

DISERTASI

**REKAYASA MIKROSTRUKTUR BAJA 42CrMo4
MELALUI AUSTEMPER DUA TAHAP UNTUK
MENINGKATKAN SIFAT MEKANIK DAN FATIK**

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Doktor
Ilmu Teknik, Bidang Ilmu Teknik Mesin



HELMY
NIM. 03043681722002

**PROGRAM STUDI ILMU TEKNIK
PROGRAM DOKTOR
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2024**

HALAMAN PENGESAHAN

REKAYASA MIKROSTRUKTUR BAJA 42CrMo4 MELALUI AUSTEMPER DUA TAHAP UNTUK MENINGKATKAN SIFAT MEKANIK DAN FATIK

LAPORAN DISERTASI

Dibuat Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Doktor
Ilmu Teknik, Bidang Ilmu Teknik Mesin

Disusun oleh:

HELMY
NIM. 03043681722002

Telah disetujui
Pada tanggal Juli 2024

Promotor:



Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.
NIP. 195903211987031001

Ko-Promotor:



Prof. Mohammad Badaruddin, ST, MT, Ph.D.
NIP. 19721211 199803 1002


Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ir. Bhakti Yudho Swarapto, S.T., M.T., IPM
NIP. 197502112003121002

Koordinator Program Studi



Dr. Ir. Nukman, M.T.
NIP. 195903211987031001


HALAMAN PERSETUJUAN

Dengan ini menyatakan bahwa disertasi Helmy yang berjudul "Rekayasa Mikrostruktur Baja 42CrMo4 Melalui Austemper Dua Tahap Untuk Meningkatkan Sifat Mekanik dan Fatik." telah dipertahankan di hadapan sidang ujian tertutup Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya pada tanggal 15 Juli 2024.




Palembang, Juli 2024

Ditandatangani oleh Tim Penguji,

Ketua Tim Penguji:

Agung Mataram, S.T, M.T, Ph.D. ()
NIP. 197901052003121002

Anggota Tim Penguji:


1. Ir. Fatahul Arifin, S.T, Dipl. Eng, EPD, M. Eng Sc, Ph.D. ()
NIP. 197201011998021004
2. Dr. Fajri Vidian, S.T, M.T
NIP. 197207162006041002 ()
3. Dr. Ir. Hendri Chandra, M.T
NIP. 196004071990031003 ()

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik


Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T, M.T, IPM.)
NIP. 197502112003121002

Koordinator Program Studi


Prof. Dr. Ir. Nukman, MT.
NIP. 195903211987031001

Pernyataan Orisinalitas/Pernyataan Plagiarisme

Nama : Helmy
NIM : 03043681722002
Program Studi : Ilmu Teknik
Bidang Kajian Utama : Teknik Mesin
Judul Disertasi : Rekayasa Mikrostruktur Baja 42CrMo4 Melalui Austemper Dua Tahap Untuk Meningkatkan Sifat Mekanik dan Fatik.

Dengan ini saya menyatakan keaslian disertasi ini. Disertasi ini dibimbing oleh seorang Promotor dan satu Ko-Promotor dan tidak melibatkan plagiarisme. Jika ditemukan adanya plagiarisme dalam disertasi ini, saya bersedia menerima sanksi akademik apapun sesuai dengan regulasi yang telah ditetapkan Universitas Sriwijaya atas konsekuensinya.

Palembang, Juli 2024



Helmy

NIM. 03043681722002

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan penulisan Laporan Disertasi ini yang berjudul “*Rekayasa Mikrostruktur Baja 42CrMo4 Melalui Austemper Dua Tahap Untuk Meningkatkan Sifat Mekanik dan Fatik*”. Laporan Disertasi dan Publikasi sebagai salah satu syarat dalam penyelesaian kuliah Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

- 1) Rektor Universitas Sriwijaya yang telah memberikan dukungan selama masa studi.
- 2) Dekan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya yang telah memberikan dukungan dan restu selama menempuh studi doktoral ini.
- 3) Koordinator Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya yaitu Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T. yang juga selaku Promotor beserta Ko-Promotor Disertai Prof. Mohammad Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D. yang telah memberikan dukungan penuh, semangat, restu dan nasehat selama menempuh studi ini. Tak lupa juga kepada bagian Administrasi yaitu kepada Ibu Yuni Erika, Aang dan Gilang yang telah banyak membantu dalam proses administrasi selama masa studi ini.
- 4) Penguji Disertasi yaitu Agung Mataram, S.T, M.T, Ph.D., Ir. Fatahul Arifin, S.T, Dipl. Eng. EPD, M. Eng Sc, Ph.D., Dr. Fajri Vidian, S.T, M.T. dan Dr. Ir. Hendri Chandra, M.T. yang telah memberikan arahan, masukan, ide, analisis dan gagasan dalam mengembangkan hasil penelitian disertasi ini.
- 5) Teknisi Lab. pak Luwonto dan Assisten Lab. Material Teknik Jurusan Teknik Mesin UNILA Muhammad Nabil Damara QurdiI yang banyak membantu dalam penelitian ini.
- 6) Teman-teman dosen Jurusan Teknik Mein Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya yang telah banyak membantu dan memberikan dukungan selama menempuh studi doktoral ini.

