

**ANALISA PENGARUH *QUENCH-TEMPERING* DAN WAKTU
TAHAN TERHADAP KOROSI, KEKERASAN, DAN
STRUKTUR MIKRO PADA *STAINLESS
STEEL 304 THIN FOIL***

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Wiranto Yogi Febrian
3334200007

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON-BANTEN
2025**

LEMBAR PENGESAHAN

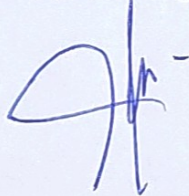
**ANALISA PENGARUH *QUENCH-TEMPERING* DAN WAKTU
TAHAN TERHADAP KOROSI, KEKERASAN, DAN
STRUKTUR MIKRO PADA *STAINLESS
STEEL 304 THIN FOIL***

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

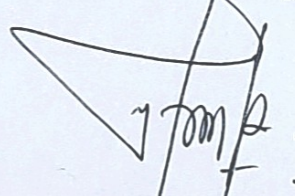
Pembimbing I



Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 198003072005011002

Pembimbing II



Yeni Murlani Zulaida, S.T., M.T.

NIP. 197401032005012001

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISA PENGARUH *QUENCH-TEMPERING* DAN WAKTU
TAHAN TERHADAP KOROSI, KEKERASAN, DAN
STRUKTUR MIKRO PADA *STAINLESS
STEEL 304 THIN FOIL***

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

Wiranto Yogi Febrian

3334200007

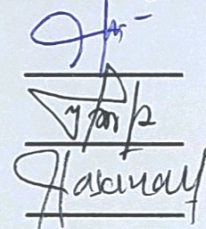
Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal

22 Mei 2025

Susunan Dewan Penguji

Penguji I : Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.
Penguji II : Yeni Muriani Zulaida, S.T., M.T.
Penguji III : Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T

Tanda Tangan



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik



Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Metalurgi

Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 198003072005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Analisa Pengaruh *Quench-Tempering* dan Waktu Tahan Terhadap Korosi, Kekerasan, dan Struktur Mikro pada *Stainless Steel 304 Thin Foil*

Nama Mahasiswa : Wiranto Yogi Febrian

NIM : 3334200007

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggung jawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 22 Mei 2025



Wiranto Yogi Febrian

NIM. 3334200007

ABSTRAK

Dalam penelitian ini, bertujuan untuk menganalisa pengaruh *quench-tempering* dan waktu tahan *stainless steel 304 thin foil* untuk aplikasi *diaphragm pressure gauge* sensor tekanan oli mesin dengan variasi temperatur *tempering* dan waktu tahan. *Quenching-tempering* adalah proses perlakuan panas logam dengan cara dipanaskan hingga temperatur austenisasi, lalu didinginkan secara cepat dalam media pendingin seperti air, minyak, atau air garam, kemudian material dipanaskan kembali dibawah temperatur rekristalisasi dan ditahan selama beberapa waktu lalu didinginkan secara perlahan menggunakan media udara. Proses austenisasi pada spesimen dilakukan pada temperatur 900°C dengan waktu tahan 1 jam, kemudian di-*quench* menggunakan air biasa. Selanjutnya di-*tempering* dengan variasi temperatur yaitu, 250°C, 400°C, 550°C, serta waktu tahan 60, 90, dan 120 menit. Analisa yang dilakukan meliputi kekerasan, ketahanan korosi, mikrostruktur, dan sebaran fasanya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dan waktu tahan *tempering*, menghasilkan penurunan nilai kekerasan dan penurunan ketahanan korosi pada *stainless steel 304 thin foil*. Kekerasan terendah dan laju korosi tertinggi terdapat pada tempertur *tempering* 550°C dengan waktu tahan 120 menit. Selain itu kenaikan temperatur dan waktu tahan *tempering* juga semakin menghilangkan fasa martensit dan memperbanyak pertumbuhan presipitat krom karbida sehingga mempengaruhi kekerasan dan ketahanan korosi material *stainless steel 304 thin foil*. Fasa martensit tertinggi terdapat pada temperatur 250°C dengan waktu tahan 60 menit dengan 55% martensit dan 45% austenit. Semakin naik temperatur dan waktu tahan, semakin menurunkan fasa martensit sedangkan fasa austenit menjadi lebih dominan.

Kata Kunci: *Stainless Steel 304 Thin Foil, Heat Treatment, Quenching-Tempering, Karbida Krom, Struktur Mikro.*

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, segala puji hanya milik-Nya, shalawat serta salam semoga tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW. Penelitian ini adalah hasil dari perjuangan, kerja keras, dan dukungan dari banyak pihak. Oleh karena itu, dengan kerendahan hati, penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul ” Analisa Pengaruh *Quench-Tempering* dan Waktu Tahan Terhadap Korosi, Ketahanan Aus, dan Struktur Mikro pada *Stainless Steel 304 Thin Foil*”. Tujuan dari pembuatan skripsi ini adalah untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar sarjana Studi S1 Jurusan Teknik Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mengarahkan dan membimbing dalam pengerjaan skripsi sehingga dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, dengan kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Teknik Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa sekaligus pembimbing I dalam penelitian ini.
2. Ibu Yeni Muriani Zulaida, S.T., M.T. selaku pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, saran, dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Orang tua, saudara dan teman-teman Teknik Metalurgi atas dukungan yang diberikan.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, saran dan kritik dari pembaca untuk perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberi sumbangsih pemikiran yang bermanfaat untuk pembaca. Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Cilegon, 22 Mei 2025

Wiranto Yogi Febrian

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	7
1.3 Rumusan Masalah	8
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	8
1.5 Sistematika Penulisan	9
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Stainless Steel</i>	10
2.2 <i>Austenitic Stainless Steel</i>	11
2.3 <i>Stainless Steel 304</i>	13
2.4 <i>Diaphragm Pressure Gauge</i>	14

2.5	<i>Heat Treatment</i>	17
2.6	<i>Solution Treatment</i>	20
2.6.1.	Pengaruh Variasi Temperatur <i>Tempering</i>	22
2.6.2.	Pengaruh Variasi Waktu Tahan <i>Tempering</i>	24
2.7	Diagram <i>Continuous Cooling Transformation</i>	24
2.8	Analisa Kekerasan.....	25
2.8.1.	Metode <i>Vickers</i>	26
2.9	Analisa Korosi (<i>Immersion Corrosion Testing</i>).....	28
2.10	Analisa Metalografi.....	30
2.11	Perhitungan Persen Fraksi Fasa	31

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir	32
3.2	Alat dan Bahan.....	33
3.2.1.	Alat-alat yang digunakan	33
3.2.2.	Bahan-bahan yang digunakan	33
3.3	Prosedur Penelitian.....	34
3.3.1.	Preparasi Sampel.....	34
3.3.2.	Proses Perlakuan Panas <i>Quenching Tempering</i>	34
3.3.3.	Pengujian Kekerasan <i>Vickers</i>	36
3.3.4.	Pengujian Korosi.....	37
3.3.5.	Pengamatan Metalografi	38
3.3.6.	Penamaan Sampel	40

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil Pengujian	41
4.1.1.	Pengujian Kekerasan	41
4.1.2.	Hasil Uji Korosi	42
4.1.3.	Hasil Pengamatan Metalografi	42
4.2	Analisa Kekerasan Material	47
4.2.1.	Kekerasan Spesimen Tempering 250°C	48
4.2.2.	Kekerasan Spesimen Tempering 400°C	49
4.2.3.	Kekerasan Spesimen Tempering 550°C	49
4.3	Analisa Laju Korosi	50
4.3.1.	Pengaruh Temperatur terhadap Laju Korosi	53
4.3.2.	Pengaruh Waktu Tahan terhadap Laju Korosi	57
4.4	Hasil Pengamatan Metalografi	60

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	74
5.2	Saran	75

DAFTAR PUSTAKA	76
-----------------------------	-----------

LAMPIRAN A. CONTOH PERHITUNGAN	82
---	-----------

LAMPIRAN B. DATA PENELITIAN	87
--	-----------

LAMPIRAN C. GAMBAR ALAT DAN BAHAN	90
--	-----------

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Karakteristik Kelompok <i>Stainless Steel</i>	11
Tabel 2.2 Komposisi <i>Stainless Steel 304 Thin Foil</i>	13
Tabel 2.3 Spesifikasi <i>Diaphragm Pressure Gauge</i> Sensor Tekanan Oli Mesin ...	18
Tabel 3.1 Penamaan Sampel	40
Tabel 4.1 Data Hasil Uji Kekerasan	41
Tabel 4.2 Data Hasil Uji Korosi.....	42
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Kekerasan Metode <i>Rule of Mixtures</i>	64
Tabel B.1 Perhitungan % Area Fraksi Fasa	88

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 1.1 <i>Diaphragm Pressure Gauge</i>	3
Gambar 2.1 Struktur Mikro <i>Stainless Steel 304</i>	14
Gambar 2.2 <i>Pressure Gauge system</i>	15
Gambar 2.3 <i>Cross Section Diagram</i> Baja Mengandung 18% <i>Chrom</i>	20
Gambar 2.4 Hasil <i>Quenching Stainless Steel 304</i>	21
Gambar 2.5 Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Kekerasan SUS 304.....	23
Gambar 2.6 Diagram CCT (<i>Continous Cooling Temperature</i>)	25
Gambar 2.7 Indentor Pengujian Vickers.....	27
Gambar 2.8 Tipe – tipe lekukan piramida intan: (a) lekukan sempurna, (b) lekukan bantal jarum, (c) lekukan berbentuk tong.....	27
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	32
Gambar 3.2 Ukuran Sampel <i>Stainless Steel 304 Thin Foil</i>	34
Gambar 3.3 Skematik <i>Heat Treatment Quench-Temper</i>	35
Gambar 3.4 Temperatur Austenisasi SS 304 0,05% C.....	35
Gambar 4.1 Struktur Mikro (a) T250 – H60 (b) T250 – H90 (c) T250 – H120....	44
Gambar 4.2 Struktur Mikro (a) T400 – H60 (b) T400 – H90 (c) T400 – H120....	45
Gambar 4.3 Struktur Mikro (a) T550 – H60 (b) T550 – H90 (c) T550 – H120....	46
Gambar 4.4 Grafik Uji Kekerasan.....	47
Gambar 4.5 Grafik Uji Laju Korosi vs Temperatur.....	54
Gambar 4.6 Grafik Uji Laju Korosi vs Waktu Tahan.....	58

Gambar 4.7 Hasil Metalografi <i>Non-Treatment</i>	60
Gambar 4.8 Hasil Metalografi Perlakuan <i>Quenching</i>	61
Gambar 4.9 Persen Fraksi Fasa vs Nilai Kekerasan.....	63
Gambar 4.10 Area Fasa T 250 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120.....	65
Gambar 4.11 Area Fasa T 400 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120.....	68
Gambar 4.12 Area Fasa T 550 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120.....	70
Gambar 4.13 Skematik Proses Perlakuan dan Hasil Struktur Mikro.....	73
Gambar A.1 Memilih Gambar Struktur Mikro.....	84
Gambar A.2 Kalibrasi Gambar.....	85
Gambar A.3 Menentukan Warna Ambang Batas.....	85
Gambar A.4 Menentukan <i>Limit to Threshold</i>	86
Gambar A.5 Hasil Persen Fraksi Fasa Struktur Mikro.....	86
Gambar B.1 Hasil <i>ImageJ</i> T 250 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120.....	88
Gambar B.2 Hasil <i>ImageJ</i> T 400 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120.....	89
Gambar B.3 Hasil <i>ImageJ</i> T 550 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120.....	89
Gambar C.1 Mesin <i>Grinding</i> dan <i>Polishing</i>	91
Gambar C.2 <i>Furnace Germany</i>	91
Gambar C.3 <i>Micro Vickers Hardness</i>	91
Gambar C.4 Mikroskop Optik.....	91
Gambar C.5 <i>Crucible</i>	91
Gambar C.6 Tang Penjepit.....	91
Gambar C.7 Wadah Media Pendingin.....	92
Gambar C.8 <i>Helm Safety</i>	92

Gambar C.9 Sarung Tangan.....	92
Gambar C.10 Pipet Tetes.....	92
Gambar C.11 <i>Aquades</i>	92
Gambar C.12 Larutan H ₂ SO ₄	92
Gambar C.13 Ampelas.....	93
Gambar C.9 Apron.....	93

BAB I

PENDAHULUAN

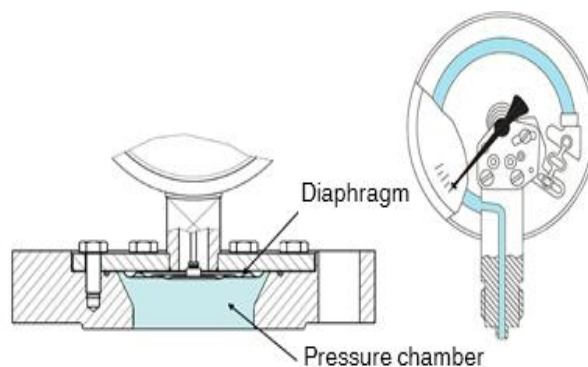
1.1 Latar Belakang

Perkembangan dunia industri makanan, kesehatan dan elektronik sekarang ini mengakibatkan kebutuhan material semakin meningkat. Oleh karena itu dunia perindustrian saat ini mulai melirik pada penggunaan bahan *stainless steel* sebagai bahan baku utama dalam produksinya, karena paduan termasuk logam yang berpenampilan menarik (*attractive*), tahan korosi (*corrosion resistance*), berkekuatan tinggi (*high strength*) dan rendah biaya perawatan (*low maintenance*) [33]. Selain itu permintaan tinggi *stainless steel* 304 dalam bentuk plat ultra tipis (*Thin Foil*) mulai banyak diminati untuk penggunaan industri biomedis, elektronik, kimia, tenaga listrik, makanan, dan nuklir [1]. Baja tahan karat austenitik umumnya digunakan untuk komponen manufaktur dengan sifat mekanik tinggi, tahan terhadap korosi, dan beroperasi baik pada temperatur tinggi maupun rendah. Karena baja ini memiliki kelebihan tersebut, salah satu aplikasi baja tahan karat austenitik yaitu banyak digunakan dalam industri perangkat sensor elektronik tekanan oli kendaraan. Dalam sensor tekanan oli kendaraan terdapat komponen penting berbentuk membran fleksibel (*diaphragm*) tipis yang disebut *diaphragm pressure gauge*. *Diaphragm pressure gauge* adalah alat pengukur tekanan yang menggunakan membran fleksibel sebagai elemen pengindera tekanan. Material *diaphragm* menggunakan *stainless steel* 304 *thin foil* harus memiliki ketahanan korosi, temperatur, kekuatan, dan kekerasan yang

mumpuni untuk beroperasi pada kondisi lingkungan yang abrasif, tekanan cukup tinggi, dan temperatur yang tinggi dalam waktu lama. Sehingga diperlukan material yang mampu bekerja secara optimal dibawah kondisi lingkungan yang berat tersebut. Tetapi dalam perkembangannya material *thin foil* masih memiliki masalah pada sifat mekanik yang dihasilkan seperti kekerasan yang meningkat akibat efek pengerasan regangan, di mana material menjadi lebih keras dan lebih kuat saat mengalami deformasi pada proses pembuatan *thin foil* dengan *cold rolling* dan terbentuk fasa martensit yang disertai *strain-induced* (41) sehingga perlu dilakukan perbaikan pada sifat mekanik tersebut agar pengaplikasian *stainless steel 304 thin foil* untuk sensor tekanan oli menjadi lebih baik.

Stainless steel 304 thin foil merupakan baja ultra tipis dengan ketebalan 0,1 – 0,01 mm dibentuk dengan proses *cold working* sehingga menaikkan kekerasan mencapai 400 HVN. Memiliki kekuatan tarik 646 Mpa dan modulus elastisitas 193 Gpa. Material ini memiliki ketahanan terhadap korosi karena terdapat unsur paduan 18% krom dan 8% nikel. *Stainless steel* memiliki ketahanan korosi yang baik disebabkan oleh fenomena pasivasi dimana unsur kromium yang bereaksi dengan oksigen yang ada dilingkungan membentuk suatu lapisan yang sangat tipis dan stabil oksida kromium (Cr_2O_3). Lapisan ini terbentuk sangat cepat dan menutupi seluruh permukaan *stainless steel* sehingga melindungi material dari korosi. *Stainless steel 304 thin foil* cocok untuk diaplikasikan komponen *diaphragm* sensor tekanan oli kendaraan karena memiliki *formability* yang baik, konduktivitas termal yang baik dan tahan terhadap korosi. *Pressure gauge* adalah alat yang digunakan untuk mengukur tekanan dalam suatu sistem,

baik sistem cairan maupun gas. Prinsip kerja alat *pressure gauge* menggunakan sensor piezoelektrik yang memiliki kemampuan untuk menghasilkan sinyal listrik ketika mengalami deformasi akibat tekanan. Sensor ini terbuat dari material tipis yang tahan terhadap tekanan, keausan, dan korosi. Material tipis sebagai elemen pengindra tekanan *pressure gauge* disebut *diaphragm*, berikut komponen *diaphragm* yang terdapat didalam *pressure gauge*.



Gambar 1.1 *Diaphragm Pressure Gauge* [49]

Diaphragm Pressure Gauge memiliki spesifikasi mekanik dan kimia dalam aplikasinya sebagai sensor tekanan oli kendaraan. Sifat mekanik yang harus dimiliki yaitu kuat tarik material 500-700 MPa, kekerasan 175 – 300 HV, modulus elastisitas 190 – 200 MPa, ketebalan diaphragm 0,1 mm – 0,5 mm, dan mampu menahan tekanan 2 sampai 10 bar. Sedangkan sifat kimia yang harus dipenuhi yaitu, tahan terhadap korosi dengan nilai laju korosi $< 0,01$ mm/year, tidak bereaksi terhadap fluida, dan tahan temperatur lingkungan hingga 150°C. Sehingga dari spesifikasi tersebut *stainless steel 304 thin foil* lazim digunakan pada *diaphragm pressure gauge* sensor tekanan oli karena memenuhi kriteria standar material yang telah ditetapkan.

Meskipun *Stainless Steel 304 thin foil* sudah memiliki sifat kimia dan mekanik yang mumpuni untuk sensor tekanan oli kendaraan, baja tahan karat ini masih sering mengalami kerusakan pada *diaphragm* karena keausan, paparan kontaminasi oli, atau kegagalan mekanis. Jika *diaphragm* mulai mengalami keausan, sensor dapat kehilangan akurasi dalam mendeteksi tekanan menyebabkan pembacaan yang salah atau peringatan tekanan oli rendah pada indikator, meskipun sistem oli masih berfungsi normal. Penyebab keausan pada *diaphragm pressure gauge* yaitu sering terkena siklus gesekan oli yang berulang-ulang, terutama saat mesin kendaraan dihidupkan, berjalan, atau dimatikan. Fluktuasi ini dapat merusak permukaan *diaphragm* yang pada akhirnya memicu keretakan mikro atau deformasi sehingga mengurangi sensitifitas sensor terhadap pembacaan tekanan oli mesin kendaraan. Selain itu kontaminasi oli oleh partikel kecil seperti logam atau kotoran dapat menyebabkan abrasi dan memperbesar gesekan pada permukaan *diaphragm* kemudian eksposur jangka panjang terhadap oli tertentu atau bahan kimia aditif dalam oli bisa menyebabkan korosi atau keausan. Oleh karena itu *stainless steel 304 thin foil* sebagai *diaphragm* sensor tekanan oli kendaraan perlu ditingkatkan dengan perlakuan panas di bawah urutan pemanasan dan pendinginan yang terkendali, dengan memperbaiki sifat kimia dan mekanik untuk memenuhi aplikasi yang diinginkan dan memperpanjang umur pakai. Material *Stainless Steel 304 thin foil* perlu direkayasa untuk menyesuaikan lingkungan kerja sistem oli kendaraan, agar tidak terjadi kegagalan dan kerusakan pada komponen karena tingginya temperatur dan beban kerja secara terus-menerus.

