatur 650°C selama 45 menit persentase elongasi dan persentase reduksi area bertambah menjadi 16,6 % dan 28,88 %. Pada saat dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* pada temperatur 675°C selama 45 menit persentase elongasi dan persentase reduksi area menjadi 18,2 % dan 37,33 %. Keuletan terendah diperoleh saat spesimen di *hardening* dan nilainya meningkat ketika diberi perlakuan *tempering*. Peningkatan nilai keuletan seiring dengan peningkatan temperatur *tempering*.



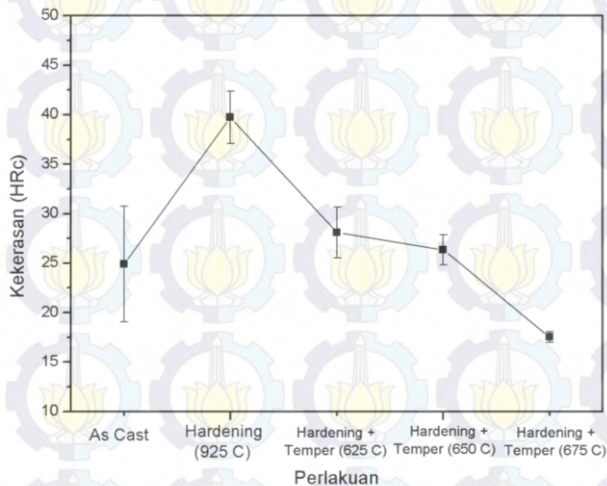
**Gambar 4.7** Pengaruh kondisi *As cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap persentase elongasi dan reduksi area

Berdasarkan spesifikasi *American Association of Railroads* (AAR) Spec M.201 Grade E, spesifikasi minimum persentase elongasi 14% dan persentase reduksi area 30%. Proses yang tidak menghasilkan sifat mekanik sesuai spesifikasi adalah *hardening-tempering* 650°C, persentase reduksi area 28,88%.



#### 4.1.4 Kekerasan

Kekerasan adalah kemampuan suatu material untuk menahan goresan dan tusukan/indentasi. Perlakuan panas pada umumnya menghasilkan perubahan kekerasan.



**Gambar 4.8** Pengaruh kondisi *As cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap kekerasan (HRc)

Pada Gambar 4.8 hubungan perlakuan spesimen AAR-M201 Grade E, terhadap kekerasan, Baja AAR-M201 Grade E *as cast* memiliki kekerasan 23,62 HRc. Pada saat baja di-*hardening* pada temperatur austenitisasi 925°C selama 45 menit dengan media pendingin air, kekerasan meningkat menjadi 39,62 HRc, kemudian dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* pada temperatur 625°C selama 45 menit, sehingga kekerasan berkurang menjadi 28,12 HRc. Pada saat dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* pada temperatur 650°C selama 45 menit kekerasan berkurang menjadi 26,15 HRc. Pada saat dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* pada temperatur 675°C selama 45 menit kekerasan berkurang menjadi 18,15 HRc. Kekerasan terbesar diperoleh saat spesimen di *hardening* dan nilainya



menurun ketika diberi perlakuan *tempering*. Penurunan nilai kekerasan menurun seiring meningkatnya temperatur *tempering*.

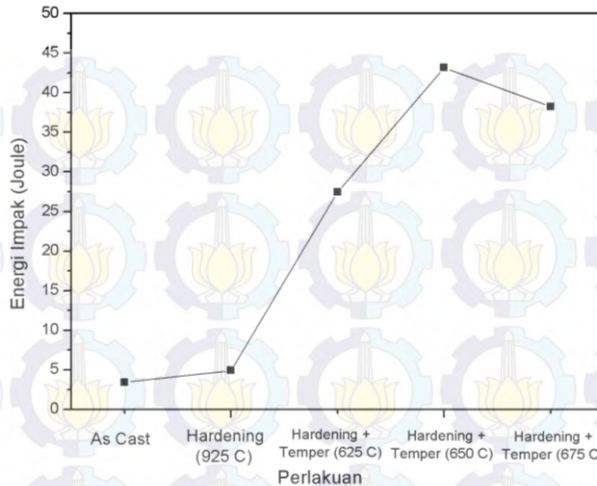
Berdasarkan spesifikasi *American Association of Railroads* (AAR) Spec M.201 Grade E, spesifikasi kekerasan berada pada rentang 22,8 – 32,9 HRC. Proses perlakuan yang tidak menghasilkan kekerasan sesuai spesifikasi adalah *hardening-tempering* 675°C.

#### 4.1.5 Ketangguhan Impak

Kekuatan impak merupakan ketahanan suatu material terhadap beban pukulan (*impact*) dinyatakan dengan besar energi yang diperlukan untuk mematahkan baja uji. Energi impak memberi suatu indikasi yang baik pada energi yang diperlukan untuk inisiasi dan penjaralan suatu retak. Metode pengujian impak yang digunakan adalah *Charpy V-notch* (CVN).

Pada Gambar 4.9, ditunjukkan hubungan perlakuan spesimen baja AAR-M201 Grade E, terhadap energi impak. Baja AAR-M201 Grade E *as cast* memiliki energi impak sebesar 3,432 Joule. Pada saat baja di-*hardening* pada temperatur austenitisasi 925°C selama 45 menit dengan media pendingin air, energi impak menjadi 4,903 Joule, kemudian dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* pada temperatur 625°C selama 45 menit, sehingga energi impak 27,458 Joule. Pada saat dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* pada temperatur 650°C selama 45 menit energi impak bertambah menjadi 43,149 Joule. Pada saat dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* pada temperatur 675°C selama 45 menit energi impak menjadi 38,245 Joule. Peningkatan temperatur *tempering*, meningkatkan energi impak.





**Gambar 4.9** Pengaruh kondisi *As cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap energi impact pada temperatur uji  $-40^{\circ}\text{C}$

Berdasarkan spesifikasi *American Association of Railroads* (AAR) Spec. M.201 Grade E, spesifikasi minimum energi impact pada temperatur uji  $-40^{\circ}\text{C}$  adalah 27 Joule. Semua proses perlakuan panas menghasilkan energi impact lebih dari 27 Joule.

#### 4.1.6 Evaluasi Hasil Perlakuan Panas

Sifat mekanik yang dihasilkan dari proses perlakuan panas seperti pada Tabel 4.1. Sifat mekanik yang diperoleh dari perlakuan panas dibandingkan dengan spesifikasi *American Association of Railroads* (AAR) Spec. M.201 Grade E. Perlakuan panas yang menghasilkan sifat mekanik yang tidak memenuhi kriteria akan dievaluasi pada proses dan parameter perlakuan panasnya.



**Tabel 4.1** Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E Hasil Perlakuan Panas

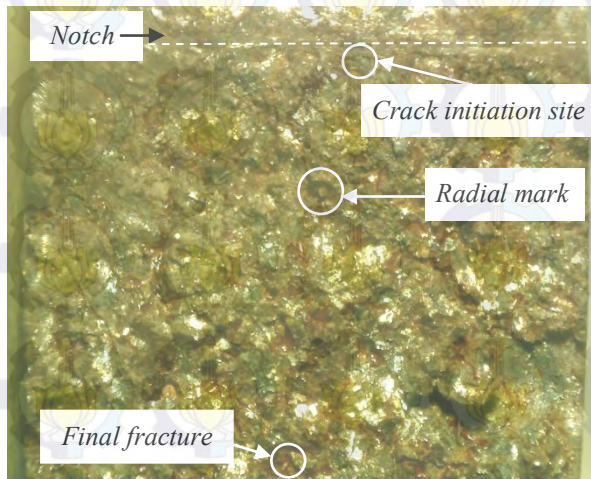
No	Perlakuan	Kekuatan Luluh (MPa)	Kekuatan Maksimum (MPa)	Persen Elongasi (%)	Persen Reduksi Area (%)	Kekerasan (HRC)	Energi Impak (Joule)
		689,645	827,67	14	30	22,8-32,9	27
1	<i>As Cast</i>	709,483	846,603	9,02	14,13	24,90	3,432
2	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit)	1000,088	1243,308	4,44	8,16	39,72	4,903
3	<i>Hardening + Tempering</i> (625°C, 45 menit)	618,542	850,142	14,2	31,25	28,09	27,458
4	<i>Hardening + Tempering</i> (650°C, 45 menit)	715,234	886,412	16,6	28,88	26,34	43,149
5	<i>Hardening + Tempering</i> (675°C, 45 menit)	531,483	650,212	18,2	37,33	17,52	38,245



Berdasarkan Tabel 4.1, dapat diketahui sifat mekanik yang tidak memenuhi spesifikasi AAR-M201 Grade E, ditandai dengan blok warna merah muda. Perlakuan panas *hardening-tempering* pada temperatur *tempering* 675°C menghasilkan sifat mekanik, kekuatan dan kekerasan, yang tidak sesuai spesifikasi. Perlakuan panas *hardening-tempering* pada temperatur *tempering* 625°C menghasilkan kekuatan luluh yang tidak sesuai spesifikasi. Perlakuan panas *hardening-tempering* pada temperatur *tempering* 650°C menghasilkan keuletan yang tidak memenuhi spesifikasi.

#### 4.1.7 Pengamatan Fraktografi

Pengamatan fraktografi digunakan untuk mengamati pola patahan pada hasil pengujian impact. Fraktografi pada permukaan patahan benda uji *charpy* dapat menunjukkan karakteristik ketangguhan impact material tersebut, dan secara tidak langsung struktur mikro.

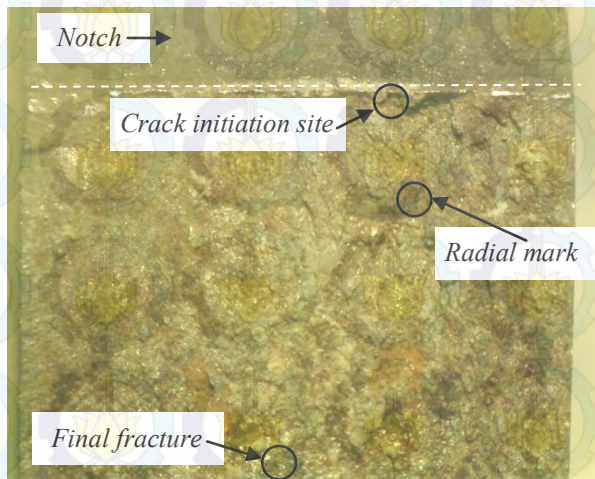


**Gambar 4.10** Mikrografi mikroskop stereo pada permukaan impact *charpy* baja AAR-M201 Grade E *as cast*, temperatur uji -40°C



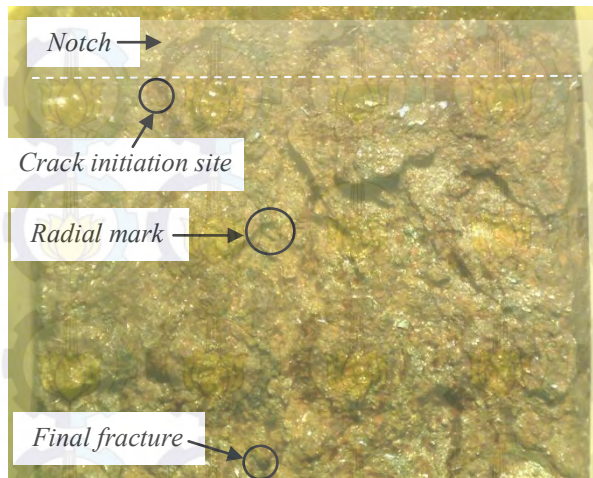


Pola patahan pada baja AAR-M20 Grade E *as cast* seperti pada Gambar 4.10, jenis patahan yang dihasilkan adalah patah getas, ditunjukkan patahan yang terdiri banyak granular-granular dari mekanisme *cleavage* dan facet permukaan patahan belah yang datar memperlihatkan daya pemantul cahaya yang tinggi serta mengkilat.



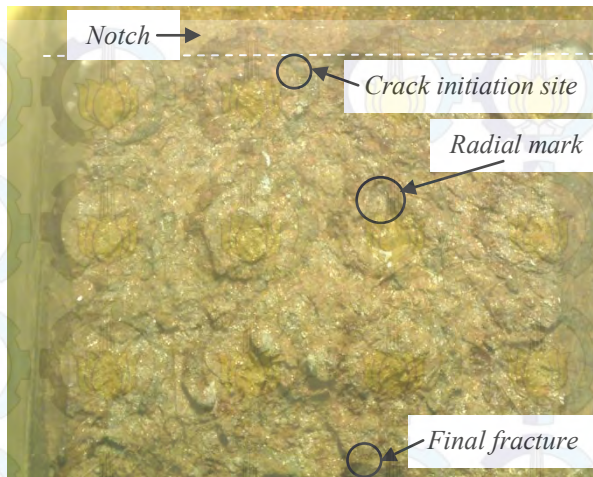
**Gambar 4.11** Mikrografi mikroskop stereo pada permukaan impak *charpy* baja AAR-M201 Grade E *hardening*, temperatur austenitisasi 925°C, waktu tahan 45 menit, media pendingin air. Temperatur uji -40°C

Pola patahan pada baja AAR-M20 Grade E *hardening*, seperti pada Gambar 4.11, patahan yang dihasilkan adalah patah getas, ditunjukkan patahan belah yang cenderung datar dan sedikit mampu memberikan daya pantul cahaya bila dibandingkan dengan baja AAR-M201 Grade E *as cast*.



**Gambar 4.12** Mikrografi mikroskop stereo pada permukaan impak *charpy* baja AAR-M201 Grade E *hardening* dan *tempering*, pada temperatur *tempering* 625°C. Temperatur uji -40°C.

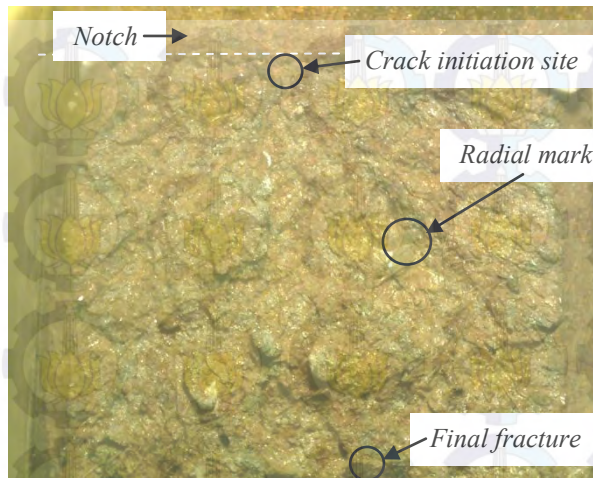
Pola patahan pada baja AAR-M20 Grade E *hardening* – *tempering* pada temperatur *tempering* 625°C, seperti pada Gambar 4.12, patahan yang dihasilkan adalah patah transisi getas-ulet, ditunjukkan patahan yang berserat dan terdiri dari dimpel yang menyerap cahaya dan pada bagian bawah patahan cenderung datar dan sedikit memberikan daya pantul cahaya. *Radial mark* yang dihasilkan cenderung besar dan banyak.



**Gambar 4.12** Mikrografi mikroskop stereo pada permukaan impak *charpy* baja AAR-M201 Grade E *hardening* dan *tempering*, pada temperatur *tempering* 650°C, temperatur uji -40°C.

Pola patahan pada baja AAR-M20 Grade E *hardening* – *tempering* pada temperatur *tempering* 650°, patahan yang dihasilkan adalah patah ulet, ditunjukkan patahan yang berserat dan terdiri dari dimpel yang menyerap cahaya. *Radial mark* yang dihasilkan tidak terlalu besar dan lebih sedikit apabila dibandingkan dengan pola patahan baja AAR-M201 Grade E *hardening-tempering* pada temperatur *tempering* 625°C.





**Gambar 4.13.** Mikrografi mikroskop stereo pada permukaan impak *charpy* baja AAR-M201 Grade E *hardening* dan *tempering*, pada temperatur *tempering* 675°C, temperatur uji -40°C.

Pola patahan pada baja AAR-M20 Grade E *hardening* – *tempering* pada temperatur *tempering* 675°C, seperti pada Gambar 4.12, patahan yang dihasilkan adalah patah ulet, ditunjukkan patahan yang berserat dan terdiri dari dimpel yang menyerap cahaya. *Radial mark* yang dihasilkan lebih kecil dan halus, apabila dibandingkan dengan baja AAR-M201 Grade E *hardening-tempering* pada temperatur *tempering* 625°C dan 650°C.



---

## 4.2 Pembahasan

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

Pada penelitian ini bertujuan menganalisa pengaruh temperatur *tempering* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik pada baja AAR-M201 Grade E. Struktur mikro dan mekanik yang diperoleh dari perlakuan *hardening-tempering*, dibandingkan dengan sifat mekanik pada kondisi *as cast* dan perlakuan *hardening*.

Proses perlakuan panas *hardening-tempering* dilakukan dengan proses *hardening*, pemanasan pada temperatur austenitisasi 925°C, waktu tahan 45 menit, dan media pendingin air, dan proses *tempering* pada temperatur *tempering* 625,650, dan 675°C dengan waktu tahan 45 menit.

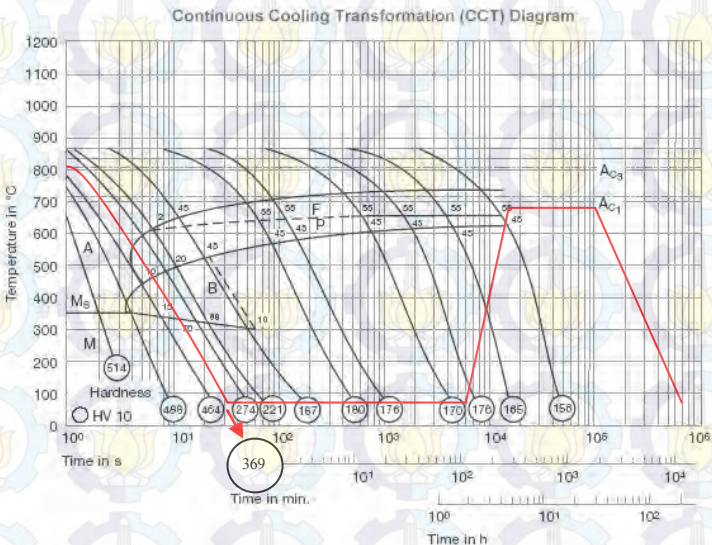
Pada kondisi *as cast* struktur mikro yang terbentuk adalah ferit dan perlit, hal ini karena proses pendinginan saat kondisi *as cast* berlangsung secara lambat (*equilibrium*), sehingga transformasi fasa yang terjadi dari austenit menjadi ferit dan sementit. Proses transformasi austenit berlangsung melalui mekanisme difusi. Atom-atom karbon dari austenit disekitar inti sementit berdifusi keluar dan bergabung dengan inti sementit yang ada. Kadar karbon austenit disekitar sementit menjadi sangat rendah sehingga menjadi ferit. Proses ini akan berlangsung terus menerus sehingga diperoleh struktur perlit yang berlamel-lamel. Lamel-lamel akan semakin rapat bila transformasi berlangsung pada temperatur yang lebih rendah (Thelning, 1984).

Pada perlakuan *hardening*, struktur mikro yang terbentuk adalah perlit dan bainit. Perlit yang terbentuk dari proses *hardening*, ketika dipanaskan maka ferit dari perlit akan bersatu dengan bilah ferit bainit sehingga jarak antar sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) pada perlit semakin rapat. Struktur mikro bainit terdiri dari agregat-agregat bilah ferit dan partikel-partikel sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) (Bhadeshia, 2001). Transformasi bainit terjadi pendinginan yang cepat austenit menjadi bainit. Pendinginan cepat dengan media air, mengakibatkan transformasi austenit menjadi bainit. Pada

---



proses transformasinya, austenit mengalami *driving force* yang besar untuk berubah dari FCC (*Face Centered Cubic*) menjadi BCC (*Body Centered Cubic*), *driving force* ini mengakibatkan atom-atom akan tergeser sehingga menjadi BCC dan terbentuk ferit. Karbon yang tidak mampu dilarutkan ferit akan berdifusi keluar membentuk kabad. Austenit yang bertransformasi menjadi ferit dan karbonnya berdifusi keluar sehingga diperoleh struktur berupa bilah-bilah ferit yang didalamnya terdapat platelet dengan arah hampir sejajar dengan sumbu pertumbuhannya. Struktur mikro bainit yang terbentuk pada baja ini adalah bainit atas. Bainit atas terdiri dari kluster bilah-bilah ferit yang terhubung satu sama lain dan memiliki orientasi kristalografi yang identik. Partikel sementit yang memanjang berada dibutir bilah ini, jumlah dan kontinuitas layer sementit dipengaruhi oleh kadar karbon baja (Bhadhesia,2001).



**Gambar 4.14** Diagram CCT Baja AAR-M201 Grade E, dengan alur proses perlakuan panas *quenching-tempering*





---

Pada proses *tempering*, dilakukan proses pemanasan pada temperatur *tempering* 625,650, dan 675°C, seperti pada Gambar 4.13. Struktur mikro yang terbentuk setelah *tempering* adalah bainit temper.

Bainit temper terdiri dari bilah ferit dan partikel-partikel karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Peningkatan temperatur *tempering* akan meningkatkan ukuran bilah ferit dan meningkatkan jumlah karbida sementit. Hal ini karena peningkatan temperatur *tempering* mengakibatkan difusi unsur C dari ferit jenuh (bilah ferit) menuju austenit, kemudian presipitasi karbida pada bainit, selain itu terjadi presipitasi karbida dari austenit yang kaya (dekomposisi austenit), selain itu semakin tinggi temperatur *tempering* maka ada *recovery* pada substruktur yang terdislokasi (Bhadeshia, 2001).

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

Sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E dipengaruhi oleh struktur mikro yang dihasilkan dari perlakuan panas. Pada kondisi *as cast* struktur mikro yang terbentuk adalah ferit dan perlit. Perlit memberikan kontribusi kekuatan pada baja. Selain itu pengaruh unsur paduan (1,6% Mn) meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja.

Struktur mikro yang dihasilkan dari proses *hardening* adalah bainit dan perlit. Sifat mekanik yang dihasilkan memiliki kekuatan dan kekerasan yang relatif besar, keuletan dan energi impak yang relatif lebih kecil, apabila dibandingkan dengan baja pada kondisi *as cast* dan *hardening-tempering*. Bainit memiliki karakteristik seperti bilah, mirip deformasi *twin* dan plat martensit. Pembentukan bilah bainit diikuti oleh distorsi permukaan sehingga dapat disimpulkan terjadi pergeseran kisi. Peningkatan kekuatan dan kekerasan ini melalui mekanisme penguatan deformasi (Abbaschian, 2013).

Pada *tempering* bainit variasi sifat mekanik dipengaruhi oleh poligonal ferit dan granular bainit. Ketika temperatur

---



---

*tempering* meningkat maka dislokasi pada bilah bainit akan berubah menjadi poligonal selain itu bilah bainit bersatu sehingga lebarnya meningkat (Feng, 2012). Peningkatan temperatur *tempering* juga memungkinkan adanya relaksasi regangan yang diakomodasi. Relaksasi ini memungkinkan bainit untuk bersatu dan tumbuh (Abbaschian, 2009).

Kekuatan dan kekerasan pada setiap tahap *tempering* berhubungan dengan ruang antar partikel, ukuran butir, ukuran partikel dan distribusi, dan densitas dislokasi. Kekerasan dan kekuatan tarik pada struktur mikro awal bainit akan berkurang selama *tempering* (Bhadeshia, 2009). Hal ini karena rekristalisasi ferit dan pengasaran bilah bainit (ukuran membesar) sehingga mengakibatkan kekuatan dan kekerasan berkurang secara perlahan (Feng, 2012).

Proses *tempering* mengakibatkan pelepasan tegangan internal selain itu merelaksasi dislokasi pada substruktur bainit sehingga memberi kesempatan atom-atom untuk menyusun dirinya kembali (LI Hong-ying, 2013). Peningkatan temperatur *tempering* mengakibatkan konesentrasi bilah ferit (bainit temper) berkurang dan keberadaan bilah ferit semakin kasar dan partikel karbida semakin banyak, hal ini akibat difusi atom karbon dan pergerakan dislokasi oleh *thermal assistance* (Gurland, 1976). Hal ini mengakibatkan keuletan meningkat, selain itu kekuatan luluh dan kekuatan maksimum berkurang.

Proses *tempering* memberikan kombinasi yang baik antara kekuatan dan ketangguhan. Energi dampak baja paduan pada temperatur tertentu bertambah besar apabila temperatur *tempering* bertambah (Dieter, 1986).

