

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

Imam A. Suryana, Tubagus N. Rohmannudin, Rochman Rochiem

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

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

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

**Kata Kunci**— baja AAR-M201 Grade E, *hardening*, *tempering*, temperatur

## I. PENDAHULUAN

ADA banyak jenis baja yang digunakan dalam dunia industri. Salah satunya adalah baja paduan mangan (manganese steel) dengan standar penamaan AAR-M201. Baja standar ini khusus digunakan pada konstruksi komponen kereta api. Baja ini dibedakan menjadi beberapa grade, berdasarkan komposisi kimia dan sifat mekanik yang telah ditentukan oleh *AAR Manual of Standards and Recommended Practices: Couplers and Freight Car Draft Components* [1].

Struktur mikro dan sifat mekanik baja merupakan dua hal yang saling terkait. Komposisi kimia dan proses perlakuan panas akan menentukan fasa yang terbentuk dalam struktur mikro baja paduan. Fasa yang berbeda dari struktur mikro akan menghasilkan sifat mekanik yang berbeda pula. Sifat mekanik baja menunjukkan respon baja terhadap beban mekanik yang bekerja. Respon ini berupa deformasi (perubahan bentuk) baja yang bersifat sementara ataupun permanen. Untuk mendapatkan sifat mekanik yang diharapkan, perlu diperhatikan komposisi kimia baja dan perlakuan panas yang diberikan pada baja.

Baja paduan merupakan baja dengan tambahan beberapa unsur paduan. Penambahan unsur paduan dimaksudkan untuk memperbaiki sifat mekanik baja [2]. Adanya unsur mangan pada *manganese steel* dapat menaikkan kekuatan dan kekerasan. Pengaruh ini akan menjadi lebih efektif pada

kadar karbon yang lebih tinggi. Pada kondisi *annealed*, baja mangan memiliki kekuatan dan keuletan yang relatif rendah, tetapi apabila dilakukan perlakuan panas *hardening* berupa *quenching* pada temperatur sekitar 1000 °C maka nilai kekuatan, keuletan, dan kekerasannya akan naik cukup signifikan [3].

Perlakuan panas didefinisikan sebagai kombinasi operasi pemanasan dan pendinginan terhadap logam dalam keadaan padat selama waktu tertentu untuk mendapatkan sifat tertentu. Dalam melakukan proses perlakuan panas, logam dipanaskan hingga temperatur tertentu dan menahannya pada temperatur tersebut untuk suatu waktu tertentu kemudian mendinginkannya dengan laju pendinginan tertentu. Laju pendinginan ini akan sangat tergantung pada media pendingin yang digunakan [3]. Proses pengerasan atau *hardening* merupakan suatu proses perlakuan panas yang dilakukan untuk meningkatkan kekuatan dan memperbaiki sifat tahan lelah dari baja. Proses *hardening* dimulai dengan austenisasi, yaitu memanaskan baja hingga temperatur sedikit di atas temperatur kritis tinggi ( $A_3$ ) selama waktu tertentu, agar seluruh strukturnya menjadi austenit. Kemudian diikuti dengan *quenching*, yaitu pendinginan menggunakan medium dengan laju pendinginan cepat [4]. *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 [5].

Penelitian ini membahas tentang efek perlakuan panas pada mikrostruktur dan sifat mekanik baja AAR-M201 grade E. Perlakuan panas yang dipakai adalah *hardening* – *tempering*, dengan variasi temperatur *tempering* yang digunakan adalah 550, 600, dan 650 °C. Kemudian dilakukan beberapa pengujian untuk mengetahui struktur mikro dan sifat mekanik baja, serta analisis mengenai pengaruh temperatur *tempering* yang digunakan terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E.