- 7) Teman-teman angkatan 2017 yaitu Pak Zarkasi, Pak Zulkifli, Ibu Yesi, Ibu Astuti, Pak Irsan, Pak Zaidan, Ibu Devie dan Ibu Selpi yang telah
- 8) Semua pihak yang telah membantu selama masa studi ini sampai dengan selesai studi doktoral.

Demikian kata pengantar dari saya semoga penulisan disertasi ini dapat bermanfaat dan berguna bagi semua kalangan. Akhir kata saya mengucapkan terima kasih.

Palembang, Juli 2024

Penulis

ABSTRAK

Baja 42CrMo4 mengandung karbon ~0,4 wt.% dan tergolong baja komersil paduan rendah yang banyak diaplikasikan pada komponen mesin yang mengalami regangan besar seperti gandar, batang penghubung, roda gigi, spindel, poros. Perlakuan panas yang diberikan pada baja 42CrMo4 yaitu *austemper* dua tahap yang mana dapat digunakan untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, dan fatiknya. Pengujian tarik, dampak dan fatik siklus rendah (*LCF*) yang dilakukan pada spesimen baja 42CrMo4 yang diberi perlakuan *austemper* dua tahap dengan waktu tahan 60 menit. Pengujian *LCF* dengan laju regangan konstan 0.005/s dan variasi amplitudo regangan yang digunakan pada pengujian fatik siklus rendah yaitu 0.35 mm/mm, 0,50 mm/mm, 0,65 mm/mm, 0,80 mm/mm, 0,95 mm/mm dan 1,10 mm/mm. Hasil pengujian tarik menunjukkan adanya peningkatan kekuatan tarik akibat poses *austemper* dua tahap jika dibandingkan dengan baja 42CrMo4 tanpa perlakuan *austemper* dimana σ_y meningkat yaitu 49.70%, σ_u meningkat menjadi 26% begitu pula dengan nilai energi plastis yaitu sebesar 71%. Struktur mikro yang dihasilkan adalah bainit yang akan mempengaruhi peningkatan kekuatan tarik, energi dampak dan umur fatik siklus rendah. Struktur mikro mempengaruhi morfologi patahan baja 42CrMo4 tanpa *austemper* dan di *austemper*. Laju perambatan retak diperlambat oleh struktur perlit yang kasar, sisa austenit, bainit-ferit dan martensit-austenit hasil dari perlakuan *austemper*. Pendekatan *Coffin-Manson* cukup efektif dalam menganalisis prediksi fatik siklus rendah dimana baja 42CrMo4 kondisi *austemper* dua tahap dapat memberikan pilihan yang baik untuk komponen-komponen teknik bila di desain untuk keamanan terhadap *LCF* dan kekuatan tarik.

Kata kunci: baja 42CrMo4, *austemper* dua tahap, struktur mikro dan fatik siklus rendah.

DAFTAR ISI

BAB	JUDUL	HALAMAN
	HALAMAN PENGESAHAN	ii
	HALAMA PERSETUJUAN	iii
	PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
	KATA PENGANTAR	v
	ABSTRAK	vii
	ABSTACT	viii
	DAFTAR ISI	ix
	DAFTAR TABEL	xi
	DAFTAR GAMBAR	xii
	DAFTAR SINGKATAN	xiv
	DAFTAR SIMBOL	xv
	DAFTAR LAMPIRAN	xvi
1.	PENDAHULUAN	1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	3
1.3	Tujuan Penelitian dan Sasaran	4
1.4	Kebaruan dan Terobosan Teknologi	5
1.5	Batasan Kajian	6
2.	TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1	Studi literatur	9
2.2	Baja	12
2.2.1	Baja Paduan	12
2.2.3	Baja Karbon	13
2.2.4	Baja <i>42CrMo4</i>	14
2.3	Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>)	14
2.3.1	<i>Annealing</i>	15
2.3.2	Normalisasi	15
2.3.3	<i>Quenching</i>	17
2.3.4	<i>Tempering</i>	18
2.3.5	<i>Austempering</i>	18
2.4	Diagram Kesetimbangan <i>Fe-Fe₃C</i>	20
5.2	Pengujian Impak	27
2.6	Teori Fatik Siklus Rendah (<i>Low-Cycle Fatigue</i>)	29
3.	METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1.2	Peralatan Pengujian	36
3.2	Proses Jalannya Penelitian	35
3.2.1	Komposisi Kimia Baja <i>42CrMo4</i>	35
3.2.2	Proses Perlakuan Panas <i>Austemper</i>	36