Evaluasi proses perlakuan untuk menghasilkan sifat mekanik yang memenuhi spesifikasi *American Association of Railroads* (AAR) Spec. M.201 Grade E, menunjukkan proses perlakuan panas *hardening-tempering* pada temperatur 675°C menghasilkan beberapa sifat mekanik yang tidak memenuhi spesifikasi, sedangkan pada proses perlakuan panas *hardening-tempering* pada 625°C dan 650°C menghasilkan sifat mekanik

---



yang sebagian besar memenuhi spesifikasi. Berdasarkan hasil sifat mekanik yang diperoleh, terdapat nilai sifat mekanik yang tidak sesuai kecenderungan (*trend*) secara teoretis, misalnya pada kekuatan luluh dan kekuatan maksimum hasil *hardening-tempering* pada temperatur 650°C seharusnya lebih kecil daripada kekuatan luluh dan kekuatan maksimum hasil *hardening-tempering* pada temperatur 625°C. Hal ini disebabkan perbedaan variabel temperatur antara kedua perlakuan tersebut yang relatif kecil sehingga data sifat mekanik yang dihasilkan masih fluktuatif.

#### 4.2.3 Pengaruh Temperatur *Tempering* pada Fraktografi Impak

Pada baja AAR-M201 Grade E *as cast* menunjukkan pola patahan getas. Patahan terdiri dari banyak granular-granular dari mekanisme *cleavage* dan facet permukaan patahan belah yang datar memperlihatkan daya pemantul cahaya yang tinggi serta mengkilat. Hal ini dipengaruhi oleh struktur mikro yang terbentuk yaitu ferit dan perlit, pada kadar karbon baja AAR-M201 Grade E 0,24%C maka perlit yang terbentuk lebih banyak daripada ferit, sehingga menghasilkan ketangguhan yang rendah. Ketangguhan impak yang dihasilkan juga cenderung kecil.

Pada baja AAR-M201 Grade E *hardening* menunjukkan pola patahan getas. patahan belah yang cenderung datar dan sedikit mampu memberikan daya pantul cahaya. Hal ini dipengaruhi oleh struktur mikro yang terbentuk yaitu bainit dan perlit, yang menghasilkan kekuatan tinggi dan ketangguhan impak yang rendah.

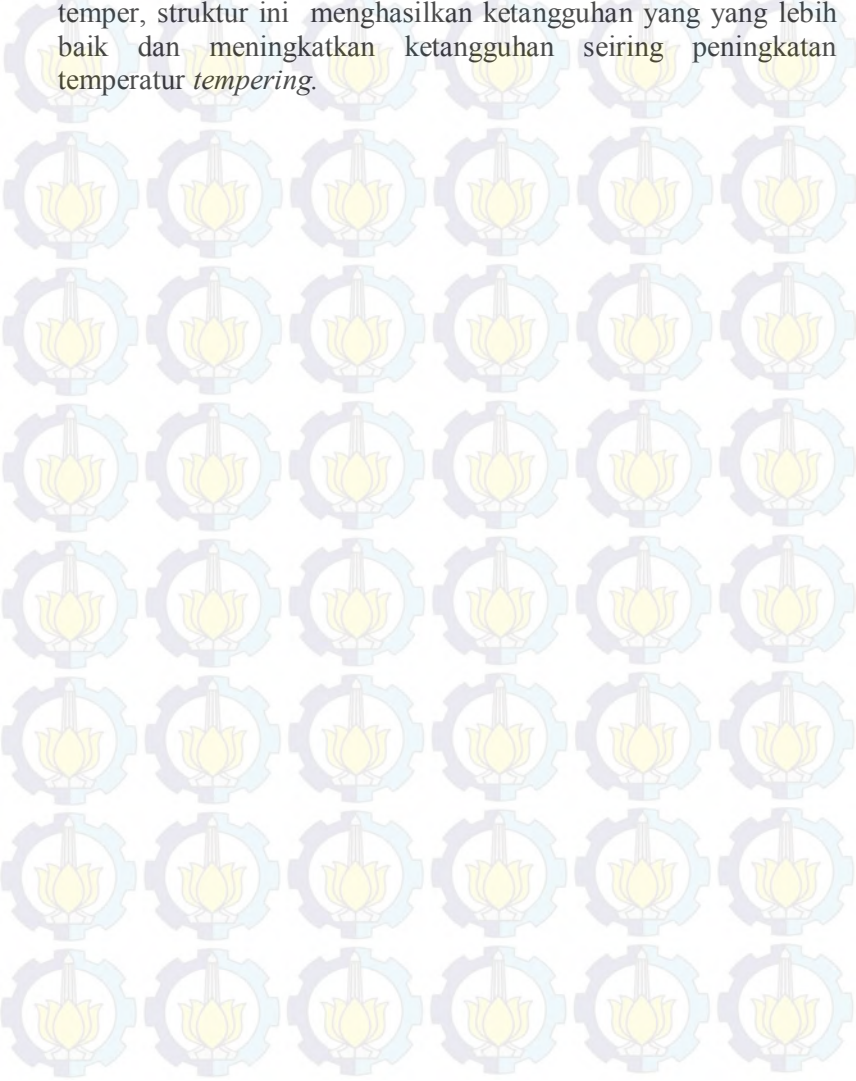
Pada baja AAR-M201 Grade E *hardening-tempering* menunjukkan pola patahan ulet. Patahan yang terbentuk berserat dan terdiri dari dimpel yang menyerap cahaya. *Radial mark* yang dihasilkan menjadi bentuk yang lebih halus seiring peningkatan temperatur *tempering*. Hal ini mengindikasikan ketangguhan impak yang semakin meningkat (Saedi,2010). Nilai ketangguhan impak *charpy* pada baja AAR-M201 Grade meningkat seiring





---

peningkatan temperatur, seperti pada Gambar 4.9. Struktur mikro yang terbentuk pada proses *hardening-tempering* adalah bainit temper, struktur ini menghasilkan ketangguhan yang lebih baik dan meningkatkan ketangguhan seiring peningkatan temperatur *tempering*.





*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

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

1. Temperatur *tempering* mempengaruhi struktur mikro baja AAR-201 Grade E, dengan terbentuknya struktur mikro yaitu bainit temper, berupa ferit dan karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Peningkatan temperatur *tempering* menghasilkan struktur bainit temper dengan ferit yang semakin kasar dan karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) semakin banyak.
2. Temperatur *tempering* mempengaruhi sifat mekanik baja AAR-201 Grade E. Peningkatan temperatur *tempering*, menurunkan kekuatan luluh, kekuatan maksimum, kekerasan dan meningkatkan keuletan dan energi dampak.

### 5.2 Saran

Berdasarkan hasil yang didapatkan maka saran-saran yang dapat diambil, sebagai berikut,

1. Pada proses *hardening*, untuk menghasilkan struktur mikro martensit maka kecepatan pendinginan perlu ditingkatkan.
2. Pada pengujian mekanik, setiap perlakuan menggunakan minimal 3 spesimen uji untuk meningkatkan keakuratan nilai sifat mekanik.
3. Penentuan persen austenit sisa yang dihasilkan dari proses *hardening* untuk mengetahui persen austenit yang bertransformasi.







---

**DAFTAR PUSTAKA**

- \_\_\_\_\_, 1998. **ASM Handbook, Vol 01, Properties and Selection : Iron and High Performance Alloys**, ASM International, Materials Park
- \_\_\_\_\_. 1998. **ASM Handbook, Vol 04, Heat Treatment**, ASM International, Materials Park
- \_\_\_\_\_. 2007. **ASTM E3 : Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**. ASTM International.
- \_\_\_\_\_. 2009. **ASTM E8/E8M : Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. ASTM International.
- \_\_\_\_\_. 2010. **ASTM E10 : Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials**. ASTM International.
- \_\_\_\_\_. 2007. **ASTM E23 : Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. ASTM International
- \_\_\_\_\_. 2000. **AAR Manual of Standards and Recommended Practices Couplers and Freight Car Draft Components : Spesification M-201-00**
- \_\_\_\_\_, **Steel Casting Handbook, Supplement 11 : Hardenability and Heat Treatment**. Steel Founders' Society of America
- Abbaschian, Reza, Lara Abbaschian dan Robert E. Reed-Hill. 2009. **Physical Metallurgy Principles, Fourth Edition**. Stanford : Cengage Learning.
- Atari, Darmawan Alan. 2012. "Pengaruh Variasi Temperatur Annealing terhadap Perubahan Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Bolster". ITS : Surabaya.



- 
- Avner, Sidney H.1974. **Introduction to Physical Metallurgy**.  
New York : Mc.Graw Hill Publishing Co. Inc.
- Bhadeshia, H.K.D.H. 2001. **Bainite in Steels : Transformations, Microstructure and Properties 2<sup>nd</sup> Edition**. London :  
IOM Communication Ltd.
- Bhadeshia, H.K.D.H. dan Robert Honeycombe. 2006. **Steels : Microstructure and Properties**. Burlington : Butterworth-Heinemann.
- Boelen,Robert, Paul Curcio, Alex Cowin.2003. “Ore car Coupler Performance at BHP-Billiton Iron Ore”. **Engineering Failure Analysis**. 11 : 221-234
- Callister, William D, Jr. 2008. **Materials Science and Engineering : An Introduction 8<sup>th</sup> Edition**. New York :  
John Wiley & Sons, Inc.
- Campbell,F.C. 2008. **Elements of Metallurgy and Engineering Alloys**. New York : ASM International.
- Clark, Donald S, Wilbur R. Varney.1962. **Physical Metallurgy for Engineers**. California : Litton Educational Publishing,Inc.
- Damanik, Fransiskus G. 2010. “Pengaruh Proses Perlakuan Panas Hardening, Normalising, dan Tempering terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja AAR M201 Grade E”. **ITS** : Surabaya.
- Dieter, George E. 1988. **Mechanical Metallurgy**. United Kingdom : McGraw-Hill Inc.
- Fang, X, Z.Fan, B.Ralph, P.Evans, R. Underhill. 2003. “Effects of Tempering Temperature on Tensile and Hole Expansion Properties of a C-Mn Steel”. **Journal of Materials Processing Technology**. 132 : 215-218.
- Feng, Rui, Sheng Li, Zhenshun Li, Lei Tian. 2012. “Variations of Microstructure and Properties of 690 MPa Grade Low
-





---

Carbon Bainitic Steel after Tempering”. **Material Science and Engineering**. 558 :205-210.

Garcia-Mateo,C, M.Peet, F.G. Caballero, H.K.D.H Bhadesia. 2004. “Tempering of Hard Mixture of Bainitic Ferrite and Austenite”. **Material Science and Technology**. 20 :814-818.

Gurland, Anand L. 1976. “Effect of Internal Boundaries on the Yield Strengths of Spheroidized Steel”. **Metallurgical and Material Transaction A**. 7 : 191-197.

Hermawan, Arief Dwi. 2012. “Efek Temperatur Normalizing terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro pada Bolster AAR M201 Grade B. **ITS**: Surabaya.

Hertzberg, Richard W.1996. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. Canada : John Wiley and Sons Inc.

Hong-ying, LI, HU Ji-dong, LI Jun, CHEN Guang, SUN Xiong-jie. 2013. “ Effect of Tempering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 6150 Steel”. **Journal Central South University**. 20:866-870.

Huang Jin, Lu Xia, Youshou Zhang, Sinian Li. 2013. “ Investigation on Brittle Fracture Mechanism of a Grade E Casr Steel Knuckle”. **Case Studies in Engineering Failure Analysis**. 2 : 15-21

Mukti, Aksa Setia. 2010.”Pengaruh Proses Perlakuan Panas Normalizing dan Pemanasan Kembali dengan Annealing terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja AAR M201 Grade C”.**ITS** : Surabaya.

Murugan,V.K. 2013.”Effect of Tempering Behavior on Heat Treated Medium Carbon (C 35 Mn 75) Steel”. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**. 2: 945-950.

---



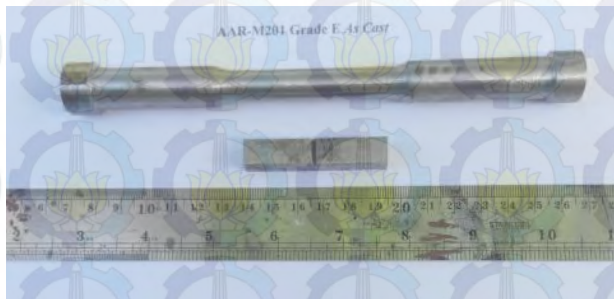
- 
- Li, Defa, Feng Huang, Shisen Wang, Yuzhang Xiong. 2012. "Effect of Tempering Temperature on Microstructures and Properties of Niobium and Titanium Microalloying Low Carbon Bainite Steel". **International Journal of Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology**. 1542-1545.
- Saeidi, N. A. Ekrami. 2010. "Impact Properties of Tempered Bainite-Ferrite Dual Phase Steels". **Materials Science and Engineering A**. 527 : 5575-5581
- Sanij, M.H. Khani, S.S. Ghasemi Banadkouki, A.R. Mashreghi. 2012. "The Effect of Single and Double Quenching and Tempering Heat Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI 1040 Steel". **Material and Design**. 42: 339-346.
- Thelning, Karl-Erik. 1984. **Steel and Its Heat Treatment**. Oxford : Butterworth-Heinemann
- Yan Shu, Xianghua Liu, Wayne J. Lu, Huifang Lan, Hongyan Wu. 2015. "Comparison on Mechanical Properties and Microstructure of a C-Mn-Si Steel Treated by Quenching and Partitioning (Q &P) and Quenching and Tempering (Q&T) Process". **Material Science & Engineering A**. 620: 58-66.
-

## LAMPIRAN

### 1. Foto Spesimen *Y-block* dan Spesimen Uji

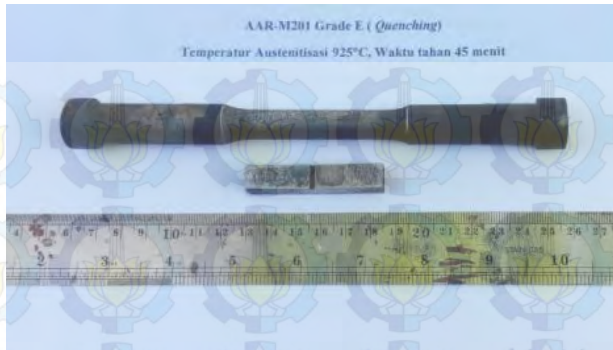


Gambar 1.1 Spesimen *Y-block*



Gambar 1.2 Spesimen *As Cast*

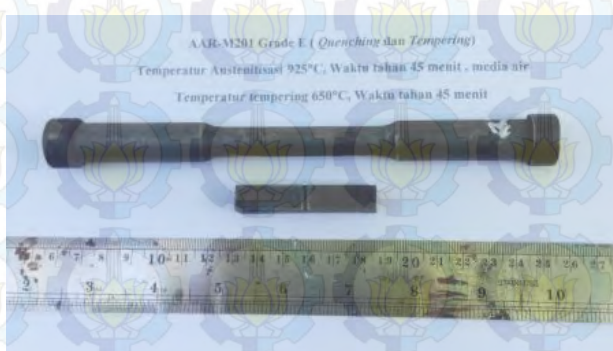




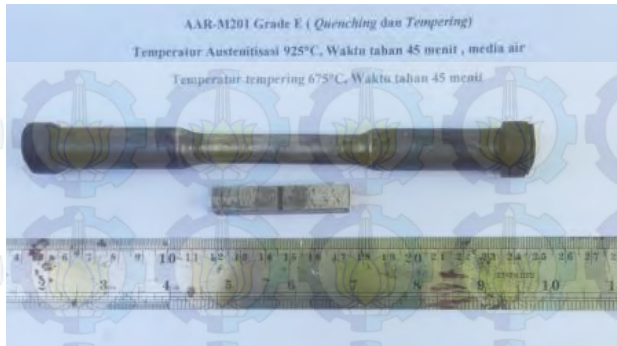
Gambar 1.3 Spesimen *Hardening*



Gambar 1.4 Spesimen *Hardening – Tempering 625 °C*



Gambar 1.5 Spesimen *Hardening – Tempering 650 °C*



Gambar 1.6 Spesimen *Hardening – Tempering* 675 °C

## 2. Data Histori Perlakuan Panas dan Sifat Mekanik

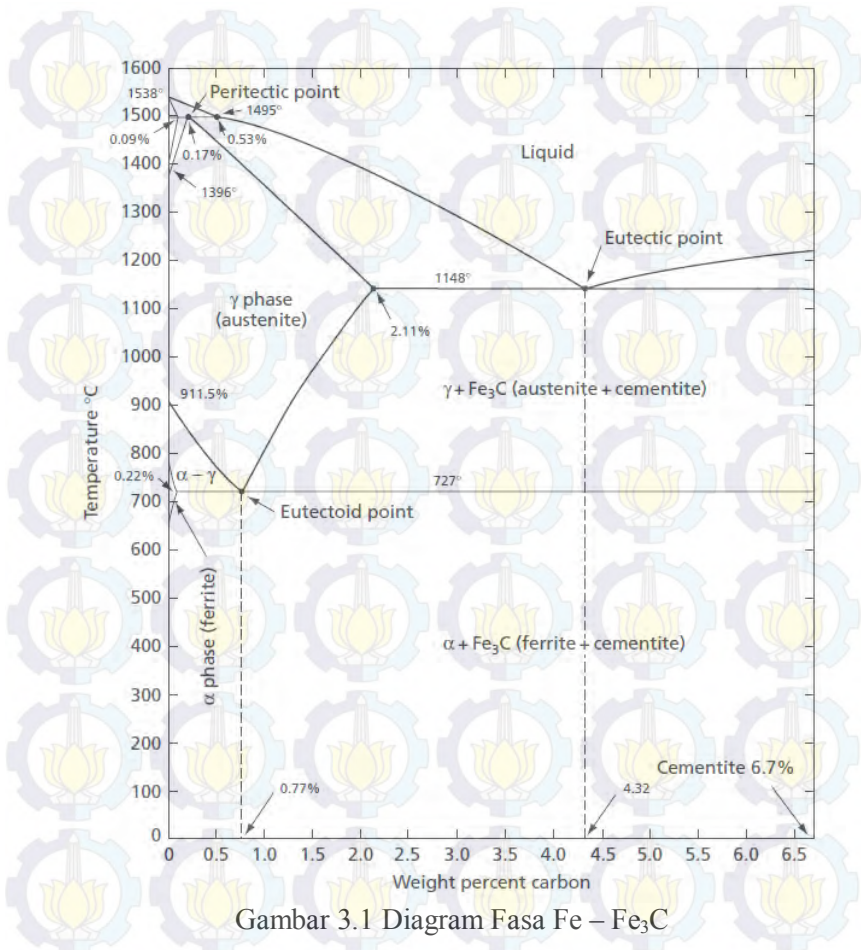
Tabel 2.1 Histori dan Data Perlakuan Panas pada PT.'X'

Quenching		Tempering			Sifat Mekanik					
T. Austenit (°C)	Waktu tahan (jam)	T. Water (°C)	T. Temper (°C)	Waktu tahan (jam)	$\sigma_{uts}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	elong (%)	RA (%)	BHN (Q)	BHN (T)
Spesifikasi Sifat Mekanik					84,37	70,3	14	30		241-311
925	3	31	625	3	73	70	25	47	415	
925	3	31	625	3	86	70	17	37	425	269
925	3	31	625	3	100	86	11	28	333	296
925	3	30	600	3	101	-	14	33	426	305
925	3	31	600	3	91	85	12	28	409	295
925	2	31	600	3	99	-	8	20	415	312

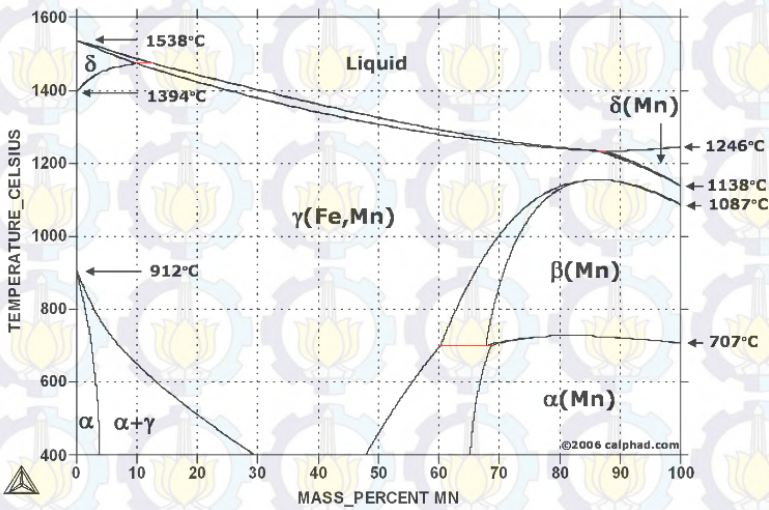
 = Sifat mekanik yang tidak memenuhi standar



### 3. Diagram Fasa Fe -Fe<sub>3</sub>C



#### 4. Diagram Fasa Fe – Mn



Gambar 4.1 Diagram Fasa Fe-Mn

## 5. Penentuan Temperatur Kritis Proses Perlakuan Panas

Tabel 5.1 Komposisi Kimia Baja AAR-M201 Grade E

Unsur	Berat (%)
C, maks 0,32	0,24
Si , maks 1,50	0,49
Mn, maks 1,85	1,6
P , maks 0,04	0,03
S , maks 0,04	0,007
Cr	0,12
Mo	0,18
Cu	0,045
Ni	0,28
Al	0,08
Fe	<i>Balance</i>
CE , maks 0,88	0,67

$$Ac_1(^{\circ}C) = 723 - 20,7(\%Mn) - 16,9(\%Ni) + 29,1(\%Si) - 16,9(\%Cr)$$

$$\text{Standar deviasi} = \pm 11,5^{\circ}C$$

$$Ac_3(^{\circ}C) = 910 - 203 \sqrt{\%C} - 15,2(\%Ni) + 44,7(\%Si) + 104(\%V) + 31,5(\%Mo)$$

$$\text{Standar deviasi} = \pm 16,7^{\circ}C$$

*(ASM Metal Handbook Vol.4-Heat Treatment)*

Perhitungan

$$Ac_1(^{\circ}C) = 723 - 20,7(1,6) - 16,9(0,28) + 29,1(0,49) - 16,9(0,12) = 697,38$$

$$Ac_1(^{\circ}C) = 697,38 \pm 11,5^{\circ}C$$



$$Ac_3(^{\circ}C) = 910 - 203\sqrt{0,24} - 15,2(0,28) + 44,7(0,49) + 104(0) + 31,5(0,18)$$

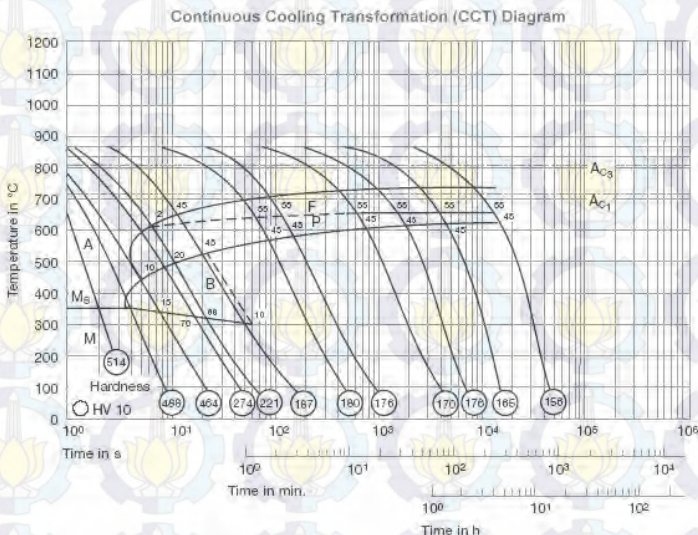
$$= 833,86$$

$$Ac_3(^{\circ}C) = 833,86 \pm 16,7^{\circ}C$$

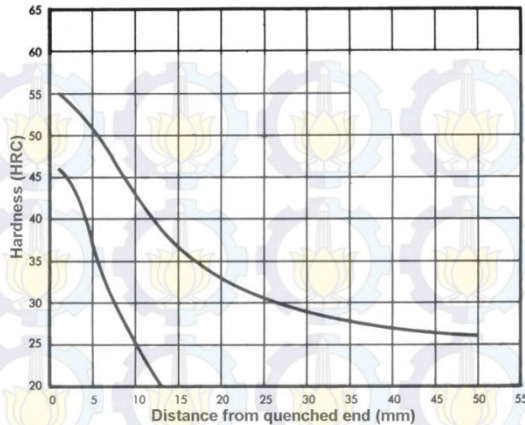
Temperatur austenitisasi =  $Ac_3 + 50^{\circ}C$  (hipoeutektoid)  
 $= 833,86 + 50$   
 $= 883,86^{\circ}C$

Jadi temperatur austenitisasi minimum pada baja AAR-M201 Grade E untuk proses *hardening* adalah  $883,86^{\circ}C$ .

