

**PENGARUH PERLAKUAN PANAS MULTI AUSTEMPERING
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO
BAJA AISI 4140**

TESIS

Oleh

PURNOMO

2125021004



**PROGRAM STUDI PASCASARJANA
MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

**PENGARUH PERLAKUAN PANAS MULTI AUSTEMPERING
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO
BAJA AISI 4140**

**Oleh:
PURNOMO**

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK**

**Pada
Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

PENGARUH PERLAKUAN PANAS MULTI AUSTEMPERING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 4140

Oleh

PURNOMO

Penyelidikan dilakukan untuk mengetahui masing-masing parameter hasil rekayasa struktur mikro dibawah kondisi perlakuan panas pada baja AISI 4140 yang mempunyai komposisi kimia dalam % berat: 0.443C, 0.198 Mo, 0.805Mn, 1.150Cr, 0.308Si, 0.021P, dikenakan perlakuan panas anil penuh (AN), austempering satu dan multi langkah (SA) dan (MA). Spesimen uji tarik dengan standar ASTM E8 telah disiapkan. Proses AN dilakukan dengan memanaskan semua sampel di dalam tanur suhu konstan 800°C selama 2 jam, dilanjutkan pendinginan di dalam tanur. Kemudian, spesimen diberi perlakuan panas SA1, SA2, SA3 dan MA. Proses SA dan MA masing-masing dilakukan dengan memanaskan semua sampel dalam tanur pada suhu 800°C selama 1 jam dan dilanjutkan dengan perendaman dalam media larutan garam 50% NaNO₃+ 50%KNO₃ pada temperatur 312, 362 dan 412°C selama 1 jam. Proses AN menghilangkan tegangan internal dengan kelembutan struktur mikro yang tinggi, sedangkan proses SA dan MA menghasilkan struktur mikro fasa bainit yang halus, yang meningkatkan sifat-sifat mekanik (kekuatan tarik dan kekuatan impak) dengan elastisitas yang baik. Mikroskop elektron pemindaian digunakan untuk mengetahui konsentrasi pengotor dan perubahan struktur mikro pada sifat mekanik spesimen yang bersangkutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel SA1 memiliki ketangguhan terbaik dengan nilai 41 Joule, sedangkan sampel MA bernilai 32.67 Joule. Spesimen dengan nilai kekerasan tertinggi adalah SA2 dengan nilai kekerasan 43.67 HRC, sedangkan pada benda uji MA 43.00 HRC. Spesimen SA1 menjadi benda uji yang mampu menerima beban maksimum terbesar sebelum mengalami kegagalan dengan nilai UTS 922.36 MPa dengan regangan 13,09%. Sementara itu, spesimen MA menjadi benda uji yang mampu menahan beban maksimum tanpa mengalami deformasi plastis yang permanen tertinggi dengan nilai Yield Strength 579.32 MPa.

Kedepan hasil penelitian ini akan menjadi solusi alternatif bagi permasalahan ketersediaan bahan baku baja AISI 4140 yang melimpah, dengan biaya murah dan ketangguhan yang dihasilkan.

Kata kunci : AISI 4140, Kekerasan, Mikrostruktur, Anealling, Single Austempering

ABSTRACT

THE EFFECT OF MULTI AUSTEMPERING HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF AISI 4140 STEEL

By

PURNOMO

This research investigates the effects of different heat treatment parameters on the microstructure of AISI 4140 steel, which has the following chemical composition in weight %: 0.443C, 0.198 Mo, 0.805Mn, 1.150Cr, 0.308Si, 0.021P. The heat treatments applied are full annealing (AN), single-step austempering (SA), and multi-step austempering (MA). Tensile test specimens were prepared according to ASTM E8 standards. The AN process involved heating all samples in a furnace at a constant temperature of 800°C for 2 hours, followed by furnace cooling. Subsequently, the specimens underwent SA1, SA2, SA3, and MA heat treatments. The SA and MA processes consisted of heating all samples in a furnace at 800°C for 1 hour and then quenching them in a 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ salt solution at temperatures of 312°C, 362°C, and 412°C for 1 hour.

The AN process eliminated internal stresses, resulting in a highly soft microstructure, while the SA and MA processes produced a fine bainitic microstructure, enhancing mechanical properties (tensile strength and impact strength) with good elasticity. The research results indicated that the SA1 sample exhibited the best toughness with a value of 41 Joules, while the MA sample had a value of 32.67 Joules. The highest hardness value was observed in the SA2 specimen with a hardness of 43.67 HRC, whereas the MA test piece had a hardness of 43.00 HRC. The SA1 specimen exhibited the highest maximum load-bearing capacity before failure with a value of 922.36 MPa tensile strength and 13.09% elongation. On the other hand, the MA specimen had the highest ability to withstand maximum loads without undergoing permanent plastic deformation, with a Yield Strength of 579.32 MPa.

In the future, the findings of this research can offer an alternative solution to the issue of abundant availability of AISI 4140 steel raw materials, providing cost-effectiveness and improved toughness.

Keywords: AISI 4140, Hardness, Microstructure, Annealing, Single Austempering

JUDUL TESIS : **PENGARUH PERLAKUAN PANAS
MULTI AUSTEMPERING TERHADAP
SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR
MIKRO BAJA AISI 4140**

Nama Mahasiswa : **Purnomo**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2125021004**

Program Studi : **Pasca Sarjana Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Prof. M. Badaruddin, ST., M.T., Ph.D
NIP. 197212111998031002



Prof. Dr. Sugiyanto., M.T.
NIP. 195704111986101001

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin



Dr. Harmen S.T., M.T.
NIP.196906202000031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Moh. Badaruddin, ST., M.T., Ph.D



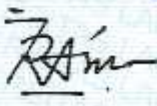
Anggota Penguji : Prof. DR. Sugiyanto, M.T., DR., Prof., M.T.



Penguji Utama I : Dr. Eng. Shirley Savet Lana, S.T., M.Met.



Penguji Utama II : Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D. IPU.



2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP 19750928 200112 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung

Prof. Dr. Jr. Murhadi, M.Si.

NIP 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 1 Agustus 2023

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Purnomo
NPM : 2125021004
Fakultas : Teknik
Jurusan : Teknik Mesin
Program Studi : Magister Teknik Mesin

Menyatakan bahwa tesis dengan judul **“PENGARUH PERLAKUAN PANAS MULTI AUSTEMPERING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 4140”** adalah karya saya sendiri dan bukan hasil plagiat sebagaimana diatur didalam Pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010.

Bandar Lampung, 1 Agustus 2023

Yang membuat pernyataan,



Purnomo

NPM. 2125021004

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Wonogiri, Jawa Tengah pada tanggal 30 Nopember 1974, dari pasangan Ibu Sugiyanti dan Alm Bapak Diarko.

Pendidikan diawali Taman Kanak-kanak (TK) Pertiwi Dharma Wanita Kab. Wonogiri diselesaikan tahun 1981, Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SDN 6 Wonogiri tahun 1987. Sekolah Menengah Pertama (SMP) diselesaikan di SMPN 1 Wonogiri tahun 1990, dan Sekolah Menengah Umum (SMU) di SMAN 1 Wonogiri, Jawa Tengah pada tahun 1993. Pada tahun 1996 penulis menyelesaikan pendidikan Diploma III (Ahli Madya) dari Univerversitas Padjadjaran, Bandung.

Pada tahun 2011 bekerja sebagai dosen di Politeknik Sugar Group Companies di Bandar Mataram, Lampung Tengah. Tahun 2015 melanjutkan jenjang Sarjana (S1) di jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Metro.. Kemudian tahun 2021 melanjutkan jenjang Sarjana Strata 2 (S2) di jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Lampung.

PERSEMBAHAN

Tesis ini penulis persembahkan kepada :

1. Aisah istriku dan anak-anakku Haidar Fauzil Adhim juga Muammar Ahza Ghaisani yang telah memberikan banyak doa, perhatian dan pengorbanan dalam menyelesaikan Tesis ini.
2. Ibu Sugianti dan Almarhum Bapak Diarko atas segala doa dan pengorbanannya.
3. Ibu Purwati Lee Couhoul selaku pemilik dari Sugar Group Companies yang telah memberikan beasiswa penuh pada program S2 Teknik Mesin ini.
4. Bapak dan ibu dosen yang telah banyak membantu sehingga tesis ini dapat selesai.
5. Terima kasih kepada bapak Prof. Moh. Badaruddin, ST., M.T., Ph.D dan bapak Prof. Dr. Sugiyanto, M.T., DR., Prof., M.T. yang ikhlas meluangkan waktu untuk membimbing sehingga tesis ini dapat selesai.
6. Teman-teman angkatan pada umumnya dan khususnya teman-teman dari program beasiswa Sugar Group yang selalu memberikan motivasi.
7. Almamater ku Universitas Lampung

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis ucapkan kepada ALLAH SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya Tesis ini dapat diselesaikan.

Tesis dengan judul “PENGARUH PERLAKUAN PANAS MULTI AUSTEMPERING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 4140” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister sarjana Teknik Mesin di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin.
4. Bapak Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing utama atas kesediaannya memberikan bimbingan, saran dan masukan dalam proses menyelesaikan Tesis ini.
5. Bapak Prof. Dr. Sugiyanto, M.T., DR., Prof., M.T. selaku Dosen Pembimbing kedua atas kesediannya memberikan bimbingan, saran dan masukan dalam proses menyelesaikan Tesis ini.
6. Ibu Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. selaku Dosen Penguji I yang telah memberikan masukan dan saran selama proses pengujian.
7. Bapak Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU. selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan dan saran selama proses pengujian.

8. Bapak Drs. A.F. Purwadi Santoso, M.Pd. selaku ketua yayasan YKBTG yang telah memberikan doa dan semangat untuk penulis dalam menyelesaikan pendidikannya.
9. Teman seperjuangan atau sahabat perkuliahan Andreas Luki dan Rizal yang saling membantu dan mendukung selama proses perkuliahan dan penelitian.
10. Teman-Teman kuliah Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin Universitas Lampung angkatan Tahun 2021.
11. Semua pihak yang membantu penulis untuk menyelesaikan Tesis ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari banyak kekurangan dalam penyusunan dalam Tesis ini, oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun dan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tesis ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 8 Agustus 2023

Penulis,

Purnomo

NPM. 2125021004

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
JUDUL TESIS	iii
PENGESAHAN	iv
SURAT PERNYATAAN	v
RIWAYAT HIDUP	vi
PERSEMBAHAN	vii
UCAPAN TERIMA KASIH	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	9
1.3. Tujuan Penelitian.....	9
1.4. Batasan Masalah.....	10
1.5. Manfaat Penelitian.....	10
1.6. Sistematika Penulisan	11
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	12
2.1. Baja AISI 4140	12
2.2. Diagram Fasa Besi–Besi Karbida (Fe–Fe ₃ C)	16
2.2.1. Pengembangan Struktur Mikro Pada Paduan <i>Hypoeutektoid</i>	19
2.3. Diagram Transformasi Isotermal	21

2.3.1. Perlit	21
2.3.2. Bainit	23
2.3.3. Martensit	25
2.5. <i>Mechanical Behavior</i> Paduan Besi–Karbon Perlit	28
2.5.1. <i>Mechanical Behavior Spheroidite</i>	29
2.5.2. <i>Mechanical Behavior</i> Bainit	29
2.5.3. <i>Mechanical Behavior</i> Martensit	30
2.6. Proses Perlakuan Panas	31
2.6.1. Pengerasan (<i>hardening</i>)	33
2.6.2. Transformasi Bainit	39
2.7. Penelitian Terdahulu	40
2.7.1. Penelitian Mattia Franceschi, Alvisi Miotti Bettanini, Luca Pezzato, Manuele Dabalà and Pascal J. Jacques, 2021	40
2.7.2. Penelitian oleh Mattia Franceschi, Luca Pezzato, Claudio Gennari, Alberto Fabrizi, Marina Polyakova, Dmitry Konstantinov, Katya Brunelli and Manuele Dabala, 2020.	43
2.7.3. Penelitian oleh Hamid Mousalou, Sasan Yazdania, Behzad Avishan, Naghi Parvini Ahmadi, Ali Chabok, Yutao Pei tahun 2018.	45
2.7.4. Penelitian-penelitian lain.	47
2.8. Rencana Penelitian	47
BAB III. METODE PENELITIAN	55
3.1. Diagram Alir Penelitian	55
3.2. Metode Penelitian	56
3.2.1 Material dan Pembuatan Spesimen	56
3.2.2. Pengkodean Material	56
3.2.3. Pembuatan Spesimen Uji	57
3.3. Prosedur Pengujian	60
3.3.2. Komposisi Kimia	60
3.3.3. Pengujian kekerasan	61
3.3.4. Pengujian tarik	62
3.3.5. Pengujian <i>Impact (Charpy)</i>	65

3.3.6. Observasi mikrostruktur dan fraktografi.....	66
3.4. Tabel Pengujian	67
3.4.1. Tabel Pengujian Kekerasan Rockwell	67
3.4.2 Tabel Uji Impak	67
3.4.3. Tabel Uji Tarik.....	68
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	69
4.1. Hasil Pengujian Sifat Mekanik	69
4.1.1. Pengujian Impak	69
4.1.2. Pengujian Kekerasan	71
4.1.3. Pengujian Tarik	73
4.2. Hasil Pengamatan SEM EDS dan XRD	84
4.2.1. Pengamatan SEM EDS XRD <i>benda uji Annealling (AN)</i>	85
4.2.2. Pengamatan SEM EDS XRD benda uji <i>Single Austempering-1 (SA1)</i>	91
4.2.3. Pengamatan SEM EDS XRD benda uji <i>Single Austempering 2 (SA2)</i>	98
4.2.4. Pengamatan SEM EDS XRD benda uji <i>Single Austempering 3(SA3)</i>	103
4.2.5. Pengamatan SEM EDS XRD benda uji <i>Multi Austempering (MA)</i>	108
BAB V. PENUTUP	117
5.1. KESIMPULAN.....	117
5.2. SARAN.....	119
DAFTAR PUSTAKA	121
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Diagram fase besi-besi karbida (Fe-Fe ₃ C).	17
Gambar 2. Skema representasi struktur mikro besi paduan karbon dari hypoeutektoid	19
Gambar 3. Fotomikrograf baja 0,38 wt% C dengan struktur mikro perlit dan ferit proeutektoid (pembesaran 635x).....	21
Gambar 4. Transformasi isothermal paduan besi karbon eutektoid, beserta kurva perlakuan panas ABCD.....	22
Gambar 5. Fotomikrograf dari (a) perlit kasar dan (b) perlit halus. 3000x.	23
Gambar 6. Mikrograf struktur bainit yang dikelilingi martensit.	24
Gambar 7. Diagram transformasi Isothermal besi karbon paduan eutektoid	25
Gambar 8. Struktur mikro martensit. Bentuk jarum (fase martensit),.....	26
Gambar 9. (a) kekerasan dan kekuatan tarik (b) daktilitas (%RA) sebagai fungsi transformasi suhu isothermal paduan besi-karbon komposisi eutectoid.	29
Gambar 10. Kekerasan sebagai fungsi % karbon untuk martensit,.....	30
Gambar 11. Diagram proses Austempering.	38
Gambar 12. Struktur (a) upper bainite dengan perlit halus dengan matrik martensit 1000x (b) lower bainite dengan matrik martensit 2500x.	40
Gambar 13. Diagram alur penelitian	55
Gambar 14. Spesimen uji tarik berdasarkan ASTM E8.	57
Gambar 15. Spesimen uji impak.	58
Gambar 16. Skema perlakuan panas penelitian.....	58
Gambar 17. Perhitungan TBs dengan software Bhadesia.	61
Gambar 18. Sketsa Perhitungan Energi Impact.....	65
Gambar 19. Energi Impak baja AISI 4140 dengan berbagai perlakuan panas.....	71
Gambar 20. Nilai kekerasan baja AISI 4140 dengan berbagai perlakuan panas.....	72
Gambar 21. Grafik Tegangan Regangan benda uji AN.	74

Gambar 22. Grafik Tegangan Regangan benda uji SA1.	76
Gambar 23. Grafik Tegangan Regangan benda uji SA2.	77
Gambar 24. Grafik Tegangan Regangan benda uji SA3.	79
Gambar 25. Grafik Tegangan Regangan benda uji MA.	81
Gambar 26. Yield strength dan Ultimate tensile strength baja AISI 4140	82
Gambar 27. Grafik Elongation dan Reduction in Area Baja AISI 4140	83
Gambar 28. Mikrograf SEM pada patahan Sampel AN (a) jarak 0 mm pembesaran 200x (b) jarak 0 mm pembesaran 1,000x.....	86
Gambar 29. (a) Jenis fracture sampel AN (b) Grain size AN	87
Gambar 30. Titik pengujian EDS specimen AN.	87
Gambar 31. Hasil Analisa EDS specimen AN	88
Gambar 32. Grafik pengujian XRD pada sampel AN.	90
Gambar 33. Mikrograf SEM pada patahan specimen SA1 dengan pembesaran (a) 200x (b) 1,000x (c) 5,000x.	92
Gambar 34. (a) Jenis fracture sampel SA1 (b) Ukuran butir sampel SA1.	93
Gambar 35. Titik pengujian EDS specimen SA1.	94
Gambar 36. Grafik hasil uji EDS specimen SA1.	95
Gambar 37. Grafik pengujian XRD pada sampel SA1.....	97
Gambar 38. Mikrograf SEM pada patahan specimen SA2 dengan pembesaran.....	99
Gambar 39. (a) Jenis fracture sampel SA2 (b) Ukuran butir sampel SA2.	100
Gambar 40. Titik pengujian EDS specimen SA2.....	101
Gambar 41. Grafik komposisi kimia spesimen SA2 hasil Uji EDS	102
Gambar 42. Grafik pengujian XRD pada sampel SA2.....	103
Gambar 43. Mikrograf SEM pada patahan specimen SA3 dengan pembesaran...	104
Gambar 44. (a) Jenis fracture sampel SA3 (b) Ukuran butir sampel SA3	105
Gambar 45. Titik pengujian EDS specimen SA3.....	106
Gambar 46. Grafik komposisi kimia specimen SA3 hasil Uji EDS.....	106
Gambar 47. Grafik pengujian XRD pada sampel SA3.....	108
Gambar 48. Mikrograf SEM pada patahan specimen MA dengan pembesaran ...	109
Gambar 49. (a) Jenis fracture sampel MA (b) Ukuran butir sampel MA.....	110
Gambar 50. Titik pengujian EDS specimen MA.....	111
Gambar 51. Grafik komposisi kimia benda uji MA hasil Uji EDS.....	111

Gambar 52. Grafik pengujian XRD pada sampel MA.	112
Gambar 53. Komposisi unsur uji EDS pada AISI 4140.....	114

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1: Komposisi kimia baja AISI 4140	12
Tabel 2: Sifat mekanik baja paduan AISI 4140 (Azom.com. 2019)	13
Tabel 3: Hasil penelitian terdahulu dan rencana penelitian.....	50
Tabel 4: Jumlah spesimen dan jenis pengujian	56
Tabel 5: Pengkodean specimen uji	56
Tabel 6: Komposisi Baja AISI 4140 (Badaruddin et al., 2021)	60
Tabel 7: Tabel standar kekerasan metode pengujian Rockwell	61
Tabel 8: Tabel pengujian Kekerasan Rockwell.....	67
Tabel 9: Tabel Uji Impak	67
Tabel 10: Tabel Uji Tarik.....	68
Tabel 11: Sifat mekanik baja paduan AISI 4140 (Azom.com. 2019)	69
Tabel 12: Energi Impak Baja AISI 4140.....	70
Tabel 13: Nilai kekerasan Baja AISI 4140 dalam beberapa perlakuan panas.....	72
Tabel 14: Hasil Uji tarik benda uji AN	73
Tabel 15: Hasil uji tarik benda uji SA1	75
Tabel 16: Hasil uji tarik benda uji SA2	77
Tabel 17: Hasil uji tarik benda uji SA3	78
Tabel 18: Hasil uji tarik benda uji MA.....	80
Tabel 19: Perbandingan hasil uji tarik AISI 4140 dalam berbagai perlakuan panas	81
Tabel 20 : Komposisi Spesimen AN hasil Uji EDS	88
Tabel 21: Komposisi Spesimen SA1 hasil Uji EDS.....	94
Tabel 22 : Komposisi kimia spesimen SA2 hasil Uji EDS	102
Tabel 23 : Komposisi Spesimen SA3 hasil Uji EDS.....	106
Tabel 24 : Komposisi Spesimen MA hasil Uji EDS	111
Tabel 25 : Hasil Uji komposisi EDS baja AISI 4140.....	113
Tabel 26 : Spesifikasi peak.....	115

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dengan perkembangan ilmu dan teknologi, penggunaan material baja dalam industri manufaktur menjadi semakin penting dan terus berkembang. Baja memiliki sifat yang dapat direkayasa sesuai dengan kebutuhan, sehingga memainkan peran krusial dalam memenuhi kebutuhan industri.

