

**PERILAKU FATIK (*FATIGUE*) BAJA KEKUATAN TINGGI
AISI 4140 PADA KONDISI AUSTEMPERING**

(TESIS)

Oleh
SUGIYANTO



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

ABSTRAK

PERILAKU FATIK (FATIGUE) BAJA KEKUATAN TINGGI AISI 4140 PADA KONDISI AUSTEMPERING

Oleh :

Sugiyanto

Baja AISI 4140 merupakan baja paduan rendah yang banyak digunakan untuk komponen mesin seperti poros engkol, roda gigi, batang piston pada kendaraan. Komponen ini mengalami pembebanan siklik selama kondisi operasi awal dan akhir. Oleh karena itu sifat plastis baja sangat diperlukan agar deformasi plastis yang terjadi pada baja dapat meningkatkan umur lelahnya. Perlakuan yang dimaksud adalah Austempering yang diberikan pada baja AISI 4140, dimana austempering merupakan perlakuan panas yang dapat digunakan untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, sifat plastis baja, dan menghasilkan mikrostruktur bainit. Tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh austempering terhadap nilai fatik siklus rendah dan perubahan struktur mikro. Uji tarik (ASTM E8) dan High cycle fatigue (ASTM E606) dilakukan dengan sampel Baja AISI 4140 yang diberi perlakuan austempering dengan waktu penahanan 60 menit, dan variasi tingkat tegangan mulai 40%,45%, 50%,55%, 60%, dan 65%. Pengaruh austempering pada hasil uji tarik menunjukkan peningkatan kekuatan tarik dibandingkan dengan sampel Baja AISI 4140 tanpa perlakuan, austempering yaitu tegangan luluh meningkat sebesar 22,59%, tegangan ultimate meningkat sebesar 12,45% serta nilai energi plastik sebesar 19,83%. Pengamatan mikrostruktur melalui mikroskop dan etsa nital 3% menghasilkan mikrostruktur bainit yang secara langsung berpengaruh terhadap peningkatan umur lelah dan kuat tarik baja AISI 4140.

Kata Kunci : Baja AISI 4140, Austemper, Uji Fatik, Mikro Struktur.

ABSTRACT

FATIGUE BEHAVIOR OF AISI 4140 HIGH STRENGTH STEEL AUSTEMPERING CONDITIONS

by :

Sugiyanto

AISI 4140 steel is low alloy steel that is widely used for machine components such as crankshafts, gears, piston rods in vehicles. These components experience cyclic loading during the initial and final operating conditions. Therefore, the plastic properties of steel are needed so that the plastic deformation that occurs in steel can increase its fatigue life. treatment is Austempering given to AISI 4140 steel, where austempering is a heat treatment that can be used to increase strength, toughness, plastic properties of steel, and produce bainite microstructure. The purpose of the study was to analyse the effect of austempering on low cycle fatigue values and changes in microstructure. Tensile tests (ASTM E8) and High cycle fatigue (ASTM E606) were carried out with samples of AISI 4140 Steel which were given treatment austempering with a holding time of 60 minutes, and the variation of the stress level start 40%,45%,50%,55%, 60%,and 65% .The effect of austempering on the tensile test results showed an increase in tensile strength compared to the AISI 4140 Steel sample without treatment, austempering namely the yield stress increased by 22.59%, the stress ultimate increased by 12,45% as well as the plastic energy value of 19,83%. Microstructural observation through a microscope and using 3% nital etching resulted in a bainite microstructure which directly affects the increase in fatigue life and tensile strength of AISI 4140 steel.

Keywords : AISI 4140, Single Austemper, Fatigue, Micro Structure

**KAJIAN PEMODELAN DAN SIMULASI PARAMETER PENGEBORAN
PADA PROSES PENGEBORAN TULANG DALAM PEMBEDAHAN
ORTOPEDI**

Oleh

EKO WAHYU SAPUTRA

(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**

Judul Tesis : **PERILAKU FATIK (FATIGUE) BAJA
KEKUATAN TINGGI AISI 4140 DALAM
KONDISI AUSTEMPERING**

Nama Mahasiswa : **Sugiyanto**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1925021005**

Program Studi : **Magister Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**

Menyetujui,

1. Komisi Pembimbing



Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 197212111998031002



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

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin



Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 197108171998021003

MENGESAHKAN

1. Tim penguji

Ketua

Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.



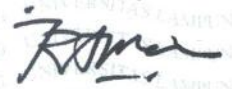
Anggota Penguji

Prof. Dr. Drs. Sugiyanto, M.T.



Penguji Utama I

Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU.



Penguji Utama II

Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met.



2. Dekan Fakultas Teknik

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

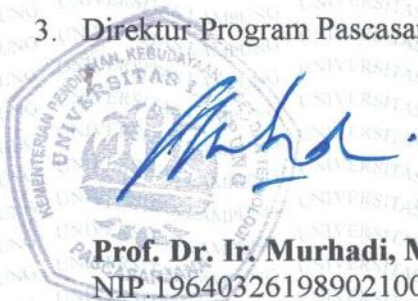
NIP. 197509282001121002



3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung

Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.

NIP. 196403261989021001



Tanggal Lulus Ujian Tesis : 14 Juni 2023

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Sugiyanto
NPM : 1925021005
Fakultas : Teknik
Jurusan : Teknik Mesin
Program Studi : Program Studi Magister Teknik Mesin

Menyatakan bahwa tesis dengan judul **“Perilaku Fatik (Fatigue) Baja Kekuatan Tinggi AISI 4140 Pada Kondisi Austempering”** 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. Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung. Atas pernyataan ini, apabila di kemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Bandar Lampung, 14 Juni 2023

Pembuat Pernyataan



Sugiyanto

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Raman Fajar 05 Februari 1988, sebagai anak kedua dari pasangan Bapak Ngadiono dan Ibu Marpuah.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 01 Indraloka II Tulang Bawang Barat pada tahun 2001, pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1

Way Serdang Mesuji pada tahun 2004, pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan di SMK Al Iman II Tulang Bawang pada Tahun 2007, dan pada tahun 2007 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa S1 Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur SPMB.

Tahun 2019 penulis diterima di Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung. Pada tahun 2021 penulis menjadi ASN di SMK Negeri 1 Baradatu sampai sekarang.

Bandar Lampung, 14 Juni 2023

Penulis

Sugiyanto

PERSEMBAHAN

Puji syukur hamba panjatkan kepada ALLAH SWT yang telah memberikan kelancaran dan kemudahan kepada hamba dalam menyelesaikan tesis ini.

Untuk Kedua Orangtuaku, Bapak Ngadiono dan Ibu Marpuah yang tak pernah henti-hentinya memberikan dukungan dan doa untuk kesuksesan penulis sehingga dapat menyelesaikan studi.

Untuk Istri Tercinta, Dwi Astiti Nugra Heni, yang telah mendukung, menemani dan membantu penulis serta doa dan kasih sayang sehingga penulis dapat menyelesaikan studi.

Untuk anak – anakku, Mas Azzam Setia Negara dan Adek Ayskaa Az Zahra serta keluarga besar yang telah mendukung penulis dalam menyelesaikan studi.

Untuk rekan seperjuanganku, Magister Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan 2019. Terima kasih untuk semua yang telah kalian berikan.

Untuk semua dosen yang dengan tulus mengajarkan banyak hal kepadaku. Terima kasih untuk ilmu, pengetahuan, dan pelajaran hidup tak ternilai yang telah diberikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah rabbilalamin, puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah, serta inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tesis sebagai salah satu syarat dalam meraih gelar Magister Teknik pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dengan tugas akhir berjudul “Perilaku Fatik (Fatigue) Baja Kekuatan Tinggi AISI 4140 Pada Kondisi Austempering”. Sholawat beriring salam selalu tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW.

Dalam penyusunan tesis ini penulis banyak mendapat bimbingan, motivasi dan bantuan baik moral maupun materi oleh banyak pihak. Untuk itu dengan sepuh ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A.IPM, selaku Rektor Universitas Lampung
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung
3. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung

4. Bapak Dr. Amrul, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung
5. Bapak Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., selaku selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung
6. Bapak Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D., selaku pembimbing akademik serta pembimbing utama tesis ini yang memberikan waktu, ide pemikiran dan motivasi bagi penulis.
7. Bapak Prof. Dr. Drs. Sugiyanto, M.T., selaku pembimbing kedua tesis ini yang memberikan saran dan nasihat bagi penulis.
8. Bapak Irza Sukmana, S.T.,M.T., Ph.D., selaku pembahas tesis ini yang memberikan saran dan nasihat bagi penulis.
9. Seluruh Dosen Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung berkat ilmu yang telah diajarkan kepada penulis selama menjalani masa studi di perkuliahan.
10. Mamak dan Bapak yang tak pernah henti-hentinya memberikan dukungan dan doa untuk kesuksesan penulis sehingga dapat menyelesaikan studi S2.
11. Istri Tercinta, Dwi Astiti Nugra Heni, S.Pd. yang telah mendukung, menemani dan membantu penulis serta doa dan kasih sayang sehingga penulis dapat menyelesaikan studi S2.
12. Anak – anakku, Mas Azzam Setia Negara dan Adek Ayskaa Az Zahra serta semua keluarga besarku terima kasih telah memberikan motivasi dalam penyelesaian studi.

13. Teman-teman Magister Teknik Mesin angkatan 2019, Mas Salam, Mas Dadang dan semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tesis ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, akan tetapi sedikit harapan semoga yang sederhana ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, 14 Juni 2023
Penulis,

Sugiyanto
NPM. 1925021005

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
SURAT PERNYATAAN	v
RIWAYAT HIDUP	vi
PERSEMBAHAN.....	vii
UCAPAN TERIMA KASIH	viii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian	5
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Sistematika Penulisan	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Material Baja	10
2.2 Baja AISI 4140	11
2.3 Uji Tarik.....	13
2.4 <i>Fatigue</i>	15
2.5 SEM (<i>Scanning Electron Microscopic</i>).....	20
2.6 Perlakuan Panas	21
2.7 <i>Austempering</i>	24
2.8 Diagram Fe-Fe ₃ C	27
2.9 Diagram TTT (<i>Time Temperature Transformation</i>).....	28
2.10 Mikro Struktur Baja.....	30

III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	35
3.2 Alat dan Bahan	35
3.3 Dimensi Spesimen Uji	42
3.4 Proses <i>Austenitasi</i>	43
3.5 Proses <i>Austempering</i>	45
3.6 Metode Pengujian	46
3.7 Diagram Alir Penelitian.....	49
IV. PEMBAHASAN	
4.1 Pengujian Tarik.....	50
4.2 Pengujian Kekerasan	53
4.3 Pengujian Fatik dan analisisnya	55
4.4 Pengamatan Mikrostruktur dan fraktografi	63
V. PENUTUP	
5.1 Simpulan.....	73
5.2 Saran	74

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 1. Diagram uji tarik	12
Gambar 2. Grafik S/N siklus tegangan sempurna bolak - balik	16
Gambar 3. Hubungan siklik regangan.....	17
Gambar 4. Spesimen untuk pengamatan dengan SEM	20
Gambar 5. Struktur mikro baja AISI 4140 setelah perlakuan panas hardening	21
Gambar 6. Diagram kesetimbangan Fe-Fe ₃ C.....	26
Gambar 7. Diagram TTT (Time Temperature Transformation) Baja AISI 4140	28
Gambar 8. Diagram Continuous Cooling Transformation (CCT) baja AISI 4340	29
Gambar 9. Struktur Mikro Ferit Pada Baja AISI 4140 Setelah Melalui Proses Quenching Bertingkat	30
Gambar 10. Austenit	30
Gambar 11. Struktur Mikro Pearlite Pada Baja AISI 4140 Setelah Melalui Proses Quenching Bertingkat	31
Gambar 12. Struktur Mikro Martensit Pada Baja AISI 4140 Akibat Pengaruh Proses Quenching.....	32
Gambar 13. Struktur Bainit.....	33
Gambar 14. Baja AISI 4140.....	36
Gambar 15. Mesin MTS <i>Landmark</i> 100 KN	36
Gambar 16. <i>Vertical machining senter</i> (CNC)	37
Gambar 17. <i>Mikroskop digital portable</i>	38
Gambar 18. Mesin <i>Scanning Electron Microscop</i> (SEM)	39
Gambar 19. Mikrometer digital	39
Gambar 20. Jangka sorong (<i>Vernier Caliper</i>).....	40
Gambar 21. Pemanas induksi (<i>Induction Heater</i>).....	40
Gambar 22. Dapur pemanas (<i>Salt Balt</i>)	41
Gambar 23. Spesimen uji tarik.....	42
Gambar 24. Spesimen uji fatik.....	43
Gambar 25. Proses austenisasi mencapai suhu 850 °C dan bagan temperatur warna baja	44
Gambar 26. Proses austempering terhadap spesimen uji.....	45
Gambar 27. Diagram alir penelitian.....	49