## 6. Diagram Transformasi Pendinginan Kontinu / *Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram* dan Kurva Hardenability baja AAR-M201 Grade E



Gambar 5.1 Diagram CCT baja AAR-M201 Grade E



Gambar 5.2 Kurva Hardenability baja AAR-M201 Grade E

## 7. Penentuan Struktur Mikro setelah *Hardening*

Proses *hardening*

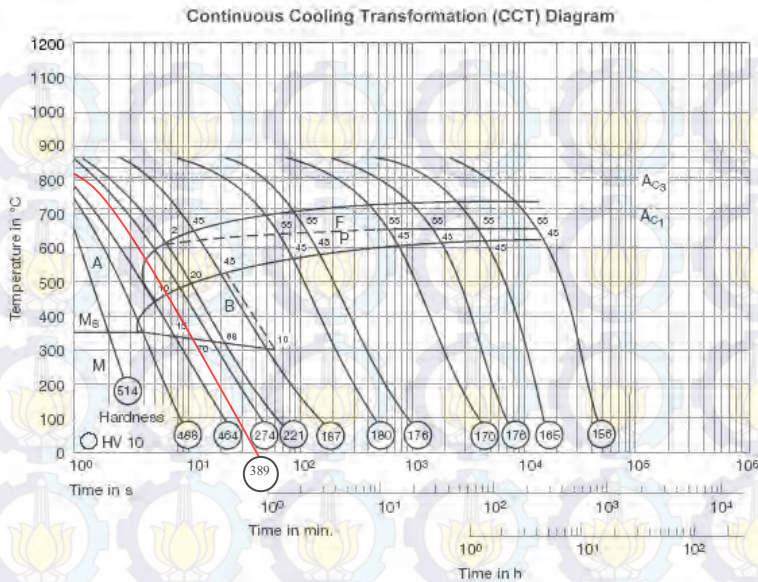
Temperatur austenitisasi = 925°C

Waktu tahan = 45 menit

Media Pendingin = air

Kekerasan setelah *hardening* = 369,23 BHN  
(389 VHN) (39,6 HRC)

Struktur mikro yang terbentuk = Bainit dan perlit



Gambar 6.1 Diagram CCT baja AAR-M201 Grade E, menunjukkan proses pendinginan (*quenching*) menghasilkan struktur mikro bainit dan perlit



## 8. Data Hasil Pengujian Tarik

### 7.1 Spesimen *As-Cast*

Tabel 7.1 Hasil Pengujian Tarik Spesimen *As Cast*

No.	Data Percobaan	Hasil Percobaan
<b>A</b>	<b>Perlakuan</b>	<i>As Cast</i>
<b>B</b>	<b>Dimensi Spesimen</b>	
1	Diameter Spesimen, $\varnothing$ (mm)	12
2	Luas Penampang, $A_0$ (mm <sup>2</sup> )	113,04
3	<i>Gauge Length</i> , $L_0$ (mm)	50
<b>C</b>	<b>Hasil Pengujian</b>	
1	Beban Lumer (kN)	80,2
2	Beban Maksimum (kN)	95,7
3	<i>Gauge Length</i> Setelah Patah, $L_1$ (mm)	54,51
4	Diameter setelah patah, $\varnothing$ (mm)	11,12
5	Luas setelah patah, $A_1$ (mm <sup>2</sup> )	97,069
<b>D</b>	<b>EVALUASI</b>	
1	<i>Yield strength</i> , $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	709,483
2	<i>Tensile strength</i> , $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	846,603
3	<i>Elongation</i> , $\varepsilon$ (%)	9,020
4	<i>Reduction of area</i> , $\delta$ (%)	14,129

Perhitungan

1. Kekuatan Luluh

$$\sigma_y = \frac{\text{Beban lumer}}{\text{Luas penampangmula - mula}}$$
$$\sigma_y = \frac{80200\text{N}}{113,04 \text{ mm}^2} = 709,48 \text{ N/mm}^2$$

2. Kekuatan Maksimum

$$\sigma_u = \frac{\text{Beban maksimum}}{\text{Luas penampangmula - mula}}$$

$$\sigma_u = \frac{95700 \text{ N}}{113,04 \text{ mm}^2} = 846,603 \text{ N/mm}^2$$

3. Elongasi

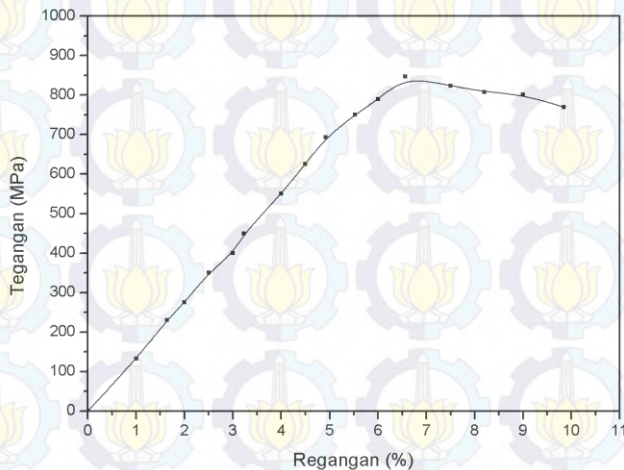
$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{54,51 - 50}{50} \times 100\% = 9,02\%$$

4. Reduksi Area

$$\delta = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

$$\delta = \frac{113,04 - 97,069}{113,04} \times 100\% = 14,129\%$$



Gambar 7.1 Grafik tegangan-regangan pada spesimen *As Cast*

## 7.2 Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit)

Tabel 7.2 Hasil Pengujian Tarik Spesimen *Hardening*

No.	Data Percobaan	Hasil Percobaan
<b>A</b>	<b>Perlakuan</b>	<i>Hardening</i>
<b>B</b>	<b>Dimensi Spesimen</b>	
1	Diameter Spesimen, $\varnothing$ (mm)	12
2	Luas Penampang, $A_0$ (mm <sup>2</sup> )	113,04
3	<i>Gauge Length</i> , $L_0$ (mm)	50
<b>C</b>	<b>Hasil Pengujian</b>	
1	Beban Lumer (kN)	113,050
2	Beban Maksimum (kN)	140,600
3	<i>Gauge Length</i> Setelah Patah, $L_1$ (mm)	52,22
4	Diameter setelah patah, $\varnothing$ (mm)	11,50
5	Luas setelah patah, $A_1$ (mm <sup>2</sup> )	103,816
<b>D</b>	<b>EVALUASI</b>	
1	<i>Yield strength</i> , $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	113,050
2	<i>Tensile strength</i> , $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	1243,808
3	<i>Elongation</i> , $\varepsilon$ (%)	4,44
4	<i>Reduction of area</i> , $\delta$ (%)	8,16

Perhitungan

1. Kekuatan Luluh

$$\sigma_y = \frac{\text{Beban lumer}}{\text{Luas penampang mula - mula}}$$

$$\sigma_y = \frac{113050 \text{ N}}{113,04 \text{ mm}^2} = 1000,088 \text{ N/mm}^2$$

2. Kekuatan Maksimum

$$\sigma_u = \frac{\text{Beban maksimum}}{\text{Luas penampang mula - mula}}$$

$$\sigma_u = \frac{140600 \text{ N}}{113,04 \text{ mm}^2} = 1243,808 \text{ N/mm}^2$$



### 3. Elongasi

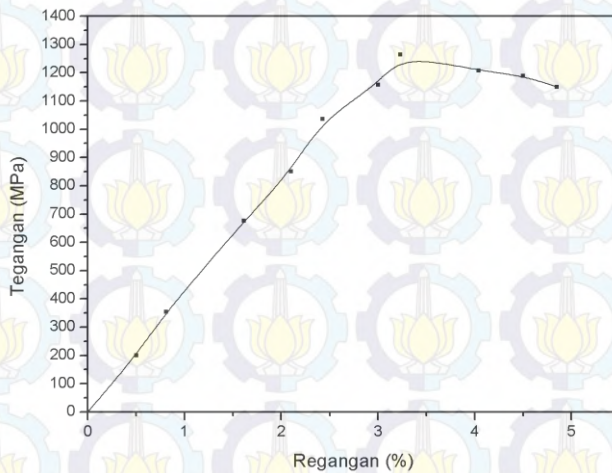
$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{52,22 - 50}{50} \times 100\% = 4,44\%$$

### 4. Reduksi Area

$$\delta = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

$$\delta = \frac{113,04 - 103,816}{113,04} \times 100\% = 8,16\%$$



Gambar 7.2 Grafik tegangan – regangan spesimen *Hardening*

### 7.3 Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (625°C, 45 menit)

Tabel 7.3 Hasil Pengujian Tarik Spesimen *Hardening* dan *Tempering* (625°C, 45 menit)

No.	Data Percobaan	Hasil Percobaan
<b>A</b>	<b>Perlakuan</b>	<i>Hardening + Tempering</i> (625°C, 45 menit)
<b>B</b>	<b>Dimensi Spesimen</b>	
1	Diameter Spesimen, $\varnothing$ (mm)	12
2	Luas Penampang, $A_0$ (mm <sup>2</sup> )	113,04
3	<i>Gauge Length</i> , $L_0$ (mm)	50
<b>C</b>	<b>Hasil Pengujian</b>	
1	Beban Lumer (kN)	69,920
2	Beban Maksimum (kN)	96,100
3	<i>Gauge Length</i> Setelah Patah, $L_1$ (mm)	57,100
4	Diameter setelah patah, $\varnothing$ (mm)	9,950
5	Luas setelah patah, $A_1$ (mm <sup>2</sup> )	77,717
<b>D</b>	<b>EVALUASI</b>	
1	<i>Yield strength</i> , $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	618,542
2	<i>Tensile strength</i> , $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	850,142
3	<i>Elongation</i> , $\varepsilon$ (%)	14,2
4	<i>Reduction of area</i> , $\delta$ (%)	31,248

Perhitungan

1. Kekuatan Luluh

$$\sigma_y = \frac{\text{Beban lumer}}{\text{Luas penampangmula - mula}}$$

$$\sigma_y = \frac{69920 \text{ N}}{113,04 \text{ mm}^2} = 618,542 \text{ N/mm}^2$$

2. Kekuatan Maksimum

$$\sigma_u = \frac{\text{Beban maksimum}}{\text{Luas penampangmula - mula}}$$

$$\sigma_u = \frac{96100 \text{ N}}{113,04 \text{ mm}^2} = 850,142 \text{ N/mm}^2$$

3. Elongasi

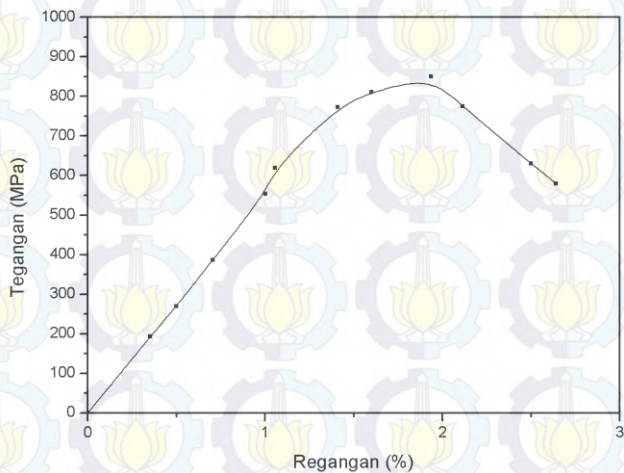
$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{57,1 - 50}{50} \times 100\% = 14,2\%$$

4. Reduksi Area

$$\delta = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

$$\delta = \frac{113,04 - 77,717}{113,04} \times 100\% = 31,25\%$$





Gambar 7.3 Grafik tegangan-regangan Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (625°C, 45 menit)

#### 7.4 Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (650°C, 45 menit)

Tabel 7.4 Hasil Pengujian Tarik Spesimen *Hardening* dan *Tempering* (650°C, 45 menit)

No.	Data Percobaan	Hasil Percobaan
<b>A</b>	<b>Perlakuan</b>	<i>Hardening</i> + <i>Tempering</i> (650°C, 45 menit)
<b>B</b>	<b>Dimensi Spesimen</b>	
1	Diameter Spesimen, $\varnothing$ (mm)	12
2	Luas Penampang, $A_o$ (mm <sup>2</sup> )	113,04
3	<i>Gauge Length</i> , $L_o$ (mm)	50
<b>C</b>	<b>Hasil Pengujian</b>	
1	Beban Lumer (kN)	80,850
2	Beban Maksimum (kN)	100,200
3	<i>Gauge Length</i> Setelah Patah, $L_1$ (mm)	58,3
4	Diameter setelah patah, $\varnothing$ (mm)	10,12
5	Luas setelah patah, $A_1$ (mm <sup>2</sup> )	80,395
<b>D</b>	<b>EVALUASI</b>	
1	<i>Yield strength</i> , $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	715,234
2	<i>Tensile strength</i> , $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	886,412
3	<i>Elongation</i> , $\epsilon$ (%)	16,6
4	<i>Reduction of area</i> , $\delta$ (%)	28,88

Perhitungan

1. Kekuatan Luluh

$$\sigma_y = \frac{\text{Beban lumer}}{\text{Luas penampangmula - mula}}$$

$$\sigma_y = \frac{80850 \text{ N}}{113,04 \text{ mm}^2} = 715,234 \text{ N/mm}^2$$

2. Kekuatan Maksimum

$$\sigma_u = \frac{\text{Beban maksimum}}{\text{Luas penampangmula - mula}}$$

$$\sigma_u = \frac{100200\text{N}}{113,04 \text{ mm}^2} = 886,412 \text{ N/mm}^2$$

3. Elongasi

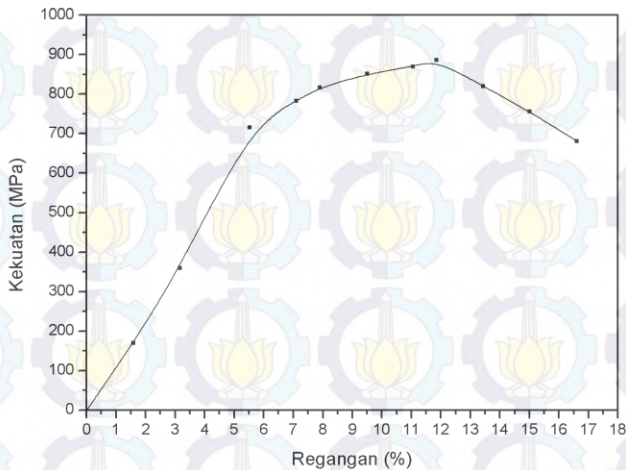
$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{58,3 - 50}{50} \times 100\% = 16,6 \%$$

4. Reduksi Area

$$\delta = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

$$\delta = \frac{113,04 - 80,395}{113,04} \times 100\% = 28,879\%$$



Gambar 7.4 Grafik tegangan-regangan Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (650°C, 45 menit)

### 7.5 Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (675°C, 45 menit)

Tabel 7.5 Hasil Pengujian Tarik Spesimen *Hardening* dan *Tempering* (675°C, 45 menit)

No.	Data Percobaan	Hasil Percobaan
<b>A</b>	<b>Perlakuan</b>	<i>Hardening</i> + <i>Tempering</i> (675°C, 45 menit)
<b>B</b>	<b>Dimensi Spesimen</b>	
1	Diameter Spesimen, $\varnothing$ (mm)	12
2	Luas Penampang, $A_0$ (mm <sup>2</sup> )	113,04
3	<i>Gauge Length</i> , $L_0$ (mm)	50
<b>C</b>	<b>Hasil Pengujian</b>	



1	Beban Lumer (kN)	60,120
2	Beban Maksimum (kN)	73,500
3	Gauge Length Setelah Patah, $L_1$ (mm)	59,100
4	Diameter setelah patah, $\varnothing$ (mm)	9,500
5	Luas setelah patah, $A_1$ (mm <sup>2</sup> )	70,846
<b>D</b>	<b>EVALUASI</b>	
1	<i>Yield strength</i> , $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	531,847
2	<i>Tensile strength</i> , $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	650,212
3	<i>Elongation</i> , $\varepsilon$ (%)	18,20
4	<i>Reduction of area</i> , $\delta$ (%)	37,33

Perhitungan

1. Kekuatan Luluh

$$\sigma_y = \frac{\text{Beban lumer}}{\text{Luas penampangmula - mula}}$$

$$\sigma_y = \frac{60120 \text{ N}}{113,04 \text{ mm}^2} = 531,847 \text{ N/mm}^2$$

2. Kekuatan Maksimum

$$\sigma_u = \frac{\text{Beban maksimum}}{\text{Luas penampangmula - mula}}$$

$$\sigma_u = \frac{73500 \text{ N}}{113,04 \text{ mm}^2} = 650,212 \text{ N/mm}^2$$

3. Elongasi

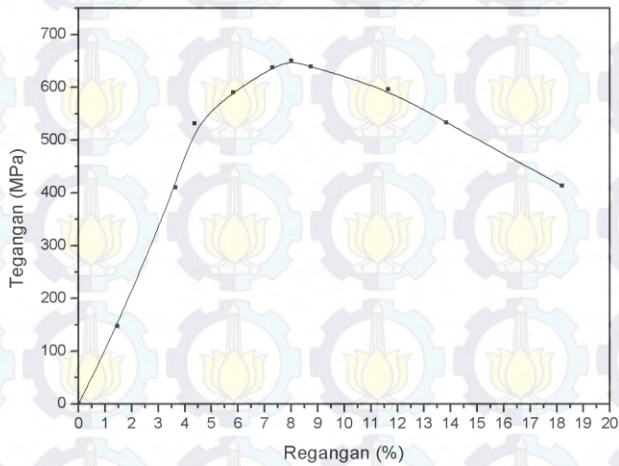
$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{59,1 - 50}{50} \times 100\% = 18,2\%$$

4. Reduksi Area

$$\delta = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

$$\delta = \frac{113,04 - 70,846}{113,04} \times 100\% = 37,326\%$$



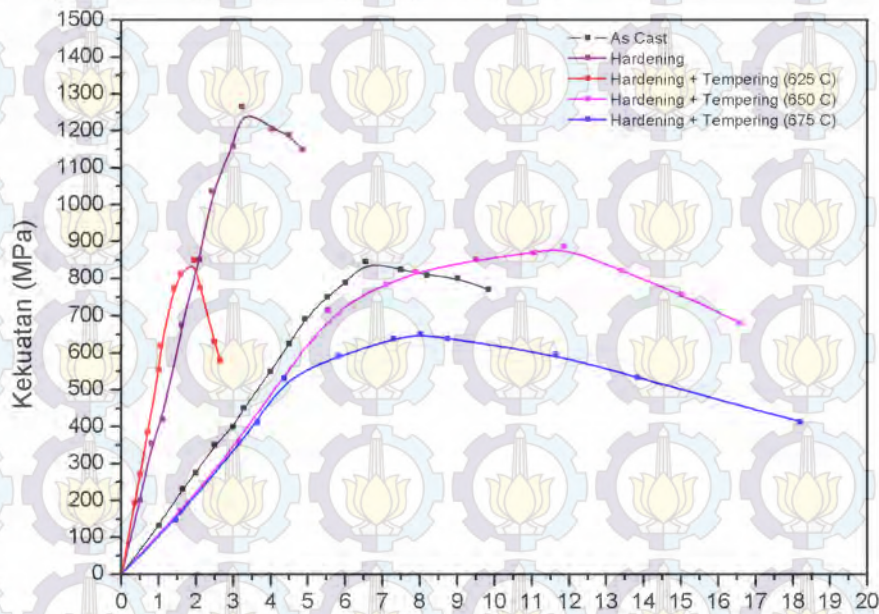
Gambar 7.5 Grafik tegangan-regangan Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (675°C, 45 menit)

## 7.6 Data Gabungan Hasil Pengujian Tarik

Tabel 7.6 Sifat Mekanik Hasil Pengujian Tarik Spesimen *As Cast*, *Hardening*, dan *Hardening-Tempering*

No	Perlakuan	Kekuatan luluh (MPa)	Kekuatan Maksimum (MPa)	% Elongasi	% Reduksi Area
1	<i>As Cast</i>	709,483	846,603	9,020	14,129
2	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit)	1000,088	1243,808	4,440	8,160
3	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (625°C, 45 menit)	618,542	850,142	14,2	31,248
4	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (650°C, 45 menit)	715,234	886,412	16,6	28,879
5	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (675°C, 45 menit)	531,483	650,212	18,2	37,326

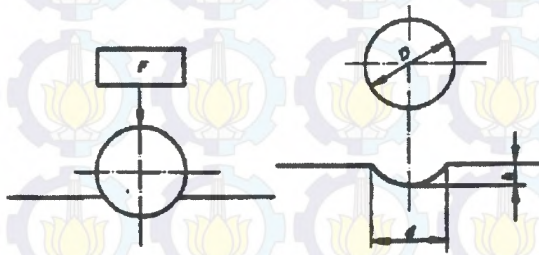




Gambar 7.6 Grafik tegangan – regangan pada spesimen *As Cast*, *Hardening*, dan *Hardening-Tempering*

## 9. Data Hasil Pengujian Kekerasan

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



Gambar 3.1 Prinsip pengujian kekerasan Brinell

$$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

dimana,

P = Beban uji (kgf)

D = Diameter bola indentor (mm)

d = Diameter rata-rata indentasi (mm)

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

## 9.1 Spesimen *As Cast*

Tabel 8.1 Hasil Pengujian Kekerasan Spesimen *As Cast*

Titik	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d (mm)	Kekerasan (BHN)	Kekerasan (HRc)
1	0,938	0,951	0,944 5	257,827	23,64
2	0,987	0,956	0,971	243,128	34,82
3	0,938	0,929	0,933 5	264,184	24,69
4	1,004	1,000	1,002	227,929	20,24
5	1,022	0,966	0,994	231,781	21,13
Rata - Rata					24,90
Standar Deviasi					5,83

## 9.2 Spesimen *Hardening (925°C, 45 menit)*

Tabel 8.2 Hasil Pengujian Kekerasan Spesimen *Hardening*

Titik	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d (mm)	Kekerasan (BHN)	Kekerasan (HRc)
1	0,800	0,796	0,798	365,271	39,36
2	0,853	0,822	0,837	330,697	35,41
3	0,800	0,778	0,789	373,883	40,28
4	0,787	0,756	0,772	391,498	42,15
5	0,796	0,760	0,778	384,817	41,42
Rata - Rata					39,72
Standar Deviasi					2,64



### 9.3 Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (625°C, 45 menit)

Tabel 8.3 Hasil Pengujian Kekerasan Spesimen *Hardening* dan *Tempering* (625°C, 45 menit)

Titik	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d (mm)	Kekerasan (BHN)	Kekerasan (HRC)
1	0,969	0,942	0,955	251,688	24,78
2	0,964	0,920	0,942	259,252	26,21
3	0,898	0,871	0,885	295,433	31,2
4	0,920	0,890	0,905	281,742	29,39
5	0,900	0,921	0,911	278,225	28,9
Rata - Rata					28,096
Standar Deviasi					2,57

### 9.4 Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (650°C, 45 menit)

Tabel 8.4 Hasil Pengujian Kekerasan Spesimen *Hardening* dan *Tempering* (650°C, 45 menit)

Titik	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d (mm)	Kekerasan (BHN)	Kekerasan (HRc)
1	1,000	0,933	0,967	245,758	24,69
2	0,929	0,916	0,923	270,768	27,97
3	0,933	0,916	0,925	269,554	27,79
4	0,964	0,942	0,953	253,065	25,01
5	0,950	0,933	0,942	259,539	26,26
Rata - Rata					26,34

Standar Deviasi	1,52
-----------------	------

### 9.5 Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (675°C, 45 menit)

Tabel 8.5 Hasil Pengujian Kekerasan Spesimen *Hardening* dan *Tempering* (675°C, 45 menit)

Titik	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d (mm)	Kekerasan (BHN)	Kekerasan (HRc)
1	1,036	1,018	1,027	216,464	17,69
2	1,036	1,022	1,029	215,583	17,59
3	1,071	1,027	1,049	208,044	16,67
4	1,040	1,022	1,031	214,707	17,48
5	1,022	1,018	1,020	219,590	18,15
Rata - Rata					17,516
Standar Deviasi					0,54

### 9.6 Data Gabungan Hasil Pengujian

Tabel 8.6 Hasil Pengujian Kekerasan Spesimen *As Cast*, *Hardening*, dan *Hardening-Tempering*