Upaya untuk memperbaiki ketahanan aus, korosi, dan abrasivitas *stainless steel 304 thin foil* aplikasi *diaphragm* sensor tekanan oli kendaraan dilakukan dengan perlakuan panas *quenching-tempering*. Perlakuan panas *quenching* dan *tempering* pada *stainless steel 304 thin foil* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro materialnya. Proses *quenching* meningkatkan kekerasan *stainless steel 304* akibat transformasi austenit berubah menjadi martensit parsial, kemudian setelah *tempering* kekerasan akan sedikit berkurang, tetapi ductiliti meningkat, sehingga cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kombinasi tahan tekanan, abrasi dan duktilitas. Perlakuan *quenching* dan *tempering* dapat meningkatkan ketahanan terhadap beban siklik, yang penting untuk aplikasi *diaphragm pressure gauge* yang sering mengalami tekanan berulang. Proses *quenching* dapat meningkatkan tegangan internal yang memicu korosi retak tegangan (*stress corrosion cracking*) dengan proses *tempering* tegangan residual dapat dikurangi sehingga meningkatkan stabilitas lapisan pasivasi dan mengembalikan ketahanan korosi material. Oleh karena itu, penelitian ini melihat pengaruh proses perlakuan panas dengan metode *Quenching-Tempering* terhadap sifat mekanik dan kimia *stainless steel 304 thin foil* berfokus pada perubahan ketahanan korosi, kekerasan dan struktur mikro yang dihasilkan sebagai komponen *diaphragm pressure gauge* aplikasi sensor tekanan oli kendaraan.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan pada penelitian ini adalah terjadinya penurunan sifat mekanik dan degradasi material oleh lingkungan kerja sensor tekanan oli

kendaraan pada pengaplikasian *stainless steel 304 thin foil* sehingga menyebabkan terjadinya penurunan sifat mekanik dan korosi terhadap material. Berdasarkan hal tersebut, maka fokus permasalahan penelitian ini adalah bagaimana menaikkan sifat mekanik dan kimia *stainless steel 304 thin foil* dengan cara perlakuan panas *quenching-tempering* sehingga keausan dan korosi material *diaphragm* sensor tekanan oli dapat dikurangi dan memperpanjang umur pakai sensor. Berikut adalah rumusan masalahnya:

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur dan waktu tahan pada perlakuan panas *quenching-tempering* terhadap kekerasan material *stainless steel 304 thin foil*?
2. Bagaimana pengaruh variasi temperatur dan waktu tahan perlakuan panas *quenching-tempering* terhadap ketahanan korosi pada *stainless steel 304 thin foil*?
3. Bagaimana temperatur tempering pada waktu tertentu mempengaruhi struktur mikro material *stainless steel 304 thin foil*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah yang telah penulis susun, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variasi temperatur dan waktu tahan perlakuan panas *quenching-tempering* terhadap nilai kekerasan dan ketahanan korosi pada baja *stainless steel 304 thin foil*
2. Mengetahui pengaruh variasi temperatur dan waktu tahan perlakuan panas *quenching-tempering* terhadap ketahanan korosi pada baja *stainless steel 304 thin foil*

3. Mengetahui struktur mikro yang terbentuk dengan variasi temperatur dan waktu tahan pada perlakuan panas *quenching-tempering*.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian dalam judul “Analisa Pengaruh *Heat Treatment Quenching* dan *Tempering* terhadap Korosi, Ketahanan Aus dan Struktur Mikro pada Material *Stainless Steel 304 Thin Foil*” dapat dijelaskan sebagai berikut:

- a. Bahan Baku : Penelitian ini menggunakan material baja *austenitic Stainless Steel 304* dengan bentuk lembar tipis atau berupa *Thin Foil*
- b. Variabel : Penelitian ini menggunakan 2 variabel tetap, 2 variabel bebas dan 3 variabel terikat yaitu:

Variabel Tetap

1. Material *stainless steel 304 thin foil*
2. Ukuran *grain size stainless steel 304 thin foil* adalah 0,5 μm
3. Austenisasi temperatur 900°C waktu tahan 60 menit

Variabel Bebas

1. Temperatur *Tempering*: variabel bebas pertama adalah temperatur *tempering*. Penelitian ini menggunakan variasi temperatur *tempering* 250°C, 400°C, dan 550°C untuk melihat bagaimana variasi temperatur *tempering* mempengaruhi sifat mekanik, ketahanan korosi dan struktur mikro *stainless steel 304*
2. *Holding Time tempering*: Variabel bebas kedua adalah *holding time* yang digunakan pada perlakuan *tempering* yaitu 60 menit, 90 menit,

dan 120 menit pada masing-masing temperatur. Penelitian ini memvariasikan *holding time* untuk melihat bagaimana variasi *holding time tempering* mempengaruhi sifat mekanik, ketahanan korosi dan struktur mikro *stainless steel* 304.

Variabel Terikat

1. Sifat Mekanis: Variabel pertama adalah nilai kekerasan *Stainless Steel* 304 yang akan diukur melalui pengujian kekerasan.
2. Sifat Kimia: Variabel terikat kedua adalah sifat kimia berupa nilai laju korosi *stainless steel* 304 yang dianalisis melalui pengujian korosi.
3. Struktur Mikro: Variabel terikat ketiga yaitu bentuk struktur mikro *stainless steel* 304 yang dihasilkan setelah dilakukan perlakuan panas. Kemudian dianalisis dengan pengujian metalografi

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini diawali dengan Bab I yaitu pendahuluan yang berisikan adanya latar belakang dilakukannya penelitian, adanya rumusan masalah penelitian, adanya tujuan penelitian, adanya ruang lingkup penelitian dan sistematika penulisan. Lalu dilanjutkan dengan Bab II yaitu tinjauan pustaka yang membahas tentang tinjauan mengenai teori-teori pendukung. Selanjutnya adalah Bab III yaitu metode penelitian yang berisikan bagaimana prosedur penelitian tersebut akan dilakukan dengan alat dan bahan yang sudah direncanakan. Kemudian adanya Bab IV yang berisikan hasil dan pembahasan penelitian. Selanjutnya, Bab V yang berisikan kesimpulan dan saran. Lalu diakhiri dengan

adanya daftar pustaka yang berisikan kutipan jurnal atau buku yang digunakan selama menyusun skripsi ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Stainless Steel*

Baja tahan karat *stainless steel* merupakan jenis baja yang paling banyak digunakan, berdasarkan aplikasinya baja tahan karat digunakan dalam berbagai jenis konstruksi dan komponen alat. *Stainless steel* merupakan jenis baja paduan yang mengandung sedikitnya 11,5% unsur *Chrom* berdasarkan komposisinya. Selain unsur kromium terdapat unsur tambahan lain yaitu Ni, Mn, Al, Cu, dan Nb [24]. *Stainless steel* memiliki sifat tidak mudah terkorosi yang disebabkan oleh kandungan kromnya sehingga menjadi pembeda diantara jenis logam baja lainnya yang mudah terkena korosi. Baja karbon akan terkorosi ketika diaplikasikan pada udara yang lembab dan lingkungan basah. Besi oksida yang terbentuk karena berikatan dengan Oksigen menjadi aktif dan mempercepat terjadinya korosi dengan adanya pembentukan oksida besi yang semakin banyak. *Stainless steel* memiliki presentase jumlah krom yang cukup untuk menanggulangi korosi dimana krom membentuk suatu lapisan pasif kromium oksida yang akan mencegah unsur Fe berikatan dengan oksigen penyebab munculnya korosi. Lapisan pasif *Chromium(III) oxide* (Cr_2O_3) yang terbentuk merupakan lapisan tipis dan tidak kasat mata, sehingga tidak akan mempengaruhi penampilan dari *stainless steel* itu sendiri. Dari sifat materialnya yang tahan terhadap air dan udara, *stainless steel* tidak memerlukan perlindungan tambahan khusus karena lapisan tipis dari krom akan cepat terbentuk kembali ketika mengalami suatu goresan,

peristiwa ini disebut dengan pasivasi. Terdapat berbagai jenis material *stainless steel* bergantung pada komposisi unsur yang digunakan sehingga mempengaruhi sifat mekanik tertentu pada material. Ketika nikel digunakan sebagai unsur paduan, maka ketahanan korosi meningkat dan kegetasannya menurun pada temperatur rendah sedangkan apabila diinginkan sifat mekanik yang lebih kuat dan keras, maka dapat dilakukan penambahan unsur karbon [17]. *Stainless steel* juga dapat dibedakan berdasarkan struktur kristal yang terbentuk yaitu *austenitic stainless steel*, *ferritic stainless steel*, *martensitic stainless steel*, *precipitation-hardening stainless steel*, dan *duplex stainless steel*. Dapat dilihat pada Tabel 2.1 rentang komposisi dari kelompok *stainless steel*.

Tabel 2.1 Karakteristik Kelompok *Stainless Steel* (25)

Stainless Steels	C (Wt%)	Cr (Wt%)	Ni (Wt%)	Mo (Wt%)	Other (Wt%)
Martensitic	0.03-2.2	10.5-18	0-7	0-4	Mn, Si, V, N, Cu
Ferritic	<0.25	10.5-30	0-4.5	0-4.5	Mn, Si, N, Ti/Nb, Al
Duplex	<0.05	18-30	1-8	1-5	Mn, Si, N, Cu, W
Austenitic	<0.08	16-30	8-35	0-7	N, Nb, Ti, Cu
Precipitation Hardening	<0.2	10-17	4.3-26	0-5	Mn, Si, Al, Ti, Nb, V, Cu, W

2.2 *Austenitic Stainless Steel*

Austenitic stainless steel mengandung 16% hingga 28% unsur kromium dan memiliki elemen penstabil austenit seperti nikel, mangan, dan karbon untuk memiliki struktur mikro austenit pada suhu ruang. Nikel adalah unsur substitusi dasar yang digunakan sebagai pembentuk dan penstabil austenit, sehingga *austenitic stainless steel* disebut juga sebagai paduan Fe-Cr-Ni. Unsur paduan lainnya, baik interstisial seperti C dan N, atau substitusi seperti Mn, Mo,

Si, Ti, Nb, W, V, Cu, Al, dll., juga dapat ditambahkan untuk memberikan sifat yang diinginkan. *Austenitic stainless steel* memiliki struktur *single phase* yaitu *face centered cubic* (FCC). Selain itu *Austenitic Steel* memiliki banyak keunggulan dari segi metalurgi:

1. Material ini mempunyai sifat ulet (yaitu, dengan kekuatan tarik sekitar 200 MPa) sehingga mudah dibentuk dengan alat yang sama yang digunakan untuk baja karbon, tetapi juga dapat dibuat sangat kuat melalui *cold working* dengan hasil kekuatan tarik mencapai lebih dari 2000 MPa (290 ksi).
2. Struktur *austenitic* berupa *face centered cubic* (FCC) memiliki sifat sangat tangguh dan *ductile* pada berbagai temperatur kerja. Selain itu tidak terjadi penurunan kekuatan dari *austenitic stainless steel* pada saat temperatur tinggi sebagaimana yang terjadi pada paduan besi berbasis feritik dengan struktur *body centered cubic* (BCC).
3. Pada Versi yang tingkat ketahanan korosinya normal dapat menahan serangan korosif dari lingkungan sehari-hari yang biasa diaplikasikan, sementara tipe yang paling tahan korosi bahkan dapat menahan korosi yang disebabkan oleh lingkungan yang ekstrim seperti temperatur tinggi, dibawah dan lainnya.

Baja Paduan *austenitic* ini juga memiliki kelemahan yaitu:

1. *Austenitic stainless steel* kurang tahan terhadap oksidasi siklik dibandingkan dengan tipe feritik karena koefisien ekspansi termal yang lebih besar cenderung menyebabkan lapisan oksida pelindung mengelupas.

2. Baja tipe ini dapat mengalami *stress corrosion cracking* (SCC) jika digunakan pada kondisi lingkungan yang tidak sesuai.

2.3 *Stainless Steel 304*

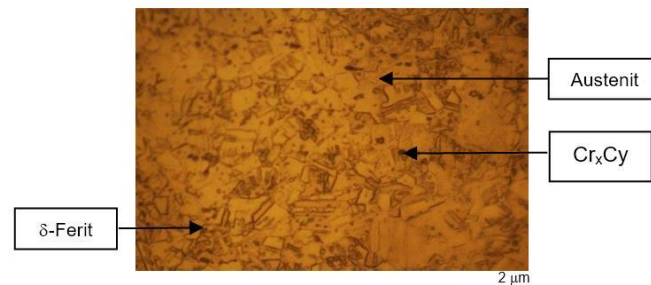
Tipe 304 adalah tipe *stainless steel* yang paling sering digunakan dalam berbagai industri maupun skala kecil karena kekuatan mekanik, kemampuan las dan ketahanan korosinya sangat baik dengan harga yang relative terjangkau. *Stainless steel* merupakan baja Paduan yang mengandung sekitar 12% Cr yang menunjukkan ketahanan korosi karena pembentukan lapisan film kromium oksida (Cr_2O_3). *Stainless steel 304* adalah adalah baja tahan karat kelompok *austenitic stainless steel* yang memiliki komposisi 0,0042%C, 1.19%Mn, 0,034%P, 0,006%S, 0,049%Si, 18,24%Cr, 8,15%Ni, dan sisanya Fe.

Tabel 2.2 Komposisi *Stainless Steel 304 Thin Foil* [1]

	Cr	Ni	S	P	C	Si	Mn
Min	18.00	8.00	-	-	-	-	-
Max	20.00	10.50	0.030	0.045	0.08	1.00	2.00
-	18.01	8.03	0.004	0.030	0.05	0.39	1.10

Stainless steel 304 memiliki sifat *non-magnetic*, dapat dikeraskan dengan *cold working* dan pada saat kondisi *aneal*, *stainless steel* mempunyai sifat *formability*. Tipe 304 *stainless steel* paling banyak digunakan dengan 18%Cr dan 8%Ni [21]. Baja tahan karat tipe ini memiliki sifat mekanik yang cukup mumpuni antara lain: kekuatan tarik 646 Mpa, *yield strength* 270 Mpa, *elongation* 50%, dan kekerasan 82 HRB [27]. Pada gambar 2.1 menunjukkan struktur mikro dari *stainless steel*

304. Terlihat dari gambar bahwa struktur mikro terdiri atas fasa *austenite*, δ -ferit dan presipitat krom karbida (Cr_xC_y) berupa endapan di batas butir.

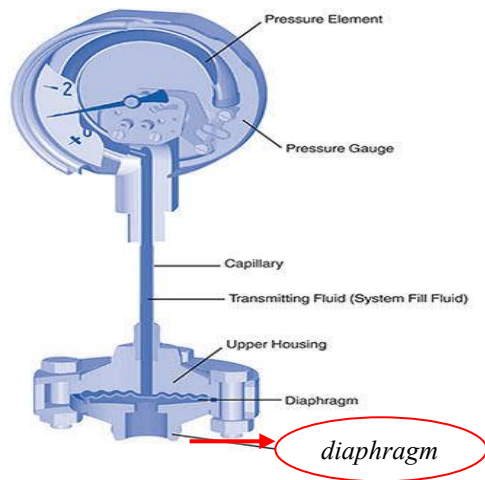


Gambar 2.1 Struktur Mikro *Stainless Steel* 304 [40]

Pada stainless steel 304, jenis karbida yang sering muncul adalah karbida kromium (Cr_{23}C_6). Pembentukan karbida kromium (Cr_3C_2) pada *stainless steel* 304 sering terjadi karena komposisi kromium dan karbon *stainless steel* 304 mengandung sekitar 18% kromium dan 0,05% karbon. Pada rentang suhu 450–870°C menyebabkan difusi karbon menuju batas butir dan bereaksi dengan kromium membentuk presipitasi Cr_{23}C_6 di batas butir.

2.4 *Diaphragm Pressure Gauge*

Diaphragm pressure gauge adalah alat yang digunakan sebagai penanda besarnya tekanan fluida yang bisa berupa gas atau cairan didalam sebuah alat proses atau perpipaan yang menggunakan membran fleksibel (*diaphragm*) untuk mendeteksi tekanan fluida dalam suatu sistem. Pada *diaphragm pressure gauge*, memiliki sebuah kelebihan dibandingkan dengan *pressure gauge* tipe biasa yaitu adanya membran atau *diaphragm* yang terpasang pada bagian koneksi dari *pressure gauge*.



Gambar 2.2 *Pressure Gauge system* [47]

Fungsi dari *diaphragm pressure gauge* tersebut yaitu mengukur tekanan pada pipa untuk mengetahui atau mengindikasikan apakah ada kebocoran atau perubahan tekanan yang signifikan yang mempengaruhi sebuah sistem kerja tersebut tidak dapat bekerja sesuai dengan normalnya. Selain itu, fungsi *diaphragm pressure gauge* memiliki membran fleksibel yang dapat mengisolasi fluida dalam sistem. Efek dari tekanan fluida dapat melewati membran *diaphragm*, tetapi material yang ada didalamnya tidak akan terpengaruh atau terkena kontaminasi sehingga tidak akan mengurangi kemurnian fluida yang diukur. Dalam aplikasinya sebagai sensor tekanan oli mesin kendaraan, sifat-sifat material *diaphragm* harus mampu beroperasi didalam lingkungan kerja mesin yaitu, *diaphragm* memiliki elastisitas yang cukup untuk merespons tekanan oli secara akurat tanpa mengalami deformasi permanen, memiliki kekerasan yang cukup untuk mencegah deformasi plastik, tetapi tidak terlalu keras sehingga mengurangi fleksibilitas. Memiliki ketahanan terhadap korosi oli mesin yang dapat mengandung bahan kimia aditif, asam, dan kelembapan, mampu bertahan terhadap partikel kecil atau kotoran

abrasif yang terdapat didalam oli, selain itu tidak bereaksi dengan komponen kimia dalam oli untuk mencegah degradasi material atau kontaminasi oli, dan harus stabil pada suhu tinggi yang dihasilkan oleh mesin kendaraan hingga 150°C.

Tipe dari *diaphragm seal* ini banyak digunakan untuk *sanitary process*, seperti industri makanan dan minuman, obat-obatan dan perkebunan. Cara kerja *diaphragm pressure gauge* adalah ketika tekanan fluida diterapkan pada satu sisi membran, membran akan melengkung atau terdefleksi. Defleksi ini kemudian ditransmisikan melalui mekanisme penghubung ke sistem penunjuk, seperti jarum pada dial, yang menunjukkan nilai tekanan yang terukur. Desain ini memungkinkan pengukuran tekanan tanpa kontak langsung antara fluida dan komponen mekanis internal. Spesifikasi material *diaphragm pressure gauge* untuk aplikasi sensor tekanan oli kendaraan harus memenuhi beberapa persyaratan penting agar dapat beroperasi secara andal dalam lingkungan oli mesin. Berikut adalah spesifikasi yang umum digunakan:

Tabel 2.3 Spesifikasi *Diaphragm Pressure Gauge* Sensor Tekanan Oli Mesin [48]

Material	Stainless Steel: SS 304 / SS 316 / SS 316L Superalloy: Hastelloy, Tantalum, Monel, Inconel dll
<i>Tensile Strength</i> (MPa)	500 – 700
<i>Hardness</i> (HV)	175 – 300
<i>Thickness</i> (mm)	0,1 – 0,5
<i>Pressure Range</i> (bar)	2 – 10
<i>Modulus Elastisity</i> (MPa)	190 – 200
<i>Temperature</i> (°C)	Ambient: -20 sampai 65, Fluid: -20 sampai 200
<i>Rate Corrosion</i> (mm/year)	< 0,01 mm/year

2.5 *Heat Treatment*

Perlakuan panas (*heat treatment*) merupakan proses merubah sifat fisik atau mekanik pada logam, melalui pengubahan struktur mikro dengan cara pemanasan dan pengaturan laju pendinginan [2]. Secara umum proses perlakuan panas adalah sebagai berikut:

- a. Pemanasan material sampai temperatur pada kecepatan tertentu.
- b. Mempertahankan temperatur untuk waktu tertentu.
- c. Pendinginan dengan media pendingin (air, oli atau udara).