Baja merupakan material yang sering digunakan untuk berbagai kebutuhan manusia terutama dalam bidang teknik. Baja sering digunakan untuk membuat alat-alat perkakas, alat-alat pertanian, komponen otomotif dan lain-lain. Kegunaan dari baja berkaitan dengan sifat mekanik yang baik bila dibandingkan dengan material lain. Baja yang diproduksi oleh industri terdiri dari beragam jenis sesuai dengan kebutuhan. Berdasarkan kandungan karbonnya, baja dikelompokkan menjadi tiga macam, yaitu:

- baja carbon rendah (*low carbon steel*)
- baja karbon sedang (*medium carbon steel*)
- baja karbon tinggi (*high carbon steel*)

Sedangkan menurut kadar unsur paduan, baja dapat dibagi dalam dua golongan yaitu: baja paduan rendah yang mengandung unsur paduan di bawah 10% dan baja paduan tinggi yang dapat mengandung unsur paduan di atas 10%.

Salah satu baja paduan rendah yang sering digunakan dalam memproduksi komponen mesin adalah baja AISI 4140.

Baja AISI 4140 dengan kadar karbon 0.42% banyak diaplikasikan untuk komponen mesin seperti gandar, batang penghubung, roda gigi, spindel, poros, sproket, poros pengancing, pinion, poros pompa, rams, dan *ring gear*. Selama aplikasi baja paduan ini harus memiliki kekuatan tinggi dengan keuletan dan ketangguhan yang cukup. Produksi baja AISI 4140 secara konvensional menggunakan metode *quenching* dan *tempering* (Q&T) yang umumnya menghasilkan fasa martensit temper (Badarrudin et al. 2019, Lang et al. 2016).

Berdasarkan kandungan elemen paduannya, baja AISI 4140 memungkinkan untuk diberi perlakuan panas (*heat treatment*). Perlakuan panas pada baja memiliki peranan sangat penting karena dapat merubah struktur mikro dan sifat mekanik dari baja tersebut sesuai dengan kebutuhan. Proses perlakuan panas adalah proses pemanasan dan pengaturan kecepatan pendinginan pada sebuah baja dengan tujuan utama untuk mengubah sifat mekanik dari baja tersebut. Baja yang di *heat treatment* akan berubah sifat mekaniknya dari segi kekerasan, ketangguhan serta keuletan tergantung dari metode yang digunakan untuk baja tersebut. Namun tidak semua jenis baja dapat diperlakukan panas, contohnya baja dengan kadar karbon rendah jika diperlakukan panas maka tidak memberikan peningkatan sifat yang berarti. Maka dapat disimpulkan kandungan karbon pada baja berpengaruh terhadap proses perlakuan panas. Perlakuan panas *hardening* atau pengerasan adalah proses perlakuan panas untuk mengeraskan baja dengan pemanasan sampai perubahan fasa yang homogen (austenisasi) kemudian diikuti pendinginan cepat sampai terjadi struktur yang disebut

martensit. Akibat proses *hardening* pada baja, maka dapat menyebabkan kekerasan (*hardness*) meningkat.

Kekerasan yang dapat dicapai tergantung pada kadar karbon dalam baja dan kekerasan yang terjadi akan tergantung pada temperatur pemanasan (*austenitizing temperature*), *holding time* dan laju pendinginan yang dilakukan. Perlakuan panas pada baja memegang peranan dalam upaya peningkatan kekerasan baja sesuai dengan kebutuhan. Proses ini meliputi pemanasan baja pada suhu tertentu, ditahan pada waktu tertentu dan didinginkan pada media tertentu pula (Sutowo et al. 2013).

Perlakuan panas mempunyai tujuan, yaitu :

- meningkatkan keuletan
- menghilangkan tegangan internal
- menghaluskan butir kristal
- meningkatkan kekerasan
- meningkatkan tegangan tarik logam

Tujuan-tujuan tersebut dapat dicapai dengan memperhatikan faktor-faktor yang mempengaruhi hasil kekerasan dalam perlakuan panas, seperti komposisi kimia, langkah perlakuan panas, cairan pendinginan, temperatur pemanasan, dan lain-lain. Proses perlakuan panas pada baja meliputi pemanasan baja pada suhu tertentu, ditahan pada waktu tertentu, dan didinginkan pada media tertentu pula. Salah satu proses perlakuan panas pada baja adalah pengerasan (*hardening*), yang bertujuan untuk meningkatkan kekerasan baja dengan pemanasan sampai perubahan fasa yang homogen kemudian diikuti pendinginan cepat sampai terjadi struktur yang disebut martensit. Setelah proses *hardening*, baja perlu dilakukan

proses *tempering* untuk menurunkan kekerasan dan meningkatkan keuletan dan ketangguhan (Amstead et al. 1979).

Meskipun proses kombinasi *quenching* dan *tempering* (Q&T) meningkatkan keuletan serta ketangguhan baja, tetapi harus mengorbankan besarnya rasio kekuatan luluh dan kekuatan maksimum baja (Zou et al. 2016, DeCooman et al. 2004), dimensi komponen mesin dan menyebabkan kerugian produksi dan ekonomis (Da Silva et al. 2012). Struktur bahan pada komponen-komponen elemen mesin yang mengalami beban fluktuasi dan regangan besar cenderung lebih cepat mengalami kelelahan (*fatigue*). Syarat utama yang harus dimiliki suatu bahan yang akan digunakan untuk komponen mesin pada kondisi kerja berat dengan umur fatik yang lama adalah memiliki kekuatan serta daktilitas yang besar.

Rekayasa butir untuk menghasilkan fasa bainit (Feng et al. 2016) adalah metode yang sekarang dikembangkan melalui proses *austempering*. Sangat penting memahami bagaimana mikrostruktur baja mempengaruhi umur kelelahan komponen mesin dengan menghambat tingkat pertumbuhan retak, sehingga nilai ambang batas faktor intensitas tegangan menurun (Putatunda et al. 2011). Menurut Canale et al. (2005), baja dengan kadar karbon sekitar 0,40% dapat diaustemper dan proses austemper ini dapat menghasilkan kekuatan yang sama seperti baja yang dihasilkan dari proses *quenching* dan *tempering* (Q&T).

Keterbatasan persediaan bahan baku, besarnya biaya produksi serta operasional untuk mendapatkan baja AISI 4140, menjadi alasan terpenting para peneliti dalam mengembangkan metode perlakuan panas *austempering*. Perlakuan panas Q&T digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik baja, yang

melibatkan langkah pendinginan yang cepat. Konsekuensinya, distorsi yang dialami produk menjadi masalah utama dalam keakuratan dimensi akhir komponen mesin.

Berbagai faktor termasuk transformasi fasa, austenit yang tertahan, media *quenching*, keseragaman dan proses pemilihan bahan secara langsung mempengaruhi dimensi akhir produk komponen mesin yang dihasilkan (Zadeh et al. 2008). Struktur bahan pada komponen-komponen elemen mesin yang mengalami beban fluktuasi dan siklik (tarik tekan) cenderung lebih cepat mengalami kelelahan. Selama aplikasi komponen teknik baja AISI 4140, mengalami beban siklik yang tinggi dan menghasilkan deformasi plastis yang besar pada bahan yang memicu terbentuknya retak awal. Pertumbuhan retak tanpa bisa diindikasikan dan terus merambat, dan akhirnya kegagalan dialami oleh komponen mesin. Hal ini tentu akan berpengaruh terhadap komponen-komponen mesin lain.

Dalam beberapa tahun terakhir, para peneliti semakin tertarik untuk mengembangkan proses *austempering* baja AISI 4140 sebagai pengganti proses perlakuan panas tradisional, yaitu *austenitizing*, *quenching* dan *tempering*. Pengaruh yang ditimbulkan oleh struktur mikro terhadap sifat mekanik baja paduan rendah telah menjadi subyek yang menarik bagi para peneliti melalui rekayasa mikrostruktur/metalurgi fisik untuk mendapatkan sifat mekanik baja yang sesuai dengan aplikasinya (Xu et al. 2017, Marupoulos et al. 2004). Untuk mendapatkan sifat baja AISI 4140 dengan kekuatan dan keuletan tinggi serta rasio kekuatan yang relatif rendah terhadap kekuatan maksimum baja, rekayasa mikrostruktur dilakukan dengan menghambat pembentukan fasa *martensite*,

dimana *austenite* langsung bertransformasi menjadi sedikit *ferrite* dan *pearlite* dan dominan paling banyak struktur fasa *bainite*.

Evolusi sifat mekanik baja paduan dengan kombinasi kekuatan, keuletan, dan ketangguhan yang lebih baik telah dihasilkan dari serangkaian proses *austempering* yang menghasilkan multi-fasa (*bainit-ferrit-perlit*) dan dominan fasa bainit dengan butir sangat halus (*nano-bainite*) pada baja kekuatan tinggi paduan rendah (Chakraborty et al. 2008, Krishna et al. 2013, Kim et al. 2016). Beberapa aplikasi industri, terutama pada industri transportasi selalu menuntut baja berkekuatan tinggi yang lebih ekonomis dengan keuletan dan ketangguhan impak yang baik untuk meringankan bagian struktur utama, sebagai upaya dalam menghemat penggunaan bahan bakar fosil (Kim et al. 2016).

Kanisanij et al. (2012) menunjukkan perlakuan *quenching* baja AISI 4140 sedikit sensitif terhadap temperatur tempering yang menghasilkan struktur martensit karena rendahnya distribusi elemen-elemen pengotor S dan P yang terpisah dari batas butir austenite sebelumnya. Proses perlakuan panas *quenching* ganda menghasilkan peningkatan yang signifikan dari kekuatan dan ketangguhan sebesar 40% dari penyempurnaan butir austenit dalam baja AISI 52100 (Lee et al. 2009). Proses *austempering* sangat ditentukan oleh temperatur awal pembentukan martensit (M_s), dengan catatan temperatur isothermal pembentukan bainit awal (B_s) lebih tinggi dari M_s . Hal ini untuk memastikan transformasi *austenite* ke bainit akan menghasilkan struktur dominan bainit fasa yang halus. Namun, tujuan untuk mendapat struktur bainit cukup sulit karena dua faktor: (1) struktur mikro bainit dan martensit metastabil sulit diprediksi secara akurat karena komposisi elemen baja yang heterogen dan kompleks, sehingga struktur bainit umumnya kasar

karena temperatur transformasi yang tidak tepat, (2) karakteristik termodinamik serta kinetik dari transformasi *austenite* menjadi ferit, perlit dan juga bainit sulit untuk dirumuskan. Oleh karena itu, perlakuan *austempering* lanjutan secara langsung perlu dilakukan untuk mendapatkan struktur bainit yang lebih halus untuk menghasilkan sifat mekanik dan keuletan baja yang tinggi.

Long et al. (2014) mengeksplorasi pengaruh perlakuan panas bainit satu dan dua tahap dalam baja karbon sedang (0.34C-1.52Mn-1.48Si-0.93Ni-1.15Cr-0.40Mo-0.71Al wt.%), dan mereka menyimpulkan bahwa kombinasi yang lebih baik dari ketangguhan impak dan kekuatan tarik dapat diperoleh melalui modifikasi mikro struktur: bainit-ferit dan penahanan pembentukan austenite. Avishan et al. (2017) melaporkan ketangguhan impak dan kekuatan mekanik baja paduan 0.83C-1.43Si-1.90Mn - 1.16Cr-1.28Co- 0.32Mo- 0.66Al (wt.%) dengan struktur nano bainit meningkat secara signifikan setelah 12 jam pada suhu 200 °C dalam proses *austempering* dua tahap dibandingkan dengan *austempering* satu tahap pada 300 °C. Mikrostruktur bainit yang dihasilkan dari proses austemper satu tahap lebih kasar dibandingkan dengan austempering dua tahap.

Seperti penelitian yang dilaporkan oleh Mousalou et al. (2018), perlakuan multi tahap *austempering* baja paduan rendah dengan kadar karbon 0.26% menunjukkan kekuatan luluh dan ketangguhan impak baja secara signifikan ditingkatkan karena pembentukan struktur nano bainit yang lebih halus dan dominan dalam meningkatkan sifat mekanik baja.

Belum ada informasi yang tersedia tentang data sifat-sifat mekanik dan struktur mikro baja AISI 4140 yang diproduksi dari hasil proses perlakuan panas dan *multi austempering*. Oleh karena itu, dari pertimbangan beberapa referensi

buku dan dan jurnal, kami ingin melakukan penelitian secara komprehensif pada perubahan sifat mekanik dan mikro struktur baja AISI 4140 yang diberi perlakuan panas *multi austempering*.

Baja AISI 4140 disiapkan untuk dibuat spesimen pengujian impak, pengujian tarik dan kekerasan. Kemudian, semua specimen uji diberi perlakuan panas. Ada empat perlakuan panas yang berbeda dipilih dalam penelitian ini. Pertama *Single Austempering-1/SA1* dengan melakukan austenisasi, yaitu memanaskan specimen dalam *furnace* suhu 860°C selama 1 jam dilanjutkan dengan mendinginkan cepat dalam larutan garam dengan komposisi 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ ke langkah pembentukan bainit di temperatur 312°C ditahan selama 1 jam, dan diikuti oleh pendinginan akhir pada suhu kamar. Jalur kedua (*Single Austempering-2/SA2*) ditandai dengan perlakuan austempering pada suhu 362°C dengan media pendingin larutan garam dengan komposisi 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ selama 1 jam. Ketiga yaitu *Single Austempering-3/SA3* yaitu dengan perlakuan austempering pada suhu 412°C dengan media pendingin larutan garam dengan komposisi 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ selama 1 jam. Sedangkan proses keempat adalah *Multi Austempering /MA*, yaitu dengan memanaskan benda uji pada suhu 860°C, lalu didinginkan cepat dalam larutan garam dengan komposisi 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ pada suhu 312°C, 362°C dan 412°C masing-masing selama 1 jam, dan diikuti dengan pendinginan pada suhu ruang. Laju pemanasan dan pendinginan pada percobaan ini diusahakan konstan pada 10°C/s.

Semua benda uji SA1, SA2, SA3 dan MA dikarakterisasi melalui beberapa pengujian mekanik yaitu: (1) pengujian kekerasan *Rockwell*

Microhardness, (2) pengujian *Impact Charpy*, (3) pengujian tarik *MTS Landmark 100KN*, dan (4) pengujian struktur mikro SEM EDS dan XRD.

Dari penelitian ini, diharapkan dapat meningkatkan ketangguhan dari baja AISI 4140. Selain itu, baja AISI 4140 dengan sifat mekanik dan mikrostruktur yang kuat sangat diperlukan untuk memenuhi kebutuhan beberapa industri strategis di Indonesia. Ketergantungan impor produk baja kekuatan tinggi yang mahal dapat teratasi dari hasil-hasil riset ini

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut ini:

Bagaimanakah pengaruh temperatur *austempering* dalam beberapa nilai temperatur terhadap kekerasan, kekuatan impak, kekuatan tarik dan mikrostruktur baja AISI 4140, menggunakan media pendingin larutan garam berkomposisi 50% NaNO_3 + 50% KNO_3 .

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh yang terjadi akibat variasi temperatur *austempering* terhadap kekerasan baja AISI 4140.
2. Mengetahui pengaruh yang terjadi akibat variasi temperatur *austempering* terhadap kekuatan impak baja AISI 4140.
3. Mengetahui pengaruh yang terjadi akibat variasi temperatur *austempering* terhadap kekuatan tarik baja AISI 4140.
4. Mengetahui pengaruh yang terjadi akibat variasi temperatur *austempering* terhadap struktur mikro pada AISI 4140.

1.4. Batasan Masalah

1. Tidak memiliki cacat didalam maupun retak pada spesimen uji.
2. Pemindahan benda uji dari dapur pemanas ke media pendingin setiap tahapan proses memiliki waktu yang sama untuk setiap benda uji.
3. Semua peralatan yang dipergunakan selama pengujian dan pengambilan data telah terkalibrasi.
4. Pengujian yang dilakukan adalah: pengujian kekerasan *Rockwell Microhardness*, pengujian *Impact Charpy*, pengujian Tarik MTS *Landmark* 100 kN, pengujian struktur mikro SEM EDS dan XRD.

1.5. Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yaitu :

1. Memberikan informasi penting data sifat mekanik dan mikro struktur baja AISI 4140 yang kuat, yang sangat dibutuhkan oleh beberapa industri strategis di Indonesia dan ketergantungan impor produk produk baja kekuatan tinggi yang mahal dapat teratasi dari hasil riset ini.
2. Memberikan pengetahuan baru bagi perancangan yang membutuhkan material baja menengah yang memiliki kekuatan dan keuletan suatu bahan yang tinggi.
3. Selain itu, dapat meningkatkan motivasi bagi para peneliti di Indonesia untuk melakukan penelitian bertaraf Internasional, terutama dibidang material maju.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian dibagi dalam beberapa bab sebagai berikut :

1. Bab 1 Pendahuluan

Pada bab ini akan dijelaskan tentang latar belakang penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan penelitian dengan judul “Pengaruh Perlakuan Panas Multi Austempering terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja AISI 4140”

2. Bab 2 Tinjauan Pustaka

Dalam bab ini akan diuraikan kajian yang berisi tentang teori-teori yang menunjang dalam melakukan penelitian dan juga analisis hasil penelitian.

3. Bab 3 Metodologi Penelitian

Pada bab ini berisi tentang uraian dan urutan proses pengerjaan penelitian dari awal sampai akhir, serta peralatan dan bahan penelitian yang digunakan.

4. Bab 4 Analisis Data dan Pembahasan

Bab ini berisi data hasil penelitian yang disajikan dalam bentuk grafik dan tabel sebagai sarana untuk menganalisis fenomena yang terjadi. Disini juga akan diuraikan pembahasan tentang analisa hasil penelitian.

5. Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Baja AISI 4140

Material AISI 4140 adalah baja HSLA (*High Strength Low Alloy*) atau baja paduan rendah berkekuatan tinggi (ASM Handbook Vol 5. 2005). Dari komposisi kimia yang dimilikinya, baja AISI 4140 masuk kedalam golongan baja *chromium-molybdenum steel*. Menurut AISI (*American Iron and Steel Institute*), baja paduan rendah AISI 4140 didesain dengan menggunakan *four-digit number* (empat digit angka) untuk menunjukkan perbedaan komposisi yang terkandung dalam baja tersebut. Angka 4 menunjukkan jenis unsur paduan, yaitu *chromium-molybdenum*. Angka 1 menunjukkan persentase unsur paduan $\pm 1\%$, dan angka 40 menunjukkan persentase kandungan karbon ($\pm 0,40\%$)

Komposisi kimia material AISI 4140 disajikan pada tabel 1 berikut ini (ASM Handbook Vol 5. 2005):

Tabel 1: Komposisi kimia baja AISI 4140

Unsur	Kandungan (%)
C (%)	0.38–0.43
Mn (%)	0.75–1.00
Si (%)	0.20–0.35
Cr (%)	0.80–1.10
Mo (%)	0.15–0.25
P (%)	≤ 0.035
S (%)	≤ 0.04

Berdasarkan komposisi kimia pada tabel 1, baja AISI 4140 memungkinkan untuk diberi perlakuan panas (*heat treatment*). Perlakuan panas pada baja memiliki peranan penting karena dapat merubah struktur mikro dan sifat mekanik dari baja tersebut sesuai dengan kebutuhan. Proses perlakuan panas meliputi pemanasan dan pendinginan pada sebuah baja atau baja paduan dengan tujuan utama untuk mengubah sifat mekanik dari baja tersebut. Melalui perlakuan panas yang tepat, tegangan dalam dapat dihilangkan, ukuran butir dapat diperbesar atau diperkecil. Selain itu, ketangguhan (*toughness*) dan keuletan (*ductility*) dari baja dapat ditingkatkan (Amstead et al. 1979).

Proses perlakuan panas *hardening* atau pengerasan adalah proses perlakuan panas untuk mengerasakan baja dengan pemanasan sampai perubahan fasa yang homogen kemudian diikuti pendinginan cepat sampai terjadi struktur yang disebut martensit. Akibat proses *hardening* pada baja, maka dapat menyebabkan kekerasan (*hardness*) dan kegetasan (*brittleness*) sehingga baja tersebut belum cocok untuk digunakan. Oleh karena itu, baja tersebut harus diberi perlakuan lanjut yaitu proses *tempering*. Proses *tempering* bertujuan untuk menambah keuletan dan menurunkan kekerasan baja (Amstead et al. 1979).

Tabel 2: Sifat mekanik baja paduan AISI 4140 (Azom.com. 2019)

Properties	Metric	Imperial
Tensile strength	655 MPa	95000 psi
Yield strength	415 MPa	60200 psi
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi
Shear Modulus	80 Gpa	11600 ksi
Elastic Modulus	190-210 GPa	27557-30458 ksi
Poisson ratio	0,27-0,30	0,27-0,30
Elongation at break (50mm)	25,70%	25,70%
Hardness Brinell	197	197
Hardness Knoop (converted from Brinell hardness)	219	219

<i>Hardness Rockwell B (converted from Brinell hardness)</i>	92	92
<i>Hardness Rockwell C (converted from Brinell hardness)</i>	13	13
<i>Hardness Vickers (converted from Brinell hardness)</i>	207	207
<i>Machineability</i>	65	65

Material AISI 4140 dapat tersedia dalam bentuk bar, batang, tempa, lembaran, plat, strip, dan cor. Aplikasi baja dengan material AISI 4140 digunakan untuk banyak mesin kekuatan tinggi seperti *connecting rods*, poros engkol, as roda, batang piston, *collet*, kunci pas, dan *sprockets*. Baja AISI 4140 memiliki keuletan tinggi dan dapat dibentuk dengan menggunakan teknik konvensional dalam kondisi anil. Namun, membutuhkan lebih banyak tekanan atau gaya untuk pembentukan karena lebih keras dari baja karbon biasa.