No	Perlakuan	Kekerasan (BHN)	Kekerasan (HRc)	Standar Deviasi
1	<i>As Cast</i>	244,970	24,90	5,83
2	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit)	369,233	39,724	2,63
3	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (625°C, 45 menit)	273,268	28,096	2,57

4	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (650°C, 45 menit)	259,737	26,34	1,52
5	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (675°C, 45 menit)	214,678	17,516	0,54

## 10. Data Hasil Pengujian Impak

### 10.1 Spesimen *As Cast*

Tabel 9.1 Hasil Pengujian Impak Spesimen *As Cast*

No.	Data Percobaan	Hasil Percobaan
	<b>Sebelum Percobaan</b>	
1	Bahan	AAR-M201 Grade E
2	Perlakuan	<i>As Cast</i>
3	Temperatur uji (°C)	- 40
4	Panjang spesimen (A) (mm)	55,2
5	Tebal (B) (mm)	10
6	Lebar (C) (mm)	10
	<b>Saat Percobaan</b>	
7	Sudut awal ( $\alpha$ )	156
8	Sudu akhir ( $\beta$ )	153
9	Energi (E) ( kpm)	0,35
	<b>Sesudah percobaan</b>	
10	Tebal Patahan (D) (mm)	10
11	Tebal sisa patahan (D') (mm)	0



## 10.2 Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit)

Tabel 9.2 Hasil Pengujian Impak Spesimen *Hardening*

No.	Data Percobaan	Hasil Percobaan
	<b>Sebelum Percobaan</b>	
1	Bahan	AAR-M201 Grade E
2	Perlakuan	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit)
3	Temperatur uji (°C)	- 40
4	Panjang spesimen (A) (mm)	54,9
5	Tebal (B) (mm)	9,81
6	Lebar (C) (mm)	10
	<b>Saat Percobaan</b>	
7	Sudut awal ( $\alpha$ )	156
8	Sudu akhir ( $\beta$ )	152
9	Energi (E) (kpm)	0,5
	<b>Sesudah percobaan</b>	
10	Tebal Patahan (D) (mm)	10
11	Tebal sisa patahan (D') (mm)	0

### 10.3 Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (625°C, 45 menit)

Tabel 9.3 Hasil Pengujian Impak Spesimen *Hardening* dan *Tempering* (625°C, 45 menit)

No.	Data Percobaan	Hasil Percobaan
	<b>Sebelum Percobaan</b>	
1	Bahan	AAR-M201 Grade E
2	Perlakuan	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (625°C, 45 menit)
3	Temperatur uji (°C)	- 40
4	Panjang spesimen (A) (mm)	55
5	Tebal (B) (mm)	10
6	Lebar (C) (mm)	10
	<b>Saat Percobaan</b>	
7	Sudut awal ( $\alpha$ )	156
8	Sudu akhir ( $\beta$ )	137
9	Energi (E) (kpm)	2,8
	<b>Sesudah percobaan</b>	
10	Tebal Patahan (D) (mm)	10
11	Tebal sisa patahan (D') (mm)	0

#### 10.4 Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (650°C, 45 menit)

Tabel 9.4 Hasil Pengujian Impak Spesimen *Hardening* dan *Tempering* (650°C, 45 menit)

No.	Data Percobaan	Hasil Percobaan
	<b>Sebelum Percobaan</b>	
1	Bahan	AAR-M201 Grade E
2	Perlakuan	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (650°C, 45 menit)
3	Temperatur uji (°C)	- 40
4	Panjang spesimen (A) (mm)	55
5	Tebal (B) (mm)	9,7
6	Lebar (C) (mm)	10
	<b>Saat Percobaan</b>	
7	Sudut awal ( $\alpha$ )	156
8	Sudu akhir ( $\beta$ )	128
9	Energi (E) ( kpm)	4,4
	<b>Sesudah percobaan</b>	
10	Tebal Patahan (D) (mm)	8,6
11	Tebal sisa patahan (D') (mm)	1,1



### 10.5 Spesimen *Hardening* (925°C, 45 menit) dan *Tempering* (675°C, 45 menit)

Tabel 9.5 Hasil Pengujian Impak Spesimen *Hardening* dan *Tempering* (675°C, 45 menit)

No.	Data Percobaan	Hasil Percobaan
	<b>Sebelum Percobaan</b>	
1	Bahan	AAR-M201 Grade E
2	Perlakuan	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (675°C, 45 menit)
3	Temperatur uji (°C)	- 40
4	Panjang spesimen (A) (mm)	54,5
5	Tebal (B) (mm)	10
6	Lebar (C) (mm)	10
	<b>Saat Percobaan</b>	
7	Sudut awal ( $\alpha$ )	156
8	Sudu akhir ( $\beta$ )	131
9	Energi (E) (kpm)	3,9
	<b>Sesudah percobaan</b>	
10	Tebal Patahan (D) (mm)	9,7
11	Tebal sisa patahan (D') (mm)	0,3

## 10.6 Data Gabungan Hasil Pengujian

Tabel 9.6 Hasil Pengujian Kekerasan Spesimen *As Cast*, *Hardening*, dan *Hardening-Tempering*

No	Perlakuan	Energi Impak (Joule)
1	<i>As Cast</i>	3,432
2	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit)	4,903
3	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (625°C, 45 menit)	27,458
4	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (650°C, 45 menit)	43,149
5	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit) <i>Tempering</i> (675°C, 45 menit)	38,245

## 11. Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E

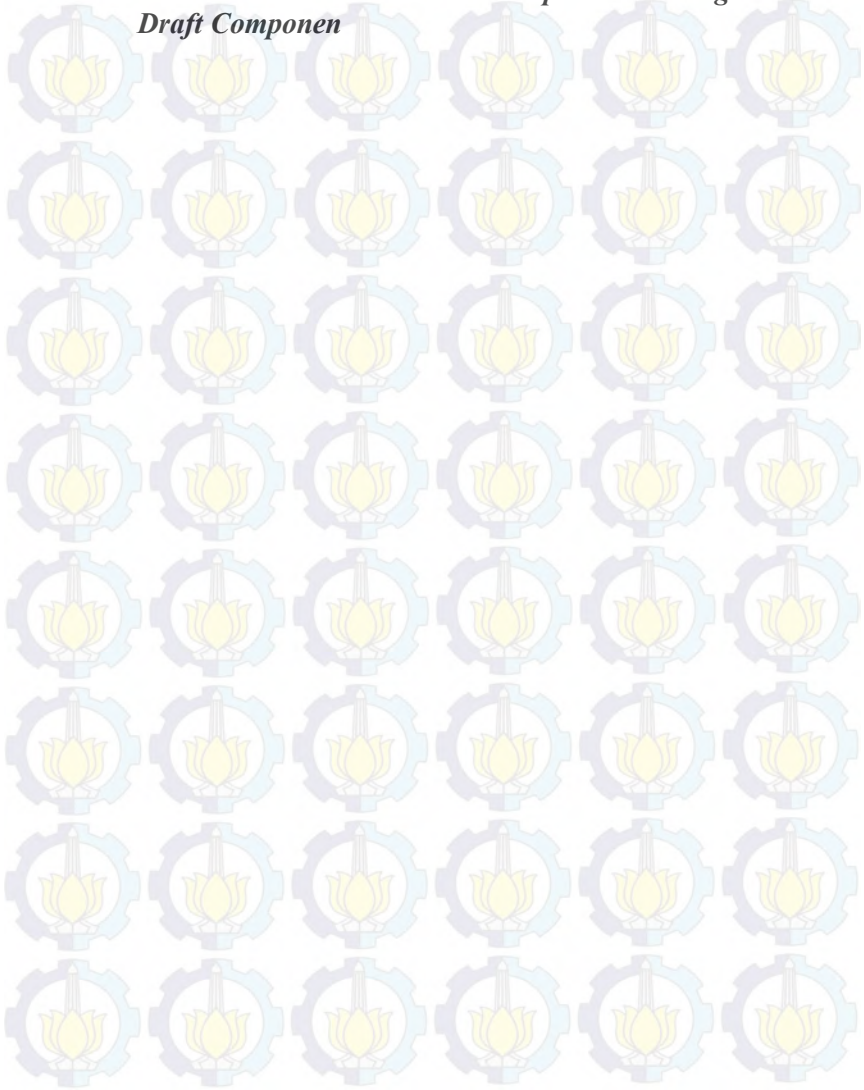
Tabel 10.1 Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E Hasil Perlakuan Panas

No	Perlakuan	Kekuatan Luluh (MPa)	Kekuatan Maksimum (MPa)	Persen Elongasi (%)	Persen Reduksi Area (%)	Kekerasan (HRc)	Energi Impak (Joule)
		689,645	827,67	14	30	22,8-32,9	27
1	<i>As Cast</i>	709,483	846,603	9,02	14,13	24,90	3,432
2	<i>Hardening</i> (925°C, 45 menit)	1000,088	1243,308	4,44	8,16	39,72	4,903
3	<i>Hardening + Tempering</i> (625°C, 45 menit)	618,542	850,142	14,2	31,25	28,09	27,458
4	<i>Hardening + Tempering</i> (650°C, 45 menit)	715,234	886,412	16,6	28,88	26,34	43,149
5	<i>Hardening + Tempering</i> (675°C, 45 menit)	531,483	650,212	18,2	37,33	17,52	38,245

 = Sifat mekanik yang tidak memenuhi spesifikasi AAR-M201



**12. Standarisasi AAR-M201 ( *AAR Manual of Standards and Recommended Practices Couplers and Freigh Car Draft Componen* )**





## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Lumajang pada tanggal 29 Agustus 1993. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara pasangan Nurhalim dan Bahriyah. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di MI Salafiyah- Pandanwangi, SMP Negeri 1 Tempeh, dan SMA Negeri 2 Surabaya. Setelah lulus SMA pada tahun 2011 penulis diterima di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur

SNMPTN Tulis 2011.

Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi baik di dalam maupun di luar kampus. Penulis pernah menjabat sebagai Staff Divisi Aplikatif BSO *Material Techno Club* (MTC) HMMT FTI- ITS tahun kepengurusan 2012/2013, dan Direktur BSO *Material Techno Club* (MTC) HMMT FTI-ITS tahun kepengurusan 2013/2014. Selain itu, penulis sempat aktif sebagai asisten matakuliah Mekanika Teknik, Matematika Rekayasa, Kimia Dasar dan juga sebagai asisten Laboratorium Metalurgi Teknik Material dan Metalurgi.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT Krakatau Steel pada bulan Juli 2014. Selama kerja praktek penulis menangani analisa karakterisasi metalografi pada baja KIA di divisi *Research and Development* PT. Krakatau Steel.

Tugas akhir yang diambil penulis dalam bidang Metalurgi Manufaktur berjudul “Analisa Pengaruh Temperatur *Tempering* terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik pada Baja AAR-M201 Grade E.”

*Email: ghulamisaqkhan@gmail.com*



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

Mochammad Ghulam Isaq Khan, Rochman Rochiem, dan Wikan Jatimurti.

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri,

Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

*e-mail*: rochman@mat-eng.its.ac.id

Institut

**Abstrak**– Baja paduan banyak digunakan pada konstruksi komponen-komponen kereta api. Baja yang umum digunakan adalah baja paduan mangan (*manganese steel*) dengan seri penamaan baja AAR-M201. Struktur mikro pada suatu baja paduan tergantung pada beberapa variabel seperti unsur paduan, konsentrasi unsur paduan, dan proses perlakuan panas. Pada penelitian ini menggunakan baja AAR-M201 Grade E as cast, perlakuan hardening, dan perlakuan hardening-tempering. Hardening dilakukan pada temperatur austenitisasi 925°C, selama 45 menit, dan media pendingin air. Hardening-tempering dilakukan pada temperatur tempering 625,650, dan 675°C, selama 45 menit. Temperatur tempering mempengaruhi struktur mikro baja AAR-M201 Grade E, dengan terbentuknya struktur mikro yaitu bainit temper, berupa bilah-bilah ferit dan partikel-partikel karbida sementit ( $Fe_3C$ ). Peningkatan temperatur tempering menghasilkan struktur bainit temper yang semakin kasar dan karbida sementit semakin banyak. Temperatur tempering mempengaruhi sifat mekanik baja AAR-201 Grade E. Peningkatan temperatur tempering, menurunkan kekuatan luluh, kekuatan maksimum, kekerasan dan meningkatkan keuletan dan energi impact.

**Kata kunci:** baja AAR-M201 Grade E, struktur mikro, sifat mekanik, temperatur *tempering*

## I. PENDAHULUAN

Baja paduan banyak digunakan pada konstruksi komponen-komponen kereta api. Baja yang umum digunakan adalah baja paduan mangan (*manganese steel*) dengan seri penamaan baja AAR-M201. Baja ini memiliki grade A,B,C,D, dan E sesuai spesifikasi komposisi kimia dan sifat mekanik yang telah ditentukan oleh *AAR Manual of Standards and Recommended Practices Couplers and Freight Car Draft Components*.

Pada penelitian ini menggunakan baja AAR-M201 Grade E dengan perlakuan panas yang digunakan adalah *quenching* dan *tempering*. Proses perlakuan panas pada baja AAR-M201 Grade E, seringkali menghasilkan sifat mekanik yang tidak sesuai dengan standar. Hal ini disebabkan karena parameter perlakuan panas yang digunakan tidak sesuai. Pada penelitian ini akan membahas mengenai pengaruh temperatur *tempering* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E. Latar belakang

pemilihan parameter temperatur *tempering*, mengacu pada data referensi perlakuan panas *quenching* dan *tempering* yang menghasilkan sifat mekanik kurang sesuai. Berdasarkan data tersebut, dilakukan penelitian dengan variasi temperatur *tempering* untuk memperoleh sifat mekanik yang sesuai standar *AAR Manual of Standards and Recommended Practices Couplers and Freight Car Draft Components*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh temperatur *tempering* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik pada baja AAR-M201 Grade E.

## II. METODE PENELITIAN

Baja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja cor AAR-M201 Grade E, baja berupa *Y-block* sesuai standar JIS 5101 dengan komposisi kimia seperti pada Tabel 1.

Perlakuan panas dilakukan dengan melakukan *hardening* pada temperatur 925°C selama 45 menit kemudian didinginkan cepat dengan media air, lalu dilakukan pemanasan kembali (*tempering*) pada temperatur

Tabel 1.  
Komposisi kimia baja AAR-M201 Grade E

Unsur	C	Si	Mn	P	S	Cr
wt (%)	0,24	0,49	1,6	0,03	0,007	0,12
Unsur	Mo	Cu	Ni	Al	Fe	CE
wt (%)	0,18	0,045	0,28	0,08	<i>Balance</i>	0,67

625,650,dan 675°C, ditahan selama 45 menit dan didinginkan dimedia udara.

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E awal dan setelah dilakukan proses perlakuan panas. Sifat mekanik yang akan ditinjau adalah kekuatan luluh, kekuatan maksimum, elongasi, dan reduksi area.

Pengujian kekerasan dilakukan untuk menentukan kekerasan baja AAR-M201 Grade E , pengujian kekerasan menggunakan metode Brinell dengan pembebanan uji dilakukan pada 187,5 kgf.

Pengujian impact digunakan untuk mengetahui berapa energi yang dibutuhkan untuk mematahkan benda kerja/spesimen. Pengujian impact yang dilakukan menggunakan metode *Charpy*, dilakukan pada temperatur -40°C. Pola patahan hasil pengujian impact diamati



menggunakan mikroskop stereo untuk menganalisis fraktografi patahan.

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik. Etsa yang digunakan untuk mendeteksi struktur mikro yang terbentuk adalah etsa pikral. Pengamatan dilakukan pada perbesaran 1000X.

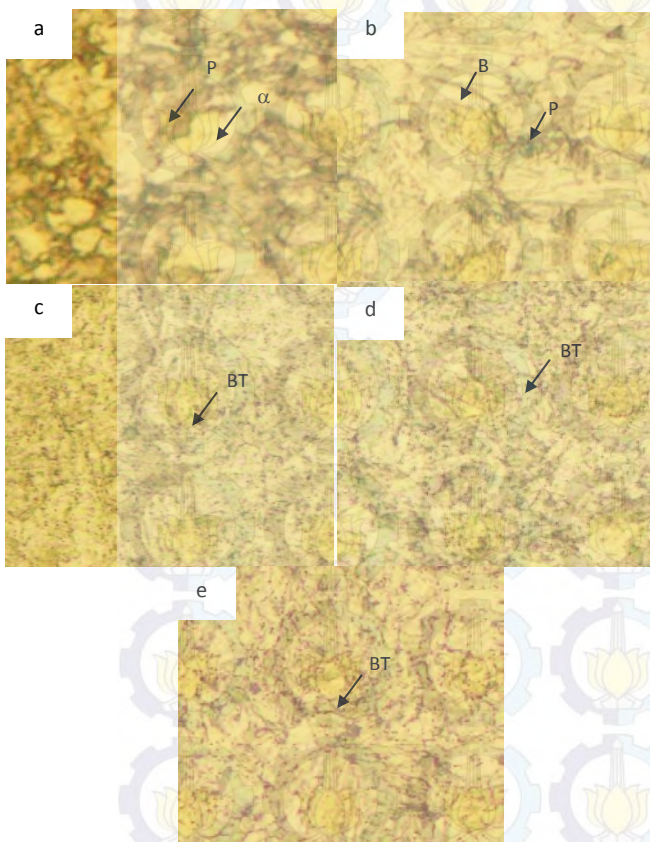
### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Pengamatan Struktur Mikro

Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E seperti pada Gambar 1. Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E *as cast* berupa ferit dan perlit, seperti pada Gambar 1.a. Setelah di-*hardening*, temperatur austenitisasi 925°C, 45 menit, media pendingin air, struktur mikronya adalah bainit, terdiri dari bilah ferit dan sementit ( $Fe_3C$ ), seperti pada Gambar 1.b.. Pada perlakuan *tempering* pada variasi temperatur 625,650,dan 675°C, masing-masing 45 menit, struktur mikro yang terbentuk adalah bainit temper, seperti pada Gambar 1.c,1.d,dan 1.e. Bainit temper terdiri dari matriks ferit dan partikel sementit ( $Fe_3C$ ).

#### B. Kekuatan Luluh dan Kekuatan Maksimum

Kekuatan luluh dan kekuatan maksimum baja AAR-M201 Grade E dipengaruhi temperatur *tempering*. Pada Gambar 2, ditunjukkan pengaruh kondisi baja pada kekuatan luluh dan kekuatan maksimum. Kekuatan luluh dan kekuatan

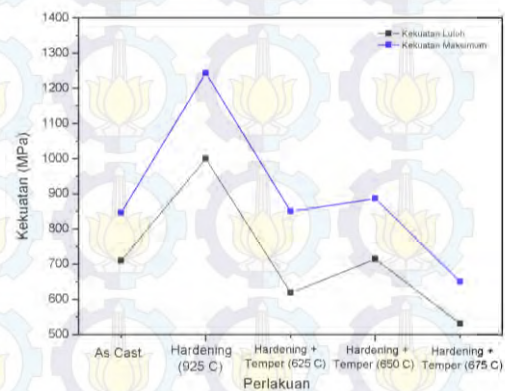


Gambar.1.Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E (a) *as cast*, berupa ferit dan perlit (b) *hardening*, temperatur austenitisasi 925°C,45 menit, media air, berupa bainit dan perlit (c) *hardening-tempering* pada 625°C, 45 menit , berupa bainit temper (d) *hardening-tempering* pada 650°C, 45 menit, berupa bainit temper (e) *hardening-tempering* pada 675°C, 45 menit, berupa bainit temper. Pembesaran 1000X.

maksimum baja *as cast* adalah 709,48 MPa dan 846,603 MPa, ketika baja di-*hardening* terjadi peningkatan sampai 1000,08 MPa dan 1243,3 MPa. Ketika baja yang telah di-*hardening*, ditemper pada 625°C kekuatan luluh dan maksimum berkurang menjadi 618,5 MPa dan 850 MPa, ketika ditemper pada 650°C menjadi 715,23 MPa dan 886,4 MPa, dan ketika ditemper pada 675°C menjadi 531,48 MPa dan 650,212 MPa. Kekuatan luluh dan kekuatan maksimum terbesar diperoleh saat baja di-*hardening* dan nilainya berkurang ketika diberi perlakuan *tempering*.

#### C. Keuletan

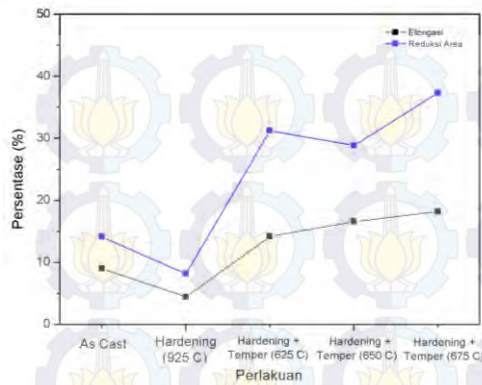
Keuletan menyatakan kemampuan suatu material untuk berdeformasi secara plastis tanpa terjadi patah. Keuletan pada baja AAR-M201 Grade E, dievaluasi dari nilai persentase



Gambar. 2. Pengaruh kondisi *as cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap kekuatan luluh dan kekuatan maksimum pada baja AAR-M201 Grade E

elongasi dan persentase reduksi area. Pada Gambar 3, ditunjukkan hubungan perlakuan baja AAR-M201 Grade E, terhadap keuletan (persentase elongasi dan reduksi area). Keuletan baja setelah dilakukan pengerasan turun secara signifikan, dan ketika baja yang telah dikeraskan ditemper, terjadi peningkatan nilai keuletan. Keuletan baja setelah ditemper meningkat secara signifikan. Peningkatan temperatur *tempering* mulai dari 625°C sampai 675°C, cenderung meningkatkan nilai keuletan secara bertahap dan kontinu, mulai dari persentase elongasi 14,2-18,2 % dan persentase reduksi area 31,25 – 37,33%.

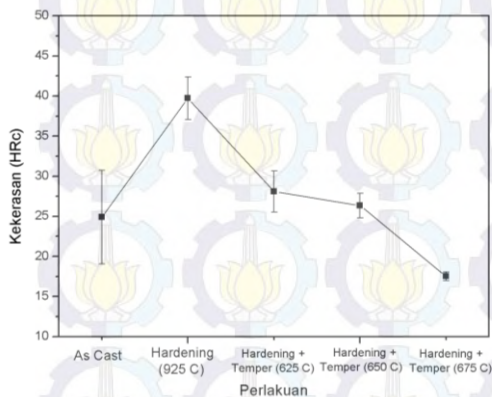




Gambar 3. Pengaruh kondisi *as cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap keuletan (persentase elongasi dan reduksi area) pada baja AAR-M201 Grade E

#### D. Kekerasan

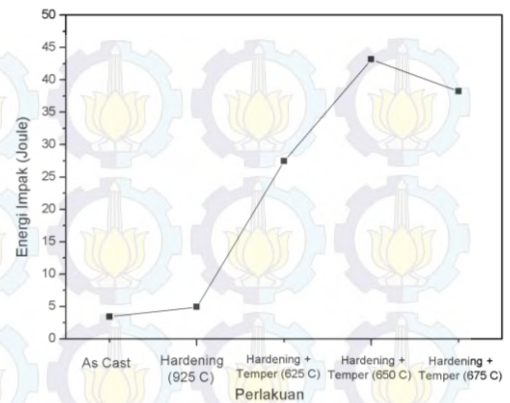
Kekerasan baja AAR-M201 Grade E dipengaruhi temperatur *tempering*. Pada Gambar 4, ditunjukkan pengaruh kondisi baja pada kekerasan. Kekerasan baja *as cast* adalah 24,9 HRC, ketika baja di-*hardening* terjadi peningkatan sampai 39,72 HRC. Ketika baja yang telah di-*hardening*, ditemper pada 625°C kekerasan berkurang menjadi 28,09 HRC, ketika ditemper pada 650°C menjadi 26,34 HRC, dan ketika ditemper pada 675°C menjadi 17,52 HRC. Kekerasan terbesar diperoleh saat baja di-*hardening* dan nilainya berkurang secara bertahap ketika diberi perlakuan *tempering*.



Gambar 4. Pengaruh kondisi *as cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap kekerasan pada baja AAR-M201 Grade E

#### E. Ketangguhan Impak

Ketangguhan impak dinyatakan dengan besar energi yang diperlukan untuk mematahkan material uji. Energi impak memberi indikasi pada energi yang diperlukan untuk inisiasi dan perambatan retak. Pada Gambar 5, energi impak baja *as cast* dan *hardening* adalah 3,43 J dan 4,9 J. Ketika dilakukan *tempering* pada temperatur 625°C, energi impak meningkat menjadi 27,45 J. Peningkatan temperatur *tempering* sampai 675°C, meningkatkan nilai energi impak secara bertahap dan kontinu sampai 38,245 J.