Tujuan dilakukannya *heat treatment* untuk meningkatkan keuletan, menghaluskan ukuran butir kristal, menghilangkan tegangan internal dan meningkatkan kekerasan atau tegangan tarik pada material. Dalam melakukan proses *heat treatment* terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi hasil *heat treatment*, yaitu temperatur pemanasan, waktu tahan yang diperlukan saat pemanasan, laju pendinginan dan lingkungan atmosfer. *Heat treatment* adalah kombinasi antar proses pemanasan atau pendinginan suatu logam dalam keadaan padat untuk memunculkan sifat – sifat tertentu. Untuk mencapai sifat – sifat yang diinginkan, maka perlu diperhatikan kecepatan pendinginan dan temperatur penahanan [34]. Dalam proses *heat treatment* akan merekayasa mikrostruktur logam pada skala atom, kristal maupun struktur makronya. Perubahan aspek struktural akan terjadi selama perlakuan panas sehingga struktur kristal dan kisi atom mengalami perubahan yang berpengaruh terhadap sifat akhir yang diinginkan pada material. Adanya sifat alotropik pada Fe menyebabkan rekayasa struktur mikro dari berbagai jenis logam dapat dilakukan. Alotropik sendiri adalah proses

bertransformasinya suatu bentuk susunan atom (sel satuan) ke bentuk susunan atom yang lain [28]. Metode dari *heat treatment* ada beberapa cara yaitu:

1. *Hardening*: Merupakan proses *heat treatment* terhadap logam dengan tujuan meningkatkan kekerasan alami logam. Proses ini dilakukan dengan tahapan pemanasan material mencapai titik *austenite* dan menahannya pada temperatur tersebut dalam waktu tertentu lalu didinginkan secara cepat sehingga sebagian atau seluruh fasa menjadi *martensite* yang mengakibatkan kekerasan pada baja meningkat.
2. *Annealing*: adalah *heat treatment* logam dengan cara pendinginan lambat yang bertujuan untuk menghilangkan tegangan internal, dan meningkatkan keuletan baja. Tahapan annealing dilakukan dengan cara memanaskan baja mencapai titik austenisasi dan ditahan dalam waktu tertentu kemudian dilakukan pendinginan pada baja secara lambat didalam *furnace*. Pendinginan secara lambat akan menyesuaikan pertumbuhan butir dan *internal stress* yang dihasilkan sehingga batas butir dari atom logam menjadi halus dan kekerasan menjadi turun dan memunculkan sifat ulet pada logam. Fasa yang terbentuk setelah proses *annealing* adalah ferit dan pearlit kasar.
3. *Normalizing*: Temperatur pemanasan untuk *normalizing* lebih tinggi daripada pemanasan untuk *annealing* sampai sekitar 50⁰C diatas temperatur kritis A₃ dan pendinginan dilakukan di udara terbuka, sehingga lebih cepat menyebabkan kecepatan pembentukan ferit *proeutektoid* atau sementit *proeutektoid* akan lebih kecil atau lebih sedikit dan perlit akan lebih banyak. Pada umumnya *normalizing* menghasilkan struktur yang halus, sehingga baja

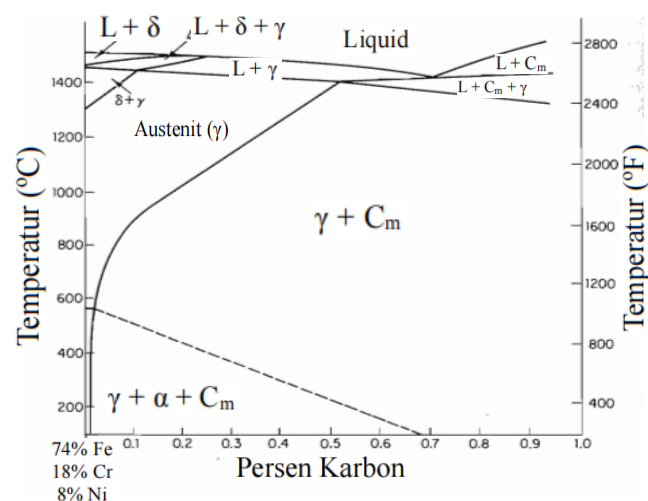
dengan komposisi kimia yang sama akan memiliki *yield strength*, UTS, kekerasan, dan kekuatan impak akan lebih tinggi daripada hasil dari *annealing*.

4. *Tempering*: Perlakuan untuk menghilangkan tegangan sisa dan menurunkan kerapuhan logam dilakukan dengan proses *tempering*. *Tempering* biasanya dilakukan setelah *quenching*. *Tempering* merupakan proses pemanasan logam setelah dikeraskan, pada temperatur di bawah temperatur kritis kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan udara. Struktur mikro yang dihasilkan adalah merubah struktur martensit menjadi besi karbida atau sementit. Baja yang dikeraskan memiliki sifat mekanik yang rapuh dan getas sehingga kurang cocok untuk aplikasi tertentu. Sifat rapuh dan getas ini dapat diturunkan melalui proses *tempering* agar mendapatkan sifat baja yang tangguh tetapi keras. Pada *tempering* kekerasan turun, kekuatan tarik akan turun pula sedang keuletan dan ketangguhan baja akan meningkat. Dalam perlakuan *tempering*, pada temperatur 200°C sampai 300°C laju difusi atom karbon lambat dan sebagian kecil karbon dibebaskan, hasilnya sebagian struktur tetap keras tetapi tegangan sisa mulai hilang dan kerapuhan menurun. Diantara temperatur 500°C dan 600°C difusi atom berlangsung lebih cepat, dan atom karbon yang berdifusi akan membentuk sementit. Penjelasan lebih lanjut mengenai macam-macam temperatur tempering dijelaskan dalam sub-bab 2.6.1
5. *Homogenizing*: *Homogenizing* dilakukan pada temperatur 1100-1200°C. proses difusi yang terjadi pada temperatur ini akan menyeragamkan komposisi

baja. Biasanya diterapkan pada ingot baja paduan dimana pada saat membeku sesaat setelah proses penuangan, memiliki struktur yang tidak homogen. Proses ini dilakukan beberapa jam pada temperatur sekitar 1150-1200°C lalu didinginkan hingga 1150-1200°C, setelah itu didinginkan diudara. Setelah proses ini dapat juga dilakukan proses normal atau anil untuk memperluas struktur *over-heat*.

2.6 *Solution Treatment*

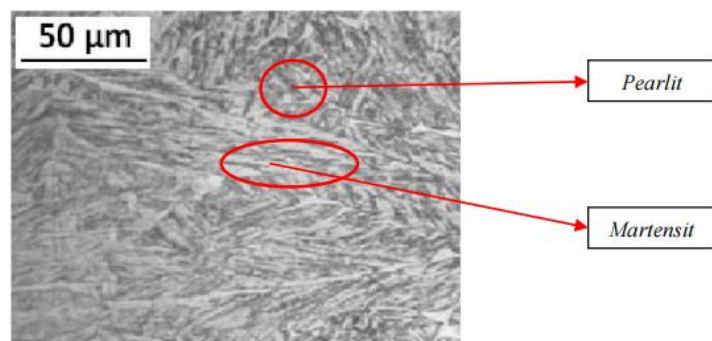
Solution Treatment adalah proses memanaskan baja Paduan dalam tungku pemanas dengan temperatur yang cukup tinggi hingga zona fase tunggal austenit dan ditahan pada rentang waktu tertentu dan setelah itu dilakukan pendinginan secara cepat. Tahap *solution treatment* bertujuan untuk melarutkan kembali fasa karbida pada baja paduan dan austenit menjadi homogen [35]. Di dalam proses ini logam dipanaskan sampai fasa γ dengan temperature 900°C, kemudian ditahan dalam waktu tertentu dan akhirnya larut sempurna sehingga fasanya γ seluruhnya. Proses ini mampu meningkatkan nilai kekerasan dari material.



Gambar 2.3 Cross Section Diagram Baja Mengandung 18% Chrom [7]

Proses *solution treatment* biasa dilakukan pada rentang temperatur 900°C – 1100°C. Kondisi fasa matriks pada temperatur ini memungkinkan elemen-elemen paduan berdifusi ke dalam matriks induknya dan terdistribusi dengan sendirinya secara merata. Komposisi yang terjadi disebut sebagai larutan padat. Larutan padat kemudian didinginkan dengan cepat (*quench*) hingga mencapai temperatur kamar sehingga atom-atom yang terlarut akan tetap terdistribusi merata dalam larutan padat lewat jenuh (*supersaturated solid solution*).

Proses diawali dengan memanaskan sampel sampai dengan titik *austenite* yang dapat merubah fasa secara homogen pada fasa α selanjutnya dilakukan proses pendinginan secara cepat dengan metode *quenching*. Menurut penelitian Dani N.R, dkk [11], fasa yang dihasilkan adalah martensit dan pearlit. Berikut adalah gambar struktur mikronya:



Gambar 2.4 Hasil *Quenching* Stainless Steel 304 [11]

Kemudian dilakukan proses *tempering* pada tiga sampel sampai dengan temperatur 250°C, 400°C dan 550°C dengan masing-masing waktu penahanan selama 60 menit, 90 menit dan 120 menit untuk menghilangkan tegangan permukaan yang tersisa dan memperbaiki sifat mekanik *stainless steel 304 thin*

foil hasil dari proses *quenching*. Setelah proses *tempering* material didinginkan pada udara terbuka.

2.6.1 Pengaruh Variasi Temperatur *Tempering*

Tempering adalah proses pemanasan kembali suatu logam yang telah dikeraskan sebelumnya melalui *quenching*. Pemanasan kembali dilakukan dibawah temperatur kritis selama waktu tertentu dan didinginkan secara perlahan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Dani N.R, dkk [11], yang melakukan proses *hardening* pada temperatur 900°C kemudian di *tempering* pada temperatur 200°C, 300°C, dan 400°C dapat menghasilkan baja dengan sifat yang berbeda. Temperatur dapat berpengaruh pada sifat mekanik material dimana dengan meningkatkan temperatur *heat treatment* pada permukaan baja akan meningkatkan keuletan baja. Berdasarkan temperaturnya, proses *tempering* dibedakan sebagai berikut:

a. *Tempering* temperatur rendah (150° - 300°C)

Pada temperatur ini untuk mengurangi tegangan internal atau kegetasan pada baja dan hanya sedikit menambahkan keuletan.

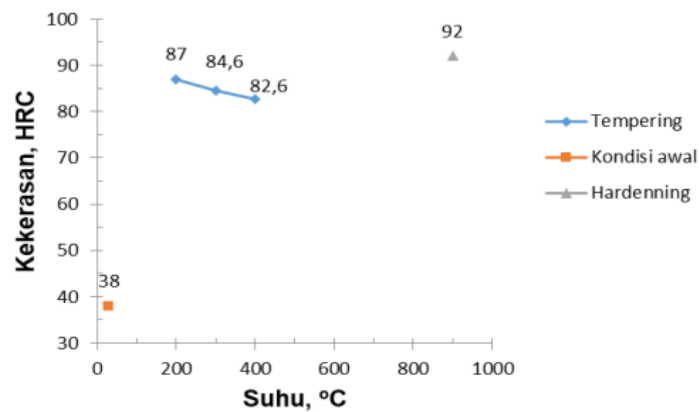
b. *Tempering* temperatur menengah (300° - 550°C)

Pada temperatur ini bertujuan untuk menambahkan keuletan dan menurunkan sedikit kekerasannya.

c. *Tempering* temperatur tinggi (550° - 650°C)

Tempering ini bertujuan untuk memunculkan sifat ulet dan tangguh yang besar tetapi menurunkan kekerasan material dan mungkin disertai transformasi fasa.

Pada penelitian sebelumnya oleh Dani N.R. dkk [11] ditemukan bahwa proses *tempering* akan menurunkan kekerasan, sedangkan keuletan dan ketangguhan baja akan meningkat.



Gambar 2.5 Pengaruh Kenaikan Temperatur vs Kekerasan SUS 304 [11]

Dari hasil penelitian yang dilakukan sebelumnya dapat kita simpulkan bahwa terjadi penurunan kekerasan, karena sesuai dengan fungsi *tempering* adalah untuk meningkatkan keuletan dan menghilangkan tegangan sisa dari baja. Benda yang cenderung semakin ulet maka nilai kekerasannya akan mengalami penurunan [11]. pada penelitian sebelumnya juga disebutkan bahwa semakin tinggi suhu *tempering* yang digunakan maka laju korosi yang dihasilkan akan semakin rendah dan ketahanan korosi akan meningkat [30]. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kandungan unsur kromium yang terlarut dalam matriks. Penelitian yang dilakukan oleh *nickel development institute* menyatakan bahwa kelarutan karbida di dalam matriks baja tahan karat diharapkan dapat meningkatkan karbida logam Cr_{23}C_6 dan Mo_{23}C_6 , sehingga ketahanan korosi akan meningkat [30].

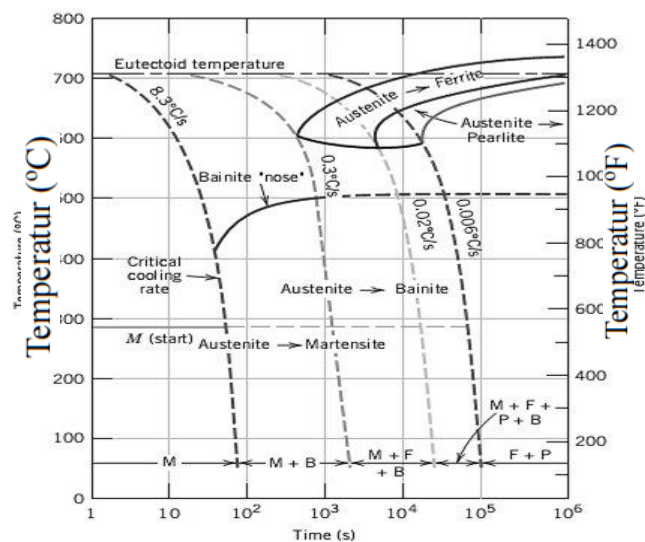
2.6.2 Pengaruh Variasi Waktu Tahan *Tempering*

Holding Time atau waktu tahan adalah waktu yang dilakukan pada proses pemanasan untuk mendapatkan sebuah sifat mekanik atau kimia tertentu yang diinginkan. Waktu penahanan sangat berpengaruh pada saat transformasi karena apabila waktu penahanan yang diberikan kurang tepat maka transformasi fasa yang terjadi tidak sempurna dan tidak homogen. Semakin lama *holding time* proses tempering pada baja karbon rendah mengakibatkan mengecilnya batas butir dan semakin besar ukuran butirnya [15]. Selain itu apabila waktu tahan terlalu pendek akan menghasilkan kekerasan yang rendah hal ini disebabkan tidak cukupnya jumlah karbida yang larut dalam larutan. Sedangkan apabila waktu penahanan yang diberikan terlalu lama, transformasi terjadi namun diikuti dengan pertumbuhan butir yang dapat menurunkan ketangguhan [42]. Baja dengan ukuran butiran yang kecil mempunyai kekerasan dan kekakuan yang tinggi. Untuk mencapai standar tersebut diperlukan temperatur pemanasan yang tepat dan untuk memastikan bahwa perubahan terjadi pada seluruh permukaan baja diperlukan adanya *holding time* [3]. menurut penelitian Setiawan A. dkk, [37] semakin lama waktu tahan pada proses *heat treatment* maka akan meningkatkan ketahanan korosi pada baja.

2.7 Diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT)

Diagram CCT adalah diagram yang menggambarkan hubungan antara laju pendinginan dengan struktur yang terbentuk setelah terjadi transformasi fasa. Kurva CCT mensimulasikan sifat dan karakter suatu material. Pada diagram ini

fasa ferit, perlit, bainit dan martensit dapat diperlihatkan. Pada diagram CCT terdapat informasi transformasi fasa yang terbentuk ketika material awalnya mengalami austenisasi terus-menerus didinginkan pada laju pendinginan tertentu. Selain itu, struktur mikro akhir dan karakteristik mekanik dapat ditentukan [45]. Perbedaan kurva pendinginan yang dipengaruhi dari laju pendinginan, dimana laju pendinginan dipengaruhi oleh media pendinginan. Air adalah media yang menghasilkan laju tertinggi selanjutnya adalah minyak, oli, dan udara. Semakin bebas partikel pendinginan (udara) laju pendinginan semakin lama dan kurva akan semakin bergeser ke kanan maka material akan semakin lunak [36]. Gambar 2.7 menunjukkan contoh dari diagram CCT (*Continuous Cooling Temperature*).



Gambar 2.6 Diagram CCT (*Continuous Cooling Temperature*) [5]

2.8 Analisa Kekerasan

Kekerasan adalah kemampuan suatu logam untuk menahan penetrasi dan gesekan dengan logam lain ataupun ketahanan suatu logam terhadap deformasi.

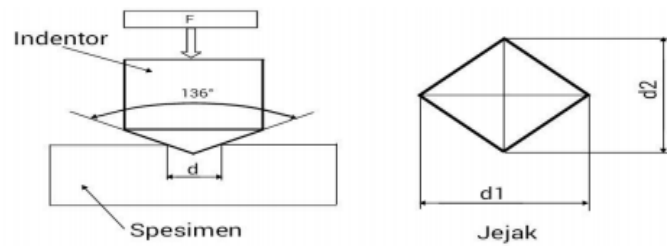
Uji kekerasan atau hardness test adalah pengujian merusak yang digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan suatu material yang didapatkan setelah material diberikan pembebanan. Pengujian kekerasan biasanya dilakukan dengan metode indentasi. Metode ini dilakukan dengan penekanan indenter terhadap benda uji dengan gaya tekan dan waktu indentasi yang ditentukan. Besarnya nilai kekerasan pada material dapat dilihat dari kemampuan menahan goresan atau indentasi dari pembebanan yang diberikan dalam waktu tertentu tanpa mengalami deformasi. Pengujian kekerasan akan dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut:

1. Kehalusan permukaan
2. Letak benda uji pada indenter
3. Adanya pengotor pada permukaan

Dengan demikian, pengujian kekerasan pada material menjadi faktor penting untuk melihat kualitas dan kinerja material saat diaplikasikan pada lingkungan kerja yang berat. Berdasarkan jenis indenter dan pembebanannya pada pengujian kekerasan ini terdapat 3 metode yang digunakan yaitu metode *Vickers*, metode *Rockwell*, dan metode *Brinell* [3]

2.8.1 Metode *Vickers*

Uji kekerasan *vickers* menggunakan indenter piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujur sangkar dengan sudut 136 derajat. Bekas indentasi yang dihasilkan berbentuk bujur sangkar berdiagonal. Pengujian dengan metode *vickers* ini biasanya diaplikasikan untuk material yang tipis memiliki ketebalan 0,005 hingga 0,01 inch.



Gambar 2.7 Indentor Pengujian *Vickers* [3]

Panjang diagonal yang diukur pada arah horizontal ditandai dengan d1 dan arah vertical ditandai dengan d2 yang kemudian dihitung d rata – rata sebagai panjang diagonal jejak. Angka kekerasan *Vickers* disebut sebagai beban dibagi luas permukaan lekukan. VHN dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

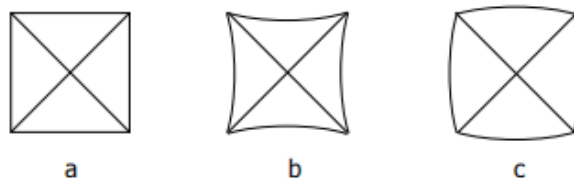
$$VHN = \frac{2P \sin(\frac{\theta}{2})}{d^2} = \frac{(1,854)P}{d^2} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dengan: P = beban yang digunakan (kg)

d = Panjang diagonal rata – rata (mm)

θ = sudut antara permukaan intan yang berhadapan = 136^0

Beban yang biasanya digunakan pada uji *vickers* berkisar antara 1 sampai 120 kg bergantung kepada kekerasan logam yang akan diuji. Terdapat tipe-tipe lekukan material hasil pengujian vickers yaitu:



Gambar 2.8 Tipe – tipe lekukan piramida intan: (a) lekukan sempurna, (b) lekukan bantal jarum, (c) lekukan berbentuk tong [14]

Hasil lekukan material yang benar ditunjukkan oleh penekan indentor berbentuk bujur sangkar (gambar 3a). lekukan bantal jarum adalah akibat adanya penurunan logam di sekitar permukaan piramida yang datar. Hal ini biasa terjadi pada logam – logam yang dilunakkan dan akibatnya terjadi pengukuran panjang diagonal yang berlebih. Lekukan berbentuk tong terjadi karena penimbunan ke atas logam – logam di sekitar permukaan penekanan. Biasanya terjadi pada logam – logam yang mengalami proses pendinginan.