Baja paduan rendah dengan kekuatan tinggi seperti baja AISI 4140 pada umumnya diproduksi dengan cara *quenching* dan *tempering* (QT) pada saat kondisi mikrostrukturnya adalah ferit-martensit temper (Feng et al. 2017, Lang et al. 2016). Dengan perlakuan proses *quenching* yang dilanjutkan dengan proses *tempering* bertujuan untuk menghasilkan kombinasi yang ideal antara kekuatan dan daktilitinya, yang dapat dicapai dengan proses *tempering* yang akan menghasilkan struktur martensit dan ferit yang halus. Penggunaan baja AISI 4140 banyak diaplikasi terutama pada komponen-komponen mesin yang bekerja dalam kondisi beban dinamis misalnya : poros, roda gigi, poros pengencang (*stubs*), pinion, dan spindle. Meskipun kekuatan baja AISI 4140 meningkat secara signifikan melalui proses Q&T, namun struktur martensit yang halus yang berada di dalam baja tidak memberikan kontribusi terhadap deformasi plastis selama bahan tersebut mengalami fatik (Paul et al. 2015, Zang

et al. 2015) karena baja dengan struktur martensit memiliki kemampuan berdeformasi plastis yang sangat rendah. (Badaruddin et al. 2019). Kapasitas baja untuk mengalami deformasi plastis sangat dibutuhkan untuk menunda pembentukan retak awal dan perambatannya selama fatik (Jordon et al. 2014, Nagarajan and Putatunda, 2015). Selain itu, proses QT pada baja AISI 4140 cenderung menghasilkan rasio kekuatan ultimate terhadap kekuatan luluh yang rendah $\sigma_{ult}/\sigma_{yield} \leq 1.0$ meskipun daktilitinya cukup (Badaruddin et al. 2019). Baja dengan rasio $\sigma_{ult}/\sigma_{yield} > 1.0$ menunjukkan performa fatik yang lebih baik selama bekerja dalam kondisi beban siklik (Fatoba and Akid. 2018).

Pada umumnya, baja AISI 4140 dengan rasio $\sigma_{ult}/\sigma_{yield} > 1.0$ dapat dicapai melalui proses *annealing/normalizing* (Badaruddin et al. 2019, Kreethi et al. 2017) dengan menghasilkan struktur ferit dan perlit yang berisikan struktur Fe_3C *lamellar*. Kemampuan perlit terhadap deformasi plastis lebih tinggi dibandingkan martensit yang memungkinkan perlit dengan struktur Fe_3C *lammelar* mampu menahan pergerakan dislokasi selama bahan mengalami beban fatik, sehingga umur bahan menjadi lebih lama (Badaruddin et al. 2019). Meskipun umur fatik baja dapat ditingkatkan melalui proses *annealing* (Badaruddin et al. 2019), namun kekuatan baja turun signifikan hampir 40% karena proses *annealing* cenderung menghasilkan struktur ferit perlit kasar (ukuran butir besar). Proses *austempering* umumnya satu tahap dilakukan pada baja paduan rendah untuk menghasilkan struktur bainit (Putatunda et al. 2011). Mikrostruktur bainit satu tahap dalam baja AISI 4140 berkorelasi langsung dengan kekuatan fatik yang mampu menghambat pembentukan retak awal dan menaikkan faktor intensitas tegangan pada ujung retak (Nagarajan et al. 2017).

Selain itu, temperatur media *austemper* dan waktu penahanan berkorelasi terhadap perubahan sifat ketangguhan impak dan kekerasan permukaan baja paduan rendah yang memiliki kadar karbon sekitar 0.4%C (Badaruddin et al. 2021, Chen et al. 2013).

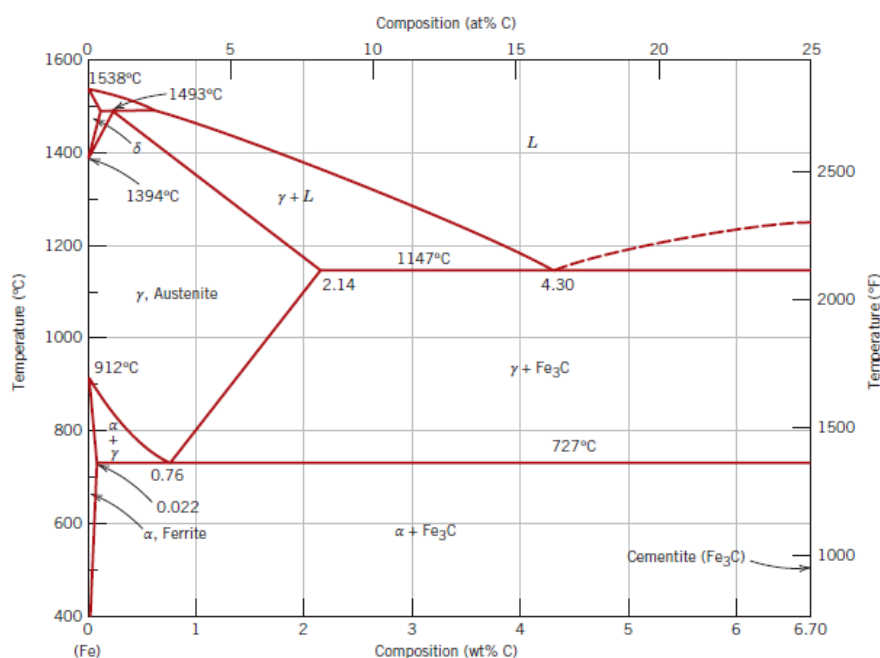
Aplikasi baja kekuatan tinggi paduan rendah terutama untuk industri transportasi selalu menuntut penggunaan komponen dengan rasio kekuatan dan berat yang relatif tinggi sebagai upaya dalam menghemat penggunaan bahan bakar fosil (Kim et al. 2016). Umumnya, perlakuan panas Q&T dilakukan dengan memanaskan komponen mesin pada temperatur *austenite* (~860–960°C) yang tergantung pada kandungan karbon dalam baja (Bhadeshia. 2022), dan ditahan selama beberapa menit. Kemudian komponen secara cepat dicelupkan ke dalam media pendingin dengan tujuan menghasilkan fasa martensit. Untuk menghaluskan struktur martensit, kemudian komponen dipanaskan pada temperatur 350–450°C selama beberapa jam (proses *tempering*). Selama proses *quenching*, umumnya distorsi terjadi pada produk yang menjadi dalam keakuratan dimensi akhir. Selain itu, beberapa faktor lain seperti: transformasi fasa austenit yang tertahan, media *quenching*, keseragaman dan proses pemilihan bahan secara langsung mempengaruhi dimensi akhir produk komponen yang dihasilkan (Canale and Totten, 2005).

2.2. Diagram Fasa Besi–Besi Karbida (Fe–Fe₃C)

Sebagian dari diagram fasa besi-karbon disajikan pada Gambar 1 di bawah. Besi murni pada pemanasan mengalami dua perubahan struktur kristal sebelum meleleh. Di suhu kamar, bentuknya stabil yang disebut ferit, atau besi α ,

memiliki struktur kristal BCC. Ferit mengalami transformasi polimorfik menjadi austenit FCC, atau besi γ , di 912°C (1674°F). Austenit ini bertahan hingga 1394°C (2541°F), di mana suhu austenit FCC kembali ke fase BCC yang dikenal sebagai δ -ferit, yang akhirnya meleleh pada 1538°C (2800°F). Semua perubahan ini terlihat jelas di sepanjang sumbu vertikal kiri dari diagram fase. Sumbu horizontal (komposisi wt%C) hanya sampai 6,70 wt%C; pada konsentrasi ini senyawa antara besi karbida, atau sementit (Fe_3C) terbentuk.

Karbon adalah pengotor interstisial dalam besi dan membentuk larutan padat dengan masing-masing α dan δ -ferit dan juga dengan austenit, seperti yang ditunjukkan oleh fase tunggal α , δ , dan γ pada bidang gambar 1. Dalam α -ferit BCC, hanya sedikit konsentrasi karbon yang larut, dengan kelarutan maksimum adalah 0,022 wt% pada 727°C (1341°F). Meskipun hadir dalam konsentrasi yang relatif rendah, karbon ini secara signifikan mempengaruhi sifat mekanik ferit.



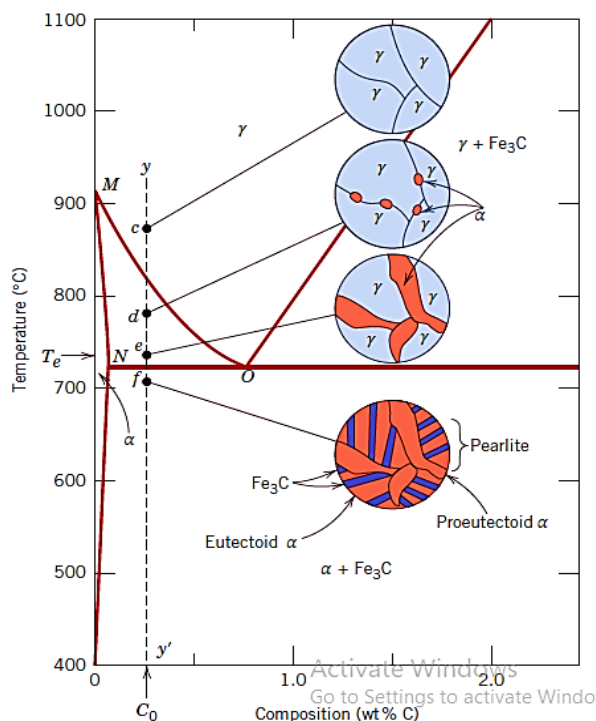
Gambar 1. Diagram fase besi-besi karbida (Fe–Fe₃C).
(Callister, 2017:287)

Austenit, atau fase γ dari besi, bila dicampur dengan karbon saja, tidak stabil di bawah 727°C (1341°F), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Kelarutan maksimum karbon dalam austenit adalah 2.14% berat, terjadi pada 1147°C (2097°F). Kelarutan ini kira-kira 100 kali lebih besar dari maksimum untuk ferit BCC karena tempat kedudukan oktahedral FCC lebih besar dari tetrahedral BCC. Karbon membentuk larutan padat dengan masing-masing α dan δ -ferit dan juga dengan austenit. Dalam α -ferit BCC, hanya sedikit konsentrasi karbon yang larut, dengan kelarutan maksimum adalah 0.022% berat pada 727°C (1341°F). Meskipun hadir dalam konsentrasi yang relatif rendah, karbon secara signifikan mempengaruhi sifat mekanik ferit.

Sementit (Fe_3C) terbentuk ketika batas kelarutan karbon dalam α -ferit terlampaui di bawah 727°C (1341°F) (untuk komposisi dalam wilayah fase $\alpha+\text{Fe}_3\text{C}$). Sementit berdampingan dengan fase antara 727°C dan 1147°C (1341°F dan 2097°F). Secara mekanis, sementit sangat keras dan rapuh, dan kehadirannya dapat meningkatkan kekuatan beberapa baja. Sementit hanya metastabil dan akan tetap sebagai senyawa pada suhu kamar. Namun, jika dipanaskan pada suhu 650°C - 700°C selama beberapa tahun, sementit secara bertahap akan berubah menjadi α -besi dan karbon dalam bentuk grafit. Grafit akan tetap ada setelah pendinginan ke suhu kamar. Oleh karena itu, diagram fase pada gambar 1 bukanlah diagram kesetimbangan yang sebenarnya karena sementit bukan merupakan senyawa kesetimbangan. Karena laju dekomposisi sementit berlangsung sangat lambat, hampir semua karbon dalam baja berada dalam bentuk Fe_3C .

2.2.1. Pengembangan Struktur Mikro Pada Paduan *Hypoeutektoid*

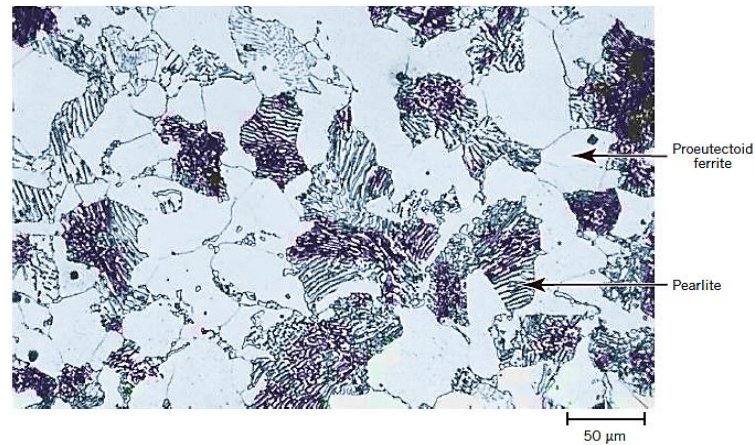
Perubahan fasa yang terjadi setelah melalui daerah astenit ke fasa $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (Gambar 1) sangat kompleks dan mirip dengan sistem *Hypoeutektoid*. Baja *hypoeutektoid* merupakan baja dengan kandungan karbon antara 0.022 sampai 0.76wt%C. Pendinginan dari paduan ini direpresentasikan bergerak menuju ke bawah garis yy' yang ditampilkan pada Gambar 2. Pada temperatur 875°C di titik c , struktur mikro seluruhnya adalah butiran fase. Pada pendinginan di titik d , di temperatur 775°C, berada dalam wilayah fase $\alpha + \gamma$ dimana kedua fase ini berdampingan seperti pada skema struktur mikro. Sebagian besar partikel α terbentuk di sepanjang batas butir γ yang asli. Komposisi fase α dan γ dapat ditentukan dengan menggunakan hubungan garis yang sesuai, dengan komposisi masing-masing 0.020 dan 0.40 wt% C.



Gambar 2. Skema representasi struktur mikro besi paduan karbon dari *hypoeutektoid*.
(Callister 2017:292)

Saat paduan didinginkan melalui daerah fase $\alpha+\gamma$, komposisi fasa ferit akan berubah dengan temperatur di sepanjang batas fase $\alpha-(\alpha+\gamma)$ garis MN, menjadi lebih kaya karbon. Namun, perubahan komposisi *austenite* lebih dramatis di sepanjang batas $(\alpha+\gamma)-\gamma$, garis MO, sebagai fungsi pengurangan suhu. Pendinginan dari d ke e, tepat di atas eutektoid namun masih di daerah $\alpha+\gamma$, menghasilkan fase fraksi yang meningkat, struktur mikro yang mirip serta partikel akan tumbuh lebih besar. Pada posisi ini, komposisi fase α mengandung 0.022wt% C, sedangkan fase γ adalah komposisi eutektoid, dengan 0.76wt% C.

Pada saat suhu diturunkan tepat di bawah eutektoid di titik f, semua fase γ yang ada pada temperatur T_e (dan memiliki komposisi eutektoid) akan menjadi perlit. Struktur mikro di titik f muncul seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Fasa ferit akan hadir baik di perlit dan sebagai fase yang terbentuk saat pendinginan melalui fase daerah $\alpha+\gamma$. Ferit dalam perlit disebut ferit eutektoid, sedangkan yang terbentuk di atas T_e , disebut proeutektoid ferit. Gambar 3 adalah foto mikro baja dengan 0.38wt% C, dimana daerah putih adalah ferit proeutektoid.



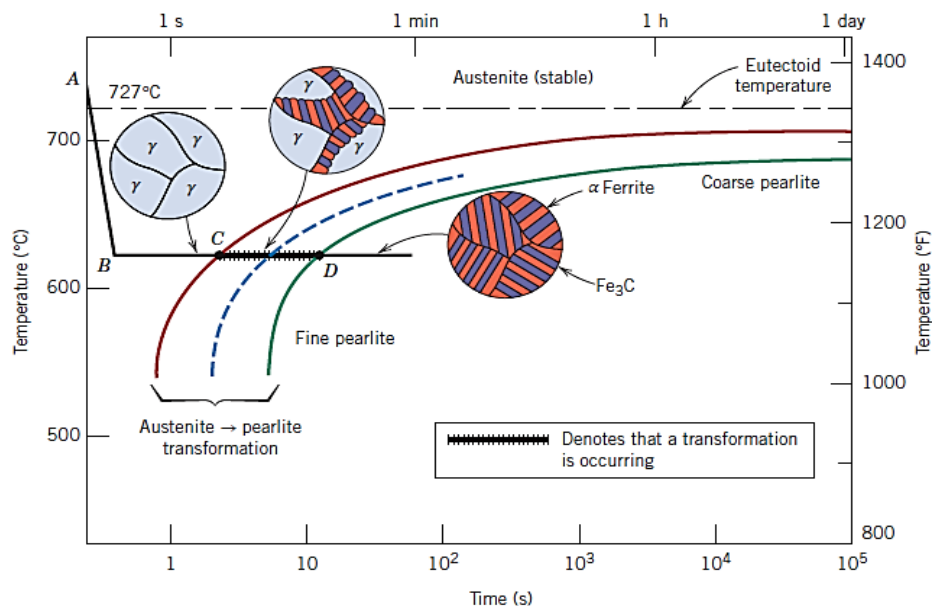
Gambar 3. Fotomikrograf baja 0,38 wt% C dengan struktur mikro perlit dan ferit proeutektoid (pembesaran 635x).

Untuk perlit, jarak antara lapisan α dan Fe_3C bervariasi dari butir ke butir. Beberapa dari perlit akan terlihat lebih gelap karena banyak lapisan jarak dekat yang belum terlihat pada perbesaran foto mikrograf. Dua unsur mikro akan terlihat yaitu ferit proeutektoid dan perlit, yang akan muncul di semua paduan besi karbon *hypoeutektoid* apabila didinginkan secara perlahan hingga suhu di bawah suhu eutektoid.

2.3. Diagram Transformasi Isotermal

2.3.1. Perlit

Pada reaksi eutektoid, austenit dengan kadar karbon sedang akan menjadi ferit dengan kandungan karbon kecil serta sementit dengan kadar karbon tinggi. Pada waktu terbentuknya *pearlite*, atom C akan bergerak dari ferit ke sementit.

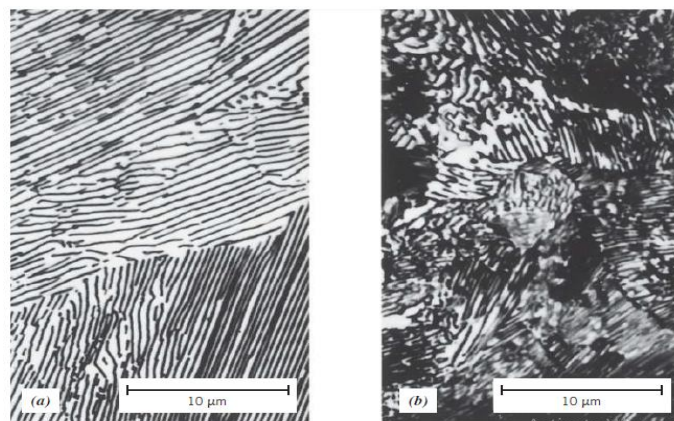


Gambar 4. Transformasi isothermal paduan besi karbon eutektoid, beserta kurva perlakuan panas ABCD. (Callister, 2017: 320).

Suhu mempunyai peranan yang sangat penting dalam laju transformasi austenit ke perlit. Gambar 4 merupakan kurva diagram transformasi isothermal untuk paduan besi-karbon eutektoid, yang menunjukkan kurva perlakuan panas isothermal (ABCD).

Pendinginan sangat cepat austenit ke temperatur tertentu ditunjukkan dengan garis vertikal AB, dan perlakuan isothermal pada kondisi ini disajikan oleh bagian horizontal BCD. Fungsi waktu akan meningkat dari kiri ke kanan di sepanjang garis ini. Transformasi austenit ke perlit akan dimulai pada perpotongan di C (setelah kira-kira 3.5 detik), serta akan mencapai 15 detik di titik D. Gambar 4 juga menampilkan struktur mikro pada berbagai kondisi waktu selama berlangsungnya reaksi. Perbandingan pada ketebalan lapisan ferit dan sementit didalam perlit adalah sekitar 8 sampai 1. Ketebalan lapisan mutlak tergantung pada temperatur di mana terjadinya transformasi isothermal.

