



TUGAS AKHIR (WE40050)

ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN SUDUT *BENDING* PADA PROSES *BENDING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO, NILAI KEKERASAN, dan KETAHANAN AUS PADA MATERIAL HARDOX 500

KHARISMAJID
NRP. 0722040051

DOSEN PEMBIMBING :

BACHTIAR, S.T., M.T.
HENDRI BUDI KURNIYANTO, S.ST.,M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGELASAN
JURUSAN TEKNIK BANGUNAN KAPAL POLITEKNIK
PERKAPALAN NEGERI SURABAYA SURABAYA
2026

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (WE40050) JUDUL

**ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN SUDUT
BENDING PADA PROSES BENDING TERHADAP STRUKTUR
MIKRO, NILAI KEKERASAN, dan KETAHANAN AUS PADA
MATERIAL HARDOX 500**

**KHARISMAJID
NRP. 0722040051**

DOSEN PEMBIMBING :

**BACHTIAR, S.T., M.T.
HENDRI BUDI KURNIYANTO, S.ST.,M.T.**

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGELASAN
JURUSAN TEKNIK BANGUNAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN SUDUT *BENDING*
PADA PROSES *BENDING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO, NILAI
KEKERASAN, dan KETAHANAN AUS PADA MATERIAL HARDOX 500**

**Disusun Oleh:
Kharimajid
0722040051**

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Pengelasan
Jurusan Teknik Bangunan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA**

**Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 22 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026**

Menyetujui,

Dosen Penguji	NIDN/NUPTK	Tanda Tangan
1. Bachtiar, S.T., M.T.	(0004127002)	(.....)
2. Hendri Budi Kurniyanto, S.ST., M.T.	(0007039003)	(.....)
3. Alvalo Toto Wibowo, S.ST., M.T.	(0005039501)	(.....)
4. Hidayat, S.T., M.Sc.	(9037773674130363)	(.....)
Dosen Pembimbing	NIDN/NUPTK	Tanda Tangan
1. Bachtiar, S.T., M.T.	(0004127002)	(.....)
2. Hendri Budi Kurniyanto, S.ST., M.T.	(0007039003)	(.....)

**Menyetujui,
Ketua Jurusan**



**Ir. Pramono Nur Ardi Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198103242014041001**

**Mengetahui,
Koordinator Program Studi**

**Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T.
NIP. 199101072019031016**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank



PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : F.WD I/021

Date : 3 Nopember 2015

Rev. : 01

Page : 1 dari 1

Yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Kharismajid

NRP. : 0722040051

Jurusan/Prodi : Teknik Bangunan Kapal/D4 Teknik Pengelasan

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN SUDUT *BENDING*
PADA PROSES *BENDING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO, NILAI
KEKERASAN, DAN KETAHANAN AUS PADA MATERIAL HARDOX 500

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut,
maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 22 Juli 2026

Yang membuat pernyataan,



(Kharismajid)

NRP. 0722040051

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **"Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Sudut Bending pada Proses Bending terhadap Struktur Mikro, Nilai Kekerasan, dan Ketahanan Aus pada Material Hardox 500"** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Program Studi D4 Teknik Pengelasan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad shallallahu 'alaihi wa sallam, beserta keluarga, sahabat, dan seluruh umatnya hingga akhir zaman.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat berbagai keterbatasan dan kekurangan. Namun, berkat doa, dukungan, bimbingan, serta bantuan dari berbagai pihak, penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan sebaik-baiknya. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan terima kasih, penulis menyampaikan penghargaan kepada:

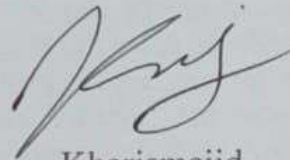
1. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T., selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
2. Bapak Priyambodo Nur A. N., S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Bangunan Kapal.
3. Bapak Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T., selaku Ketua Program Studi D4 Teknik Pengelasan.
4. Ibu Adristi Nisazarifa, S.T., M.T. selaku koordinator tugas akhir Program Studi D4 Teknik Pengelasan.
5. Bapak Bachtiar, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I sekaligus Dosen Penguji yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, serta motivasi selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Hendri Budi Kurniyanto, S.ST., M.T., selaku Dosen Pembimbing II sekaligus Dosen Penguji yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta saran yang sangat bermanfaat selama penyusunan Tugas Akhir ini.

7. Bapak Alvalo Toto Wibowo, S.ST., M.T. dan Bapak Hidayat, S.T., M.Sc., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan masukan demi penyempurnaan Tugas Akhir ini.
8. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan Program Studi D4 Teknik Pengelasan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan pelayanan selama masa perkuliahan.
9. Kedua orang tua tercinta, Almarhum Bapak Agus Riyanto dan Ibu Ratna Widiyanti, yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dukungan, pengorbanan, serta semangat yang tiada henti kepada penulis dalam menyelesaikan pendidikan dan Tugas Akhir ini.
10. Kakak saya, Idzhar Nur Cahyo dan Salwa Sabila, yang senantiasa memberikan doa, semangat, serta dukungan moril dan materiil kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
11. Bapak Mahfud Rido'i, S.ST., selaku QA/QC manager PT Lintech Seaside Facility, yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan pengalaman berharga selama pelaksanaan On the Job Training (OJT).
12. Teman-teman Grup on the job training, yaitu rohman, Dicky, dan Roy yang telah menjadi rekan selama On the Job Training serta selalu memberikan semangat, motivasi, dan dukungan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
13. Seluruh teman-teman Program Studi D4 Teknik Pengelasan Angkatan 2021 yang telah memberikan dukungan, semangat, serta kebersamaan selama masa perkuliahan hingga penyelesaian Tugas Akhir.
14. Saudari Vannisa Ayu Marcellia, yang senantiasa memberikan doa, dukungan, semangat, serta menjadi tempat berbagi cerita dan keluh kesah selama penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.
15. Terakhir, untuk diri penulis sendiri. Terima kasih telah memilih untuk terus bangkit di tengah berbagai tantangan dan kesulitan. Terima kasih telah bertahan, berjuang, dan tidak menyerah hingga mampu menyelesaikan perjalanan ini. Semoga setiap usaha yang telah dilakukan menjadi awal dari langkah-langkah terbaik di masa yang akan datang.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat, baik bagi perkembangan ilmu pengetahuan, dunia industri, maupun bagi para pembaca, serta dapat menjadi salah satu referensi bagi penelitian selanjutnya.

Akhir kata, apabila terdapat kekurangan maupun kesalahan dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan rahmat dan keberkahan kepada semua pihak yang telah membantu penyelesaian Tugas Akhir ini.

Surabaya, 27 Juli 2026



Kharismajid

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN SUDUT *BENDING* PADA PROSES *BENDING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO, NILAI KEKERASAN, DAN KETAHANAN AUS PADA MATERIAL HARDOX 500

Kharismajid

ABSTRAK

Hardox 500 merupakan baja tahan aus yang banyak digunakan pada komponen industri pertambangan, seperti *hopper liner*, karena memiliki kekerasan tinggi dan ketahanan aus yang sangat baik. Namun, kekerasan yang tinggi menyebabkan proses *cold bending* menjadi sulit, terutama untuk mencapai radius pembungkakan tertentu, sehingga *hot bending* digunakan sebagai alternatif proses pembentukan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi temperatur *preheat* dan sudut *bending* terhadap struktur mikro, kekerasan, dan ketahanan aus material Hardox 500. Proses *hot bending* dilakukan dengan variasi temperatur *preheat* tanpa *preheat*, 150°C, 250°C, dan 350°C serta variasi sudut *bending* 2,5°, 5°, dan 10°. Pengujian yang dilakukan meliputi pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik, pengujian kekerasan Vickers, dan pengujian ketahanan aus. Analisis statistik dilakukan menggunakan Two-Way ANOVA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh spesimen didominasi oleh struktur *tempered martensite* dan *bainite*, dengan morfologi lath martensite yang semakin kurang tegas seiring meningkatnya temperatur *preheat* akibat proses *tempering*. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada material tanpa *preheat* sebesar 529,42 HV, sedangkan nilai terendah diperoleh pada *preheat* 350°C sebesar 309,92 HV. Nilai faktor keausan meningkat dari 0,024 menjadi 0,043 mm³/N·m seiring peningkatan temperatur *preheat*. Hasil Two-Way ANOVA menunjukkan bahwa temperatur *preheat* memberikan pengaruh yang lebih signifikan dibandingkan sudut *bending* terhadap kekerasan Hardox 500 pada proses *hot bending*.

Kata kunci: Hardox 500, *hot bending*, *cold bending*, struktur mikro, kekerasan, ketahanan aus

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

***ANALYSIS OF THE EFFECTS OF VARIATIONS IN
TEMPERATURE AND BENDING ANGLE DURING THE
BENDING PROCESS ON THE MICROSTRUCTURE,
HARDNESS, AND WEAR RESISTANCE OF HARDOX 500
MATERIAL***

Kharismajid

ABSTRACT

Hardox 500 is a wear-resistant steel widely used in mining industry components, such as hopper liners, due to its high hardness and excellent wear resistance. However, its high hardness makes the cold bending process difficult, particularly when small bending radii are required; therefore, hot bending is commonly used as an alternative forming method. This study aims to investigate the effects of preheating temperature and bending angle on the microstructure, hardness, and wear resistance of Hardox 500. The hot bending process was carried out using four preheating conditions: no preheating, 150°C, 250°C, and 350°C, with bending angles of 2.5°, 5°, and 10°. The experimental work included microstructural observation using an optical microscope, Vickers hardness testing, and wear testing. Statistical analysis was performed using Two-Way ANOVA. The results showed that all specimens were predominantly composed of tempered martensite and bainite, with the martensitic lath morphology becoming less distinct as the preheating temperature increased due to the tempering effect. The highest hardness value was obtained without preheating (529.42 HV), whereas the lowest value was recorded at a preheating temperature of 350°C (309.92 HV). The wear factor increased from 0.024 to 0.043 mm³/N·m with increasing preheating temperature, indicating a reduction in wear resistance. Two-Way ANOVA revealed that the preheating temperature had a more significant effect than the bending angle on the hardness of Hardox 500 during the hot bending process.

Keywords: *Hardox 500, hot bending, cold bending, microstructure, hardness, wear resistance.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR GAMBAR.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat.....	3
1.5 Batasan	3
BAB 2 LANDASAN TEORI	5
2.1 Baja Tahan Aus	5
2.2 Material Hardox 500	7
2.3 <i>Bending</i>	7
2.4 <i>Cold Bending</i>	9
2.5 <i>Hot Bending</i>	9
2.5.1 <i>Suhu Preheat Hot Bending</i>	10
2.6 Penelitian Terdahulu.....	10
2.6.1 <i>The Influence of Different Heat Treatment Cycles on the Properties of the Steels HARDOX® 500 and STRENGTH® 700</i>	10
2.6.2 <i>The Effect Of Heat Treatment On The Formability Behavior Of Hardox-500 Sheet Material</i>	13
2.6.3 <i>Study On The Impact Of Temperature On The Warm Bending Of Aluminium Alloy Sheets</i>	14
2.6.4 <i>Characterization Of The Mechanical Properties And Microstructural Evolution Of Martensitic Steel In Repeated Tempering Cycles</i>	15

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Diagram Alir Penelitian	19
3.2 Studi Lapangan	20
3.3 Studi Literatur	21
3.4 Rumusan Masalah.....	21
3.5 Persiapan Alat dan Bahan	21
3.5.1 Persiapan Alat	21
3.5.2 Persiapan Bahan	22
3.6 Bending	22
3.7 Pengujian Spesimen.....	24
3.7.1 <i>Hardness Test</i>	25
3.7.2 Pengujian Keausan	27
3.7.3 <i>Micro Test</i>	30
3.8 Analisa dan Pembahasan.....	33
3.8.1 Menganalisis Data Uji Anova	33
3.9 Kesimpulan	34
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Hasil Pengujian Struktur mikro	35
4.2 Hasil Pengujian Hardness	41
4.3 Hasil Pengujian Keausan	45
4.4 Hasil Uji Analisis Two Way Anova	47
4.4.1 Hasil Nilai Kekerasan Pada Intrados.....	48
4.4.2 Hasil Nilai Kekerasan Pada Intrados.....	51
4.5 Pembahasan	54
4.5.1 Pembahasan Hasil Pengujian Struktur Mikro	55
4.5.2 Pembahasan Hasil Pengujian Kekerasan.....	56
4.5.3 Pembahasan Pengujian Keausan	57
BAB 5 KESIMPULAN.....	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	65

BIODATA DIRI	87
---------------------------	-----------

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Material Hardox 500.....	7
Tabel 2. 2 Karbon Equivalent Hardox 500	7
Tabel 2. 3 Mikrostruktur Baja Hardox 500 Dan Strenx 700.....	12
Tabel 2. 4 Tabel Uji Kekerasan Untuk Perbedaan Kondisi Tempering.....	17
Tabel 2. 5 Sifat Mekanik Spesimen Pada Perlakuan Panas Yang Berbeda	17
Tabel 2. 6 Nilai Koefisien Gesekan Pada Perlakuan Panas Yang Berbeda	17
Tabel 3. 1 Marking spesimen uji.....	23
Tabel 4. 1 Hasil nilai hardness vickers.....	42
Tabel 4. 2 Parameter pengujian ketahanan aus	45
Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Keausan.....	45

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 jenis Keausan.....	5
Gambar 2. 2 perbandingan antara keausan dan kekerasan.....	6
Gambar 2. 3 Proses Bending.....	8
Gambar 2. 4 Proses cold bending.....	9
Gambar 2. 5 Nilai Kekerasan Baja Hardox 500 dan Strenx 700	12
Gambar 2. 6 Mikrostruktur Normalizing; A) 850°C, B) 900°C, C) 950°C Dan D) 1000°C	14
Gambar 2. 7 2017A T4 Mikrografi Daerah <i>Bending</i> Pada Suhu Ruang.....	14
Gambar 2. 8 2017A T4 Mikrografi Daerah Bending Pada Suhu 180 °C.....	15
Gambar 2. 9 Struktur Mikro Material H13 Belum Ditempering	15
Gambar 2. 10 Struktur Mikro Material H13 Ditempering Satu Kali	16
Gambar 2. 11 Struktur Mikro Material H13 Ditempering Dua Kali.....	16
Gambar 2. 12 Struktur Mikro Material H13 Ditempering Tiga Kali.....	16
Gambar 2. 13 Struktur Mikro Material H13 Ditempering Empat Kali.....	16
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	20
Gambar 3. 2 Material penelitian.....	22
Gambar 3. 3 Area preheat proses hot bending	23
Gambar 3. 4 Proses hot bending (A) Pemansan material, (B) Proses memasukan material pada mesin bending (C) Proses bending	24
Gambar 3. 5 Spesimen hasil bending.....	24
Gambar 3. 6 Titik pengujian hardness	26
Gambar 3. 7 Sistem pengujian keausan metode pin on disk.....	28
Gambar 3. 8 Metode pengujian tribotester pin on disk.....	29
Gambar 3. 9 Area spesimen uji keausan.	29
Gambar 3. 10 Dimensi spesimen uji tribotester	30
Gambar 3. 11 titik uji mikro struktur	33
Gambar 4. 1 Daerah uji mikro.....	35

Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Atas Sudut Bending 2,5°	
a) Tanpa Preheat, b) Preheat 150°, c) Preheat 250°, dan	
d) Preheat 350°	35
Gambar 4. 3 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Atas Sudut Bending 5°	
a) Tanpa Preheat, b) Preheat 150°, c) Preheat 250°, dan	
d) Preheat 350°	36
Gambar 4. 4 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Atas Sudut Bending 10°	
a) Tanpa Preheat, b) Preheat 150°, c) Preheat 250°, dan	
d) Preheat 350°	36
Gambar 4. 5 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Tengah Sudut Bending 2,5°	
a) Tanpa Preheat, b) Preheat 150°, c) Preheat 250°, dan	
d) Preheat 350°	38
Gambar 4. 6 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Tengah Sudut Bending 5°	
a) Tanpa Preheat, b) Preheat 150°, c) Preheat 250°, dan	
d) Preheat 350°	38
Gambar 4. 7 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Tengah Sudut Bending 10°	
a) Tanpa Preheat, b) Preheat 150°, c) Preheat 250°, dan	
d) Preheat 350°	39
Gambar 4. 8 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Bawah Sudut Bending 2,5°	
a) Tanpa Preheat, b) Preheat 150°, c) Preheat 250°, dan	
d) Preheat 350°	39
Gambar 4. 9 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Bawah Sudut Bending 5°	
a) Tanpa Preheat, b) Preheat 150°, c) Preheat 250°, dan	
d) Preheat 350°	40
Gambar 4. 10 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Bawah Sudut Bending 5°	
a) Tanpa Preheat, b) Preheat 150°, c) Preheat 250°, dan	
d) Preheat 350°	40
Gambar 4. 11 lokasi titik pengujian kekerasan.....	42
Gambar 4. 12 Grafik Data Hardness Pada Area Intrados.....	43
Gambar 4. 13 Grafik Data Hardness Pada Area Extrados.....	43
Gambar 4. 14 Grafik Perbandingan Nilai faktor keausan	46
Gambar 4. 15 Between-Subjects Factors.....	48

Gambar 4. 16 uji homogenitas varians (Levene's Test)	49
Gambar 4. 17 Tests of between-subjects effects	50
Gambar 4. 18 Between-Subjects Factors	52
Gambar 4. 19 uji Homogenitas Varians (Levene's Test).....	52
Gambar 4. 20 Test of Between-Subjects effect.....	53
Gambar 4. 21 Grafik Hubungan Antara Hardness dan Faktor keausan	57

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada dunia industri pertambangan dan manufaktur, masalah keausan (*wear*) dan abrasi sering dijumpai, khususnya pada peralatan seperti *feeder* untuk *conveyor*. Untuk mengatasi hal tersebut, umumnya digunakan pelapisan atau pemberian *liner* dari material yang memiliki ketahanan aus dan kekerasan tinggi. Salah satu material yang cocok digunakan adalah Hardox 500.

Hardox 500 merupakan baja tahan aus dengan kekerasan berkisar antara 470–530 HBW. Kekerasan tersebut diperoleh dari struktur mikro yang didominasi martensit temper yang terbentuk melalui proses *quenching* dan *tempering* (SSAB, 2023) yang memiliki kandungan karbon sebesar 0,30%, mangan sebesar 1,30%, dan chromium sebesar 2,40%. Pada proses penerapannya pada dunia industri material Hardox 500 akan mengalami proses pembentukan deformasi secara *bending* atau pembengkokan menyesuaikan bentuk dari produk yang akan dilapisi. *Bending* merupakan proses pembentukan material dengan cara membengkokkan atau melengkungkan material sehingga memiliki bentuk yang diinginkan, dengan cara memberikan tekanan pada bagian tertentu sehingga terjadi deformasi plastis pada bagian tersebut. Dikarenakan Hardox 500 memiliki kekerasan dan kekuatan yang tinggi, proses pembentukan material menjadi lebih sulit dibandingkan baja karbon biasa. Pada kondisi tertentu, terutama apabila proses pembentukan tidak dikendalikan dengan baik, dapat terjadi konsentrasi tegangan yang berpotensi menimbulkan cacat, seperti retak, sehingga diperlukan pengendalian parameter proses pembentukan agar kualitas material tetap terjaga.

Dikarenakan material Hardox 500 telah mengalami proses *quenching* dan *tempering*, perlakuan panas lanjutan selama proses pembentukan perlu diperhatikan agar sifat mekanik dan ketahanan aus material tetap terjaga. SSAB (2023) menyatakan bahwa pemanasan pada temperatur di atas 250°C berpotensi menyebabkan perubahan sifat mekanik akibat perubahan struktur mikro. Li et al. juga menjelaskan bahwa peningkatan temperatur pemanasan pada baja *quenched*

and tempered menyebabkan terjadinya *further tempering* yang mengubah struktur martensit temper melalui difusi karbon dan pertumbuhan presipitat karbida sehingga nilai kekerasan material mengalami penurunan. Oleh karena itu, pengaruh temperatur *preheat* terhadap karakteristik Hardox 500 perlu dikaji untuk menentukan parameter proses *hot bending* yang sesuai.

Permasalahan proses pembentukan juga dijumpai pada PT X saat proses pembuatan liner hopper menggunakan material Hardox 500. Pembentukan dengan metode *cold bending* masih memiliki keterbatasan dalam mencapai bentuk atau radius pembengkokan tertentu sehingga dipilih proses *hot bending* dengan variasi temperatur *preheat* sebagai alternatif proses pembentukan. Namun, proses pemanasan selama *hot bending* berpotensi mengubah struktur mikro akibat tempering lanjutan sehingga dapat memengaruhi nilai kekerasan dan ketahanan aus material. Oleh karena itu diperlukan penelitian untuk mengevaluasi pengaruh variasi temperatur *preheat* terhadap karakteristik Hardox 500.

Berdasarkan uraian tersebut, proses *hot bending* pada material Hardox 500 perlu dikaji lebih lanjut karena pemanasan selama proses pembentukan berpotensi mengubah struktur mikro serta memengaruhi nilai kekerasan dan ketahanan aus material. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur *preheat* dan sudut *bending* terhadap karakteristik material Hardox 500 sehingga diperoleh informasi mengenai parameter proses pembentukan yang sesuai tanpa menurunkan performa material secara signifikan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka didapatkan beberapa rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana struktur mikro material hardox 500 pada proses *bending* dengan variasi temperatur *preheat* dan sudut *bending* ?
2. Bagaimana pengaruh variasi temperatur *preheat* dan sudut *bending* pada proses *bending* pada material Hardox 500 terhadap nilai kekerasan ?
3. Bagaimana ketahanan aus material Hardox 500 pada proses *bending* dengan variasi temperatur *preheat* dan sudut *bending* ?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah pada sub bab sebelumnya, maka dapat diketahui bahwa penelitian ini bertujuan sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui Struktur mikro material hardox 500 pada proses *bending* dengan variasi temperatur *preheat* dan sudut *bending*.
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur *preheat* dan sudut *bending* pada proses *bending* material Hardox 500 terhadap nilai kekerasan.
3. Untuk mengetahui Ketahanan aus material hardox 500 pada proses *bending* dengan variasi temperatur *preheat* dan sudut *bending*.