Gambar 4. Pengaruh kondisi *as cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering* terhadap energi impak pada baja AAR-M201 Grade E.

#### F. Evaluasi Hasil Sifat Mekanik

Sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E pada kondisi *as cast*, *hardening*, dan *hardening-tempering*, seperti pada Tabel 2.

Tabel 2.  
Sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E setelah perlakuan panas

Per- lakuan	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	El. (%)	RA (%)	Ke- kerasa n (HRC)	E. Impak (Joule)
<i>As cast</i>	709,5	846,6	9,02	14,13	24,9	3,43
H*	1000	1243,3	4,44	8,16	39,72	4,90
H+T** 625°C	618,5	850,14	14,2	32,25	28,09	27,46
H+T 650°C	715,2	886,41	16,6	28,88	26,34	43,15
H+T 675°C	531,5	650,21	18,2	37,33	17,52	38,25

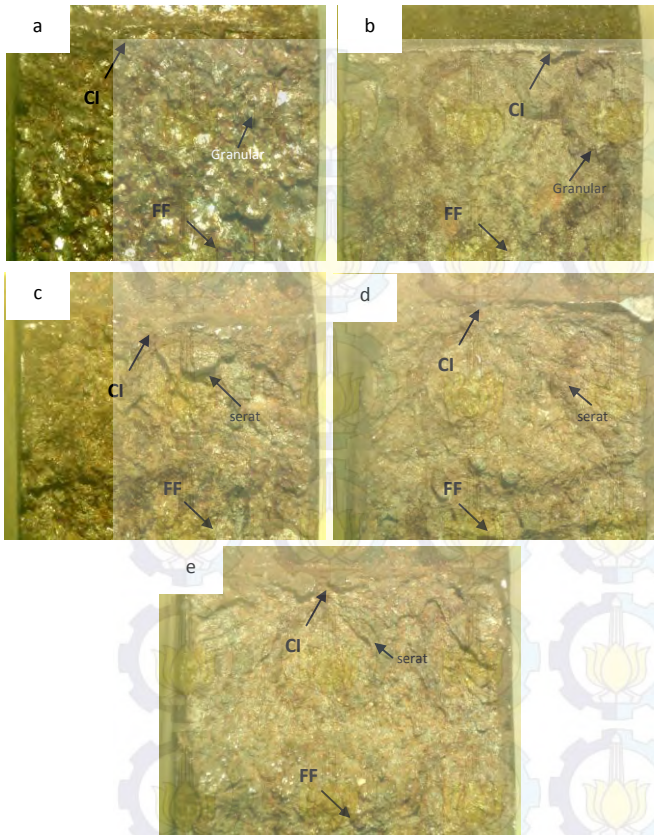
H\*- *Hardening*, temperatur austenitisasi 925°C, 45 menit, media pendingin air.

#### G. Pengamatan Fraktografi

Pengamatan fraktografi digunakan untuk mengamati pola patahan pada hasil pengujian impak. Fraktografi pada permukaan patahan benda uji *charpy* dapat menunjukkan karakteristik ketangguhan impak material tersebut, dan secara tidak langsung struktur mikro. Penampang pola patahan impak baja AAR-M201 Grade E, seperti pada Gambar 5. Pola patahan baja AAR-M201 Grade E *as cast*, merupakan jenis patahan getas, ditunjukkan dengan banyak granular-granular yang terbentuk dan facet permukaan patah belah datar yang memperlihatkan pantulan cahaya. Pada baja *hardening*, menghasilkan pola patahan getas ditunjukkan dengan patahan yang cenderung datar dan sedikit memantulkan pantulan cahaya. Pada baja *hardening-tempering*, pola patahan yang dihasilkan cenderung ulet, ditunjukkan patahan yang berserat dan terdiri dari dimpel yang menyerap cahaya. Peningkatan temperatur *tempering* menghasilkan pola patahan dengan *radial mark* yang cenderung lebih halus. Hal ini mengindikasikan ketangguhan impak yang semakin meningkat.

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





Gambar. 5. Mikrografi mikroskop stereo pada permukaan impak charpy pada baja AAR-M201 Grade E (a) *as cast* (b) *hardening* (c) *hardening-tempering* pada 625°C (d) *hardening-tempering* pada 650°C (e) *hardening-tempering* pada 675°C. Temperatur uji -40°C, CI (*Crack Initiation*), FF (*Final Fracture*)

Pada kondisi *as cast* struktur mikro yang terbentuk adalah ferit dan perlit, hal ini karena proses pendinginan saat kondisi *as cast* berlangsung secara lambat, sehingga transformasi fasa yang terjadi dari austenit menjadi ferit dan sementit. Proses transformasi austenit berlangsung melalui mekanisme difusi. Atom-atom karbon dari austenit disekitar inti sementit berdifusi keluar dan bergabung dengan inti sementit yang ada. Kadar karbon austenit disekitar sementit menjadi sangat rendah sehingga menjadi ferit. Proses ini akan berlangsung terus menerus sehingga diperoleh struktur perlit yang berlamel-lamel. Lamel-lamel akan semakin rapat bila transformasi berlangsung pada temperatur yang lebih rendah [1]

Pada perlakuan *hardening*, struktur mikro yang terbentuk adalah perlit dan bainit. Struktur mikro perlit terbentuk karena laju pendinginan selama *hardening* masih memungkinkan terjadi transformasi austenit menjadi perlit. Struktur mikro bainit terdiri dari agregat-agregat bilah ferit dan partikel-partikel sementit ( $Fe_3C$ ) [2]. Transformasi bainit terjadi pendinginan yang cepat austenit menjadi bainit. Pendinginan cepat dengan media air, mengakibatkan transformasi austenit menjadi bainit. Pada proses transformasinya, austenit mengalami *driving force* yang besar untuk berubah dari FCC (*Face Centered Cubic*) menjadi BCC (*Body Centered Cubic*), *driving force* ini mengakibatkan atom-atom akan tergeser sehingga menjadi BCC dan terbentuk ferit. Karbon yang tidak mampu

dilarutkan ferit akan berdifusi keluar membentuk kabad. Austenit yang bertransformasi menjadi ferit dan karbonnya berdifusi keluar sehingga diperoleh struktur berupa bilah-bilah ferit yang didalamnya terdapat platelet dengan arah hampir sejajar dengan sumbu pertumbuhannya. Struktur mikro bainit yang terbentuk pada baja ini adalah bainit atas. Bainit atas terdiri dari kluster bilah-bilah ferit yang terhubung satu sama lain dan memiliki orientasi kristalografi yang identik. Partikel sementit yang memanjang berada dibujur bilah ini, jumlah dan kontinuitas layer sementit dipengaruhi oleh kadar karbon baja [2].

Pada proses *tempering*, dilakukan proses pemanasan pada temperatur *tempering* 625, 650, dan 675°C, struktur mikro yang terbentuk adalah bainit temper. Bainit temper terdiri dari bilah ferit dan partikel-partikel karbida sementit ( $Fe_3C$ ). Peningkatan temperatur *tempering* akan meningkatkan ukuran bilah ferit dan meningkatkan jumlah partikel sementit. Hal ini karena peningkatan temperatur *tempering* mengakibatkan difusi unsur C dari ferit jenuh (bilah bainit) menuju austenit, kemudian presipitasi karbida pada bainit ferit, selain itu terjadi presipitasi karbida dari austenit yang kaya (dekomposisi austenit), selain itu semakin tinggi temperatur *tempering* maka ada *recovery* pada substruktur yang terdislokasi [2].

#### I. Pengaruh Temperatur Tempering terhadap Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E

Sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E dipengaruhi oleh struktur mikro yang dihasilkan dari perlakuan panas. Pada kondisi *as cast* struktur mikro yang terbentuk adalah ferit dan perlit. Perlit memberikan kontribusi kekuatan pada baja. Selain itu pengaruh unsur paduan (1,8% Mn) meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja.

Struktur mikro yang dihasilkan dari proses *hardening* adalah bainit dan perlit. Sifat mekanik yang dihasilkan memiliki kekuatan dan kekerasan yang relatif besar, keuletan dan energi impak yang relatif lebih kecil, apabila dibandingkan dengan baja pada kondisi *as cast* dan *hardening-tempering*. Bainit memiliki karakteristik seperti bilah, mirip deformasi *twin* dan plat martensit. Pembentukan bilah bainit diikuti oleh distorsi permukaan sehingga dapat disimpulkan terjadi pergeseran kisi. Peningkatan kekuatan dan kekerasan melalui mekanisme penguatan deformasi [3].

Pada *tempering* bainit variasi sifat mekanik dipengaruhi oleh poligonal ferit dan granular bainit. Ketika temperatur *tempering* meningkat maka dislokasi pada bilah bainit akan berubah menjadi poligonal selain itu bilah bainit bersatu sehingga lebarnya meningkat [4]. Peningkatan temperatur *tempering* juga memungkinkan adanya relaksasi regangan yang diakomodasi. Relaksasi ini memungkinkan bainit untuk bersatu dan tumbuh [3].

Kekuatan dan kekerasan pada setiap tahap *tempering* berhubungan dengan ruang antar partikel, ukuran butir, ukuran partikel dan distribusi, dan densitas dislokasi. Kekerasan dan kekuatan tarik pada struktur mikro awal bainit akan berkurang selama *tempering* [3]. Hal ini karena rekristalisasi ferit dan pengasaran bilah bainit (ukuran membesar) sehingga mengakibatkan kekuatan dan kekerasan berkurang secara perlahan [4].



Proses *tempering* akan mengakibatkan pelepasan tegangan internal selain itu merelaksasi dislokasi pada substruktur bainit sehingga mempersilahkan atom-atom untuk menyusun dirinya kembali [5]. Peningkatan temperatur *tempering* akan mengakibatkan konsentrasi bilah ferit/ bainit temper berkurang dan keberadaan bilah ferit (bainit) semakin kasar dan partikel karbida, hal ini akibat difusi atom karbon dan pergerakan dislokasi oleh *thermal assistance* [6]. Hal ini mengakibatkan keuletan meningkat, selain itu kekuatan luluh dan kekuatan maksimum berkurang.

Pada baja AAR-M201 Grade E *hardening* menunjukkan pola patahan getas. patahan belah yang cenderung datar dan sedikit mampu memberikan daya pantul cahaya. Hal ini dipengaruhi oleh struktur mikro yang terbentuk yaitu bainit dan perlit, yang menghasilkan kekuatan tinggi dan ketangguhan impact yang rendah.

Pada baja AAR-M201 Grade E *hardening-tempering* menunjukkan pola patahan ulet. Patahan yang terbentuk berserat dan terdiri dari dimpel yang menyerap cahaya. *Radial mark* yang dihasilkan menjadi bentuk yang lebih halus seiring peningkatan temperatur *tempering*. Hal ini mengindikasikan ketangguhan impact yang semakin meningkat.

#### IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Temperatur *tempering* mempengaruhi struktur mikro baja AAR-201 Grade E setelah *hardening*, dengan terbentuknya struktur mikro bainit temper, berupa ferit poligonal dan karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Peningkatan temperatur *tempering* menghasilkan struktur bainit temper yang semakin kasar dan karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) semakin banyak. Temperatur *tempering* mempengaruhi sifat mekanik baja AAR-201 Grade E. Peningkatan temperatur *tempering* menurunkan kekuatan luluh, kekuatan maksimum, kekerasan dan meningkatkan keuletan dan energi impact.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] K.E.Thelning, *Steel and Its Heat Treatment*. Oxford : Butterworth-Heinemann (1984),
- [2] H.K.D.H.Bhadeshia, *Bainite in Steels : Transformations, Microstructure and Properties 2<sup>nd</sup> Edition*. London : IOM Communication Ltd (2001).
- [3] R.Abbaschian, L. Abbaschian and R.Hill. 2009. *Physical Metallurgy Principles, Fourth Edition*. Stanford : Cengage Learning (2009).
- [4] Rui Feng, Sheng Li, Zhenshun Li, Lei Tian, "Variations of Microstructure and Properties of 690 MPa Grade Low Carbon Bainitic Steel after Tempering," *Material Science and Engineering*, Vol 558(2012) 205-210.
- [5] L.H. Ying, H. J.Dong, L. Jun, C. Guang, S. X.Jie. 2013, "Effect of Tempering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 6150 Steel," *Journal Central South University*, Vol 30(2013) 866-870.
- [6] A. L. Gurland, "Effect of Internal Boundaries on the Yield Strengths of Spheroidized Steel," *Metallurgical and Material Transaction*, Vol 7(1976) 191-197.



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

Mochammad Ghulam Isaq Khan  
2711100089

Dosen Pembimbing  
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.  
Wikan Jatimurti S.T.,M.Sc.



# PENDAHULUAN

Latar Belakang

Rumusan Masalah

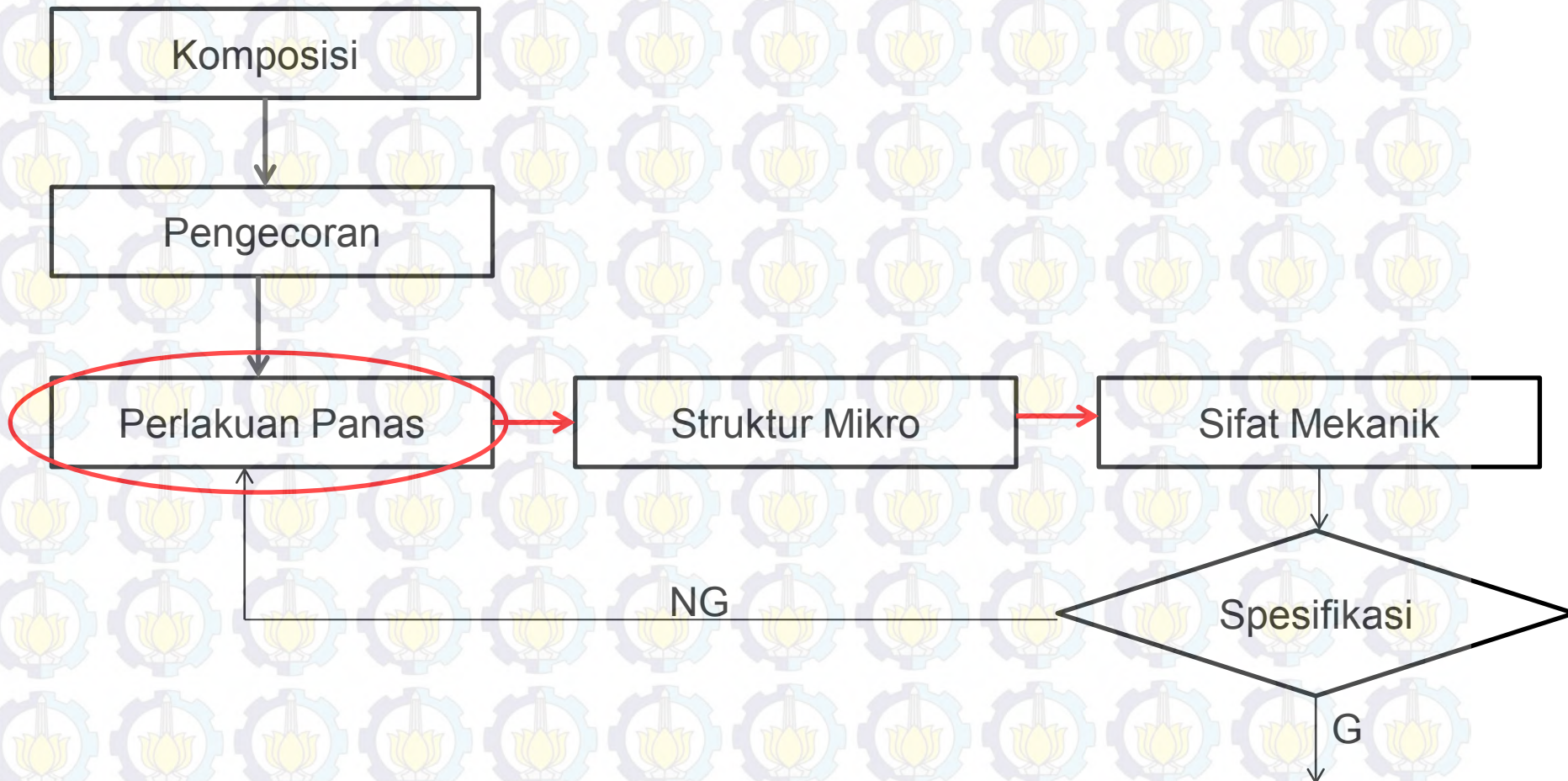
Tujuan

Batasan Masalah

Manfaat Peneitian

# Latar Belakang

- Dalam konteks manufaktur baja AAR-M201 Grade E





# Data Perlakuan Panas dan Hasil Pengujian

Hardening			Tempering		Sifat Mekanik					
Temp. aust (C)	Waktu tahan (jam)	T. Water (C)	Temp. temp (C)	Waktu tahan(jam)	$\sigma_{uts}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	elong (%)	RA (%)	BHN (Q)	BHN (T)
					<b>84,37</b>	<b>70,3</b>	<b>14</b>	<b>30</b>	-	<b>241-311</b>
925	3	31	625	3	73	70	25	47	415	
925	3	31	625	3	86	70	17	37	425	269
925	3	31	625	3	100	86	11	28	333	296
925	3	30	600	3	101	-	14	33	426	305
925	3	31	600	3	91	85	12	28	409	295
925	2	31	600	3	99	-	8	20	415	312

## Kesimpulan

- Parameter *quenching* yang digunakan ; T.aus = 925°C, waktu tahan = 45 menit
- Pada parameter *tempering* ; T =625 °C, waktu tahan = 45 menit → hasil sifat mekanik tidak memenuhi persyaratan ( sifat yang tidak sesuai, tidak konsisten)

Pada penelitian ini, menggunakan parameter temperatur *tempering* mulai 625 , 650 675 °C, waktu tahan = 45 menit



# Rumusan Masalah

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 ?

# Tujuan

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



# Batasan Masalah

- 1) Komposisi kimia pada setiap material uji diasumsikan sama.
- 2) Tidak ada penurunan temperatur yang besar saat material uji dikeluarkan dari dapur pemanas.
- 3) Lama waktu pemindahan spesimen uji dari dapur ke media pendingin diasumsikan konstan pada semua spesimen uji.
- 4) Pengaruh lingkungan diabaikan.
- 5) Tidak ada cacat pada material uji.



# Manfaat Penelitian

- Sebagai referensi dalam proses perlakuan panas baja AAR-M201 Grade E agar diperoleh struktur mikro dan sifat mekanik sesuai dengan spesifikasi standar yang telah ditentukan.

# TINJAUAN PUSTAKA

Baja Paduan

Pengaruh Unsur Paduan

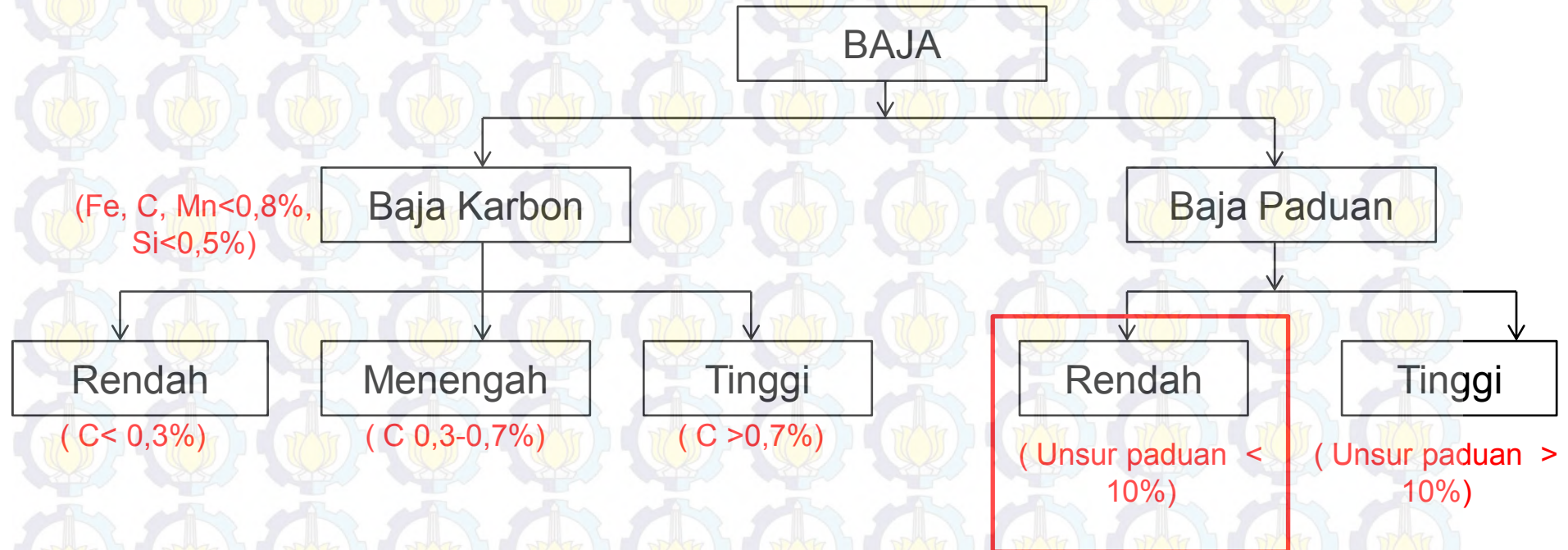
Baja AAR-M201 Grade E

Hardening

Tempering pada Bainit



# Baja Paduan

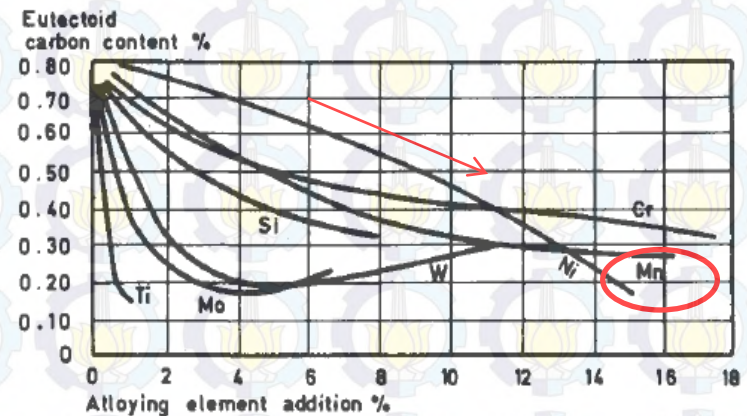
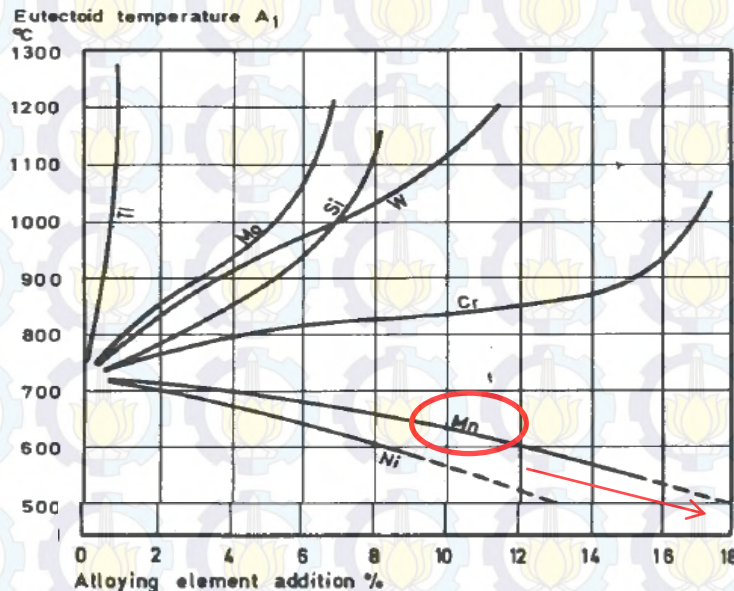


	C	Si	Mn	P	S	Cu
AAR-M201	Maks 0,32	Maks 1,5	Maks 1,85	Maks 0,04	Maks 0,04	-
Grade E	Cr	Ni	Mo	Al	Fe	CE
	-	-	-	-	Balance	Maks 0,88



# Pengaruh Unsur Paduan (1)

- Pengaruh unsur paduan Mn (Mangan)
  1. Pengerasan unsur baja → memberikan pengaruh kuat pada kekuatan dan kekerasan ferit.
  2. Temperatur Transformasi/Eutektoid → Menurunkan temperatur eutektoid dan menggeser komposisi pada karbon yang lebih rendah





# Pengaruh Unsur Paduan (2)

3. Laju pendinginan kritis → kurva bergeser ke kanan → CCR semakin rendah
4. Tempering (melunak apabila dipanaskan kembali) → pengaruh kecil