3.2.3	Observasi Struktur Mikro	44
3.2.4	Pengujian Tarik Statis	45
3.2.5	Pengujian Impak	46
3.2.6	Pengujian <i>LCF</i>	48
3.3.7	Fraktografi	49
4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	51
4.1	Analisa Komposisi kimia	51
4.2	Observasi Struktur Mikro	51
4.3	Hasil Pengujian Tarik dan Analisis	52
4.4	Hasil Pengujian Impak dan Analisis	54
4.5	Hasil Pengujian <i>LCF</i> dan Analisis	58
4.5.1	Respon Tegangan Siklik Terhadap Jumlah Siklus	58
4.5.2	Perilaku Siklus Pelunakan dan Siklus Pengerasan	62
4.5.3	Perilaku <i>Masing</i> dan <i>non-Masing</i>	64
4.5.4	Analisis Umur Fatik Berdasarkan Regangan Siklik	67
4.6	Hasil Fraktografi dan Analisis	74
5.	KESIMPULAN DAN SARAN	77
5.1	Kesimpulan	77
5.2	Rekomendasi Kajian Lanjutan	78
	DAFTAR PUSTAKA	79
	LAMPIRAN	85

DAFTAR TABEL

NO.TABEL	JUDUL	HALAMAN
1.1	Penelitian-penelitian dalam usaha meningkatkan sifat mekanik baja	5
2.1	Sifat-sifat fisik baja karbon	14
3.1	Komposisi kimia baja <i>42CrMo4</i>	40
4.1	Rangkuman komposisi kimia baja <i>42CrMo4</i> yang digunakan (wt.%).	51
4.2	Ringkasan data yang diperoleh dari uji tarik baja <i>42CrMo4</i>	54
4.3	Hasil pengolahan data uji impak baja <i>42CrMo4</i> tanpa <i>austemper</i>	51
4.4	Hasil pengolahan data uji impak baja <i>42CrMo4 austemper 340⁰C</i>	52
4.5	Hasil pengolahan data uji impak baja <i>42CrMo4 austemper 400⁰C</i>	52
4.6	Hasil pengolahan data uji impak baja <i>42CrMo4 austemper dua tahap</i>	53
4.7	Data Hasil Pengujian Fatik Siklus Rendah Baja <i>42CrMo4</i>	59
4.8	Siklus rasio pelunakan dan rasio pengerasan	63
4.9	Parameter LCF baja <i>42CrMo4</i>	70

DAFTAR GAMBAR

NO. GAMBAR	JUDUL	HALAMAN
2.1	Diagram temperatur perlakuan panas untuk baja karbon	16
2.2	Diagram Time Temperatur Transformation (TTT)	18
2.3	Diagram transformasi isothermal siklus <i>austemper</i>	20
2.4	Diagram fasa Fe-Fe ₃ C	21
2.5	Kurva tegangan-regangan berbagi material	24
2.6	Metode offset untuk menentukan batas luluh	25
2.7	Kurva tegangan-regangan untuk material ketangguhan berbeda	27
2.8.	Prinsip dasar pengujian impak	28
3.3	Geometri dan ukuran specimen	34
3.4	Spesimen baja <i>42CrMo4</i> yang akan diuji	35
3.5	Pemanas induksi (<i>Induction Heater</i>) untuk preses autenisasi	36
3.6	<i>Thermogun "SMART SENSOR"</i>	36
3.7	Dapur <i>salt bath</i> untuk proses <i>austemper</i>	37
3.8	Mesin <i>MTS Landmark 100 kN USA</i>	37
3.9	<i>Charpy Impact Testing Machine type CI-30 5</i>	38
3.10	Mikroskop Optik	39
3.11	<i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	39
3.12	Algoritma Software BhaDesia (University of Cambridge)	41
3.13	Skematis Proses <i>austemper</i> satu tahap dengan variasi temperatur	42
3.14	Proses <i>austemper</i> satu tahap temperature 340 ⁰ C	42
3.15	Proses <i>austemper</i> satu tahap temperature 400 ⁰ C	43
3.16	Skematis proses <i>austemper</i> dua tahap	43
3.17	Proses <i>austemper</i> dua tahap	44
3.18	<i>Measuring Microscope STM G-LM</i>	45
3.19	Pengujian tarik statis dikontrol oleh aksial ekstensometer	46
3.20	Alat Uji impak impak <i>Charpy</i>	47
3.21	Pengujian fatik siklus rendah dikontrol oleh <i>ekstensometer</i>	48
3.22	<i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	49
4.1	Struktur mikro baja <i>42CrMo4</i>	52

4.2 Kurva tegangan vs regangan pada baja <i>42CrMo4</i>	53
4.3 Kurva Energi Impak dari baja <i>42CrMo4</i>	58
4.5 Perilaku pelunakan/pengerasan baja <i>42CrMo4</i> selama uji LCF	63
4.6 Kurva perilaku <i>non-Masing</i> dan <i>Near-Masing</i> pada baja <i>42CrMo4</i>	65
4.7 Pengaruh amplitudo tegangan terhadap amplitude regangan plastis	64
4.8 Kurva regangan amplitude terhadap jumlah kebalikan siklus patah	72
4.9 Morfologi permukaan patahan baja <i>42CrMo4</i> dari <i>SEM</i>	75