1.4 Manfaat

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Manfaat penelitian bagi mahasiswa bahwa penelitian ini dapat menjadi sarana bagi mahasiswa untuk menerapkan ilmu yang didapat semasa kuliah khususnya materi ilmu bahan, pengujian material dan proses fabrikasi. teori dan penelitian ini diharapkan dapat menjadi pedoman dalam pembuatan produk fabrikasi sehingga mampu memberikan solusi jika terjadi suatu permasalahan terutama pada *defect* material.
2. Manfaat bagi perusahaan dapat menjadi sumber informasi terkait sifat mekanik dan struktur mikro material Hardox 500 setelah dilakukannya proses hot *bending* dan dapat menjadi referensi ketika akan mengerjakan proyek yang menggunakan material tersebut.
3. Manfaat bagi umum dapat digunakan sebagai referensi atau informasi tambahan dalam pembuatan suatu proyek yang menggunakan material dengan kekerasan tinggi.

1.5 Batasan

1. *Range* temperatur dilakukannya pemanasan awal penelitian ini adalah 0 °C, 150 °C, 250 °C, dan 350 °C.
2. sudut *bending* yang diujikan adalah 2.5°, 5° dan 10°.
3. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini hanya menggunakan pengujian struktur mikro, uji keausan dan *hardness.test*.

4. Pemanasan dilakukan dengan *torch* pemanas dengan bahan bakar *oxy acetylene*.
5. Proses pendinginan menggunakan udara.
6. Nilai ketebalan material adalah 16 mm.
7. Ukuran *opening* V-Die 120 mm, dengan sudut 88°
8. Nilai radius *punch* 20 mm dengan sudut 88°
9. Proses dilakukannya penelitian di PT. X

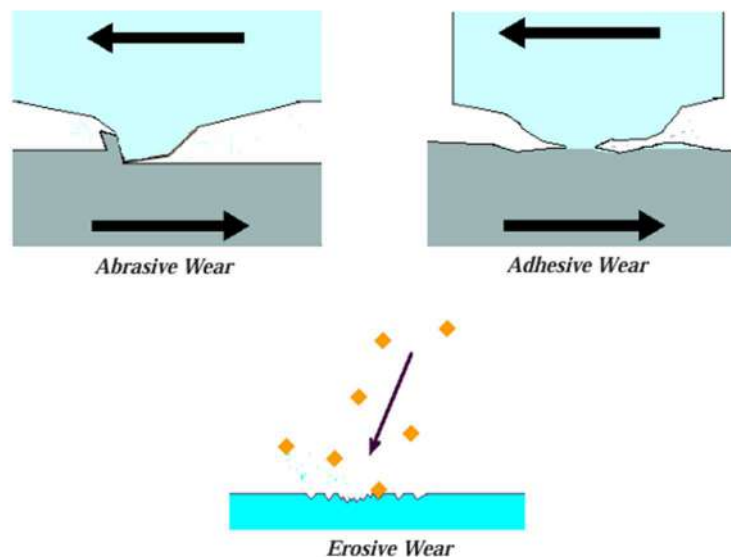
BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Baja Tahan Aus

Aus merupakan kerusakan yang terjadi akibat permukaan material terkena material lain secara berulang, dengan adanya gesekan terus menerus dalam jangka panjang material akan mengalami kegagalan keausan. Jenis keausan yang sering terjadi pada material :

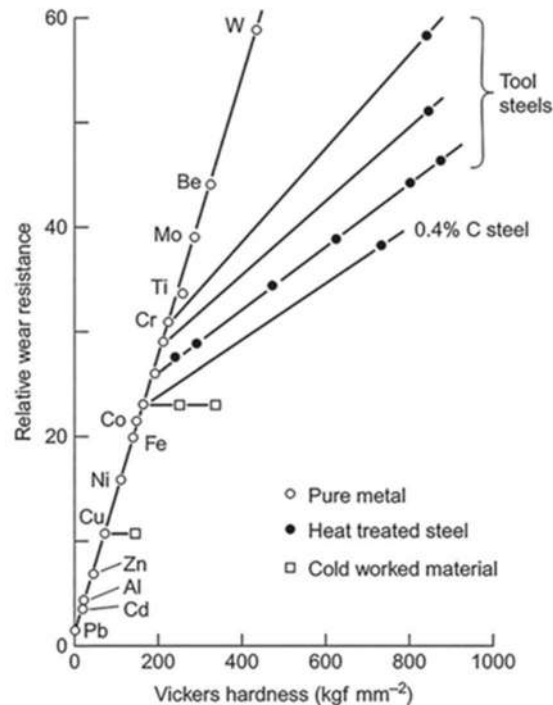
1. Keausan *abrasive* : material keras merusak material lunak ketika mengalami kontak.
2. Keausan adhesif : peletakan antara dua material yang kontak karena gaya adhesif
3. Keausan erosi : pergerakan fluida gas atau *liquid* yang merusak permukaan material (Albar, 2012)



Gambar 2. 1 jenis Keausan
(Albar, 2012)

Baja tahan aus merupakan salah satu jenis material yang fokus utamanya untuk memiliki ketahanan terhadap kondisi operasi yang dapat menyebabkan keausan. Sifat yang perlu ada pada material yang memiliki ketahanan aus adalah kekerasan, ketangguhan, dan stabilitas kimia (Albar, 2012). Biasanya Ketahanan aus memiliki hubungan sifat mekanik seperti ketika material memiliki kekerasan

yang tinggi maka kecenderungan material memiliki sifat ketahanan aus semakin tinggi seperti pada Gambar 2.2 (Khrushchov, 1974)



Gambar 2. 2 perbandingan antara keausan dan kekerasan
(Khrushchov, 1974)

Ketahanan aus juga dipengaruhi oleh mikro struktur material tersebut seperti yang dijelaskan oleh (Chintha, 2019) menyatakan bahwa Peningkatan ketahanan aus abrasi berkaitan dengan efek pengerasan austenit tertahan dan/atau transformasi austenit menjadi martensit. Struktur mikro martensit terbentuk akibat proses *quenching* dan memiliki peran untuk meningkatkan kekerasan material. (Aji Pangestu et al., 2024). Namun, martensit dikenal sebagai fase yang sangat keras namun juga sangat getas, terutama pada baja karbon tinggi dan dalam kondisi *as-quenched* (belum ditemper)(Sun et al., 2017). Oleh karena itu material yang dilakukan pengerasan biasanya dilakukan *tempering* untuk mengurangi kegetasan dan mengurangi tegangan sisa dari material. *Tempering* menyebabkan presipitasi karbida halus dan relaksasi struktur martensite, sehingga baja menjadi lebih ulet dan tidak mudah retak. (Souza et al., 2021)

Baja tahan aus biasanya diproduksi dengan cara *quenching* diikuti dengan *tempering*. Seperti halnya material Hardox 500 yang telah mengalami proses

quenching dan *tempering* pada proses produksinya, sehingga menjadikan material tersebut memiliki kekerasan yang tinggi dan ketahanan aus yang baik.

2.2 Material Hardox 500

Hardox 500 merupakan baja tahan abrasi dengan kekerasan 470-530 HBW dan *yield strength* 1400 Mpa(SSAB, 2023). Yang cocok diaplikasikan pada barang yang membutuhkan ketahanan terhadap keausan. Hardox 500 adalah material baja karbon yang sudah mengalami proses perlakuan panas yaitu *Quenching* dan *tempering*(SSAB, 2023). Komposisi kimia dari Hardox tertera pada Tabel 2.1 dan karbon equivalent pada Tabel 2.2

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Material Hardox 500

Komposisi kimia	Persentase (max %)
C	0.3
Si	0.4
Mn	1.3
P	0.02
S	0.01
Cr	2.20
Ni	2.0
Ma	0.4
B	0.005

(SSAB, 2023)

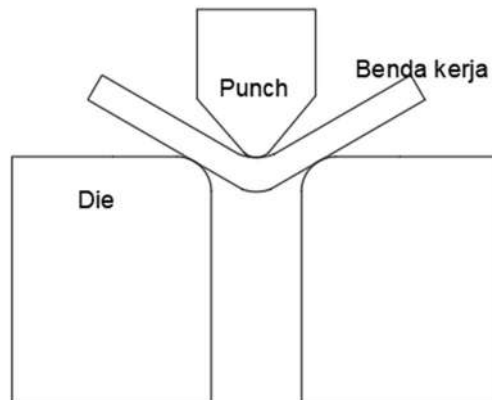
Tabel 2. 2 Karbon Equivalent Hardox 500

	CET maks	Tipikal CET
Plate hardox 500	0,43	0,41

(SSAB, 2023)

2.3 Bending

Bending merupakan proses pemberian tekanan pada bagian tertentu sehingga membentuk atau mengubah sudut bagian-bagian benda kerja. Penekanan tersebut membuat benda kerja mengalami deformasi plastis pada bagian yang diberi tekanan. material akan melewati daerah *yield strength* dan dibawah daerah *ultimate tensile strength*. proses *bending* sebagai berikut benda kerja ditempatkan pada *die*, material ditahan dengan penahan, dan perlahan *punch* diturunkan sehingga membentuk V (Olaf Digel, 2002)



Gambar 2. 3 Proses *Bending*
(Dokumen pribadi,2025)

Ada beberapa metode *bending* material yang umum digunakan di dunia industri antara lain :

1. *V-Bending* : Metode pembengkokan yang menggunakan *punch* dan *die* berbentuk V untuk menghasilkan sudut tertentu pada lembaran logam, dan umumnya diterapkan pada proses produksi skala kecil hingga menengah.
2. *Edge bending* : Dilakukan dengan memberikan gaya tekan pada bagian tepi lembaran logam sehingga terbentuk sudut yang diinginkan, metode ini dinilai efisien dan sesuai untuk produksi dalam jumlah besar
3. *Roll bending* : Dilakukan dengan memanfaatkan tiga atau lebih rol untuk membentuk lengkungan pada lembaran logam, sehingga banyak digunakan dalam pembuatan pipa atau tabung berdiameter besar.
4. *Press brake bending* : Dilakukan dengan menggunakan mesin *press brake* untuk melakukan pembengkokan lembaran logam dengan tingkat presisi yang tinggi, sehingga memungkinkan pembentukan sudut yang kompleks dan akurat.

Namun proses *bending* pada suhu ruangan pada material tertentu dapat menyebabkan *crack* saat proses *bending*. metode *bending* yang digunakan untuk mencegah terjadinya *crack* saat proses *bending* yaitu *hot bending* atau melakukan pemanasan hingga suhu tertentu sebelum dilakukan *bending* material.

2.4 Cold Bending

Proses *bending* dingin merupakan proses *bending* yang dilakukan pada suhu ruang tanpa adanya perlakuan sebelumnya. Proses *bending* dingin ini sering menyebabkan retak pada plat, oleh karena itu perlu ditetapkan radius tekuk yang sesuai dengan ketebalan dan grade material. (RL Brockenbrough, 1998) kelebihan dari *bending* dingin adalah biaya yang murah, produksi yang cepat, tidak adanya perubahan material akibat perlakuan panas, dan juga akurasi yang tinggi. kekurangan dari *bending* dingin adalah terjadinya *spring-back* sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Pornputsiri & Kanlayasiri, 2020) menyatakan bahwa nilai *spring-back* pada material dengan suhu 25 °C lebih besar dibandingkan material dibending pada suhu 400 °C, pada *bending* dingin juga beresiko untuk terjadinya *crack* yang besar seperti pada penelitian yang dilakukan oleh (Özdemir & Gökmeşe, 2018) bahwa material X10CrAlSi24 terjadi reak ketika dilakukan *bending* dingin dengan sudut 30°. Proses *cold bending* ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Proses *cold bending*
(SSAB, 2023)

2.5 Hot Bending

Hot bending adalah proses pembengkokan benda kerja dengan memberikan perlakuan panas pada area *bending* sebelum proses *bending*. tujuan dari perlakuan panas sebelum proses *bending* adalah untuk mencegah terjadinya *crack* pada saat proses *bending*. seperti yang dilakukan oleh (Özdemir & Gökmeşe, 2018) menunjukkan bahwa *preheat* sebelum dilakukannya *bending* dapat mencegah terjadinya *crack*. Selain itu *bending* panas juga dapat memperkecil *springback* yang

terjadi pada material yang di *bending*. namun *bending* panas memiliki kekurangan, yaitu apabila temperatur *hot bending* tidak diatur maka hal tersebut akan mengubah struktur mikro pada material tersebut dan juga berubahnya sifat mekanik material yang mengalami *hot bending*. Seperti penelitian yang dilakukan oleh (Rohmat et al., 2023) menyatakan bahwa perubahan struktur mikro akan mengubah sifat mekanik dari material.

2.5.1 Suhu *Preheat Hot Bending*

Penentuan suhu *hot bending* berdasarkan pada pernyataan yang dikeluarkan oleh (SSAB, 2023) yaitu material Hardox 500 adalah material yang sudah dilakukan *quenching* dan *tempering* sehingga memiliki struktur mikro *martensite* dan juga pada data sheet tersebut menyatakan bahwa material Hardox tidak diperbolehkan untuk dikenai panas lebih dari 250 °C. Dan hal tersebut bertujuan agar tidak mengubah struktur mikro yang dapat berpengaruh terhadap nilai kekerasan material tersebut. *tempering* pada suhu antara 160 °C dan 200 °C tidak terjadi perubahan struktural yang sensitif, antara 200 °C – 260 °C baja mulai kehilangan kekerasan namun tidak terlihat modifikasi struktural yang terlihat, antara 260 °C – 360 °C terjadi *precipitation* karbida dan membentuk perlit yang halus. (Gallina et al., 2020)

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini mengacu pada penelitian Penelitian sebelumnya yaitu yang memiliki relevansi dengan proses *tempering* berulang terhadap struktur mikro dan kekuatan mekanik material yang memperkuat dasar dengan pendekatan serupa

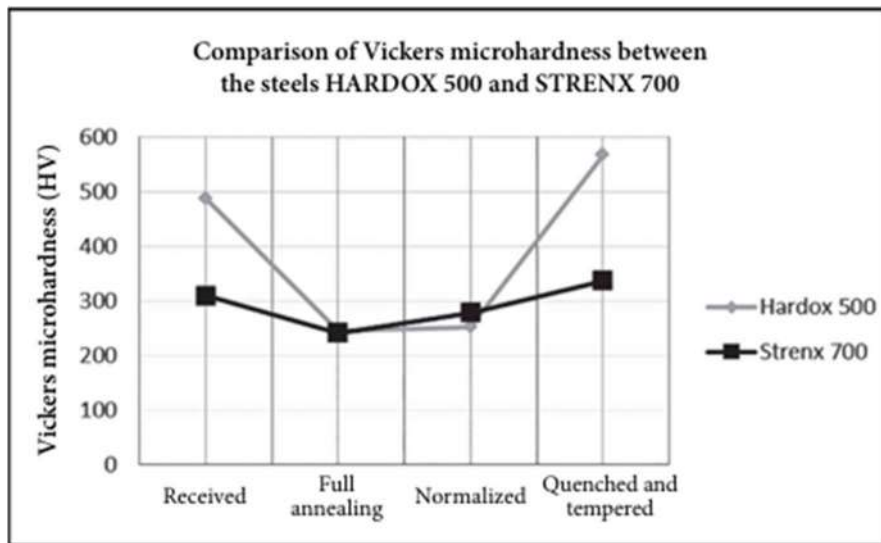
2.6.1 *The Influence of Different Heat Treatment Cycles on the Properties of the Steels HARDOX® 500 and STRENX® 700*

Penelitian ini dilakukan oleh (Gallina et al., 2020) penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan kekuatan mekanik, dan struktur mikro akibat proses *heat treatment* berulang pada material Hardox 500 dan juga Strenx 700. Pada penelitian ini menggunakan metode *heat treatment* yaitu dilakukannya full annealing dengan suhu 50 °C diatas suhu austenisasi

sampai austenisasi selesai dan didinginkan dengan pendinginan lambat didalam oven. proses yang kedua yaitu perlakuan quenching dan tempering, jadi material dipanaskan sampai temperatur 880 °C dan di tahan sampai semuanya sama dan didinginkan dengan cepat menggunakan polimer dengan konsentrasi 10% pada larutan cair, dan dilakukan tempering dengan suhu 180 °C selama 1 jam. Proses *heat treatment* yang ketiga yaitu normalization yaitu material dipanaskan hingga suhu 880 °C dan didinginkan pada suhu ruangan. Pada penelitian ini dilakukan dua metode pengujian yaitu metalografi, dan pengujian kekerasan.

Hasil dari perlakuan panas full annealing pada kedua material memiliki mikrostruktur pro-eutectoid ferrite, perlite dan beberapa bagian spheroidization. Pada perlakuan normalizing pada material hardox 500 dan strenx 700 terlihat ferrite, perlite dan bainite pada mikrostrukturnya. Pada perlakuan panas quenching dan tempering dapat diamati bahwa terbentuk struktur martensit tempered seperti pada material tanpa perlakuan panas sebelumnya. Hasil pengujian mikro ada pada Tabel 2.3. dan untuk hasil dari pengujian kekerasan seperti pada Gambar 2.5.

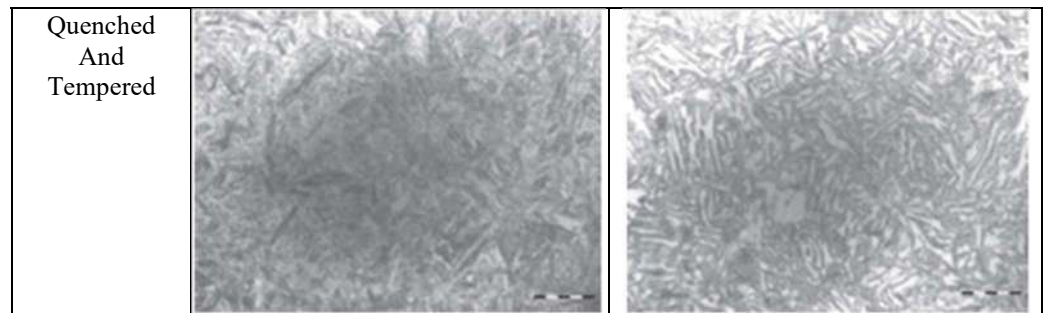
Kesimpulannya berdasarkan penelitian ini adalah pada saat proses full annealing kedua material menunjukkan mikrostruktur yang serupa yaitu ferrite dan pearlite, terjadi penurunan kekerasan dan memiliki kekerasan yang paling rendah dibandingkan pada proses lainnya, pada proses normalizing mikro struktur martensite digantikan oleh ferrite, pearlite dan bainite. Pada proses normalizing mengalami penurunan kekerasan namun tidak lebih rendah dari proses full annealing. Pada proses quenching dan tempering kedua material menunjukkan mikrostruktur yang sama yaitu martensite tempered dan kekerasan material meningkat signifikan.



Gambar 2. 5 Nilai Kekerasan Baja Hardox 500 dan Strenx 700
(Gallina et al., 2020)

Tabel 2. 3 Mikrostruktur Baja Hardox 500 Dan Strenx 700.

	Hardox 500	Strenx 700
Received		
Full Anneraling		
Normalized		

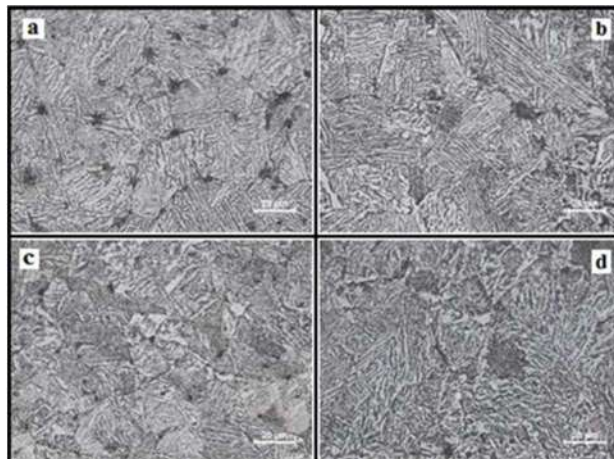


Sumber : (Gallina et al., 2020)

2.6.2 The Effect Of Heat Treatment On The Formability Behavior Of Hardox-500 Sheet Material

Penelitian ini dilakukan oleh (Gökmeşe & Özdemir, 2016) dengan adanya masalah terkait material Hardox 500 dengan ketebalan 4 mm yang mengalami *crack* saat proses bending 90 ° pada suhu ruang. Pada penelitian ini material Hardox 500 dilakukan *heat treatment* yaitu normalizing dengan suhu 850 °C, 900 °C, 950 °C, dan 1000 °C, dengan *holding time* selama 60 menit dan didinginkan pada suhu ruang. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian struktur mikro, pengujian kekerasan dan juga *springback*.