2.9 Analisa Korosi (*Immersion Corrosion Testing*)

Definisi korosi menurut *National Association of Corrosion Engineers* (NACE) *International* adalah korosi sebagai kerusakan atau degradasi sifat-sifat logam yang disebabkan oleh lingkungan korosif. Menurut penelitian [22] menyebutkan korosi dapat menyebabkan penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya. Dari beberapa istilah diatas dapat disimpulkan bahwa terjadinya korosi pada material disebabkan oleh kontak langsung dengan lingkungan sekitarnya sehingga mengalami penurunan mutu dan kualitas material. Secara garis besar ada dua komponen penting yang mempengaruhi terjadinya korosi yaitu material dan lingkungan. Material dapat berupa logam atau non-logam, material logam terdiri dari baja, seng, aluminium dan lainnya. Sedangkan material non-logam dapat berupa keramik, karet plastik dan lain-lain. Lingkungan penyebab terjadinya korosi dapat berupa kelembapan udara, asam atau basa lingkungan, gas, temperatur dan lain-lain. Tingkat kereaktifan material dengan lingkungan kerja dapat menentukan proses terjadinya

korosi dapat berlangsung dengan cepat atau lambat. Reaksi yang terjadi dapat berbentuk reaksi kimia, elektrokimia, atau mekanik. Terdapat berbagai penyebab terjadinya korosi yaitu korosi seragam (*uniform corrosion*), korosi galvanik (*Galvanic Corrosion*), korosi sumuran (*pitting corrosion*), korosi celah (*crevice corrosion*), korosi erosi (*erosion corrosion*), korosi batas butir (*intergranular corrosion*) dan korosi tegangan (*stress corrosion*). Pengujian korosi perendaman digunakan untuk menentukan ketahanan korosi suatu material terhadap lingkungan berair yang agresif. Metode pengujian ASTM G31 menggunakan laju korosi ke satuan waktu, biasanya dalam mm/tahun (mpy). Persyaratan pengujian bervariasi, namun hasilnya biasanya dapat diperoleh dalam siklus perendaman 24 jam, 10, atau 20 hari. Perhitungan laju korosi menggunakan kehilangan berat awal setelah dilakukan perendaman, pengujian ini disebut juga metode *Weight Loss*. Metode kehilangan berat adalah metode pengukuran laju korosi yang paling banyak digunakan untuk lempengan logam. Metode kehilangan berat dinyatakan sebagai kehilangan berat per satuan luas atau per satuan waktu. Pengujian korosi ini cukup sederhana sehingga mudah dalam pengaplikasiannya. Lempengan logam ditempatkan didalam sistem korosif dengan konsentrasi tertentu dan jangka waktu tertentu. Lalu mengukur kehilangan massa material yang diuji setelah perendaman kemudian menghitung besar laju korosinya [38]. Rumus yang digunakan untuk menghitung laju korosi metode *weight loss* yaitu:

$$\text{mpy} = \frac{K \times \Delta W}{D \times A \times T} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

CR = Corrosion Rate (mm/year)

- K = Konstanta ($8,76 \times 10^4$)
- ΔW = Selisih Kehilangan Berat (gram)
- A = Luas Area Total (cm^2)
- t = Waktu *exposure* (jam)
- D = Massa jenis SS 304 *thin foil* (8 gram/cm^3)

2.10 Analisa Metalografi

Metalografi adalah disiplin ilmu yang mempelajari karakteristik mikrostruktur suatu logam dan paduannya serta hubungannya dengan sifat – sifat logam dan paduannya. Pengujian metalografi mencakup pengamatan dan penentuan struktur kimia, atom, batas butir, konstituen, inklusi dan fase yang terbentuk pada logam dan Paduan. Struktur mikro sendiri dipengaruhi oleh komposisi kimia logam atau paduannya serta proses perlakuan yang dialami selama pembentukan logam. Banyak sifat makroskopis penting dari bahan logam yang sangat sensitif terhadap struktur mikro seperti kekuatan tarik atau perpanjangan, serta sifat termal atau listrik lainnya yang berhubungan langsung dengan struktur mikro. Pada penelitian ini tujuan spesifik analisa metalografi untuk mengetahui morfologi struktur mikro hasil perlakuan tempering dengan masing-masing variabel, dan menghubungkannya dengan nilai kekerasan dan laju korosi yang didapatkan. Dalam melakukan uji metalografi, sampel yang akan diuji harus dipreparasi dengan tahap – tahap preparasi sebagai berikut [6]. Pengambilan Sampel (*Sampling*), Pemotongan Sampel (*Cutting*), *Mounting*, Pengampelasan (*Grinding*), *Polishing*, *Etching*, dan Observasi Mikroskopis / Makroskopis.

2.11 Perhitungan Persen Fraksi Fasa

Perhitungan persen fraksi fasa dalam struktur mikro adalah metode kuantitatif untuk menentukan sebaran relatif dari fasa struktur mikro yang terdapat dalam suatu material berdasarkan citra mikroskopis. *Thresholding* pada *ImageJ* adalah teknik pemrosesan gambar yang digunakan untuk memisahkan dan mengklasifikasikan fasa berdasarkan tingkat kecerahan atau warna dalam citra mikrostruktur. Tujuan perhitungan persen fraksi fasa yaitu:

1. Menentukan Sebaran Fasa dalam Material

Mempermudah analisis distribusi fasa seperti martensit, austenit, ferrit, perlit, atau bainit dalam paduan logam.

2. Menilai Efek Perlakuan Panas dan Proses Deformasi

Menganalisis perubahan struktur mikro akibat proses *quenching*, *tempering*, *annealing*, atau *cold rolling*.

3. Mengontrol Kualitas dan Sifat Mekanik Material

Menghubungkan persentase fasa dengan kekerasan, ketahanan korosi, dan sifat mekanik lainnya.

4. Menggunakan Metode Kuantitatif yang Konsisten dan Reproduksi

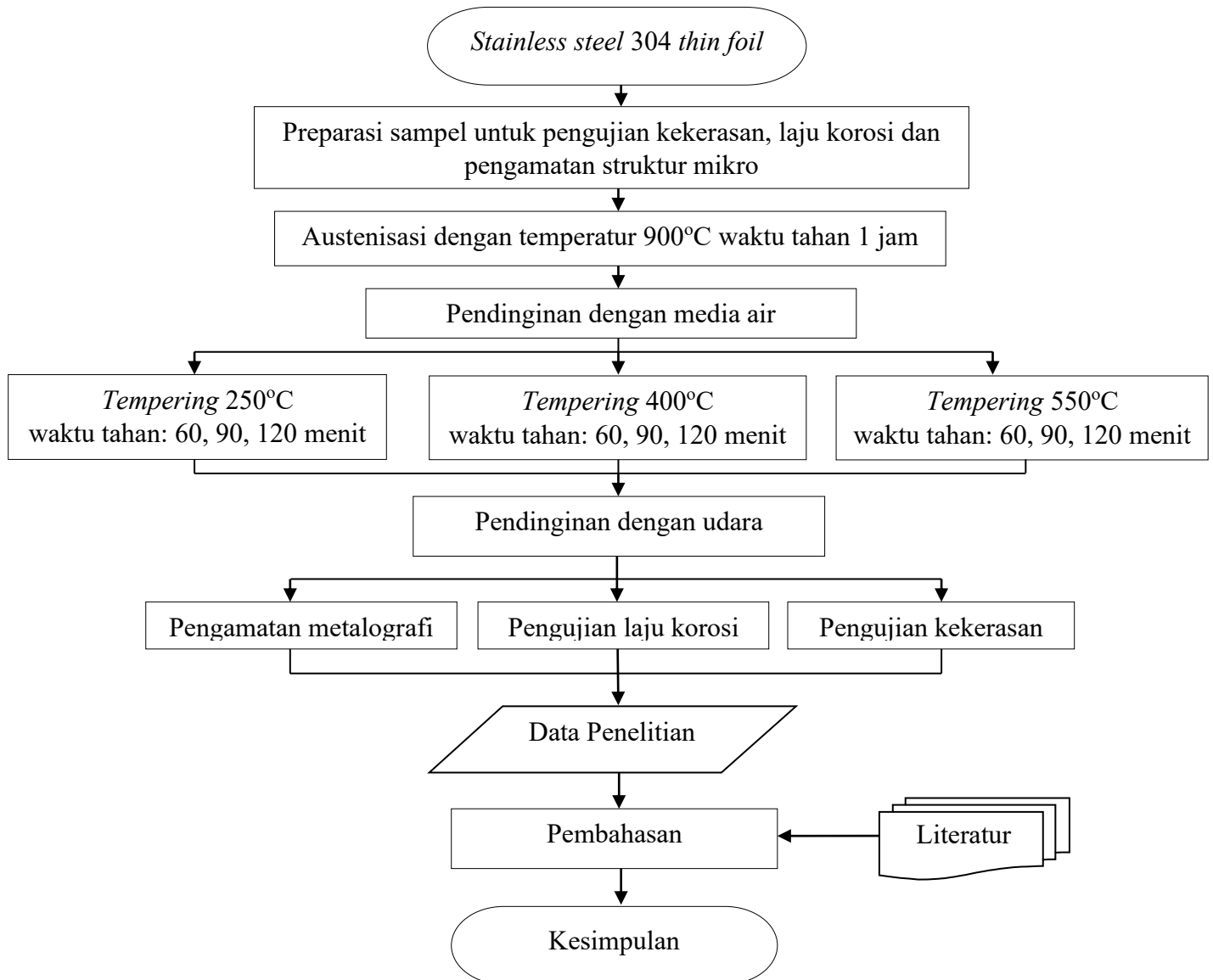
Mengurangi subjektivitas dalam analisis mikrostruktur dibandingkan pengamatan visual manual.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Tahapan-tahapan pada penelitian ini dapat dilihat menggunakan diagram alir pada gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat-alat yang digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. *Muffle furnace*
2. Mesin *grinding*
3. Mesin *polishing*
4. Mesin uji kekerasan
5. Mikroskop optik
6. *Neraca* analitik
7. Penjepit spesimen
8. *Hair dryer*
9. Gelas beker
10. Kertas amplas (80#, 100#, 120#, 200#, 400#, 600#, 800#, 1200#, 1500#, dan 2000#)
11. Krusibel
12. Sarung tangan

3.2.2 Bahan-bahan yang digunakan

Berikut adalah bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini:

1. *Stainless steel 304 thin foil*
2. Resin
3. *Hardener*
4. Larutan etsa

5. H_2SO_4 0,01 M

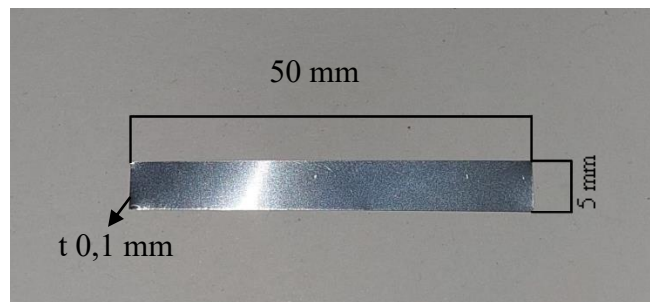
6. *Aquadest*

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Sampel yang digunakan dalam penelitian ini berupa material tipis *stainless steel* 304 yang melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

3.3.1 Preparasi Sampel

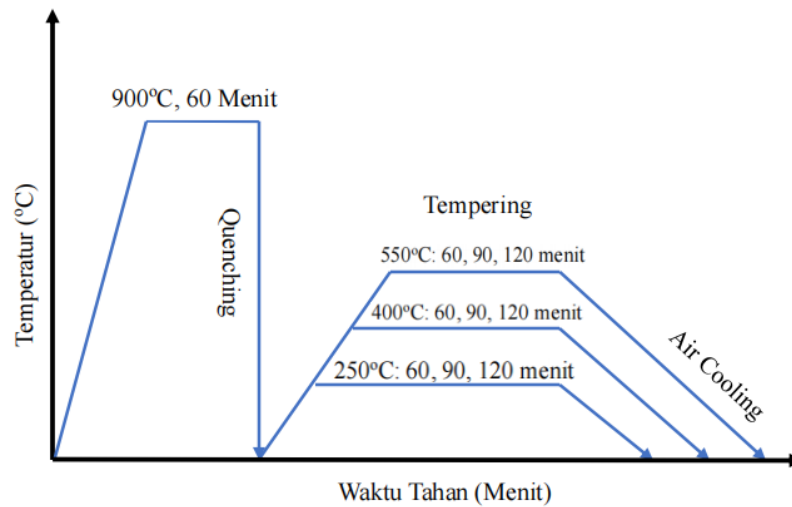
Sampel *stainless steel* 304 thin foil dipotong dengan ukuran 50 x 5 x 0,1 mm³. Material yang akan dipotong sebanyak 9 buah.



Gambar 3.2 Ukuran Sampel *Stainless Steel* 304 Thin Foil

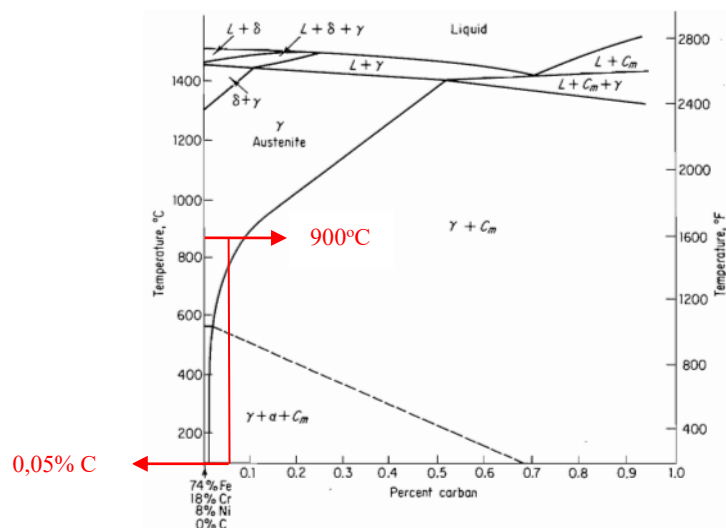
3.3.2 Proses Perlakuan Panas *Quenching Tempering*

Langkah-langkah proses *quenching tempering* ada beberapa tahapan berikut adalah skematik dan tahapan *quench-temper*:



Gambar 3.3 Skematik *Heat Treatment Quench-Temper*

1. Dilakukan proses perlakuan panas *quenching* pada sampel yang dimulai dengan menyalakan *muffle furnace* dan dinaikkan mencapai temperatur austenisasi 900°C.



Gambar 3.4 Temperatur Austenisasi SS 304 0,05% C

2. Sampel *stainless steel 304 thin foil* lalu dimasukkan ke dalam *muffle furnace*, kemudian dilakukan penahanan waktu selama 1 jam.

3. Sampel dikeluarkan dari dalam *furnace* lalu segera didinginkan menggunakan media pendingin air.
4. Setelah melalui tahap *quenching* kemudian sampel dilanjutkan ke proses *tempering*. Sampel dibersihkan dan dibagi kedalam tiga crucible sesuai variasi waktu tahan tempering untuk memudahkan proses identifikasi sampel didalam *furnace* pada proses *tempering*.
5. *Muffle furnace* disiapkan untuk proses *tempering* menggunakan variasi temperatur dan waktu tahan yaitu 250°C, 400°C dan 550°C dengan masing-masing waktu tahan 60 menit, 90 menit dan 120 menit.
6. Kemudian sampel yang telah disiapkan dimasukkan ke dalam *muffle furnace* untuk masing-masing variasi temperatur dan waktu tahan
7. Setelah mencapai masing-masing waktu tahan yang telah ditentukan, sampel yang ditempering didinginkan dengan udara hingga mencapai temperatur ruang.

3.3.3 Pengujian Kekerasan *Vickers*

Uji kekerasan dilakukan untuk mengukur ketahanan suatu material terhadap deformasi permukaan. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah uji kekerasan vickers. Metode ini menggunakan indentor kecil berbahan intan berbentuk piramida sudut 136° dengan beban 100 gf. Pembebanan dilakukan selama 10 detik, dan data diambil dari tiga titik pembebanan pada permukaan material. Proses ini dilakukan dalam kondisi bebas dari regangan, dengan orientasi tegak

lurus pada sumbu indenter. Indenter diturunkan secara perlahan dengan kecepatan kurang dari 1 mm, tanpa getaran. Ketika indenter menyentuh permukaan sampel, akan terbentuk bekas berupa bujur sangkar berdiagonal. Nilai kekerasan *vickers* didapatkan otomatis pada alat.

3.3.4 Pengujian Korosi

Pengujian korosi menggunakan metode *immersion corrosion testing* dengan larutan pengkorosi H_2SO_4 konsentrasi 0,01 M dan spesimen direndam selama 30 hari, standar uji korosi yang digunakan adalah ASTM G31. Berikut adalah langkah-langkah pengujian korosi:

1. Dibersihkan spesimen uji dari kontaminan dan partikel yang menempel sisa pemanasan tempering
2. Disiapkan alat dan bahan uji korosi
3. Dilubangin ujung spesimen dan mengikatkan tali pada spesimen untuk digantungkan pada gelas ukur
4. Ditimbang berat awal spesimen uji (W_0)
5. Disiapkan larutan korosif dibuat sebanyak 100 ml
6. Direndam spesimen uji dalam larutan korosif selama 30 hari
7. Diangkat spesimen uji hasil perendaman selama 30 hari
8. Dilakukan proses *pickling* pada spesimen yang mengalami korosi
9. Ditimbang berat akhir spesimen uji (W_1)
10. Dihitung nilai laju korosi menggunakan persamaan 2.2

3.3.5 Pengamatan Metalografi

Metalografi dilakukan untuk memperoleh informasi tentang struktur makro dan mikro suatu logam, yang memungkinkan analisis sifat dan karakteristik material tersebut. Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik. Berikut adalah tahapan metalografi:

a. Proses Mounting

Tujuan dilakukan *mounting* untuk mempermudah pemegangan benda uji ketika dilakukan tahap preparasi selanjutnya seperti pengampelasan dan *polishing*. Langkah-langkah proses *mounting* adalah:

1. Dilakukan proses *mounting* pada sampel yang telah dilakukan uji kekerasan, yaitu pada sampel *tempering* 250°C, 400°C, 550°C waktu tahan 60 menit, 90 menit dan 120 menit.
2. Disiapkan cetakan dengan diameter 4,5 cm dan tinggi 3 cm untuk proses *mounting*
3. Diletakkan pipa pada permukaan yang halus
4. Diletakkan sampel secara *horizontal*
5. Dituangkan cairan resin *polyester* yang telah dicampur dengan katalis pada pipa yang berisi sampel, tunggu hingga mengeras
6. Dikeluarkan resin dan sampel yang telah mengeras dari pipa
7. Sampel disimpan ditempat yang steril

b. Proses *Grinding* dan *Polishing*

Pengampelasan dilakukan untuk memperhalus permukaan benda uji dan membersihkan kotoran-kotoran yang terlihat dan *polishing* adalah

proses terakhir dari bagian preparasi spesimen untuk mendapatkan permukaan benda kerja yang halus dengan menggunakan mesin poles metalografi. Langkah-langkah proses polishing adalah:

1. Gunakan perlengkapan keselamatan kerja sebelum melakukan pekerjaan.
2. Disiapkan sampel yang telah *dimounting*.
3. Dinyalakan mesin amplas.
4. Kemudian sampel dilakukan grinding menggunakan kertas amplas 100#, 120#, 200#, 400#, 600#, 800#, 1200#, 1500#, dan 2000# dengan bantuan alat mesin *grinding*.
5. Dilakukan pengampelasan dengan waktu maksimal 10 menit tiap ukuran ampelas.
6. Lalu sampel di-*polishing* dengan menggunakan pasta alumina.

c. Proses Etsa

Etsa merupakan cara untuk mengikis batas butir secara selektif dan terkendali dengan pencelupan ke dalam larutan pengetsa baik menggunakan listrik maupun tidak ke permukaan sampel sehingga detail struktur yang akan diamati akan terlihat dengan jelas dan tajam. Jenis etsa yang digunakan untuk *stainless steel 304 thin foil* ini adalah *Glyceregia*. Langkah-langkah proses etsa adalah:

1. Disiapkan peralatan etsa seperti pipet, gelas ukur 100 ml dan 500 ml dan spuit ukuran 3 ml.
2. Disiapkan bahan seperti HCl, HNO₃, *glycerol* dan air.

3. Kemudian dituangkan HCl 33,3%, HNO₃ 33,3% dan *glycerol* 33,3% tadi kedalam gelas ukur kapasitas 100 ml dan aduk selama 1 menit.
4. Kemudian dicelupkan permukaan sampel yang telah dipoles kedalam cairan etsa tersebut selama 60 detik.
5. Lalu angkat dan bilas dengan air bersih
6. Kemudian sampel diamati, dianalisa struktur mikronya menggunakan mikroskop optik.

3.4 Penamaan Sampel

Pada penelitian ini, didapatkan beberapa variasi sampel dengan temperatur dan waktu tahan yang berbeda. Untuk memudahkan dalam pembacaan dan analisa kepada sampel, dilakukan sebuah penamaan yang dimana kode T mempresentasikan temperatur tempering, dan H merepresentasikan waktu tahan pada masing-masing temperatur. Penamaan tersebut dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.1 Penamaan Sampel

Temperatur Tempering (°C)	Holding Time (menit)	Kode Sampel
250	60	T 250 - H 60
	90	T 250 - H 90
	120	T 250 - H 120
400	60	T 400 - H 60
	90	T 400 - H 90
	120	T 400 - H 120
550	60	T 550 - H 60
	90	T 550 - H 90
	120	T 550 - H 120

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan ditampilkan serta penjelasan bagaimana hasil dari penelitian dan pembahasan dari data yang didapatkan:

4.1 Hasil Pengujian

4.1.1 Pengujian Kekerasan

Pada sampel *stainless steel 304 thin foil* setelah diberikan perlakuan panas dilakukan pengujian kekerasan untuk mengetahui pengaruh kenaikan temperatur dan *holding time* terhadap nilai kekerasan pada sampel. Uji kekerasan yang dilakukan menggunakan *Vickers hardness* untuk setiap sampel dilakukan sebanyak 3 kali identasi dimana hasil pengukuran dari diameter identasi diambil nilai rata-ratanya lalu dihitung berdasarkan ASTM E384. Berikut data hasil percobaan kekerasan yang ditampilkan pada tabel.