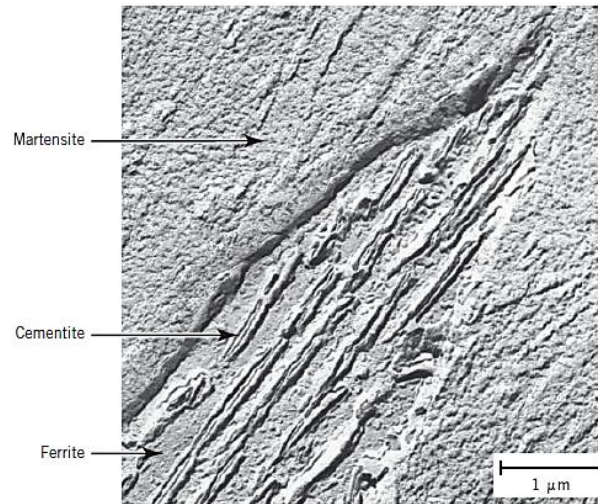
Saat suhu benar-benar tepat di bawah eutektoid, lapisan yang relatif tebal akan dihasilkan dari fase ferit dan Fe_3C . Struktur mikro inilah yang disebut perlit kasar, dan daerah pembentukannya ditunjukkan di sebelah kanan kurva. Dengan berkurangnya suhu, laju dari difusi karbonpun juga akan menurun, dan lapisan akan menjadi semakin tipis. Struktur berlapis tipis yang diproduksi di pada suhu disekitar 540°C disebut perlit halus, yang juga ditampilkan dalam gambar 5.



Gambar 5. Fotomikrograf dari (a) perlit kasar dan (b) perlit halus. 3000x.
(Callister, 2017: 320)

2.3.2. Bainit

Bainit adalah struktur mikro lain yang dapat terbentuk selama transformasi austenitik pada baja. Struktur ini terdiri dari campuran fase ferit dan sementit. Pembentukan bainit melibatkan proses difusi. Bentuk bainit dapat bervariasi, muncul sebagai struktur berbentuk jarum atau pelat, tergantung pada suhu transformasi.

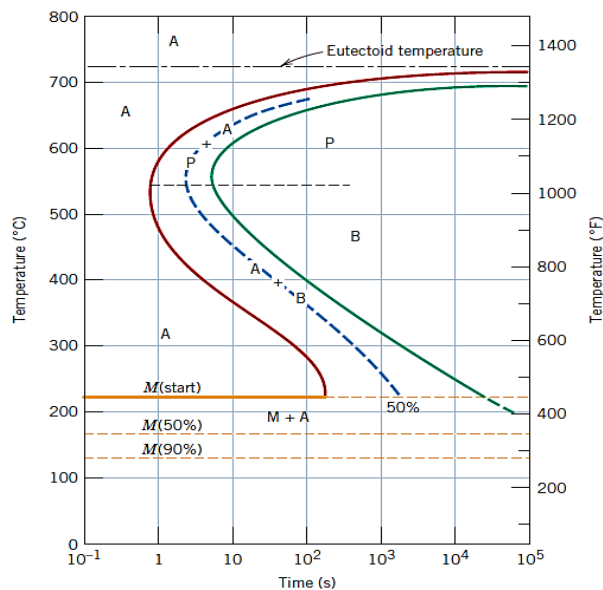


Gambar 6. Mikrograf struktur bainit yang dikelilingi martensit.
(Callister, 2017: 321)

Gambar 6 adalah mikrograf elektron yang memperlihatkan butir bainit yang diposisikan secara diagonal dari kiri bawah ke kanan atas, terdiri dari ferit serta partikel sementit Fe_3C yang terlihat memanjang.

Fase yang mengelilingi adalah martensit. Selanjutnya, tidak ada fase proeutektoid yang terbentuk beserta bainit. Ketergantungan pada waktu dan suhu pada transformasi bainit juga ditunjukkan di dalam diagram transformasi isothermal. Hal itu dapat terjadi pada saat suhu di bawah di mana perlit terbentuk.

Pada Gambar 7, kurva di bagian awal, akhir, dan di setengah reaksi hanyalah ekstensi dari transformasi perlitik seperti yang ditunjukkan pada diagram transformasi isothermal untuk paduan besi-karbon komposisi eutektoid yang telah diperluas ke suhu yang lebih rendah. Ketiga kurva berbentuk C dan memiliki "hidung", di mana laju transformasi pada kondisi maksimum. Perlit terbentuk di atas hidung, yaitu pada kisaran suhu sekitar 540°C hingga 727°C , dan pada suhu sekitar 215°C dan 540°C akan memunculkan bainit sebagai produk transformasi.



Gambar 7. Diagram transformasi Isotermal besi karbon paduan eutektoid (A) austenit (B) Bainit (M) Martensit (P) Perlit.

2.3.3. Martensit

Unsur mikro atau fase lain yang disebut martensit akan terbentuk pada saat paduan besi karbon diaustenisasi, yaitu didinginkan secara cepat (*quenching*) ke temperature yang relatif rendah. Martensit merupakan struktur fase tunggal yang tidak seimbang yang diperoleh dari proses transformasi austenit tanpa difusi. Ini akan dianggap sebagai hasil dari transformasi yang kompetitif Bersama dengan perlit dan bainit. Transformasi *martensitic* akan terjadi pada saat laju pendinginan yang berlangsung cukup cepat untuk mencegah difusi karbon. Difusi apapun akan menghasilkan pembentukan fase ferit dan sementit.

Butir martensit memiliki tampilan yang terlihat seperti piring atau jarum (Gambar 8). Fasa putih pada foto mikro merupakan *retained austenite*, yang tidak mengalami perubahan selama pendinginan cepat. Martensit dan juga mikro konstituen lain seperti perlit, dapat hidup berdampingan.



Gambar 8. Struktur mikro martensit. Bentuk jarum (fase martensit), dan daerah putih (austenite). (Avner, Sidney H. 1974:258)

Transformasi martensit adalah proses yang tidak melibatkan difusi dan terjadi secara instan, ditunjukkan oleh garis horizontal yang disebut sebagai $M_{(start)}$ pada Gambar 7. $M(50\%)$ dan $M(90\%)$ menunjukkan persentase transformasi austenit menjadi martensit. Suhu di mana garis-garis ini berada bervariasi, tergantung pada komposisi paduan, tetapi umumnya suhu tersebut relatif rendah karena difusi karbon hampir tidak ada. Karakter garis-garis ini yang horizontal dan linear menunjukkan bahwa transformasi martensit tidak tergantung pada waktu, melainkan hanya bergantung pada suhu pendinginan atau penguatan paduan. Jenis transformasi ini disebut transformasi athermal.

Mendinginkan paduan dengan komposisi eutektoid yang didinginkan dengan cepat dari suhu di atas 727°C hingga 165°C , dari diagram transformasi isothermal (Gambar 7), dapat terlihat bahwa 50% austenit akan segera berubah menjadi martensit. Selama suhu ini dipertahankan, tidak akan ada transformasi lebih lanjut yang terjadi.

Hadirnya elemen paduan selain karbon seperti: Cr, Ni, Mo, dan W mampu membuat perubahan yang signifikan dalam posisi dan juga bentuk kurva dalam diagram transformasi isothermal. Ini juga termasuk (1) pergeseran ke *nose* yang lebih panjang dari transformasi austenit menuju ke perlit, dan (2) pembentukan *nose* bainit yang terpisah. Biasanya, bainit tidak dapat terjadi pada saat paduan dengan komposisi eutektoid atau baja karbon polos didinginkan terus menerus hingga mencapai suhu kamar. Hal ini disebabkan karena pada saat transformasi bainit semua austenit telah berubah menjadi perlit.

Untuk pendinginan kontinyu dari paduan baja, terdapat laju pendinginan kritis, yang mewakili laju pendinginan minimum yang menghasilkan martensit total struktur. Laju pendinginan kritis ini, bila disertakan pada diagram transformasi kontinyu, tidak akan bertemu dengan *nose* di mana transformasi perlit mulai, seperti yang ditampilkan pada gambar 7, untuk laju pendinginan lebih besar dari yang kritis hanya akan ada martensit, selain itu ada rentang nilai diantara perlit dan martensit yang dihasilkan. Akhirnya, struktur perlitik akan berkembang secara penuh pada tingkat pendinginan yang rendah.

Carbon beserta unsur paduan lainnya juga akan menggeser fase perlit (serta proeutektoid) dan *bainite nose* dalam jangka waktu yang lama, yang mengakibatkan menurunnya laju pendinginan kritis. Salah satu alasan baja paduan adalah untuk memfasilitasi pembentukan martensit sehingga struktur martensit total dapat berkembang pada penampang yang relatif tebal.

Kromium, nikel, molibdenum, mangan, silikon, dan tungsten merupakan unsur paduan lain yang sangat efektif dalam membuat baja tahan terhadap panas.

Namun elemen ini harus dalam larutan padat dalam austenit pada saat terjadi pendinginan.

2.5. Mechanical Behavior Paduan Besi–Karbon Perlit

Sementit jauh lebih keras tetapi lebih rapuh daripada ferit. Meningkatkan fraksi Fe_3C dalam paduan baja sambil menahan elemen mikrostruktur lainnya agar konstan akan menghasilkan bahan yang lebih keras dan lebih kuat. Kekuatan Tarik, kekuatan luluh dan angka kekerasan akan cenderung meningkat pada saat kadar karbon meningkat. Sementit bersifat lebih rapuh, sehingga peningkatan kandungannya menghasilkan keuletan dan ketangguhan (atau energi impak) yang cenderung menurun.

Ketebalan pada masing-masing lapisan fase ferit dan sementit dalam struktur mikro juga akan mempengaruhi sifat mekanik dari suatu material. Perlit halus bersifat lebih keras dan kuat jika dibandingkan dengan perlit kasar.

Fase sementit yang mempunyai sifat kuat dan kaku akan sangat membatasi deformasi dari ferit yang bersifat lunak di daerah yang terletak didekat batas, sehingga dapat dikatakan bahwa sementit akan memperkuat ferit.

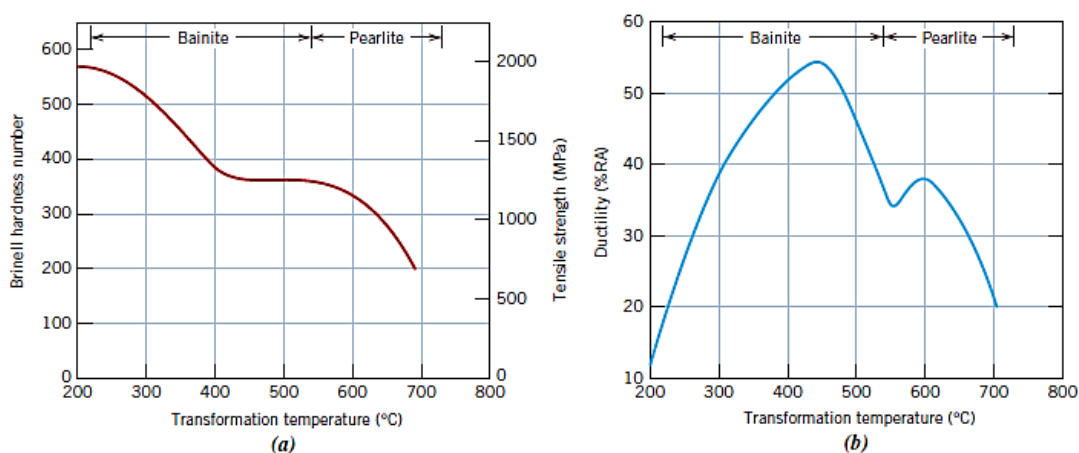
Tingkat penguatan pada perlit halus lebih tinggi karena area batas fasa yang lebih besar per satuan volume material. Batas fase berfungsi sebagai penghalang untuk gerakan dislokasi dengan cara yang sama seperti batas butir. Pada perlit halus, ada lebih banyak batas yang harus dilewati selama deformasi plastis, sehingga semakin besar penguatan dan pembatasan gerakan dislokasi pada perlit halus menghasilkan kekerasan dan kekuatan yang lebih besar.

2.5.1. Mechanical Behavior Spheroidite

Paduan yang memiliki struktur mikro *pearlitic* memiliki kekuatan dan kekerasan yang lebih besar dibandingkan dengan *spheroidite*. Pada *spheroidite*, batas yang tidak terlalu luas per satuan area menyebabkan deformasi plastis hampir tidak dibatasi, sehingga bahan tersebut relatif lunak dan lemah. Baja *spheroidized* sangat ulet, lebih dari baik perlit halus atau kasar, dan juga sangat tangguh karena retakan hanya dapat ditemukan di sebagian kecil dari partikel sementit yang rapuh merambat melalui matriks ferit yang ulet.

2.5.2. Mechanical Behavior Bainit

Karena baja bainitik memiliki struktur yang lebih halus (yaitu, partikel α -ferit dan Fe_3C yang lebih kecil), mereka pada umumnya lebih kuat dan lebih keras daripada baja perlit. Baja bainit juga menunjukkan kombinasi kekuatan dan keuletan yang diinginkan. Gambar 9(a) dan 9(b) masing-masing menampilkan pengaruh temperatur transformasi terhadap kekuatan, kekerasan dan keuletan untuk paduan besi karbon komposisi eutektoid.

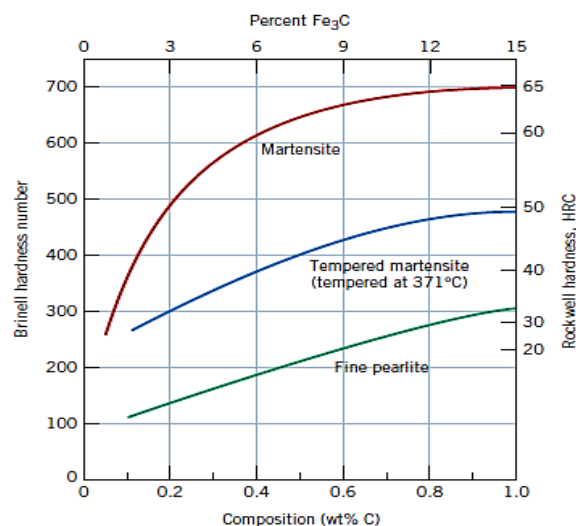


Gambar 9. (a) kekerasan dan kekuatan tarik (b) daktilitas (%RA) sebagai fungsi transformasi suhu isothermal paduan besi-karbon komposisi eutektoid.

(Callister, 2017:334)

2.5.3. Mechanical Behavior Martensit

Dari berbagai struktur mikro yang dapat diproduksi untuk paduan baja tertentu, martensit adalah yang paling keras dan kuat. Kekerasannya akan bergantung pada kadar karbon yang dimilikinya, sampai 0.6 wt%C seperti yang ditunjukkan pada gambar 10, yang menggambarkan kekerasan fasa martensit dan perlit halus sebagai fungsi dari persen berat karbon.



Gambar 10. Kekerasan sebagai fungsi % karbon untuk martensit, martensit temper (pada 371°C), dan baja perlit.
(Callister, 2017:335)

Berbeda dengan baja perlitik, kekuatan dan kekerasan martensit tidak dianggap berhubungan dengan struktur mikro. Sebaliknya, properti ini dikaitkan dengan efektivitas atom karbon interstisial dalam menghambat gerakan dislokasi, dan untuk slip yang relatif sedikit untuk struktur BCT.

2.6. Proses Perlakuan Panas

Saat ini, terdapat berbagai jenis bahan yang dapat digunakan sebagai bahan baku industri, dan jenisnya sangat beragam, dan kadang-kadang membuat sulit untuk melakukan pemilihan yang tepat. Satu bahan memiliki keunggulan dalam hal keuletan, sementara yang lain tahan terhadap korosi, *creep*, atau suhu kerja yang tinggi tetapi harganya cukup mahal, sehingga pemilihan bahan baku berdasarkan pertimbangan ekonomi juga memainkan peran yang sangat penting.

Penentuan bahan yang tepat pada dasarnya merupakan kompromi dari berbagai sifat, lingkungan, dan penggunaan, sejauh mana sifat bahan dapat memenuhi persyaratan yang telah ditentukan. Bahan teknik perlu diketahui secara akurat karena digunakan untuk berbagai tujuan dalam berbagai kondisi. Bahan teknik dapat digolongkan menjadi tiga bagian yaitu logam, non-logam, dan komposit. Bahan logam dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian yaitu *ferro* dan *non-ferro*, sedangkan bahan non-logam terdiri dari polimer, kayu, kulit, dan karet. Komposit adalah bahan yang tersusun dari logam dengan logam lain.

Bahan *ferro* memiliki besi sebagai kandungan utama, ditambah unsur lain, sehingga menghasilkan berbagai jenis paduan besi seperti besi cor, baja, dan baja paduan. Bahan *non-ferro* antara lain tembaga, seng, aluminium, magnesium, timah hitam, timah putih, nikel, titanium, dan paduan lainnya. Sifat-sifat bahan logam perlu diketahui dengan baik karena bahan ini digunakan untuk berbagai tujuan dan kondisi sesuai dengan fungsinya, tetapi kadang-kadang sifat-sifat bahan logam tidak memenuhi persyaratan sesuai dengan fungsinya, sehingga diperlukan upaya untuk meningkatkan atau memperbaiki sifat-sifat logam. Sifat-sifat logam dapat ditingkatkan dengan perlakuan panas pada logam.

Dewasa ini terdapat berbagai jenis bahan yang dapat digunakan sebagai bahan baku industri, jenis-jenis yang sangat beragam kadang-kadang menyulitkan pemilihan yang tepat. Bahan yang satu mempunyai keunggulan ditinjau dari segi keuletan, lainnya tahan terhadap korosi, mulur (*creep*) atau suhu kerja yang tinggi namun cukup mahal, oleh karena itu pemilihan bahan baku berdasarkan pertimbangan ekonomis memegang peranan yang sangat penting pula.

Penentuan bahan yang tepat pada dasarnya merupakan kompromi berbagai sifat, lingkungan dan cara penggunaan, sampai dimana sifat bahan dapat memenuhi persyaratan yang telah ditentukan. Bahan teknik perlu diketahui secara seksama karena bahan teknik digunakan untuk berbagai macam keperluan dalam berbagai keadaan

Bahan teknik dapat digolongkan menjadi tiga bagian yaitu logam, bukan logam dan komposit. Bahan logam dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian yaitu *ferro* dan *non ferro*, sedangkan bahan bukan logam terdiri dari polimer, kayu, kulit, karet. Komposit adalah bahan yang tersusun dari logam dengan logam lain.

B.H. Amstead et al. (1997) berpendapat bahwa perlakuan panas adalah proses pemanasan dan pendinginan logam dalam keadaan padat untuk mengubah sifat-sifat fisik logam tersebut. Baja dapat diberi perlakuan panas untuk meningkatkan ketangguhan dan keuletan sehingga tahan terhadap abrasi dan beban kejutan yang dapat menyebabkan deformasi pada bagian tersebut. Perlakuan panas melibatkan memanaskan logam atau paduan hingga mencapai suhu tertentu, kemudian menahannya selama beberapa saat pada suhu tersebut,

dan kemudian mendinginkannya sesuai dengan kecepatan pendinginan tertentu. Selama proses pemanasan dan pendinginan ini, terjadi perubahan struktur mikro, termasuk perubahan bentuk dan ukuran butir kristal, yang dapat menyebabkan perubahan sifat logam atau paduan tersebut. Tujuan dari perlakuan panas pada logam adalah:

- 1) Merubah atau memperbaiki ukuran butiran kristal.
- 2) Mengurangi atau menghilangkan tegangan dalam logam selama proses pengerjaan panas maupun pengerjaan dingin.
- 3) Memperbaiki sifat-sifat mekanik seperti kekuatan (*strength*), kekerasan (*hardness*), ketahanan fatik (*fatigue resistance*), kekenyalan (*ductility*), dan tahanan kejut/impak (*impact/shock resistance*).
- 4) Meningkatkan ketahanan terhadap panas dan korosi.
- 5) Menghasilkan permukaan yang keras.

Proses perlakuan panas meliputi :

- 1) Pengerasan (*hardening*)
- 2) Penyepuhan (*tempering*)
- 3) Pemijaran dingin (*annealing*)
- 4) Penormalan (*normalizing*)
- 5) Pengerasan permukaan (*carburising dan nitriding*)

2.6.1. Pengerasan (*hardening*)

Pengerasan (*hardening*) adalah proses pemanasan baja sampai suhu di daerah atau di atas daerah kritis disusul dengan pendinginan yang cepat (Amstead et al., 1997). Proses pengerasan bertujuan untuk menambahkan kekerasan,

kekuatan dan memperbaiki ketahanan baja dalam pemakaiannya. Pengerasan dicapai dengan memanaskan baja hingga mencapai temperatur di atas temperatur pengerasan kemudian didinginkan pada media pendingin yang tersedia. Cara pemanasannya bertahap dan pada setiap penambahan temperatur ditahan selama beberapa menit sesuai dengan ukuran sampel, apabila ukuran sampel berbeda maka dalam melakukan pemanasannya untuk sampel berukuran kecil diberi matras dengan ukuran sama dengan sampel besar sehingga kedua sampel dapat mencapai temperatur di atas temperatur pengerasan (temperatur kritis) secara bersamaan.