DAFTAR SINGKATAN

<i>ADT</i>	<i>Austemper Dua Tahap</i>
<i>BF</i>	<i>Bainite-Ferrite</i>
<i>COD</i>	<i>Crack on Opening Displacement-</i>
<i>EDS</i>	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
<i>EPFM</i>	<i>Elastic Plastic Fracture Mechanics</i>
<i>FCG</i>	<i>Fatigue Crack Growth</i>
<i>GB</i>	<i>Grain Boundary</i>
<i>HSLA</i>	<i>High Strength Low Alloy</i>
<i>LCF</i>	<i>Low Cycle Fatigue</i>
<i>LEFM</i>	<i>Linier Elastic Fracture Mechanics</i>
<i>MA</i>	<i>Martensite-Austenite</i>
<i>MPE</i>	<i>Multipurpose elite</i>
<i>OES</i>	<i>Optical Emission Spectroscopy</i>
<i>PB</i>	<i>Phase Boundary</i>
<i>RA</i>	<i>Remained Austenite</i>
<i>SEI</i>	<i>Secondary Electron Microscopy.</i>
<i>TA</i>	<i>Tanpa Austemper</i>
T_{au}	Temperature Austenisasi
<i>TBs</i>	Temperatur Bainit Mulai
<i>TMs</i>	Temperatus Martensit Mulai
<i>T340</i>	Temperature <i>Austemper</i> 340 ⁰ C
<i>T400</i>	Temperatur <i>Austemper</i> 400 ⁰ C

DAFTAR SIMBOL

- K' = Koefisien kekuatan siklik (MPa)
 σ'_f = Koefisien kekuatan fatik (MPa)
 n = Eksponen pengerasan siklik
 n' = Eksponen pengerasan regangan siklik
 ε'_f Koefisien duktiliti fatik (mm/mm)
 b Eksponen kekuatan fatik
 c Eksponen duktiliti fatik

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN	HALAMAN
A. Pendukung Penelitian Disertasi	85
B. Sertifikat dan Artikel Seminar Internasional	93
C. LoA dan Artikel Jurnal Bereputasi	107
D. SK Ujian Disertasi dan Sertifikat Revisi Sidang Disertasi	119

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Baja $42CrMo4$ dalam standar *AISI* merupakan baja *AISI 4140*. Produksi manufaktur baja $42CrMo4$ secara konvensional menggunakan metode *quenching* dan *tempering* (*Q&T*) yang umumnya menghasilkan fasa martensit temper (*Sani* dkk. 2019, *Meysami* dkk. 2019, *Chang* 2020). Meskipun, proses kombinasi quench dan temper mengakibatkan menurunkan kekutan ultimat akibat proses temper tersebut (*Zuo* dkk. 2019, *De Cooman* 2021, *Li* dkk, 2019).

Quench dan temper mengakibatkan distorsi akibat pendinginan (*Silva* dkk. 2019).

Terbatasnya ketersediaan bahan baku, tingginya biaya produksi dan operasi dalam memenuhi kebutuhan baja $42CrMo4$, menjadi alasan utama para peneliti mengembangkan beberapa metode teknis untuk meningkatkan umur kelelahan bahan seperti nitridasi (*Kovaci* dkk. 2020, *Sengul* dan *Celik* 2021), *carburising* (*Boniardi* dkk. 2019) dan *shot peening* (*Menig* dkk. 2020). Ketiga metode tersebut secara signifikan meningkatkan kekerasan permukaan dan menghasilkan tegangan sisa tekan pada permukaan baja. Namun penerapan ketiga metode tersebut dapat memicu pengerasan regangan yang tinggi pada daerah permukaan baja dan berkontribusi terhadap distorsi yang mengarah kepada turunnya daktilitas baja. Selain itu, untuk bentuk-bentuk komponen mesin yang kompleks tidak semua permukaan dapat diberi pelakuan dengan ketiga metode tersebut.

Selama aplikasi komponen teknik baja $42CrMo4$, komponen-komponen mesin adanya beban berulang yang akan menimbulkan *initiation crack*. Seperti dijelaskan diatas, proses *Q&T* baja *AISI* dan aplikasi metode teknik baja $42CrMo4$ dapat menghasilkan kekuatan baja yang tinggi, namun daktilitas akan dikorbankan. Untuk meningkatkan LCF pada material, rasio energy plastis dan elastis harus lebih besar (*Purnadi*, 2019). Sifat LCF baja sangat ditentukan oleh besarnya daerah plastis dari kurva tegangan-regangan baja. *Purnadi* melaporkan dalam tugas akhirnya bahwa proses annealing baja *AISI 4140* pada amplitude regangan 0.3%

meningkatkan umur fatik baja sebesar 2.4 kali. Namun, meskipun umur fatik baja meningkat tetapi kekuatan baja menurun hampir 40%.