Gambar 28. Kurva tegangan teknik vs regangan teknik.....	50
Gambar 29. Kurva tegangan vs jumlah siklus pada Baja AISI 4140 raw material dengan perlakuan <i>single austempering</i>	58
Gambar 30. Kurva Log σ_a (Mpa) vs Log Nf (Cycle).....	60
Gambar 31. Kurva S-N baja AISI 4140 <i>single austempering</i>	62
Gambar 32. Struktur mikro baja AISI 4140 dengan <i>single austemper</i> sebelum diuji fatik (A&B) dan sesudah diuji fatik (C&D)	63
Gambar 33. Struktur mikro baja AISI 4140 raw material	64
Gambar 34. Fraktografi SEM baja AISI 4140 <i>single austempering</i> pada kondisi <i>stress level</i> 65 %	65
Gambar 35. Fraktografi SEM baja AISI 4140 <i>single austempering</i> pada kondisi <i>stress level</i> 40 %	66
Gambar 36. Fraktografi SEM baja AISI 4140 <i>raw material</i> pada kondisi <i>stress level</i> 65 %	67
Gambar 37. Fraktografi SEM baja AISI 4140 <i>raw material</i> pada kondisi <i>stress level</i> 40 %	68
Gambar 38. SEM EDS pada baja AISI 4140 raw material dengan 20K	69
Gambar 39. Spektrum hasil uji EDS baja AISI 4140 raw material	70
Gambar 40. SEM EDS pada baja AISI 4140 <i>single austemper</i> dengan 20K....	71
Gambar 41. Spektrum hasil uji EDS baja AISI 4140 <i>single austemper</i>	72
Gambar 41. Mikrostruktur SEM baja AISI 4140 <i>single austempering</i> pada kondisi <i>stress level</i> 65 %	71

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 1. Komposisi kimia baja AISI 4140	12
Tabel 2. Spesifikasi mesin CNC miling <i>machine</i>	37
Tabel 3. Hasil uji tarik baja AISI 4140	52
Tabel 4. Hasil pengujian kekerasan	54
Tabel 5. Data hasil pengujian fatik siklus tinggi AISI 4140 raw material.....	55
Tabel 6. Data hasil pengujian fatik siklus tinggi AISI 4140 single austemper.....	56
Tabel 7. Data pengujian fatik dengan basis logaritmanya pada raw material	58
Tabel 8. Data pengujian fatik dengan basis logaritmanya pada Austempering	59
Tabel 9. Data persamaan regresi	60
Tabel 10. Data tegangan perhitungan empiris Basquin pada raw material	61
Tabel 11. Data tegangan perhitungan empiris Basquin pada Austempering ...	61
Tabel 12. Komposisi unsur kandungan baja AISI 4140 raw material secara mapping atau luasan area tertentu	70
Tabel 13. Komposisi unsur kandungan baja AISI 4140 single austemper secara mapping atau luasan area tertentu	72

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengaruh dari perkembangan zaman dan kemajuan teknologi berbanding lurus terhadap kebutuhan suatu bahan material. Banyak komponen – komponen terbaru yang menuntut sebuah material memiliki karakteristik tertentu sesuai dengan kebutuhan pasar. Seperti pada *shaft* (poros), *gear* (roda gigi) rel kereta api, *Coupling* (Kopling), Sprockets, dan dan beberapa *spare part* mesin – mesin industri dan otomotif. Hal itu yang akhirnya menjadikan produsen - produsen untuk terus berkembang dan melakukan inovasi. Selain tuntutan material bahan yang bermutu tinggi, produsen juga dituntut untuk menghasilkan suatu produk yang memiliki umur pakai lama. Perlu diketahui bahwasanya komponen – komponen yang digunakan secara terus menerus tentu akan mengalami kegagalan bahan atau rusak. Bahan material akan mengalami kegagalan bahan dikarenakan beban dinamis yang terjadi secara fluktuasi, terus menerus dan berulang-ulang dan nilai pembebanannya dibawah yield strength. Dan kegagalan bahan banyak disebabkan karena faktor dari kelelahan bahan atau usia pakai, maka kemampuan suatu bahan yang memiliki kelelahan bahan yang tinggi tentu menjadi pilihan bagi produsen – produsen tersebut.

Baja AISI (American Iron and Steel Institute) 4140 termasuk kedalam kelompok baja karbon menengah, dengan nilai komposisi karbonnya mencapai 0,443%. Dengan komposisi yang lainnya yaitu (0,80-1,10)% Cr, (0,75-1,0)% Mn, (0,38-0,43)% C, (0,15-0,30)% Si, (0,15-0,25)% Mo, 0,040% S, dan 0,035% P sehingga baja AISI 4140 termasuk baja paduan rendah (Fendri, dkk, 2018). Bahan ini banyak dipilih karena memiliki nilai karakteristik lebih kuat dan keras serta dapat dikeraskan kembali dengan beberapa perlakuan. Beberapa perlakuan yang bisa dilakukan untuk memodifikasi dari Baja AISI 4140 adalah bisa dilakuan dengan proses *heat treatment* seperti *hardening*, *quenching*, *annealing* dan *tempering* serta *austempering*. Baja dengan nilai kekuatan tinggi seperti baja AISI 4140 pada umumnya diproduksi dengan kondisi QT (*Quenching* dan *Tempering*) dimana penyusun mikrostrukturnya adalah ferit – martensit temper (Feng et al. 2017). Proses perlakuan quenching dan kemudian diberikan proses tempering memiliki tujuan untuk mendapatkan hasil perpaduan antara daktiliti dan kekuatan yang baik dimana dari proses tempering tersebut menghasilkan struktur martensit dan ferit yang halus sehingga kekuatan baja AISI 4140 memiliki nilai kekuatan yang meningkat lebih baik melalui proses tersebut, akan tetapi dengan adanya struktur martensit yang lebih halus tidak memberikan pengaruh kontribusi pada kemampuan deformasi plastis selama bahan mengalami beban dinamis (Paul et al.2015).

Austempering adalah proses memanaskan kembali suatu bahan material dibawah suhu kritis yaitu sampai pada fase austenit, kemudian bahan material tersebut didinginkan dalam larutan garam cair dengan cepat. Dari proses *austempering* ini

akan menghasilkan struktur mikro berupa bainit. Proses austempering dilakukan untuk mendapatkan sifat karakteristik material yang memiliki nilai ketangguhan baik, nilai impak dan kekuatan tarik yang lebih tinggi. Proses austempering pada umumnya dilakukan dengan satu tahap pada bahan baja paduan rendah agar menghasilkan struktur bainit (Putatunda et al.2011). Semakin tinggi suhu austempering yang diberikan maka nilai *ultimate tensile strength* dan nilai *hardness* mengalami penurunan (Avanish Kumar et al.2022). Namun untuk nilai kekuatan fatiknya, spesimen yang diberikan suhu 350⁰C memiliki nilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan spesimen yang diberikan perlakuan 250⁰C karena memiliki nilai kecenderungan tertinggi untuk pengerasan regangan. Fraktografi menunjukkan bahwa struktur mikro cacat seperti inklusi tidak ada didekat retak lelah daerah inisiasi dan spesimen gagal terutama karena inisiasi retakan yang diinduksi permukaan.

Shultoni Mahardika (2020) telah melakukan sebuah penelitian yang berjudul “Analisa rekayasa sifat mekanik baja AISI 4140 dengan variasi suhu tempering untuk meningkatkan keuletan dan kekerasan material”. Dari penelitian tersebut diperoleh beberapa simpulan, yaitu terjadinya penurunan kekerasan pada setiap kenaikan suhu tempering baja AISI 4140, hal tersebut juga terlihat dari butiran hasil struktur mikro material yang membesar. Hal tersebut berbanding terbalik dengan kekuatan tariknya. Dimana untuk kekuatan tariknya mengalami kenaikan nilai pada setiap kenaikan suhu tempering baja AISI 4140. Hal tersebut juga bisa terlihat dari hasil pengamatan pada struktur mikro, dimana butiran yang diperoleh adalah membulat dan lebih halus.

Salman (2006) juga telah melakukan pengujian fatik dengan memberikan perlakuan panas austempering dan variasi temperatur yaitu pada suhu 235⁰C, 300⁰C, 370⁰C. Dari hasil pengujian yang dilakukan didapatkan bahwasanya dengan diberikan suhu yang semakin besar maka nilai spesimen untuk mengalami kegagalan lebih tinggi, terlihat pada spesimen temperatur 370⁰C memiliki nilai siklus sebanyak 874.500 sedangkan spesimen dengan temperatur austempering 235⁰C memiliki nilai siklus 165.100. Sedangkan untuk nilai kekerasan yang dihasilkan spesimen dengan temperatur lebih besar memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan spesimen bertemperatur rendah.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Pratowo (2018) menyimpulkan bahwa kekerasan dari baja karbon rendah menurun setelah dilakukan proses austempering, dimana semakin tinggi temperatur austempering maka mengakibatkan kekerasan baja akan cenderung lebih rendah. Pada mikrostruktur bainit dengan satu tahap pada baja AISI 4140 berhubungan langsung dengan kemampuan kekuatan fatiknya yang dapat digunakan untuk menghambat proses pembentukan awal retakan serta dapat menaikkan faktor intensitas tegangan pada ujung retak (Nagarajan et al.2017). Disamping itu juga temperatur yang digunakan pada media austemper dan waktu selama proses pendinginan berpengaruh terhadap perubahan dari sifat ketangguhan impak dan kekerasan permukaan baja paduan rendah (Badaruddin et al.2021).

Berdasarkan uraian penelitian – penelitian tersebut, maka penulis tertarik untuk melakukan penelitian pada baja AISI 4140 dengan melakukan *single austempering* pada suhu 312⁰C, diharapkan nantinya agar bisa merekayasa material untuk meningkatkan kekuatan tarik dan umur fatik sehingga penelitian ini berjudul “ Perilaku Fatik (Fatigue) Baja Kekuatan Tinggi AISI 4140 pada kondisi austempering”.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis sifat mekanik pada baja AISI 4140 setelah dilakukan proses austempering.
2. Menganalisis pengaruh austempering terhadap fatik siklus tinggi pada baja AISI 4140.
3. Menganalisis persamaan Basquin setelah dilakukan pengujian.
4. Menganalisis perubahan mikrostruktur setelah dilakukan pengujian.
5. Membandingkan hasil dari pengujian pada raw material dengan baja AISI 4140 setelah dilakukan proses austempering.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini bisa mendapatkan hasil yang baik dan benar, maka dilakukan beberapa batasan masalah, adapun batasan masalahnya adalah sebagai berikut :

1. Spesimen uji tarik didesain dengan standar ASTM E8, sedangkan untuk spesimen uji fatik didesain dengan standar ASTM E606.
2. Analisa sifat fatik menggunakan persamaan Basquin.

3. Pengujian fatik siklus tinggi pada temperatur ruang.
4. Pengaruh terhadap kehilangan ketebalan pada sampel uji akibat dari proses oksidasi diabaikan, serta waktu kecepatan dalam mencelupkan kelarutan garam dibawah 30 detik.
5. Penurunan temperatur pada saat furnace dibuka dianggap relatif rendah pada saat pengaturan pada suhu furnace 960⁰C.

1.4 Sistematika Penulisan

Untuk sistematika penulisan dalam penelitian sebagai berikut:

I. Pendahuluan

a. Latar Belakang

Membahas tentang pokok permasalahan dari penelitian ini, yaitu : kebutuhan dunia industri dan otomotif terhadap material yang akan diaplikasikan, proses austempering yang bisa meningkatkan ketangguhan, pengaruh terhadap kekuatan tarik dan kekuatan impak setelah dilakukan proses austempering, kemudian dilengkapi dengan penelitian – penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, yang memiliki nilai korelasi dari penelitian ini.

b. Tujuan Penelitian

Berisi tentang tujuan yang ingin dicapai oleh penulis dari penelitian yang akan dilakukan terhadap Baja Paduan AISI 4140 setelah dilakukan austempering.

c. Batasan Masalah

Untuk memfokuskan terhadap tujuan yang akan dicapai, maka perlu dilakukan batasan - batasan masalah. sehingga bisa menghasilkan penelitian yang lebih spesifik.

d. Sistematika Penulisan

Berisi tentang sistematika dalam penulisan karya ilmiah, tata urutan penulisan dari latar belakang, tujuan, tinjauan pustaka, metodologi sampai memperoleh beberapa simpulan.