Tabel 4.1 Data Hasil Uji Kekerasan

Kode sampel	Nilai Kekerasan (HV)
NT	400
Quenching	384
T 250 - H 60	340
T 250 - H 90	307
T 250 - H 120	303
T 400 - H 60	310
T 400 - H 90	301
T 400 - H 120	293
T 550 - H 60	275
T 550 - H 90	246
T 550 - H 120	243

4.1.2 Hasil Uji Korosi

Pada sampel *stainless steel 304 thin foil* dilakukan pengujian korosi untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi temperatur *tempering* dan waktu tahan terhadap laju korosi masing-masing sampel. Uji korosi menggunakan metode *immersion test* dimana sampel direndam dalam larutan H₂SO₄ dengan konsentrasi 0,01 M selama 30 hari perendaman. Lalu ditimbang selisih berat sampel awal dengan akhir untuk mendapatkan kehilangan massa pada masing-masing sampel untuk dimasukkan kedalam rumus perhitungan laju korosi metode *weight loss*. Berikut data hasil percobaan korosi yang ditampilkan pada tabel berikut.

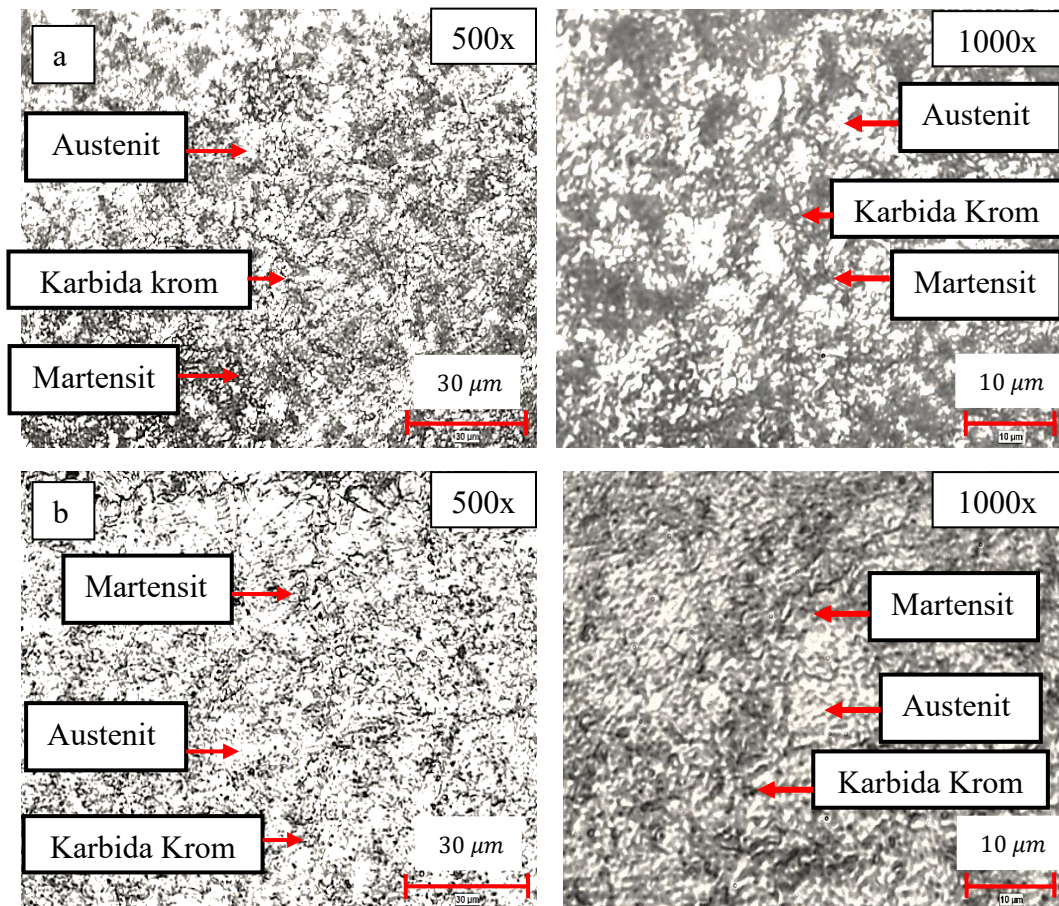
Tabel 4.2 Data Hasil Uji Korosi

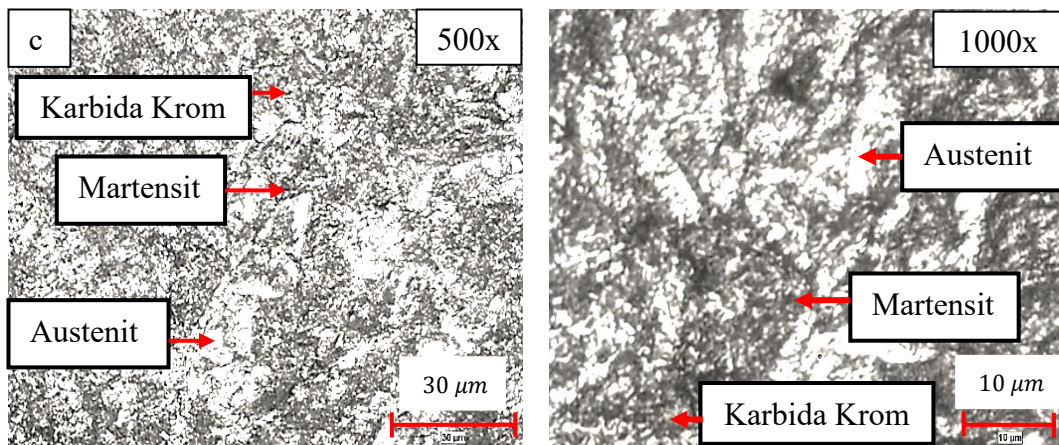
Spesimen	Massa Awal (gram)	Massa Akhir (gram)	Kehilangan Massa (gram)	Laju Korosi (mm/y)
NT	0,2523	0,2519	0,0003	9×10^{-4}
T 250 - H 60	0,2521	0,2519	0,0002	6×10^{-4}
T 250 - H 90	0,2513	0,2506	0,0007	21×10^{-4}
T 250 - H 120	0,2523	0,2513	0,0010	31×10^{-4}
T 400 - H 60	0,2526	0,2517	0,0009	27×10^{-4}
T 400 - H 90	0,2514	0,2499	0,0015	45×10^{-4}
T 400 - H 120	0,2518	0,2495	0,0023	68×10^{-4}
T 550 - H 60	0,2521	0,2490	0,0031	92×10^{-4}
T 550 - H 90	0,2523	0,2485	0,0038	113×10^{-4}
T 550 - H 120	0,2525	0,2481	0,0044	131×10^{-4}

4.1.3 Hasil Pengamatan Metalografi

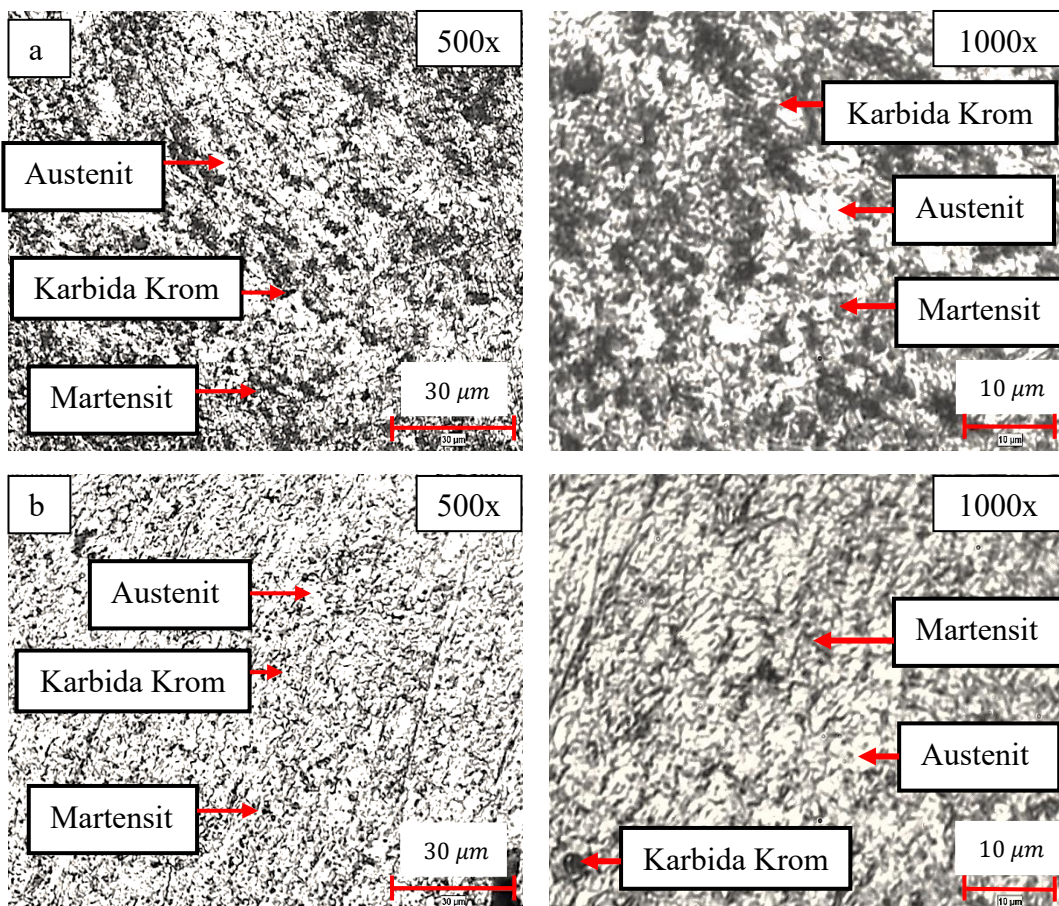
Spesimen *stainless steel 304* setelah diberikan perlakuan panas *tempering* dilakukan uji metalografi untuk mengetahui struktur mikro yang

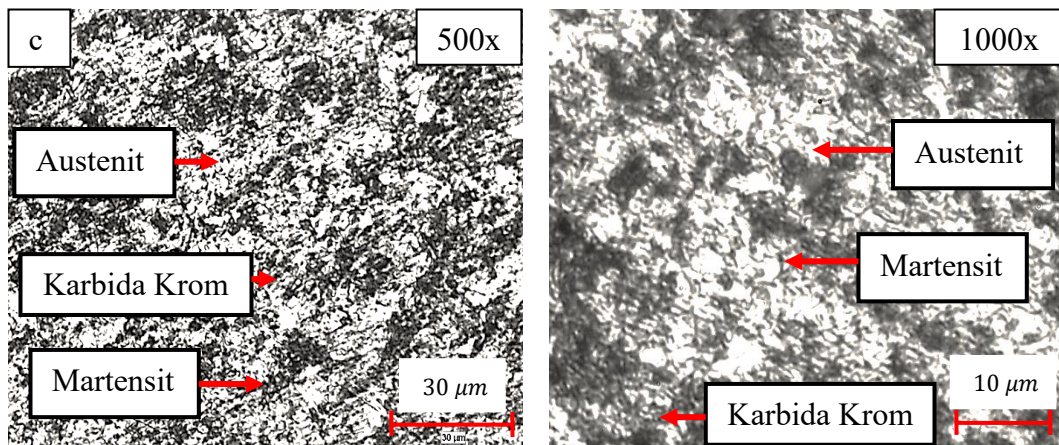
terbentuk. Spesimen dilakukan etsa 33,3% HNO₃ + 33,3% HCl + 33,3% *glycerol*. Spesimen yang dilakukan metalografi telah dilakukan perlakuan panas *quenching* pada temperatur 900°C dalam waktu 1 jam. Setelah itu dilanjutkan proses *tempering* dengan variasi temperatur 250°C, 400°C dan 550°C masing – masing waktu tahan 60, 90, dan 120 menit. Setelah dilakukan etsa analisis yang diambil yaitu melihat morfologi butir dan besar ukuran butir, berikut hasil yang didapat dengan perbesaran 500x dan 1000x.



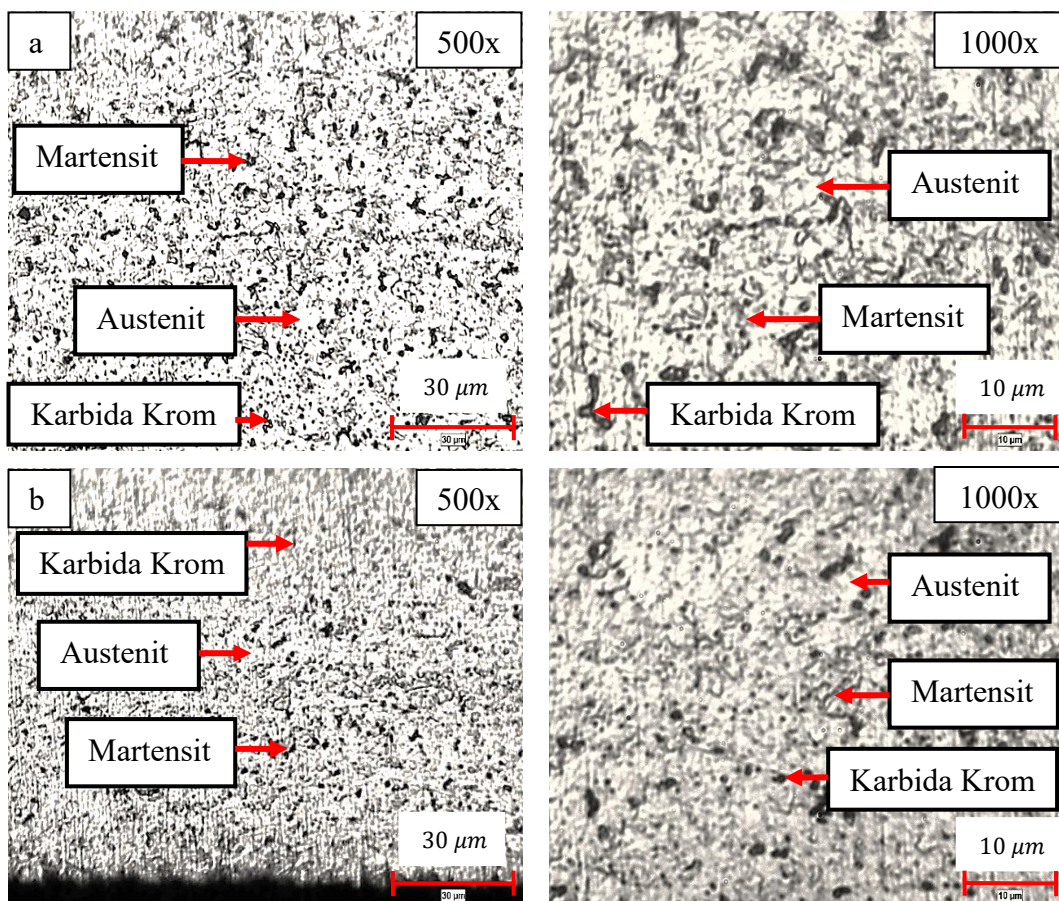


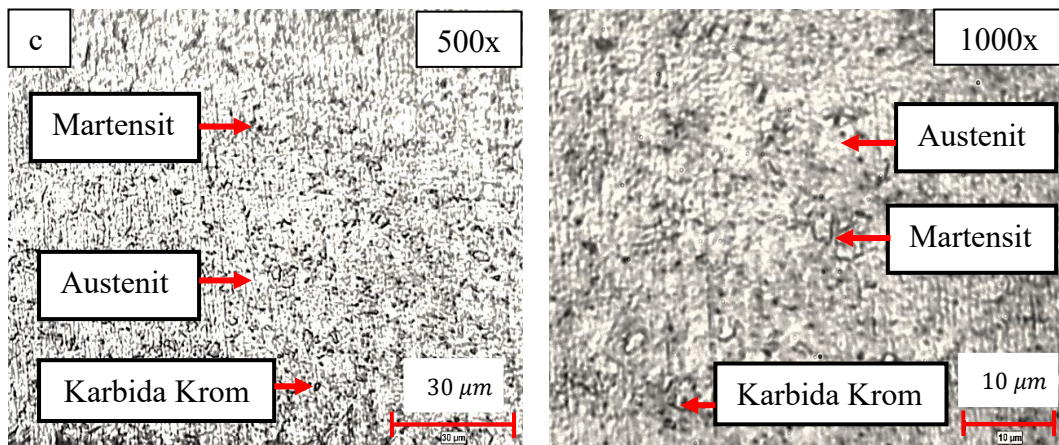
Gambar 4.1 Hasil Metalografi (a) T250 – H60 (b) T250 – H90 (c) T250 – H120





Gambar 4.2 Hasil Metalografi (a) T400 – H60 (b) T400 – H90 (c) T400 – H120

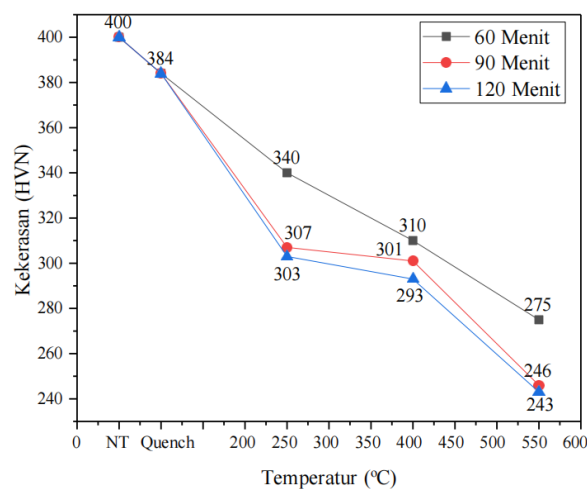




Gambar 4.3 Hasil Metalografi (a) T550 – H60 (b) T550 – H90 (c) T550 – H120

4.2 Analisa Kekerasan Material

Pada pengujian kekerasan, sampel *stainless steel 304 thin foil* yang telah melalui proses *quenching tempering* dengan temperatur 250°C, 400°C, 550°C menggunakan tiga variasi waktu tahan pada masing-masing temperatur yaitu, 60 menit, 90 menit dan 120 menit akan disesuaikan dengan dimensi standar pengujian uji kekerasan *micro vickers*. Indentor piramida berbentuk berlian diletakkan pada permukaan sampel. Terapkan beban sebesar 100 gf waktu pembebanan 10 detik. Data kekerasan pada tiap spesimen dengan jenis variasinya dapat dilihat sebagai berikut. Pertama dilakukan pengukuran dan pengambilan data pada spesimen T 250 dengan varian H 60, H 90, H 120. Kemudian didapatkan hasil rata-rata VHN T 250 yaitu H 60 (340 HV), H 90. (307 HV), dan H 120 (303 HV). Selanjutnya dilakukan pengambilan data kekerasan spesimen T 400 dengan varian yang sama dan didapatkan hasil VHN pada spesimen T 400 adalah H 60 (310 HV), H 90 (301 HV), dan H 120 (293 HV). Kemudian pada spesimen T 550 dengan varian yang sama didapatkan, H 60 (275 HV), H 90 (246 HV), H 120 (243 HV). Hasil dari data tersebut dapat dilihat pada grafik:



Gambar 4.4 Grafik Uji Kekerasan

4.2.1 Kekerasan Spesimen *Tempering* 250°C

Berdasarkan gambar 4.4 dapat terlihat bahwa kekerasan yang didapat oleh hasil *tempering* dengan temperatur 250°C waktu tahan 60, 90, 120 menit berturut-turut adalah 340 HV, 307 HV, dan 303 HV. Kekerasan dengan nilai paling tinggi adalah spesimen *tempering* temperatur 250°C waktu tahan 60 menit dengan nilai *Vickers Hardness* mencapai 340 HV. Selanjutnya seiring bertambahnya waktu tahan nilai kekerasan menurun yaitu pada waktu tahan 90 menit nilai kekerasannya 307 HV dan 120 menit turun menjadi 303 HV. Jika dilihat dari nilai kekerasannya pada temperatur 250°C nilai kekerasan masih relatif tinggi hal ini disebabkan setelah melalui proses *quenching*, struktur mikro material membentuk fasa martensit yang sifatnya sangat keras. Kemudian diberikan perlakuan *low tempering* (150 – 250°C) panas yang dihasilkan tidak cukup mengubah fasa martensit secara signifikan. *Low tempering* menghilangkan sedikit tegangan sisa yang terbentuk selama *quenching*, tetapi tidak cukup panas untuk terjadinya transformasi fasa menjadi struktur yang lebih lunak seperti ferrit atau bainit [31]. Fasa martensit tetap dominan, sehingga nilai kekerasannya masih tinggi tetapi seiring bertambahnya waktu tahan kekerasan menurun. Waktu tahan yang lebih lama memberi banyak waktu untuk relaksasi tegangan sisa dan memunculkan presipitat karbida yang dapat tumbuh menjadi ukuran yang lebih besar dan stabil. Karbida yang lebih besar mengurangi kekerasan karena menurunkan distorsi dalam kisi-kisi kristal.