## II. URAIAN PENELITIAN

### A. Bahan Penelitian

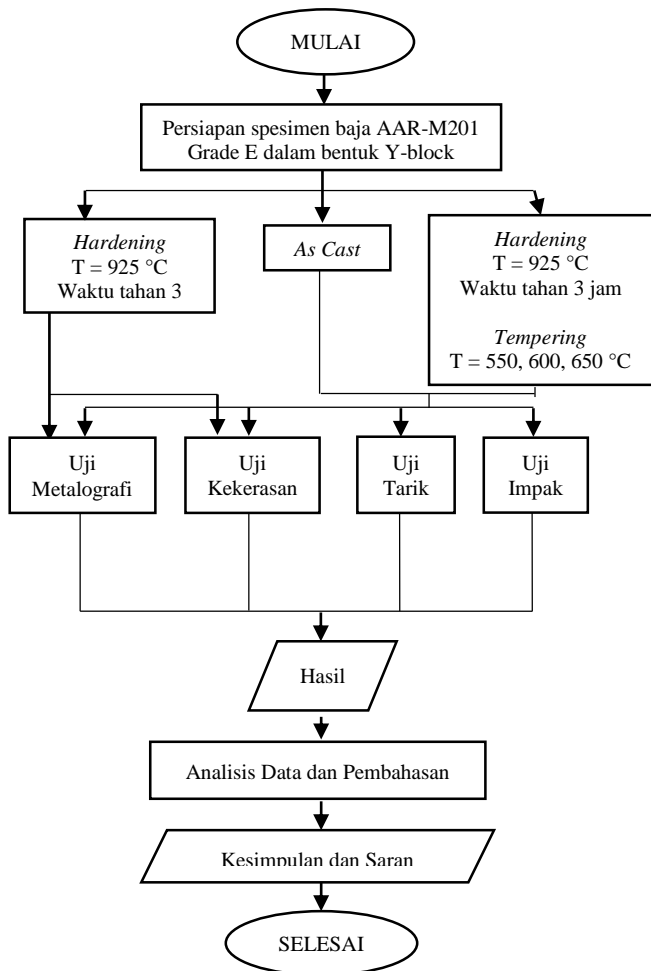
Baja yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja AAR-M201 Grade E, dengan komposisi kimia yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Komposisi kimia baja AAR-M201 grade E.

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

### B. Diagram Alir

Tahap-tahap dalam penelitian ini dilakukan sesuai dengan diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

### C. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Dapur Pemanas

Dapur pemanas yang digunakan adalah dielectric heating furnace dengan kapasitas 400V/60 Hz dan pemanasan maksimum 1280 °C.

#### 2. Mesin Uji Tarik

Mesin uji tarik yang digunakan adalah Universal Testing Machine MFL System tipe UPD-20 dengan kapasitas maksimum 200 kN.

#### 3. Mesin Uji Kekerasan

Mesin uji kekerasan yang digunakan adalah Universal Hardness Tester HBRV seri 187.52 dengan kapasitas pembebanan maksimum 1000 kgf.

#### 4. Mesin Uji Impact

Mesin uji impact yang digunakan adalah mesin uji impact Charpy Wolpert tipe PW15 kapasitas 150 J.

#### 5. Mikroskop Optik

Mikroskop optik yang digunakan adalah mikroskop optik Olympus seri GX71 dengan perbesaran maksimum 1000 X.

6. Peralatan lain seperti gerinda, gergaji, jangka sorong, mesin polis, mesin bubut, dan termometer.

### D. Proses Perlakuan Panas

Proses perlakuan panas yang dilakukan pada penelitian ini adalah *hardening-temper*. Proses *hardening* dilakukan dengan memanaskan baja pada temperatur 925 °C, menahan pada temperatur tersebut selama 3 jam, kemudian didinginkan cepat menggunakan media pendingin air. Kemudian diikuti dengan *tempering*. Baja yang telah dikeraskan dipanaskan kembali pada tiga variasi temperatur yang berbeda, yaitu 550, 600, dan 650 °C, dan didinginkan pada media udara.

### E. Pengujian

Setelah mengalami perlakuan panas, kemudian dilakukan pengujian mekanik serta pengamatan struktur mikro pada baja. Pengujian yang dilakukan diantaranya;

#### Uji Tarik

Uji tarik dilakukan berdasarkan standar ASTM E8M *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials* [6]. Sifat mekanik yang ditinjau adalah kekuatan tarik, kekuatan luluh, elongasi, dan reduksi area.

#### Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan berdasar standar ASTM E10 *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials* [7]. Pengujian kekerasan Brinell menggunakan indenter bola baja yang dikeraskan, dengan beban sebesar 187,5 kgf, dan waktu indentasi 10 detik. Hasil yang didapat dalam satuan BHN, yang kemudian dikonversi dalam satuan HRc untuk analisis lebih lanjut.