Ada beberapa cara untuk memperoleh kekuatan tinggi baja *AISI 4140* dengan keuletan yang besar dan rasio kekuatan yang relatif rendah yaitu melalui rekayasa butir dan memasukkan fasa lunak ferit ke dalam struktur mikro martensit tanpa temper untuk menghasilkan fasa bainit (*Feng dkk. 2019*). Untuk memprediksi umur komponen mesin yang aman dan sebagai upaya mencegah kegagalan fatik komponen bahan secara dini. Mikrostruktur secara signifikan mempengaruhi tingkat pertumbuhan retak fatik dan ambang batas kelelahan (*Nagarajan dkk. 2019, Nagarajan dan Putatunda, 2019*). Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa peneliti lebih berminat untuk mengembangkan proses *austempering* baja *AISI 4140* sebagai pengganti proses perlakuan panas tradisional: *austenitizing*, *quenching* dan *tempering*. Baja yang di *austemper* dengan ketangguhan patah yang lebih baik (*Putatunda dkk. 2021, Putatunda dkk. 2009*). Tidak banyak informasi yang tersedia tentang perilaku fatik siklus rendah baja *42CrMo4* yang diproduksi dari hasil proses *austemper*. Oleh karena itu, melalui riset disertasi doctoral, kami ingin melakukan penelitian secara komprehensif terhadap perilaku *LCF* baja *42CrMo4* yang diberi perlakuan *austemper* dua tahap.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Salah satu cara untuk meningkatkan kemampuan baja *High Strength Low Alloy (HSLA)* terhadap kekuatan tarik, ketangguhan dan ketahanan fatik siklus rendah adalah mengubah fasa ferit-pearlit menjadi fasa bainit dengan cara proses *austemper*. Untuk memperbanyak transformasi austenit sisa menjadi bainit dilakukan juga *austemper* dua tahap terhadap baja *42CrMo4*.

Kekuatan tarik, ketangguhan dan *low cycle fatigue (LCF)* dijelaskan secara rinci melalui mekanime penguatan pembentukan struktur mikro multi-fasa yaitu, *bainite-ferrite (BF)*, *martensit-austenit (MA)* dan *remained austenit (RA)* terbentuk dalam baja. Pengaruh perlakuan *austemper* satu tahap dan *austemper* dua tahap dijabarkan secara detil untuk mengetahui perilaku *low cycle fatigue (LCF)* baja *42CrMo4*. Karakteristik perilaku pelunakan dan pengerasan dan fitur-fitur fraktografi dijelaskan secara rinci untuk mendukung mekanisme perilaku fatik

siklus rendah baja. Selain itu, sifat *LCF* ditentukan menggunakan pendekatan model *Coffin-Manson-Basquin* dapat digunakan sebagai parameter untuk memprediksi faktor desain keamanan penggunaan baja *42CrMo4*.

Dapat disimpulkan bahwa kombinasi baik dari kekuatan tarik dan ketahanan fatik siklus rendah dapat diperoleh secara eksperimental melalui memodifikasi struktur mikro bainit dengan menerapkan suhu austemper yang sesuai. Perubahan struktur mikro pada baja dilakukan menggunakan mikroskop optik dan *SEM* untuk menjelaskan peranan struktur mikro multi-fasa terhadap kekuatan tarik dan perilaku *LCF* secara detil. Selain itu juga, pengaruh proses *austemper* terhadap kekuatan tarik dan perilaku *LCF* dijelaskan dalam buku ini juga dibandingkan dengan hasil-hasil penelitian dari beberapa sumber literatur.

1.4 TUJUAN PENELITIAN DAN SASARAN

Tujuan utama penelitian ini adalah meningkatkan sifat mekanik dan fatik siklus rendah baja *42CrMo4* melalui proses perlakuan *austemper* dua tahap, yang nantinya baja ini memiliki kekuatan dan daktilitas tinggi untuk digunakan pada berbagai aplikasi komponen struktur yang penting, yaitu komponen struktur kendaraan, pesawat terbang dan berat komponen cukup besar, sebagai usaha untuk meningkatkan efisiensi dalam penggunaan bahan bakar fosil.

Sasaran riset ini adalah mempelajari perilaku fatik baja *42CrMo4* yang diberi perlakuan austemper tunggal dan austemper dua tahap secara komprehensif meliputi investigasi perilaku sifat mekanik, fatik siklus rendah (*LCF*), perubahan mikrostruktur, fractografi. Riset dilakukan untuk mempelajari deformasi plastis yang terjadi pada baja *42CrMo4* selama pengujian *LCF*.