II. Tinjauan Pustaka

a. Baja Paduan AISI 4140

Menjelaskan tentang bahan Baja Paduan, komposisi dan sifat-sifatnya.

b. Klasifikasi dan Spesifikasi Baja Paduan

Menampilkan penggolongan dan masing-masing spesifikasi serta penerapannya dalam aplikasi serta sifat dari masing-masing klasifikasi tersebut.

c. Uji Tarik

Mendefinisikan pengertian uji tarik, standar dalam pengujian tarik dan menampilkan kurva tegangan dan regangan serta menghitung untuk mendapatkan nilai tegangan, regangan maupun modulus elastisitas dari bahan.

d. Uji Fatik

Menjelaskan pengertian uji fatik, tiga fase yang terjadi sebelum terjadinya kegagalan dalam perpatahan fatik, standar dalam

pengujian fatik. Akan dibahas juga mengenai siklus yang terjadi dan pengertian dan Low Cycle Fatigue (LCF) dengan High Cycle Fatigue (HCF) serta faktor – faktor yang mempengaruhi dari fatik. Kurva S-N, dan membahas teori Coffin-Manson-Basquin).

e. Pengamatan Mikrostruktur dan SEM Fraktografi (Scanning Electron Microscopic)

Pada sub bab ini akan membahas tentang struktur mikro dan SEM Fraktografi serta teori yang mendasarinya.

III. Metodologi Penelitian

a. Waktu dan Tempat Penelitian

Membahas rentang waktu yang akan dilaksanakan selama penelitian berlangsung mulai dari tahap awal sampai tahap akhir.

b. Alat dan Bahan

Menjelaskan peralatan - peralatan dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini.

c. Dimensi Spesimen Uji

Membahas bentuk dan ukuran spesimen uji, disesuaikan dengan standar ASTM yang sudah ditetapkan dan dilengkapi dengan gambar.

d. Metode Penelitian

Yaitu langkah – langkah prosedur yang akan dilakukan dalam penelitian, dibuat secara terperinci dari kegiatan yang satu ke kegiatan yang lain.

e. Diagram Alir Penelitian

Adalah gambaran alir penelitian dari proses tahap awal perencanaan sampai nanti di tahap akhir dan penelitian dinyatakan selesai.

IV. Hasil dan Pembahasan

a. Hasil Data Penelitian

Menampilkan data dari penelitian baik berupa tabel maupun grafik dan hasil – hasil penelitian yang lain.

b. Pembahasan

Membahas dari hasil penelitian dan menyandingkan dengan teori dari tinjauan pustaka serta mengamati dengan hasil yang ada.

V. Penutup

a. Simpulan

Akan menghasilkan beberapa poin yang bisa disimpulkan dari penelitian ini.

b. Saran

Merupakan beberapa saran dari penulis yang diberikan kepada para peneliti yang lain dalam melakukan penelitian selanjutnya.

Daftar Pustaka

Memuat referensi – referensi, sumber data, yang digunakan penulis untuk menyelesaikan penelitian ini.

Lampiran

Memuat lampiran yang memiliki hubungan dengan data penelitian sebagai pelengkap dan pendukung, serta dokumentasi penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Material Baja

Salah satu material teknik dari logam adalah Baja, material ini merupakan paduan antara besi (Fe) dengan karbon (C), untuk jumlah kandungan karbon bisa mencapai 1,5%. Kandungan karbon terjadi dalam bentuk besi karbida, sifat utama dari logam ini adalah kuat, memiliki kemampuan tahan terhadap temperatur tinggi, dan mampu menghantarkan listrik secara baik (konduktor). Elemen lain seperti fosfor, belerang, silikon dan mangan juga bisa dipadukan, dengan jumlah yang lebih banyak atau lebih sedikit sehingga bisa memperoleh bahan yang diinginkan dengan memiliki sifat – sifat tertentu.

Berdasarkan dari jumlah kandungan karbonnya, maka material baja karbon dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu baja karbon rendah, baja karbon sedang dan baja karbon tinggi. Nilai kandungan karbonnya bervariasi dari 0,06% sampai 1,5%. Menurut Khurmi dan Gupta, 2005 baja karbon dibagi menjadi beberapa jenis tergantung pada kandungan karbonnya, yaitu :

1. Baja karbon rendah atau baja ringan, memiliki kandungan karbon 0,15% - 0,45%

Karakteristik dari baja karbon rendah ini adalah sangat lunak, namun memiliki tingkat keuletan yang tinggi. Baja karbon jenis ini memiliki

kelebihan berupa kekuatan yang tinggi, biaya yang rendah. Untuk aplikasi dari baja karbon jenis ini banyak dijumpai pada roda gigi, pelat, konstruksi jembatan, baut, pipa dan sebagainya.

2. Baja karbon sedang, memiliki kandungan karbon 0,45% - 0,8%

Untuk baja karbon jenis ini bisa dilakukan proses – proses heat treatment atau perlakuan panas seperti, *austenitizing*, *quenching* dan *tempering* agar mendapatkan karakteristik material sesuai dengan yang dibutuhkan dalam pengaplikasiannya di lapangan.

3. Baja karbon tinggi, memiliki kandungan karbon 0,8% - 1,5%

Karena memiliki kadar karbon yang tinggi, maka sifat dari baja karbon ini memiliki kekerasan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan baja karbon rendah dan baja karbon sedang, namun salah satu sifatnya memiliki tingkat keuletan yang rendah. Aplikasi dari baja karbon tinggi biasanya digunakan sebagai material yang memerlukan temperatur tinggi, tahan terhadap *defleksi*, beban gesek seperti mata bor, *bearing*, dan juga blok silinder.

2.2. Baja AISI 4140

Bahan Baja AISI 4140 memiliki nama lain *Chrome-moly*, dimana material ini memiliki perbandingan kekuatan terhadap berat yang baik. Material ini memiliki karakteristik kuat dan daya tahan yang relatif tinggi jika dibandingkan dengan bahan material yang lain. Nilai yang bisa dicapai ketika Baja AISI 4140 sepenuhnya mengeras 60 HRC. Nilai Kekerasan yang tinggi tersebut dipengaruhi dengan adanya kandungan karbon yang terdapat padanya, dimana dengan kandungan karbon yang lebih tinggi maka akan memiliki nilai kekerasan

lebih tinggi dan sebagai keuntungan yg lainnya yaitu memiliki ketahanan aus yang lebih tinggi (Claesson, 2014).

Dalam beberapa aplikasi yang bisa kita jumpai pada bidang industri, bahan Baja AISI 4140 (42CrMo4) sering digunakan industri dirgantara, industri otomotif, dan industri manufaktur. Elemen dari paduan antara Cr dan Mo yang disertakan mempengaruhi tingkat kekerasan dan ketangguhan yang tinggi. sehingga menjadi salah satu bahan substrat terpenting untuk aplikasi keausan abrasif dan perekat (Ulutan *et al.*,2010). Disamping itu Baja AISI 4140 juga bisa diaplikasikan pada sistem untuk tabung yang bertekanan, seperti badan injeksi bahan bakar. Sistem seperti ini menciptakan tekanan bertekanan tinggi, yang berdenyut naik turun dalam waktu yang lama. Pada tabel 1 dibawah ini bisa kita melihat komposisi kimia baja AISI 4140.

Tabel 1. Komposisi kimia baja AISI 4140 (Badaruddin *et al.*, 2019).

No	Unsur Kimia	Jumlah Kandungan (wt.%)
1	Karbon (C)	0,443
2	Mangan (Mn)	0,805
3	Silikon (Si)	0,308
4	Kromium (Cr)	1,15
5	Fosfor (P)	0,021
6	Sulfur (S)	0,01
7	Molibdenum (Mo)	0,198
8	Nikel (Ni)	0,253
9	Aluminium (Al)	0,0198
10	Kobalt (Co)	0,020
11	Tembaga (Cu)	0,320
12	Titanium (Ti)	0,026
13	Wolfram (W)	0,0114

2.3. Uji Tarik

Pengujian tarik adalah salah satu proses pengujian yang berfungsi untuk mengetahui kekuatan mekanik dari suatu material. Pengujian tarik dilakukan dengan cara melakukan penarikan material dengan gaya tarik secara terus menerus dan teratur sampai material mengalami kegagalan atau patah. Dari uji tarik ini, kita bisa mendapatkan nilai tarik yang diperlukan agar material atau spesimen uji mengalami kegagalan. Kemudian dari hasil uji tarik tersebut, kita bisa menjabarkan atau membuatkan sebuah kurva, yaitu kurva tegangan dan regangan. Dan dari kurva tersebut kita bisa mencari dan menganalisa daerah elastis, daerah plastis dan nilai titik luluhnya (yield strength).



Gambar 1. Diagram uji tarik (Salindeho, 2013).

Untuk kurva tegangan vs regangan bisa diperoleh dari hasil pengukuran perpanjangan spesimen uji dimana tegangan yang digunakan adalah tegangan membujur rata-rata dari pengujian tarik yang diperoleh dan dibagi dengan luas awal penampang melintang benda.

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana:

Σ :Tegangan tarik, N/m² (Pa)

F : Gaya, N

A : Luas permukaan, m²

Regangan tarik suatu batang yang ditarik dapat didefinisikan dengan cara yang sama sebagai perbandingan antara berkurangnya panjang batang dengan panjang semula yang nilainya lebih kecil dari 0. Sehingga perubahan yang terjadi dari suatu perbandingan pada panjang batang $\Delta\ell/\ell_0$ disebut dengan regangan seperti yang pada persamaan berikut.

$$\varepsilon = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana:

E : Regangan

ℓ : Panjang batang, m

ℓ_0 : Panjang semula, m

$\Delta\ell$: Perubahan panjang, m

Dari kurva tegangan regangan yang diperoleh bisa digunakan untuk hampir semua bahan. Untuk jarak tertentu dari titik asal, nilai-nilai eksperimental dari tegangan-regangan pada dasarnya terletak pada satu garis lurus. Dalam Hal ini berlaku untuk semua bahan yang dikenal sebagai hukum *Hooke*. Yang secara mudah menyatakan bahwa tegangan berbanding lurus dengan regangan, dimana pada daerah tersebut adalah daerah linear atau *linear zone*. Dimana pada daerah ini, kurva tegangan-regangan mengikuti hokum *Hooke* yang dirumuskan:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

E : Modulus elastis, GPa

Σ : Tegangan, (MPa)

ε : Regangan

2.4. *Fatigue*

Kelelahan (*Fatigue*) merupakan kecenderungan pada bahan untuk mengalami kegagalan atau patah jika menerima tegangan secara berulang-ulang (*cyclic stress*) yang nilainya dibawahbatas kekuatan elastisnya. Untuk diketahui bahwa sebagian besar kerusakan yang terjadi pada komponen mesin disebabkan oleh kelelahan bahan ini. Maka dari itu, kelelahan bahan merupakan sifat yang sangat penting untuk diketahui, tetapi sifat ini sulit untuk diukur karena banyak faktor yang mempengaruhinya.

Terdapat tiga fase dalam terjadinya kegagalan bahan akibat fatigue (kelelahan) bahan. Ketiga fase tersebut adalah sebagai berikut:

1. Permulaan retak (*crack initiation*)

Diawali dengan adanya *crack* sebagai awal terjadinya fatigue kemudian *crack* pada permukaan (seperti goresan, notch, lubang-pitch dll) akan merambat karena adanya pembebanan yang berulang.

2. Penyebaran retak

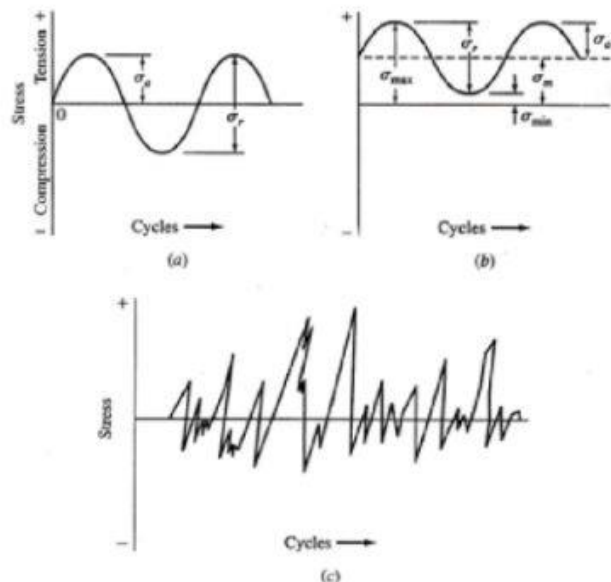
Pada fase ini, *crack* mulai merambat seiring dengan tingginya nilai konsentrasi tegangan di *crack initiation*. Penyebaran retak ini berkembang menjadi

microcracks. Perambatan atau perpaduan microcrack tersebut berkembang membentuk macrocracks yang akan berujung pada perpatahan bahan.