#### Uji Impak

Uji impact dilakukan berdasar pada standar ASTM E23 *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials* [8]. Spesimen yang digunakan sesuai standar batang uji impact Charpy tipe A. Pengujian dilakukan pada tiga temperatur berbeda, yaitu 0, -40, dan -60 °C

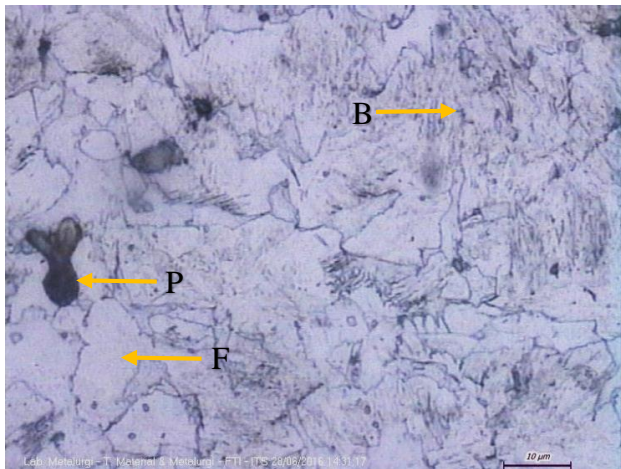
#### Uji Metalografi

Uji metalografi atau pengamatan struktur mikro dilakukan untuk menganalisis struktur mikro yang terbentuk dari baja AAR-M201 Grade E yang telah mengalami perlakuan panas. Preparasi spesimen dilakukan berdasarkan standar ASTM E3 *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* [9]. Etsa yang digunakan adalah pikral 4%, dengan komposisi 4 ml *picric acid* + 96 ml ethanol. Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop optik, dengan perbesaran 1000×.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Struktur Mikro

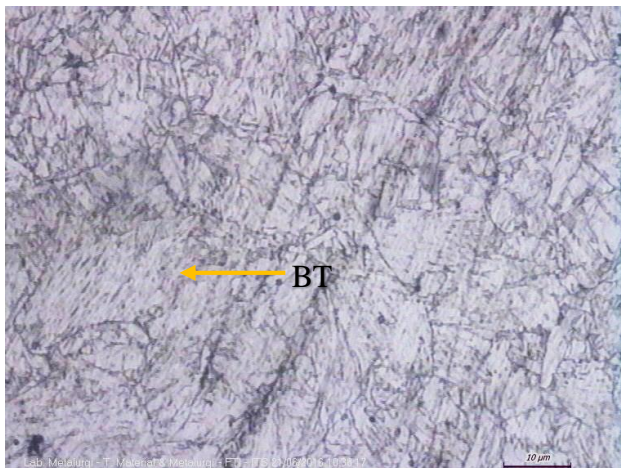
Struktur mikro pada baja AAR-M201 Grade E kondisi perlakuan *hardening* dengan temperatur austenisasi 925 °C, waktu tahan 3 jam, media pendingin air, adalah seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E setelah quenching dari temperatur 925 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x. B: Bainit; F: Ferrit; P:Perlit.

Struktur yang terbentuk terdiri atas beberapa fasa yang berbeda, yaitu kombinasi antara ferrit-perlit dan bainit. Struktur ini terbentuk akibat laju pendinginan yang relatif cepat, sehingga strukturnya tidak hanya menjadi ferrit-perlit saja namun juga terbentuk bainit.