1.5 KETERBARUAN DAN TEROBOSAN TEKNOLOGI

Baja *42CrMo4* austempering sekarang banyak menarik minat para peneliti khususnya para peneliti di luar negeri, untuk melakukan kajian riset yang lebih mendalam karena baja *42CrMo4* adalah baja paduan rendah dengan kekuatan

tinggi. Pada tabel berikut ini merupakan penelitian-penelitian dalam usaha untuk meningkatkan sifat mekanik baja paduan rendah.

Tabel 1.1 Penelitian-penelitian dalam usaha meningkatkan sifat mekanik baja.

NAMA PENELITI	PERLAKUAN	HASIL
<i>Sanij</i> dkk 2019, <i>Meysami</i> dkk 2019, <i>Chang</i> 2020	Proses <i>Quench</i> dan <i>Temper</i>	Fasa martensit <i>temper</i> (kuat dan getas)
<i>Zou</i> dkk 2019, <i>De Cooman</i> 2020, <i>Li</i> dkk 2021	Proses <i>Quench</i> dan <i>Temper</i>	Keuletan dan ketangguhan baja > tetapi mengorbankan besarnya rasio kekuatan luluh dan kekuatan maksimum baja tsb
<i>Silva</i> dkk. 2019	Proses <i>Quench</i> dan <i>Temper</i>	Sifat mekanik meningkat, akibat pendinginan terjadi distorsi geometri yang tidak diinginkan
<i>Kovaci</i> dkk 2019, <i>Sengul</i> dan <i>Celik</i> 2020	Nitridasi	Ketiga metode ini secara signifikan meningkatkan kekerasan permukaan, namun penerapan ketiga metode tersebut dapat memicu pengerasan regangan yang tinggi pada daerah permukaan baja dan berkontribusi terhadap distorsi yang mengarah kepada turunnya daktilitas baja.
<i>Boniardi</i> dkk. 2020	Karburising	
<i>Menig</i> dkk. 2021	<i>Shot peening</i>	
<i>Purnadi</i> , 2019	Annealing baja <i>AISI 4140</i>	Low cycle fatigue (LCF) meningkat. Kekuatan baja menurun hampir 40%.

<i>Chakrabarty, 2019</i>	<i>Austempering</i>	mikrostruktur baja mempengaruhi umur kelelahan komponen struktur
<i>Nagarajan dkk. 2019, Nagarajan dan Putatunda, 2020</i>	Menganalisa mikrostruktur	Struktur mikro berpengaruh pada pertumbuhan retak.
<i>Putatunda dkk. 2021, Putatunda dkk. 2019</i>	<i>Austempering</i> baja <i>AISI 4140</i>	Menghasilkan kekuatan yg mendekati baja yg dihasilkan dari proses <i>Q&T</i> tetapi dengan ketangguhan patah yg lebih baik
<i>Badaruddinn dkk, 2019</i>	<i>Annealing</i> baja <i>AISI 4140</i>	Menghasilkan ketahanan <i>LCF</i> meningkat signifikan akan tetapi kekuatan tarik turun sampai hampir 30%.

Sampai saat ini penelusuran kami dari berbagai sumber yang valid yaitu penelusuran berdasarkan publikasi ilmiah yang diterbitkan di beberapa jurnal internasional, pengembangan baja ini masih menggunakan perlakuan austempering tunggal dengan kajian fokus pada mikrostruktur, sifat mekanik dan perambatan retak fatik. Melalui riset disertasi doctor, kami akan mengembangkan sifat mekanik dan fatik baja *42CrMo4* dengan perlakuan austempering dua tahap.

1.6 BATASAN KAJIAN

Adapun batasan kajian disertasi yaitu:

1. Spesimen yaitu baja batangan *42CrMo4*.
2. Pengaruh kehilangan ketebalan pada sample akibat oksidasi diabaikan.
3. Suhu austenisasi ditetapkan 840°C dengan waktu tahan 15 menit.
4. Suhu bainit mulai dan martensit mulai didapat dengan menggunakan *Algoritma Software Bhadesia (University of Cambridge)*.

3. Larutan pada proses *austemper* dipakai larutan garam 50% NaNO_3 + 50% KNO_3 .
4. Suhu austemper 340°C dan 400°C, sedangkan untuk suhu *austemper* diambil kedua suhu tersebut.