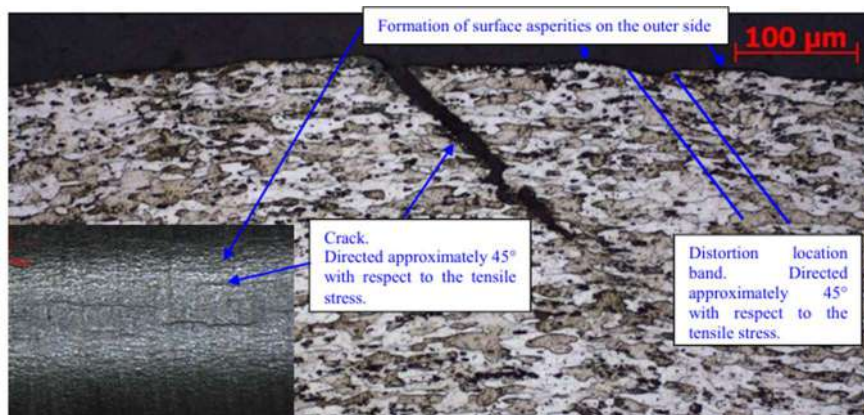
Pada penelitian ini dihasilkan nilai *springback* pada suhu 1000 °C menghasilkan nilai *springback* paling kecil sebesar 23.99% jika dibandingkan dengan perlakuan panas normalizing pada suhu 850 °C, 900 °C, dan 950 °C dengan masing-masing penurunan nilai *springback* masing-masing sebesar 14.9%, 7.12%, dan 7.25%. pada pengujian kekerasan dihasilkan nilai kekerasan sebesar 384 HV yang berarti mengalami penurunan dari material Hardox 500 tanpa perlakuan dengan nilai kekerasan sebesar 520 HV. Pengujian struktur mikro terlihat bahwa martensite pada material Hardox 500 digantikan dengan struktur mikro ferrite dan pearlite dalam bentuk strip seperti pada Gambar 2.6



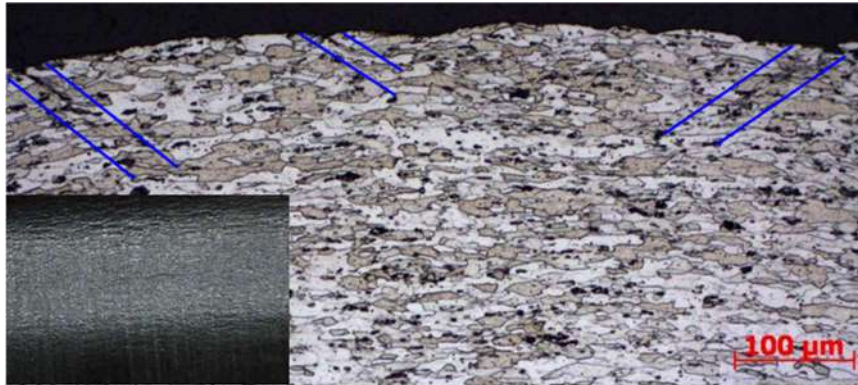
Gambar 2. 6 Mikrostruktur Normalizing; A) 850°C, B) 900°C, C) 950°C Dan D) 1000°C
(Gökmeşe & Özdemir, 2016)

2.6.3 Study On The Impact Of Temperature On The Warm Bending Of Aluminium Alloy Sheets

Penelitian ini dilakukan oleh (Mauduit & Maillard, 2021) penelitian ini bertujuan mempelajari proses *Warm forming* pada proses *bending* dengan material yaitu aluminium 2017A-T4 dan 6061-T6. *Warm forming* dilakukan dengan suhu 180 °C dan *room* temperatur dengan sudut *bending* 45 ° Dengan pengujian yang dilakukan yaitu mikrostruktur. Pada *bending* material 2017A T4 terlihat inisiasi *crack* pada pengujian mikro seperti pada Gambar 2.7. Pada *warm bending* dengan suhu 180 °C material 2017A T4 tidak mengalami *crack* pada daerah *bending* ditunjukkan pada Gambar 2.8. kesimpulannya *warm bending* pada kedua material aluminium dapat mencegah risiko terjadinya *crack* dan juga mengurangi *springback*.



Gambar 2. 7 2017A T4 Mikrografi Daerah *Bending* Pada Suhu Ruang.

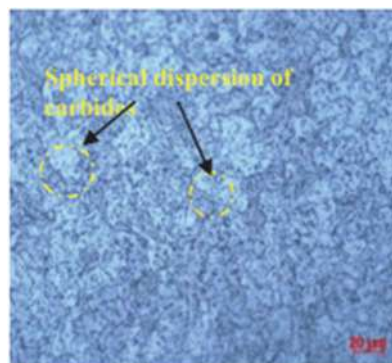


Gambar 2. 8 2017A T4 Mikrografi Daerah *Bending* Pada Suhu 180 °C

2.6.4 Characterization Of The Mechanical Properties And Microstructural Evolution Of Martensitic Steel In Repeated Tempering Cycles

Penelitian ini dilakukan oleh (Shelar & Ronge, 2023) penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik material baja martensite H13 jika dilakukan tempering berulang sebanyak 4 kali. Dengan suhu tempering 580 °C dan dengan holding time 120 menit. Dengan pengujian tarik, impact, kekerasan, uji mikro, dan ketahanan keausan material.

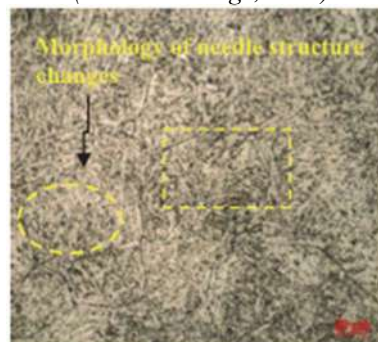
Penelitian ini dihasilkan pada material H13 yang tidak dilakukan tempering dihasilkan struktur mikro bainite dengan karida yang kasar seperti pada Gambar 2.9. pada tempering 1 kali terlihat struktur martensite yang sangat halus seperti pada Gambar 2.10. Pada tempering ke dua terlihat bahwa terbentuk struktur mikro martensite tempered seperti pada Gambar 2.11. Pada tempering ke tiga terlihat *precipitation* paduan karbida seperti pada Gambar 2.12. Pada *tempering* ke empat terlihat struktur mikro *martensite tempered*. Struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 2.13.



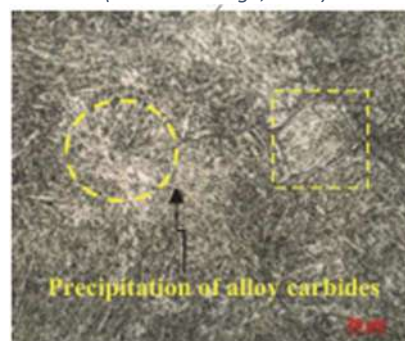
Gambar 2. 9 Struktur Mikro Material H13 Belum Ditempering
(Shelar & Ronge, 2023)



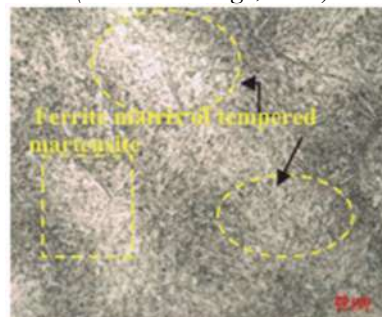
Gambar 2. 10 Struktur Mikro Material H13 Ditempering Satu Kali
(Shelar & Ronge, 2023)



Gambar 2. 11 Struktur Mikro Material H13 Ditempering Dua Kali
(Shelar & Ronge, 2023)



Gambar 2. 12 Struktur Mikro Material H13 Ditempering Tiga Kali
(Shelar & Ronge, 2023)



Gambar 2. 13 Struktur Mikro Material H13 Ditempering Empat Kali
(Shelar & Ronge, 2023)

Pada pengujian hardness, pengujian tensile dan koefisien aus dapat dilihat pada tabel 2.4, tabel 2.5 dan tabel 2.6

Tabel 2. 4 Tabel Hasil Uji Kekerasan Pada Perlakuan Tempering Yang Berbeda

parameter	Tanpa perlakuan	T 1	T 2	T 3	T 4
<i>Hardness</i> (HRC)	46	46	44	40	38

Sumber : (Shelar & Ronge, 2023)

Tabel 2. 5 Sifat Mekanik Spesimen Pada Perlakuan Tempering Yang Berbeda

No	Parameter	Tanpa Perlakuan	T 1	T 2	T 3	T 4
1	<i>Yield Strength</i> (Mpa)	350.05	952	945	907	870
2	<i>Ultimate Tensile Strength</i> (Mpa)	641.32	1122	1165	1116	1081
3	<i>Elongation %</i>	31.80	11.48	12.40	12.58	14.40
4	<i>Reduction Of Area (%)</i>	66.72	22.31	19.32	24.80	25.49

Sumber : (Shelar & Ronge, 2023)

Tabel 2. 6 Nilai Koefisien Gesekan Pada Perlakuan Tempering Yang Berbeda

No	Parameter	Tanpa Perlakuan	T 1	T 2	T 3	T 4
1	COF	0.285	0.194	0.254	0.225	0.258

Sumber : (Shelar & Ronge, 2023)

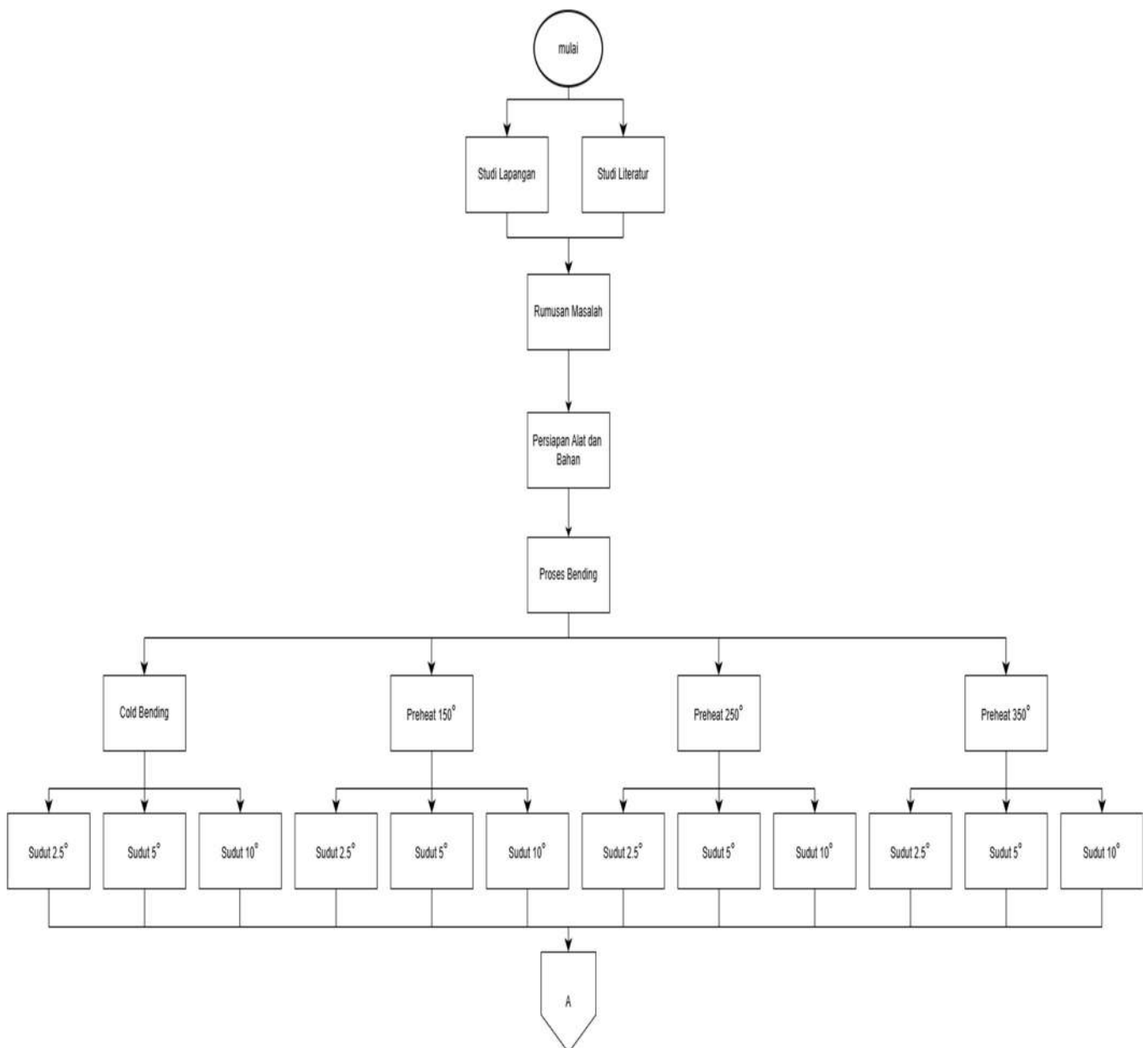
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

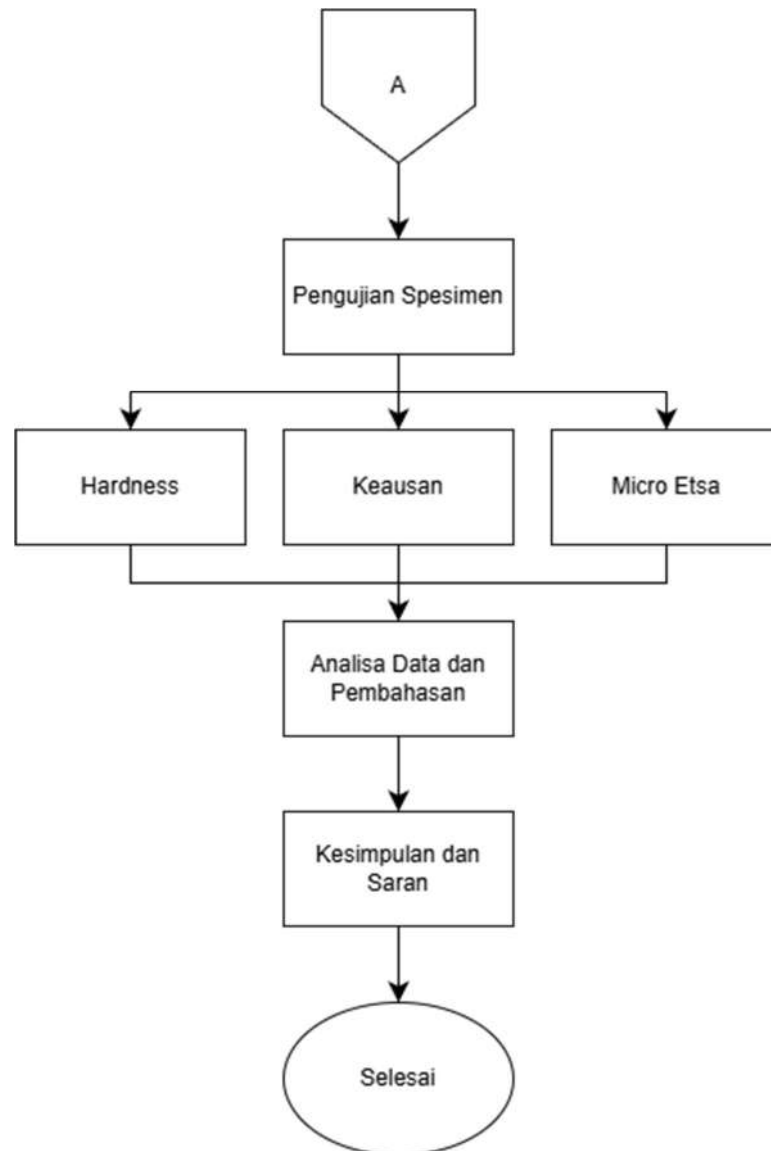
This page is intentionally left blank

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Alur Penelitian analisis variasi *temperature preheat* pada proses *hot bending* material Hardox 500 ditunjukkan pada Gambar 3.1 sebagai berikut





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Studi Lapangan

Studi lapangan ini dilakukan untuk mengidentifikasi berbagai permasalahan yang muncul di industri sebagai lokasi pelaksanaan *On the Job Training* (OJT). Permasalahan utama yang terjadi adalah terjadinya penurunan kekerasan akibat proses *hot bending* pada material Hardox 500. Berdasarkan kondisi tersebut penelitian ini diusulkan untuk mengkaji pengaruh variasi temperatur *preheat* pada

proses *hot bending* terhadap material Hardox 500, dengan harapan dapat memberikan solusi yang lebih efektif dan efisien bagi perusahaan.

3.3 Studi Literatur

Studi literatur ini penulis pengumpulan sumber-sumber referensi, jurnal, *code* dan *standard* yang akan dijadikan sebagai pedoman dalam membuat penelitian ini. Pada penelitian ini menggunakan beberapa literatur yaitu jurnal yang membahas tentang perlakuan panas material Hardox 500, jurnal tentang *hot bending* dan juga *data sheet* material Hardox 500 yang dikeluarkan oleh SSAB.

3.4 Rumusan Masalah

Setelah mempelajari tentang Penelitian ini pada tahap studi literatur, penulis menemukan poin-poin penting yang bisa disusun menjadi rumusan masalah yang melatar belakangi Penelitian ini.

3.5 Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan alat dan bahan menjadi hal yang penting dalam melakukan penelitian ini. Alat dan bahan yang dibutuhkan sebagai berikut :

3.5.1 Persiapan Alat

Persiapan alat yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut :

1. Mesin *Bending*.
2. *Torch* api.
3. Peralatan ukur.
 - a. *Thermogun*.
 - b. Penggaris besi.
4. Alat bantu
 - a. Gerinda tangan .
 - b. Spidol.
5. Alat pelindung diri (APD)
 - a. Sepatu *safety*.
 - b. *Wearpack*.

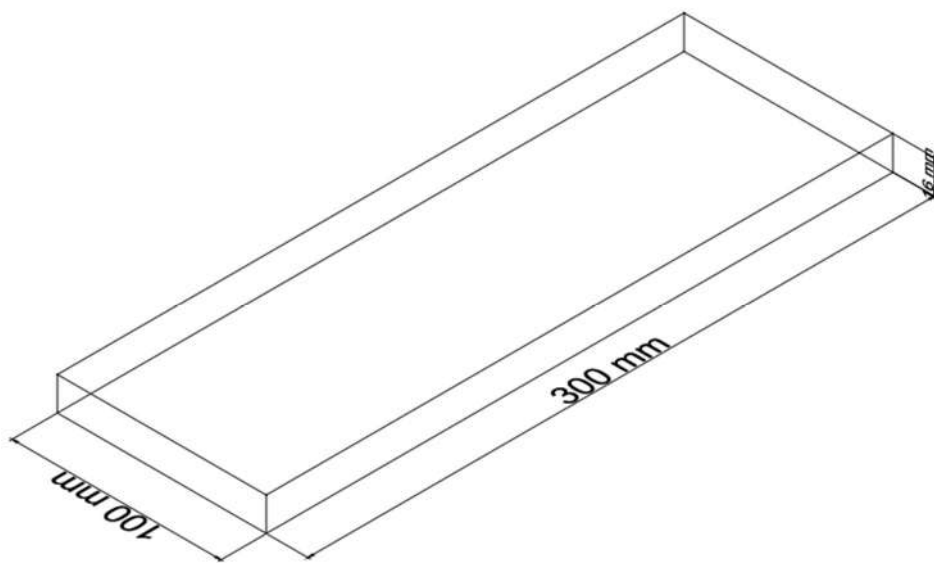
- c. Sarung tangan.
- d. Kacamata *safety*.

3.5.2 Persiapan Bahan

Persiapan bahan habis pakai yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Persiapan material

Material yang digunakan pada penelitian ini berdimensi 100 x 300 x 16 mm untuk setiap spesimen. Seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Material Penelitian.

2. Gas oxy acetylene

Pada penelitian ini juga menggunakan gas oxy acetylene untuk bahan bakar torch pada proses *preheating* sebelum dilakukannya proses *bending*.

3.6 Bending

Pada penelitian ini menggunakan proses *hot bending* yang memerlukan pemanasan awal sebelum proses *bending* dilakukan. Langkah-langkah proses *hot bending* sebagai berikut :

1. Mempersiapkan mesin *bending*, *torch* untuk pemanasan awal, dan *thermogun* untuk mengukur suhu pemanasan awal.

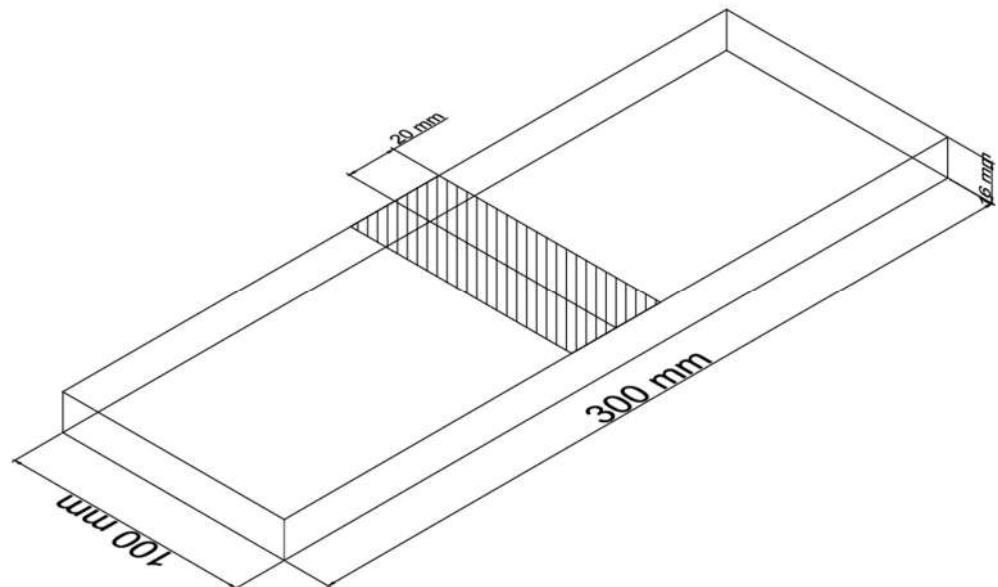
2. Mempersiapkan spesimen dan melakukan *marking* dengan acuan seperti pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 *Marking* Spesimen Uji.

No	Temperatur <i>preheat</i> °C	Sudut <i>bending</i> (mm)	<i>Marking</i>	Jumlah
1	0	2.5°	TA-0-2.5-A	1
		5°	TA-0-5-B	1
		10°	TA-0-10-C	1
2	150	2.5°	TA-0-2.5-D	1
		5°	TA-150-5-E	1
		10°	TA-150-10-F	1
3	250	2.5°	TA-0-2.5-G	1
		5°	TA-250-5-H	1
		10°	TA-250-10-I	1
4	350	2.5°	TA-350-2.5-J	1
		5°	TA-350-5-K	1
		10°	TA-350-10-L	1

Sumber : Data Pribadi.