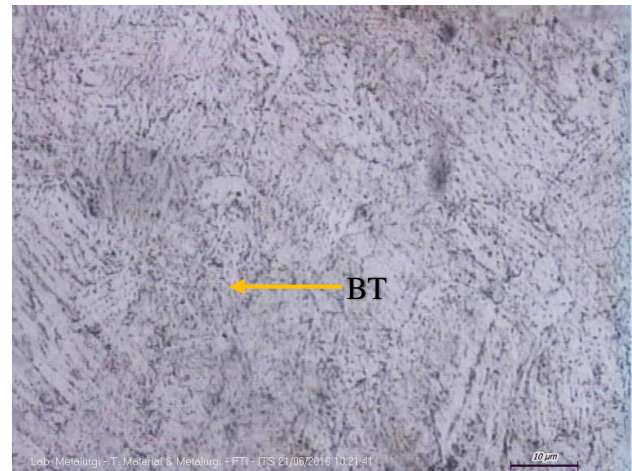
Struktur mikro pada baja AAR-M201 Grade E kondisi perlakuan *hardening* dengan temperatur austenisasi 925 °C, waktu tahan 3 jam, media pendingin air, kemudian dilanjutkan perlakuan *tempering* dengan temperatur 550 °C dan waktu tahan 3 jam, adalah seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E dengan perlakuan *quenching – tempering* pada temperatur 550 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x. BT: Bainit temper.

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

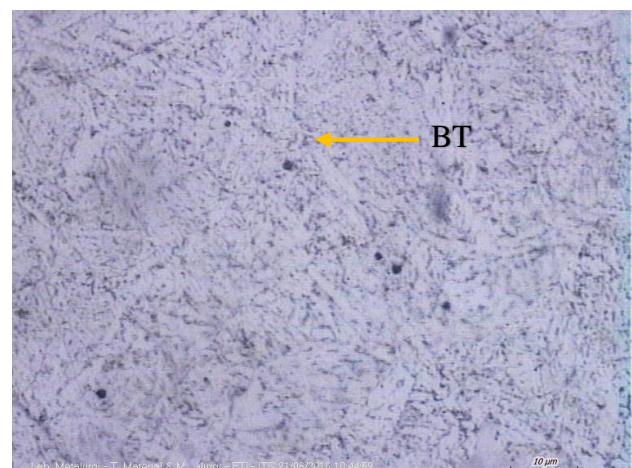
Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E kondisi perlakuan *hardening* dengan parameter yang sama, kemudian dilanjutkan *tempering* pada tempertur 600 °C dengan waktu tahan 3 jam, adalah seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E dengan perlakuan *quenching – tempering* pada temperatur 600 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x. BT: Bainit temper.

Struktur mikro yang terbentuk adalah bainit temper dengan struktur lebih kasar. Bilah-bilah ferrit saling menyatu dan membentuk butir yang lebih besar, seiring dengan semakin tingginya temperatur *tempering* yang digunakan. Selain itu, partikel sementit tersebar semakin merata.

Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E kondisi perlakuan *hardening*, dilanjutkan perlakuan *tempering* pada tempertur 650 °C, waktu tahan 3 jam, adalah seperti pada Gambar 5.



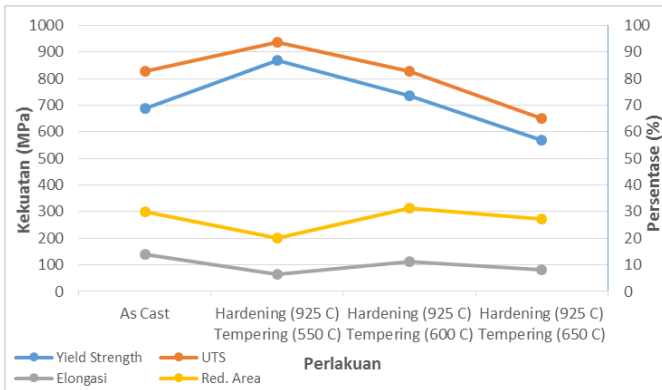
Gambar 5. Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E dengan perlakuan *quenching – tempering* pada temperatur 650 °C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x. BT: Bainit temper.

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

#### B. Uji Tarik

Sifat mekanik yang dapat ditinjau dari uji tarik adalah kekuatan tarik, kekuatan luluh, elongasi, dan reduksi area. Hasil uji tarik ditunjukkan pada gambar 6.