Proses perlakuan panas pada logam bertujuan untuk meratakan panas ke seluruh benda kerja agar tidak mengalami distorsi atau retak. Semakin besar potongan benda, semakin lama waktu yang diperlukan untuk memperoleh hasil yang merata. Kekerasan yang dapat dicapai pada proses pendinginan tergantung pada laju pendinginan, kadar karbon, dan ukuran benda. Struktur martensit secara penuh dapat diperoleh dengan pendinginan yang cepat menggunakan air, larutan garam, atau air yang disemprotkan. Suhu media pendingin harus merata agar pendinginan yang dicapai juga merata.

Baja dengan karbon kurang dari 0.76% dapat diberi perlakuan panas pada suhu austenit sempurna, sedangkan baja dengan karbon lebih dari 0.76% dapat diberi perlakuan panas pada suhu sedikit di atas titik kritis terendah. Pada kandungan karbon di atas 0.76%, tidak terjadi perubahan sementit bebas menjadi austenit karena larutannya telah menjadi keras, sehingga perlu dilakukan pemanasan pada temperatur tinggi untuk mengubahnya dalam bentuk austenit.

Suhu pemanasan untuk baja karbon biasanya sama dengan temperatur anil sempurna. Berdasarkan diagram fasa Fe-Fe₃C, baja karbon dengan kandungan karbon kurang dari 0.76% dipanaskan 30°-50°C di atas titik kritis atas. Seluruh atom karbon masuk ke dalam larutan padat dan kemudian didinginkan.

Baja dengan kandungan karbon lebih dari 0.76% biasanya dipanaskan sedikit di atas titik kritis terendah (bawah), sehingga terjadi perubahan perlit menjadi austenit. Setelah itu, martensit akan terbentuk setelah dilakukan pendinginan pada suhu tersebut. Namun, jika kandungan karbon di atas 0.76%, tidak akan terjadi perubahan sementit bebas menjadi austenit karena larutannya telah menjadi keras. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemanasan pada suhu tinggi untuk mengubahnya menjadi austenit melalui pemanasan sampai pada fase besi gamma (γ) yang memiliki susunan atom yang lebih padat dengan susunan kristal atomnya berbentuk "berpusat pada dinding kubus".

Sifat-sifat mekanik dan stuktur mikro yang diinginkan dari baja karbon rendah dapat diperoleh dengan perlakuan panas. Perlakuan panas merupakan suatu proses untuk merubah sifat logam dengan cara merubah stuktur mikronya melalui proses pemanasan dan pengaturan kecepatan pendinginan.

Proses perlakuan panas yang diperlukan untuk mendapat material *Austempered Low Carbon Steel* adalah dengan melakukan proses *austempering* terhadap baja karbon rendah (*low carbon steel*). Proses *austempering* pada pembuatan material *Austempered Low Carbon Steel* terdiri dari lima tahapan proses, yaitu:

a. Austenisasi

Proses austenisasi adalah proses pemanasan material baja karbon rendah hingga mencapai daerah austenit dengan temperatur antara 820°C-870°C. Pada daerah austenit, keseluruhan fasa material akan diubah menjadi austenit, dan atom karbon akan larut intersiti pada struktur FCC pada permukaan sampel sampai pada kedalaman tertentu. Proses ini disebut difusi, dimana atom karbon masuk ke dalam struktur kristal logam pada temperatur austenit.

Parameter yang berpengaruh pada proses ini adalah temperatur yang seragam dan media pendingin yang sesuai sehingga diperoleh kondisi fase yang diinginkan. Temperatur austenisasi yang digunakan dalam kisaran 820⁰C–870⁰C dengan waktu austenisasi sekitar 30 menit. Penahanan baja karbon sedang diatas temperatur kritis selama periode waktu yang cukup, bertujuan untuk menjamin bahwa matrik keseluruhan yang terbentuk adalah Austenit (*complete austenitization*). Temperatur austenisasi menentukan kandungan karbon dari austenit. Temperatur dan waktu austenisasi tergantung pada stuktur mikro dari material yang digunakan. Temperatur austenisasi digunakan untuk mengontrol kandungan karbon dari austenit yang mempengaruhi stuktur dan sifat dari *austempered medium carbon steel* yang dihasilkan.

b. Penahanan (*holding time*)

Proses penahanan adalah homogenisasi unsur dari fasa austenit, yaitu waktu penahanan pada daerah austenit selama periode tertentu dengan tujuan untuk memperoleh keseragaman fase austenit (*complete austenitization*)

c. *Quenching*

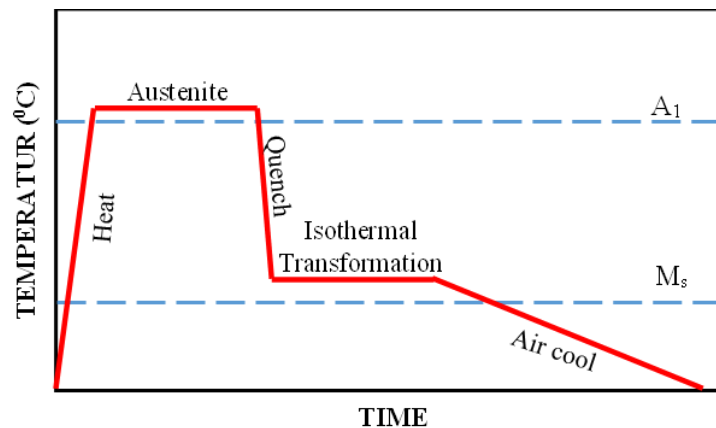
Proses *quenching* adalah pendinginan material yang telah menjalani austenisasi. Proses *quenching* dilakukan dengan cara pencelupan dalam media

pendingin secara cepat. Kecepatan proses *quenching* dari daerah austenit ke temperatur transformasi isothermal merupakan hal yang sangat menentukan. Hal ini dilakukan untuk menghindari terbentuknya struktur perlit saat pencelupan ke temperatur *austempering*.

d. *Austempering*

Proses *austempering* adalah proses perlakuan panas untuk mendapatkan struktur bainit yang dapat meningkatkan keuletan baja. Proses dimulai dengan pemanasan baja hingga mencapai temperatur austenit, ditahan untuk mendapatkan fase austenit homogen, didinginkan cepat hingga temperatur di atas M_s , ditahan (isothermal) hingga transformasi bainit selesai, dan didinginkan dengan udara ke temperatur kamar. Penahanan dilakukan dalam media seperti salt bath atau oli ke kurva pembentukan bainit.

Pada prinsipnya *austempering* merupakan penyempurnaan dari proses temper. Transformasi fasa pada proses *austempering* terjadi secara iso termal yaitu dengan penahanan (*soaking*) pada waktu yang lebih lama dengan temperatur pembentukan martensit (M_s), sehingga diperoleh dekomposisi austenit yang lengkap (*ausferit*). Ausferit adalah struktur yang diharapkan sebagai hasil akhir dari proses austempering, karena struktur ausferit memiliki kombinasi sifat mekanik yang lebih baik.



Gambar 11. Diagram proses Austempering.
(Amstead, et al. 1997: 143)

Proses *austempering* pada baja karbon sedang dilaksanakan untuk memperoleh bahan *austempered low carbon steel*, yaitu dengan melakukan proses austenisasi spesimen pada temperatur 871°C - 982°C untuk menghasilkan struktur Austenit dan dengan waktu penahanan tertentu kemudian di *quenching* pada temperatur antara 260°C - 400°C dan ditahan selama 2-4 jam kemudian didinginkan pada suhu ruangan (Wadageri et al. 2106).

Siklus yang terjadi selama *austempering*

- 1) Pemanasan dalam *furnance* listrik sampai temperatur austenit (871°C - 982°C)
- 2) Pencelupan atau perendaman dengan media pendingin pada temperatur 260°C - 400°C sampai bertransformasi dari austenit menjadi ausferit
- 3) Pendinginan dengan udara terbuka (temperatur ruangan)

Keuntungan *austempering* adalah :

- 1) Memiliki ketangguhan tinggi
- 2) Waktu heat treatment semakin singkat

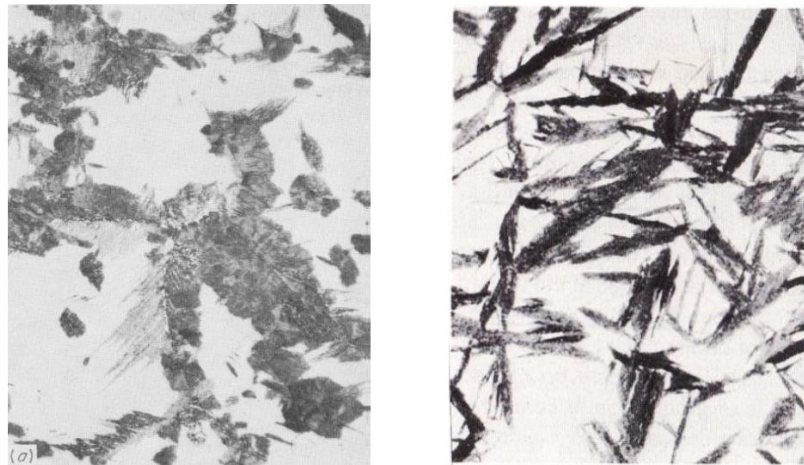
e. *Air Cooling* (pendinginan udara)

Proses *air cooling* adalah proses pendinginan terakhir yang dilakukan pada material baja setelah direndam dalam larutan garam atau oli dan didinginkan pada suhu ruangan. Proses *austempering* adalah proses perlakuan panas untuk mendapatkan struktur bainit yang dapat meningkatkan keuletan baja dibandingkan pada kondisi equilibrium. Proses ini diawali dengan pemanasan baja hingga mencapai temperatur austenit, ditahan untuk mendapatkan fase austenit homogen, didinginkan cepat hingga temperatur di atas M_s , ditahan (*isothermal*) hingga transformasi bainit selesai, dan didinginkan dengan udara ke suhu kamar. Proses penahanan adalah proses homogenisasi dari komposisi fasa austenit, yaitu waktu penahanan pada daerah austenit selama periode waktu tertentu dan bertujuan untuk menjamin diperolehnya keseragaman fase austenit (*complete austenitization*).

2.6.2. Transformasi Bainit

Bainit merupakan mikrostruktur yang menunjukkan dekomposisi austenit (γ) menjadi ferit (α) dan sementit (Fe_3C), terjadi pada temperatur di bawah *nose* hingga di atas M_s . Berdasarkan strukturnya bainit dibedakan menjadi dua tipe yaitu *upper bainite* dan *lower bainite*. Kekerasan *upper bainite* mencapai 40 HRC dan *lower bainite* 60 HRC. Upper bainite adalah struktur yang terbentuk di temperatur relatif tinggi (mendekati *nose*) dan tampak pada gambar 12(a) seperti bulu (*feathery*). Lower bainite adalah struktur yang terbentuk di temperatur relatif rendah (mendekati M_s), tampak seperti jarum (*needlelike*) (Gambar 12b).

Pada *upper bainite*, austenit stabil diquench ke temperatur di bawah nose menjadi austenit tidak stabil, lalu ditahan (isothermal) untuk membentuk ferit lewat jenuh (*ferrite supersaturated*). Pada *lower bainite*, fase austenit stabil didinginkan cepat ke temperatur austemper (mendekati temperatur M_s) menjadi austenit tidak stabil, lalu ditahan (isothermal) untuk membentuk ferit lewat jenuh (*ferrite supersaturated*). Transformasi terjadi pada temperatur rendah, sehingga jarak difusi pendek. Kekerasan meningkat disebabkan oleh struktur semakin halus dan jarak antara karbida semakin dekat.



Gambar 12. Struktur (a) *upper bainite* dengan perlit halus dengan matrik martensit 1000x (b) *lower bainite* dengan matrik martensit 2500x. (Avner, Sidney H. 1974:268-269)

2.7. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu bertujuan untuk mendapatkan bahan perbandingan dan acuan. Selain itu juga untuk menghindari adanya anggapan kesamaan dengan penelitian sebelumnya (plagiarism). Maka dari itu, pada penelitian kali ini penulis menyampaikan hasil-hasil penelitian terdahulu sebagai berikut :

2.7.1. Penelitian Mattia Franceschi, Alvisè Miotti Bettanini, Luca Pezzato, Manuele Dabalà and Pascal J. Jacques, 2021

Penelitian Mattia Franceschi, dkk berjudul “*Effect of Multi-Step Austempering Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of a High Silicon Carbide-Free Bainitic Steel with Bimodal Bainite Distribution*”.

Pada penelitian ini, Franceschi, dkk., meneliti baja *High Silicon Carbide-Free Bainitic* menggunakan tiga jalur perlakuan multi-austemper yang berbeda. Rute pertama, yaitu Multistep 1, terdiri dari austenisasi pada 900°C selama 5 menit, diikuti dengan pendinginan cepat (10°C/s) ke tahap pembentukan bainit pertama pada suhu 370°C hingga reaksi bainit selesai, dan tahap pembentukan bainit kedua pada suhu 300°C selama transformasi bainitik lebih lanjut, diikuti oleh pendinginan akhir hingga suhu kamar. Rute kedua, bernama Multistep 2, ditandai dengan perlakuan *austempering* kedua di 250°C. Dan rute ketiga, yang disebut Multistep 3 terdiri dari perlakuan austempering pertama pada 350 °C sampai penghentian transformasi bainitik dan tahap kedua pada 250°C.

Karakterisasi struktur mikro dilakukan pada spesimen yang diberi perlakuan panas mengikuti praktik metalografi standar. Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan mikroskop elektron pemindaian emisi *lapangan Zeiss ULTRA55 Schottky (Carl Zeiss NV, Zaventem, Belgia)*, beroperasi pada 15kV dan dengan detektor *InLens*. Ketebalan ferit bainitik dilakukan pada gambar SEM yang diambil pada perbesaran tinggi dan dianalisis dengan dukungan perangkat lunak *ImageJ*. Pengamatan TEM, dengan mikroskop elektron transmisi *Philips CM30 (Philips NV, Amsterdam, Belanda)* yang beroperasi pada 300kV, dilakukan untuk mendapatkan fitur mikrostruktur berstruktur nano. Pengukuran difraksi sinar-X dilakukan pada sampel yang dipoles untuk

menentukan fraksi volume austenit yang tertahan. Karakterisasi tersebut dilakukan dengan difraktometer *Bruker-D8 ADVANCE (Bruker, Billerica, MA, USA)*, dengan radiasi Cu Ky pada tegangan 30kV dan arus 30mA.

Dari penelitian ini diperoleh hasil bahwa :

- (1) Perlakuan austempering satu langkah mengarah ke struktur mikro yang mengandung ferit bainitik, film austenit stabil, blok tidak stabil dan martensit getas keras. Kombinasi konstituen mikrostruktur seperti itu berakibat pada pemanjangan yang buruk karena efek TRIP (*TRansformation Induced Plasticity*) yang tidak menguntungkan;
- (2) Austemper dua tahap mengarah pada pembentukan distribusi bainit bimodal, bainit kasar terbentuk pada suhu yang lebih tinggi, dan bainit yang lebih halus terbentuk selama tahap kedua. Selain itu, langkah kedua dari reaksi bainit menghindari keberadaan pulau martensit besar dalam struktur mikro akhir;
- (3) Selain itu, tahap kedua dari reaksi bainit menyebabkan peningkatan lebih lanjut dalam kandungan karbon austenit, meningkatkan stabilitas termal austenit yang tertahan;
- (4) Perlakuan austemper dua langkah mengarah untuk meningkatkan sifat mekanik dalam hal daktilitas (perpanjangan fraktur) dan kekuatan tarik akhir.

2.7.2. Penelitian oleh Mattia Franceschi, Luca Pezzato, Claudio Gennari, Alberto Fabrizi, Marina Polyakova, Dmitry Konstantinov, Katya Brunelli and Manuele Dabala, 2020.

Penelitian oleh Mattia Franceschi dkk, pada 2020 berjudul “*Effect of Intercritical Annealing and Austempering on the Microstructure and Mechanical Properties of a High Silicon Manganese Steel*”.

Pada penelitian ini, digunakan material *High Silicon Manganese Steel*. Perlakuan panas yang dilakukan terhadap sampel adalah annealing dengan pemanasan pada 870⁰C pada 1⁰C/s, waktu penahanan 10 menit.

Selanjutnya perlakuan *quenching* dan *tempering* (Q&T), yaitu dengan pemanasan pada 900⁰C pada 1⁰C/s, waktu tinggal 15 menit, dan pendinginan air (laju pendinginan: 40⁰C/s); temper pada 600⁰C selama 30 menit dan pendinginan udara (5⁰C /s). *Intercritical Annealing and Austempering (IA&A)*: Perlakuan pra-quenching dari 870⁰C (15 menit) dan pendingin air. Pemanasan pada 780⁰C selama 30 menit pada 0,8⁰C/s, pendinginan udara pada 10⁰C/s hingga 400⁰C dan ditahan selama 30 menit diikuti dengan pendinginan air hingga suhu kamar pada 40⁰C/s.

Struktur mikro sampel dianalisis dengan menggunakan mikroskop optik, *LEICA DMRE (Leica Microsystems S.r.l., Milan, Italia)*, dan pemindaian mikroskop elektron (SEM) menggunakan *LEICA-Cambridge Stereoscan LEO 440 (Leica Microsystems S.r.l., Milan, Italia)*. Identifikasi fasa dan kuantifikasi fasa dilakukan melalui difraksi sinar-X dengan *Bruker D8 Advance (XRD, Bruker D8 Advance, Karlsruhe, Jerman)*, beroperasi pada 40kV dan 40mA dan tabung radiasi Cu (radiasi K disaring dengan filter nikel di sisi tabung). Pola yang diperoleh dianalisis menggunakan perangkat lunak High Score Plus untuk

mengidentifikasi fase konstituen. Perhitungan fraksi volume fase dilakukan melalui analisis Rietveld pada perangkat lunak yang sama.

Analisis *Electron Backscattered direction* (EBSD) dilakukan setelah perlakuan panas untuk mempelajari secara rinci struktur mikro yang diperoleh. Secara khusus, identifikasi dan kuantifikasi dari fase yang dilakukan. Selain itu, distribusi fase, orientasi, dan keberadaan tekstur diselidiki. Untuk investigasi EBSD, digunakan *FEI QUANTA 205 FEG SEM* (*Thermo Fisher Scientific, Hillsboro, OR, USA*), dilengkapi dengan *AMETEK EBSD* (*AMETEK BV, Tilburg, Belanda*) sistem dan Analisis OEM Mikroskop elektron transmisi (TEM) juga dilakukan untuk menyelesaikan karakterisasi RA pada sampel menggunakan *JEOL JEM 200CX* (*Jeol Ltd, Tokyo, Jepang*).

Kekerasan mikro Vickers, diuji dengan *Leitz-DURIMET* (*Leica Microsystem S.r.l., Milan, Italia*) tester, dilakukan pada masing-masing sampel dengan melakukan tiga lekukan, dengan beban 300g. Sampel juga dikenai uji tarik menurut ASTM A370. Pengujian dilakukan pada sampel tulang anjing, pada laju regangan $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ dengan mesin uji tarik *MTS* (*MTS System Corporation, Eden Prairie, MN, USA*), menggunakan gaya maksimum 50kN.

Dan dari penelitian ini didapat hasil:

- (1) Baja silikon tinggi baru dengan struktur mikro multifase yang disusun oleh ferit, tetragonal martensit, dan retained austenit berhasil dikembangkan. Perlakuan austempering memungkinkan untuk menstabilkan volume fraction yang konsisten dari retained austenit sama dengan 14,9%.

- (2) Analisis XRD, EBSD, dan TEM lengkap mengungkapkan bahwa RA (Retained Austenite) hadir dalam dua morfologi: sebagai film antara pulau martensit dan dalam bentuk balok.
- (3) Sampel yang mengalami austempering menunjukkan nilai kekerasan mikro Vickers yang lebih tinggi sementara Q&T dan sampel anil ditandai dengan nilai yang lebih rendah.
- (4) Perlakuan austempering meningkatkan kekuatan tarik material (1650 MPa), dibandingkan dengan anil dan Q&T, yang dicirikan oleh uji tarik yang lebih rendah, masing-masing 1130 dan 1200 MPa. Namun, jumlah martensit yang tinggi, mengakibatkan pada regangan patah yang rendah (4,5%) dan keuletan, yang dikonfirmasi oleh permukaan patah getas.

2.7.3. Penelitian oleh Hamid Mousalou, Sasan Yazdania, Behzad Avishan, Naghi Parvini Ahmadi, Ali Chabok, Yutao Pei tahun 2018.

Penelitian oleh Hamid Mousalou, dkk tersebut berjudul "*Microstructural and mechanical properties of low-carbon ultra-fine bainitic steel produced by multi-step austempering process*". Empat prosedur perlakuan panas yang berbeda dilakukan dalam penelitian ini :

Pertama langkah (A) dengan memanaskan sampel pada temperatur austenitisasi 900°C dan austempering pada 340°C selama 4 jam untuk mencapai struktur mikro bainitik penuh. Austempering langkah (B) juga dirancang dalam sampel yang diaustenisasi pada 900 °C, diubah menjadi bainit pada 340 °C selama 8 menit untuk mendapatkan hampir 60% bainit dan akhirnya didinginkan hingga 305°C dan ditahan selama 6 jam. Ketiga (C) austenisasi pada 900°C,

sebagian diubah menjadi bainit pada 340°C selama 14 menit untuk mencapai 80% bainit, diturunkan hingga 277°C dan ditahan selama 22 jam.