3. Mempersiapkan Titik *bending* pada mesin *bending* sesuai dengan sesuai Gambar 3.3
4. Melakukan pemberian garis bantu untuk area yang dilakukan pemanasan awal dan juga titik tekan untuk mesin *bending*.
5. Melakukan pemanasan material menggunakan *torch* dan mengukur suhu yang dengan *thermogun* sampai suhu pemanasan awal sama dengan Tabel 3.1. area yang dilakukan pemanasan sesuai dengan Gambar 3.3



Gambar 3. 3 Area *Preheat* Proses *Hot Bending*



(a)

(b)



Gambar 3. 4 Proses *Hot Bending* (A) Pemansan Material, (B) Proses Memasukan Material Pada Mesin *Bending* (C) Proses *Bending*
(Dokumen Pribadi, 2026)

6. Melakukan proses *bending* sesuai sudut yang direncanakan.
7. Melakukan pengukuran hasil sudut *bending* menggunakan *protractor*.

3.7 Pengujian Spesimen

Setelah dilakukannya proses penekukan material, tahap selanjutnya adalah dilakukannya pengujian material untuk mengetahui perubahan apa saja yang terjadi setelah material Hardox 500 dilakukannya *hot bending* pada Gambar 3.4. Jenis-jenis pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

- a. *Hardness test*.
- b. *Micro test*.
- c. *Wear ability test*.



Gambar 3. 5 Spesimen Hasil Bending

3.7.1 Hardness Test

Pengujian kekerasan adalah pengujian yang bertujuan untuk mengetahui kekerasan sebuah material. Kekerasan dinyatakan sebagai kemampuan material untuk menahan *indentasi* atau dengan definisi lain adalah ketahanan logam terhadap deformasi plastis. (M.M. Munir et al., 2019) Penekanan *indenter* pada material uji berkisar antara 10-15 detik dengan beban tertentu, bekas dari penekanan *indenter* kemudian diukur untuk menentukan nilai kekerasan dengan cara gaya tekan dibagi dengan luas tapak tekan.

pengujian kekerasan memiliki beberapa macam metode yang digunakan sebagai berikut :

1. Metode pengujian kekerasan Brinell
2. Metode Pengujian Kekerasan Vickers
3. Metode Pengujian kekerasan Rockwell

Pada setiap metode pengujian kekerasan memiliki kegunaan masing-masing seperti rockwell dan vickers dapat digunakan pada material dengan tebal minimal 1,5 mm namun pada brinell minimal ketebalan material adalah 6 mm, selain itu brinell tidak memerlukan kehalusan permukaan yang tinggi, beda halnya dengan vickers yang sensitif terhadap kekasaran permukaan. (M.M. Munir et al., 2019).

Pada penelitian ini menggunakan metode uji kekerasan Vickers dikarenakan pengujian vickers dapat digunakan untuk material lunak hingga keras. Prosedur pengujian vickers mengacu pada standar ASTM E92. Yang menggunakan gaya tekan antara 1 Kgf hingga 120 kgf. Pengukuran kekerasan dengan metode vickers dihitung secara manual dengan persamaan (3.1) :

$$HV = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = 1.8544 \frac{P}{d^2} \quad (3.1)$$

Dimana

HV = *Hardness Vickers*

P = Beban (kgf)

α = sudut 2 sisi yang berhadapan pada *indenter*

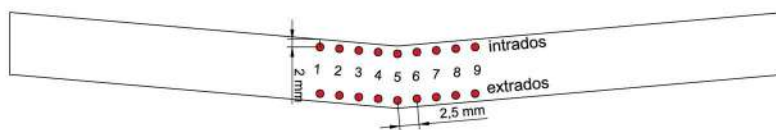
d = diagonal *indentasi* rata rata (mm)

Peralatan untuk dilakukannya *hardness test* sebagai berikut :

8. Spesimen uji.
9. Mesin uji kekerasan.
10. *Indentor piramid intan.*
11. *Polishing machine.*
12. Kertas poles.
13. Tisu.

Langkah kerja pengujian sebagai berikut :

- a. Permukaan spesimen yang akan di uji dihaluskan dengan mesin poles menggunakan kertas poles grit 600, 800, 1000, dan 2000.
- b. Setelah dipoles, material dikeringkan menggunakan tisu.
- c. Spesimen di celupkan ke dalam larutan etsa.
- d. Setelah dilakukan etsa, melakukan penentuan titik dilakukannya pengujian *hardness*, yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 6 Titik Pengujian *Hardness*

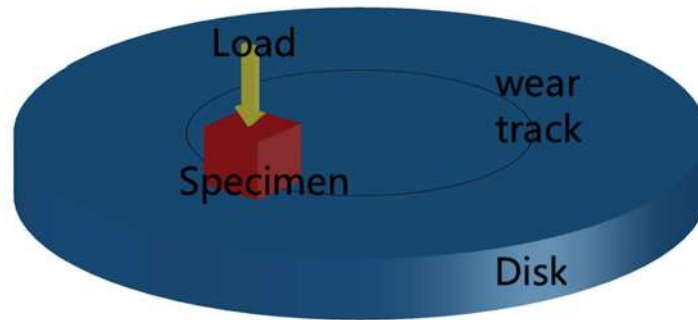
- e. Mesin *hardness Vickers* dinyalakan.
- f. Beban *indentor* yang akan digunakan dalam pengujian ditentukan, meliputi jenis dan diameter *indentor*. Pada pengujian ini menggunakan beban sebesar 15 kgf
- g. *Dwell time* diatur selama 15 detik.
- h. Spesimen uji diletakan pada ragum dan fokus diatur ke daerah yang akan di uji.
- i. Setelah semua sudah dilakukan dan spesimen sudah diencangkan, pengujian dapat dilakukan dengan menekan tombol start.
- j. Diameter diukur dan nilai kekerasan yang tertera di mesin dicatat.
- k. Mengulangi setiap langkah (f sampai j) untuk titik yang telah di tentukan.

3.7.2 Pengujian Keausan

Kontak fisik antara satu material dengan material yang lain secara terus menerus dapat menyebabkan kerusakan keausan material. Keausan didefinisikan proses hilangnya material secara bertahap dari permukaan suatu benda akibat bergesekan dengan permukaan lain.

Pembebanan gesek menimbulkan kontak berulang antar permukaan yang saling berinteraksi, sehingga menyebabkan terlepasnya sebagian material dari permukaan benda uji. Tingkat keausan suatu material ditentukan berdasarkan besarnya jejak atau perubahan permukaan akibat proses gesekan tersebut. Keausan sendiri telah lama menjadi perhatian, namun dalam jangka waktu tertentu belum banyak dikaji secara ilmiah karena pada praktiknya penggantian komponen dianggap lebih mudah dibandingkan upaya peningkatan ketahanan dan umur pakainya melalui modifikasi material.

Ada beberapa metode pengujian keausan, namun pengujian kali ini menggunakan metode *pin on disk* dengan alat tribotester. Tribotester merupakan perangkat alat uji yang digunakan untuk mengetahui nilai koefisien gesek, gaya gesek dan volume deformasi yang terjadi antara dua material yang saling kontak, dengan nilai tersebut didapatkan nilai keausan dari suatu material, ketahanan sifat material, umur optimal material dan acuan dalam perawatan dan pemeliharaan. (Sulistiono & Umarsyah, 2021) Uji keausan *abrasif pin-on-disk* (POD) melibatkan keausan abrasif dua benda dengan tegangan tinggi. Salah satu ujung spesimen *pin* digerakkan di atas kertas abrasif, mengikis material dari spesimen dan menghancurkan butiran abrasif yang terpasang. (Hawk et al., 1999) Metode *pin on disc* bekerja dengan menggunakan sebuah pin sebagai salah satu material uji dan sebuah cakram (*disc*) sebagai pasangan geseknya. Cakram diputar dengan kecepatan tertentu, sementara *pin* diberi beban sehingga menekan permukaan cakram dan menghasilkan gaya gesek. Pada sebagian besar desain tribometer, posisi *pin* dibuat tetap, namun terdapat pula variasi alat di mana *pin* dapat bergerak mengikuti arah tertentu selama pembebanan. Menurut (ASTM G99, 2017) hasil dari pengujian keausan adalah volume keausan berbanding dengan jarak *track* keausan. pengujian keausan *pin on disk* sesuai dengan Gambar 3.5



Gambar 3. 7 Sistem Pengujian Keausan Metode *Pin On Disk*.

Berat keausan dan volume keausan dapat dihitung menggunakan persamaan (3.2) dan (3.3) untuk faktor keausan dapat dihitung dengan persamaan (3.4) dan (3.5). Pengujian keausan menggunakan mesin tribotester *pin on disc* dengan standar ASTM G132 (*Standard Test Method for Pin Abrasion Testing*).

$$\text{Berat keausan(gram)} = \text{Beratawal(gram)} - \text{berataakhir(gram)} \quad (3.2)$$

$$\text{Vol. keausan(mm}^3\text{)} = \frac{\text{Berat keausan(gram)}}{\text{Berat jenis}\left(\frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}\right)} \quad (3.3)$$

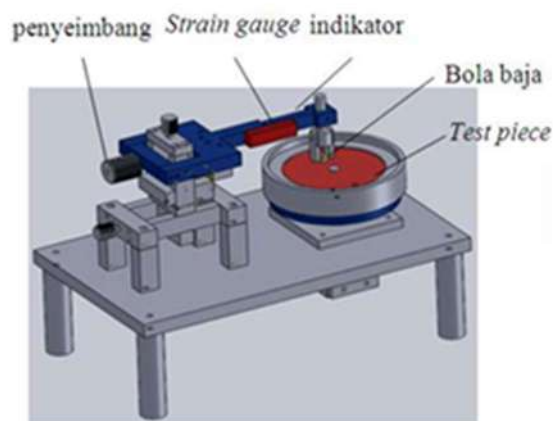
$$\text{Jarak tempuh} = \text{Keliling track(mm)} \times \text{putaran mesin(RPM)} \times \text{waktu uji(menit)} \quad (3.4)$$

$$\text{Faktor keausan}\left(\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}\right) = \frac{\text{volume keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban(N)} \times \text{jarak tempuh (m)}} \quad (3.5)$$

Ketahanan aus pada pengujian *pin-on-disc* didefinisikan sebagai kemampuan material *pin* untuk menahan kehilangan massa atau volume akibat gesekan kontinu dengan permukaan *disc* yang berputar di bawah beban tertentu. Selama pengujian, material mengalami kontak geser berulang yang menyebabkan terjadinya mekanisme keausan seperti keausan adhesif dan *abrasif*. Ketahanan aus dievaluasi berdasarkan kecilnya nilai faktor keausan yang terjadi setelah pengujian, yang umumnya dinyatakan dalam bentuk kehilangan massa, volume keausan, atau nilai faktor keausan. Semakin kecil volume keausan atau semakin rendah faktor keausan yang dihasilkan, maka semakin tinggi ketahanan aus material tersebut.

Uji keausan *Pin-On-Disc* memiliki beberapa komponen yaitu *pin* yang ujungnya berbentuk bola atau flat yang terbuat dari bahan material tertentu

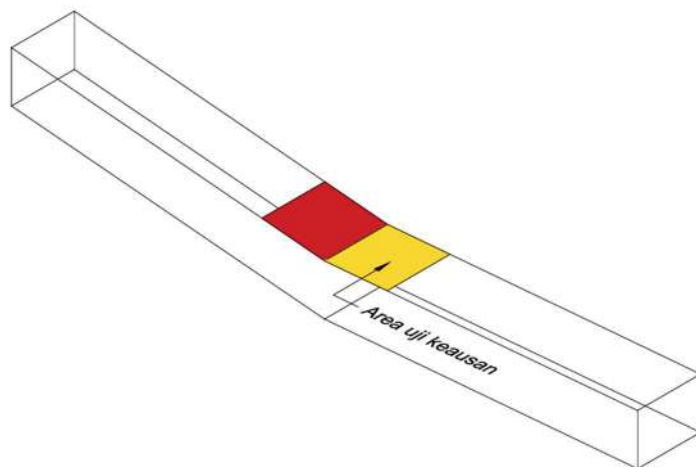
yang diinginkan untuk pengujian tersebut dan *disc* berbentuk piringan yang juga terbuat dari bahan material yang diinginkan. (Darmanto et al., 2014) Spesimen dikenai beban dan bergesekan dengan sebuah cakram yang berputar. Kontak antara spesimen dan cakram akan membuat penurunan berat akibat dari gesekan kedua benda tersebut. ilustrasi dari pengujian tribotester dengan metode *pin on disk* dapat dilihat pada Gambar 3.6



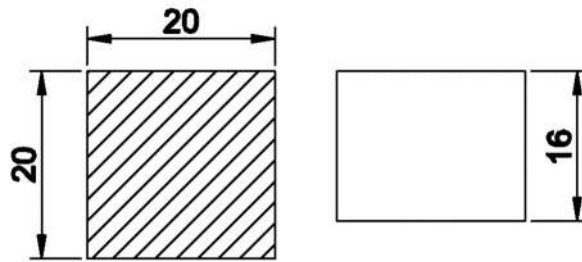
Gambar 3. 8 Metode Pengujian *Tribotester Pin On Disk*
(Armanto et al., 2012)

Langkah-langkah dari pengujian keausan sebagai berikut :

14. Melakukan persiapan spesimen dengan dimensi dan bentuk seperti pada Gambar 3.7 dan area yang merah merupakan daerah 1 yang akan diuji dan area kuning merupakan daerah 2 yang akan diuji. Dengan ukuran spesimen 20 mm x 20 mm x 16 mm seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 9 Area Spesimen Uji Keausan.



Gambar 3. 10 Dimensi Spesimen Uji Tribotester

15. Melakukan penimbangan sebelum proses pengujian guna mengetahui berat spesimen awal sebelum pengujian.
16. Melakukan penimbangan berat *stand holder* ditambah dengan beban sehingga memiliki beban total yaitu 300 gram.
17. Melakukan pemasangan *stand holder* pengujian dengan metode pengeleman sampai benar-benar kuat.
18. Melakukan pengaturan *rpm* pada mesin sehingga mendapatkan *rpm* sebesar 500 putaran per menit.
19. Spesimen diletakan pada mesin uji dan mesin uji dinyalakan dengan menekan Tombol ON.
20. Tunggu sampai 1 menit dan kemudian lepas spesimen dan bersihkan lem dari spesimen sampai benar-benar bersih.
21. Melakukan penimbangan spesimen sesudah pengujian.
22. Dilakukannya perhitungan selisih berat sebelum dan sesudah pengujian serta dilakukan perhitungan untuk mendapatkan faktor keausan.

3.7.3 Micro Test

Pengujian mikro struktur adalah pengujian dengan mengamati struktur mikroskopis logam dan paduan menggunakan mikroskop optik, mikroskop elektron atau jenis mikroskop lainnya. Berdasarkan (M.M. Munir et al., 2019) pengujian metalografi dapat menganalisis mulai dari *Grain size*, Analisa fasa; *intergranular corrosion attack*; *Inclusion size, shape, dan distribution*; *Weld* dan *Heat affected zone*; *Carburizing, Nitriding thickness*; *Decarburization*,

dan *micro crack* dan *porosity*. Pengujian mikro dilakukan dengan mikroskop dengan pembesaran x 50 sampai dengan x 500 dengan atau tanpa proses etsa.

Proses etsa adalah proses pengikisan permukaan spesimen menggunakan larutan kima dengan kadar asam yang tinggi dengan tujuan meningkatkan visibilitas optik dari struktur mikro logam. Komposisi kimia untuk *etching reagent* adalah picral yaitu 4 g picric acid, dan 100 ml ethyl alkohol. Sesuai panduan yang ada pada (M.M. Munir et al., 2019). Karena komposisi kimia tersebut cocok untuk semua baja karbon untuk melihat hasil dari *annealed*, *normalized*, *quenched*, *tempered* *spheroidized*, dan *austempered*.

Pada penelitian ini pengujian mikro bertujuan untuk melihat perubahan mikro struktur akibat pemanasan material Hardox 500 dan juga untuk mengidentifikasi apakah terdapat cacat pada area *bending* terutama *micro crack*.

Alat dan bahan yang digunakan dalam pengujian mikro sebagai berikut :

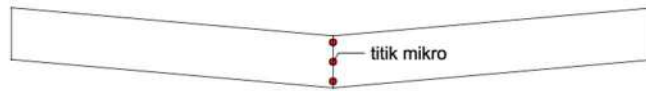
1. Spesimen uji
2. *Microscope optic*.
3. Kertas poles dengan grit 600, 800, 1000, dan 1500.
4. Kain wool.
5. Serbuk alumina.
6. Larutan etsa.
7. Kain bersih.
8. Mesin poles.
9. *Dryer*.
10. Cawan kimia.
11. Pipet.

Langkah pengerjaan pada pengujian *micro* sebagai berikut :

1. Persiapan dan Pengujian
 - a. Kertas gosok dengan grit paling kasar (600) dan dipasang pada mesin poles.
 - b. Mesin poles dinyalakan, dan katup air dibuka sedikit hingga membasahi kertas poles yang digunakan.

- c. Spesimen ditempekan pada kertas poles dan digosokkan pada kertas poles serta terus dialiri sama air.
 - d. Permukaan diangkat dan diamati, serta dipastikan bahwa gosokan pada material sudah sesuai dengan orientasi putar pada mesin poles.
 - e. Setelah dirasa hasil polesan sudah searah, mesin poles dan katup air dimatikan dan mengganti kertas poles yang lebih halus seperti 800, 1000, dan 1500 sesuai yang sudah disiapkan. Ulangi langkah a sampai d.
 - f. Setelah semua proses pemolesan dilakukan, mesin dan katup air dimatikan dan spesimen dicuci dengan cairan alkohol.
 - g. Setelah spesimen bersih, langkah selanjutnya memasang kain *wool* ke mesin poles, menyalakan katup air dan menyalakan mesin poles.
 - h. Spesimen diolesi dengan serbuk alumina dan dipoles hingga permukaan halus.
 - i. Diamati permukaan spesimen tidak ada bekas goresan akibat gosokan pada proses sebelumnya dan menjadi kinclong seperti cermin.
 - j. Keringkan spesimen dengan menggunakan air dan alkohol lalu keringkan menggunakan *dryer*.
2. Proses etsa
 - a. Alat yang diperlukan proses etsa adalah pipet, cawan kimia, dan *dryer* disiapkan.
 - b. Larutan etsa disiapkan dengan pipet pada cawan kimia.
 - c. Spesimen dimasukkan ke dalam cawan kimia dalam beberapa detik, kemudian dicuci dengan air.
 - d. Spesimen dikeringkan menggunakan *dryer*.
 3. Pengamatan mikroskop
 - a. Spesimen diletakan pada bawah lensa mikroskop optik dengan permukaan rata.

- b. Pembesaran lensa diatur, lampu dinyalakan, dan fokus diatur untuk pengamatan mikro strukturnya.
- c. Titik uji mikro strukture



Gambar 3. 11 Titik Uji Mikro Struktur

- d. Foto struktur mikronya dan dianalisis.

3.8 Analisa dan Pembahasan

Setelah melakukan semua rangkaian penelitian mulai dari persiapan material, proses *bending*, dan pengujian. Maka sudah didapatkan data yang akan dilakukan analisa (Mishra et al., 2019) sehingga membuktikan hasil dari variasi sudut *bending* dan temperatur *preheat* pada proses *bending* material hardox 500 terhadap nilai kekerasan, struktur mikro dan nilai keausan atau *wear ability*

3.8.1 Menganalisis Data Uji Anova

Pengujian pengaruh penelitian ini adalah menggunakan analisis Anova (Analysis of Variance). Analisis anova adalah metode statistik yang digunakan dalam pengujian hipotesis untuk perbandingan rata-rata antar kelompok. (Mishra et al., 2019). Pada analisis anova terbagi menjadi 2 jenis analisis yaitu one-way anova dan two-way anova.

Pada penelitian ini menggunakan analisis variasi dua arah (Two Way Anova). Analisis variasi dua arah merupakan metode statistik yang digunakan untuk menguji perbedaan rata-rata serta pengaruh perlakuan dari dua faktor independen terhadap satu atau lebih variabel respon, dengan masing-masing faktor memiliki dua atau lebih tingkat perlakuan. Pada penelitian ini, metode Two-Way ANOVA digunakan untuk mengevaluasi pengaruh sudut *bending* dan temperatur *preheat* terhadap kekerasan material dan ketahanan aus. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh masing-masing faktor serta interaksi di antara keduanya terhadap sifat mekanik material yang diuji.

3.9 Kesimpulan

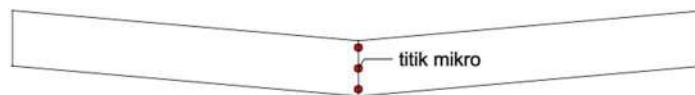
Hasil penelitian ini diperoleh melalui proses evaluasi yang telah dilakukan. Apabila ditemukan kelemahan atau keterbatasan yang memengaruhi hasil penelitian, maka akan disampaikan rekomendasi sebagai upaya perbaikan agar hasil yang diperoleh lebih selaras dengan tujuan yang diharapkan.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

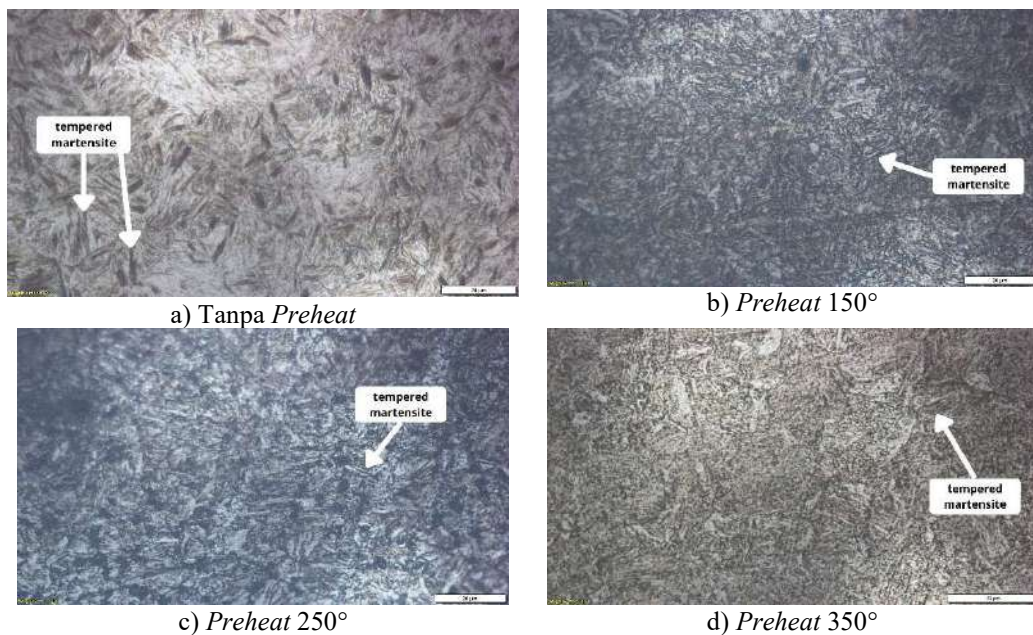
4.1 Hasil Pengujian Struktur mikro

Setelah proses *hot bending*, material diuji secara metalografi untuk mengamati perubahan struktur mikro akibat pengaruh temperatur dan deformasi selama proses pembengkokan. Pengamatan dilakukan pada tiga lokasi, yaitu bagian atas, tengah, dan bawah spesimen sesuai Gambar 4.1. yang bertujuan untuk membandingkan struktur mikro pada daerah yang menerima panas lebih tinggi dan lebih rendah. Pengujian ini bertujuan mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi akibat proses *hot bending*. Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop dengan pembesaran 1000×. Hasil pengamatan struktur mikro disajikan sebagai berikut.