4.2.2 Kekerasan Spesimen *Tempering* 400°C

Nilai kekerasan spesimen *tempering* 400°C dengan waktu tahan 60, 90, dan 120 menit yaitu 310 HV, 301 HV, 293 HV. Pada temperatur 400°C nilai kekerasan sudah mulai mengalami penurunan dibandingkan temperatur 250°C dan seiring bertambahnya waktu tahan nilai kekerasannya menjadi lebih turun. Pada temperatur ini, nilai kekerasan tertinggi yang didapat adalah 310 HV dengan waktu tahan 60 menit. Nilai kekerasan yang didapatkan mengalami penurunan cukup signifikan dibandingkan *tempering* 250°C dengan waktu tahan yang sama, hal ini disebabkan pada temperatur *middle tempering* (300-450°C) panas yang dihasilkan cukup untuk menghilangkan tegangan sisa sehingga struktur kristal menjadi lebih stabil dan mengurangi jumlah dislokasi. Akan tetapi, pada temperatur 400°C sensitasi dapat terjadi dimana presipitasi karbida kromium berdifusi di batas butir sehingga kromium di sekitar batas butir berkurang menciptakan area yang kekurangan kromium (*chromium depleted zone*). Jika karbida kromium terbentuk dalam jumlah besar, material dapat mengalami sensitasi yang dapat menyebabkan penurunan kekerasan di zona tertentu dan mengurangi ketahanan korosi intergranular [32].

4.2.3 Kekerasan Spesimen *Tempering* 550°C

Temperatur *tempering* 550°C nilai kekerasan yang didapatkan turun signifikan pada masing-masing waktu tahan dibandingkan dua temperatur

sebelumnya. Kekerasan yang didapatkan yaitu, 60 menit 275 HV, 90 menit 246 HV, dan 120 menit 243 HV. Nilai kekerasan tertinggi pada temperatur ini adalah 275 HV dengan waktu tahan 60 menit, dan semakin turun seiring bertambahnya waktu tahan. Hal ini disebabkan karena temperatur *high tempering* ($>450^{\circ}\text{C}$) menghilangkan hampir semua tegangan internal yang tersisa akibat perlakuan *quenching* dan terjadi pergerakan dislokasi dalam kisi kristal, sehingga struktur mikro yang mengalami deformasi menjadi lebih homogen. Selain itu, pada *stainless steel 304 thin foil* hasil *quenching* diberikan perlakuan *high tempering* dapat memicu rekristalisasi pada temperatur 550°C sehingga terbentuknya butir baru yang bebas dari dislokasi. Butir yang terbentuk dari rekristalisasi memiliki dislokasi lebih sedikit dibandingkan butir hasil *quenching*, sehingga kekerasan menurun secara signifikan [32]. Adapun pengaruh lainnya dalam menurunkan kekerasan adalah terbentuknya karbida kromium di batas butir. Pembentukan ini menyebabkan deplesi kromium di sekitar batas butir yang mengurangi ketahanan deformasi dan kekerasan di zona tersebut.

4.3 Analisa Laju Korosi Material

Perhitungan laju korosi dilakukan dengan metode *weight loss*. Pengujian *weight loss* digunakan untuk mengetahui pengaruh proses *quenching tempering* spesimen *stainless steel 304 thin foil* terhadap ketahanan korosinya pada lingkungan korosif. Dalam metode ini, berat sampel sebelum (W_0) dan berat sampel setelah dilakukan perendaman dalam larutan H_2SO_4 0,01 M (W_1)

ditimbang menggunakan timbangan digital kemudian dicatat untuk menentukan laju korosinya. Perbedaan berat sampel awal dan akhir ini digunakan sebagai ukuran atau dasar untuk perhitungan laju korosi.

$$(\Delta W = W_0 - W_1) \dots \dots \dots (4.1)$$

Dimana: ΔW = Selisih kehilangan berat (gram)

W_0 = Berat awal (gram)

W_1 = Berat akhir setelah perendaman (gram)

Setelah didapatkan selisih berat, kemudian nilai laju korosi pada masing-masing spesimen dapat dihitung menggunakan persamaan 2.2. Pada penelitian ini, *stainless steel 304 thin foil* sebagai spesimen uji dicelupkan kedalam larutan H_2SO_4 0,01 M selama 30 hari. Luas spesimen uji yang tercelup memiliki dimensi sebagai berikut:

Dilihat dari dimensi bentuk spesimen adalah balok, maka *surface area*-nya adalah sebagai berikut:

Panjang = 5 cm

Leba = 0,5 cm

Tebal = 0,01 cm

Perhitungan luas area material yang terendam larutan korosi dengan persamaan sebagai berikut:

$$A = 2 \times (p \times l + p \times t + l \times t) \dots \dots \dots (4.2)$$

$$A = 2 \times (5 \times 0,5 + 5 \times 0,01 + 0,5 \times 0,01)$$

$$A = 2 \times (2,5 + 0,05 + 0,005)$$

$$A = 5,11 \text{ cm}^2$$

Perhitungan laju korosi *stainless steel 304 thin foil* tanpa perlakuan dilakukan untuk mengetahui laju korosi *raw material* sebagai pembanding dengan spesimen yang telah diberi perlakuan *quenching tempering*. Perhitungan laju korosi menggunakan larutan dan waktu perendaman yang sama dengan spesimen *quench-temper*. Berikut perhitungan laju korosinya:

$$\begin{aligned} \text{Diketahui: } W_0 &= 0,2523 \text{ gram} \\ W_1 &= 0,2519 \text{ gram} \\ A &= 5,11 \text{ cm}^2 \\ K &= 8,76 \times 10^4 \\ D &= 8 \text{ g/cm}^3 \\ t &= 720 \text{ jam} \end{aligned}$$

maka hitung selisih berat dengan persamaan 4.1 hasilnya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} &= 0,2523 - 0,2520 \text{ (gram)} \\ &= 0,0003 \text{ gram} \end{aligned}$$

Kemudian hitung laju korosi dengan persamaan 2.2 berikut hasilnya:

$$\begin{aligned} &= \frac{8,76 \times 10^4 \times 0,0003}{8 \times 5,11 \times 720} \\ &= 0,0009 \text{ mm/year} \end{aligned}$$

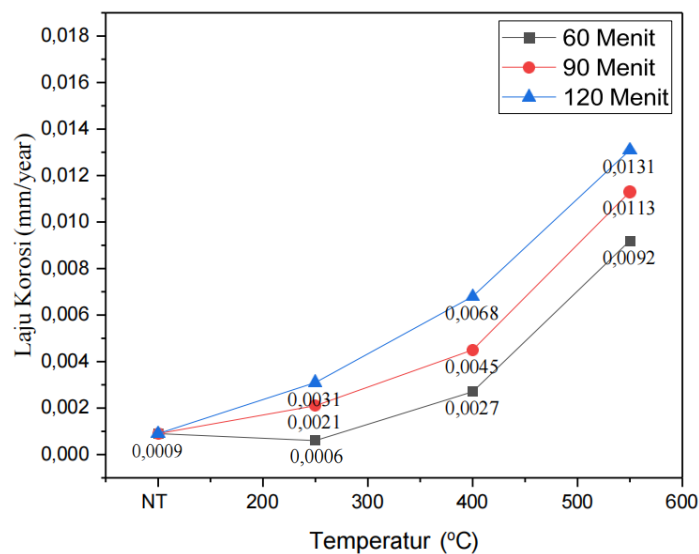
Dengan cara perhitungan yang sama dan waktu perendaman yang sama untuk spesimen tanpa perlakuan dengan spesimen setelah *quenching tempering* pada temperatur 250°C, 400°C, 550°C dan waktu tahan 60, 90, dan 120 menit didapatkan hasil laju korosi untuk T 250 – H 60 (0,0006 mm/y) H 90 (0,0021 mm/y) H 120 (0,0031 mm/y). Sementara itu, untuk T 400 diperoleh H 60 (0,0027

mm/y) H 90 (0,0045 mm/y) H 120 (0,0068 mm/y) kemudian untuk T 550 yaitu H 60 (0,0092 mm/y) H 90 (0,0113 mm/y) H 120 (0,0131 mm/y).

4.3.1 Pengaruh Temperatur terhadap Laju Korosi

Dilihat dari tabel 4.3 hasil perhitungan laju korosi bahwa besarnya temperatur tempering yang diberikan berpengaruh pada laju korosi yang terjadi. Meningkatnya temperatur dari 250°C, 400°C, dan 550°C menyebabkan laju korosi cenderung naik. Laju korosi yang terjadi pada spesimen dengan *tempering* 250°C relatif rendah begitu juga dengan temperatur 400°C, tetapi terus naik begitu temperatur *tempering* mencapai 550°C. Hasil perendaman yang dilakukan dalam waktu 30 hari tanpa perlakuan panas dan dengan perlakuan panas mendapatkan nilai yaitu untuk spesimen tanpa perlakuan panas dengan nilai laju korosi sebesar 0,0009 mm/year, sedangkan spesimen yang diberi perlakuan *tempering* T 250 - H 60 sebesar 0,0006 mm/y. Kemudian nilai laju korosi untuk T 250 – H 90 dan H 120 memiliki laju korosi yang lebih tinggi dari pada tanpa perlakuan yaitu H 90 (0,0021 mm/y) dan H 120 (0,0031 mm/y). Begitu juga saat temperatur *tempering* 400°C memiliki nilai laju korosi yang lebih tinggi dibandingkan tanpa perlakuan dan *tempering* 250°C. Pada T 400 - H 60 didapatkan nilai 0,0027 mm/y lalu H 90 sebesar 0,0045 mm/y dan H 120 yaitu 0,0068 mm/y. Pada perlakuan T 400 – H 60 memiliki nilai laju korosi sedikit lebih rendah dibandingkan T 250 – H 120. Dapat diketahui bahwa walaupun temperatur *tempering* telah dinaikkan tidak selalu membuat nilai laju korosi semakin lebih besar dari temperatur yang lain, hal ini disebabkan lamanya waktu tahan juga berperan penting dalam mempengaruhi

besarnya kenaikan laju korosi. Selanjutnya T 550 – H 60, H 90, dan H 120 didapatkan laju korosinya yaitu 0,0092 mm/y, 0,0113 mm/y, dan 0,0131 mm/y. Pada T 550 ini kenaikan nilai laju korosi menjadi lebih signifikan lagi dibandingkan spesimen tanpa perlakuan. Selain itu pada T 250 dan T 400 kenaikan laju korosi tidak terlalu tinggi dari pada T 550, yang mana laju korosinya naik secara drastis dan melewati batas spesifikasi *corrosion rate* untuk aplikasi *diaphragm pressure gauge* sensor tekanan oli mesin yaitu maksimal 0,01 mm/year. Sehingga dapat diketahui peningkatan temperatur berpengaruh besar dengan naiknya laju korosi dimana kenaikan terjadi secara linear bila dihubungkan dengan kenaikan temperatur *tempering*. Penjelasan tersebut kemudian dibuat dalam bentuk grafik sebagai berikut:



Gambar 4.5 Grafik Uji Laju Korosi vs Temperatur

Pada grafik dapat kita ketahui bahwa laju korosi paling tinggi terjadi pada spesimen dengan temperatur *tempering* 550°C yaitu terjadi kenaikan laju korosi

yang signifikan antara sampel tempering 250°C dan *tempering* 400°C. Hal ini dikarenakan setelah proses *high tempering* (suhu >450°C) terjadi perubahan pada struktur mikro yang memengaruhi komposisi kimia dan sifat pelindung lapisan pasif *stainless steel 304 thin foil*. Pada rentang temperatur ini sensitasi dapat terjadi akibat terbentuknya presipitasi karbida kromium dimana karbon yang larut dalam fasa austenit kemudian berikatan dengan kromium membentuk karbida kromium di batas butir sehingga efek dari terbentuknya presipitasi ini menyebabkan kromium di sekitar batas butir berkurang hingga di bawah batas minimum untuk membentuk lapisan pasivasi pada material [8]. Banyaknya kromium yang berikatan dengan karbon membentuk membuat kekurangan kromium di zona sensitasi, sehingga unsur kromium yang harusnya berikatan dengan oksigen membentuk lapisan tipis oksida kromium (Cr_2O_3) yang melindungi *stainless steel* dari korosi menjadi turun dan menyebabkan efektivitas lapisan pasif berkurang. Selain itu, presipitasi karbida kromium membuat ketidakseragaman dalam struktur mikro menyebabkan mikrogalvanik yang dapat mempercepat laju korosi. Hal ini terjadi karena perbedaan potensial elektroda dalam material, yang memicu mekanisme korosi elektrokimia sehingga presipitasi kromium di batas butir memiliki area dengan sifat elektrokimia yang berbeda. Area dengan kadar kromium lebih tinggi menjadi lebih tahan korosi (katodik), sementara area yang kekurangan kromium menjadi lebih rentan terhadap korosi (anodik) [19]. Perbedaan ini membentuk sistem sel galvanik mikro, dimana area anodik akan terkorosi lebih cepat.

Selanjutnya laju korosi pada temperatur *tempering* 400°C lebih rendah dari dibandingkan *tempering* 500°C. Untuk nilai laju korosi tertinggi yang didapatkan yaitu 0,0068 mm/y pada waktu tahan 120 menit, sedangkan 60, 90 menit yaitu 0,0027 mm/y dan 0,0045 mm/y. Laju korosi *middle tempering* (300-450°C) lebih rendah dibandingkan *high tempering* karena pada rentang temperatur ini presipitasi karbida kromium cenderung masih sedikit terbentuk, dimana austenit tetap dominan tanpa adanya transformasi fasa yang terjadi sehingga belum menyebabkan korosi yang signifikan dibandingkan *high tempering*. Tetapi pada *tempering* 400°C resiko terjadinya korosi mulai meningkat karena presipitasi karbida kromium sudah mulai terbentuk di batas butir, namun karena deplesi kromium yang masih sedikit ketahanan terhadap korosi tidak menjadi turun signifikan seperti pada *high tempering* [16].

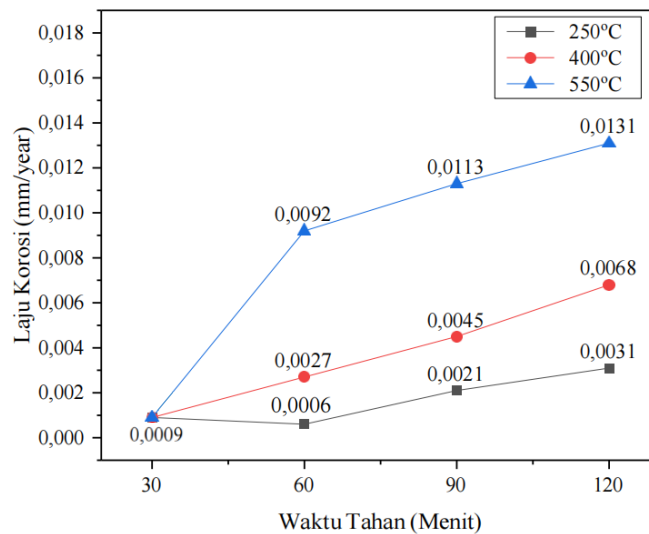
Sedangkan untuk *low tempering* yaitu temperatur 250°C laju korosi terjadi sangat rendah dibandingkan T 400 dan T 550 adapun laju korosi tertinggi yang didapatkan pada T 250 adalah dengan waktu tahan 120 menit dengan nilai 0,0031 mm/y. Dari grafik 4.5 dapat dilihat nilai laju korosi T 250 – H 120 sedikit lebih tinggi dari T 400 - H 60 hal ini dipengaruhi waktu tahan T 250 yang lebih lama dua kali lipat dari pada T 400 – H 60 walaupun T 400 temperturnya lebih tinggi tetapi waktu tahan juga mempengaruhi struktur mikro dan komposisi kimia yang menyebabkan meningkatnya laju korosi. Tetapi secara rata-rata nilai laju korosi T 250 sangat rendah, ini dikarenakan pada T 250 lapisan pasif oksida kromium (Cr_2O_3) pada permukaan *stainless steel* tetap stabil. Temperatur T 250 masih rendah dan tidak cukup untuk menyebabkan difusi pengendapan karbida kromium

di batas butir, sehingga tidak terjadi deplesi kromium yang memperbesar laju korosi. Selain itu struktur mikro *stainless steel 304 thin foil* tetap stabil dan tidak terjadi transformasi fasa yaitu kromium tetap homogen dalam matriks austenitik tanpa membentuk presipitasi kromium karbida di batas butir yang menyebabkan sensitasi akibat batas butir yang kekurangan kromium [46]. Tetapi nilai laju korosi pada T 250 H 90 (0,0021 mm/y) dan H 120 (0,0031 mm/y), lebih tinggi dibandingkan spesimen tanpa perlakuan dengan laju korosi 0,0009 mm/y, serta spesimen T 250 H 60 yaitu (0,0006 mm/y) ini disebabkan *low tempering* merelaksasi tegangan sisa sehingga mengubah struktur oksida secara halus dan membuat lapisan pasif menjadi lebih tipis dibandingkan tanpa perlakuan.

4.3.2 Pengaruh Waktu Tahan terhadap Laju Korosi

Waktu tahan *tempering* memengaruhi laju korosi *stainless steel 304 thin foil* karena lama waktu pemanasan pada temperatur tertentu memengaruhi perubahan struktur mikro dan sifat material. Waktu penahanan sangat berpengaruh pada saat transformasi karena apabila waktu penahanan yang diberikan kurang tepat maka transformasi fasa yang terjadi tidak sempurna dan tidak homogen mengakibatkan presipitasi karbida kromium tidak merata di batas butir sehingga terjadi konsentrasi kromium yang rendah di beberapa area [40]. Jika dilihat dari grafik 4.6 dengan temperatur *tempering* yang sama meningkatnya nilai laju korosi setiap kenaikan waktu tahan *tempering*. Untuk semua temperatur (T 250, T 400, T 550), laju korosi semakin besar ketika waktu tahan meningkat dari 60, 90 kemudian 120 menit. Nilai laju korosi pada T 250 – H 60, 90, 120 yaitu

0,0006 mm/y, 0,0021 mm/y dan 0,0031 mm/y. Lalu T 400 – H 60, 90, 120 yaitu 0,0027 mm/y, 0,0045 mm/y dan 0,0068 mm/y dan untuk T 550 – H 60, 90, 120 sebesar 0,0092 mm/y, 0,0113 mm/y dan 0,0131 mm/y. Hasil data terhadap waktu tahan dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 4.6 Grafik Uji Laju Korosi vs Waktu Tahan

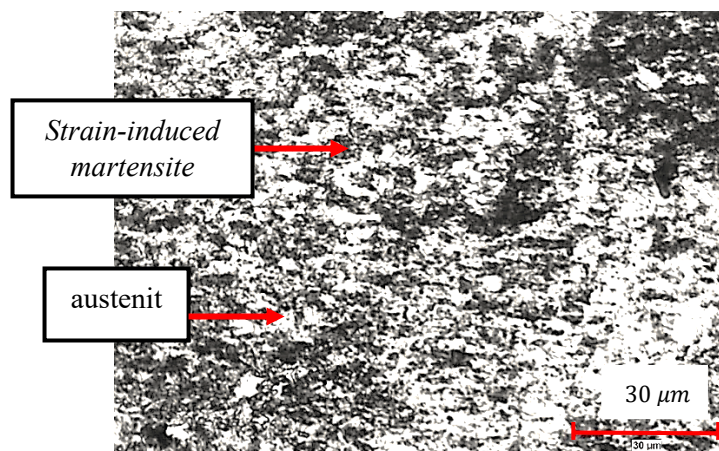
Pada grafik menunjukkan pengaruh variasi waktu tahan terhadap laju korosi hasil *tempering* menunjukkan nilai laju korosi tertinggi pada waktu tahan 120 menit disetiap temperatur *tempering*. Semakin lama waktu tahan maka semakin tinggi nilai laju korosi material. Besarnya laju korosi pada waktu tahan 120 menit disebabkan oleh banyaknya difusi kromium dari matriks austenit ke batas butir dan membentuk presipitasi karbida kromium. Proses difusi kromium membutuhkan waktu untuk menjadi karbida kromium di batas butir sehingga dengan waktu tahan yang lebih lama, presipitasi karbida kromium meningkat secara signifikan, menyebabkan deplesi kromium yang lebih luas di sekitar batas butir. Presipitasi karbida kromium menciptakan zona kekurangan kromium di

batas butir, yang melemahkan kemampuan pembentukan lapisan pasif Cr_2O_3 di area tersebut [10]. Pada waktu tahan 120 menit, deplesi kromium menjadi semakin parah, sehingga lapisan pasif tidak dapat melindungi batas butir dengan baik akibatnya laju korosi meningkat drastis. Sedangkan pada waktu tahan tempering 90 menit nilai laju korosinya lebih rendah dibandingkan 120 menit karena transformasi mikrostruktur yang masih dalam tahap awal dan belum masif. Pada waktu tahan 90 menit, presipitasi karbida kromium di batas butir sudah mulai terjadi, tetapi belum sepenuhnya berdifusi. Jumlah dan ukuran karbida yang terbentuk lebih kecil dan tidak memiliki banyak waktu untuk kromium berdifusi ke batas butir dibandingkan dengan waktu tahan 120 menit. Zona deplesi kromium di sekitar batas butir masih relatif kecil karena presipitasi karbida belum sepenuhnya mencapai kesetimbangan dan lapisan pasif di area matriks austenit masih dapat berfungsi sebagian untuk melindungi material dari serangan korosi. Kemudian dengan waktu tahan 60 menit memiliki nilai laju korosi terendah pada setiap temperatur tempering yang disebabkan oleh waktu tahan 60 menit tidak memberikan cukup waktu untuk proses difusi kromium dari matriks austenit ke batas butir, akibatnya presipitasi karbida hanya sedikit terjadi. Bahkan pada temperatur 250°C belum mengalami perubahan transformasi fasa yang signifikan dan waktu tahan hanya berpengaruh pada proses relaksasi tegangan sisa. Semakin lama waktu tahan tempering 250°C memberikan waktu tambahan bagi material untuk mencapai kondisi keseimbangan yang lebih stabil, sehingga mengurangi tegangan sisa lebih efektif tetapi juga meningkatkan nilai laju korosi meskipun pada 250°C tidak signifikan terjadi presipitasi karbida difusi unsur kromium dapat

mulai terjadi pada skala mikro akibatnya lapisan pasif menjadi lebih tipis dan akan semakin besar dengan bertambahnya waktu tahan sehingga dapat merusak lapisan pasif (Cr_2O_3) yang melindungi dari serangan korosi.