# Baja AAR-M201 Grade E

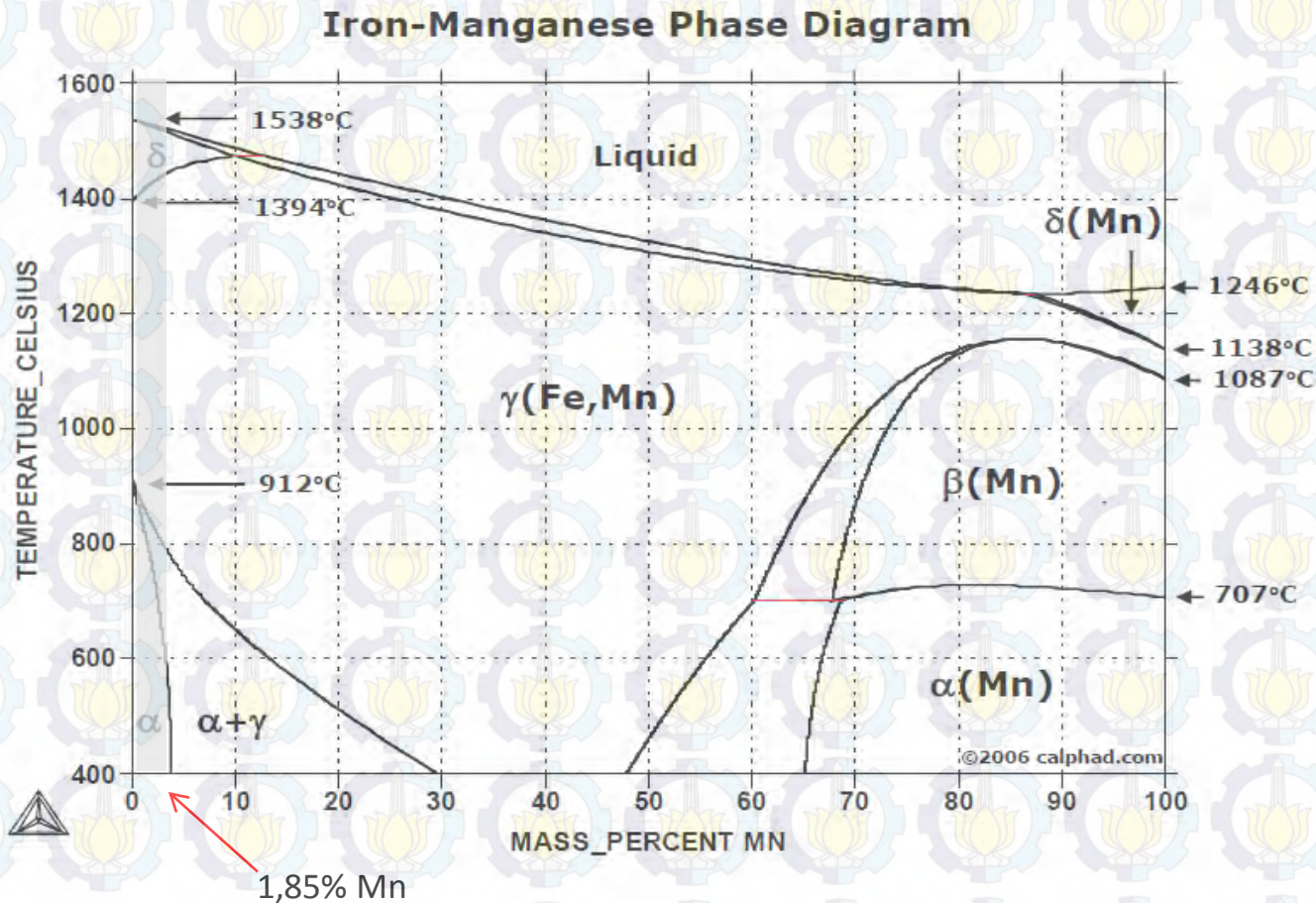
- Baja AAR-M201 Grade E merupakan baja paduan yang komponen mobil dan kereta api.
- Baja ini menggunakan penamaan AAR (*American Association Railroad*) grade E menunjukkan produk coran harus diberi perlakuan panas *quenching* dan *tempering*.
- Komposisi kimia

AAR-M201 Grade C,D, dan E	
Karbon, persentase maksimum	0,32
Mangan, persentase maksimum	1,85
Fosfor, persentase maksimum	0,04
Sulfur, persentase maksimum	0,04
Silikon, persentase maksimum	1,50

Baja Paduan Mangan  
(*Manganese Steel*)



# Diagram Fasa Fe-Mn



Mangan (1,85%Mn) yang ditambahkan ke Fe, fasa yang terbentuk adalah larutan padat  $\alpha$  (pada temperatur kamar)



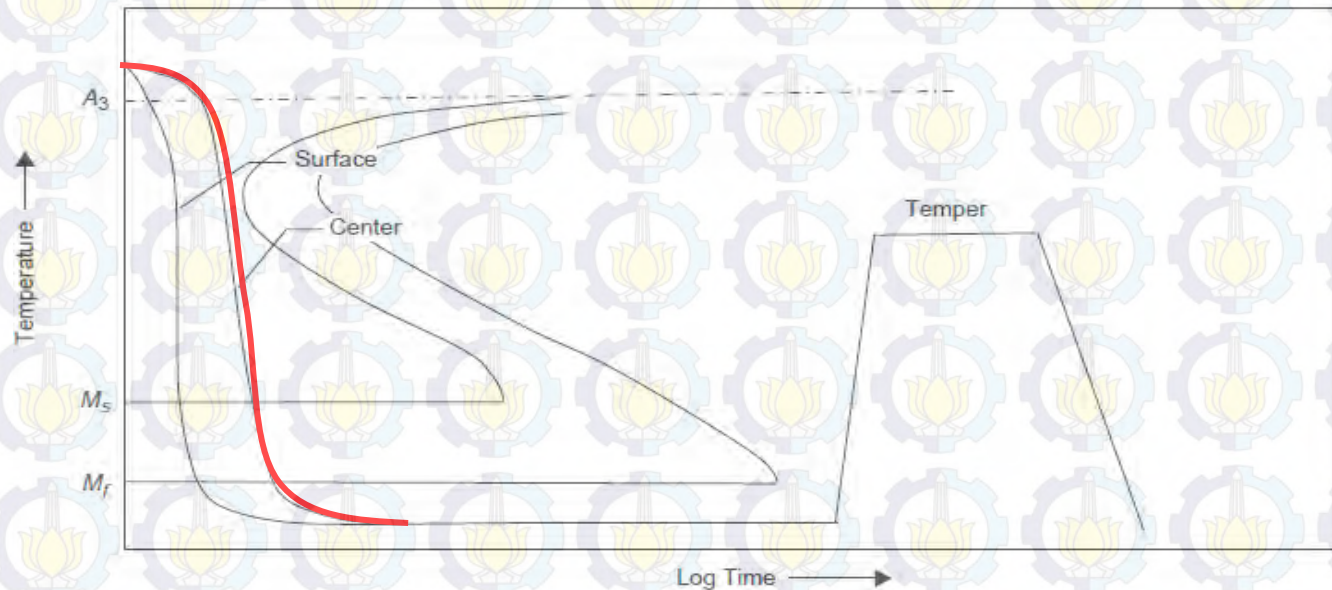
# Baja AAR-M201 Grade E

- Persyaratan sifat mekanik

Sifat mekanik	AAR-M201 Grade E
Kekuatan tarik, ksi	120
Kekuatan luluh, ksi	100
Elongasi pada 2", %	14
Reduksi area, %	30

# Hardening

- Prosedur → Pemanasan baja sampai temperatur austenitisasi, ditahan beberapa waktu tertentu, lalu didinginkan secara cepat.
- Media pendingin → oli, air, dll → laju pendinginan
- Target struktur mikro → martensit





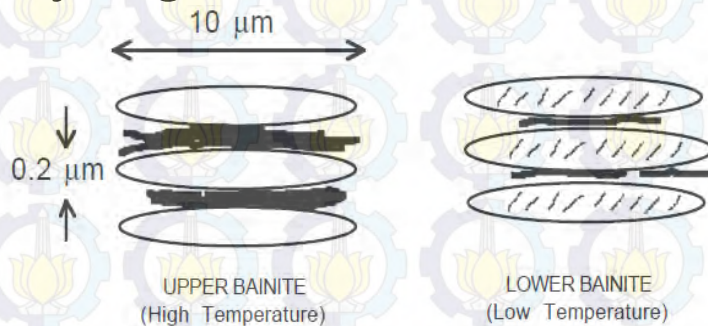
# Tempering

- *Tempering* adalah proses pemanasan kembali baja yang telah dikeraskan sampai temperatur dibawah temperatur kritis terendah ( $A_1$ ), lalu didinginkan pada laju yang diinginkan.
- Tujuan → berakibat turunnya kekerasan, dan melepas tegangan dalam untuk memperoleh keuletan yang lebih baik
- Operasi → 250 dan 650°C (umum)



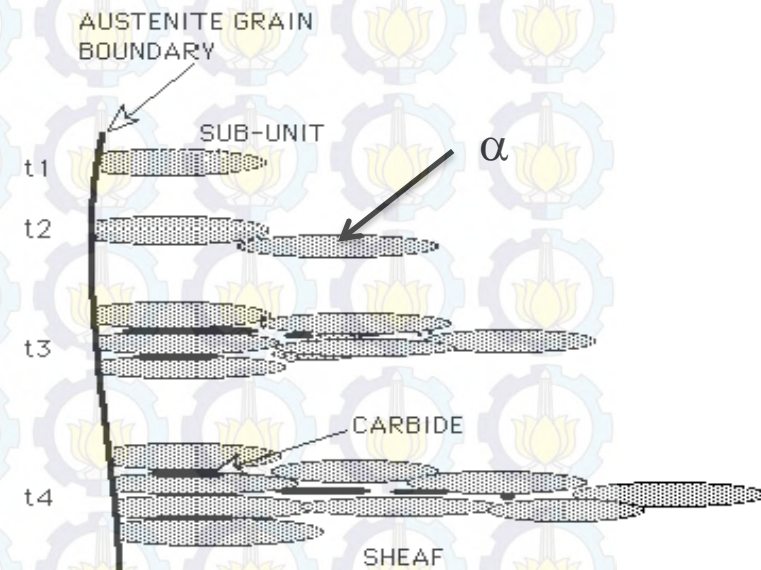
# Pembentukan Bainit

- Bainit → agregat non lamelar yang terdiri dari **karbida** dan **ferit** yang berbentuk bilah.



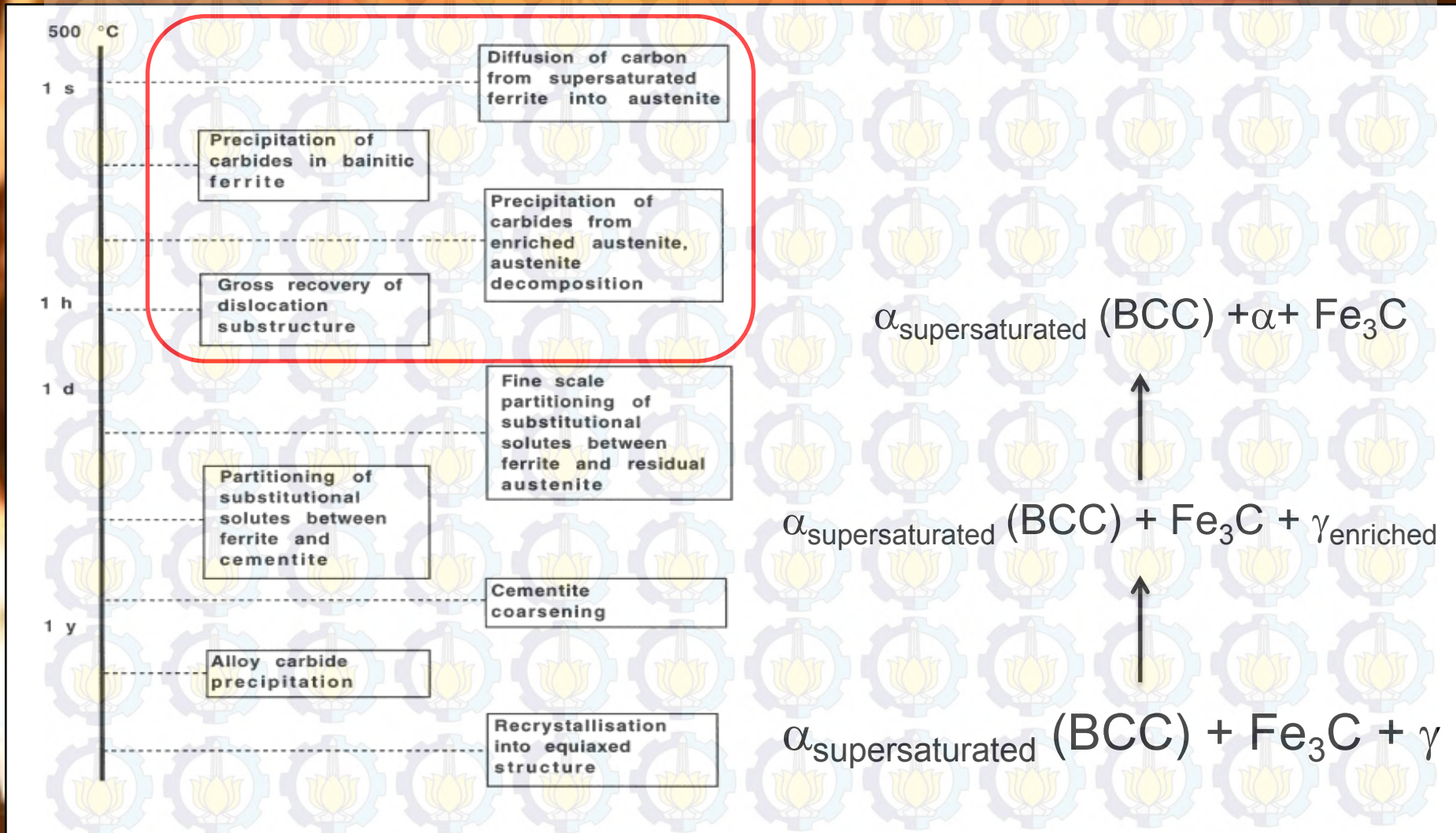
- Proses transformasi,  
 $\gamma$  mengalami *driving force*, sehingga  
 $\gamma$  (FCC) →  $\alpha_{\text{supersaturated}}$  (BCC) +  $\text{Fe}_3\text{C}$

Bainit





# Tempering pada Bainit





# METODOLOGI PENELITIAN



Diagram Alir Penelitian



Bahan Penelitian

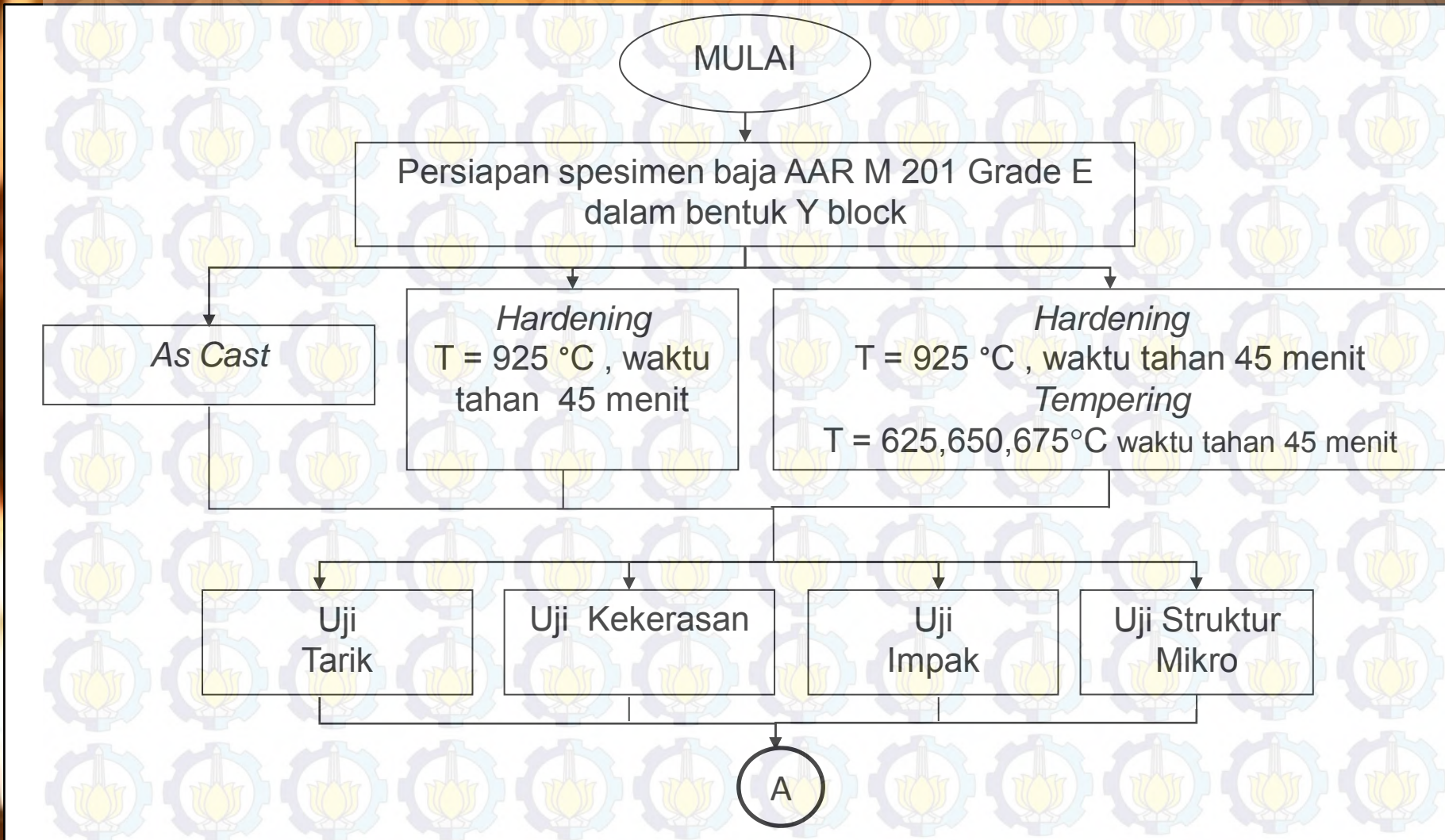


Peralatan Penelitian



Metoda Penelitian

# Diagram Alir Penelitian





```
graph TD; A((A)) --> Hasil[/Hasil/]; Hasil --> Analisis[Analisa Data dan Pembahasan]; Analisis --> SELESAI([SELESAI]);
```

A

Hasil

Analisa Data dan  
Pembahasan

SELESAI



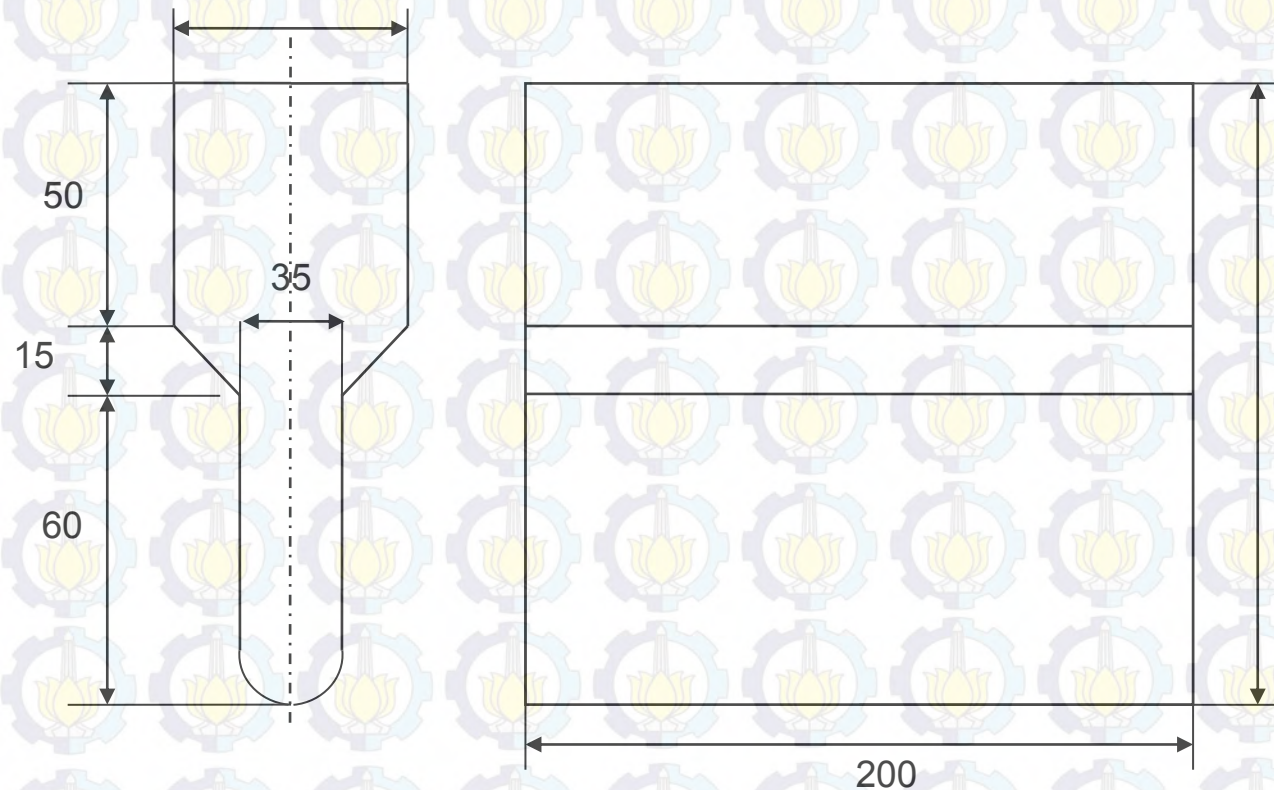
# Bahan Penelitian

- Baja AAR M-201 Grade E, memiliki komposisi sbb.

Unsur	Berat (%)
C, maks 0,32	0,24
Si, maks 1,50	0,49
Mn, maks 1,85	1,6
P , maks 0,04	0,03
S , maks 0,04	0,007
Cr	0,12
Mo	0,18
Ni	0,28
Fe	Balance
CE, maks 0,88	0,67

# Metoda Penelitian (1)

## Persiapan Sampel (JIS 5101)



Satuan dalam mm

\*satuan dalam mm



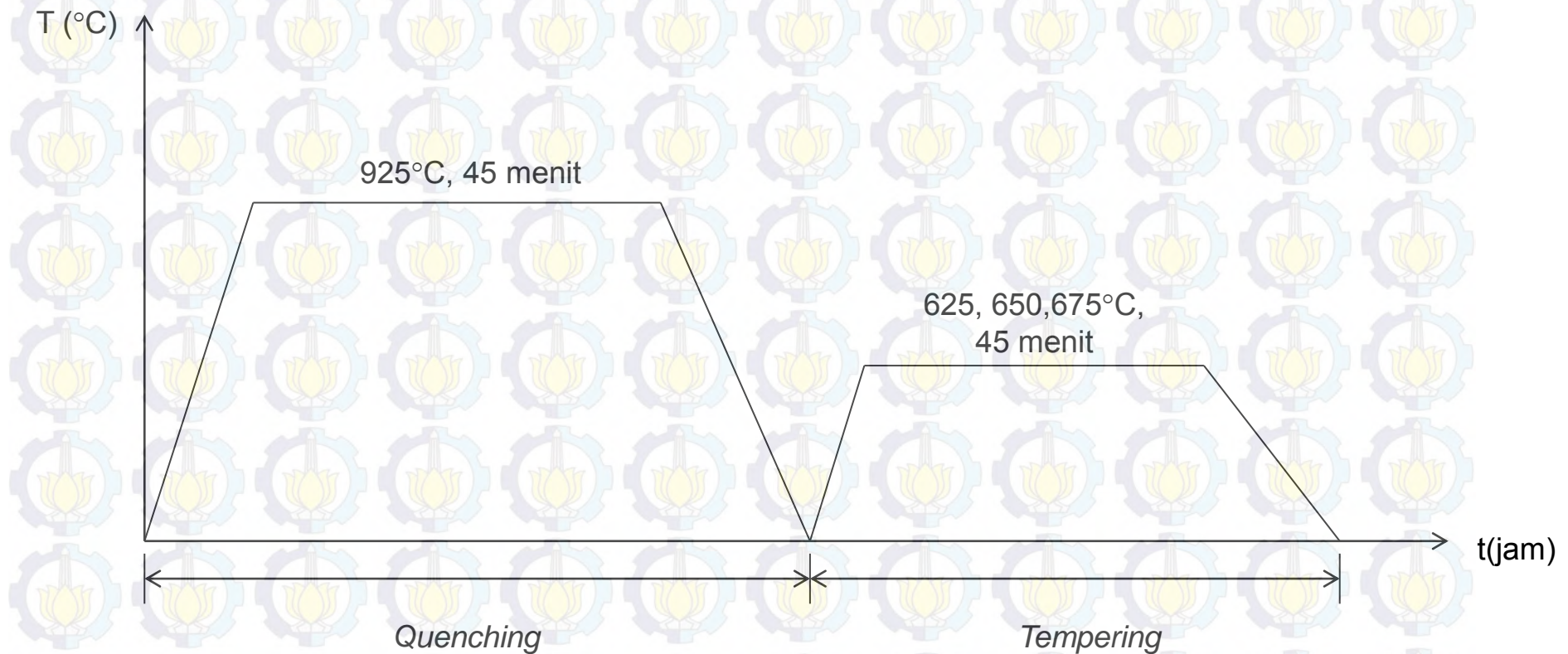
# Peralatan Penelitian

No	Peralatan	Spesifikasi
1	Dapur Pemanas	Dapur pemanas <i>dielectric heating furnace</i> dengan kapasitas 400 V/60 Hz , Kemampuan pemanasan maksimum 1280 °C
2	Mesin Uji Tarik	Mesin uji tarik <i>Universal Testing Machine</i> GOTECH seri GT-7001-4C50 dengan kapasitas maksimum 1 ton
3	Mesin Uji Kekerasan	Mesin uji kekerasan <i>Universal Hardness Tester</i> HBRV seri 187,52 dengan pembebanan maksimum 1000 kgf
4	Mesin Uji Impak	Mesin uji impak <i>Charpy Karl Frank/580 M</i>
5	Mikroskop Optik	Mikroskop optik <i>Olympus</i> seri GX71 dengan pembesaran maksimum 1000 X
6	Peralatan lain-lain	gerinda, gergaji, jangka sorong, mesin polis, mesin bubut, dan termometer.