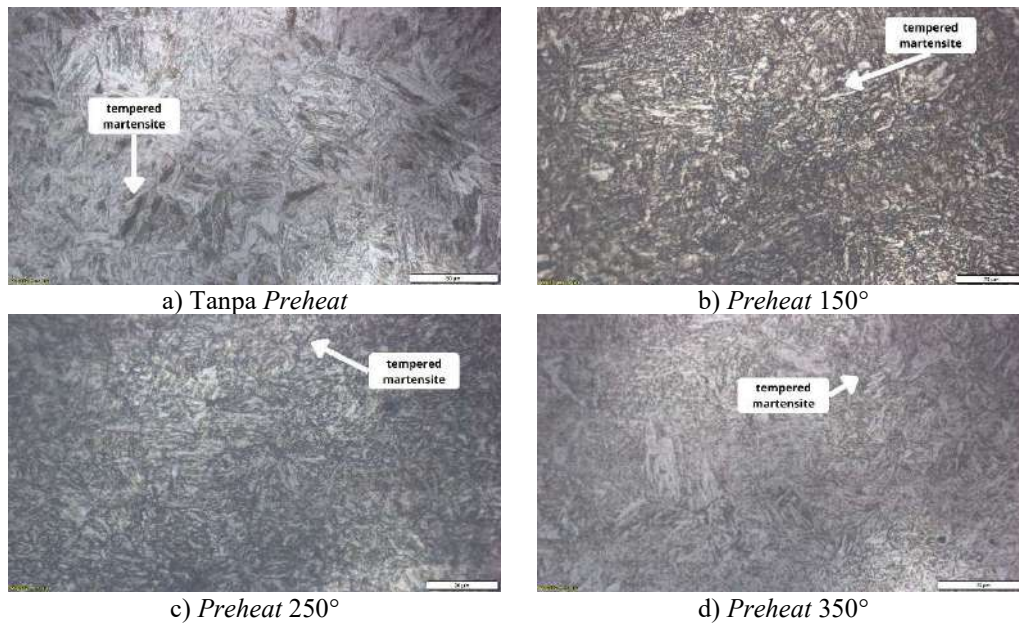


Gambar 4. 1 Daerah Uji Mikro

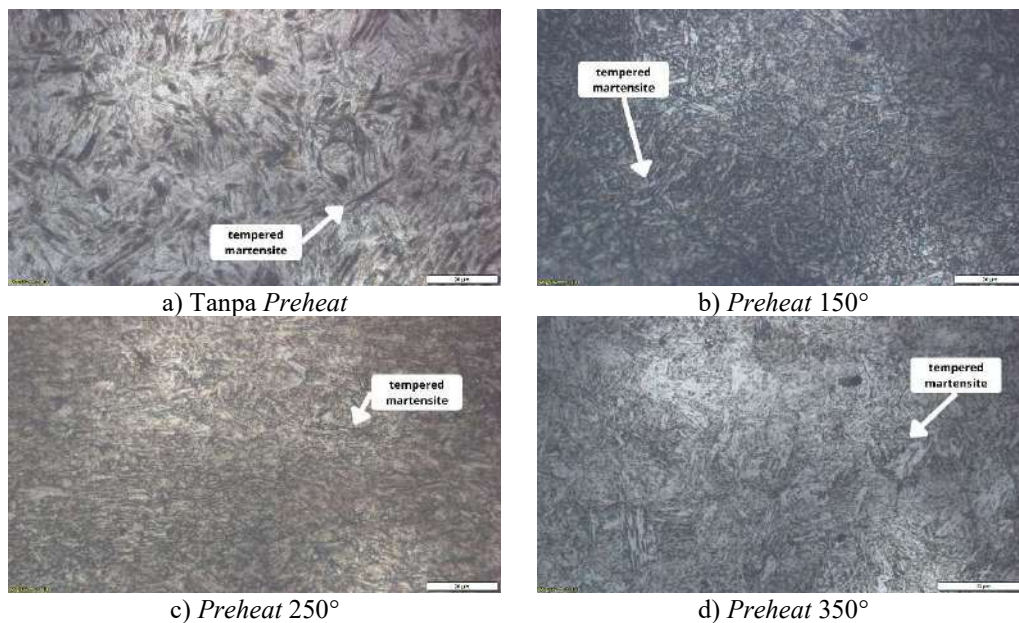
A. Hasil uji mikrostruktur bagian atas



Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Atas Sudut Bending 2,5° a) Tanpa Preheat, b) Preheat 150°, c) Preheat 250°, dan d) Preheat 350°



Gambar 4. 3 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Atas Sudut Bending 5° a) Tanpa *Preheat*, b) *Preheat* 150°, c) *Preheat* 250°, dan d) *Preheat* 350°



Gambar 4. 4 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Atas Sudut Bending 10° a) Tanpa *Preheat*, b) *Preheat* 150°, c) *Preheat* 250°, dan d) *Preheat* 350°

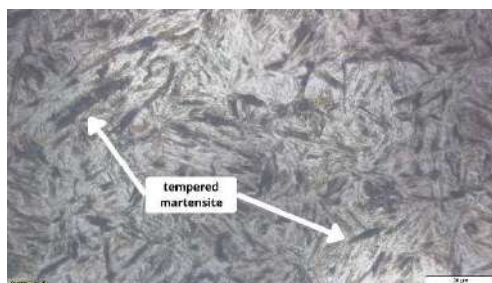
Berdasarkan Gambar 4.1 hingga Gambar 4.3, hasil pengamatan struktur mikro pada variasi sudut bending 2,5°, 5°, dan 10° menunjukkan bahwa seluruh spesimen didominasi oleh struktur mikro tempered lath martensite dengan indikasi adanya

bainite. Struktur tempered lath martensite tampak berupa lath-lath memanjang yang tersusun dalam paket (packet), sedangkan bainite memiliki morfologi berbentuk berkas (*sheaf*) yang tersusun atas lath ferrite. Pada pengamatan menggunakan mikroskop optik, kedua struktur tersebut memberikan penampakan menyerupai jarum (*needle-like appearance*) dan berkas lath, sehingga pada beberapa kondisi keduanya sulit dibedakan hanya berdasarkan morfologi optik (ASM International, 2004; Bhadeshia & Honeycombe, 2017).

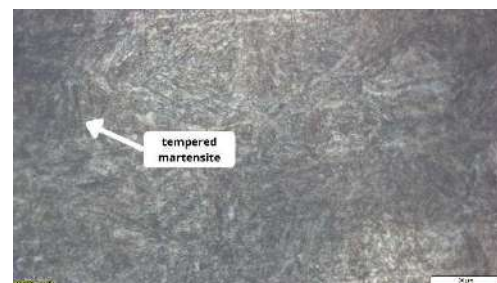
Pada spesimen tanpa preheat, lath martensite masih tampak jelas dengan batas antar lath yang tegas serta kontras yang tinggi. Sementara itu, pada spesimen dengan temperatur preheat 150°C, 250°C, dan 350°C, struktur mikro tampak semakin homogen dengan batas antar lath yang mulai kabur (*fuzzy*) dan kontras antar lath yang menurun. Perubahan morfologi tersebut menunjukkan terjadinya proses tempering lanjutan (*re-tempering*) selama preheating, yang menyebabkan relaksasi tegangan sisa serta presipitasi karbida halus pada matriks martensit.

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian (Wen et al., 2019), yang melaporkan bahwa struktur mikro baja setelah proses quenching didominasi oleh martensit. Seiring meningkatnya temperatur tempering, morfologi lath martensite mengalami perubahan yang ditandai dengan semakin kaburnya batas lath dan batas butir (*fuzzy*). Fenomena yang sama juga diamati pada penelitian ini, yaitu peningkatan temperatur preheat menyebabkan morfologi tempered lath martensite menjadi lebih homogen, batas antar lath semakin kurang tegas, serta diikuti oleh penurunan nilai kekerasan akibat proses tempering lanjutan.

B. Hasil Uji Mikrostruktur Bagian tengah



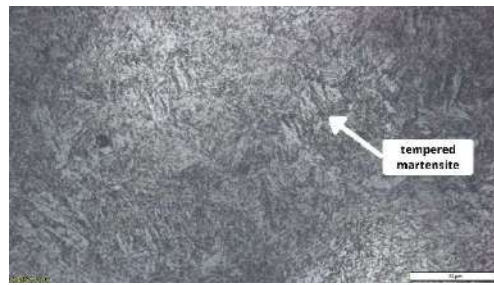
a) Tanpa Preheat



b) Preheat 150°



c) *Preheat 250°*



d) *Preheat 350°*

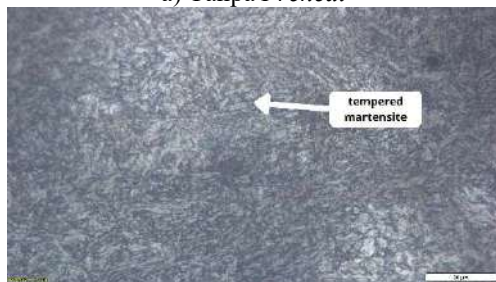
Gambar 4. 5 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Tengah Sudut Bending 2,5° a) Tanpa *Preheat*, b) *Preheat 150°*, c) *Preheat 250°*, dan d) *Preheat 350°*



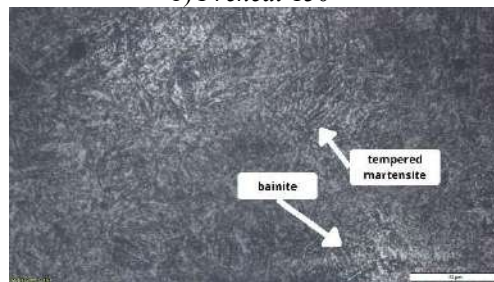
a) Tanpa *Preheat*



b) *Preheat 150°*

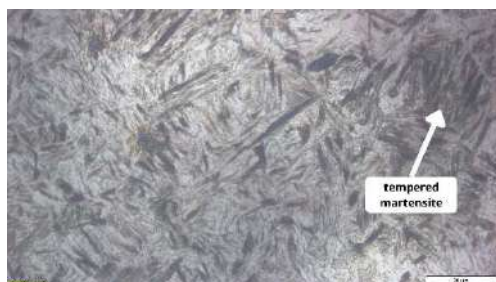


c) *Preheat 250°*

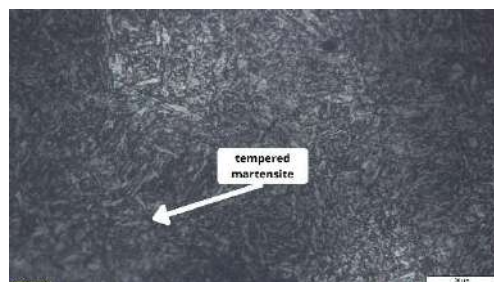


d) *Preheat 350°*

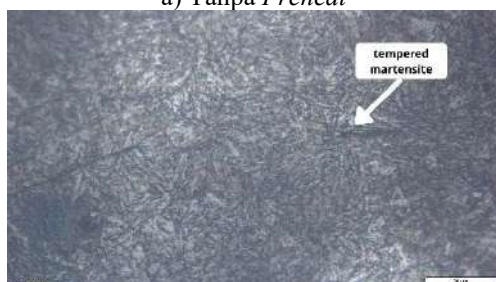
Gambar 4. 6 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Tengah Sudut Bending 5° a) Tanpa *Preheat*, b) *Preheat 150°*, c) *Preheat 250°*, dan d) *Preheat 350°*



a) Tanpa *Preheat*



b) *Preheat 150°*



c) *Preheat 250°*

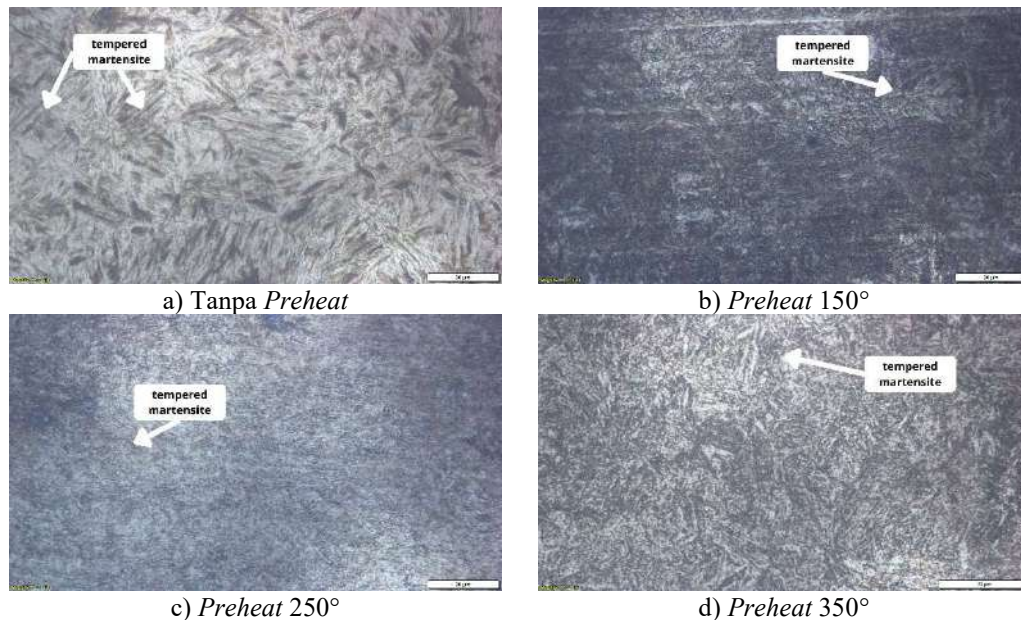


d) *Preheat 350°*

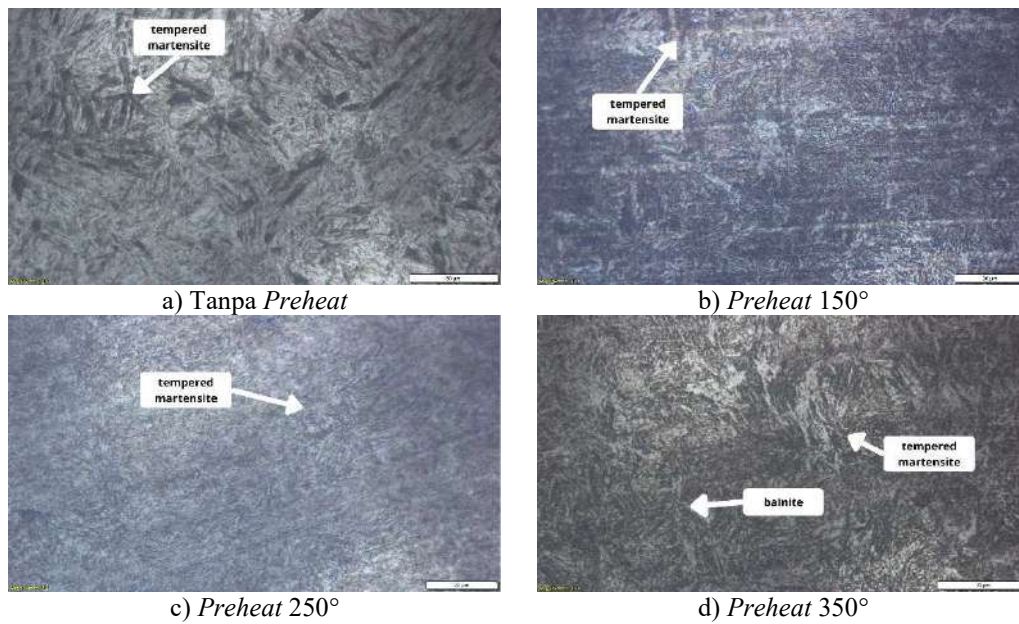
Gambar 4. 7 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Tengah Sudut *Bending* 10° a) Tanpa *Preheat*, b) *Preheat* 150°, c) *Preheat* 250°, dan d) *Preheat* 350°

Berdasarkan Gambar 4.4 hingga Gambar 4.6, hasil pengamatan struktur mikro pada bagian tengah untuk seluruh variasi sudut bending 2,5°, 5°, dan 10° menunjukkan bahwa struktur mikro masih didominasi oleh tempered lath martensite dengan indikasi adanya bainite yang bermorfologi *sheaf* (berkas). Pada spesimen tanpa preheat (0°C), lath martensite masih tampak jelas dengan batas antar-lath yang tegas serta memberikan penampakan menyerupai jarum (*needle-like appearance*) pada pengamatan menggunakan mikroskop optik. Seiring meningkatnya temperatur preheat menjadi 150°C, 250°C, dan 350°C, struktur mikro tampak semakin homogen yang ditandai dengan berkurangnya kontras serta semakin kaburnya batas antar-lath akibat proses *re-tempering*. Perubahan morfologi pada bagian tengah tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan bagian atas. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa peningkatan temperatur preheat menyebabkan struktur tempered lath martensite menjadi lebih homogen tanpa mengubah morfologi dasarnya, sedangkan morfologi bainite yang teramati juga tidak menunjukkan perubahan yang signifikan.

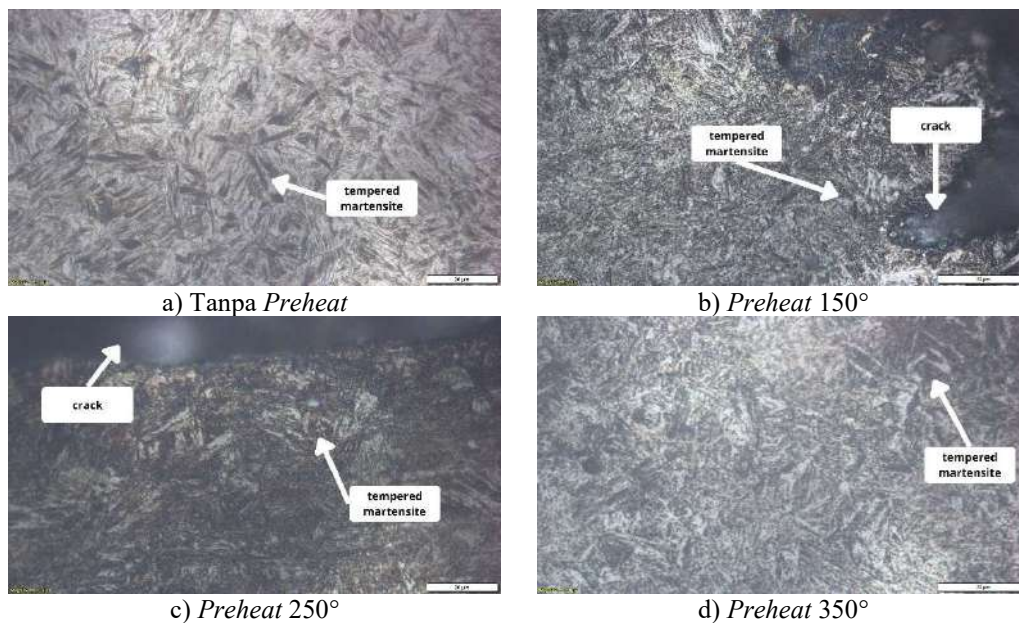
C. Hasil mikrostruktur bagian bawah



Gambar 4. 8 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Bawah Sudut *Bending* 2,5° a) Tanpa *Preheat*, b) *Preheat* 150°, c) *Preheat* 250°, dan d) *Preheat* 350°



Gambar 4. 9 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Bawah Sudut Bending 5° A) Tanpa Preheat, B) Preheat 150°, C) Preheat 250°, Dan D) Preheat 350°



Gambar 4. 10 Hasil Pengujian Mikrostruktur Bagian Bawah Sudut Bending 5° A) Tanpa Preheat, B) Preheat 150°, C) Preheat 250°, Dan D) Preheat 350°

Berdasarkan Gambar 4.7 sampai 4.9 terjadi Perbedaan tampilan mikrostruktur pada daerah bawah (*ekstrados*) yang dipengaruhi oleh deformasi plastis akibat proses *bending*. Regangan tarik pada daerah bawah (*ekstrados*) meningkatkan pergerakan dan akumulasi dislokasi sehingga menyebabkan distorsi kisi kristal. Kondisi tersebut mengakibatkan morfologi lath tempered martensite tampak sedikit berbeda atau lebih kurang tegas dibandingkan daerah yang menerima deformasi

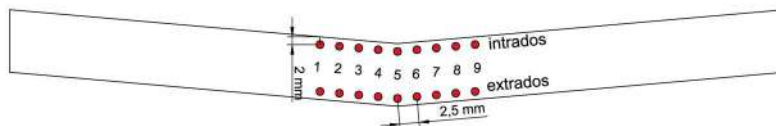
lebih kecil. Selain itu, pengaruh temperatur preheat selama proses hot *bending* turut berkontribusi terhadap perubahan morfologi melalui proses tempering. sesuai dengan buku yang ditulis oleh (Ir. Wahid Suherman, 2003) deformasi plastis selama proses pembentukan logam menyebabkan pergerakan dan penumpukan dislokasi yang mengakibatkan distorsi kisi kristal. Pada proses *hot working*, apabila temperatur dan waktu penahanan mencukupi hingga mencapai temperatur rekristalisasi, dapat terjadi rekristalisasi. Namun, pada penelitian ini temperatur *preheat* maksimum hanya mencapai 350°C sehingga perubahan mikrostruktur yang diamati lebih didominasi oleh proses tempering lanjutan daripada rekristalisasi.