3. Patah (*fracture*)

Ini merupakan fase terakhir, bahan akan mengalami perpatahan karena sudah tidak mampu lagi menahan pembebanan secara siklik dan sudah melewati nilai elastisitasnya. Pada tahap ini penjalaran retak yang terjadi pada material sangatlah cepat sehingga struktur akan pecah menjadi dua dan pada akhirnya akan menghasilkan kerusakan permanen.

Pada *fatigue* terdapat tiga siklus umum yang dapat menunjukkan suatu siklus tegangan fatigue. Yang pertama adalah tegangan dinamis terjadi mulai dari tegangan rata-rata nol dengan amplitude yang konstan (tetap). Yang kedua yaitu tegangan dinamis dimulai diatas garis rata-rata nol dengan amplitude konstan. Dan yang ketiga tegangan dinamis yang acak atau random.

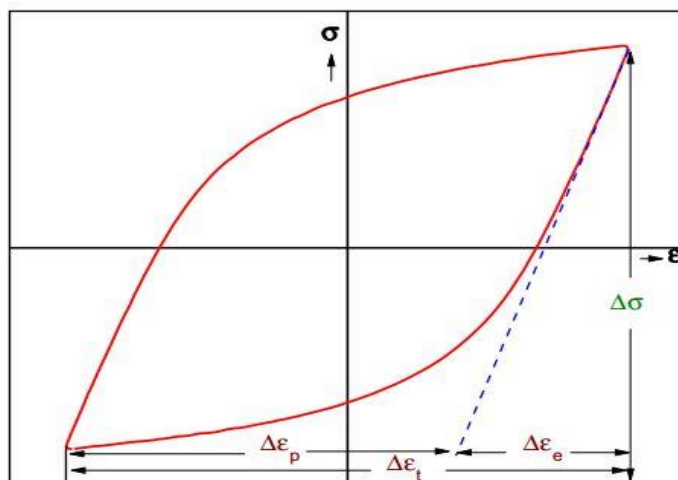


Gambar 2. Grafik S/N: (a) Siklus tegangan sempurna bolak-balik, (b) Siklus tegangan berulang dengan $\sigma_{maks} = \sigma_{min}$, dan (c) Siklus tegangan acak

Pada *fatigue* terdapat dua siklus yang membedakan, yaitu :

1. *Low Cycle Fatigue (LCF)* yaitu fatik dengan siklus rendah. Pada *low cycle fatigue* memiliki nilai jumlah siklus dibawah $\leq 10^3 = 1000$ siklus dalam kondisi plastis. *Low cycle fatigue* biasanya didesain dengan mengabaikan keseluruhan efek *fatigue* atau dengan mengurangi level tegangan yang diijinkan. Sebagai contoh aplikasi *low cycle fatigue* ini adalah grendel pada laci kecil dekat stir mobil, stud pada roda truk.
2. *High Cycle Fatigue (HCF)* yaitu fatik dengan siklus tinggi. pada *high cycle fatigue* memiliki nilai jumlah siklus antara 10^4 sampai 10^7 dan di luar kondisi elastis. Sebagai contoh aplikasi *high cycle fatigue* adalah engsel pintu mobil, panel badan pesawat, dan pemukul softball aluminium.

Hubungan siklik regangan pada fatik. dimana hubungan antara $\Delta\epsilon_p/2$ dan $2N_f$ sangat penting untuk mengevaluasi dan mengkararakteristik sifat fatik agar meningkatkan kinerja fatik suatu bahan.



Gambar 3. Hubungan siklik regangan

Dapat dijelaskan dengan persamaan *coffin manson*:

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \dots\dots\dots (4)$$

Dimana;

ε'_f : koefisien daktilitas fatik

C : eksponen daktilitas fatik

Amplitudo regangan total adalah jumlah amplitudo regangan elastis dan amplitudo regangan plastic dapat dianalisa melalui pendekatan persamaan teori Coffin-Manson-Basquin (Persamaan 4). Sehingga hubungan antara amplitudo regangan total dan jumlah pembalikan regangan terhadap kegagalan dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \dots\dots\dots (5)$$

Dimana:

E : Modulus Young (GPa)

N_f : jumlah siklus kegagalan (siklus)

$\frac{\Delta \varepsilon_f}{2}$: total amplitudo regangan (mm/mm)

σ'_f : koefisien kekuatan fatik (MPa)

b_0 : kekuatan exponent fatik

ε'_f : koefisien daktilitas fatik

c_0 : exponent daktilitas fatik

Kondisi *fatigue* dapat dipengaruhi atau dapat diubah dengan memperhatikan beberapa faktor, faktor – faktor yang dapat mempengaruhi atau dapat mengubah yaitu sebagai berikut :

1. Tegangan Konsentrasi

Terjadi pada daerah-daerah benda yang dimensinya berubah drastis dan pemicu lain terjadinya konsentrasi tegangan seperti fillet, notch, alur pasak, positas, inklusi dan lain-lain akan menyebabkan menurunnya umur *fatigue* atau *fatigue life*. Besar konsentrasi tegangan dapat diketahui dengan menghitung konsentrasi suatu tegangan.

2. Ukuran

Bila ukuran suatu spesimen bertambah maka ketahanan *fatigue* menurun. Hal ini dikarenakan, kegagalan akibat *fatigue* biasanya dimulai dari permukaan. Maka penambahan ukuran dilakukan akan memberikan kemungkinan menimbulkan keberadaan cacat. Akibatnya retak berawal pada cacat tersebut.

3. Tegangan sisa

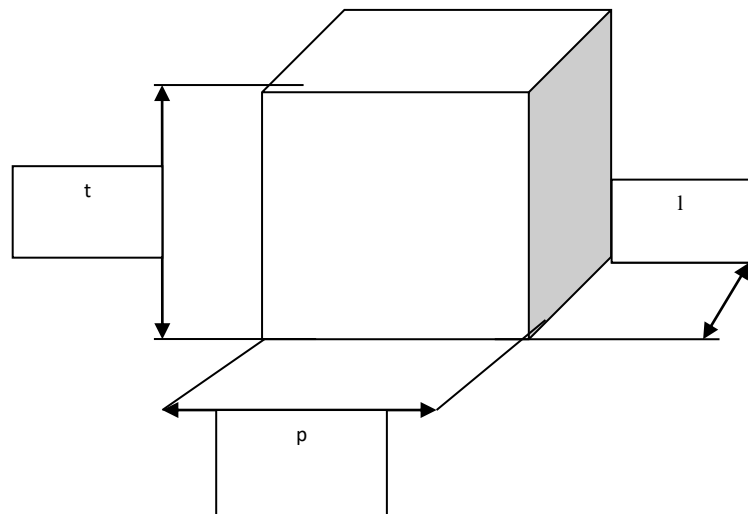
Tegangan sisa tekan akan memberikan peningkatan pada ketahanan *fatigue*. Tegangan sisa ini dapat dikembangkan dengan cara melakukan deformasi plastis yang tidak seragam pada suatu penampang material.

4. Faktor komposisi kimia

Pengaruh komposisi kimia terhadap kekuatan leleh bahan diharapkan agar sama dengan seluruh spesimen uji pada saat pemilihan bahan material yang akan di produksi dalam satu kali proses pembuatan

2.5 SEM (*Scanning Electron Microscope*)

SEM dilakukan untuk untuk mengamati bentuk patahan pada spesimen uji setelah dilakukan proses pengujian. Cara untuk mendapatkan struktur mikro dengan membaca berkas elektron, didalam SEM berkas elektron berupa noda kecil yang umumnya $1\mu\text{m}$ pada permukaan specimen. Permukaan spesimen diambil gambarnya, dari gambar tersebut kemudian dianalisa bentuk permukaannya atau kerusakan pada spesimen. Pentingnya SEM adalah memberikan gambaran nyata dari bagian kecil specimen. Berikut adalah gambar bentuk spesimen yang akan dilakukan pengamatan menggunakan SEM.



Gambar 4. Spesimen untuk pengamatan dengan SEM

Keterangan gambar :

- P : Panjang spesimen uji (mm)
- t : Tinggi spesimen uji (mm)
- l : Lebar Spesimen uji (mm)

2.6 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Suatu proses memanaskan kembali kemudian dilanjutkan dengan pendinginan pada baja atau baja paduan sering disebut dengan proses perlakuan panas. Dimana proses perlakuan panas tersebut memiliki tujuan agar dapat mengubah kekuatan mekanik dari baja tersebut dan juga merubah mikrostrukturnya sesuai dengan yang diharapkan. Dari proses tersebut juga dapat menghilangkan tegangan serta dapat merubah ukuran butir – butir, ada yang butirnya semakin besar dan ada juga yang butirnya lebih mengecil. Nilai ketangguhan dan keuletan dari baja juga dapat ditingkatkan dengan adanya proses pemanasan. Disamping itu komposisi kimia baja juga harus lebih diketahui agar bisa mendapatkan spesimen yang sesuai dari harapan, karena perubahan komposisi kimia khususnya karbon dapat mengakibatkan perubahan sifat – sifat fisisnya. (Fendri dkk, 2018).

Ada dua pengelompokkan dalam proses perlakuan panas yaitu (Pratowo, 2018):

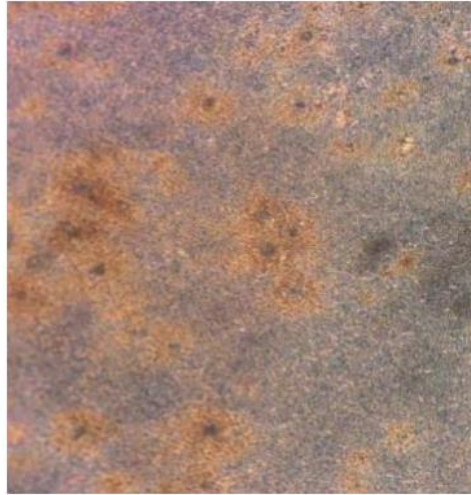
a. Softening (Pelunakan)

Softening merupakan tindakan yang dilakukan dengan bertujuan untuk mendapatkann sifat mekanik yang menurun sehingga bahan menjadi lunak, proses ini dilakukan dengan cara melakukan pendinginan material yang sudah dipanaskan didalam tungku (annealing) atau mendinginkan dalam udara terbuka (normalizing).

b. Hardening (Pengerasan)

Hardening merupakan upaya agar sifat material yang didapatkan meningkat, terutama sifat kekerasannya, proses ini dilakukan dengan cara mencelupkan

secara cepat (quenching) material yang sudah dipanaskan ke dalam suatu media quenching berupa air, air garam, maupun oli.



Gambar 5. Struktur mikro baja AISI 4140 setelah perlakuan panas hardening
(Fendri, dkk, 2018)

1. Austenisasi

Pada perlakuan Temperatur austenisasi adalah faktor yang sangat penting untuk mulai transformasi fasa menjadi austenit. Jika temperatur austenisasi yang diberikan rendah, maka tidak memungkinkan seluruh fasa material menjadi austenit sehingga pengerasan tidak tercapai sesuai yang diharapkan (Damanik, 2010).

2. Annealing

Sedangkan proses Annealing adalah suatu proses memanaskan baja diatas temperatur kritisnya (723°C), ketika temperatur yang diharapkan sudah tercapai kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan secara perlahan dengan beberapa waktu lama hingga temperatur merata. Hal tersebut dilakukan untuk menjaga agar temperatur dibagian dalam dan luar seragam kira-kira sama sampai

diperoleh struktur yang diinginkan, proses pendinginan ini menggunakan media pendingin udara luar.

3. Quenching

Proses perlakuan yang lainnya adalah Quenching, pada proses ini memiliki harapan agar baja memiliki kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi secara signifikan. Langkah awal yang dilakukan adalah memanaskan logam baja tersebut pada temperatur tertentu. Temperatur yang umumnya digunakan antara 845° - 870° C, kemudian jika temperatur sudah tercapai maka dilakukan proses pendinginan pada media pendingin dengan secara cepat. Sehingga nanti akan terbentuk struktur martensit ketika baja sudah dingin. Proses Quenching dilakukan juga untuk mencegah terjadinya pembentukan struktur perlit serta untuk memudahkan pembentukan struktur bainit atau martensit (Razak dan Tangkemandu, 2017).