# Metoda Penelitian (2)

## Perlakuan Panas pada Spesimen

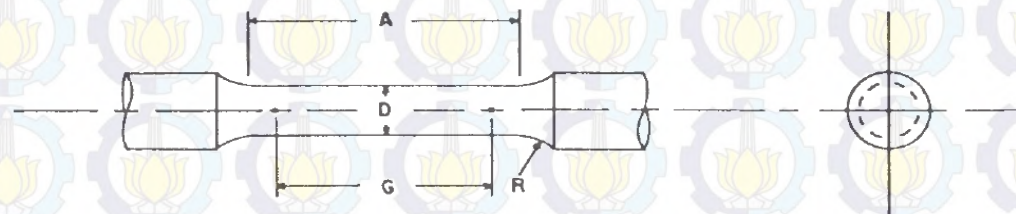


# Metoda Penelitian (3)

## Pengujian Tarik

Pengujian tarik → sifat mekanik (kekuatan dan keuletan)

Standar Pengujian → *ASTM A370 Standard Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Product*

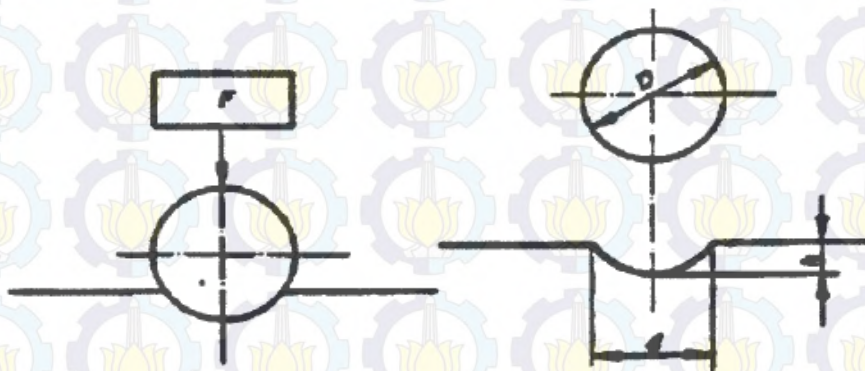


Bagian	Ukuran (mm)
G - Gage length	$50,0 \pm 0,10$
D - Diameter	$12,5 \pm 0,25$
R - Radius of fillet	10
A - Lenth of reduced section, min	60



# Uji Kekerasan

- Uji kekerasan → Kekerasan baja AAR-M201 Grade E
- Metode Brinell → ASTM A370
- Spesifikasi
  - Beban uji : 187,5 kgf
  - Indentor : Bola baja yang dikeraskan (  $D = 2,5 \text{ mm}$  )
  - Waktu Indentasi : 10 detik



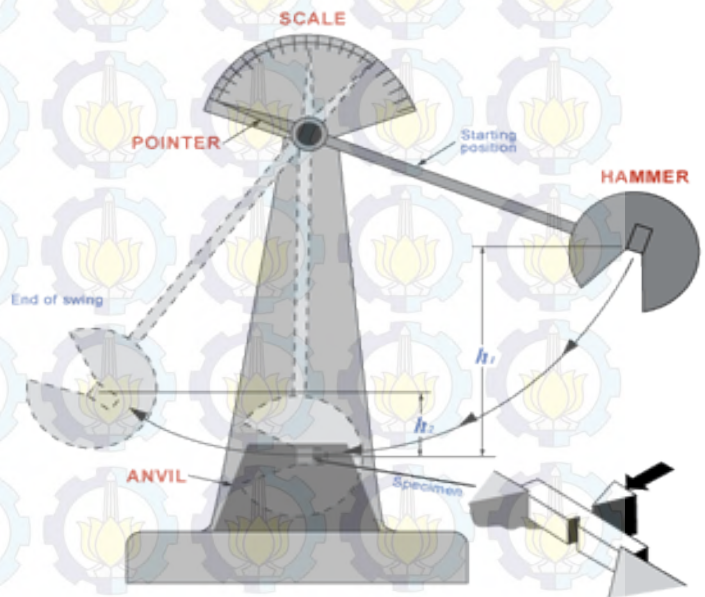
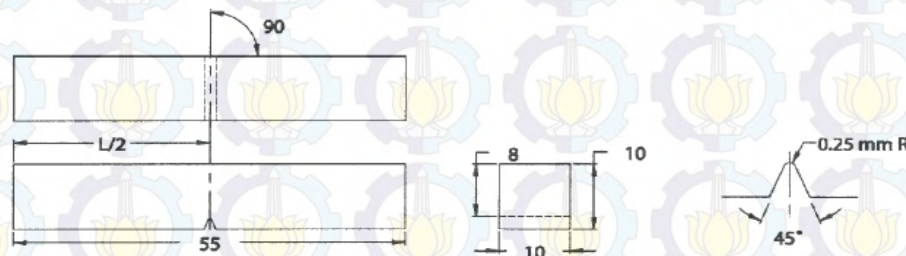
$$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$



# Metoda Penelitian (4)

## Pengujian Impak

- Pengujian impak → energi yang dibutuhkan untuk mematahkan benda kerja
- Standar Pengujian → ASTM E23 *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.*
- Metode → Impak charpy
- Temperatur →  $-40^{\circ}\text{C}$





# Metoda Penelitian (5)

## Pengujian Struktur Mikro (Mikroskop Optik)

- Pengujian struktur mikro → mengetahui struktur mikro
- Standar Pengujian → *ASTM E3 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.*
- Pengamatan → Pembesaran 200-500-1000 X
- Etsa yang digunakan → Pikral

Etsa	Komposisi
Pikral	4 gram <i>picric acid</i> ( $(\text{NO}_2)_3\text{C}_6\text{H}_2\text{OH}$ ) + 100 mL ethanol

# ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Struktur Mikro

Uji Tarik

Uji Kekerasan

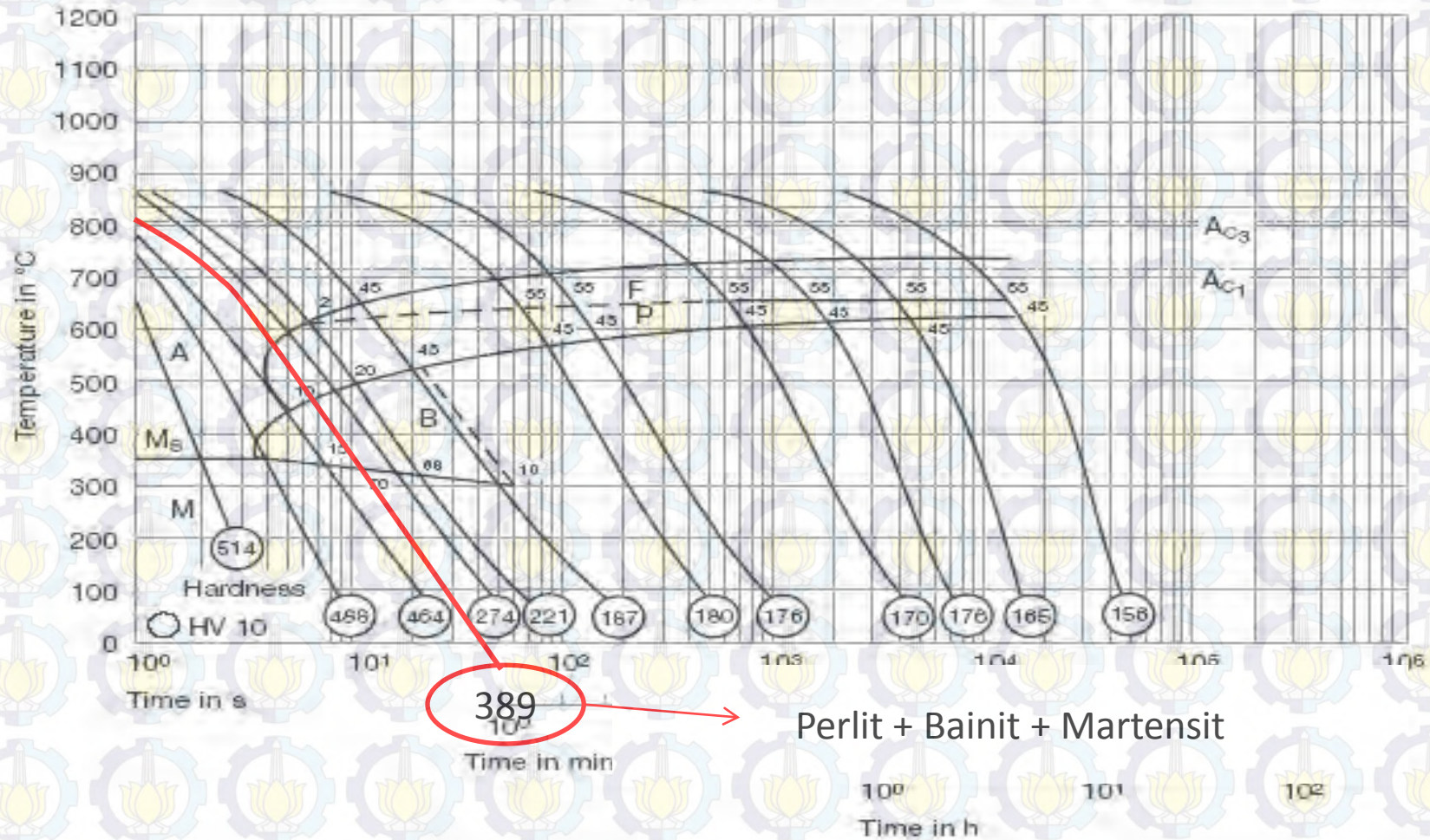
Uji Impak

Pembahasan



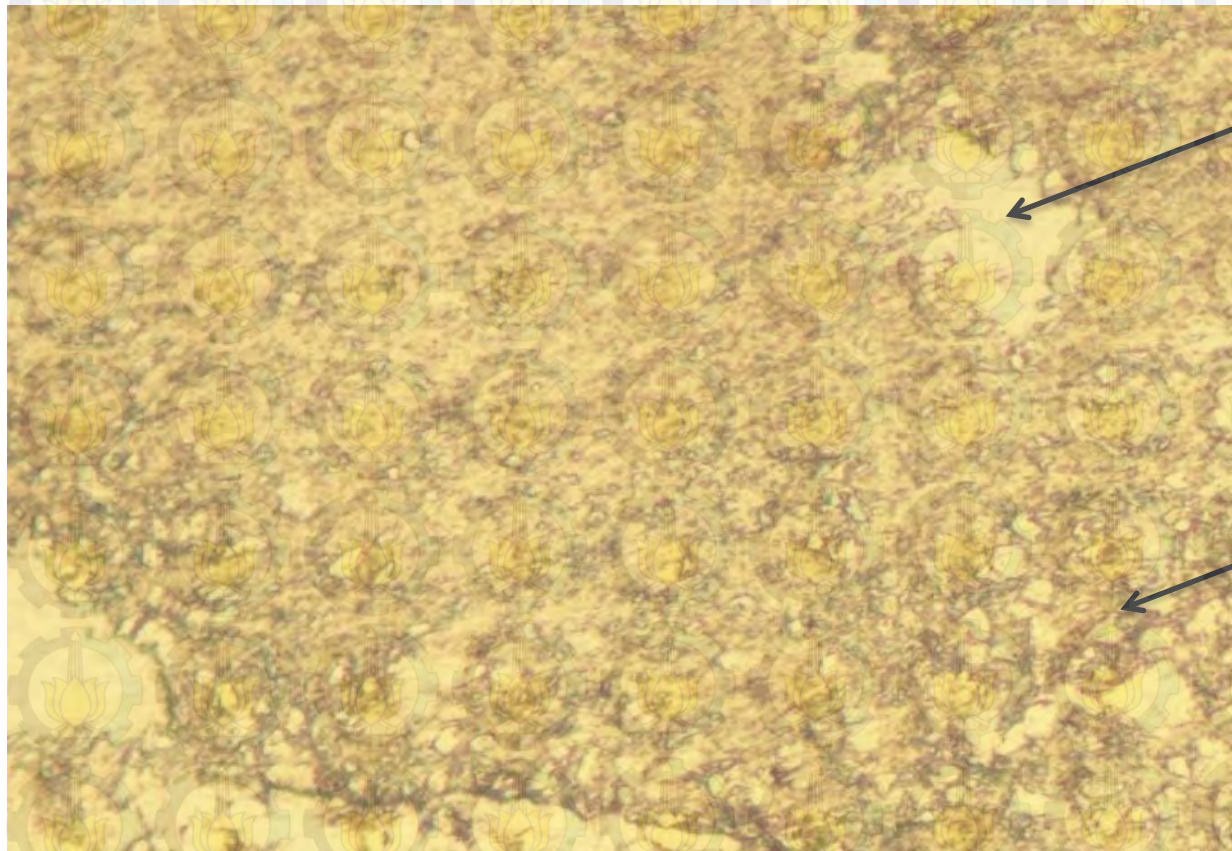
# Proses Quench

Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram





# Struktur Mikro (1)



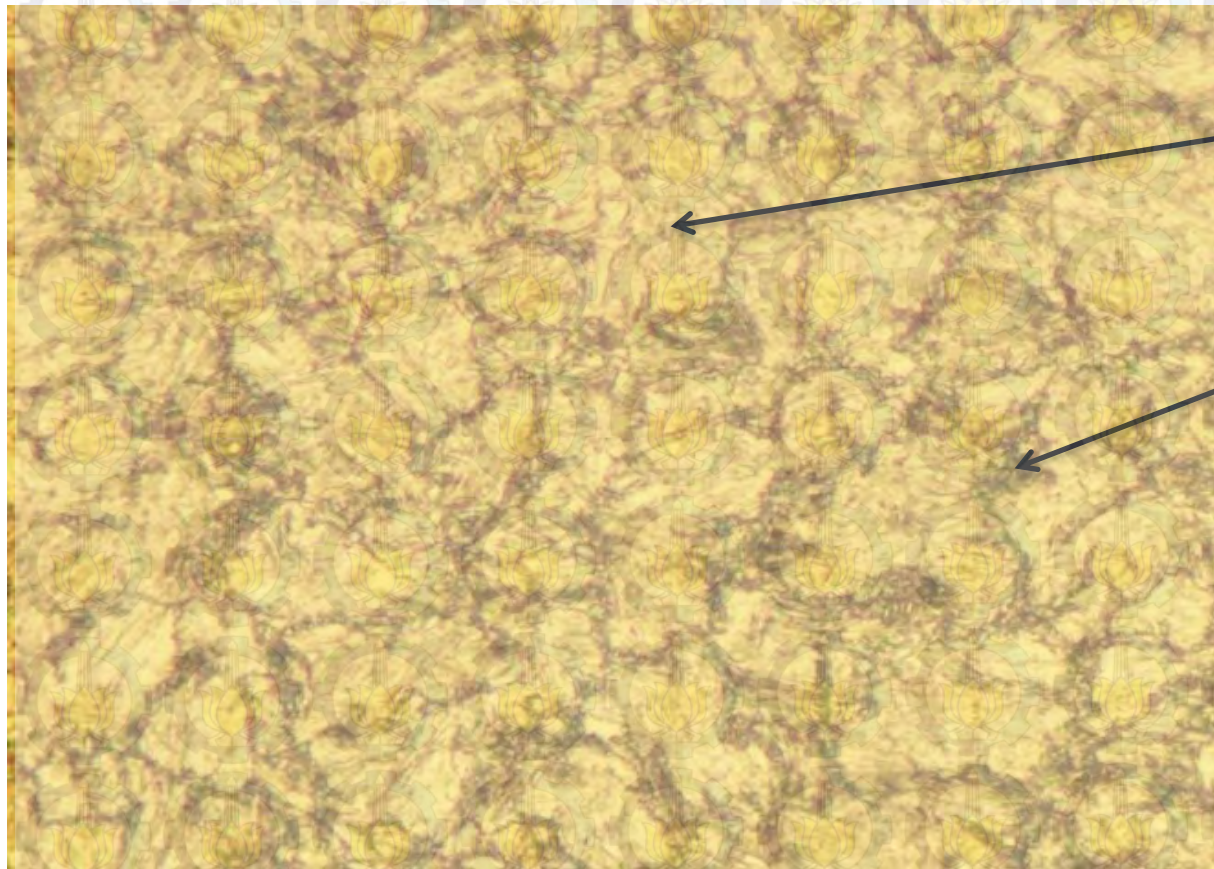
Ferit

Perlit

- Perlakuan = As Cast
- Struktur Mikro = Ferit dan Perlit



# Struktur Mikro (2)



Bainit

Perlit

- Perlakuan = Hardening ( $925^{\circ}\text{C}$ , 45 menit)
- Struktur Mikro = Bainit dan Perlit



# Struktur Mikro (3)



Ferit

$Fe_3C$

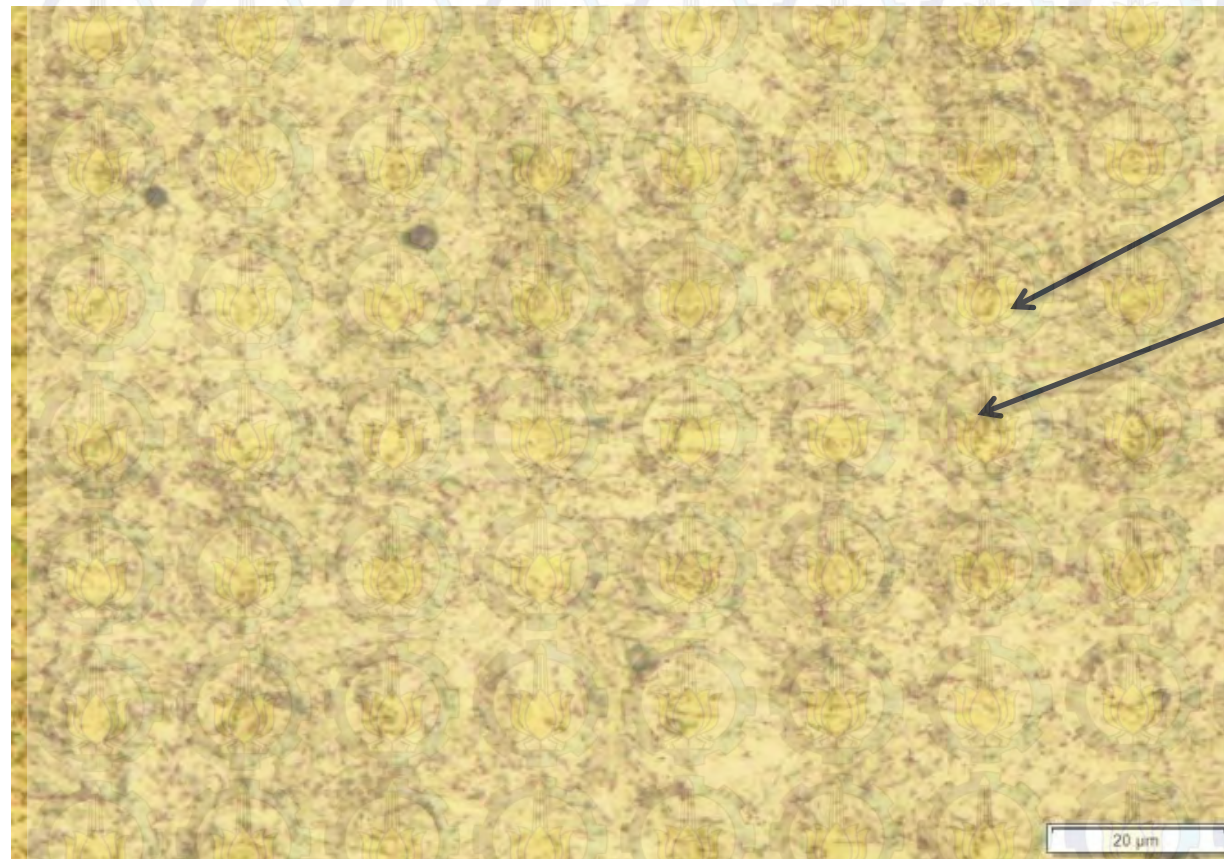
Bainit  
Temper

20  $\mu m$

- Perlakuan = Hardening (925°C, 45 menit) + Tempering (625 °C, 45 menit)
- Struktur Mikro = Bainit temper



# Struktur Mikro (4)



Ferit

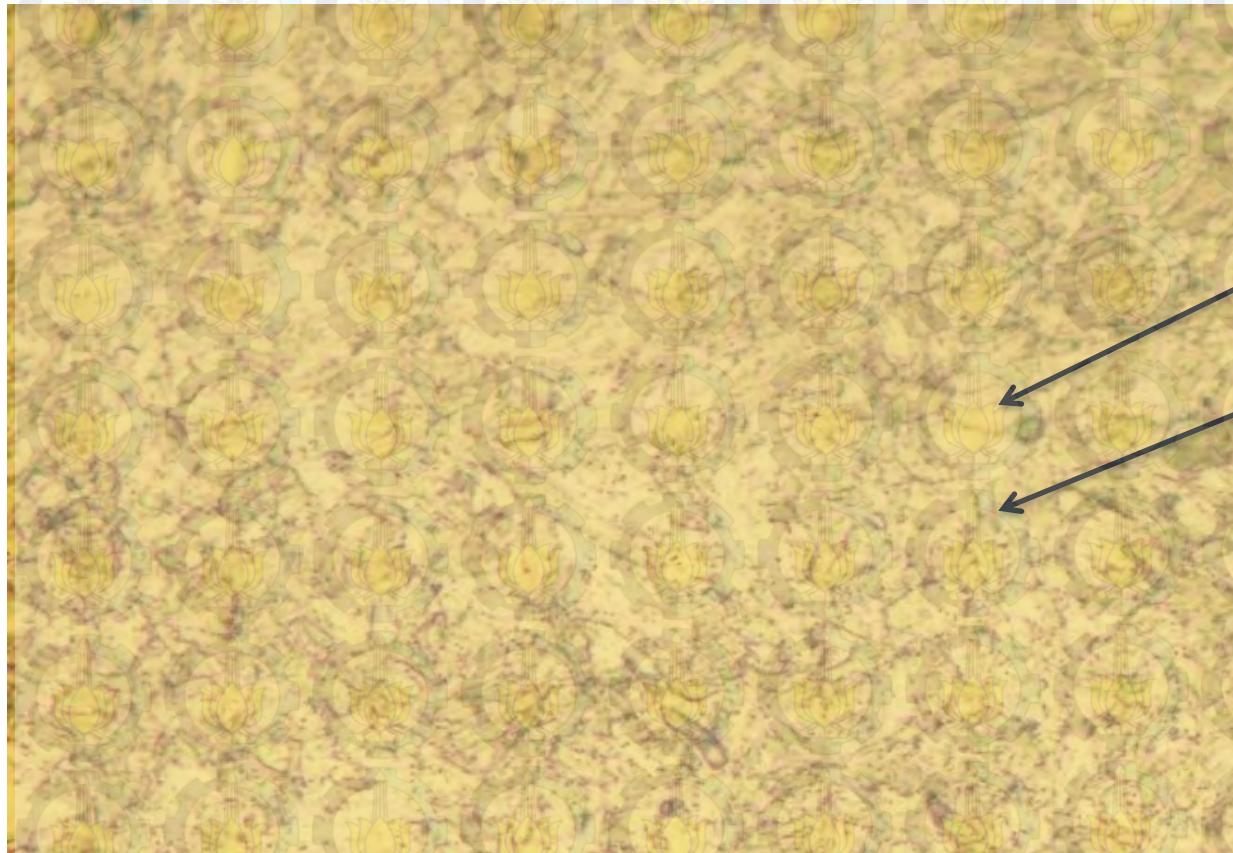
$Fe_3C$

Bainit  
Temper

- Perlakuan = Hardening (925°C, 45 menit) + Tempering (650 °C, 45 menit)
- Struktur Mikro = Bainit temper