Berdasarkan Tabel 4.3 Pada variasi *preheat* 150°C dan 250°C sudut *bending* 10° terjadi retak (*crack*) selama proses *hot bending* meskipun hasil pengamatan struktur mikro masih menunjukkan dominasi struktur tempered martensite. Hal ini mengindikasikan bahwa retak yang terjadi tidak berkaitan dengan perubahan fasa, melainkan dipengaruhi oleh distribusi temperatur yang tidak merata akibat proses pemanasan lokal (*localized heating*) menggunakan oxy-acetylene torch. Perbedaan temperatur antara daerah yang dipanaskan dan daerah di sekitarnya menyebabkan terbentuknya gradien temperatur (*thermal gradient*). Gradien temperatur tersebut menimbulkan perbedaan pemuaian termal pada material sehingga menghasilkan tegangan termal (*thermal stress*). Selama proses *bending*, tegangan termal tersebut bekerja bersamaan dengan tegangan mekanik akibat deformasi plastis akibat proses *bending*, sehingga meningkatkan konsentrasi tegangan pada daerah *bending* dan menginisiasi terjadinya retak. Mekanisme ini sejalan dengan penelitian Li et al. (2025) yang melaporkan bahwa konsentrasi *thermal stress* dapat memicu terbentuknya *slip band*, *microcrack*, serta mempercepat inisiasi dan perambatan retak. Selain itu, Maruyama et al. (2025) menjelaskan bahwa retak pada baja martensitik selama proses bending diawali oleh deformasi lokal yang terkonsentrasi pada *shear band* sehingga menghasilkan konsentrasi tegangan di daerah puncak *bending* (*bend apex*) yang kemudian berkembang menjadi retak permukaan.

4.2 Hasil Pengujian Hardness

Pada penelitian ini dilakukan pengujian kekerasan (*hardness test*) untuk mengetahui perubahan nilai kekerasan material Hardox 500 setelah mengalami

proses *hot bending*. Pengujian dilakukan menggunakan metode Vickers Hardness Test dengan beban sebesar 10 kgf (HV10) dan dwell time 15 detik. Pengukuran kekerasan dilakukan pada beberapa titik di sisi intrados dan extrados spesimen untuk mengevaluasi distribusi kekerasan akibat pengaruh temperatur pemanasan dan deformasi selama proses *hot bending*. Lokasi titik-titik pengujian kekerasan ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 11 Lokasi Titik Pengujian Kekerasan

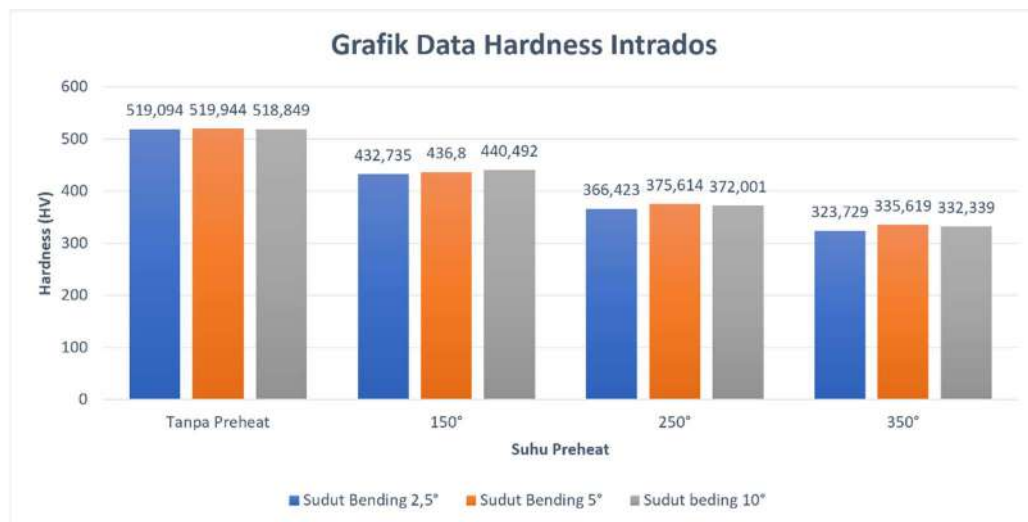
Tabel 4. 1 Hasil Nilai *Hardness* Vickers

load 10 kgf												
dwell time = 15 sec												
Preheat	Sudut bending	Area	Lokasi									Rata - rata (HVN)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Tanpa Preheat	2,5	intrados	518,47	520,95	517,11	518,2	515,47	515,74	520,12	524,84	520,95	519,094
		extrados	512,22	509,01	515,47	510,88	509,81	510,88	510,61	515,2	514,11	512,021
	5	intrados	520,95	518,47	517,65	522,06	519,57	523,44	521,23	518,75	517,38	519,944
		extrados	523,44	520,12	519,85	522,06	521,23	523,72	522,06	526,52	525,68	522,742
	10	intrados	513,03	520	517,65	514,39	515,2	519,3	523,72	525,12	521,23	518,849
		extrados	510,61	512,76	511,96	513,3	518,2	512,49	520,67	518,2	513,3	514,610
Preheat 150 °	2,5	intrados	432,47	439,66	433,1	436,05	430,18	434,99	430,18	432,26	425,25	432,735
		extrados	464,68	462,35	458,67	458,59	459,72	458,72	456,62	466,38	466,29	461,336
	5	intrados	433,94	439,66	433,31	431,43	437,74	436,66	441,38	443,98	433,1	436,800
		extrados	452,35	455,72	459,13	456,4	459,13	449,68	453,92	452,57	452,8	454,633
	10	intrados	443,33	439,66	447,69	440,74	434,99	437,74	438,59	440,31	441,38	440,492
		extrados	465,83	469,11	464,66	466,29	468,94	468,94	465,83	467,72	469,11	467,381
Preheat 250 °	2,5	intrados	367,04	361,71	361,55	366,71	370,99	367,04	365,9	362,03	374,84	366,423
		extrados	407,5	410,19	409,61	411,35	412,9	410	414,07	411,54	409,42	410,731
	5	intrados	373,49	374,33	371,15	371,65	371,82	379,6	377,55	380,48	380,46	375,614
		extrados	401,64	404,27	398,11	399,78	398,67	397,01	397,19	398,11	402,77	399,728
	10	intrados	366,22	371,65	374,16	371,49	369,99	376,19	370,99	373,32	372,99	372,001
		extrados	395,73	398,85	399,59	395,18	405,5	403,61	399,59	404,46	400,52	400,337
Preheat 350 °	2,5	intrados	326,94	325,94	325,25	324,03	323,22	320,4	323,22	321,47	323,09	323,729
		extrados	361,55	361,39	366,39	365,73	367,38	364,78	369,99	365,73	363,15	365,121
	5	intrados	330,21	335,15	333,16	336,15	334,72	331,47	337,87	340,48	341,36	335,619
		extrados	358,22	359,16	359,48	358,85	360,11	363,79	364,28	362,51	359,01	360,663
	10	intrados	336,15	334,29	332,46	330,91	332,6	331,47	331,19	332,88	329,1	332,339
		extrados	371,15	376,87	376,19	369	369,66	367,53	367,41	375,34	373,99	371,904

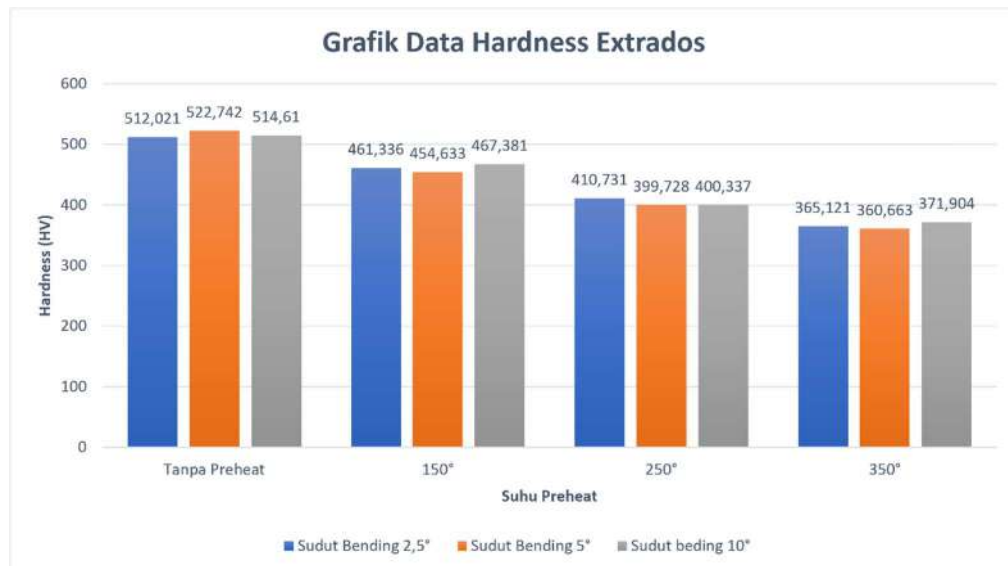
fSumber : Data Pribadi

Untuk mempermudah pembacaan dan interpretasi data hasil pengujian kekerasan Vickers yang disajikan pada Tabel 4.1, maka data tersebut ditampilkan kembali dalam bentuk grafik. Penyajian grafik bertujuan untuk memperjelas kecenderungan perubahan nilai kekerasan akibat variasi temperatur *preheat* dan sudut *bending* pada material Hardox 500. Melalui grafik, hubungan antara

peningkatan temperatur preheat terhadap penurunan nilai kekerasan pada daerah *intrados* dan *ekstrados* dapat diamati dengan lebih jelas. Grafik disajikan berurutan pada Gambar 4.2 Menunjukkan Grafik data *hardness* pada area *Intrados* dan Pada Gambar 4.3 Menunjukkan Grafik data *Hardness* pada area *extrados*.



Gambar 4. 12 Grafik Data Hardness Pada Area Intrados



Gambar 4. 13 Grafik Data Hardness pada Area Extrados

Berdasarkan Tabel 4.4, nilai kekerasan Hardox 500 menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan meningkatnya temperatur *preheat* pada seluruh variasi sudut *bending*, baik pada daerah *intrados* maupun *ekstrados*. Pada kondisi tanpa *preheat* (0°C), nilai kekerasan berada pada kisaran 512–522 HV, yang masih sesuai dengan *datasheet* Hardox 500 dengan rentang kekerasan 470–530 HV

(SSAB, 2023b). Nilai tersebut menunjukkan bahwa material masih mempertahankan karakteristiknya sebagai baja *quenched and tempered* yang didominasi oleh struktur tempered martensite. Setelah diberikan *preheat* 150°C, nilai kekerasan menurun menjadi sekitar 433–467 HV, kemudian kembali menurun pada temperatur 250°C hingga berkisar 366–411 HV, dan mencapai nilai terendah pada temperatur *preheat* 350°C, yaitu sekitar 323–372 HV.

Penurunan nilai kekerasan tersebut mengindikasikan terjadinya proses tempering lanjutan (*re-tempering*) akibat pemanasan selama proses *hot bending*. Hal ini didukung oleh hasil pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.1-4.10 yang menunjukkan bahwa morfologi lath tempered martensite menjadi semakin kurang tegas (*fuzzy*) seiring meningkatnya temperatur *preheat*. Hasil penelitian ini sejalan dengan (Wen et al., 2019), yang melaporkan bahwa peningkatan temperatur tempering menyebabkan batas-batas lath martensite menjadi semakin kabur dan diikuti oleh penurunan nilai kekerasan secara bertahap.

Selain pengaruh temperatur, perbedaan nilai kekerasan juga terlihat antara daerah *intrados* dan *ekstrados*. Pada seluruh variasi temperatur *preheat*, nilai kekerasan pada daerah *intrados* umumnya lebih rendah dibandingkan daerah *ekstrados*. Kondisi ini diduga disebabkan oleh proses pemanasan lokal (*localized heating*) yang dilakukan dari sisi *intrados* sehingga distribusi temperatur selama proses *hot bending* menjadi tidak merata. Akibatnya, daerah *intrados* menerima paparan panas yang lebih tinggi sehingga mengalami tempering yang lebih intensif dibandingkan daerah *ekstrados*. Fenomena serupa dilaporkan oleh (Kostryzhev et al., 2021), yang menyatakan bahwa pemanasan lokal pada baja martensitik dapat menghasilkan gradien mikrostruktur dan gradien kekerasan pada daerah yang terpengaruh panas.

Secara keseluruhan, peningkatan temperatur *preheat* dari 0°C hingga 350°C menyebabkan penurunan nilai kekerasan pada seluruh variasi sudut *bending*, yaitu 2,5°, 5°, dan 10°. Pola penurunan yang relatif serupa pada ketiga sudut tersebut menunjukkan bahwa temperatur *preheat* merupakan faktor yang lebih dominan memengaruhi perubahan nilai kekerasan dibandingkan variasi sudut *bending*.

4.3 Hasil Pengujian Keausan

Keausan merupakan hilangnya material dari permukaan benda secara bertahap akibat kontak mekanis dan gerakan relatif dengan permukaan lain. Prinsip pengujian ini adalah menghitung nilai keausan yang terjadi setelah spesimen diekspos dengan piringan abrasif yang berputar dengan kecepatan kurang lebih 500 rpm selama 1 menit. Parameter pengujian ketahanan aus akan ditampilkan pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4. 2 Parameter Pengujian Ketahanan Aus

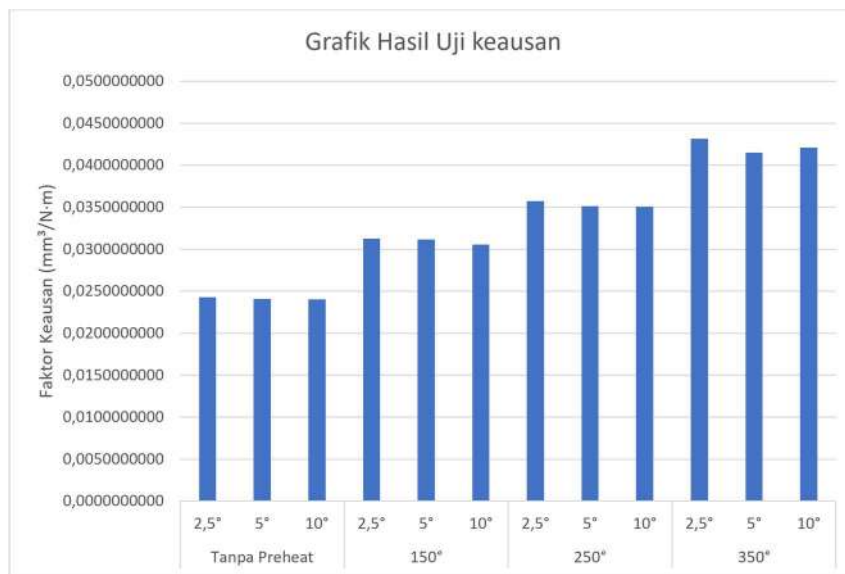
Beban	510,55 g = 5,008 N
Distance Radius	80,1 mm
Koefisien gesek kertas abrasif	Grit 60
Kecepatan purataran	500 rpm
Waktu pengujian	1 menit
Berat jenis baja	0,00785 g/mm ³ .
Jarak tempuh	251,7428571 m

Pengujian ketahanan aus dalam penelitian ini dilakukan mengacu pada standar ASTM G132 (*Standard Test Method for Pin Abrasion Testing*), yaitu metode standar yang digunakan untuk menguji seberapa tahan suatu material terhadap keausan akibat gesekan dengan membandingkan berat awal sebelum pengujian dan berat akhir setelah pengujian selesai dilakukan (ASTM, 1997). Perhitungan dilakukan menggunakan rumus yang ditunjukkan pada persamaan (3.2), (3.3), (3.4), dan (3.5). Hasil dari pengujian keausan dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Keausan

Preheat	Sudut Bending	Berat Awal (G)	Berat Akhir (G)	Berat Keausan (G)	Volume Keausan (Mm ³)	Faktor Keausan (Mm ³ /N·M)
Tanpa Preheat	2,5°	55,735	55,4947	0,2403	30,61146497	0,024278378
	5°	57,9185	57,6799	0,2386	30,39490446	0,024106621
	10°	55,8128	55,5749	0,2379	30,30573248	0,024035897
150°	2,5°	49,0133	48,704	0,3093	39,40127389	0,031249698
	5°	52,1355	51,827	0,3085	39,29936306	0,031168871
	10°	57,7722	57,4698	0,3024	38,52229299	0,030552566
250°	2,5°	51,4037	51,05	0,3537	45,05732484	0,03573559
	5°	56,7902	56,4424	0,3478	44,30573248	0,035139492
	10°	57,1546	56,8074	0,3472	44,22929936	0,035078872
350°	2,5°	48,0814	47,6545	0,4269	54,38216561	0,043131251
	5°	56,5568	56,1462	0,4106	52,30573248	0,041484403
	10°	56,0583	55,6415	0,4168	53,0955414	0,042110811

Sumber : Data Pribadi



Gambar 4. 14 Grafik Perbandingan Nilai Faktor Keausan

Berdasarkan hasil pengujian keausan pada Tabel 4.3, seluruh variasi sudut *bending* menunjukkan kecenderungan peningkatan faktor keausan seiring meningkatnya temperatur *preheat*. Pada ketiga variasi sudut *bending* (2,5°, 5°, dan 10°), faktor keausan meningkat secara bertahap dari kisaran 0,024 mm³/N·m pada kondisi tanpa *preheat* menjadi sekitar 0,031 mm³/N·m pada *preheat* 150°C, kemudian meningkat menjadi sekitar 0,035 mm³/N·m pada *preheat* 250°C, dan mencapai kisaran 0,042–0,043 mm³/N·m pada *preheat* 350°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *preheat* secara konsisten meningkatkan faktor keausan material Hardox 500. Semakin besar faktor keausan, semakin besar volume material yang hilang selama proses pengujian sehingga menunjukkan penurunan ketahanan aus material.

Peningkatan faktor keausan tersebut sejalan dengan hasil pengujian kekerasan yang menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *preheat* menyebabkan penurunan nilai kekerasan material. Penurunan kekerasan terjadi akibat proses pemanasan ulang (*reheating*) yang menyebabkan tempering lanjutan pada struktur martensit sehingga kemampuan material dalam menahan penetrasi partikel abrasif menjadi berkurang. Akibatnya, partikel abrasif lebih mudah mengikis permukaan material sehingga volume material yang terlepas semakin besar. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Ligier et al., 2024) terjadi hal serupa bahwa nilai *hardness* berbanding lurus dengan ketahanan aus material. Jadi

semakin tinggi nilai *hardness* maka semakin kecil juga faktor keausan material tersebut.

Secara keseluruhan, peningkatan temperatur *preheat* dari 0°C hingga 350°C menyebabkan peningkatan nilai faktor keausan pada seluruh variasi sudut *bending*. Hasil ini menunjukkan bahwa temperatur *preheat* merupakan faktor yang lebih dominan memengaruhi ketahanan aus dibandingkan variasi sudut *bending*. Peningkatan temperatur *preheat* menyebabkan penurunan nilai kekerasan akibat proses tempering pada struktur martensit, sehingga permukaan material menjadi lebih mudah mengalami pengikisan oleh partikel abrasif. Akibatnya, volume kehilangan material dan nilai faktor keausan meningkat. Hasil penelitian ini sejalan dengan (Wen et al., 2019) yang melaporkan bahwa peningkatan temperatur tempering menyebabkan perubahan pada struktur *tempered martensite* sehingga nilai kekerasan material menurun secara bertahap. Penurunan kekerasan tersebut mengurangi kemampuan material dalam menahan penetrasi partikel abrasif, sehingga ketahanan aus material ikut menurun.

4.4 Hasil Uji Analisis Two Way Anova

ANOVA Two-Way (Analysis of Variance) merupakan metode statistik yang digunakan untuk mengevaluasi pengaruh dua faktor independen terhadap variabel dependen secara simultan. Dalam analisis ini, setiap faktor memiliki dua atau lebih level, dan ANOVA Two-Way digunakan untuk menguji apakah terdapat perbedaan yang signifikan pada nilai rata-rata variabel dependen akibat masing-masing faktor. Selain itu, metode ini juga dapat digunakan untuk mengetahui adanya interaksi antara kedua faktor, yaitu apakah kombinasi kedua faktor memberikan pengaruh yang berbeda dibandingkan pengaruh masing-masing faktor secara terpisah. Hasil analisis ANOVA Two-Way meliputi nilai F dan Sig. untuk masing-masing faktor maupun interaksinya, yang digunakan untuk menentukan signifikansi statistik. Apabila nilai Sig. lebih kecil dari taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$), maka faktor tersebut dinyatakan berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen. Dalam pengujian hipotesis menggunakan ANOVA Two-Way, hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1) pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Faktor temperatur *preheat*

H₀₁: Variasi temperatur *preheat* tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan material Hardox 500.

H₁₁: Variasi temperatur *preheat* berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan material Hardox 500.

2. Faktor sudut bending

H₀₂: Variasi sudut *bending* tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan material Hardox 500.

H₁₂: Variasi sudut *bending* berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan material Hardox 500.

3. Interaksi Temperatur Preheat dan Sudut bending

H₀₃: Tidak terdapat interaksi yang signifikan antara temperatur *preheat* dan sudut *bending* terhadap nilai kekerasan material Hardox 500.