4.4 Hasil Pengamatan Metalografi

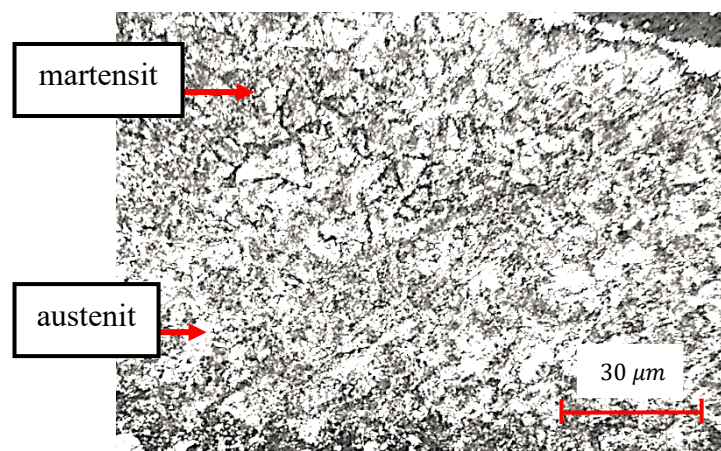
Pengamatan metalografi bertujuan untuk mengidentifikasi fasa-fasa yang terbentuk efek dari perlakuan tempering dan memahami hubungan fasa-fasa tersebut dengan kekerasan dan ketahanan korosi *stainless steel 304 thin foil*. Dengan fokus pada tiga temperatur perlakuan, yaitu 250°C , 400°C , dan 550°C serta variasi waktu tahan 60, 90, 120 menit, kita dapat melihat fasa yang dihasilkan dan mengetahui penyebab dari naik turunnya nilai kekerasan dan laju korosi sehingga efektivitas treatment *quenching tempering* bisa dievaluasi. Selain itu diperlukan analisa awal struktur mikro spesimen tanpa perlakuan untuk mengetahui bagaimana respon material dan memastikan hasil perlakuan panas sesuai dengan kebutuhan aplikasi terhadap perlakuan panas yang diberikan. Berikut adalah struktur mikro *raw material stainless steel 304 thin foil*:



Gambar 4.7 Hasil Metalografi *Non-Treatment*

Pada *stainless steel 304 thin foil* tanpa perlakuan panas memiliki struktur mikro berbentuk butiran panjang dan terdeformasi. Butiran tampak tidak simetris seperti serat-serat panjang karena material mengalami peregangan akibat beban mekanis. Dari struktur mikro yang terlihat, dapat kita ketahui bahwa *stainless steel 304 thin foil* ini merupakan hasil *cold rolling*. Saat material mengalami *cold rolling*, jumlah dislokasi dalam kisi kristal meningkat drastis yang menyebabkan *strain hardening*. Semakin banyak deformasi plastis, semakin banyak dislokasi terbentuk sehingga kekerasan material meningkat karena pergerakan dislokasi semakin terhambat. Hal ini menjadi penyebab *raw material stainless steel 304 thin foil* memiliki nilai kekerasan yang tinggi yaitu mencapai 400 HV. Hasil *cold rolling* juga membentuk fasa martensit pada material. Sebagian fasa austenit dapat berubah menjadi martensit melalui mekanisme transformasi martensitik yang diinduksi oleh deformasi. Tekanan akibat deformasi menyebabkan perubahan fasa dari FCC ke BCT sehingga semakin besar reduksi ketebalan dalam *cold rolling*, semakin banyak martensit terbentuk.

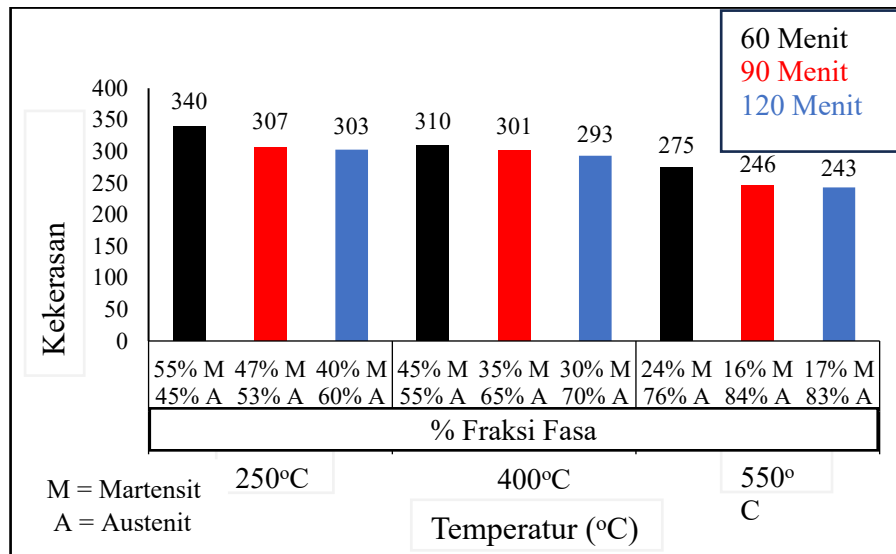
Pada *stainless steel 304 thin foil* ini sebelum di-*tempering* terlebih dahulu dilakukan proses *quenching* air biasa dengan pemanasan temperatur 900°C waktu tahan 60 menit. Kemudian juga didapatkan hasil struktur mikro sebagai berikut:



Gambar 4.8 Hasil Metalografi Perlakuan *Quenching*

Dari Gambar 4.8 dapat kita lihat struktur mikro yang dihasilkan yaitu dominan martensit, dan sedikit austenit. Permukaan spesimen terlihat kasar menandakan *quenching* pada *stainless steel* 304 menyebabkan transformasi yang menghasilkan fasa martensit dalam jumlah besar, seperti yang terlihat pada referensi Gambar 2.5. Ketika jumlah martensit meningkat, struktur menjadi lebih kasar dengan butiran yang tajam dan tidak homogen. Selain itu, material hasil *quenching* mengalami retakan mikro akibat *internal stress*, membuatnya terlihat lebih getas.

Selanjutnya data hasil struktur mikro *tempering* yang didapatkan berupa gambar hasil pengujian mikroskop optik dengan perbesaran 500x dan 1000x. Dilakukan perbesaran yang berbeda karena sulitnya melihat bentuk dan sebaran kelompok-kelompok fasa pada permukaan material. Melalui pengujian metalografi didapatkan fasa hasil perlakuan *quenching tempering* yaitu martensit dan fasa utama austenit. Persen sebaran fasa ini bervariasi setiap kenaikan temperatur dan waktu tahan *tempering* yang berpengaruh kepada kekerasan dan ketahanan korosi material. Untuk menentukan persentase area sebaran fasa martensit dan austenit pada gambar struktur mikro *stainless steel* 304 *thin foil*, dilakukan analisis menggunakan teknik *thresholding* dengan *software ImageJ*. Nilai dari % area fraksi fasa dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti temperatur *tempering* dan waktu tahan. Namun, pengaruh paling utama adalah temperatur *tempering* yang menyebabkan transformasi fasa martensit secara signifikan setiap kenaikan temperatur sehingga mempengaruhi nilai kekerasan material. Berikut adalah grafik persen fasa terhadap nilai kekerasan material:



Gambar 4.9 Persen Fraksi Fasa vs Nilai Kekerasan

Nilai kekerasan yang didapatkan terhadap kenaikan dan penurunan persen fraksi fasa austenit dan martensit, jika dilakukan perhitungan manual menggunakan metode *rule of mixtures* dengan rumus yaitu:

$$HV_{total} = (f_m \times HV_m) + (f_a \times HV_a) \dots \dots \dots (4.3)$$

Dimana: f_m = Persen fraksi martensit

f_a = Persen fraksi austenit

HV_m = Kekerasan martensit

HV_a = Kekerasan Austenit

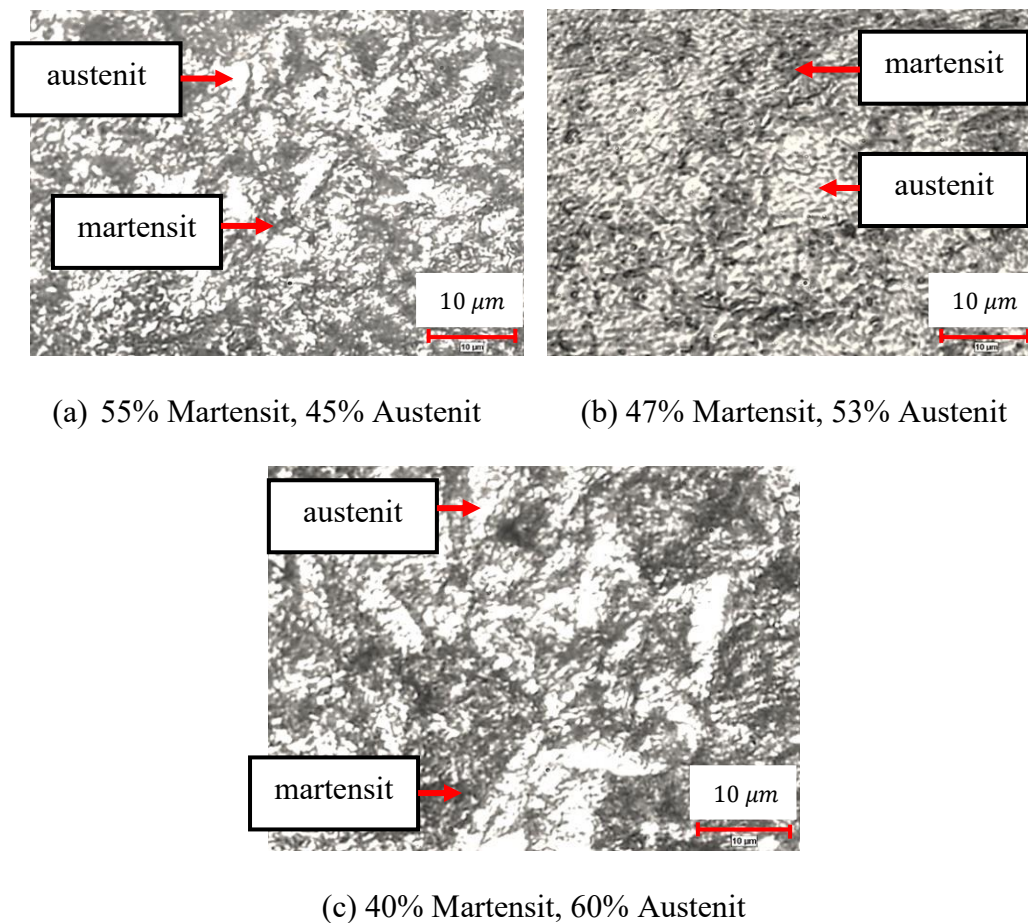
Dapat dilihat pada tabel 4.3 dan lampiran A.2, dari rumus tersebut didapatkan hasil yang cukup mendekati nilai kekerasan aktual hasil uji kekerasan *stainless steel 304 thin foil* terhadap sebaran fasanya pada gambar 4.9. Untuk hasil perhitungann dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Kekerasan Metode *Rule of Mixtures*

Temperatur Tempering (°C)	Holding Time (menit)	Kekerasan
250	60	365
	90	341
	120	320
400	60	335
	90	305
	120	290
550	60	272
	90	248
	120	251

Fasa yang terbentuk pada pada temperatur *tempering* 250°C dengan variasi waktu tahan 60, 90, dan 120 menit dapat dilihat pada gambar 4.1. Pada Gambar 4.1 struktur mikro spesimen *stainless steel 304 thin foil* menunjukkan fasa yang terbentuk adalah austenit (γ), dan martensit (α). Austenit merupakan fasa utama dalam *stainless steel 304* karena baja tahan karat austenitik memiliki elemen seperti nikel (Ni) dan mangan (Mn) yang menstabilkan fasa austenit. Ciri-ciri struktur austenit pada pada gambar mikroskop di atas adalah area terang yang terlihat seragam. Sedangkan fasa martensit sisa perlakuan *quenching* pada proses sebelumnya masih terdapat pada spesimen *tempering* 250°C yang ditunjukkan area gelap acak dan memanjang. Seiring bertambahnya waktu tahan area martensit yang terbentuk cenderung terelaksasi atau menjadi martensit temper. Selanjutnya presipitasi karbida kromium mulai sedikit terbentuk yaitu pada temperatur 250°C, difusi karbon dan kromium di batas butir belum terjadi secara signifikan terutama dengan waktu tahan 60 menit, tapi tanda-tanda awal munculnya presipitasi sudah mulai terlihat di batas butir. Dengan waktu tahan 60 menit dapat kita amati struktur mikro martensit sisa *quenching* masih muncul dan tersebar dipermukaan

material, ini disebabkan pada temperatur *tempering* rendah (250°C), transformasi martensit menjadi austenit kembali (*reverse transformation*) tidak signifikan. Namun seiring bertambahnya waktu tahan *tempering* hanya menyebabkan relaksasi *internal stress* dan penurunan densitas dislokasi dalam struktur martensit temper [30]. Hal ini dapat dilihat dari gambar persen sebaran fraksi fasa berikut:



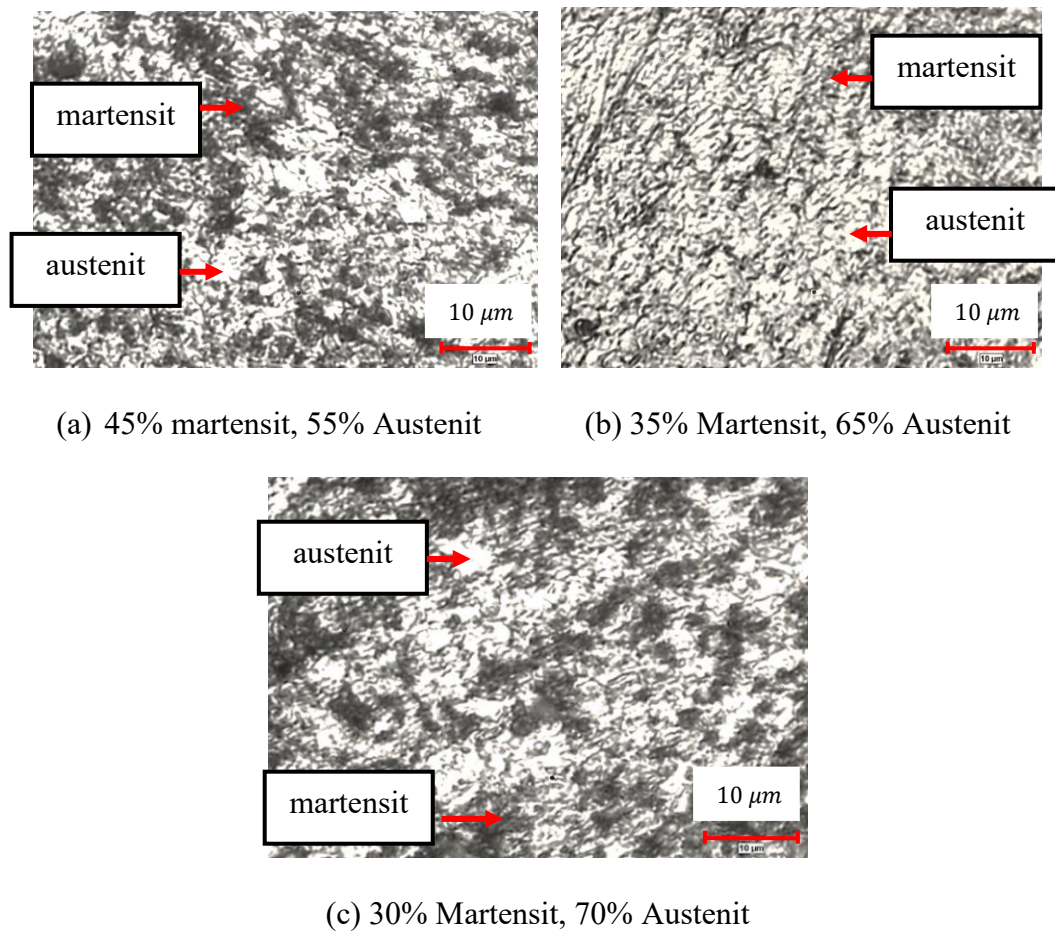
Gambar 4.10 Area Fasa T 250 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120

Berdasarkan Gambar 4.10 dapat dilihat pada temperatur 250°C bahwa persen area fasa martensit pada gambar berwarna gelap, cenderung masih tinggi untuk waktu tahan 60 menit dan semakin menurun dengan waktu tahan 90 menit dan 120 menit

sedangkan persen area fasa austenit yang berwarna terang mengalami peningkatan. Pada kondisi waktu tahan 60 menit, persen area martensit mencapai 55% dan austenit 45%. Namun, ketika waktu tahan dinaikkan ke-90 menit, persen area martensit menurun menjadi 47% lalu area austenit meningkat menjadi 53%. Selanjutnya, pada waktu tahan 120 menit terjadi penurunan persen area martensit dan kenaikan persen area austenit menjadi 40% dan 60%. Penambahan waktu tahan *tempering* cukup memiliki dampak signifikan terhadap relaksasi struktur martensit. Pada 250°C, difusi karbon masih sangat terbatas karena temperatur yang rendah. Namun dengan waktu yang lebih lama, karbon dapat mulai berdifusi keluar dari martensit membentuk struktur yang lebih stabil yaitu martensit temper. Akibat masih banyaknya fasa martensit pada *tempering* 250°C yang memiliki karakteristik kekerasan yang tinggi dan rapuh, sehingga berpengaruh pada tingginya nilai kekerasan yang didapatkan pada temperatur ini yaitu H 60 (340 HV), H 90 (307 HV), dan H 120 (303 HV). Selain itu juga ditemukan adanya indikasi pembentukan presipitat krom karbida dilihat dari kenaikan laju korosi *tempering* 250°C dibandingkan spesimen tanpa perlakuan. Dengan temperatur *tempering* 250°C pembentukan presipitat krom karbida sangat lambat karena difusi atom kromium dan karbon memerlukan energi aktivasi yang cukup besar. Tetapi dengan memperlama waktu tahan, difusi atom dapat terjadi secara perlahan dan presipitat mulai sedikit terbentuk sehingga dengan H 60, presipitasi masih dalam tahap awal yang membuat ukuran dan distribusinya kecil. Hanya sedikit atom *chromium* yang berdifusi di sepanjang batas butir dalam struktur mikro. Kemudian H 90, presipitat karbida masih sedikit tersebar di matriks austenit tetapi

ukurannya sudah lebih besar dibandingkan H 60 dan naiknya waktu tahan ke-H 120 presipitat akan terbentuk lebih banyak lagi di batas butir dan terkonsentrasi didalam matriks membuat ukuran semakin luas. Dengan itu dapat dipahami bahwa semakin bertambahnya waktu tahan difusi atom kromium dan karbon menjadi lebih signifikan, sehingga presipitat akan bertambah besar dan lebih banyak. Hal ini juga menjadi penyebab naiknya laju korosi pada tempering 250°C setiap bertambahnya waktu tahan karena presipitat yang semakin besar meningkatkan zona kekurangan kromium di sekitar batas butir mengakibatkan penurunan ketahanan korosi.