# Struktur Mikro (5)



Ferit

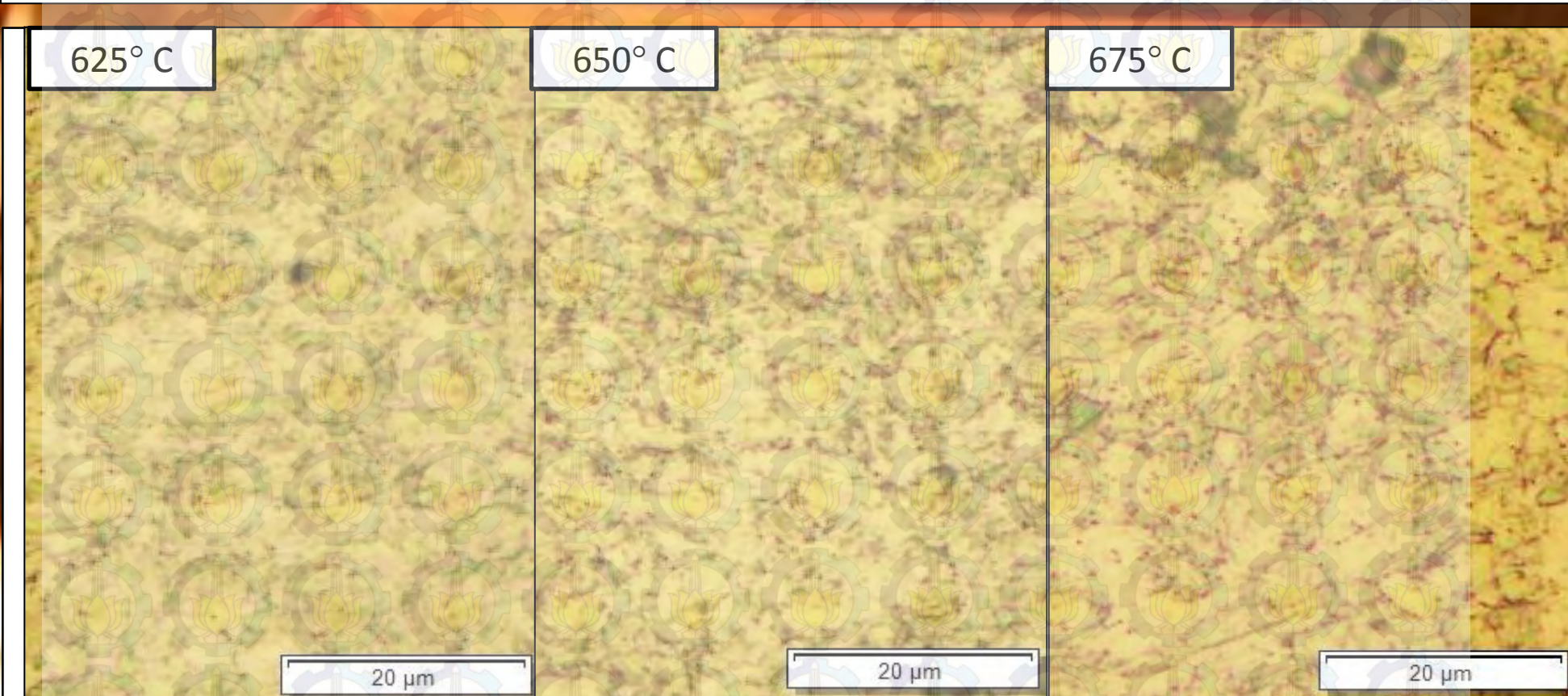
$Fe_3C$

Bainit  
Temper

- Perlakuan = Hardening ( $925^{\circ}C$ , 45 menit) + Tempering ( $675^{\circ}C$ , 45 menit)
- Struktur Mikro = Bainit temper



# Perbandingan



- Peningkatan temperatur *tempering* → bainit temper, dengan ukuran ferit semakin besar dan karbida sementit semakin banyak.

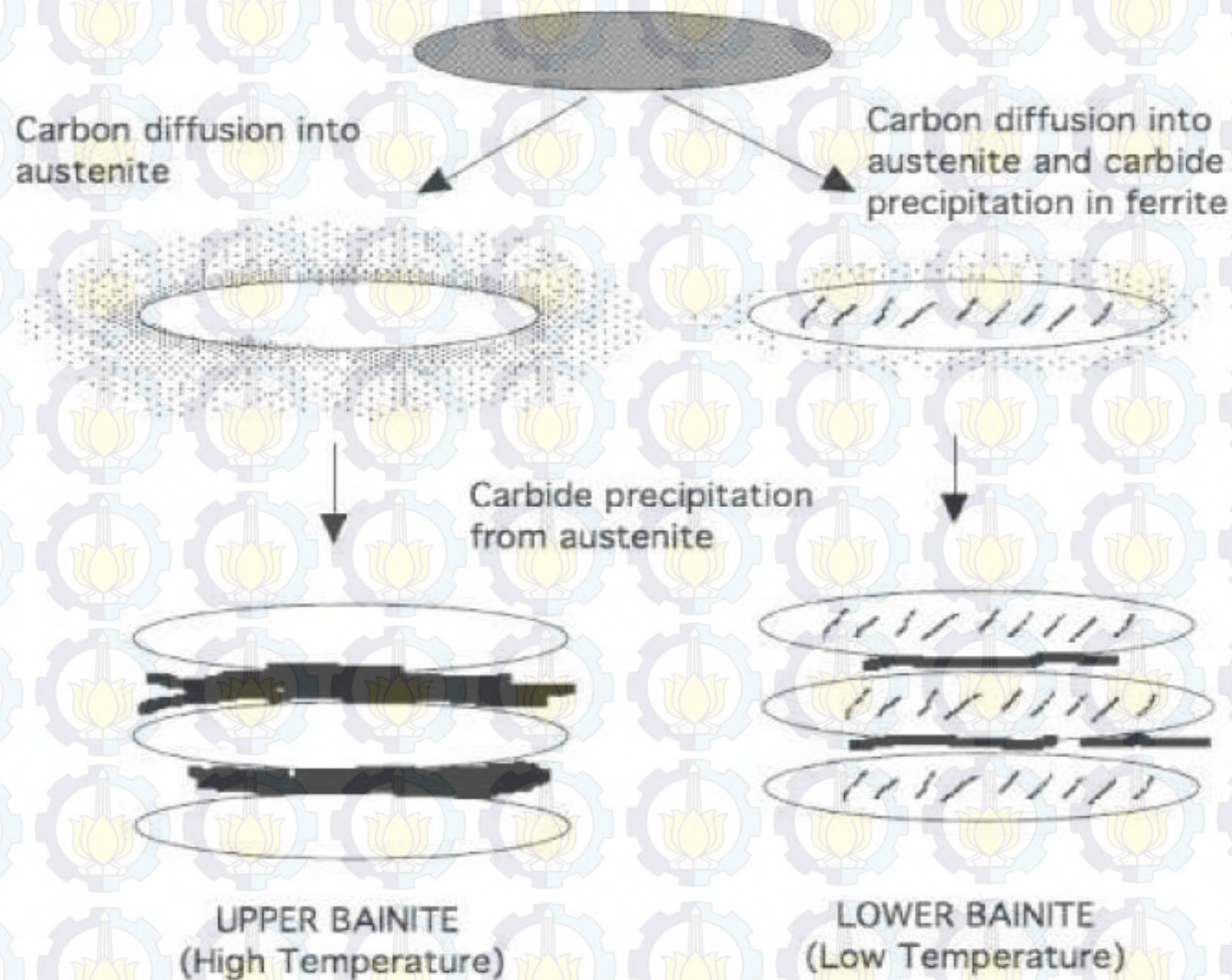


# Transformasi Bainit

- Austenit (FCC) → Ferit (BCC)
- Mekanisme : *driving force* → atom-atom FCC menjadi BCC
- Reaksi yang terjadi,  
$$\gamma \rightarrow \gamma + \alpha_{b, \text{ supersaturated}}$$
$$\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C} + \alpha_{b, \text{ supersaturated}} \quad (\text{Bhadeshia, 2001})$$
- Ferit tidak mampu melarutkan karbon, sehingga karbon berdifusi keluar → struktur bilah-bilah ferit yang didalamnya terdapat platelet sementit



# Skematik Proses





# Transformasi Bainit Temper

- Bainit temper terdiri dari → bilah ferit dan partikel sementit.
- Peningkatan temperatur *tempering*

Peningkatan difusi atom C dari ferit  
jenuh menuju austenit → presipitasi

karbida

+

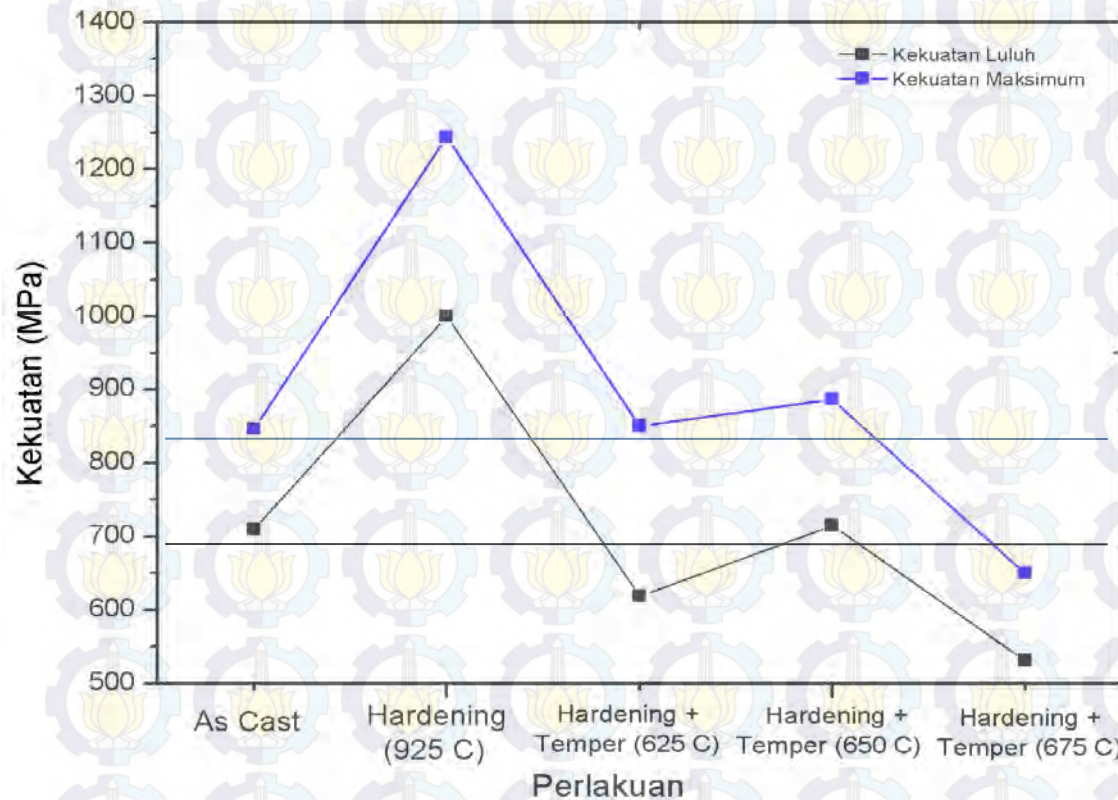
*Recovery* substruktur yang terdislokasi



Ukuran bilah ferit semakin besar dan  
karbida ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) semakin banyak.



# Pengujian Tarik (1)

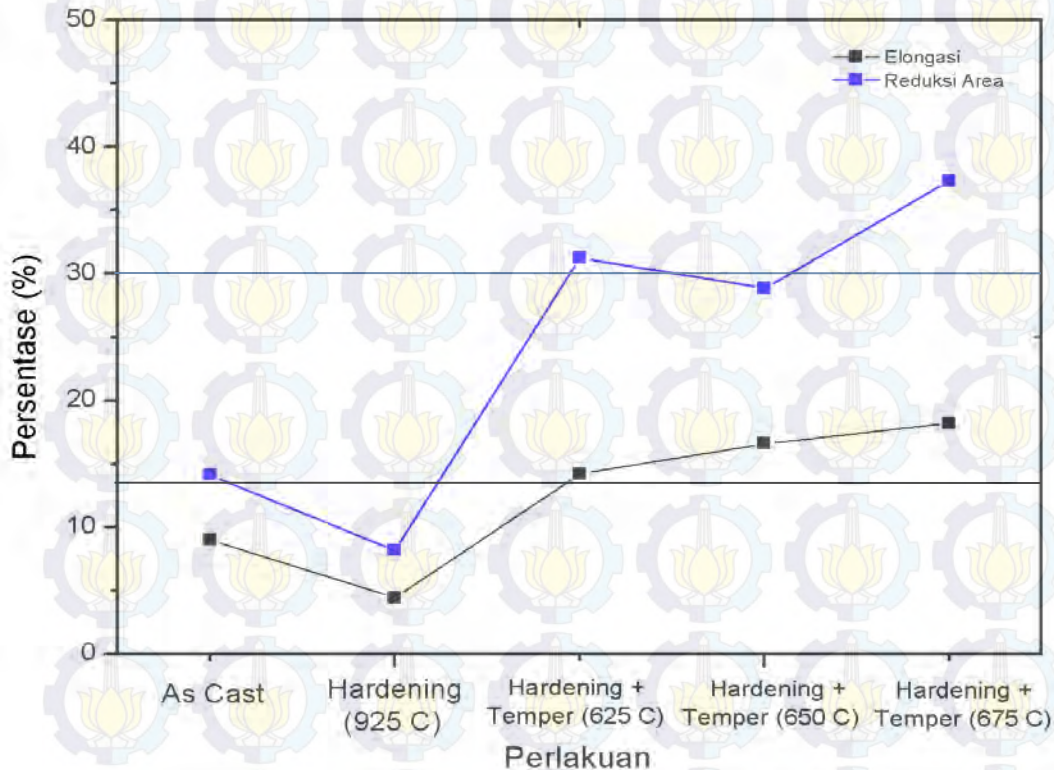


- Kekuatan luluh dan kekuatan maksimum terbesar diperoleh saat spesimen di *hardening*
- Penurunan kekuatan luluh dan kekuatan maksimum menurun seiring meningkatnya temperatur *tempering*.

Kekuatan luluh → min. 689,645 MPa  
Kekuatan maksimum → min. 827,67 MPa



# Pengujian Tarik

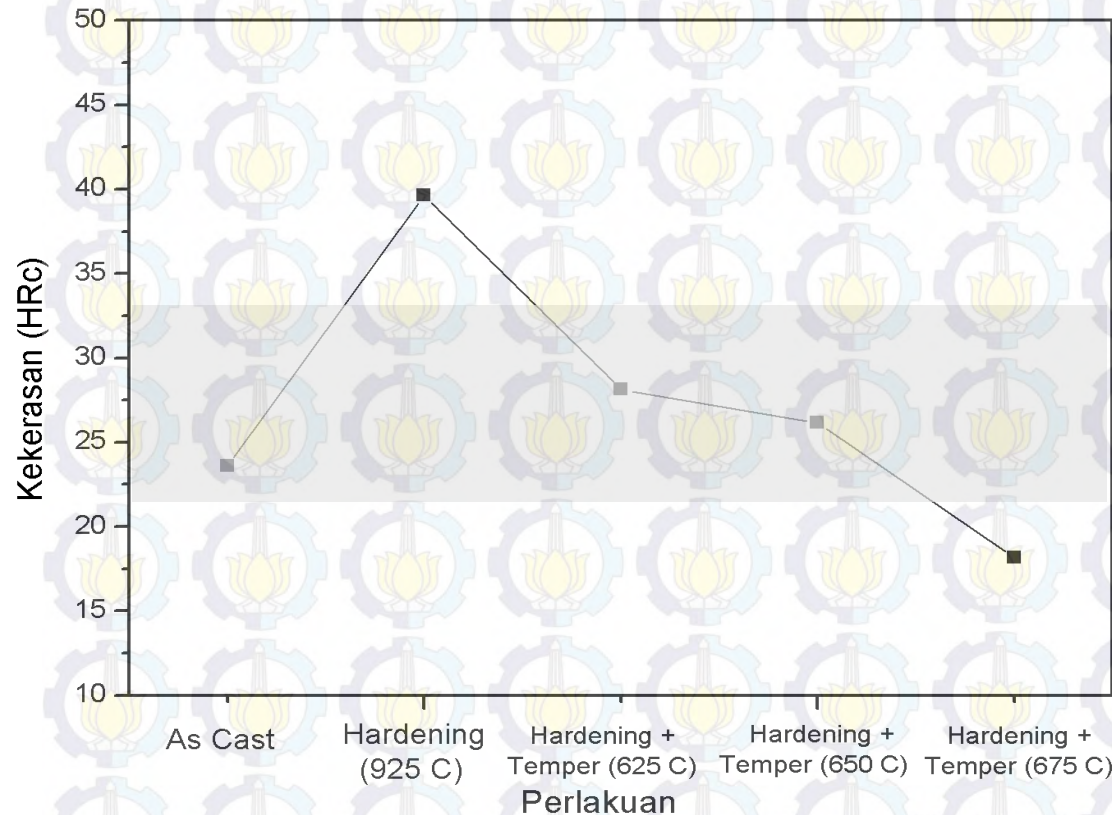


Elongasi → min. 14%  
Reduksi Area → min. 30%

- Keuletan terkecil diperoleh saat spesimen di *hardening* .
- Peningkatan nilai keuletan → peningkatan temperatur *tempering* .



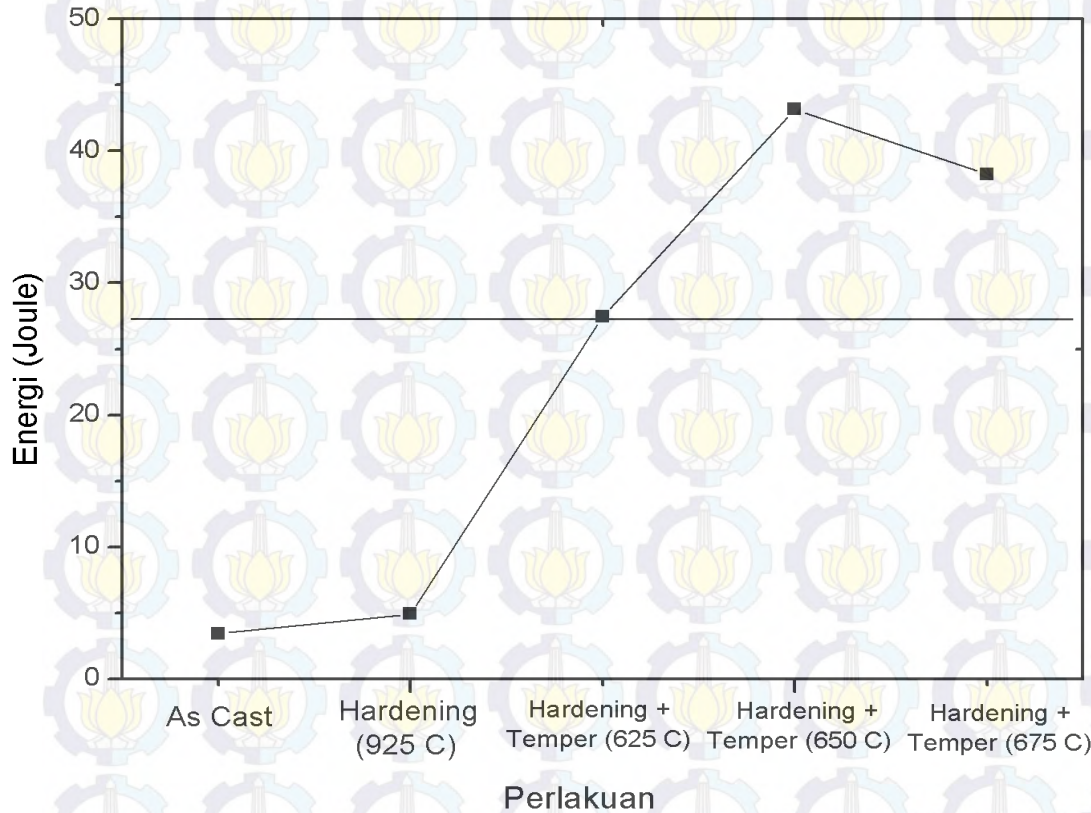
# Uji Kekerasan



- Kekerasan terbesar diperoleh saat spesimen di *hardening*.
- Penurunan nilai kekerasan menurun seiring meningkatnya temperatur *tempering*.

Kekerasan → 22,8 – 32,9 HRC

# Uji Impak



- Peningkatan temperatur *tempering* → meningkatkan energi impak.

Energi Impak → 27 Joule



# Bahasan

- Pada perlakuan hardening ( $925^{\circ}\text{C}$ , 45 menit)

Bainit



Pada proses pembentukan  
bilah bainit, diikuti **distorsi**  
**permukaan** yang  
mengakibatkan **pergeseran**  
**kisi**



- Kekuatan tinggi
- Kekerasan tinggi
- Keuletan rendah
- Energi Impak kecil



# Bahasan

- Pada peningkatan temperatur *tempering* (625,650,675°C)

Bainit  
Temper



- Dislokasi menjadi poligonal → bilah ferit bersatu dan tumbuh
- Relaksasi regangan
- Karbida ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) semakin banyak dan besar



- Kekuatan berkurang
- Kekerasan berkurang
- Keuletan bertambah
- Energi Impak bertambah



# Evaluasi Hasil Perlakuan Panas

No	Perlakuan	Kekuatan Luluh (MPa)	Kekuatan Maksimum (MPa)	Kekerasan (BHN)	Persen Elongasi (%)	Persen Reduksi Area (%)	Energi Impak (J)
		689,645	827,67	241-311	14	30	27
1	As Cast	709,483	846,603	244,97	9,02	14,13	3.43
2	Hardening	1000,088	1243,808	369,23	4,44	8,16	4,90
3	Hardening + Temper 625°C	618,542	850,142	273,27	14,2	31,25	27,46
4	Hardening + Temper 650°C	715,234	886,412	259,74	16,6	28,88	43,15
5	Hardening + Temper 675°C	531,483	650,212	214,68	18,2	37,33	38,25

Proses perlakuan panas *hardening-tempering* pada 625 °C dan 650°C menghasilkan sifat mekanik yang sebagian besar memenuhi spesifikasi AAR M201 Grade E



# KESIMPULAN

Kesimpulan

Saran

# Kesimpulan

- Temperatur *tempering* mempengaruhi struktur mikro baja AAR-201 Grade E, dengan terbentuknya struktur mikro yaitu bainit temper, berupa bilah-bilah ferit dan karbida sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Peningkatan temperatur *tempering* menghasilkan struktur bainit temper yang semakin kasar dan karbida sementit semakin banyak.
- Temperatur *tempering* mempengaruhi sifat mekanik baja AAR-201 Grade E. Peningkatan temperatur *tempering* menurunkan kekuatan luluh, kekuatan maksimum, kekerasan dan meningkatkan keuletan dan energi impak.



# Saran

- Pada proses *hardening*, untuk menghasilkan struktur mikro martensit maka kecepatan pendinginan perlu ditingkatkan.
- Pada pengujian mekanik, setiap perlakuan menggunakan minimal 3 spesimen uji untuk meningkatkan keakuratan nilai sifat mekanik.
- Penentuan persen austenit sisa yang dihasilkan dari proses *hardening* untuk mengetahui persen austenit yang bertransformasi.



Terima Kasih

Mochammad Ghulam Isaq Khan  
2711100089