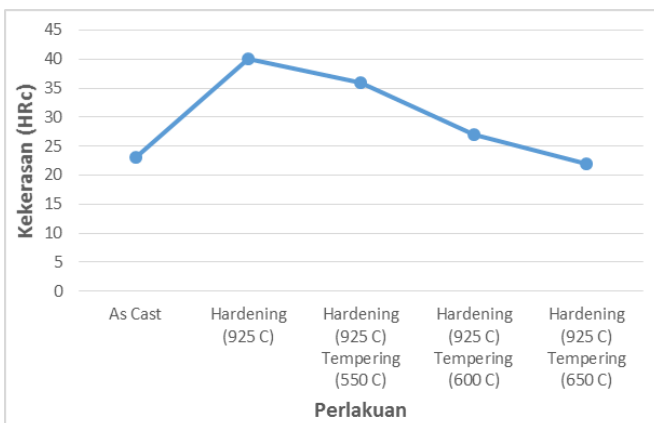


Gambar 6. Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR-M201 Grade E terhadap kekuatan tarik, kekuatan luluh, persen elongasi, dan reduksi area.

Kekuatan tarik dan kekuatan luluh paling optimal didapat dari proses *tempering* pada temperatur 550 °C. Dari proses tersebut didapat kekuatan tarik sebesar 938,43 MPa dan kekuatan luluh 870,22 MPa. Nilai kekuatan luluh dan kekuatan tarik makin turun seiring dengan semakin tingginya temperatur yang digunakan dalam proses *tempering*. Persen elongasi dan reduksi area paling optimal didapat dari proses *tempering* pada temperatur 600 °C, dengan elongasi sebesar 11,07% dan reduksi area sebesar 31,35%.

### C. Uji Kekerasan

Hasil uji kekerasan baja AAR-M201 Grade E pada tiga kondisi perlakuan yang berbeda ditunjukkan pada gambar 7.

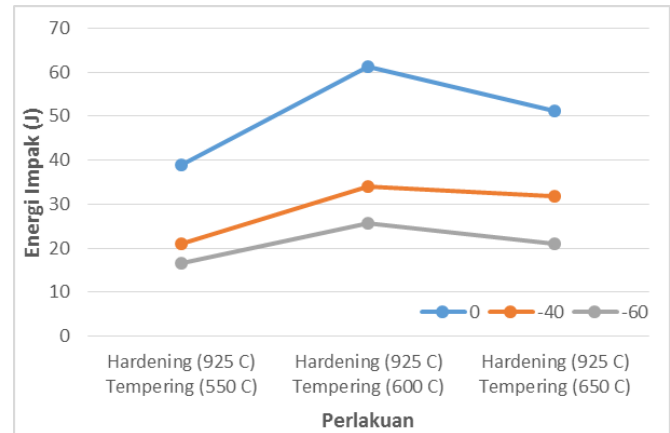


Gambar 7. Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR-M201 Grade E terhadap kekerasan.

Baja yang mengalami perlakuan *hardening* saja memiliki kekerasan 40 HRC, lebih keras dibandingkan baja yang mengalami perlakuan *hardening-tempering*. Dari ketiga variasi perlakuan *hardening-tempering*, nilai kekerasan paling tinggi didapat dari proses *tempering* pada temperatur 550 °C, dengan nilai sebesar 36 HRC. Nilai kekerasan baja menjadi semakin rendah ketika temperatur *tempering* yang digunakan semakin tinggi.

### D. Uji Impak

Uji impak dilakukan untuk menganalisis ketangguhan baja. Ketangguhan baja ditinjau dari energi impak, yaitu besar energi yang mampu diserap oleh baja. Hasil uji impak terlihat pada gambar 8.



Gambar 8. Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR-M201 Grade E terhadap energi impak.

Dari ketiga temperatur pengujian, energi impak paling optimal didapat dari *tempering* pada temperatur 600 °C, dengan nilai sebesar 25,73 Joule pada temperatur -60 °C, 34 Joule pada temperatur -40 °C, dan 61,33 Joule pada 0 °C. Dari grafik dapat dilihat bahwa semakin rendah temperatur yang digunakan saat uji impak, maka semakin kecil nilai energi impak.

### E. Pembahasan

Pada pengamatan struktur mikro, struktur mikro yang terbentuk setelah proses *hardening* terdiri atas ferrit, perlit, dan bainit. Sementara setelah proses *tempering* struktur yang terbentuk adalah bainit temper. Secara teoritis, saat baja didinginkan cepat, maka struktur yang terbentuk adalah martensit [10]. Namun, pada penelitian ini struktur yang terbentuk adalah bainit, ferrit, dan perlite. Martensit tidak terbentuk karena kadar karbon yang terdapat dalam baja cukup rendah, tidak cukup banyak untuk membentuk struktur martensit.