Terakhir (D) adalah tiga langkah perlakuan panas austempering di mana sampel awalnya diaustenisasi pada 900°C , sebagian diubah menjadi bainit pada 340°C untuk mendapatkan 80% bainit, diturunkan hingga 277°C dan ditahan selama 22 jam dan akhirnya didinginkan hingga 200°C selama 54 jam.

Semua perlakuan panas adalah dilakukan di tungku penangas garam dan sampel didinginkan dalam air pada akhir siklus perlakuan panas.

Dari penelitian ini selanjutnya diperoleh hasil sebagai berikut :

Perlakuan panas *austempering* multi-langkah dilakukan untuk mencapai bainitic ultra-halus struktur mikro dan karakteristik mekanik yang diinginkan dari baja bainitik dengan berat 0,26% karbon. Proses perlakuan panas dilakukan dengan transformasi bainitic parsial pada suhu jauh lebih rendah dari suhu M_s baja. Hasilnya menunjukkan bahwa kekuatan luluh dan ketangguhan patah benturan baja meningkat secara signifikan dengan perlakuan austempering multi-langkah. Penurunan fraksi volume yang signifikan dan bentuk austenit / martensit dalam struktur mikro dan pembentukan skala nano plat bainit dan film austenit merupakan faktor dominan dalam meningkatkan mekanis properti. Juga ditunjukkan bahwa penurunan suhu *austempering* pada langkah kedua penurunan ketebalan pelat dalam kelompok Bain; perubahan kristalografi ini karakteristik menyebabkan peningkatan fraksi batas sudut tinggi dalam struktur mikro, yang memainkan peran penting dalam meningkatkan ketangguhan patah impact baja.

2.7.4. Penelitian-penelitian lain.

Perlakuan austemper perlu dilakukan untuk mendapatkan struktur bainit halus dimana karbida (Fe_3C) dalam matriks ferit dalam bentuk partikel-partikel yang lebih halus dibandingkan struktur lamellar karbida (Fe_3C) dalam perlit (Badaruddin et al. 2019). Struktur karbida halus akan berkontribusi langsung terhadap peningkatan kekuatan mekanik dan fatik baja. Kombinasi kekuatan tarik dan elongasi baja AISI 9255 dengan Si-tinggi dapat ditingkatkan secara ekstrem mencapai 1852 MPa dan 14% pada temperatur austempering 280°C and 1165 MPa dan 34% pada temperatur 400°C (Acharya et al. 2018). Selain itu, austempering satu tahap dilakukan pada baja dengan komposisi: 0.34C-1.52Mn-1.48Si-0.93Ni-1.15Cr-0.40Mo-0.71Al wt.% menghasilkan kombinasi energi impak dan kekuatan tarik yang besar karena struktur bainit ferit halus diperoleh pada temperatur austempering 250°C dan 350°C selama 5 jam, masing-masing. Sedangkan Avishan et al. 2017 melakukan proses austemper baja dengan komposisi kimia 0.83C-1.43Si-1.90Mn-1.16Cr- 1.28Co-0.32Mo- 0.66Al (wt.%) pada temperatur 200°C dan pada temperature 300°C setelah 12 jam. Struktur bainit-ferit yang dihasilkan dari proses austemper temperature 300 °C lebih halus dan berimplikasi pada peningkatan kekuatan tarik dan impak baja yang lebih tinggi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variasi temperatur media austemper (350, 400 dan 450°C)

2.8. Rencana Penelitian

Pada baja AISI 4140 (Badaruddin et al. 2021) menghasilkan peningkatan kekerasan permukaan baja secara signifikan pada suhu 350°C.

Penelitian yang sama dilakukan oleh Mousalou et al. (2018) pada baja paduan rendah kadar 0.26 wt.% karbon dengan austempering tunggal pada suhu 350°C, dimana kekuatan luluh dan ketangguhan impak baja secara signifikan ditingkatkan dari struktur bainit halus dan dominan dalam meningkatkan sifat mekanik baja.

Untuk mendapatkan sifat baja AISI 4140 dengan kekuatan dan keuletan tinggi dan rasio kekuatan yang relatif tinggi terhadap kekuatan maksimum, maka pembentukan fasa martensit harus dihambat agar fasa austenite langsung bertransformasi menjadi ferit dan bainit. Sifat mekanik baja dengan kombinasi kekuatan, keuletan, dan ketangguhan yang ideal akan dihasilkan melalui serangkaian proses austempering untuk menghasilkan struktur bainit halus. Keberhasilan austemper sangat ditentukan oleh temperatur isothermal pembentukan awal bainit (B_s), yang harus lebih tinggi daripada suhu awal pembentukan martensit (M_s). Hal ini untuk memastikan transformasi austenit menuju bainit akan menghasilkan struktur dominan bainit ferit. Tiga hal penting yang menjadi hambatan dalam proses austempering baja paduan; (1) terbentuknya martensit beserta bainit yang disebabkan karena ketepatan temperatur B_s yang tidak dapat diprediksi, (2) suhu M_s yang sama dengan B_s karena database komposisi kimia baja yang tidak lengkap tersedia, dan (3) transformasi fasa austenite menjadi ferit dan bainit sangat sulit untuk ditentukan (Mousalou et al. 2018, Zadeh et al. 2008). Struktur bainit terbentuk umumnya kasar karena temperatur transformasi yang tidak tepat (Mousalou et al. 2018, Xu et al. 2017), Oleh karena itu temperatur M_s dan B_s baja AISI 4140 akan ditentukan dengan menggunakan *software* yang dikembangkan oleh Bhadhesia.

2022, berdasarkan atas jumlah kandungan karbon (wt.%) dan komposisi kimia elemen logam lainnya dalam baja.

Belum ada informasi yang tersedia tentang data-data karakter mekanik dan mikro struktur baja AISI 4140 yang diproduksi dari hasil proses perlakuan panas dan multi austempering. Oleh karena itu, dari pertimbangan beberapa referensi buku dan dan jurnal, melalui proyek riset dasar Kemenristekdikti tahun 2021-2022, kami ingin melakukan penelitian secara komprehensif pada perubahan sifat mekanik dan mikro struktur baja AISI 4140 yang diberi perlakuan panas multi austempering.

Material baja AISI 4140 akan disiapkan untuk dibuat specimen uji impact, uji tarik dan uji kekerasan. Kemudian, semua spesimen uji diberi perlakuan panas Ada empat perlakuan panas yang berbeda dipilih dalam penelitian ini. Pertama *Single Austempering-1/SA1* dengan melakukan austenisasi, yaitu memanaskan spesimen dalam *furnace* suhu 800°C selama 1 jam dan kemudian didinginkan cepat ke dalam larutan garam dengan komposisi 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ ke langkah pembentukan bainit di temperature 312°C ditahan selama 1 jam, dan diikuti oleh pendinginan akhir pada suhu kamar. Jalur kedua (*Single Austempering-2/SA2*) ditandai dengan perlakuan austempering pada suhu 362°C dengan media pendingin larutan garam dengan komposisi 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ selama 1 jam. Ketiga yaitu *Single Austempering-3/SA3* yaitu dengan perlakuan austempering pada suhu 412°C dengan media pendingin larutan garam dengan komposisi 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ selama 1 jam. Sedangkan proses keempat adalah *Multi Austempering /MA*, yaitu dengan memanaskan specimen pada suhu 800°C, lalu didinginkan cepat dalam larutan garam dengan komposisi

50% NaNO₃ + 50% KNO₃ pada suhu 312°C, 362°C dan 412°C masing-masing selama 1 jam, dan diikuti dengan pendinginan pada suhu ruang.

Laju pemanasan dan pendinginan pada percobaan ini diusahakan konstan pada 10°C/s

Semua specimen SA1, SA2, SA3 dan MA dikarakterisasi melalui beberapa pengujian mekanik yaitu: (1) uji kekerasan *Vickers Microhardness*, (2) uji *Impact Charpy*, (3) uji tarik MTS Landmark 100 kN, dan (4) pengujian struktur mikro EDS dan X-RD.

Dari penelitian ini diharapkan akan meningkatkan ketangguhan dari baja AISI 4140. Selain itu, baja AISI 4140 dengan sifat mekanik dan mikro struktur yang kuat sangat diperlukan untuk memenuhi kebutuhan bagi beberapa industri strategis di Indonesia dan ketergantungan impor produk produk baja kekuatan tinggi yang mahal dapat teratasi dari hasil-hasil riset ini.

Tabel 3: Hasil penelitian terdahulu dan rencana penelitian

No	Peneliti	Judul	Metoda	Hasil
1	Mattia Franceschi, Alvise Miotti Bettanini, Luca Pezzato, Manuele Dabalà and Pascal J. Jacques, 2021	<i>Effect of Multi-Step Austempering Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of a High Silicon Carbide-Free Bainitic Steel with Bimodal Bainite Distribution</i>	Multistep1, austenisasi 900°C 5 menit, diikuti dengan pendinginan cepat ke tahap bainit pertama pada suhu 370°C dan tahap bainit kedua pada suhu 300°C, lanjut pendinginan hingga suhu kamar. Multistep 2, perlakuan austempering kedua di 250°C. Multistep 3 terdiri dari perlakuan austempering pertama pada 350 °C	(1)Perlakuan austempering satu langkah mengarah ke struktur mikro yang mengandung ferit bainitik, film austenit stabil, blok tidak stabil dan martensit getas keras. Kombinasi konstituen mikrostruktur seperti itu berakibat pada pemanjangan yang buruk karena efek TRIP yang tidak menguntungkan; (2) Austemper dua tahap mengarah pada pembentukan distribusi bainit bimodal, bainit kasar terbentuk pada

			sampai penghentian transformasi bainitik dan tahap kedua pada 250°C.	suhu yang lebih tinggi, dan bainit yang lebih halus terbentuk selama tahap kedua. Selain itu, langkah kedua dari reaksi bainit menghindari keberadaan pulau martensit besar dalam struktur mikro akhir; (3) Selain itu, tahap kedua dari reaksi bainit menyebabkan peningkatan lebih lanjut dalam kandungan karbon austenit, meningkatkan stabilitas termal austenit yang tertahan; (4) Perlakuan austemper dua langkah mengarah untuk meningkatkan sifat mekanik dalam hal daktilitas (perpanjangan fraktur) dan kekuatan tarik akhir.
2	Mattia Franceschi, Luca Pezzato, Claudio Gennari, Alberto Fabrizi, Marina Polyakova, Dmitry Konstantinov, Katya Brunelli and Manuele Dabala, 2020.	<i>Effect of Intercritical Annealing and Austempering on the Microstructure and Mechanical Properties of a High Silicon Manganese Steel</i>	Perlakuannya adalah annealing dengan pemanasan 870°C pada, holding time 10 menit. Selanjutnya (Q&T) quenching tempering, dengan pemanasan 900°C, selama 15 menit, pendinginan air (laju pendinginan: 40°C/s); Temper pada 600°C selama 30 menit dan pendinginan udara (5°C/s). <i>Intercritical Anneal & Austempering (IA&A):</i> Perlakuan pra-quenching 870°C (15 menit) dan pendingin air. Pemanasan pada 780°C selama 30 menit (0,8°C/s), pendinginan udara	(1) Baja silikon tinggi baru dengan struktur mikro multifase yang disusun oleh ferit, tetragonal martensit, dan retained austenit berhasil dikembangkan. Perlakuan austempering memungkinkan untuk menstabilkan volume fraction yang konsisten dari retained austenit sama dengan 14,9%. (2) Analisis XRD, EBSD, dan TEM lengkap mengungkapkan bahwa RA (<i>Retained Austenite</i>) hadir dalam dua morfologi: sebagai film antara pulau martensit dan dalam bentuk balok. (3) Sampel yang mengalami austempering menunjukkan nilai kekerasan mikro vickers

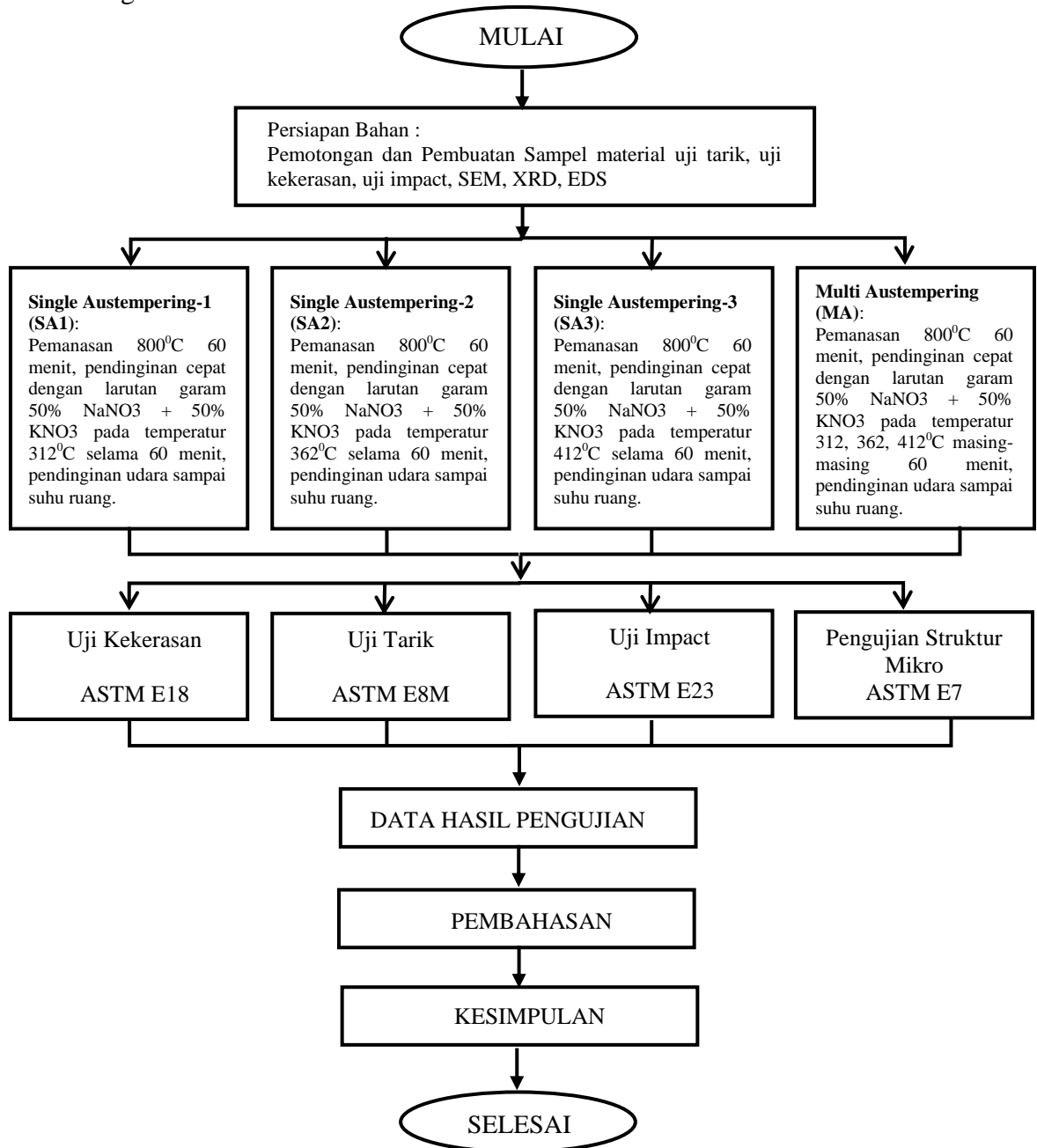
			(10 ⁰ C/s) hingga 400 ⁰ C dan ditahan selama 30 menit diikuti dengan pendinginan air hingga suhu kamar pada (40 ⁰ C/s).	yang lebih tinggi sementara Q&T dan sampel anil ditandai dengan nilai yang lebih rendah. (4) Perlakuan <i>austempering</i> meningkatkan kekuatan tarik material (1650 MPa), dibandingkan dengan anil dan Q&T, yang dicirikan oleh uji tarik yang lebih rendah, masing-masing 1130 dan 1200 MPa. Namun, jumlah martensit yang tinggi, mengakibatkan pada regangan patah yang rendah (4,5%) dan keuletan, yang dikonfirmasi oleh permukaan patah getas.
3	Hamid Mousalou, Sasan Yazdania, Behzad Avishan, Naghi Parvini Ahmadi, Ali Chabok, Yutao Pei tahun 2018	<i>Microstructural and mechanical properties of low-carbon ultra-fine bainitic steel produced by multi-step austempering process</i>	Empat prosedur perlakuan: Langkah (A) dengan memanaskan sampel pada suhu austenitisasi 900 ⁰ C dan austemper pada 340 ⁰ C selama 4 jam untuk mencapai struktur mikro bainitik penuh. Austempering langkah (B) juga dirancang dalam sampel yang diaustenisasi pada 900 ⁰ C, diubah menjadi bainit pada 340 ⁰ C selama 8 menit untuk mendapatkan 60% bainit dan akhirnya didinginkan hingga 305 ⁰ C dan ditahan selama 6 jam. Ketiga (C) austenisasi pada 900 ⁰ C, sebagian diubah menjadi bainit pada 340 ⁰ C	Perlakuan <i>austempering</i> multi-langkah dilakukan untuk mencapai bainitic ultra-halus struktur mikro dan karakteristik mekanik yang diinginkan dari baja bainitik dengan berat 0,26% karbon. Kekuatan luluh dan ketangguhan patah benturan baja meningkat secara signifikan dengan perlakuan <i>austempering</i> multi-langkah. Penurunan fraksi volume yang signifikan dan ukuran blok austenit / martensit dalam struktur mikro dan pembentukan skala nano pelat bainitik dan film austenitik merupakan faktor dominan dalam meningkatkan mekanis properti. Juga ditunjukkan bahwa penurunan suhu austempering pada langkah kedua

			<p>selama 14 menit untuk mencapai 80% bainit, diturunkan hingga 277°C dan ditahan selama 22 jam.</p> <p>Terakhir (D) adalah tiga langkah perlakuan panas <i>austempering</i> di mana sampel awalnya diaustenisasi di 900°C, sebagian diubah ke bainit pada 340°C untuk mendapatkan 80% bainit, diturunkan ke 277°C dan ditahan selama 22 jam dan akhirnya didinginkan hingga 200°C selama 54 jam.</p> <p>Semua perlakuan panas adalah dilakukan di tungku penangas garam dan sampel didinginkan dalam air pada akhir siklus perlakuan panas</p>	<p>penurunan ketebalan pelat dalam kelompok Bain; perubahan kristalografi ini karakteristik menyebabkan peningkatan fraksi batas sudut tinggi dalam struktur mikro, yang memainkan peran penting dalam meningkatkan ketangguhan patah impak baja.</p>
4	Purnomo, 2022	Pengaruh Perlakuan Panas Multi Austempering Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Aisi 4140	<p>Empat perlakuan panas yang berbeda dalam penelitian ini. Pertama <i>Single Austempering</i>-1/SA1: memanaskan specimen di suhu 800°C selama 1 jam dan didinginkan cepat ke dalam larutan garam dengan komposisi 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ ke pembentukan bainit di temperature 312°C ditahan selama 1 jam, dan diikuti oleh pendinginan akhir</p>	<p>Untuk mendapatkan sifat baja AISI 4140 dengan kekuatan dan keuletan tinggi.</p> <p>Untuk mendapatkan sifat mekanik baja dengan kombinasi kekuatan, keuletan, dan ketangguhan yang ideal akan dihasilkan melalui serangkaian proses austempering untuk menghasilkam strukur bainit halus</p>

			<p>pada suhu kamar. Kedua yaitu (<i>Single Austempering-2</i> /SA2) dengan perlakuan austempering pada suhu 362°C dengan media pendingin garam komposisi 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ selama 1 jam. Ketiga yaitu <i>Single Austempering-3</i>/SA3 yaitu dengan perlakuan austempering pada suhu 412°C dengan media pendingin larutan garam 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ selama 1 jam. Keempat adalah <i>Multi Austempering</i> /MA, yaitu dengan memanaskan specimen pada suhu 800°C, lalu didinginkan cepat dalam larutan garam dengan komposisi 50% NaNO₃ + 50% KNO₃ pada suhu 312°C, 362°C dan 412°C masing-masing selama 1 jam, dan diikuti dengan pendinginan pada suhu ruang.</p>	
--	--	--	---	--

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 13. Diagram alur penelitian

3.2. Metode Penelitian

3.2.1 Material dan Pembuatan Spesimen

Baja AISI 4140 dibeli dari PT. Tira Austenit-Jakarta. Sebagai awal penelitian, benda dipotong dengan maksud untuk memudahkan pengerjaan lebih lanjut, dan dibentuk sesuai dengan standar yang telah ditentukan.