4. Tempering

Proses tempering bisa diartikan sebagai proses pemanasan logam baja setelah dilakukan proses pengerasan pada temperatur di bawah suhu kritisnya, kemudian dilanjutkan proses pendinginan. Logam baja yang sudah dikeraskan tadi akan memiliki karakter lebih rapuh sehingga tidak cocok jika untuk diaplikasikan pada komponen yang memerlukan tingkat daktiliti tinggi, namun melalui proses tempering ini kekerasan dan kerapuhan tersebut bisa diturunkan sampai memenuhi persyaratan penggunaan (Nandiawan, dkk, 2015).

5. Normalizing

Normalizing adalah salah satu langkah perlakuan panas dengan memiliki harapan agar setelahnya menghasilkan struktur mikro berupa perlit dan ferit yang memiliki bentuk halus. Normalizing merupakan proses pemanasan logam sampai mencapai fasa austenite, kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginaan secara perlahan-lahan, media yang digunakan bisa berupa pendingin udara. Hasil pendinginan normalizing ini jauh lebih mulus dari aneling (Pratowo, 2018).

2.7 Austempering

Austempering merupakan proses perlakuan panas yang diaplikasikan dengan tujuan untuk mendapatkan mikrostruktur yang dikenal sebagai bainit. Perlakuan austempering diperlukan guna mendapatkan struktur bainit halus yang dimana karbida (Fe_3C) yang ada pada matriks ferit berbentuk partikel – partikel halus jika dibandingkan dengan struktur lameral karbida (Fe_3C) pada perlit (Badaruddin, 2019). Dengan sifat kekerasan, kekuatan, ketahanan benturan, keuletan dan ketahanan aus yang ditingkatkan. Struktur mikro ausferitik adalah campuran ferit bainitik dan austenit yang tertahan (Pourasiabi et al., 2012). Austempering merupakan salah satu usaha alternatif antara quenching dengan tempering guna meningkatkan ketangguhan dan keuletan beberapa baja. Pada austempering baja terlebih dahulu dilakukan proses austenisasi, kemudian dilanjutkan dengan proses quenching pada media pendingin seperti rendaman larutan garam pada temperatur sedikit lebih tinggi daripada temperatur baja M_s , kemudian dilanjutkan dengan proses menahan beberapa waktu yang secara isothermal untuk memberi kesempatan berlangsungnya transformasi austenit ke bainit, lalu didinginkan ke

temperatur ruang dalam udara (Pratowo, 2018). Kelebihan proses austempering ini adalah tidak diperlukan proses tempering, austempering mampu meningkatkan sifat mekanik terutama untuk memperoleh struktur bainit, mendapatkan ketangguhan tinggi serta hasil austempering mempunyai kekuatan dan keuletan yang cukup tinggi. Keberhasilan proses austempering sangat ditentukan oleh temperatur isothermal pembentukan bainit awal (B_s), dimana yang harus memiliki nilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan temperatur awal pembentukan martensit (M_s). Berikut merupakan tiga faktor yang bisa menjadi penghambat pada proses austempering baja paduan, yaitu:

1. Terbentuknya martensit secara bersama dengan bainit, hal ini bisa terjadi karena keakuratan temperatur bainit awal (B_s) yang tidak dapat diprediksi.
2. Temperatur martensit (M_s) yang hampir sama dengan temperatur bainit awal (B_s) karena database komposisi kimia baja yang tidak lengkap tersedia.
3. Secara termodinamika dan kinetik transformasi fasa austenit menjadi ferit dan bainit sangat sulit untuk ditentukan. (Mousalou, 2018).

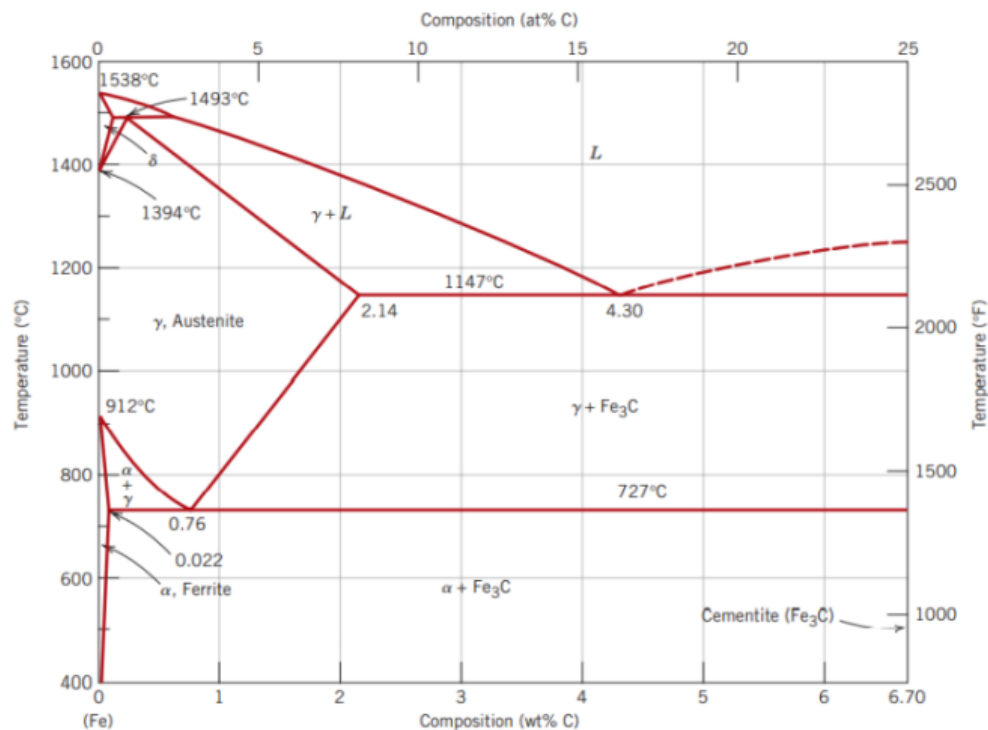
Struktur bainit umumnya terbentuk secara kasar, hal tersebut bisa terjadi dikarenakan penggunaan temperatur transformasi yang tidak tepat (Mousalou et al. 2018). sehingga nantinya dalam penelitian ini dalam penentuan temperatur M_s dan B_s baja AISI 4140 menggunakan software yang telah dikembangkan oleh Bhadeshia (2022) berdasarkan dari jumlah kandungan karbon (wt.%) dan komposisi kimia elemen logam lainnya yang ada dalam baja. Untuk komposisi kimia baja bisa ditentukan terlebih dahulu dengan presisi menggunakan glow discharge spektroskopi (GD-OES).

Proses perlakuan austempering tingkat lanjutan yang lebih dikenal dengan istilah multi - tahap (multisteps) austempering bisa dilakukan untuk memperoleh struktur bainit yang lebih halus lagi atau istilah lainnya nano bainit, yang secara langsung sangat berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan mekanik dan keuletan yang tinggi. Selain hal tersebut austempering tingkat lanjutan juga bisa menghasilkan kombinasi ketangguhan impact dan kekuatan tarik tinggi karena struktur bainit ferit yang lebih halus. Namun yang menjadi catatan adalah untuk mendapatkan sifat baja dengan kekuatan dan keuletan tinggi serta rasio kekuatan yang relatif tinggi terhadap kekuatan maksimum, maka pembentukan fasa martensit harus dihambat agar fasa austenit langsung bertransformasi menjadi ferit dan bainit.

Avishan (2017) telah melakukan austemper pada baja 0,83C-1,43Si-1,90Mn-1.16Cr-1.28Co-0,32Mo-0,66Al (wt.%) pada temperatur 200 °C serta pada temperatur 300 °C selama 12 jam. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan struktur bainit – ferit yang dihasilkan dari proses austemper temperatur 300 °C lebih halus dan berimbang terhadap peningkatan kekuatan tarik dan impact. Penelitian yang lain juga menunjukkan dengan menggunakan variasi temperatur (350, 400, 450 °C) pada baja AISI 4140 (Badaruddin, 2021) menghasilkan peningkatan secara signifikan kekerasan pada permukaan pada suhu 350 °C. Penelitian yang sama juga pernah dilakukan oleh Mousalou (2018) dengan melakukan proses *single austempering* pada suhu 350 °C, dari hasil penelitian tersebut menghasilkan kekuatan luluh dan ketangguhan impact baja secara signifikan ditingkatkan dari struktur bainit halus serta dominan dalam meningkatkan sifat mekanik baja.

2.8 Diagram Fe-Fe₃C

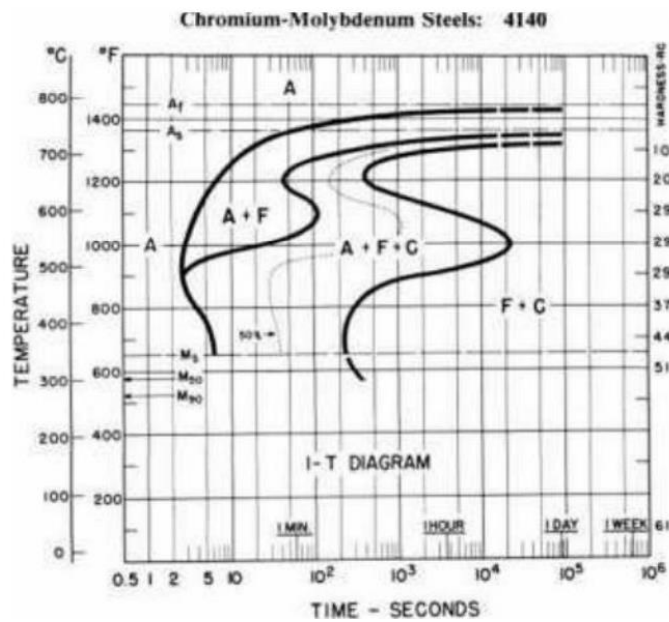
Sebagai pedoman dasar dalam melakukan perlakuan panas atau *heat treatment* pada besi dan baja maka menggunakan diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C, seperti ditunjukkan pada gambar 6. Dari gambar tersebut bisa terlihat beberapa fasa yang terjadi pada kondisi tertentu. Fasa - fasa tersebut antara lain adalah ferit, cementit (Fe₃C), austenit (g), besi (d) atau campuran fasa - fasa tersebut, dimana letak posisinya tergantung pada kondisi temperatur serta kandungan karbon (Sumiyanto dan Abdunnaser, 2015). Disamping itu diagram fasa Fe-Fe₃C menjadi patokan untuk melakukan proses perlakuan panas terhadap jenis - jenis baja. Sumbu horizontal pada sumbu menunjukkan jumlah kandungan karbon dalam suatu material. sedangkan pada sumbu vertikal menunjukkan temperatur pemanasan dan perubahan struktur mikro yang terjadi (Callister, 2007).



Gambar 6. Diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C (Callister, 2007)

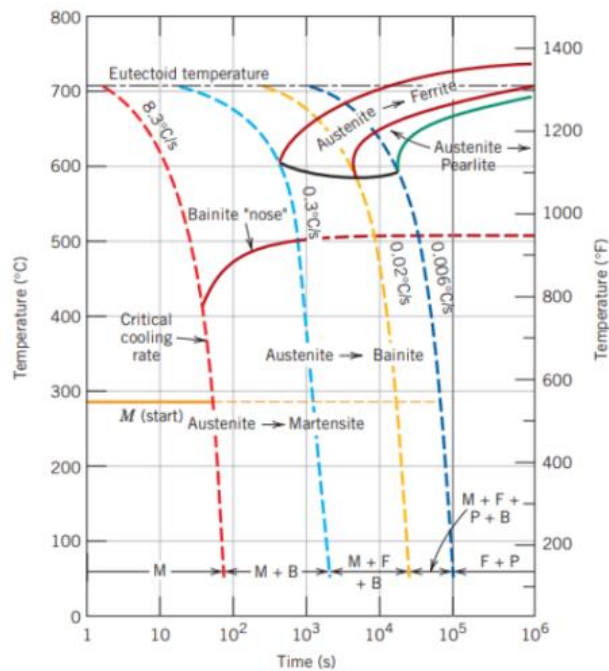
2.9 Diagram TTT (Time Temperature Transformation)

Diagram TTT merupakan diagram yang berfungsi untuk mengetahui temperatur terhadap waktu. Pada diagram TTT bisa terlihat transformasi eutektoid logam dari temperatur austenit ke temperatur ruang dan pada keseimbangan yang tidak stabil. Untuk material yang dipanaskan dari temperatur austenit dengan proses pendinginan yang lambat akan cenderung memiliki bentuk formasi ferit - ferit, sedangkan untuk material yang menggunakan metode pendinginan secara cepat akan cenderung membentuk formasi martensit pada keseimbangan yang tidak stabil. Laju kecepatan pendinginan tergantung kepada media quench yang digunakan (Lubay, 2014). Untuk diagram TTT ini sangat dipengaruhi oleh jumlah kadar karbon dalam baja itu sendiri, dimana dengan semakin besar kadar karbon yang ada pada material tersebut maka diagramnya akan semakin bergeser ke arah kanan, begitu juga dengan unsur paduan lainnya. Jika baja dipanaskan sampai membentuk austenit, maka pendinginan akan berlangsung secara terus - menerus tidak isothermal biar pun dilaksanakan dengan berbagai media pendingin. 14 Diagram TTT menggambarkan hubungan waktu (Time), suhu (Temperature) dan perubahan struktur (Transformation). Diagram ini memiliki skala tegak lurus dan skala mendatar. Lintasan mendatar dari sumber tegak hingga garis S pertama (kiri) menunjukkan waktu yang berlangsung hingga tercapainya awal pembentukan austenit, sedang garis S ke dalam (kanan) menyatakan saat berakhirnya perubahan bentuk. Jarak mendatar antara kedua garis liku menyatakan jangka waktu proses perubahan bentuk (Haryadi, 2006). Diagram TTT untuk baja C sama dengan 0,8% (eutectoid) diperlihatkan pada gambar 7.