Transformasi bainit terjadi akibat laju pendinginan yang cepat. Pendinginan yang cepat mengakibatkan austenit tidak mempunyai waktu yang cukup untuk bertransformasi menjadi perlit, sehingga struktur yang terbentuk hampir menyerupai perlit, yaitu bainit. Pada proses transformasinya, austenit mengalami driving force yang besar untuk berubah dari FCC (*Face Centered Cubic*) menjadi BCC (*Body Centered Cubic*), sehingga terbentuk ferrit. Ferrit mempunyai nilai kelarutan karbon yang kecil, sehingga karbon yang tidak mampu dilarutkan ferrit berdifusi keluar membentuk karbida sementit ( $Fe_3C$ ). Austenit yang bertransformasi menjadi ferrit dan karbon yang berdifusi keluar membentuk karbida, menghasilkan struktur berupa bilah-bilah ferrit yang saling terhubung dan didalamnya terdapat partikel sementit yang memanjang dengan arah hampir sejajar dengan sumbu pertumbuhannya. Jumlah dan kontinuitas layer sementit dipengaruhi oleh kadar karbon baja [11]. Struktur mikro bainit yang terbentuk pada baja ini adalah bainit atas [12].

Temperatur *tempering* yang relatif tinggi menyebabkan terjadinya *recovery*, menghilangkan batas butir diantara bilah-bilah yang mempunyai sudut yang kecil, menyebabkan bilah-bilah yang berdekatan saling menyatu, sehingga strukturnya menjadi lebih kasar [13]. Semakin tinggi temperatur *tempering* yang digunakan maka semakin besar ukuran ferrit dan semakin banyak jumlah karbida sementit. Hal ini karena semakin tinggi temperatur *tempering* mengakibatkan difusi unsur C dari ferrit jenuh, juga presipitasi

karbida dari austenit yang kaya (dekomposisi austenit) [11].

Hasil uji mekanik kemudian dirangkum, untuk dibandingkan dengan standar AAR, seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E hasil *tempering* dari tiga temperatur berbeda

Sifat Mekanik	Standar AAR	Tempering 550 °C	Tempering 600 °C	Tempering 650 °C
Kekuatan Tarik (MPa)	827,37	938,43	828,88	650,47
Kekuatan Luluh (MPa)	689,47	870,22	735,64	570,09
Elongasi (%)	14	6,52	11,07	8,27
Reduksi Area (%)	30	20,05	31,35	27,26
Kekerasan (HRc)	22,6 – 31	36	27	22
Kekuatan impak (Joule) pada -40 °C	27,12	21	34	31,83

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

Semakin tinggi temperatur yang digunakan dalam proses *tempering* maka semakin menurun nilai kekuatan dan kekerasannya [10]. Hal ini disebabkan karena pada temperatur *tempering* yang tinggi, terjadi *recovery* yang menyebabkan hilangnya batas butir dan membuat ukuran butir semakin besar [13]. Batas butir menyimpan tegangan yang tinggi, sehingga ketika batas butir menghilang, berakibat pada berkurangnya kekuatan dan kekerasan yang dimiliki baja. *Tempering* pada temperatur tinggi juga mengubah bentuk karbida dari yang semula memanjang (*elongated*) menjadi bulat (*sphere*). Karbida dengan bentuk memanjang menyimpan tegangan yang lebih tinggi bila dibanding karbida berbentuk bulat, sehingga saat karbida berubah bentuk menjadi bulat maka kekuatan dari baja menjadi turun. *Tempering* pada temperatur diatas 500 °C menyebabkan pelarutan kembali unsur paduan [13]. Unsur paduan seperti kromium (Cr) dan Molibden (Mo) yang sebenarnya dapat menghambat penurunan kekerasan saat proses *tempering*, larut dalam ferrit dan sulit untuk membentuk karbida karena kadar unsur paduan dan kadar karbon yang rendah, sehingga penurunan nilai kekerasan tidak dapat dihindari.