Daftar Pustaka

1. Badaruddin, M., Sugiyanto., Wardono, H., Andoko., Wang, C.J. and Rivai, A.K. 2019. Improvement of Low-Cycle Fatigue Resistance in AISI 4140 Steel by Annealing Treatment. *International Journal of Fatigue*, 2019
2. Yue Zhang , Xianggang Sang, GuangTao Xu, Gang Wang, MingHao Zhao, Fatigue crack propagation of the gradient surface-modified layer of high-strength steel, *International Journal of Fatigue*, 2023, <http://www.elsevier.com/locate/ijfatigue>
3. Giovanni Meneghettia, Alberto Campagnoloa, Daniele Bertoa, Elena Pullina, Stefano Masaggiab, Fatigue properties of austempered ductile iron-to-steel dissimilar arc-welded joints, 2019, <http://www.sciencedirect.com>.
4. H. Meysami, R. Ghasemzadeh, S. H. Seyedein, M. R. Aboutalebi, An investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-quenched and tempered AISI 4140 steel, *Materials & Design*, 31(3), 2019, pp. 1570-1575.
5. M.H. Khani Sanij, S.S. Ghasemi Banadkouki, A.R. Mashreghi, M. Moshrefifar, The effect of single and double quenching and tempering heat treatments on the microstructure and mechanical properties of AISI 4140 steel, *Materials & Design*, 42, 2020, pp. 339-346.
6. Badaruddin, M, Sugiyanto, S. Sumardi, D. Asmi, Improvement of the fatigue crack growth resistance in AISI 4140 steel under single- and multi-austempering heat treatments, 2024, <https://www.sciencedirect.com/journal/results-in-engineering>
7. W.S Chang, Microstructure and mechanical properties of 780 MPa high strength steels produced by direct-quenching and tempering process, *Journal of Materials Science*, 37(10), 2021, pp.1973-1979.
8. Wilson Sckudlarek, Manar N. Krmasha, Kassim S. Al-Rubaie, Orlando Preti, Julio C.G. Milan, Cesar E.Costa, Effect of austempering temperature on microstructure and mechanical properties of ductile cast iron modified by niobium, *Jurnal of Materials Research and Technology*, 2022 <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.041>
9. J. Feng, T. Frankenbach, M. Wettlaufer, Strengthening 42CrMo4 steel by isothermal transformation below martensite start temperature, *Materials Science & Engineering A*, 683, 2019, pp. 110–115.
10. Z.C. Li, H. Ding, R.D.K. Misra, Z.H. Cai, Microstructure-mechanical property relationship and austenite stability in medium-Mn TRIP steels: The effect of

austenite-reverted transformation and quenching-tempering treatments
Materials Science and Engineering A, 682, 2019, pp. 211-219.

11. B.C. De Cooman, Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 8, 2020, 285–303.
12. 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, 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, 2019, pp. 153-163.
13. A. D. da Silva, T. A. Pedrosa, J. L. Gonzalez-Mendez, X. Jiang, P.R. Cetlin, T. Altan, Distortion in quenching an AISI 4140 C-ring – Predictions and experiments, *Materials & Design*, 42, 2019, pp. 55-61.
14. L de C.F. Canale, G.E. Totten, 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, 2020, pp. 4-52.
15. Y.B. Xu, Z.P. Hu, Y. Zou, X.D. Tan, D.T.Han, S.Q. Chen, D.G. Ma, R.D.K. Misra, 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, 2019, pp. 40-55.
16. H. Kovacı, A. F. Yetim, Ö. Baran, A. Çelik, Fatigue crack growth behavior of DLC coated AISI 4140 steel under constant and variable amplitude loading conditions, *Surface and Coatings Technology*, 304, 2020, pp. 316-324.
17. H. Kovacı, A. F. Yetim, Ö. Baran, A. Çelik, Fatigue crack growth analysis of plasma nitrated AISI 4140 low-alloy steel: Part 1-constant amplitude loading, *Materials Science and Engineering A*, 672, 2019, pp. 257-264.
18. I. Chakrabarty, Heat Treatment of Cast Irons, *Comprehensive Materials Finishing*, 2, 2019, pp. 246-287 (DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09192-X).
19. M. Gerstenmeyer, F. Zanger, V. Schulze, Influence of Complementary Machining on fatigue strength of AISI 4140, *CIRP Annals*, 67(1), 2021, pp. 583-586.
20. R. Menig, V. Schulze, O. Vöhringer, Optimized warm peening of the quenched and tempered steel AISI 4140, *Materials Science and Engineering A*, 335(1–2), 2019, pp. 198-206.
21. V. R. Nagarajan, S. K. Putatunda, Influence of dissolved hydrogen on the fatigue crack growth behaviour of AISI 4140 steel, *International Journal of Fatigue*, 62, 2019, pp. 236-248.