Gambar 7. Diagram TTT (Time Temperature Transformation) Baja AISI 4140
(Claesson, 2014)

Hubungan antara struktur mikro dengan kecepatan pendinginan perlu diketahui dan untuk memperoleh informasi hubungan diantara hal tersebut maka tindakan yang secara umum digunakan yaitu proses menggabungkan diagram kecepatan pendinginan kedalam diagram TTT yang kemudian disebut dengan diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT) seperti terdapat pada gambar 8 Pada diagram CCT tersebut dapat menggambarkan keadaan saat terjadinya proses transformasi eutektoid dari temperatur austenit menuju temperatur ruangan. Dan untuk sifat mekanik yang bisa dihasilkan bisa diperoleh dengan cara menentukan durasi atau selang waktu pada proses penahanan pada keadaan isothermal dan juga faktor yang tidak bisa tertinggal adalah kecepatan laju pendinginan dari media quench yang digunakan. Diagram CCT ditunjukkan pada gambar 8 dibawah ini.



Gambar 8. Diagram Continuous Cooling Transformation (CCT) baja AISI 4340 (Callister, 2007).

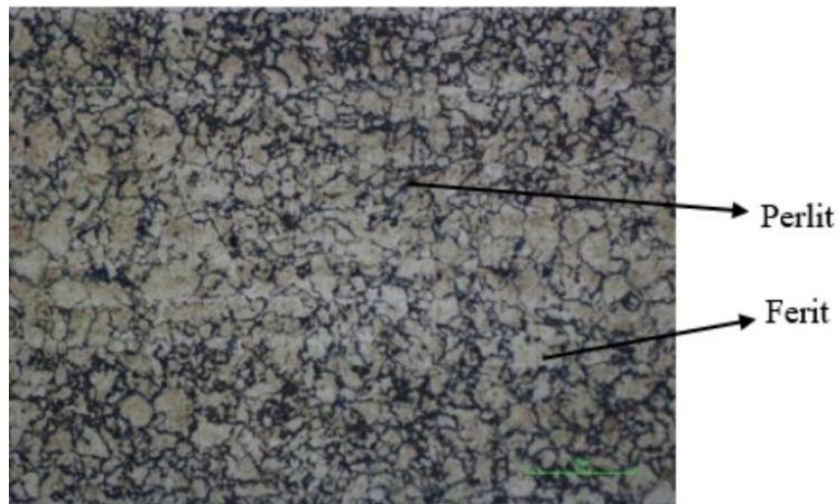
2.10 Mikro Struktur Baja

Mikro struktur adalah kondisi dari beberapa gabungan fasa - fasa yang terdapat dalam baja serta dapat diamati dan dianalisa melalui teknik metalografi. Berikut adalah beberapa jenis struktur mikro baja

1. Ferit

Ferit adalah paduan dari unsur karbon serta unsur paduan yang terjadi karena akibat dari suatu proses pendinginan dengan secara lambat, ciri dari ferit ini memiliki warna yang lebih terang dengan ruang atomnya yang kecil serta rapat mengakibatkan hanya dapat menampung sedikit jumlah atom karbon. Struktur mikro ferit ini memiliki karakter lunak serta memiliki kekuatan yang relatif rendah, keuletan tinggi dan tahan korosi menengah. Struktur mikro ferit biasanya

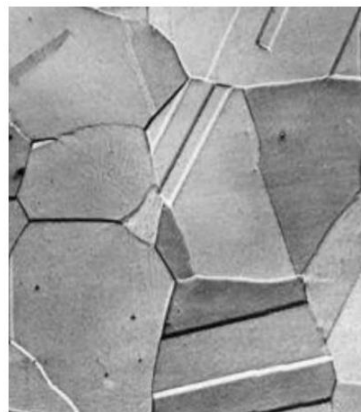
terdapat pada baja dengan jumlah kandungan karbon rendah. Dimana larutan karbon didalam fasa berkisar 0,0008% dan berbentuk polygonal (Sumiyanto dan Abdunnaser, 2015).



Gambar 9. Struktur Mikro Ferit Pada Baja AISI 4140 Setelah Melalui Proses Quenching Bertingkat (Razak dan Tangkemanda 2017).

2. Austenit

Austenit merupakan campuran dari besi dan karbon yang terjadi karena adanya proses pembekuan. Jumlah karbon yang dimiliki maksimum sebesar 2,14%. Lentur merupakan sifat yang identik dengan austenit ini, selain itu juga memiliki sifat keuletan yang tinggi dan lunak.



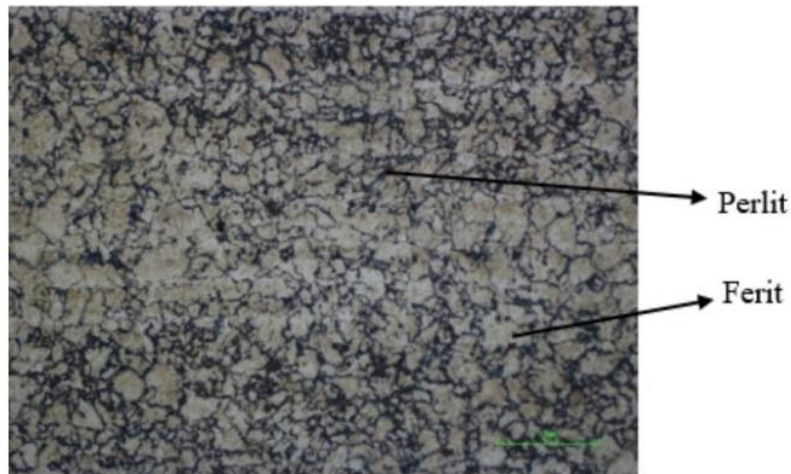
Gambar 10. Austenit (Callister, 2007).

3. Simentit

Simentit merupakan campuran besi yang bisa membentuk fasa stabil pada paduan besi dan baja. Namun pada bentuk fasa murni, simentit memiliki sifat sangat keras dan getas.

4. Pearlite

Pearlite campuran dari dua fasa yaitu ferit dan simentit yang keduanya tersusun sebagai pelat sejajar dengan kondisi bolak-balik. Pearlite memiliki jumlah karbon tetap sebesar 0,83% pada baja karbon dan terbentuk karena reaksi eutectoid saat austenit proses pendinginan. Kuat dan lebih keras daripada ferit tetapi kurang ulet dan tidak magnetis merupakan ciri dan pearlite ini.

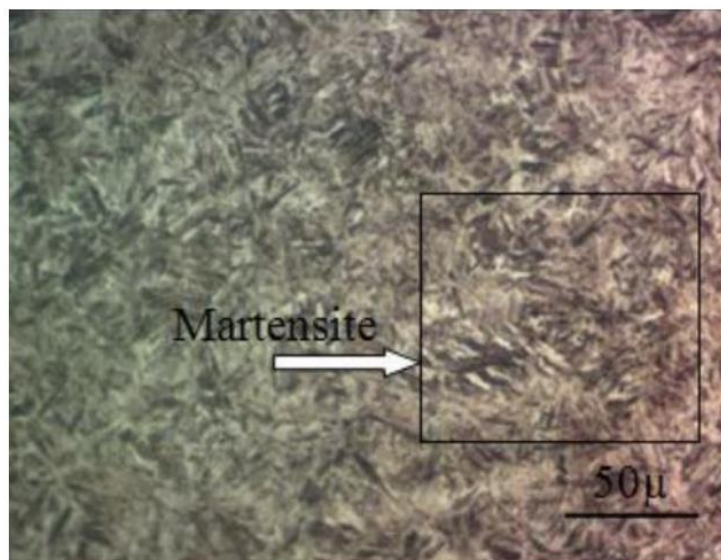


Gambar 11. Struktur Mikro Pearlite Pada Baja AISI 4140 Setelah Melalui Proses Quenching Bertingkat (Razak dan Tangkemanda 2017).

5. Martensit

Martensit merupakan transformasi yang terjadi pada austenite karena dilakukan proses pendinginan dengan sangat cepat dan tanpa disertai oleh penyusunan atom

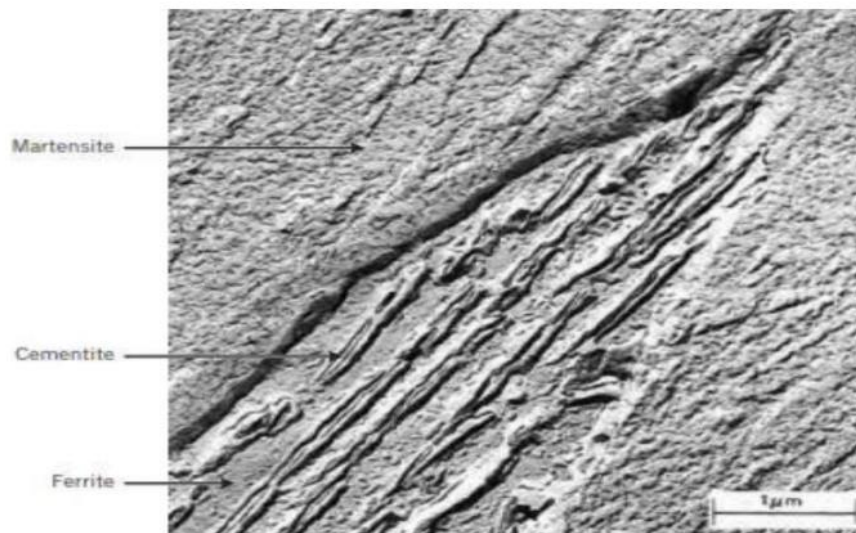
karbon yang secara difusi pada kisi - kisi austenite tersebut. Pembentukan martensit terjadi karena proses pergeseran atom dengan nilai jarak atom - atomnya. Akibat dari pergeseran atom ini, mengakibatkan terjadinya perubahan struktur dari body central cubic (BCC) menjadi body center tetragonal (BCT). Pembentukan martensit dimulai pada garis martensit stars (Ms) dan berakhir pada garis martensit finish (Mf). Garis Ms dan Mf tidak dipengaruhi oleh laju pendinginan tetapi ditentukan oleh komposisi kimia. Struktur martensit didalam baja merupakan struktur yang memiliki kekerasan paling tinggi seperti ditunjukkan pada gambar 12.



Gambar 12. Struktur Mikro Martensit Pada Baja AISI 4140 Akibat Pengaruh Proses Quenching (Mizhar dan Suherman, 2011).

6. Bainit

Bainit pencampuran dari dua fasa, yaitu antara ferit dan sementit, kedua fasa ini bisa terbentuk dikarenakan adanya proses pendinginan cepat austenit pada suhu antara 400°C dan 550°C. kemudian dilanjutkan dengan adanya waktu penahanan pada temperatur ini sampai melewati batas kurva transformasi martensit finis untuk terbentuknya formasi bainit. Transformasi bainit bisa terjadi karena adanya pengendapan karbida pada konfigurasi yang lebih halus.



Gambar 13. Struktur Bainit (Callister, 2007).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei 2022 - September 2022 bertempat di Laboratorium Material Teknik, Fakultas Teknik Universitas Lampung. Observasi mikrostruktur dilakukan di laboratorium pengembangan paduan & karakterisasi FTTM ITB Bandung. Dan SEM fraktografi dilakukan di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Pusat Logam dan Mineral Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

3.2 Alat dan Bahan

Untuk peralatan dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Baja AISI 4140

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Baja AISI 4140, yang nantinya akan dibubut menggunakan mesin CNC dan dibuat sesuai dengan standar pengujian tarik baja (ASTM E8, 2004) sedangkan untuk spesimen uji fatik menggunakan standar pengujian fatik (ASTM E606, 2004).