Adapun rincian jumlah spesimen dan jenis pengujian ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 4: Jumlah spesimen dan jenis pengujian

NO	PENGUJIAN	JUMLAH	KETERANGAN
1	Uji komposisi Kimia	1	
2	Uji Kekerasan	12	3 untuk setiap step perlakuan panas
3	Uji Tarik	12	3 untuk setiap step perlakuan panas
4	Uji Impact	12	3 untuk setiap step perlakuan panas
5	Uji Mikro Struktur	4	1 untuk setiap step perlakuan panas
	Total Spesimen	41	

3.2.2. Pengkodean Material

Pada penelitian ini, untuk mempermudah identifikasi proses dan material, digunakan pengkodean material seperti dalam tabel 5 berikut ini :

Tabel 5: Pengkodean specimen uji

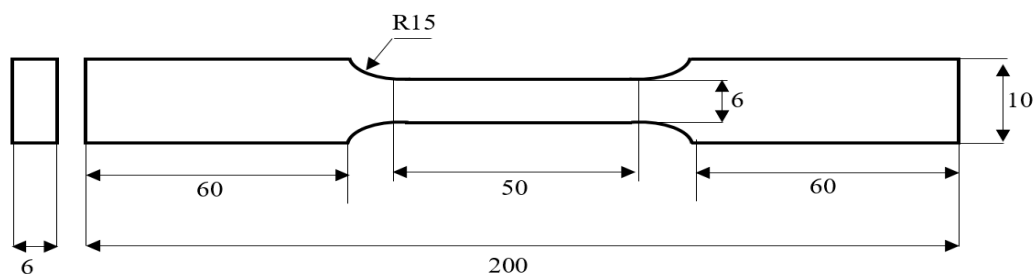
PROSES	NO	KODE	PERLAKUAN
<i>ANNEALLING (AN)</i>	1	AN-1	Spesimen dipanaskan hingga suhu <i>austenite</i> di 800 ⁰ C dan ditahan selama 2 jam, selanjutnya didiamkan didalam tungku hingga mencapai suhu ruang
	2	AN-2	
	3	AN-3	
<i>SINGLE AUSTEMPETING (SA-1)</i>	1	SA1-1	Spesimen dipanaskan hingga suhu 800 ⁰ C dan ditahan selama 60 menit, selanjutnya didinginkan secara cepat dalam larutan garam KNO ₃ 50% dan NaNO ₃ 50% dengan temperature 312 ⁰ C dan ditahan selama 60 menit, selanjutnya didinginkan di udara hingga mencapai suhu ruang
	2	SA1-2	
	3	SA1-3	
<i>SINGLE AUSTEMPETING (SA-2)</i>	1	SA2-1	Spesimen dipanaskan hingga suhu 800 ⁰ C dan ditahan selama 60 menit, selanjutnya didinginkan secara cepat dalam larutan garam KNO ₃ 50% dan NaNO ₃ 50% dengan
	2	SA2-2	
	3	SA2-3	

			temperatur 362 ⁰ C dan ditahan selama 60 menit, selanjutnya didinginkan di udara hingga mencapai suhu ruang
<i>SINGLE AUSTEMPERTING (SA-3)</i>	1	SA3-1	Spesimen dipanaskan hingga suhu 800 ⁰ C dan ditahan selama 60 menit, selanjutnya didinginkan secara cepat dalam larutan garam KNO3 50% dan NaNO3 50% dengan temperatur 412 ⁰ C dan ditahan selama 60 menit, selanjutnya didinginkan di udara hingga mencapai suhu ruang
	2	SA3-2	
	3	SA3-3	
<i>MULTI AUSTEMPERING (MA)</i>	1	MA-1	Spesimen dipanaskan hingga suhu 800 ⁰ C dan ditahan selama 60 menit, selanjutnya didinginkan secara cepat dalam larutan garam KNO3 50% dan NaNO3 50% dengan temperatur 312 ⁰ C, 362 ⁰ C dan 412 ⁰ C masing-masing ditahan selama 60 menit, selanjutnya didinginkan di udara hingga suhu ruang
	2	MA-2	
	3	MA-3	

3.2.3. Pembuatan Spesimen Uji

1. Spesimen Uji Tarik

Pembuatan spesimen uji tarik dibuat menggunakan mesin CNC dan mengikuti standar pengujian tarik baja (ASTM E8, 2004):

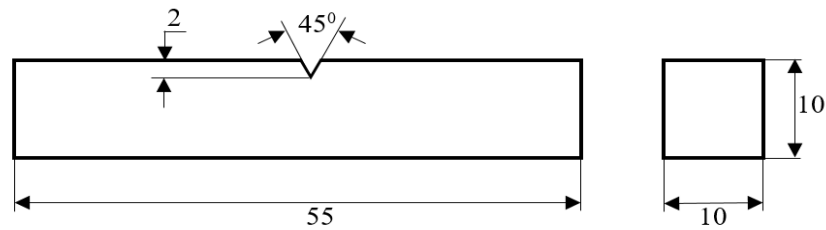


Gambar 14. Spesimen uji tarik berdasarkan ASTM E8.

2. Spesimen Uji Impak

Pembuatan Spesimen Impak sebelum diuji, pada masing-masing spesimen terlebih dahulu dibuat takikan berbentuk V pada bagian tengah. Fungsi dari pembuatan takikan ini adalah untuk melokalisir energi patah. Patahan pada spesimen umumnya berawal dari takikan yang ada pada spesimen uji impak itu.

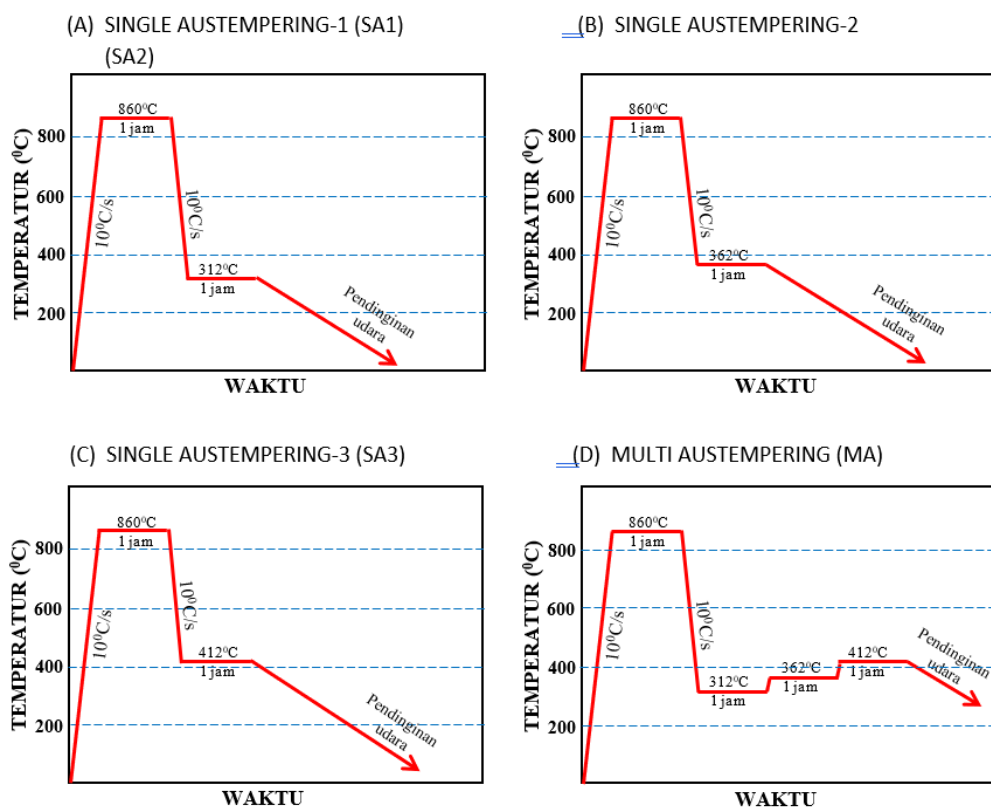
Oleh karena itu untuk mengetahui besarnya energi impak maka dibuat takikan pada spesimen. Dimana takikan berbentuk V dengan sudut kemiringan serta kedalaman takikan telah ditentukan sesuai standar ASTM E23 mulai dimensi minimum sampai maksimum seperti tampak pada gambar 15.



Gambar 15. Spesimen uji impak.

Pembuatan semua specimen dilakukan dengan menggunakan CNC.

Kemudian pada spesimen uji diberi perlakuan panas sebagai berikut:



Gambar 16. Skema perlakuan panas penelitian.

Pada baja AISI 4140 dilakukan proses *Annealing* yang bertujuan untuk mendapatkan kembali sifat-sifat fisik yang berubah selama proses deformasi dingin dan mendapatkan sifat-sifat mekanik yang lebih sesuai seperti aplikasinya. *Annealing* dilakukan dengan memanaskan material hingga temperatur austenisasi 800°C didalam *furnace* dan ditahan selama 2 jam agar panasnya merata. Selanjutnya dilakukan pendinginan lambat di dalam tungku hingga suhu ruang.

Empat langkah perlakuan panas yang berbeda dilakukan dalam penelitian secara skematik ditampilkan pada gambar 16. Jalur pertama (*Single Austempering-1/SA1*) dilakukan dengan austenisasi, yaitu dengan perlakuan panas semua spesimen dalam *furnace* suhu 800°C selama 1 jam dan kemudian didinginkan cepat ke dalam larutan garam dengan komposisi 50% NaNO_3 + 50% KNO_3 ke langkah pembentukan bainit di temperature 312°C dan ditahan selama 1 jam, diikuti oleh pendinginan akhir pada suhu kamar. Jalur kedua (*Single Austempering-2/SA2*) adalah dengan austempering pada temperatur 362°C didalam larutan garam dengan komposisi 50% NaNO_3 + 50% KNO_3 selama 1 jam, dilanjutkan dengan pendinginan akhir pada suhu kamar. Langkah ketiga atau yang disebut dengan *Single Austempering-3/SA3* adalah dengan perlakuan *austempering* pada suhu 412°C dengan media pendingin larutan garam dengan komposisi 50% NaNO_3 + 50% KNO_3 dan tetap ditahan selama 1 jam, diikuti pendinginan akhir pada suhu kamar. Sedangkan perlakuan yang keempat yang disebut dengan perlakuan *Multi Austempering/MA* adalah dengan memanaskan spesimen pada suhu austenisasi di 800°C selama 1 jam, selanjutnya didinginkan cepat ke dalam larutan garam dengan komposisi 50% NaNO_3 + 50% KNO_3 ke langkah pembentukan *bainite* di temperatur 312°C , 362°C , 412°C masing-masing

selama 1 jam, dan terakhir didinginkan pada suhu ruang. Untuk semua percobaan, laju pemanasan dan pendinginan diusahakan konstan pada 10°C/s .

Semua specimen SA1, SA2, SA3 dan MA dikarakterisasi melalui beberapa pengujian mekanik yaitu: (1) pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell C*, (2) pengujian *Impact Charpy*, (3) pengujian Tarik dengan mesin *MTS Landmark 100 KN*, dan (4) pengambilan struktur mikro SEM/EDS serta XRD.

3.3. Prosedur Pengujian

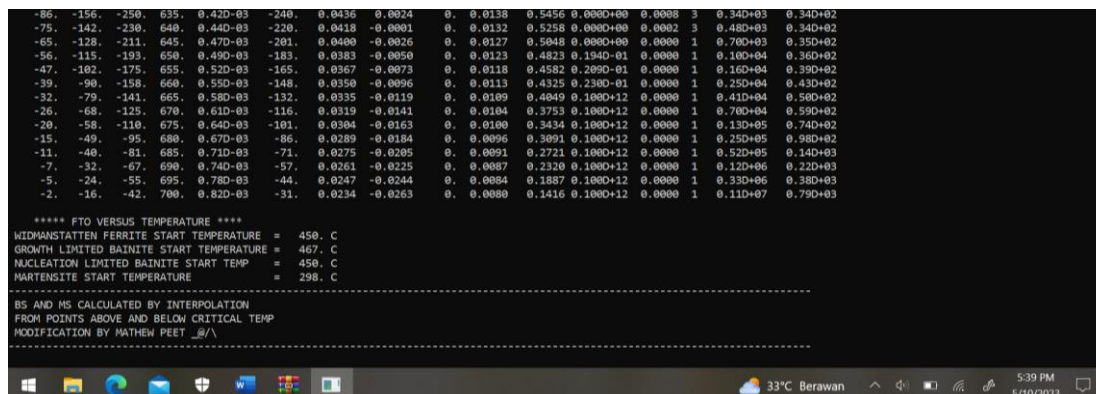
3.3.2. Komposisi Kimia

Komposisi kimia yang terkandung dalam baja AISI 4140 seperti yang tertera dalam tabel 6.

Tabel 6: Komposisi Baja AISI 4140 (Badaruddin et al., 2021)

Element	C	Mo	Mn	Cr	Si	P	S
w.t(%)	0.443	0.198	0.805	1.150	0.308	0.021	0.010
Element	Ni	Al	Co	Cu	Ti	W	Fe
w.t(%)	0.253	0.0198	0.020	0.320	0.026	0.0114	Bal.

Dari data komposisi kimia material AISI 4140 tersebut, selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai Temperatur Awal Bainit (T_1) dan juga temperatur austempering. Untuk mendapatkan nilai T_1 , dapat dilakukan dengan memasukkan komposisi kimia dari baja AISI 4140 ke dalam software Bhadesia. Setelah itu, temperatur awal bainit (T_{B_s}) dapat diperoleh dan dimasukkan ke dalam ketentuan $T_1 = T_{B_s} - 100^{\circ}\text{C}$. Pada penelitian ini, nilai T_1 digunakan pada temperatur 312°C , 362°C , dan 412°C .



Gambar 17. Perhitungan TBs dengan *software* Bhadesia.

3.3.3. Pengujian kekerasan

Tabel 7: Tabel standar kekerasan metode pengujian Rockwell

Skala	Penekan	Beban			Skala Kekerasan	Warna Angka
		Awal	Utama	Jumlah		
A	Kerucut intan 120°	10	50	60	100	Hitam
B	Bola baja 1,558 mm (1/16")	10	90	100	130	Merah
C	Kerucut intan 120°	10	140	150	100	Hitam
D	Kerucut intan 120°	10	90	100	100	Hitam
E	Bola baja 3,175 mm (1/8")	10	90	100	130	Merah
F	Bola baja 1,558 mm	10	50	60	130	Merah
G	Bola baja 1,558 mm	10	140	150	130	Merah
H	Bola baja 3,175 mm	10	50	60	130	Merah
K	Bola baja 3,175 mm	10	140	150	130	Merah
L	Bola baja 6,35 mm (1/4")	10	50	60	130	Merah
M	Bola baja 6,35 mm	10	90	100	130	Merah
P	Bola baja 6,35 mm	10	140	150	130	Merah
R	Bola baja 12,7 mm (1/2")	10	50	60	130	Merah
S	Bola baja 12,7 mm	10	90	100	130	Merah
V	Bola baja 12,7 mm	10	140	150	130	Merah

Pengujian kekerasan Rockwell dilakukan dengan menekan permukaan benda uji menggunakan indentor dengan menerapkan beban pendahuluan dan beban utama, lalu beban utama dilepaskan sedangkan beban pendahuluan masih dipertahankan. Metode ini sederhana, cepat, dan tidak memerlukan mikroskop untuk mengukur jejak, serta cocok untuk semua material yang keras dan lunak.

Tujuan pengujian kekerasan adalah untuk mengetahui kemampuan suatu bahan terhadap beban dalam perubahan yang tetap. Pengujian kekerasan menggunakan *Mitutoyo Rockwell Hardness Tester Machine HR200*, di laboratorium Politeknik Tunas Garuda Lampung. Pengujian kekerasan dengan metode Rockwell ini diatur berdasarkan standar ASTM E-18.

3.3.4. Pengujian tarik

Pengujian tarik dilakukan pada temperatur ruang dengan kontrol pergerakan aktuator secara aksial. Pertama, dilakukan dengan laju regangan konstan 0.3%/min untuk menentukan modulus elastisitas dan tegangan luluh (0.2% *offset*). Setelah spesimen mencapai regangan 0.3%, kontrol aktuator secara otomatis dipindah ke kontrol displasemen dengan laju 0.15 mm/min. Pengujian dilakukan sampai spesimen patah.

Pengujian kekuatan tarik kondisi kontrol amplitudo tegangan (*high-cycle fatigue/HCF*) dilakukan menggunakan mesin *MTS Landmark 100 kN* (statik dan dinamik) versi alat uji fatik bahan release terbaru dari MTS USA di Laboratorium Material Teknik-Teknik Mesin, Universitas Lampung.

Spesimen akan diberi beban uji aksial yang semakin besar secara kontinyu. Akibat dari pembebanan aksial tersebut, spesimen akan mengalami perubahan panjang. Perubahan beban (P) dan perubahan panjang (ΔL) tercatat pada mesin uji tarik berupa grafik, yang merupakan fungsi beban dan pertambahan panjang dan disebut sebagai grafik P – ΔL dan kemudian dijadikan grafik *Stress-Strain* yang menggambarkan sifat bahan secara umum.

Uji Tarik (*Tensile Test*) adalah suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan (*tensile strength*) suatu material/bahan dengan cara memberikan beban (gaya statis) yang sesumbu dan diberikan secara lambat atau cepat. Diperoleh hasil sifat mekanik dari pengujian ini berupa kekuatan dan elastisitas dari material/bahan.

Nilai kekuatan dan elastisitas dari material uji dapat dilihat dari kurva hasil uji tarik. Selain kekuatan dan elastisitas, sifat lain yang dapat diketahui adalah sebagai berikut:

- Kekuatan luluh dari material.
- Keuletan dari material.
- Kelentingan dari suatu material

Pengujian dilakukan dengan tujuan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu material/bahan dan juga sebagai referensi pendukung untuk spesifikasi material/bahan. Kekuatan ini ada beberapa macam, tergantung pada jenis beban yang bekerja, yaitu kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan tekan kekuatan torsi dan kekuatan lengkung. Sifat Mekanik yang didapat dari uji tarik meliputi (Callister, 2010:154):

- Tegangan Tarik (σ):

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

F adalah beban sesaat yang diterapkan tegak lurus terhadap penampang specimen dalam satuan newton (N), dan A_0 adalah luas awal penampang sebelum beban diterapkan (m^2).

- Regangan (ϵ):

$$\epsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

l_0 adalah panjang awal specimen sebelum diterapkan gaya (m) dan l_1 adalah panjang benda uji saat diterapkan gaya (m).

Pada penelitian ini pengujian Tarik menggunakan mesin MTS LandMark 100kN di laboratorium metalurgi fakultas teknik Universitas Lampung. Dari data mesin nantinya akan didapatkan nilai *axial displacement* dan *tensile strength* (σ_y). Dari hasil mesin tersebut, selanjutnya dilakukan perhitungan untuk:

- 1) Mencari nilai *Axial Displacement*:

$$\text{Axial Displacement} = \text{internal} - \text{first internal displacement}$$

- 2) Mencari nilai Regangan:

25 mm (*gauge length* benda uji pada penelitian ini)

$$\text{Regangan} = \frac{\text{Axial Displacement}}{25 \text{ mm}}$$

- 3) Mencari nilai *Tensile Strength* (σ_y):

$$\text{Tensile Strength } (\sigma_y) = [\sigma_y - \text{first } \sigma_y]$$

- 4) Mencari nilai (*Offside 0.002*):

$$\text{Offside 0.002} = [\text{Regangan} + 0.002]$$

- 5) Mencari nilai Hooke = $ax + c$:

$$\text{Memuat Grafik} = [\text{Offside 0.002} \sim \text{int. 10 dan T. Strength } (\sigma_y)]$$

$$y = [a \times \text{Regangan} - c] \text{ [a dan c dicari dari grafik]}$$

- 6) Mencari nilai yang paling mendekati 0:

$$\text{Cari } \sim 0 = [\text{Hooke} - \text{Tensile Strength } (\sigma_y)]$$

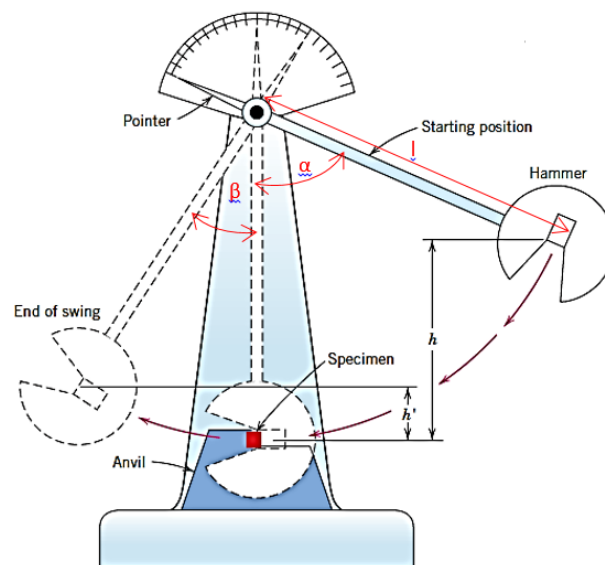
- 7) Mencari nilai *Yield*:

$Yield = [Cari \sim 0 \text{ lihat nilai searah kolom } T. Strength (\sigma_y)]$

8) Mencari nilai UTS:

$$UTS = MAX[Tensile Strength (\sigma_y)]$$

3.3.5. Pengujian *Impact* (*Charpy*)



Gambar 18. Sketsa Perhitungan Energi Impact.
(Callister, 2010:252)

Pengujian impact *charpy* dilakukan untuk mengetahui sifat liat dari bahan yang ditentukan dari banyaknya energi yang dibutuhkan untuk mematahkan batang uji dengan sekali pukul. Spesimen akan dipukul impact dengan beban tertentu sampai patah, dan akan didapat luas patahan benda uji, dihitung besar energi untuk mematahkannya serta harga *impact charpy*-nya.