22. H. Kovacı, A. F. Yetim, Ö. Baran, A. Çelik, Fatigue crack growth analysis of plasma nitrided AISI 4140 low-alloy steel: Part 2-Variable amplitude loading and load interactions, *Materials Science and Engineering A*, 672, 2020, pp. 265-275.
23. A. B. Şengül, A. Çelik, Effect of plasma nitriding on fatigue crack growth on AISI 4140 steel under variable amplitude loading, *Surface and Coatings Technology*, 205, 2021, pp. 5172-5177.
24. A. Çelik, A. F. Yetim, A. Alsaran, M. Karakan, Effect of magnetic treatment on fatigue life of AISI 4140 steel, *Materials & Design*, 26, 2020, pp. 700-704.
25. K. H. Lang, M. Korn, T. Rohm, Very High Cycle Fatigue Resistance of the Low Alloyed Steel 42CrMo4 in Medium- and High-Strength Quenched and Tempered Condition, *Procedia Structural Integrity*, 2, 2019, pp. 1133-1142.
26. Purnadi, Evaluasi sifat fatik siklus rendah baja AISI 4140 yang dianil, 2019, Skripsi, Jurusan Teknik Mesin-Universitas Lampung.
27. I. Nikitin, M. Besel, Correlation between residual stress and plastic strain amplitude during low cycle fatigue of mechanically surface treated austenitic stainless steel AISI 304 and ferritic-pearlitic steel SAE 1045, *Materials Science and Engineering A*, 491, 2019, Pages 297-303.
28. B. N. Mordyuk, G. I. Prokopenko, P. Yu. Volosevich, L. E. Matokhnyuk, A.V. Byalonovich, T.V. Popov, Improved fatigue behavior of low-carbon steel 20GL by applying ultrasonic impact treatment combined with the electric discharge surface alloying, *Materials Science and Engineering A*, 659, 2019, pp. 119-129.
29. G. Sun, R. Zhou, J. Lu, J. Mazumder, Evaluation of defect density, microstructure, residual stress, elastic modulus, hardness and strength of laser-deposited AISI 4340 steel, *Acta Materialia*, 84, 2019, pp. 172-189.
30. K. W. Kim, K.I. Kim, C.H. Lee, J.Y. Kang, T.H. Lee, K. M. Cho, K.H. Oh, Control of retained austenite morphology through double bainitic transformation, *Materials Science and Engineering A*, 673, 2020, pp. 557-561.
31. M. Boniardi, F. D'Errico, C. Tagliabue, Influence of carburizing and nitriding on failure of gears – A case study, *Engineering Failure Analysis*, 13(3), 2020, pp. 312-339
32. V.R. Nagarajan, S. K. Putatunda, J. Boileau, Fatigue crack growth behavior of austempered DIN 42CRMO4 Steel with dissolved hydrogen, *Metals*, 7(11), 2019, pp. 2-18.

33. P.V. Krishna, R.R. Srikant, M.Iqbal, N. Sriram, Effect of austempering and martempering on the properties of AISI 52100 steel, *ISRN Tribology*, 2019, Article ID 515484, 2-6, <http://dx.doi.org/10.5402/2013/515484>.
34. S.K. Putatunda, A.V. Singar, R. Tackett, G. Lawes, Development of a high strength high toughness ausferritic steel, *Materials Science and Engineering A*, 513–514, 2019, pp. 329-339
35. S.K. Putatunda, C. Martis, J. Boileau, Influence of austempering temperature on the mechanical properties of a low carbon low alloy steel, *Materials Science and Engineering A*, 528 (15), 2021, pp. 5053-5059.
36. J. Vatauvuk, G.E. Totten, J.E. Nucci, L. L. Albano, L.d. Canale, Comparative impact behavior of high-C steel after conventional quenching, tempering, and austempering," *Materials Performance and Characterization*, 5(1), 2019, pp. 227-238.
37. B. Avishan, M. Tavakolian, S. Yazdani, Two-step austempering of high performance steel with nanoscale microstructure, *Materials Science and Engineering A*, 693, 2020, pp. 178-185.
38. C J. Martis, S.K. Putatunda, J. Boileau, J.G. Spray, The static and dynamic mechanical properties of a new low-carbon, low-alloy austempered steel, *Materials Science and Engineering A*, 589, 2019, pp. 280-287.
39. J. Chakraborty, D. Bhattacharjee, I. Manna, Austempering of bearing steel for improved mechanical properties, *Scripta Materialia*, 59, 2019, pp. 247–250.
40. H. Mousalou, S. Yazdani, B. Avishan, N. P. Ahmadi, A. Chabok, Yutao Pei, Microstructural and mechanical properties of low-carbon ultra-fine bainitic steel produced by multi-step austempering process, *Materials Science and Engineering A*, 734, 2020, pp. 329-337.
41. Van vlack, Laurence H, “Elements of Materials Engineering”, terjem. Sriati Djapri, 7th Edition, Addison-Wesley Publising Company, USA, 2019.
42. W.D. Callister, D.G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering*, 10th ed., John Wiley, 2019, pp. 119-139.
43. A. Sarkar, A. Nagesha, P. Parameswaran, R. Sandhya, M. Okazaki, Implications of dynamic strain aging under LCF-HCF interactions in a type 316LN stainlesssteel, *Mater. Sci. Eng. A* 708, 2019, pp. 91–103.
44. H.K.D.H. Bhadeshia: Materials algorithms project, available at (<https://www.msm.cam.ac.uk/map/steel/programs/mucg83.html>).
45. ASTM E8, 2004, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, West Conshohocken, United States.

46. ASTM E606, 2004, Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, West Conshohocken, United States. PA: ASTM International.
47. ASTM E23, 2002, Standard Practice for Impact Testing, West Conshohocken, United States.
48. ASTM E18, 2004, Standard Practice for Rockwell Hardness Fatigue Testing, West Conshohocken, United States.