Gambar 14. Baja AISI 4140

2. Mesin MTS Landmark 100 kN

Untuk pengujian tarik statis dan uji fatik menggunakan mesin MTS Landmark 100 kN, proses pengujian ini dilakukan di Laboratorium Material Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.



Gambar 15. Mesin MTS Landmark 100 kN.

3. Mesin Bubut CNC (*Vertical Machining Center*)

Vertical Machining Center digunakan untuk pembuatan spesimen uji tarik dan uji fatik. Mesin *VMC* dengan putaran *spindle* utama pada posisi vertikal, mesin *VMC* ini bisa mengerjakan banyak proses kerja yang meliputi *milling*, *drilling*, *boring*, *tapping*, *reaming*, *counter boring/shinking*, kontur permukaan, dan lain-lain. Pada Mesin *VMC* ini putaran *spindle*, gerakan pada 3 Axis (Sumbu X, Sumbu Y, Sumbu Z), dengan bantuan *CNC controller* maka putaran *spindle*, gerakan pada masing-masing sumbu dan *tool* yang tersimpan pada *automatic tool changer* akan bekerja secara simultan mengikuti program yang sudah dipersiapkan.



Gambar 16. *Vertical Machining Center (CNC Milling Machine)*

Tabel 2. Spesifikasi mesin *CNC Milling Machine*

No.	Item	Ukuran
1	Max. Tool Length	300 mm

2	Max. Tool Weight	7 Kg
3	Max. Tool Diameter Adjacent Empty	ø 150 mm
4	Max. Distance from Spindle Nose to Worktable	800 mm
5	Speed	10.000 r/min

4. Mikroskop Digital (*Mikroskop Digital Portable*)

Alat ini digunakan untuk mengamati pertumbuhan dan perambatan retak selama pengujian fatik dilakukan.



Gambar 17. *Mikroskop Digital Portable.*

5. SEM (*Scanning Electron Microscop*)

Scanning Electron Microscop (SEM) digunakan untuk mengobservasi patahan pada permukaan spesimen uji sebelum dan setelah dilakukan pengujian tarik dan pengujian fatik serta spesimen raw material.



Gambar 18. Mesin SEM (*Scanning Electron Microscop*)

6. Mikrometer Digital (*Out Side Micrometer Digital*)

Untuk mengukur diameter spesimen uji menggunakan *Out Side Micrometer* yang memiliki tingkat ketelitian sampai 0,001 mm. Alat ukur ini berada di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung.



Gambar 19. Mikrometer Digital (*Out Side Micrometer Digital*)

6. Jangka Sorong (*Vernier Caliper*)

Jangka sorong digunakan untuk mengukur panjang spesimen uji, baik spesimen uji tarik, fatik dan pengamatan SEM. Alat ini memiliki tingkat ketelitian 0,05 mm.



Gambar 20. Jangka Sorong (*Vernier Caliper*)

7. Pemanas Induksi (*Induction Heater*)

Pemanas Induksi (*Induction Heater*) yaitu alat yang digunakan untuk memanaskan baja AISI 4140 hingga mencapai temperatur austenitnya, alat ini tersedia di Laboratorium Material Teknik.



Gambar 21. Pemanas Induksi (*Induction Heater*)

8. Dapur Pemanas (*Salt Balt*)

Dapur pemanas (*salt balt*) digunakan untuk menahan spesimen pada temperatur dan waktu yang sudah ditentukan, untuk penelitian ini menggunakan temperatur pada 312 °C. Pada dapur pemanas ini berisi larutan kalium nitrat (KNO_3) dengan sodium nitrat (NaNO_3) yang sudah mencair.



Gambar 22. Dapur Pemanas (*Salt Balt*)

9. Timbangan

Alat ini digunakan untuk menimbang berat kalium nitrat (KNO_3) dengan sodium nitrat (NaNO_3) sehingga didapatkan campuran yang pas, yaitu 1 kg KNO_3 dan 1 kg NaNO_3 .

10. Termo digital

Termo digital digunakan untuk mengetahui temperatur pada saat spesimen dipanaskan pada *Induction Heater*, alat ini digunakan untuk memastikan bahwa spesimen telah mencapai pada temperatur yang diharapkan, selain membandingkan dengan warna yang muncul pada spesimen.

11. Peralatan Tangan (*Hand Tool*)

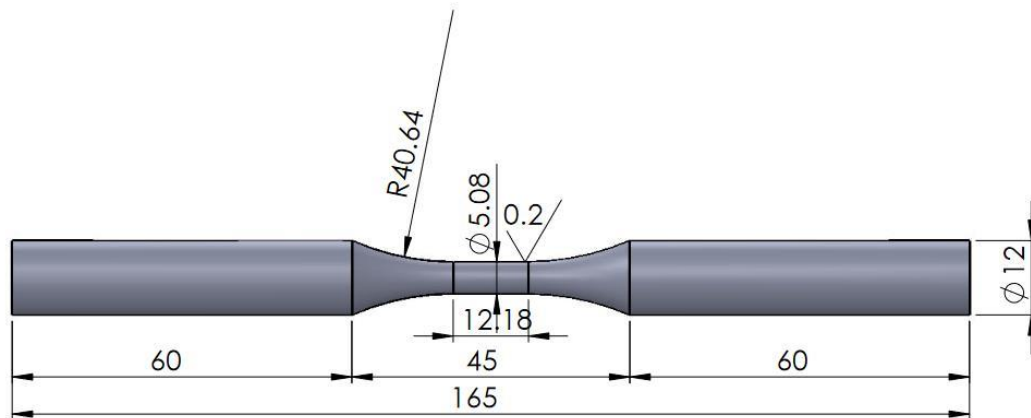
Peralatan tangan yang digunakan antara lain, kunci pas 12, tang, obeng, gergaji besi, dan ragum

3.3 Dimensi Spesimen Uji

Ada 2 dimensi uji yang digunakan, yaitu dimensi spesimen untuk uji tarik sebanyak 6 buah (3 buah raw material dan 5 buah austempering) serta 10 spesimen uji fatik (4 buah raw material dan 6 buah austempering). Dimensi spesimen uji terbagi menjadi dua kategori, yaitu :

a. Spesimen Uji Tarik

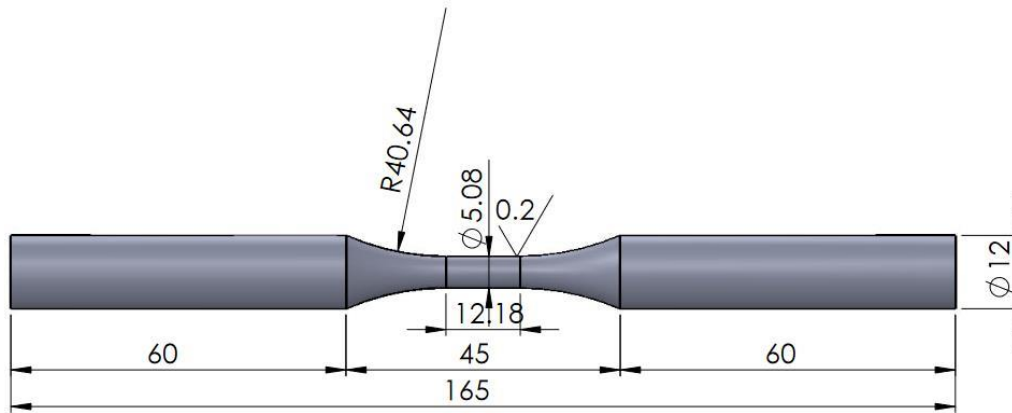
Untuk spesimen uji tarik menggunakan spesimen berdasarkan standar ASTM E8. Ukuran dan bentuk seperti pada gambar 23 dibawah ini.



Gambar 23. Spesimen uji tarik

b. Spesimen Uji Fatik

Spesimen yang digunakan untuk melakukan uji fatik mengacu pada standar ASTM E606.



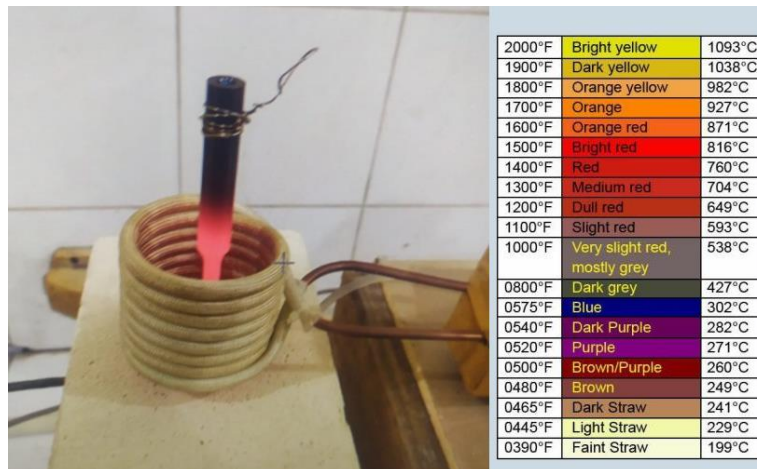
Gambar 24. Spesimen Uji Fatik

3.4 Proses Austenitasi

Untuk proses austenitasi, beberapa tahapan yang dilakukan yaitu :

1. Menyiapkan beberapa spesimen dengan cara memasang kawat pada ujungnya, dengan tujuan memudahkan saat pemindahan spesimen dari *induction heater* ke *salt bath*.
2. Memasang spesimen dan memastikan posisi yang tepat, yaitu berada ditengah dan tidak miring serta tidak menyentuh kumparan koil yang terdapat pada *induction heater*.
3. Menghidupkan *induction heater*.
4. Memastikan air pada selang mengalir dengan baik dan tidak ada kebocoran.
5. Menghidupkan MCB *Power Supply*.
6. Memastikan jarum pada *Voltmeter* stabil.

7. Menghidupkan termokontrol.
8. Memastikan setiap bagian pada modul *induction heater* berjalan dengan baik.
9. Menghidupkan MCB modul.
10. Memanaskan spesimen sampai suhu 850°C (Proses berlangsungnya panas dari suhu ruang mencapai suhu 850°C terjadi sekitar 2 menit).
11. Dengan menggunakan penghitung waktu, spesimen ditahan selama 10 menit.

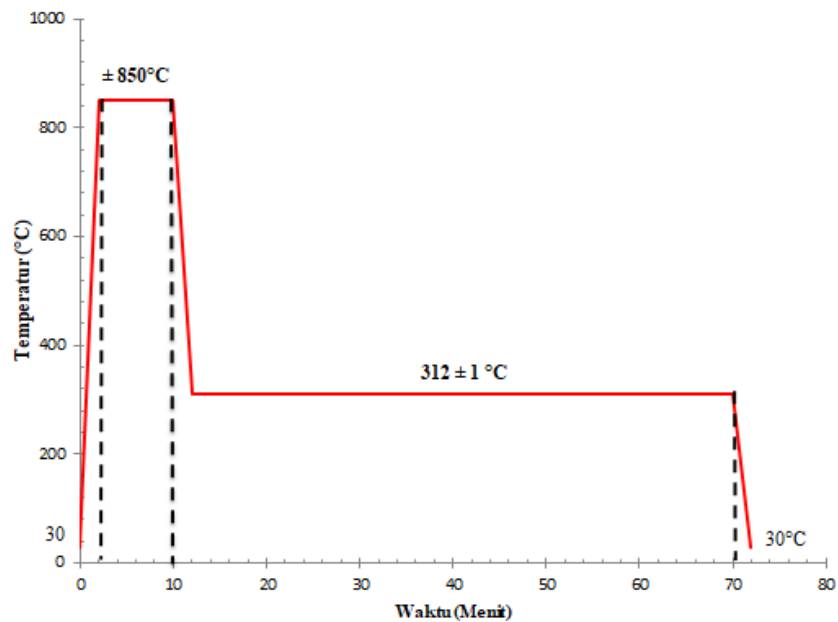


Gambar 25. Proses Austenisasi mencapai suhu 850 °C dan bagan temperatur warna baja

3.5 Proses Austempering

Pada proses *Austempering* dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu sebagai berikut:

1. Proses *austempering* dilakukan dengan mencelupkan spesimen pada larutan garam dengan temperatur T_1 312°C ($T_1 = T_{B_s} (462^{\circ}\text{C}) - 150^{\circ}\text{C}$) dengan waktu penahanan selama 60 menit. Dimana $T_{B_s} = 462^{\circ}\text{C}$.
2. Dengan menggunakan *timer*, setelah baja AISI 4140 melewati waktu penahanan kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan hingga mencapai temperatur ruang menggunakan udara bebas.
3. Setelah mencapai temperatur ruang, maka specimen baja AISI 4140 kemudian dibersihkan menggunakan air bersih dan memastikan sisa – sisa larutan garam yang berwarna putih telah tiada.