Semakin tinggi temperatur *tempering* yang digunakan maka akan semakin baik keuletan dan ketangguhan baja [10]. Nilai keuletan dan ketangguhan baja dari *tempering* pada temperatur 600 °C lebih tinggi daripada yang dihasilkan dari *tempering* pada temperatur 550 °C. Hal ini disebabkan karena struktur mikro menjadi semakin kasar dan butir yang menjadi semakin besar, akibat *recovery*, saat temperatur *tempering* yang digunakan semakin tinggi. Semakin tinggi temperatur yang digunakan dalam proses *tempering*, maka akan semakin kasar struktur mikro yang dihasilkan, berakibat pada keuletan dan ketangguhan baja yang menjadi semakin baik. Namun nilai keuletan dan ketangguhan yang dihasilkan dari *tempering* pada temperatur 650 °C lebih rendah daripada yang dihasilkan dari *tempering* pada temperatur 600 °C. Pada proses *tempering* diatas 600 °C, *recovery* yang terjadi pada bainit sangat kecil, sehingga tidak ada perubahan yang

signifikan pada struktur mikro, terutama pada morfologi ferrit dan ukuran butir [14]. Akibatnya, tidak terjadi peningkatan yang signifikan pada keuletan dan ketangguhan. Pada penelitian ini, nilai ketangguhan dan keuletan justru semakin rendah saat temperatur *tempering* yang digunakan 650 °C, karena *tempering* pada temperatur 650 °C menyebabkan distribusi karbida menjadi semakin merata, mengakibatkan nilai keuletan dan ketangguhannya menurun. Nilai keuletan dan ketangguhan paling optimal didapat saat baja di *tempering* pada temperatur 600 °C.

#### IV. KESIMPULAN DAN SARAN

##### A. Kesimpulan

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

##### B. Saran

Untuk dapat menciptakan baja yang memenuhi standar AAR-M201 Grade E, saran yang dapat diberikan adalah untuk melakukan penelitian lebih lanjut pada proses *tempering* sekitar 600 °C. Karena dari hasil penelitian, hasil sifat mekanik paling optimal didapatkan dari proses *tempering* pada temperatur 600 °C, dimana hampir semua sifat mekaniknya memenuhi standar, kecuali elongasi.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan terciptanya tulisan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak diantaranya kepada Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayah kepada penulis, kepada segenap keluarga yang selalu memberikan doa dan semangat kepada penulis, kepada Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M. Eng, selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS, kepada Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc dan Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc selaku dosen pembimbing tugas akhir, kepada segenap tim penguji pada seminar dan sidang tugas akhir, kepada Bapak Beny Andhika, ST., dan PT. Barata Indonesia (Persero), kepada seluruh dosen dan jajaran

staff jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS, dan kepada seluruh pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, yang telah membantu dalam proses penelitian dan penulisan jurnal ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Manual of Standards and Recommended Practices, Washington D.C.: The Association of American Railroads, 2007.
- [2] F. Campbell, Elements of Metallurgy and Engineering Alloys, New York: ASM International, 2008.
- [3] S. H. Avner, Introduction to Physical Metallurgy, New York: Mc.Graw Hill Publishing Co. Inc., 1974.
- [4] E. Brunhuber, Giesserei Lexikon, Berlin: Fachverlag Schiele & Schoen, 1988.
- [5] D. S. Clark dan W. Varney, Physical Metallurgy for Engineers, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1962.
- [6] ASTM E8/E8M : Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, 2007.
- [7] ASTM E10 : Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, ASTM International, 2010.
- [8] ASTM E23 : Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM International, 2002.
- [9] ASTM E3 : Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, 2007.
- [10] W. D. Callister, Materials Science and Engineering an Introduction, vol. 7, New York: John Wiley & Sons. Inc., 2007.
- [11] H. K. D. H. Bhadhesia dan R. W. K. Honeycombe, Steels: Microstructure and Properties, Oxford: Elsevier, 2006.
- [12] ASM Handbook vol. 9: Metallography and Microstructure, ASM International, 2004.
- [13] D. Li, F. Huang, S. Wang, Y. Xiong, S. Xing dan T. Xiong, “Effect of tempering temperature on microstructures and properties of niobium and titanium microalloying low carbon bainite steel,” dalam *2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, Paris, 2012.
- [14] K. J. Irvine, F. B. Pickering dan W. C. Heselwood, J. Iron and Steel Institute, 1957, pp. 54-67.