H₁₃: Terdapat interaksi yang signifikan antara temperatur *preheat* dan sudut *bending* terhadap nilai kekerasan material Hardox 500.

4.4.1 Hasil Nilai Kekerasan Pada Intrados

Analisis statistik dilakukan menggunakan Two-Way ANOVA untuk mengetahui pengaruh variasi sudut *bending* dan temperatur pemanasan terhadap nilai kekerasan (*Hardness*) pada daerah *intrados* material Hardox 500. Sebelum dilakukan analisis ANOVA, terlebih dahulu dilakukan pengujian asumsi berupa uji homogenitas.

Between-Subjects Factors			
		Value Label	N
sudut bending	1	2,5	36
	2	5	36
	3	10	36
temperatur	1	0	27
	2	150	27
	3	250	27
	4	350	27

Gambar 4. 15 Between-Subjects Factors

Tabel *Between-Subjects Factors* menunjukkan jumlah sampel yang digunakan pada setiap kombinasi perlakuan dalam penelitian. Variabel bebas yang digunakan terdiri atas sudut *bending* dan temperatur pemanasan,

sedangkan variabel terikat yang dianalisis adalah nilai kekerasan (*Hardness*) pada daerah *intrados*.

Variasi sudut *bending* terdiri dari tiga tingkat perlakuan, yaitu 2,5°, 5°, dan 10°, dengan masing-masing memiliki 36 data pengamatan. Sementara itu, variasi temperatur terdiri dari empat tingkat perlakuan, yaitu 0°C, 150°C, 250°C, dan 350°C, yang masing-masing memiliki 27 data pengamatan. Jadi terdapat 108 data pengamatan hasil *hardness* pada *intrados* material.

Levene's Test of Equality of Error Variances^{a,b}

		Levene Statistic	df1	df2	Sig. ^c
nilai hardness	Based on Mean	1.270	11	96	.253
	Based on Median	1.080	11	96	.386
	Based on Median and with adjusted df	1.080	11	78.324	.388
	Based on trimmed mean	1.269	11	96	.254

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Dependent variable: nilai hardness

b. Design: Intercept + sudut + temperatur + sudut * temperatur

c. Confidence Interval: 0%

Gambar 4. 16 Uji Homogenitas Varians (Levene's Test)

Sebelum dilakukan analisis Two-Way ANOVA, terlebih dahulu dilakukan uji homogenitas varians menggunakan *Levene's Test of Equality of Error Variances*. Uji ini bertujuan untuk mengetahui apakah varians data pada setiap kelompok perlakuan adalah sama (homogen). Salah satu asumsi utama dalam analisis Two-Way ANOVA adalah bahwa varians antar kelompok harus homogen.

Berdasarkan hasil uji *Levene* yang ditampilkan pada Gambar 4.6, diperoleh nilai Levene Statistic sebesar 1,270 dengan nilai signifikansi (Sig.) sebesar 0,253 berdasarkan *Based on Mean*. Karena nilai signifikansi lebih besar dari taraf nyata yang digunakan ($0,253 > 0,05$), maka H_0 diterima, yang berarti tidak terdapat perbedaan varians yang signifikan antar kelompok perlakuan. Dengan demikian, data memiliki varians yang homogen sehingga memenuhi salah satu asumsi dasar dalam analisis Two-Way ANOVA.

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: nilai hardness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	551717.161 ^a	11	50156.106	4174.831	<,001
Intercept	18551594.326	1	18551594.326	1544174.279	<,001
sudut	874.704	2	437.352	36.404	<,001
temperatur	550372.984	3	183457.661	15270.418	<,001
sudut * temperatur	469.472	6	78.245	6.513	<,001
Error	1153.337	96	12.014		
Total	19104464.824	108			
Corrected Total	552870.498	107			

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: nilai hardness

Source	Partial Eta Squared
Corrected Model	.998
Intercept	1.000
sudut	.431
temperatur	.998
sudut * temperatur	.289
Error	
Total	
Corrected Total	

a. R Squared = .998 (Adjusted R Squared = .998)

Gambar 4. 17 Tests Of Between-Subjects Effects

Analisis Two-Way ANOVA dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi sudut *bending*, temperatur pemanasan, serta interaksi antara sudut *bending* dan temperatur terhadap nilai kekerasan (*Hardness*) pada daerah *intrados* material Hardox 500. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 4.10.

Berdasarkan hasil *Tests of Between-Subjects Effects*, diperoleh nilai signifikansi (Sig.) untuk faktor sudut *bending* sebesar <0,001 dengan nilai F hitung sebesar 36,404. Karena nilai signifikansi lebih kecil dari taraf nyata 0,05 ($p < 0,05$), maka dapat disimpulkan bahwa variasi sudut *bending* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekerasan material Hardox 500 pada daerah *intrados*. Dengan demikian, hipotesis nol (H_{01}) yang menyatakan bahwa sudut *bending* tidak berpengaruh terhadap nilai kekerasan ditolak, sedangkan hipotesis alternatif (H_{11}) diterima.

Selanjutnya, faktor temperatur pemanasan juga menunjukkan nilai signifikansi $<0,001$ dengan nilai F hitung sebesar 15270,418. Hasil tersebut menunjukkan bahwa temperatur pemanasan memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap nilai kekerasan. Nilai F yang jauh lebih besar dibandingkan faktor sudut *bending* menunjukkan bahwa temperatur merupakan faktor yang memiliki pengaruh paling dominan terhadap perubahan kekerasan material. Dengan demikian, hipotesis nol (H_{02}) yang menyatakan bahwa temperatur *preheat* tidak berpengaruh terhadap nilai kekerasan ditolak, sedangkan hipotesis alternatif (H_{12}) diterima.

Selain pengaruh masing-masing faktor, hasil analisis juga menunjukkan adanya interaksi yang signifikan antara sudut *bending* dan temperatur, yang ditunjukkan oleh nilai F hitung sebesar 6.513 dengan nilai signifikansi $<0,001$. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan nilai kekerasan tidak hanya dipengaruhi oleh sudut *bending* atau temperatur secara terpisah, tetapi juga dipengaruhi oleh kombinasi kedua faktor tersebut. Dengan kata lain, pengaruh temperatur terhadap nilai kekerasan berbeda pada setiap variasi sudut *bending* yang digunakan. Dengan demikian, hipotesis nol (H_{01}) yang menyatakan bahwa sudut *bending* dan temperatur *preheat* tidak berpengaruh terhadap nilai kekerasan ditolak, sedangkan hipotesis alternatif (H_{11}) diterima.

4.4.2 Hasil Nilai Kekerasan Pada Intrados

Analisis statistik dilakukan menggunakan Two-Way ANOVA untuk mengetahui pengaruh variasi sudut *bending* dan temperatur pemanasan terhadap nilai kekerasan (Hardness) pada daerah intrados material Hardox 500. Sebelum dilakukan analisis ANOVA, terlebih dahulu dilakukan pengujian asumsi berupa uji homogenitas.

Between-Subjects Factors			
		Value Label	N
Temperature	1	0	27
	2	150	27
	3	250	27
	4	350	27
Sudut bending	1	2,5	36
	2	5	36
	3	10	36

Gambar 4. 18 Between-Subjects Factors

Tabel *Between-Subjects Factors* menunjukkan jumlah data pada setiap tingkat perlakuan yang digunakan dalam analisis Two-Way ANOVA. Penelitian ini menggunakan dua faktor, yaitu temperatur pemanasan dan sudut *bending*, dengan variabel respon berupa nilai kekerasan (*hardness*) pada daerah *ekstrados*.

Faktor temperatur terdiri atas empat tingkat perlakuan, yaitu 0°C, 150°C, 250°C, dan 350°C, dengan masing-masing memiliki 27 data pengamatan. Jumlah tersebut diperoleh dari kombinasi 3 variasi sudut *bending* pada setiap temperatur dengan 9 kali pengulangan sehingga diperoleh 27 data untuk setiap tingkat temperatur.

Sementara itu, faktor sudut *bending* terdiri atas tiga tingkat perlakuan, yaitu 2,5°, 5°, dan 10°, yang masing-masing memiliki 36 data pengamatan. Jumlah tersebut diperoleh dari kombinasi 4 variasi temperatur dengan 9 kali pengulangan sehingga setiap tingkat sudut *bending* memiliki 36 data.

Levene's Test of Equality of Error Variances ^{a,b}					
		Levene Statistic	df1	df2	Sig. ^c
nilai hardness	Based on Mean	1.815	11	96	.062
	Based on Median	.851	11	96	.591
	Based on Median and with adjusted df	.851	11	78.091	.591
	Based on trimmed mean	1.770	11	96	.070

Gambar 4. 19 Uji Homogenitas Varians (Levene's Test)

Berdasarkan hasil uji *Levene pada Based on Mean* pada Gambar 4.19, diperoleh nilai *Levene Statistic* sebesar 1.185 dengan nilai signifikansi (Sig.) sebesar 0,062. Karena nilai signifikansi lebih besar dari taraf nyata 0,05 (0,062

$> 0,05$), sehingga dapat disimpulkan bahwa varians antar kelompok perlakuan homogen. maka H_0 diterima, yang berarti tidak terdapat perbedaan varians yang signifikan antar kelompok perlakuan. Dengan demikian, data memiliki varians yang homogen sehingga memenuhi salah satu asumsi dasar dalam analisis Two-Way ANOVA.

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: nilai hardness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	355436.675 ^a	11	32312.425	3843.226	<,001
Intercept	20602205.051	1	20602205.051	2450417.298	<,001
sudut	323.065	2	161.533	19.213	<,001
temperatur	352870.325	3	117623.442	13990.081	<,001
sudut * temperatur	2243.285	6	373.881	44.469	<,001
Error	807.133	96	8.408		
Total	20958448.858	108			
Corrected Total	356243.807	107			

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: nilai hardness

Source	Partial Eta Squared
Corrected Model	.998
Intercept	1.000
sudut	.286
temperatur	.998
sudut * temperatur	.735
Error	
Total	
Corrected Total	

a. R Squared = .998 (Adjusted R Squared = .997)

Gambar 4. 20 Test Of Between-Subjects Effect

Berdasarkan hasil analisis Two-Way ANOVA pada Gambar 4.11, diperoleh bahwa model yang digunakan signifikan dengan nilai $F = 3843,226$ dan nilai signifikansi (Sig.) $< 0,001$. Hal ini menunjukkan bahwa model statistik yang digunakan mampu menjelaskan variasi nilai kekerasan dengan sangat baik.

Secara parsial, faktor sudut *bending* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekerasan dengan nilai $F = 19,213$ dan Sig. $< 0,001$, sehingga hipotesis nol (H_0) yang menyatakan bahwa variasi sudut *bending* tidak berpengaruh terhadap nilai kekerasan ditolak. Meskipun demikian,

berdasarkan nilai Partial Eta Squared sebesar 0,286, pengaruh sudut *bending* tergolong lebih kecil dibandingkan pengaruh temperatur *preheat*.

Faktor temperatur *preheat* merupakan variabel yang memberikan pengaruh paling dominan terhadap perubahan nilai kekerasan, dengan nilai $F = 13.990,081$ dan $\text{Sig.} < 0,001$. Selain itu, nilai Partial Eta Squared sebesar 0,998 menunjukkan bahwa sekitar 99,8% variasi nilai kekerasan dapat dijelaskan oleh variasi temperatur *preheat* setelah memperhitungkan faktor lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *preheat* secara nyata menyebabkan penurunan nilai kekerasan Hardox 500 akibat terjadinya proses tempering lanjutan (*re-tempering*) pada struktur tempered martensite.

Hasil analisis juga menunjukkan adanya interaksi yang signifikan antara sudut *bending* dan temperatur *preheat*, dengan nilai $F = 44,469$ dan $\text{Sig.} < 0,001$. Nilai Partial Eta Squared sebesar 0,735 mengindikasikan bahwa kombinasi kedua faktor tersebut memberikan kontribusi yang besar terhadap perubahan nilai kekerasan. Dengan demikian, pengaruh temperatur *preheat* terhadap nilai kekerasan tidak sepenuhnya sama pada setiap variasi sudut *bending*, meskipun secara umum pola penurunan kekerasan tetap menunjukkan kecenderungan yang serupa.

Nilai Adjusted R^2 sebesar 0,997 menunjukkan bahwa 99,7% variasi nilai kekerasan dapat dijelaskan oleh model yang melibatkan faktor sudut *bending*, temperatur *preheat*, dan interaksi keduanya, sedangkan sekitar 0,3% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa model Two-Way ANOVA yang digunakan memiliki tingkat kecocokan dalam menjelaskan perubahan nilai kekerasan Hardox 500.

4.5 Pembahasan

Pada bagian pembahasan ini, penulis memfokuskan analisis terhadap setiap hasil pengujian yang telah dilakukan. Selain itu, dilakukan juga analisis terhadap korelasi antar hasil pengujian untuk mengetahui pengaruh pada setiap variabel. Pembahasan secara rinci akan dijabarkan pada bagian berikutnya.

4.5.1 Pembahasan Hasil Pengujian Struktur Mikro

Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.2-4.10, Pada spesimen tanpa *preheat* (0°C), morfologi lath tempered martensite masih tampak jelas dengan batas lath yang relatif tegas. Seiring meningkatnya temperatur *preheat* hingga 150°C, 250°C, dan 350°C, morfologi lath tempered martensite tampak semakin kurang tegas (*fuzzy*) dan lebih Seragam. Perubahan tersebut mengindikasikan terjadinya *tempering* lanjutan (*re-tempering*) akibat pemanasan selama proses *hot bending*. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Wen et al., 2019) yang melaporkan bahwa peningkatan temperatur *tempering* menyebabkan batas lath martensite menjadi semakin kabur disertai penurunan nilai kekerasan.

Perbedaan morfologi juga terlihat antara daerah *intrados* dan *ekstrados*. Struktur mikro pada daerah *intrados* cenderung menunjukkan perubahan morfologi yang lebih nyata dibandingkan ekstrados. Kondisi ini diduga disebabkan oleh proses pemanasan lokal (*localized heating*) dari sisi *intrados* sehingga temperatur yang diterima lebih tinggi dan proses *tempering* berlangsung lebih intensif. Temuan tersebut juga konsisten dengan hasil pengujian kekerasan yang menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada daerah *intrados* lebih rendah dibandingkan *ekstrados*.

Retak yang terjadi pada spesimen *preheat* 150°C dan 250°C diduga dipengaruhi oleh terbentuknya thermal stress akibat pemanasan lokal (*localized heating*) menggunakan oxy-acetylene torch. Pemanasan yang tidak merata menghasilkan gradien temperatur sehingga setiap bagian material mengalami pemuaihan yang berbeda. Perbedaan pemuaihan tersebut menimbulkan *thermal stress* yang bekerja bersamaan dengan tegangan akibat proses *bending*, sehingga meningkatkan konsentrasi tegangan dan memicu inisiasi retak. Mekanisme ini sejalan dengan (Ahlström, 2016), yang menjelaskan bahwa pemanasan lokal dapat menghasilkan *thermal strain*, *residual stress*, dan medan tegangan yang berkontribusi terhadap pembentukan retak. Selain itu, Li et al. (2025) melaporkan bahwa konsentrasi *thermal stress* dapat memicu terbentuknya *slip band*, *microcrack*, dan mempercepat perambatan retak.

4.5.2 Pembahasan Hasil Pengujian Kekerasan

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.12–4.13, nilai kekerasan Hardox 500 menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan meningkatnya temperatur *preheat* pada seluruh variasi sudut *bending*, baik pada daerah *intrados* maupun *ekstrados*. Pada kondisi tanpa *preheat* (0°C), nilai kekerasan berada pada kisaran 512–523 HV, yang masih sesuai dengan *datasheet* Hardox 500, yaitu 470–530 HV (SSAB, 2023). Setelah diberikan *preheat* 150°C, 250°C, dan 350°C, nilai kekerasan terus menurun hingga mencapai kisaran 323–372 HV pada temperatur 350°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *preheat* menyebabkan penurunan nilai kekerasan Hardox 500.

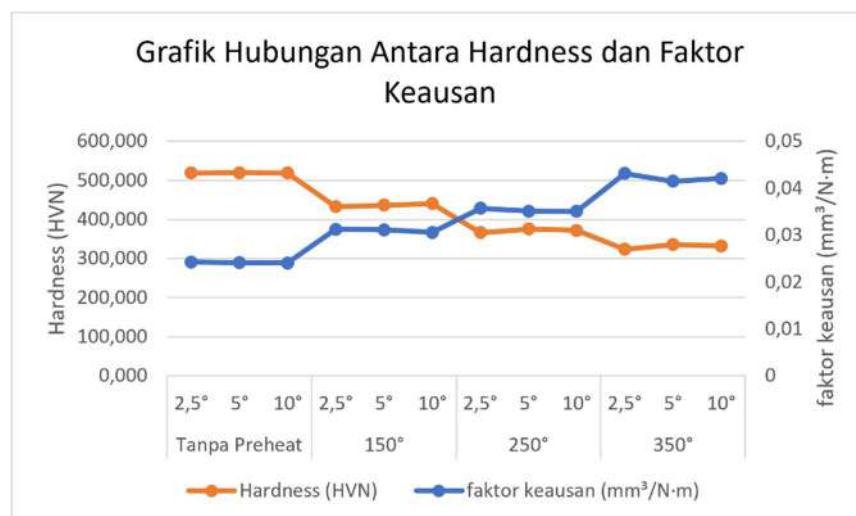
Penurunan nilai kekerasan tersebut mengindikasikan terjadinya proses *tempering* lanjutan (*re-tempering*) akibat pemanasan selama proses *hot bending*. Hal ini didukung oleh hasil pengamatan struktur mikro yang menunjukkan bahwa morfologi lath tempered martensite menjadi semakin kurang tegas (*fuzzy*) seiring meningkatnya temperatur *preheat*. Selain itu, nilai kekerasan pada daerah *intrados* umumnya lebih rendah dibandingkan *ekstrados* karena pemanasan dilakukan dari sisi *intrados*, sehingga daerah tersebut menerima paparan panas yang lebih tinggi. Hasil ini sejalan dengan penelitian Wen et al. (2019) yang melaporkan bahwa peningkatan temperatur *tempering* menyebabkan morfologi lath martensite menjadi semakin kabur dan diikuti penurunan nilai kekerasan, serta didukung oleh (Kostryzhev et al., 2021) yang menjelaskan bahwa pemanasan lokal pada baja martensitik menghasilkan gradien mikrostruktur dan gradien kekerasan.

Hasil analisis Two-Way ANOVA menunjukkan bahwa temperatur *preheat*, sudut *bending*, dan interaksi keduanya berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan (Sig. < 0,001). Namun, berdasarkan nilai F dan *Partial Eta Squared*, temperatur *preheat* merupakan faktor yang paling dominan memengaruhi perubahan nilai kekerasan. Secara keseluruhan, semakin tinggi temperatur *preheat*, semakin rendah nilai kekerasan Hardox 500, sedangkan pengaruh sudut *bending* relatif lebih kecil.

4.5.3 Pembahasan Pengujian Keausan

Berdasarkan hasil pengujian keausan pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.4, faktor keausan Hardox 500 menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur *preheat* pada seluruh variasi sudut *bending*. Nilai faktor keausan meningkat dari kisaran 0,024 mm³/N·m pada kondisi tanpa *preheat* menjadi sekitar 0,042–0,043 mm³/N·m pada temperatur *preheat* 350°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *preheat* menyebabkan penurunan ketahanan aus material Hardox 500. Semakin besar faktor keausan, semakin besar volume material yang hilang selama proses pengujian sehingga ketahanan aus material semakin menurun.

Peningkatan faktor keausan tersebut berkaitan dengan hasil pengujian kekerasan dan struktur mikro yang telah dilakukan. Seiring meningkatnya temperatur *preheat*, nilai kekerasan Hardox 500 mengalami penurunan akibat proses tempering lanjutan (*re-tempering*), yang ditandai dengan morfologi lath tempered martensite yang semakin kurang tegas (*fuzzy*). Penurunan kekerasan menyebabkan permukaan material lebih mudah mengalami deformasi dan pelepasan material saat bergesekan dengan media abrasif, sehingga faktor keausan meningkat dapat dilihat pada Gambar 4.11. Hasil penelitian ini sejalan dengan (Ligier et al., 2024) yang menyatakan bahwa penurunan kekerasan pada baja berkorelasi dengan meningkatnya laju keausan akibat berkurangnya kemampuan material dalam menahan aksi partikel abrasif.



Gambar 4. 21 Grafik Hubungan Antara *Hardness* dan Faktor keausan

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *preheat* menyebabkan morfologi tempered martensite menjadi semakin *fuzzy*, diikuti oleh penurunan nilai kekerasan dan peningkatan faktor keausan. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan mikrostruktur akibat proses tempering lanjutan selama *hot bending* berkontribusi terhadap menurunnya ketahanan aus Hardox 500. Meskipun variasi sudut bending juga memengaruhi hasil pengujian, pengaruh temperatur *preheat* terlihat lebih dominan dalam menentukan perubahan sifat mekanik dan ketahanan aus material.

Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan tanpa *preheat* (suhu ruang) direkomendasikan sebagai kondisi terbaik dalam proses *hot/cold bending* Hardox 500 karena menghasilkan nilai kekerasan tertinggi, ketahanan aus terbaik (nilai wear factor terendah), serta mempertahankan struktur mikro yang masih didominasi martensit temper. Sebaliknya, peningkatan temperatur *preheat* hingga 150°C, 250°C, dan 350°C menyebabkan penurunan kekerasan akibat proses tempering yang semakin intensif, sehingga ketahanan aus juga menurun. Oleh karena itu, apabila proses pembentukan masih dapat dilakukan tanpa risiko kegagalan pembentukan, penggunaan tanpa *preheat* menjadi pilihan yang paling direkomendasikan untuk mempertahankan sifat mekanik Hardox 500.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur *preheat* dan sudut *bending* pada proses *hot bending* terhadap struktur mikro, nilai kekerasan, dan ketahanan aus material Hardox 500, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa material HARDOX 500 yang mengalami proses *cold bending* didominasi oleh struktur mikro tempered martensite. Sementara itu, material yang mengalami proses *hot bending* juga tetap didominasi oleh martensit temper, namun morfologi martensit kurang tegas (kabur) seiring meningkatnya temperatur *preheat*. Perubahan morfologi tersebut terjadi akibat efek tempering selama proses pemanasan sebelum *bending*, sehingga mengurangi ketegasan bentuk lath martensit.
2. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa proses *hot bending* menyebabkan penurunan nilai kekerasan dibandingkan *cold bending*. Berdasarkan hasil uji ANOVA dua arah, variasi temperatur *preheat* dan sudut *bending* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekerasan (nilai signifikansi $< 0,05$). Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada material tanpa *preheat* sebesar 522 HV, sedangkan nilai kekerasan terendah diperoleh pada variasi *preheat* 350°C sebesar 323 HV. Penurunan kekerasan ini disebabkan oleh terjadinya proses tempering selama pemanasan yang menurunkan kekerasan martensit.
3. Hasil pengujian ketahanan aus menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *preheat* menyebabkan peningkatan faktor keausan material HARDOX 500. Nilai faktor keausan tertinggi diperoleh pada variasi *preheat* 350°C sebesar 0,0431 mm³/N·m, sedangkan nilai faktor keausan terendah diperoleh pada material tanpa *preheat* sebesar 0,0240 mm³/N·m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa material tanpa *preheat* memiliki ketahanan aus yang

lebih baik dibandingkan material yang mengalami *preheat*, sejalan dengan penurunan nilai kekerasan akibat proses *tempering*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya maupun penerapan di industri adalah sebagai berikut.

1. Perlu digunakannya kamera termal untuk mengetahui gradient temperature yang terjadi pada saat proses bending.
2. Perlu dilakukannya pengujian lebih lanjut seperti sem agar mengetahui struktur mikro yang terjadi pada material.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahlström, J. (2016). Residual stresses generated by repeated local heating events – Modelling of possible mechanisms for crack initiation. *Wear*, 366–367, 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.029>
- Aji Pangestu, M., Afira Ainur Rosidah, dan, Teknologi Adhi Tama Surabaya, I., & Korespondensi, P. (2024). 54 | AUSTENITIZING TEMPERATURE AND QUENCHING MEDIA EFFECTS ON HARDNESS AND MICROSTRUCTURE IN HARDENING OF AISI 1040 STEEL Austenitizing Temperature and Quenching Media Effects on Hardness and Microstructure in Hardening of AISI 1040 Steel. *Journal of Mechanical and Electrical Technology*, 3(2).
- Albar, M. E. (2012). *UAS Material Selection Material Tahan Aus untuk Cutting Tools*.
- Armanto, E., Burhanudin, A., Dwi Krisnandi, D., Prabowo, D., Sudarto, J. H., & Tembalang, S. (2012). *PERANCANGAN MESIN UJI TRIBOLOGI PIN-ON-DISC*.
- ASTM. (1997). *Standard Test Method for Pin Abrasion Testing*.
- ASTM G99. (2017). *Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/G0099-17>
- Chintha, A. R. (2019). Metallurgical aspects of steels designed to resist abrasion, and impact-abrasion wear. In *Materials Science and Technology (United Kingdom)* (Vol. 35, Number 10, pp. 1133–1148). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1615669>
- Darmanto, Muhamad Thufik Ridwan, & Imam Syafa'at. (2014). *Analisis Keausan Alumunium Menggunakan Tribotester*.
- Gallina, B., Volcanoglo Biehl, L., Braz Medeiros, J. L., & de Souza, J. (2020). The influence of different heat treatment cycles on the properties of the steels HARDOX® 500 and STRENGTH® 700. *Revista Liberato*, 67–74. <https://doi.org/10.31514/rliberato.2020v21n35.p67>
- Gökmeşe, H., & Özdemir, M. (2016). *Hardox-500 Sac Malzemenin Şekillendirilebilirlik Davranışı Üzerinde Isıl İşlemin Etkisi*.

- Hawk, J. A., Wilson, R. D., Tylczak, J. H., & Dogan, O. N. (1999). Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation. *Wear*, 225–229.
- Ir. Wahid Suherman. (2003). *ilmu logam ir wahid-suherman*.
- Khrushchov, M. M. (1974). PRINCIPLES OF ABRASIVE WEAR. In *Wear* (Vol. 28). Elsevier Sequoia S.A.
- Kostrzyzhev, A. G., Rizwan, M., Killmore, C. R., Yu, D., & Li, H. (2021). Edge microstructure and strength gradient in thermally cut ti-alloyed martensitic steels. *Metals*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/met11071138>
- Ligier, K., Napiórkowski, J., & Lemecha, M. (2024). Assessment of Changes in Abrasive Wear Resistance of a Welded Joint of Low-Alloy Martensitic Steel Using Microabrasion Test. *Materials*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/ma17092101>
- Mauduit, A., & Maillard, A. (2021). Study on the impact of temperature on the warm bending of aluminium alloy sheets. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1157(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1157/1/012049>
- Mishra, P., Singh, U., Pandey, C. M., Mishra, P., & Pandey, G. (2019). Application of student's t-test, analysis of variance, and covariance. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(4), 407–411. https://doi.org/10.4103/aca.aca_94_19
- M.M. Munir, M. Thoriq Wahyudi, Hendri Budi Kurnianto, & Dika Anggara. (2019). *Modul praktik DT NDT*.
- Olaf Digel. (2002). *Complete Design Services*.
- Özdemir, M., & Gökmeşe, H. (2018). Microstructural characterization and deformation of X10CrAlSi24 sheet material applied V-bending process. *Tehnicki Vjesnik*, 25(3), 846–854. <https://doi.org/10.17559/TV-20170425022545>
- Pornputsiri, N., & Kanlayasiri, K. (2020). Effect of bending temperatures on the microstructure and springback of a TRIP steel sheet. *Defence Technology*, 16(5), 980–987. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.11.018>
- RL Brockenbrough. (1998). *Fabrication Guidelines for Cold Bending ii DISCLAIMER*.

- Rohmat, I. K., Amri, Moh. S., Munir, M. M., Kurniyanto, H. B., & Muzzakki, M. H. (2023). ANALISIS HOLDING TIME POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT) PADA PENGELASAN MATERIAL SA-213 GRADE T91 DENGAN SA-213 GRADE T22 UNTUK APLIKASI BOILER. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 14(1), 317–329. <https://doi.org/10.21776/jrm.v14i1.1304>
- Shelar, A., & Ronge, B. P. (2023). Characterization of the mechanical properties and microstructural evolution of martensitic steel in repeated tempering cycles. *Frattura Ed Integrita Strutturale*, 17(66), 38–55. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.66.03>
- Souza, M., Serrão, L. F., Pardal, J. M., Tavares, S. S. M., & Fonseca, M. C. (2021). *Tempering Influence on Residual Stresses and Mechanical Properties of AISI 4340 Steel*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1051431/v1>
- SSAB. (2023a). *BENDING HARDOX® CONTENTS*.
- SSAB. (2023b). *Data sheet 152id Hardox® 500*. www.ssab.com.
- Sulistiono, N. E., & Umarsyah, R. (2021). PROSES PEMBUATAN MESIN TRIBOMETER TIPE PIN ON DISK TEST BERSTANDAR ASTM G 99. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(2), 115.
- Sun, J. J., Liu, Y. N., Zhu, Y. T., Lian, F. L., Liu, H. J., Jiang, T., Guo, S. W., Liu, W. Q., & Ren, X. B. (2017). Super-strong dislocation-structured high-carbon martensite steel. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06971-w>
- Wen, E., Song, R., & Xiong, W. (2019). Effect of tempering temperature on microstructures and wear behavior of a 500 HB grade wear-resistant steel. *Metals*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/met9010045>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

Lampiran 1 Mill Certificate HARDOX 500

PL.12

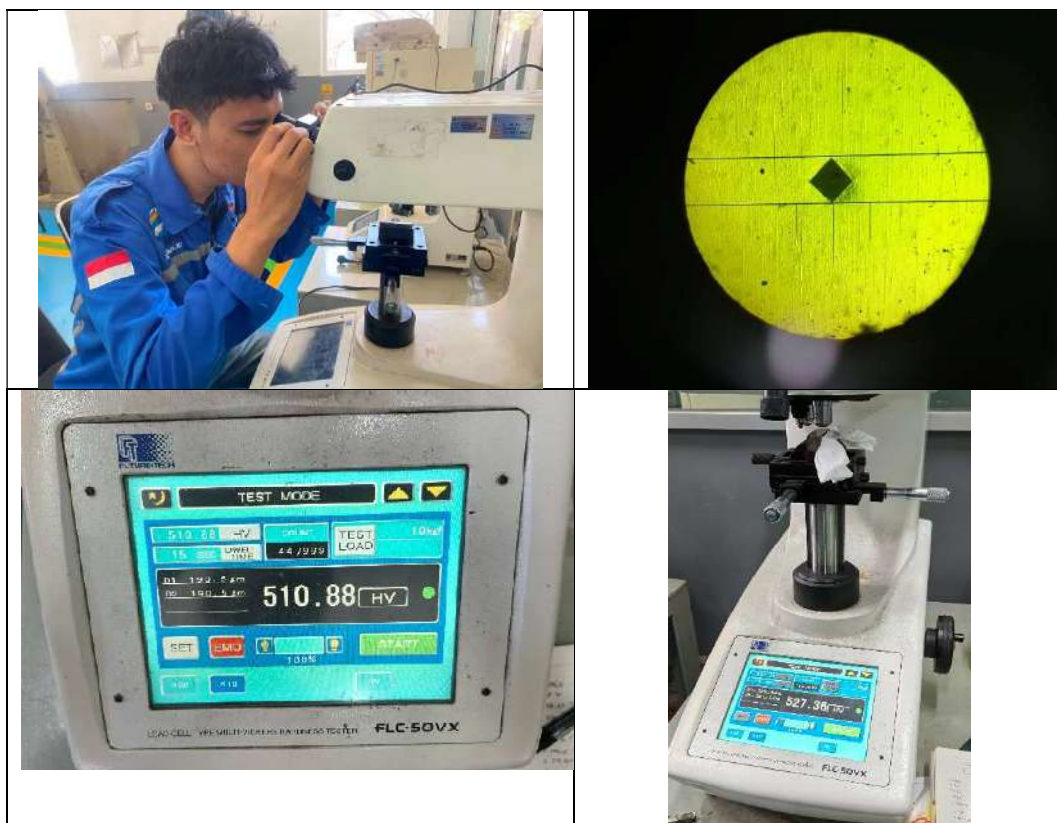
Lampiran 2 Proses Cold Bending Dan Hot Bending



Lampiran 2 proses Pengujian struktur mikro



Lampiran 3 Pengujian Hardness



Lampiran 4 uji keausan



Sudut Bending 2,5° dan tanpa Preheat	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Sudut Bending 5° dan tanpa Preheat	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Sudut Bending 10° dan tanpa Preheat	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Sudut Bending 2,5° dan Preheat 150°	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Sudut Bending 5° dan Preheat 150°	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Sudut Bending 10° dan Preheat 150°	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Sudut Bending 2,5° dan Preheat 250°	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Sudut Bending 5° dan Preheat 250°	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Sudut Bending 10° dan Preheat 250°	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Sudut Bending 2,5° dan Preheat 350°	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Sudut Bending 5° dan Preheat 350°	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Sudut Bending 10° dan Preheat 350°	
Berat Awal	Berat Akhir
	

Lampiran 5 Perhitungan uji ketahanan aus

Laporan *Wear Resistance Test*

Nama : Kharismajid
NRP : 0722040051
Kelas : D4-TL8B

Pengujian dilakukan menggunakan standard ASTM G132 *type pin on disk* yang memiliki parameter pengujian sebagai berikut :

➤ Parameter Pengujian

- Beban uji = 510,55 g.
- Radius Tracking = 80,10 mm
- Koefisien Gesek Abraser = grit 60
- Putaran Kecepatan = 500 RPM
- Waktu pengujian = 1 menit

➤ Rumus Perhitungan Pengujian

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 2,5 dan tanpa preheat**

• Diketahui :

- Beban awal = 55,735 g
- Beban akhir = 55,4947 g
- Berat Jenis Baja = 0,00785 (g/mm³)
- Waktu Uji = 1 menit
- Radius Track = 80,10 mm
= 0,08010 m
- Beban Uji = 510,55 g
= 5,0084955 (N)
- Putaran Kecepatan = 500 RPM

• Perhitungan :

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
= 55,7350 - 55,4947
= 0,2403 g
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
= $\frac{0,2403 \text{ (g)}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
= 30,61146497 mm³
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
= $2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
= 251,7428571 m
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$
= $\frac{30,61146497 \text{ mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
= 0,0242783780230716 $\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 5 dan tanpa preheat**

• Diketahui :

- Beban awal = 57,9185 g
- Beban akhir = 57,6799 g
- Berat Jenis Baja = 0,00785 (g/mm³)
- Waktu Uji = 1 menit
- Radius Track = 80,10 mm
= 0,08010 m
- Beban Uji = 510,55 g
= 5,0084955 (N)
- Putaran Kecepatan = 500 RPM

• Perhitungan :

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
= 57,9185 - 57,6799
= 0,2386 g
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
= $\frac{0,2386 \text{ g}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
= 30,39490446 mm³
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
= $2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
= 251,7428571 m
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$
= $\frac{30,39490446 \text{ mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
= 0,024106621 $\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 10 dan tanpa preheat**

• Diketahui :

- Beban awal = 55,8128 g
- Beban akhir = 55,8128 g
- Berat Jenis Baja = 0,00785 (g/mm³)
- Waktu Uji = 1 menit
- Radius Track = 80,10 mm
= 0,08010 m
- Beban Uji = 510,55 g
= 5,0084955 (N)
- Putaran Kecepatan = 500 RPM

• Perhitungan :

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
= 55,8128 g - 55,8128 g
= 0,2379 g
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
= $\frac{0,2379 \text{ g}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
= 30,30573248 mm³
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
= $2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
= 251,7428571 m
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$
= $\frac{30,30573248 \text{ mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
= 0,024035897 $\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 2,5 dan preheat 150**

• Diketahui :

- Beban awal = 49,0133 g
- Beban akhir = 48,704 g
- Berat Jenis Baja = 0,00785 (g/mm³)
- Waktu Uji = 1 menit
- Radius Track = 80,10 mm
= 0,08010 m
- Beban Uji = 510,55 g
= 5,0084955 (N)
- Putaran Kecepatan = 500 RPM

• Perhitungan :

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
= 49,0133 g - 48,704 g
= 0,3093 g
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
= $\frac{0,3093 \text{ g}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
= 39,40127389 mm³
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
= $2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
= 251,7428571 m
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$
= $\frac{39,40127389 \text{ mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
= 0,031249698 $\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 5 dan preheat 150**

• Diketahui :

- Beban awal = 52,1355 g
- Beban akhir = 51,827 g
- Berat Jenis Baja = 0,00785 (g/mm³)
- Waktu Uji = 1 menit
- Radius Track = 80,10 mm
= 0,08010 m
- Beban Uji = 510,55 g
= 5,0084955 (N)
- Putaran Kecepatan = 500 RPM

• Perhitungan :

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
= 52,1355 g - 51,827 g
= 0,3085g
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
= $\frac{0,3085\text{g}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
= 39,29936306 mm³
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
= $2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
= 251,7428571 m
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$
= $\frac{39,29936306 \text{ mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
= 0,031168871 $\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 10 dan preheat 150**

• Diketahui :

- Beban awal $= 57,7722 \text{ g}$
- Beban akhir $= 57,4698 \text{ g}$
- Berat Jenis Baja $= 0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}$
- Waktu Uji $= 1 \text{ menit}$
- Radius Track $= 80,10 \text{ mm}$
 $= 0,08010 \text{ m}$
- Beban Uji $= 510,55 \text{ g}$
 $= 5,0084955 \text{ (N)}$
- Putaran Kecepatan $= 500 \text{ RPM}$

• Perhitungan :

- Berat Keausan $= \text{Berat awal} - \text{Berat akhir}$
 $= 57,7722 \text{ g} - 57,4698 \text{ g}$
 $= 0,3024 \text{ g}$
- Volume Keausan $= \frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
 $= \frac{0,3024 \text{ g}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
 $= 38,52229299 \text{ mm}^3$
- Jarak Tempuh $= \text{Keliling Track Uji} \times \text{RPM} \times \text{Waktu Pengujian}$
 $= 2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
 $= 251,7428571 \text{ m}$
- Faktor keausan $= \frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N)} \times \text{Jarak Tempuh (m)}}$
 $= \frac{38,52229299 \text{ mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
 $= 0,030552566 \frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 2,5 dan preheat 250**

• Diketahui :

- Beban awal = 51,4037 g
- Beban akhir = 51,05 g
- Berat Jenis Baja = 0,00785 (g/mm³)
- Waktu Uji = 1 menit
- Radius Track = 80,10 mm
= 0,08010 m
- Beban Uji = 510,55 g
= 5,0084955 (N)
- Putaran Kecepatan = 500 RPM

• Perhitungan :

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
= 51,4037 g - 51,05 g
= 0,3537 g
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
= $\frac{0,3537 \text{ g}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
= 45,05732484 mm³
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
= $2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
= 251,7428571 m
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$
= $\frac{45,05732484 \text{ mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
= 0,03573559 $\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 5 dan preheat 250**

• Diketahui :

- Beban awal = 56,7902 g
- Beban akhir = 56,4424 g
- Berat Jenis Baja = 0,00785 (g/mm³)
- Waktu Uji = 1 menit
- Radius Track = 80,10 mm
= 0,08010 m
- Beban Uji = 510,55 g
= 5,0084955 (N)
- Putaran Kecepatan = 500 RPM

• Perhitungan :

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
= 56,7902 g - 56,4424 g
= 0,3478 g
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
= $\frac{0,3478 \text{ g}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
= 44,30573248 mm³
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
= $2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
= 251,7428571 m
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$
= $\frac{\text{mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
= 0,035139492 $\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 10 dan preheat 250**

• Diketahui :

- Beban awal = 57,1546 g
- Beban akhir = 56,8074 g
- Berat Jenis Baja = 0,00785 (g/mm³)
- Waktu Uji = 1 menit
- Radius Track = 80,10 mm
= 0,08010 m
- Beban Uji = 510,55 g
= 5,0084955 (N)
- Putaran Kecepatan = 500 RPM

• Perhitungan :

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
= 57,1546 g - 56,8074 g
= 0,3472 g
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
= $\frac{0,3472 \text{ g}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
= 44,22929936 mm³
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
= $2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
= 251,7428571 m
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$
= $\frac{44,22929936 \text{ mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
= 0,035078872 $\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 2,5 dan preheat 350**

• Diketahui :

- Beban awal = 48,0814 g
- Beban akhir = g
- Berat Jenis Baja = 0,00785 (g/mm³)
- Waktu Uji = 1 menit
- Radius Track = 80,10 mm
= 0,08010 m
- Beban Uji = 510,55 g
= 5,0084955 (N)
- Putaran Kecepatan = 500 RPM

• Perhitungan :

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
= 48,0814 g - 47,6545 g
= 0,4269 g
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
= $\frac{0,4269 \text{ g}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
= 54,38216561 mm³
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
= $2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
= 251,7428571 m
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$
= $\frac{54,38216561 \text{ mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
= 0,043131251 $\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 5 dan preheat 350**

• Diketahui :

- Beban awal = 56,5568 g
- Beban akhir = 56,1462 g
- Berat Jenis Baja = 0,00785 (g/mm³)
- Waktu Uji = 1 menit
- Radius Track = 80,10 mm
= 0,08010 m
- Beban Uji = 510,55 g
= 5,0084955 (N)
- Putaran Kecepatan = 500 RPM

• Perhitungan :

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
= 56,5568 g - 56,1462 g
= 0,4106g
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
= $\frac{0,4106 \text{ g}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
= 52,30573248 mm³
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
= $2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
= 251,7428571 m
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$
= $\frac{52,30573248 \text{ mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
= 0,041484403 $\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

➤ **Perhitungan Spesimen Sudut bending 10 dan preheat 350**

• Diketahui :

- Beban awal = 56,0583 g
- Beban akhir = 55,6415 g
- Berat Jenis Baja = 0,00785 (g/mm³)
- Waktu Uji = 1 menit
- Radius Track = 80,10 mm
= 0,08010 m
- Beban Uji = 510,55 g
= 5,0084955 (N)
- Putaran Kecepatan = 500 RPM

• Perhitungan :

- Berat Keausan = Berat awal – Berat akhir
= 56,0583 g - 55,6415 g
= 0,4168 g
- Volume Keausan = $\frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat Jenis } \frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}}$
= $\frac{0,4168 \text{ g}}{0,00785 \text{ (g/mm}^3\text{)}}$
= 53,0955414 mm³
- Jarak Tempuh = Keliling Track Uji x RPM x Waktu Pengujian
= $2 \times \frac{22}{7} \times 0,08010 \times 500 \times 1$
= 251,7428571 m
- Faktor keausan = $\frac{\text{Volume Keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x Jarak Tempuh (m)}}$
= $\frac{53,0955414 \text{ mm}^3}{5,0084955 \text{ N} \times 251,7428571 \text{ m}}$
= 0,042110811 $\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

BIODATA DIRI



Basic Data			
Kharismajid			
Place, Date of Birth:		Nickname:	Gender
Banyuwangi, 19 Desember 2003		kaka	Male
Adress		Nationality	
Dsn Maron, Genteng Kulon, Genteng, Banyuwangi		Indonesia	
Religion		Hobby	
Islam		Running	
E-Mail		Phone Number:	
Kharismajid.kj@gmail.com		089620704784	
Formal Education			
Education Level	Year	Institution	Field of Study
Elementary School	2010-2016	SDN 1 Genteng	-
Junior High School	2016-2019	SMP Negeri 1 Genteng	-
Senior High School	2019-2022	SMA Negeri 1 Genteng	Sains and Matematic
University	2022-2026	Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya	Welding Engineering