Gambar 26. Proses Austempering terhadap specimen uji

3.6 Metode Pengujian

Spesimen uji dibuat dari baja paduan rendah AISI 4140 dibeli di PT Tira Austenit-Jakarta. Bentuk dan dimensi ukuran spesimen uji tarik dan uji HCF disiapkan sesuai standar ASTM E8 dan standar ASTM E606. Proses pemesinan pembuatan spesimen menggunakan CNC EMCOTronic TM02 buatan Austria, yang akan dikerjakan di P2TK/VEDC Malang-Jawa Timur. Diameter grip spesimen semuanya adalah 12 mm. Untuk pengujian tarik dan HCF menggunakan mesin MTS Landmark 100 kN (statik dan dinamik). Semua peralatan tersedia di Lab. Material Teknik, Teknik Mesin Universitas Lampung.

a. Pengujian tarik

Pengujian tarik pada temperatur ruang dengan kontrol pergerakan aktuator secara aksial menggunakan laju regangan konstan 0,5%/min untuk menentukan modulus elastisitas dan tegangan luluh (0.2% offset). Setelah spesimen mencapai regangan 0.5%, kontrol aktuator secara otomatis dipindah ke kontrol *displacement* dengan laju 0.15 mm/min. Pengujian dilakukan sampai spesimen patah. Uji tarik ini dilakukan sebanyak tiga kali. Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan dalam pengujian tarik :

1. Menyiapkan spesimen uji sesuai dengan standar ASTM E8.
2. Membuka program Controller 793B setelah itu klik *manual command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
3. Pasang spesimen pada *cross head grip* atas kemudian spesimen dicekam.

4. Lalu *cross head* diturunkan sampai ujung bawah spesimen masuk ke dalam grip bawah dengan kedalaman 3 cm.
5. Klik *manual command* dan klik *control mood* ke *force*.
6. Kemudian klik *auto offset* untuk *force*. Setelah itu grip bagian bawah dicekam sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
7. Pasang *extensometer* ke spesimen dengan posisi zero pin, dan klik *manual offset* untuk *extensometer*. Lalu lepaskan *zero* pin dari *extensometer*.
8. Membuka Software MTS Test Suite (MPE), pilih template untuk uji tarik statis.
9. Memasukkan data panjang plat, lebar pelat dan tebal plat.
10. Memasukan *initial speed* dan *secondary speed* (mm/s).
11. Setelah menginput semua data lalu klik RUN.

b. Pengujian Fatik

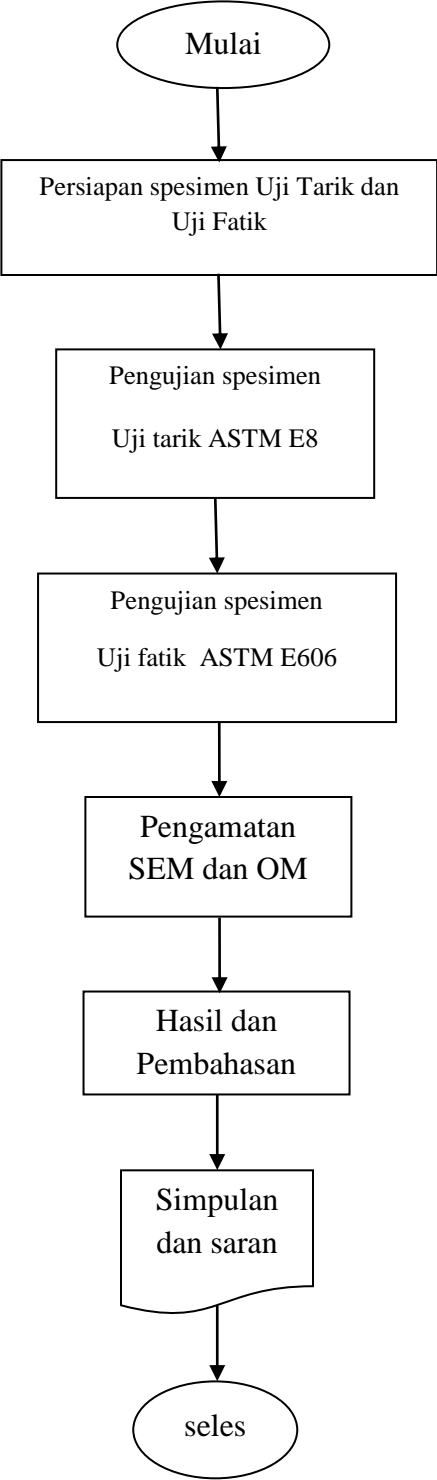
Pengujian HCF (*high cycle fatigue*) dilakukan enam kali pengulangan pada setiap satu parameter uji. Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan dalam pengujian fatik :

1. Menyiapkan spesimen sesuai dengan standar ASTM E606.
2. Membuka program Controller 793B setelah itu klik *manual command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
3. Pasang spesimen pada *cross head grip* atas kemudian spesimen dicekam.

4. Lalu *cross head* diturunkan sampai ujung bawah spesimen masuk ke dalam grip bawah dengan kedalaman 3 cm.
 5. Klik *manual command* dan klik *control mood* ke *force*.
 6. Kemudian klik *auto offset* untuk *force*. Setelah itu grip bagian bawah dicekam sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
 7. Membuka Software MTS Test Suite (MPE), pilih template untuk *high cycle fatigue testing*.
 8. Memasukkan data *Pmaks* dan *Pmin*, siklus total, *incremental cycles*, beban Uji fatik menggunakan kontrol beban 60% dan 65% dari nilai *stress yield* yang diperoleh dari hasil uji tarik. pada setiap jumlah siklus tertentu dengan tujuan agar retak dapat diamati/diukur dengan menggunakan mikroskop digital portable.
 9. Memasukkan *initial speed* dan *secondary speed (mm/s)*.
- c. Observasi mikrostruktur and fraktografi

Mikrostruktur dan fraktografi dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro karena pembentukan presipitasi elemen carbide dan rom menggunakan optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). Begitu juga karakterisasi menggunakan EDS dan XRD dilakukan untuk mempelajari perubahan fasa-fasa. Semua data kuantitatif dan kualitatif dari hasil OM, SEM, EDS dan XRD digunakan untuk mempelajari perilaku HCF melalui perubahan mikrostruktur dan perubahan fasa dalam bahan AISI 4140 selama pengujian HCF.

3.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 27. Diagram alir penelitian

BAB V

PENUTUP

A. SIMPULAN

Berikut adalah beberapa kesimpulan yang bisa diberikan dari penelitian ini, yaitu :

1. Dengan diberikannya perlakuan *single austemper* mampu menaikkan tegangan luluh 22,5% dan *finite life* 2,85 kali lipat dari spesimen yang tidak diberikan perlakuan (*raw material*).
2. Persamaan empiris untuk memprediksi kekuatan fatik baja AISI 4140 dilakukan dengan pendekatan persamaan Basquin, dimana nilai untuk *raw material* $8.668,81 (2Nf)^{-0,364087}$ sedangkan *single austemper* sebesar $10.071,83 (2Nf)^{-0,298873}$.
3. Pada pengamatan struktur mikro menunjukkan terdiri dari fasa bainit ferit yang sebelumnya berupa fasa ferit pearlite. Dimana bentuk dari fasa bainit ini lebih halus dan mampu menaikkan sifat mekanik baja termasuk kemampuan menahan beban fatik.
4. Awal retak dimulai dari sisi pinggir spesimen terjadi konsentrasi tegangan yang tinggi karena pembebanan siklik, *secondary crack* menandakan bahwa

baja lebih getas dan *cleavage fracture* yang berarti bahwa bentuk rekahan yang getas.

B. SARAN

Adapun saran yang bisa diberikan adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut berupa multi *austemper*, karena salah satu spesimen uji yang dilakukan dengan menerapkan multi *austemper* justru mengalami penurunan nilai tegangan luluh.
2. Perlu dilakukan penelitian dengan pembebanan *stress level* yang lebih rendah sehingga menambah referensi.

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
- ASTM E8, 2004. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, West Conshohocken, United States.
- ASTM E606, 2004. *Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing*, West Conshohocken, United States.
- Avanish Kumar, B. Blessto, Aparna Singh. 2022. *Effect of austempering temperature on high cycle fatigue behaviour in nanostructured bainitic steels*, *Materials Science and Engineering A* 846 (2022) 143296.
- 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.
- 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 A K, 2019. *Improvement Of Low-Cycle Fatigue Resistance In AISI 4140 Steel By Annealing Treatment. International Journal Of Fatigue*. 125, 406-407.
- Bhadeshia. <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/map/steel/programs/mucg46-b.html>. (Diakses Pada Tanggal 22 April 2021)
- Callister Jr, William D. Jr. (2007). *Material Science And Engineering An Introduction-7th Edition*. New Jersey: John Wiley And Sons.
- Claesson, Erik. 2014. *Development Of A Heat Treatment Method To Form A Duplex Microstructure Of Lower Bainite And Martensite In AISI 4140 Steel*. Royal Institute Of Technology. Swedia.

- Damanik, Ewaldo Zulfikar. 2010. Pengaruh Proses *Austempering* Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanis *Thin Wall Ductile Iron* (TWDI) Hasil Pengecoran Vertikal Dengan Isolator Dan Tanpa Isolator. Universitas Indonesia. Depok
- Fendri Risno, Darmawi, Syahrul, Jasman. 2018. Analisis Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Aisi 4140 Akibat Perbedaan Temperatur Pada Perlakuan Panas *Tempering*. Universitas. Negeri Padang. Padang.
- 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.
- Haryadi, Gunawan Dwi. 2006. Pengaruh Suhu Tempering Terhadap Kekerasan, Kekuatan Tarik Dan Struktur Mikro Pada Baja K-460. Universitas Diponegoro. Semarang.
- Khurmi. R.S. And Gupta.J.K. 2005. *A Text Book Machine Design. S.I Unit*. New Delhi: *Eurashia Publishing House* (PVT.) LTD.
- Lubay, Asnadi. 2014. Variasi Waktu Tahan Pada Proses *Austempering* Berpengaruh Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon Tinggi. Universitas IBA. Palembang.
- Mizhar, S., & Suherman, S. (2011). Pengaruh Perbedaan Kondisi Tempering Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Dari Baja AISI 4140. *Jurnal Dinamis, Volume II*, No. 8 Hal. 23 ISSN 0216-7492.
- 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.
- Nagarajan V R, Putatunda S K, Boileau J. 2017. *Fatigue Crack Growth Behaviour of Austempered AISI 4140 Steel with Dissolved Hydrogen*, *Metals*, 7 (11), 2-18.
- Nandiawan.D.H, Sunardi, Fawaid.M. 2015. Pengaruh Variasi Suhu Pada Proses *Self Tempering* Dan Variasi Waktu Tahan Pada Proses *Tempering* Terhadap Sifat Mekanis Baja AISI 4140. Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Cilegon.
- 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.

- Pratowo, Bambang. 2018. Analisa Keuletan Baja Karbon Rendah Setelah Dilakukan Perlakuan Panas *Austempering*. Universitas Bandar Lampung. Lampung.
- Puorasiabi H, Amirzadeh.Z, Babazadeh.M, 2012. *Development A-Layer Perceptron Artificial Neural Network Model To Estimate The Vickers Hardness Of Mn-Ni- Cu-Mo Austempered Ductile Iron. Materials And Design*, 35, 782-789
- 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.
- Razak.A.H, & Tangkemanda.A. 2017. *Quenching Bertingkat Pada Proses Hardening Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Aisi 4140*. Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar.
- Salindeho.R.D, Soukota.J, Poeng.R. 2013. *Pemodelan Pengujian Tarik Untuk Menganalisis Sifat Mekanik Material*. Universitas Sam Ratulangi. Manado.
- Salman S, F Findik, P. Topuz 2006. *Effect of Various Austempering Temperatures on Fatigue Properties in Ductile Iron*, Materials and Design 28 (2007) 2210-2214.
- Shultoni Mahardika, 2020. *Analisa rekayasa sifat mekanik baja AISI 4140 dengan variasi suhu tempering untuk meningkatkan keuletan dan kekerasan material*. Jurnal Mekanova Vol 6 No.1
- Sumiyanto & Abdunnaser. 2015. *Pengaruh Media Pendingin Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Plat Baja Karbon Astm A-36*. Bina Teknika, Volume II Nomer 2, 155-170.
- Ulutan.M, Celik.O.N, Gasan.H, Er.U. 2010. *Effect Of Different Surface Treatment Methods On The Friction And Wear Behavior Of AISI 4140 Steel*. J.Mater, Sci, Technol, 26(3), 251-257.