Impact Test berguna untuk melihat efek-efek yang ditimbulkan oleh adanya takikan, bentuk takikan, temperatur, dan faktor-faktor lainnya. Uji impact dapat juga disebut sebagai suatu pengujian material untuk mengetahui kemampuan suatu material/bahan dalam menerima beban tumbuk dengan diukur

besarnya energi yang diperlukan untuk mematahkan spesimen material/bahan dengan ayunan seperti ditunjukkan pada gambar 18.

Bandul dengan ketinggian tertentu berayun dan memukul spesimen. Energi potensial dari bandul berkurang sebelum dan sesudah memukul spesimen merupakan energi yang diserap oleh spesimen.

Nilai besarnya energi impact (*joule*) dapat dilihat pada skala mesin penguji. Sedangkan besarnya energi impact secara teoritis dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$E_0 = W \cdot h_0$$

$$E_1 = W \cdot h_1$$

$$\Delta E = E_0 - E_1 = W (h_0 - h_1)$$

Dari gambar 10 diatas didapatkan bahwa:

$$h_0 = l - l \cos\alpha = l (1 - \cos\alpha)$$

$$h_1 = l - l \cos\beta = l (1 - \cos\beta)$$

Sehingga didapatkan

$$\Delta E = W l (\cos\beta - \cos\alpha)$$

Dimana: E_0 adalah energi awal (*Joule*), E_1 energi akhir (*Joule*), W berat bandul (N), h_0 ketinggian bandul sebelum dilepas (m), h_1 ketinggian bandul setelah dilepas (m), l panjang lengan bandul (m), α adalah sudut awal ($^\circ$) dan β sudut akhir ($^\circ$)

3.3.6. Observasi mikrostruktur dan fraktografi

Komposisi struktur mikro dan fraktografi dilakukan untuk mendapatkan informasi tentang perubahan struktur mikro karena pembentukan presipitasi

elemen karbida dan krom menggunakan *Scanning Electron Microscopy (SEM)/ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)* dan *X-ray Diffraction (XRD) Pattern* di BPTM-BRIN, Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

Semua data baik kuantitatif maupun kualitatif dari hasil SEM, EDS, XRD, Impak, Tarik dan Kekerasan selanjutnya akan digunakan untuk mempelajari sifat mekanik, perubahan mikro struktur dan perubahan fasa baja AISI 4140 selama pengujian.

3.4. Tabel Pengujian

3.4.1. Tabel Pengujian Kekerasan Rockwell

Tabel 8: Tabel pengujian Kekerasan Rockwell

No	Spesimen	Nilai Kekerasan (HRC)					Rata-rata
		Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	
1	AN-1						
2	SA1-1						
3	SA2-1						
4	SA3-1						
5	MA-1						

3.4.2 Tabel Uji Impak

Tabel 9: Tabel Uji Impak

No	Spesimen	Energi Impak (Joule)	
		Energi Impak	Rata-rata
1	AN-1		
2	AN-2		
3	AN-3		
4	SA1-1		
5	SA1-2		
6	SA1-3		
7	SA2-1		
8	SA2-2		
9	SA2-3		
10	SA3-1		

11	SA3-2		
12	SA3-3		
13	MA-1		
14	MA-2		
15	MA-3		

3.4.3. Tabel Uji Tarik

Tabel 10: Tabel Uji Tarik

No	Sampel	L ₀ (mm)	L ₁ (mm)	d ₀ (mm)	d ₁ (mm)	Yield (MPa)	UTS (MPa)
1	AN-1						
2	AN-2						
3	AN-3						
4	SA1-1						
5	SA1-2						
6	SA1-3						
7	SA2-1						
8	SA2-2						
9	SA2-3						
10	SA3-1						
11	SA3-2						
12	SA3-3						
13	MA-1						
14	MA-2						
15	MA-3						

BAB V. PENUTUP

5.1. KESIMPULAN

Berdasarkan tujuan dari penelitian ini, maka beberapa hal terkait masing-masing parameter perubahan struktur mikro terhadap kekuatan mekanik baja AISI 4140, dapat dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Benda uji perlakuan SA1 menjadi specimen dengan ketangguhan terbaik, dengan nilai 41.00 Joule, meningkat 135.34% dari AN yang merupakan perlakuan awal dari benda uji. Benda uji MA meningkat 88.46% menjadi 32.67 Joule. Dalam proses perlakuan panas menggunakan metode AN pada baja AISI 4140, tekanan internal dalam benda uji dihilangkan. Hal ini menyebabkan austenit, yang terbentuk karena laju pendinginan yang lambat, berubah menjadi perlit kasar dan ferit. Dalam hal ini, perlakuan panas SA dan MA telah mengoptimalkan kekuatan dan ketangguhan (duktilitas) dengan pembentukan struktur ferit-martensit-bainit. Sebagai hasilnya, harga impak dari baja yang mengalami perlakuan panas SA dan MA meningkat dibandingkan dengan baja yang mengalami perlakuan panas menggunakan metode AN. Perubahan temperatur pada saat proses *Single*

austempering sangat mempengaruhi energi impak, dimana semakin meningkatnya temperatur menjauhi M_s (*martensite start*), akan membuat harga energi impaknya berkurang.

2. Pengujian kekerasan benda uji perlakuan panas meperoleh hasil kekerasan sebagai berikut: Spesimen dengan nilai kekerasan tertinggi adalah SA2 dengan nilai kekerasan 43.67 HRC, meningkat 79.45% dari perlakuan awal AN. Sedangkan pada benda uji MA meningkat 76.71% menjadi 43.00 HRC. Perubahan temperatur *austempering* baik pada SA maupun MA tidak terlalu banyak memberi perubahan pada nilai kekerasan baja AISI 4140.
3. Spesimen SA1 menjadi benda uji yang mampu menerima beban maksimum terbesar sebelum mengalami kegagalan dengan nilai UTS 922.36 MPa dengan regangan 13,09%. Peningkatan nilai tegangan dan penurunan nilai regangan menunjukkan bahwa benda uji SA dan MA memiliki kekuatan dan ketangguhannya lebih baik daripada benda uji AN. Sementara itu, spesimen MA menjadi benda uji yang mampu menahan beban maksimum tanpa mengalami deformasi plastis yang permanen tertinggi dengan nilai *Yield Strenght* 579.32 MPa.
4. Pada benda uji AN memiliki ukuran butir yang besar dan banyak didominasi oleh *brittle fracture*. Hasil pengamatan pada struktur kristal AN yang ditemukan adalah struktur kubik BCC dengan fasa iron (Fe)/*feritte*. Dominasi bentuk patahan pada benda uji menunjukkan sifat material yang rapuh atau ulet. Demikian juga ukuran butir yang Nampak pada benda uji, semakin kecil ukuran butir menyebabkan ketangguhan dan kekuatan

material semakin baik. Hal ini yang membuat benda uji AN memiliki sifat mekanik yang kurang baik, karena Ferit bersifat lunak dan ukuran butir yang besar juga sifat mekanik material menjadi kurang baik.

5. Observasi struktur mikro dilakukan pada bidang patahan uji impak benda uji SA dan MA menunjukkan lebih didominasi *ductile fracture* dengan ukuran butir yang lebih kecil jika dibandingkan dengan AN. Sementara benda uji SA dan MA memiliki struktur kubik BCC dengan fasa iron (Fe)/*ferrite* dan banyak besi carbide (Fe_7C_3) dan besi karbida *cohenite* (Fe_3C) dengan struktur *orthorhombic*. Adanya karbida kaya Carbon Fe_3C yang bercampur dengan Fe yang terlihat pada hasil pengujian XRD benda uji SA dan MA ini menunjukkan adanya fasa *Bainite* dan fase *Martensite* yang selalu muncul pada saat terjadi pendinginan cepat *austenite*.

5.2. SARAN

1. Hasil penelitian dengan metode *Single* dan *Multi Austempering* pada bahan baja AISI 4140 ini sudah dapat memberi kesimpulan dan menjadi salah satu alternatif dalam memperbaiki sifat mekanik dari baja AISI 4140 untuk memenuhi kebutuhan pasar. Proses perlakuan panas yang sederhana, efisien dalam waktu dan biaya menjadi keunggulan utama metode ini.

2. Penelitian lanjutan pada baja AISI 4140 dapat menggunakan pengujian *high cycle fatigue* dan *low cycle fatigue* yang dapat melihat sejauh mana tingkat ketangguhan dalam durasi tertentu.
3. Penelitian lanjutan pada baja AISI 4140 dengan mencari metode rekayasa perlakuan panas yang lebih efektif dan efisien secara waktu dan biaya diperlukan untuk mendapatkan sifat yang lebih baik pada pemakaian dan produk turunannya.
4. Perlakuan panas metode induksi sangat mungkin dilakukan untuk mendapat keakurasian titik atau lokasi dan temperatur pemanasan. Akibat pemanasan induksi maka energi yang diperlukan lebih sedikit daripada pemanasan pada keseluruhan produk, waktu yang dibutuhkan lebih singkat dan mengurangi distorsi panas yang berlebihan.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharya P P, Udupa R, Bhat R. (2018). *Microstructure and mechanical properties of austempered AISI 9255 high-silicon steel*, *Materials Science and Technology*, 34(3), 1743- 1747.
- Amstead, B. H., dan Djaprie. (1979). *Teknologi Mekanik (Edisi 7)*, Jakarta, Indonesia: Erlangga
- ASM Handbook Vol. 1. (2005). *Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys*. USA: ASM International.
- ASM Handbook Vol.4. (1991). *Heat Treating*. USA: ASM International
- ASM Handbook 2nded (1995). *“Heat Treater’s Guide: Practice and Procedures for Irons and Steels”*, ASM International.
- ASTM E8, 2004, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, WestConshohocken, United States.
- ASTM E23, 2007, *Standard Practice for Notched Bar Impact Testing of metallic Materials*, West Conshohocken, United States.
- ASTM E606, 2004, *Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing*, West Conshohocken, United States.
- Avishan B, Tavakolian M, Yazdani S. (2017). *Two-step austempering of high performance steel with nanoscale microstructure*, *Materials Science and Engineering A*, 693, 178-185.
- Avner S.H., (1974). *Introduction to Physical Metallurgy, 2nd edition*, Mc Graw Hill Inc., Singapore.
- Badaruddin M, Bakti B, Prasetyo B, Sugiyanto. (2021). *Effect of austempering temperatures on surface hardness of AISI 4140 steel*, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1173, 012027.
- Badaruddin M, Sugiyanto, Wardono H, Andoko, Wang C J, Rivai AK. (2019). *Improvement of low-cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment*, *International Journal of Fatigue*, 125, 406-417.

- Badaruddin M, Rd. T. Riza, Zulhanif, (2018). *The effect of diffusion treatment on the mechanical properties of hot-dip aluminum coating on AISI P20 steel*, *AIP Conference Proceedings* 1983, 050004; doi: 10.1063/1.5046277.
- Bhadeshia H K D H: *Materials algorithms project*, available at (<https://www.msm.cam.ac.uk/map/steel/programs/mucg83.html>). (di akses tanggal 10 Februari 2022)
- Bauer Grosse, C. Frantz, G. Le Caer, N. Heiman, (1981). *Formation Of Fetc 3 And Fesc 2 Type Metastable Carbides During The Crystallization Of An Amorphous Fe75cz5 Alloy*, *Journal of Non-Crystalline Solids*: 44 277-286 277 North-Holland Publishing Company
- Callister D. William, David G. Rethwisch, *Material Science and Engineering An Introduction, 8th edition*, John Willwy and Sons, USA
- Canale L de C F, Totten G E. (2005). *Overview of distortion and residual stress due to quench processing. Part I: factors affecting quench distortion*, *International Journal of Materials and Product Technology (IJMPT)*, 24, 4-52.
- Cahyo Sutowo, Bayu Agung Susilo, Pengaruh Proses *Hardening* Pada Baja Hq 7 Aisi 4140 Dengan Media Oli Dan Air Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro, Jakarta, Indonesia.
- Chakraborty J, D. Bhattacharjee, I. Manna, (2008). *Austempering of bearing steel for improved mechanical properties*, *Scripta Materialia*, 59, pp. 247–250.
- Chen C Y, Hung F Y, Lui T S, Chen L H. (2013). *Microstructures and mechanical properties of austempering CrMo (SCM 435) alloy steel*, *Materials Transactions*, 54(1), 56-60.
- Daniel H. Herring (2005), *Grain Size and Its Influence on Materials Properties*, *IndustrialHeating.com*, August 2005.
- Da Silva A.D., T. A. Pedrosa, J. L. Gonzalez-Mendez, X. Jiang, P.R. Cetlin, T. Altan, (2012). *Distortion in quenching an AISI 4140 C-ring – Predictions and experiments*, *Materials & Design*, 42, pp. 55-61.
- De Cooman B.C., (2004) *Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite*, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 8, 285–303.
- Fatoba O, Akid R. (2018). *Uniaxial cyclic elasto-plastic deformation and fatigue failure of API- 5L X65 steel under various loading conditions*, *Theoretical Applied Fracture Mechanics*, 94, 147-159.
- Feng J, Frankenbach T, Wettlaufer M. (2017). *Strengthening AISI 4140 steel by*

isothermal transformation below martensite start temperature, Materials Science and Engineering A, 683, 110-115.

Ghozali, I. (2016) Aplikasi Analisis Multivariete Dengan Program IBM SPSS 23. Edisi 8. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro.

Hamid Mousalou, Sasan Yazdania, Behzad Avishan, Naghi Parvini Ahmadi, Ali Chabok, Yutao Pei, (2018). *Microstructural and mechanical properties of low-carbon ultra-fine bainitic steel produced by multi-step austempering process.*

Hoyeol Kim, Zhichao Liu, Weilong Cong, Hong-Chao Zhang. (2017), *Tensile Fracture Behavior and Failure Mechanism of Additively-Manufactured AISI 4140 Low Alloy Steel by Laser Engineered Net Shaping*, Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Jordon J B, Horstemeyer M F. (2014). *Microstructure-sensitive fatigue modeling of AISI 4140 steel*, *J. Engineering Materials and Technology*, 136(2), 021004.

Joseph Maciejewski. (2015). *The Effects of Sulfide Inclusions on Mechanical Properties and Failures of Steel Components*, *J Fail. Anal. and Preven*, 15:169-178, doi 10.1007/s11668-015-9940-9

Khani Sanij M.H., S.S. Ghasemi Banadkouki, A.R. Mashreghi, M. Moshrefifar, (2012). *The effect of single and double quenching and tempering heat treatments on the microstructure and mechanical properties of AISI 4140 steel*, *Materials & Design*, 42, pp. 339-346.

Kim K W, Kim K I, Lee C H, Kang J Y, Lee T H, Cho K M, Oh K H. (2016). *Control of retained austenite morphology through double bainitic transformation*, *Materials Science and Engineering A*, 673, 557-561.

Kreethi R, Mondal A K, Dutta K. (2017). *Ratcheting fatigue behaviour of AISI 4140 steel under different heat treatment conditions*, *Materials Science and Engineering A*, 679, 66-74.

Krishna P.V, R.R. Srikant, M.Iqbal, N. Sriram, (2013). *Effect of austempering and martempering on the properties of AISI 52100 steel*, *ISRN Tribology*, Article ID 515484, 2-6, <http://dx.doi.org/10.5402/2013/515484>.

Maropoulos S, N. Ridley, J. Kechagias, S. Karagiannisc, (2004). *Fracture toughness evaluation of a HSLA Steel*, *Engineering Fracture Mechanics*, 71, 1695-1704.

- Mattia Franceschi, Alvise Miotti Bettanini, Luca Pezzato, Manuele Dabalà and Pascal J. Jacques, (2021). *Effect of Intercritical Annealing and Austempering on the Microstructure and Mechanical Properties of a High Silicon Manganese Steel*
- Mattia Franceschi, Luca Pezzato, Claudio Gennari, Alberto Fabrizi, Marina Polyakova, Dmitry Konstantinov, Katya Brunelli and Manuele Dabala, (2020), *Effect of Intercritical Annealing and Austempering on the Microstructure and Mechanical Properties of a High Silicon Manganese Steel*
- Mousalou H, Yazdani S, Avishan B, Ahmadi N P, Chabok A, Pei Y. (2018). *Microstructural and mechanical properties of low-carbon ultra-fine bainitic steel produced by multi-step austempering process, Materials Science and Engineering A*, 734, 329-337.
- Lang K H, Korn M, Rohm T. (2016). *Very high cycle fatigue resistance of the low alloyed Steel AISI 4140 in medium- and high-strength quenched and tempered condition, Procedia Structural Integrity*, 2, 1133-1142.
- Lee K.O., S.K. Hong, Y.K. Kang, H.J. Yoon, S.S. Kang, (2009). *Grain refinement in bearing steels using a double-quenching heat treatment process International Journal Automotive Technology*, 10(6), pp. 697-702.
- Long X, J. Kang, B. Lv, F. Zhang, (2014). *Carbide-free bainite in medium carbon steel, Material & Design*, 64, pp. 237-245.
- Machiajewsky J (2015). *The Effects of Sulfide Inclusions on Mechanical Properties and Failures of Steel Components*, ASM International, J Fail. Anal. and Preven 15:169–178
- Mattia Franceschi, Luca Pezzato, Claudio Gennari, Alberto Fabrizi, Marina Polyakova, Dmitry Konstantinov, Katya Brunelli, Manuele D (2020). *Effect of Intercritical Annealing and Austempering on the Microstructure and Mechanical Properties of a High Silicon Manganese Steel*, *Metals* 2020, 10(11), 1448; <https://doi.org/10.3390/met10111448>
- Mian Muhammad Bilal, Khurram Yaqoob, Mohammad Hammad Zahid, Ehsan ul haq, Waqas Hassan Tanveer, Abul Wadood, Bilal Ahmed (2019). *Effect of austempering conditions on the microstructure and mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 steels, Journal of Materials Research and Technology Volume 8, Issue 6, November–December 2019, Pages 5194-5200.*
- Nagarajan V R, Putatunda S K. (2014). *Influence of dissolved hydrogen on the fatigue crack growth behaviour of AISI 4140 steel, International Journal of Fatigue*, 62, 236-248.

- Nagarajan V R, Putatunda S K, Boileau J. (2017). *Fatigue crack growth behavior of austempered AISI 4140 Steel with dissolved hydrogen*, *Metals*, 7(11), 2-18.
- Putatunda S K, Martis C, Boileau J. (2011). *Influence of austempering temperature on the mechanical properties of a low carbon low alloy steel*, *Materials Science and Engineering A*, 528(15), 5053-5059.
- Paul S K, Stanford N, Hilditch T. (2015). *Effect of martensite morphology on low cycle fatigue behaviour of dual phase steels: Experimental and microstructural investigation*, *Materials Science and Engineering A*, 644, 53-60.
- S. B. Singh, Indian Institute of Technology Kharagpur India. (2012) *Mechanisms of bainite transformation in steels*, Woodhead Publishing Limited.
- Smallman R. E, Bishop R. J. (1999) *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*, 6th edition, Butterworth-Heinemann, Oxford
- Tartaglia J M, Hayrynen K L. (2012). *A comparison of fatigue properties of austempered versus quenched and tempered 4340 steel*, *JMEPEG*, 21, 1008-1024.
- Xu Y B, Hu Z P, Zou Y, Tan X D, Han D T, Chen S Q, Ma D G, Misra R D K. (2017). *Effect of two-step intercritical annealing on microstructure and mechanical properties of hot-rolled medium manganese TRIP steel containing δ -ferrite*, *Materials Science and Engineering A*, 688, 40-55.
- Y. Zou, Y.B. Xu, Z.P. Hu, X.L. Gu, F. Peng, X.D. Tan, S.Q. Chen, D.T. Han, R.D.K. Misra, G.D. Wang, (2016). *Austenite stability and its effect on the toughness of a high strength ultra-low carbon medium manganese steel plate*, *Materials Science and Engineering A*, 675, pp. 153-163.
- Zadeh A A, Salemi A, Assadi H. (2008). *Mechanical behavior of CrMo steel with tempered martensite and ferrite–bainite–martensite microstructure*, *Materials Science and Engineering A*, 483–484, 325-328.
- Zhang J, Di H, Deng Y, Misra R D K. (2015). *Effect of martensite morphology and volume fraction on strain hardening and fracture behavior of martensite–ferrite dual phase steel*, *Materials Science and Engineering A*, 627, 230-240.