Selanjutnya didapatkan gambar struktur mikro perlakuan *tempering* 400°C dengan waktu tahan yang sama, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.2 dapat diketahui bahwa analisa visual didapatkan fasa martensit dan austenit. Fasa martensit masih dapat ditemukan pada *tempering* 400°C dengan H 60, H 90, H 120 tetapi seiring bertambahnya waktu tahan, fasa martensit terlihat sedikit berkurang dan jika dibandingkan *tempering* 250°C dengan waktu tahan yang sama, sebaran fasa martensit 400°C tidak sebanyak 250°C. Adanya fasa martensit disebabkan oleh temperatur 400°C belum cukup untuk metransformasi martensit menjadi fasa stabil austenit. Hanya saja pada temperatur ini, fasa martensit lebih terelaksasi yaitu atom karbon yang sebelumnya terperangkap dalam struktur martensit mulai bergerak, menghasilkan martensit temper yang lebih stabil tetapi masih mempertahankan bentuk kristalnya sehingga fasa martensit tidak sepenuhnya hilang. Berikut adalah gambar perhitungan persen sebaran fasa pada *tempering* 400°C:



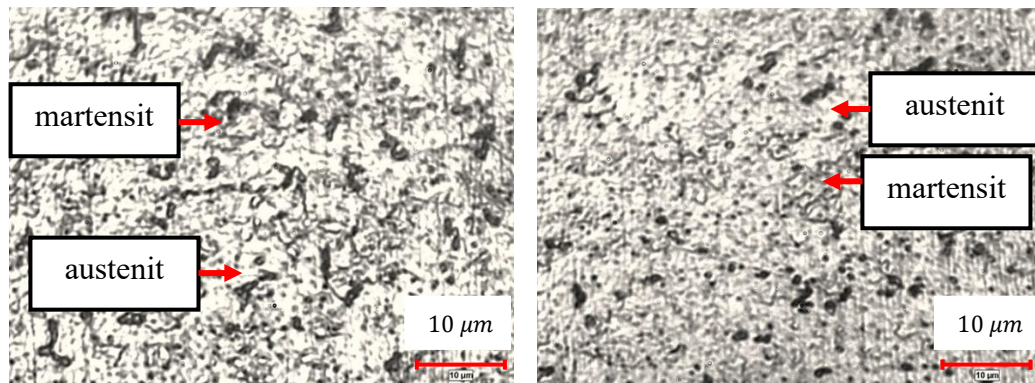
Gambar 4.11 Area Fasa T 400 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120

Berdasarkan Gambar 4.11 terlihat bahwa seiring bertambahnya waktu tahan, fasa austenit cenderung meningkat sedangkan fasa martensit menurun cukup signifikan. Hal ini disebabkan pada temperatur 400°C, transformasi martensit menjadi austenit sudah mulai terjadi dibandingkan temperatur 250°C. Dengan menaikkan temperatur memberikan tambahan energi untuk atom karbon lebih cepat berdifusi keluar dari martensit menyebabkan kestabilan struktur martensit menurun, sehingga memicu transformasi kembali menjadi fasa stabil austenit. Hal ini juga berpengaruh terhadap nilai kekerasan yang didapatkan, dapat kita lihat

Gambar 4.4 nilai kekerasan *tempering* 400°C tidak turun terlalu jauh dibandingkan *tempering* 250°C. Selanjutnya struktur mikro austenit tetap menjadi matriks utama dalam *stainless steel 304 thin foil* karena pada temperatur 400°C, energi aktivasi untuk difusi atom sangat rendah dan difusi atom berjalan sangat lambat atau bahkan tidak terjadi sehingga tidak cukup menggerakkan atom-atom untuk berdifusi seperti karbon atau kromium bertransformasi membentuk fasa lain. Selain itu elemen paduan seperti nikel (Ni) dan mangan (Mn) membuat austenit menjadi stabil. Tetapi pembentukan presipitat karbida kromium pada *stainless steel 304 thin foil* selama *tempering* 400°C dapat terjadi secara lambat sehingga presipitasi karbida terbentuk dalam jumlah kecil dan meningkat seiring bertambahnya waktu tahan [16]. Pada penelitian ini spesimen sebelumnya diberikan perlakuan *quenching* dari temperatur rekristalisasi (900°C) sehingga atom karbon dan kromium terjebak dalam larutan padat (*solid solution*) di dalam matriks austenit. Lalu diberikan *tempering* pada 400°C memicu pelepasan karbon dan kromium sehingga presipitat mulai terbentuk di batas butir.

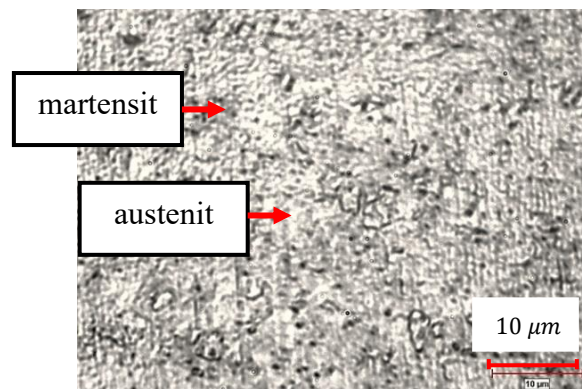
Sementara pada Gambar 4.3 didapatkan hasil pengamatan struktur mikro hasil perlakuan *tempering* 550°C. Setelah diamati dapat kita lihat seiring dengan meningkatnya waktu tahan dari H 60, H 90, kemudian H 120 diperoleh hasil permukaan yang cenderung lebih halus serta butir tersebar secara merata dan homogen. Fasa martensit masih dapat ditemukan pada *tempering* 550°C tetapi ukuran dan sebarannya sudah jauh berkurang dibandingkan T 250 dan T 400. Selain itu dengan bertambahnya waktu tahan fasa martensit semakin bertransformasi menjadi fasa stabil austenit bahkan dengan H 120 struktur

martensit sudah sangat kecil dan cenderung seluruhnya austenit disertain sebaran *grain size* yang homogen. Persen sebaran fasanya dapat dilihat pada gambar berikut:



(a) 24% Martesit, 76% Austenit

(b) 16% Martensit, 84% Austenit



(c) 17% Martensit, 83% Austenit

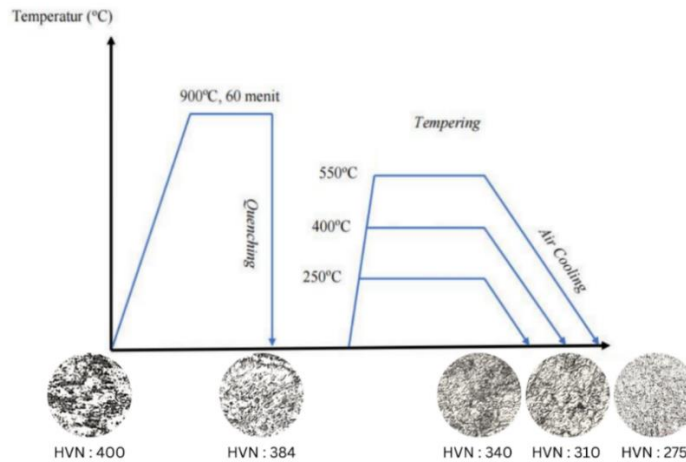
Gambar 4.12 Area Fasa T 550 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120

Pada Gambar 4.12 didapatkan hasil yaitu, dengan meningkatnya temperatur *tempering* 550°C dan seiring bertambahnya waktu tahan dari 60, 90, sampai 120 menit, diperoleh hasil sebaran fasa martensit yang semakin menurun dibandingkan temperatur 250°C dan 400°C, sedangkan fasa austenit semakin mendominasi. Dari masing-masing gambar dapat kita lihat perbedaan sebaran fasa

martensit, ditunjukkan area berwarna gelap yang semakin mengecil dan jarang diantara fasa utama austenit yang semakin meningkat seiring dengan naiknya temperatur *tempering* dan waktu tahan. Difusi karbon lebih aktif pada temperatur 550°C menyebabkan atom karbon keluar dari martensit dan larut ke dalam matriks austenit atau membentuk presipitat karbida krom di batas butir [8]. Pada gambar T 550 – H 60 mikrostruktur menunjukkan peningkatan homogenitas dengan sedikit adanya bintik-bintik hitam memanjang yang mengindikasikan masih terdapat fasa martensit yang belum bertransformasi ke fasa austenit. Hal ini dapat terjadi karena, temperatur 550°C difusi atom menjadi lebih aktif dibandingkan T 250 dan T 400 sehingga sudah cukup untuk menstabilkan fasa martensit menjadi austenit, tetapi adanya pengaruh waktu tahan 60 menit belum secara tuntas menyelesaikan difusi atom karbon yang masih terperangkap dalam martensit, akibatnya struktur martensit tetap ada sebagian karena karbon belum sepenuhnya meninggalkan matriks martensit dan menjaga distorsi kristal *body centered tetragonal* (BCT). Kemudian dengan bertambahnya waktu tahan H 90, memberikan waktu tambahan untuk karbon berdifusi ke matriks austenit atau batas butir membentuk karbida. Hal ini berpengaruh dengan semakin berkurangnya fasa martensit pada H 90 dibandingkan H 60 yang ditandai dengan bintik-bintik hitam yang semakin sedikit. Lalu dengan *tempering* 550°C H 120 fasa martensit cenderung sudah tidak terlihat dan hampir semuanya bertransformasi menjadi austenit yang homogen dan sebaran butir lebih merata. Hal ini mengindikasikan pada *tempering* 550°C dengan waktu tahan ≥ 120 menit sudah cukup untuk atom karbon bergerak keluar dari martensit menuju matriks austenit atau ke batas butir membentuk presipitasi sehingga fasa martensit signifikan berkurang. Disebabkan banyaknya fasa martensit yang bertransformasi dan tegangan sisa hasil *quenching* yang

sepenuhnya terelaksasi, hal ini berpengaruh terhadap nilai kekerasan yang turun signifikan pada *tempering* 550°C disemua waktu tahan. Selain itu, dengan *tempering* 550°C pembentukan presipitas karbida krom meningkat dibandingkan T 250 dan T 400. Peningkatan temperatur *tempering* memberikan energi aktivasi yang besar pula kepada atom-atom karbon dan kromium yang terdapat dalam fasa austenit untuk bergerak atau berdifusi ke batas butir. Ketika atom karbon bereaksi dengan atom kromium maka akan membentuk karbida kromium pada batas butir atau dalam matriks. Semakin banyak presipitat karbida krom terbentuk maka semakin besar juga area yang kekurangan atom kromium (*chromium depleted zone*) sehingga kadar atom kromium (Cr) terlalu rendah untuk membentuk lapisan pasivasi Cr₂O₃ yang dapat menyebabkan material *stainless steel 304 thin foil* hasil *tempering* 550°C lebih rentan terkena serangan korosi. Hal ini dapat kita lihat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6 yaitu *tempering* 550°C menunjukkan kenaikan laju korosi yang signifikan dibandingkan T 250 dan T 400 yang disebabkan banyaknya terbentuk presipitasi karbida kromium yang menurunkan ketahanan korosi *stainless steel 304 thin foil*.

Berdasarkan penjelasan hasil struktur mikro *stainless steel 304 thin foil* diatas, dapat ditampilkan secara ringkas skematik diagram proses perlakuan panas serta perubahan mikrostruktur dari *raw material*, hasil *quenching*, kemudian setelah diberikan variasi perlakuan *tempering*. Hasilnya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.13 Skematik Proses Perlakuan dan Hasil Struktur Mikro

Pada spesimen *raw material* butiran tampak tidak simetris seperti serat-serat panjang karena material mengalami peregangan akibat beban mekanis *cold rolling*. Saat material mengalami *cold rolling*, jumlah dislokasi dalam kisi kristal meningkat drastis yang menyebabkan *strain hardening*. Selanjutnya setelah austenisasi 900°C waktu tahan 60 menit material di-*quenching* dengan media air biasa dan menghasilkan struktur mikro dominan martensit dan sedikit austenit. Permukaan spesimen terlihat kasar dengan butiran yang tajam dan tidak homogen. Selanjutnya diberikan perlakuan *tempering*, dengan *tempering* pertama pada temperatur 250°C menghasilkan struktur martensit temper dan terlihat permukaan menjadi lebih halus dibandingkan hasil *quenching*. Kemudian *tempering* 400°C, fasa martensit sudah cenderung berkurang, tetapi temperatur 400°C belum cukup untuk metransformasi martensit seluruhnya menjadi fasa stabil austenit. Lalu pada *tempering* 550°C hampir semuanya bertransformasi menjadi austenit, tetapi pertumbuhan presipitat karbida semakin masif sehingga menurunkan ketahanan korosi pada *stainless steel 304 thin foil*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Temperatur dan waktu tahan proses *quenching-tempering* berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan stainless steel 304 thin foil. Semakin tinggi temperatur dan waktu tahan, maka nilai kekerasan material akan semakin turun. Hal ini dikarenakan, kenaikan temperatur dan waktu tahan menyebabkan *stress relieving* yang semakin baik. Selain itu Semakin tinggi temperatur tempering dan semakin lama waktu tahan, semakin banyak martensit yang berubah kembali menjadi austenit, menyebabkan penurunan kekerasan.
2. Peningkatan Temperatur dan waktu tahan perlakuan *quenching-tempering* menghasilkan peningkatan laju korosi *stainless steel 304 thin foil*. Kenaikan signifikan mulai terjadi pada temperatur 400°C dan semakin tinggi pada 550°C. Peningkatan ini disebabkan pada rentang temperatur 400°C – 700°C karbon dalam material mulai berdifusi dan bereaksi dengan kromium untuk membentuk karbida kromium (Cr_{23}C_6) di batas butir. Presipitasi ini menyebabkan penurunan kadar kromium di sekitar batas butir sehingga unsur kromium sebagai elemen utama pembentuk lapisan pelindung oksida (Cr_2O_3) tidak terbentuk dengan sempurna.

3. Temperatur dan waktu tahan dalam proses *quenching-tempering* memiliki pengaruh besar terhadap struktur mikro *stainless steel 304 thin foil*. Fasa yang terbentuk saat *quenching* adalah martensit dengan banyak *internal stress*, dan sisanya fasa austenit. Kemudian *tempering* menghasilkan fasa martensit temper dan austenit. Semakin bertambah temperatur dan waktu tahan, maka martensit semakin banyak bertransformasi menjadi austenit.

5.2 Saran

Adapun saran setelah melakukan percobaan ini untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan analisa kekuatan dan ketangguhan untuk memahami karakteristik sifat mekanik *stainless steel 304 thin foil* setelah perlakuan *quenching-tempering* untuk spesifikasi *diaphragm pressure gauge*.
2. Melakukan uji XRF (*X-ray fluorescence*) untuk mengetahui secara pasti persen pengurangan unsur karbon dan kromium sehingga lebih memahami banyaknya presipitasi karbida krom yang terbentuk di batas butir.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A Aziz & M Yang. *Effect of Martensitic Transformation and Grain Size on the Surface Roughening Behavior in SUS 304 and SUS 316 Thin Foil*. Article Advance Materials Engineering Laboratory, Tokyo Metropolitan University. 67–182; Oct 2020, doi:10.3390/eng1020011.
- [2] W.O Alexander, E.J Bradbury. Dasar Metalurgi untuk Rekayasawan. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama. 1991.
- [3] A Aminnudin, H Suryanto, Suprayito. *The Influence of Holding Time to Mechanical Properties of Steel Processed with Powder Metallurgy*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1908(1):012032. Jun 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1908/1/012032.
- [4] R.R Aminuddin, A.W.B Santosa, H Yudo. Analisa Kekuatan Tarik, Kekerasan dan Kekuatan Puntir Baja ST 37 Sebagai Bahan Poros Baling-baling Kapal (*Propeller Shaft*) setelah Proses *Tempering*. Jurnal Teknik Perkapalan Vol. 8 No.3, Jul 2020.
- [5] Arai, *Heat Treating*. *ASM Metal Handbook Vol. 4*. USA: ASM International, 1998.
- [6] ASM Handbook. *Metallography And Microstructure*. Vol 9 ASM International, 2004.
- [7] Avner, H Sidney. *Introduction to physical metalurgi, 2nd Edition*, Mc Graw-Hill Publishing Co. Ltd, Singapore, 1974.
- [8] A Budianto, K Purwantini, T. Sujitno. Pengamatan Struktur Mikro Korosi Antar Butir Dari Mineral Baja Tahan Karat Austenitik Setelah Mengalami Proses Pemanasan. Jurnal Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir. Jurnal forum nuklir 3 (2): 107. BATAN, Yogyakarta. Nov 2009, DOI: 10.17146/jfn.2009.3.2.3297.

- [9] Callister, D William. *Material Science and Engineering An Introduction*. New York: John Wiley and Sons, Inc, 2007.
- [10] M.R Cahya, Wawan, A Abdullah. Analisis Terjadinya Korosi Batas Butir Akibat Proses Pengelasan GTAW pada Material Austenitic Stainless steel AISI A304. *Jurnal Teknologika* Vol 9 No 1. Mei 2019, doi.org/10.51132/teknologika.v9i1.7.
- [11] N.R Dani, Mulyadi, Sunardi. "Analisis Kuat Impak, Kekerasan dan Struktur Mikro Stainless Steel 304 Setelah Melalui Proses Hardening 900°C dan Tempering 200°C, 300°C, dan 400°C." *Jurnal Teknik Mesin* Vol. 1, No. 1 ISSN 2747-1947. Des 2020.
- [12] H.E Davis, G.E Troxell, C.T Wiskocil. "*The Testing and Inspection of Engineering Materials*." McGraw-hill Book Company, New York, USA, 1995.
- [13] S Dewangan, S Chattopadhyaya. "*Analysyng Effect of Quenching and Tempering into Mechanical Properties and Microstructure of 304-SS Welded Plates*." *Journal Department of Mechanical Engineering*, Manipal University Jaipur, Jaipur, Rajasthan, India, Pin-303007. Sep 2022, DOI: 10.36547/ams.28.3.1556.
- [14] Dieter, E George. *Metalurgi Mekanik*. Jakarta: Erlangga ,1987.
- [15] D Ekasurya, Sumarji, H Stjahjono. "Pengaruh *Heat Treatment Tempering* dengan Variasi *Holding Time* Terhadap Sifat Mekanik Baja AAR M201 Grade B+." *Jurnal Teknik Mesi Universitas Jember*, 2014.
- [16] M Farkhan, Sutrisna, A.B Prasetyo. "Analisis Kekuatan Tarik Dan Kekerasan Pada Baja Tahan Karat Austenitik Terhadap Variasi Temperatur Temper." *Jurnal Program Studi Teknik Mesin ITNY*. Vol. 03. pp. 41-50 e-ISSN: 2622-2736. Mar 2022.
- [17] E Gunawan. "Pengaruh Temperatur pada Proses Perlakuan Panas Baja Tahan Karat Martensitik AISI 431 terhadap Laju Korosi dan struktur Mikro." *Engineering and sains journal* Vol.1 NO.1, ISSN 2579-5422, Jun 2017. DOI: 10.5281/zenodo.1116030.

- [18] Handoyo, Yopi. "Pengaruh *Quenching* dan *Tempering* pada Baja JIS Grade S45C Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Crankshaft." *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Fakultas Teknik Unisma Bekasi* Vol.3 No.2 ISSN 2303-0909, Aug 2015.

- [19] E Bushueva, Y Turlo, G Khamgushkeeva. "*Influence of Chromium Concentration on Corrosion Resistance of Surface Layers of Stainless Steel.*" *Journal Novosibirsk State Technical University, Department of Chemistry and Chemical Technologies* 340:01022, Jan 2021. DOI: 10.1051/mateconf/202134001022.

- [20] D Irwanto, Y Basir, M Pamuji. "Studi Korosi pada Pipa Menggunakan Metode *Impressed Current* di Petrochina International Jambi." *Ltd. Jurnal Desiminasi Teknologi*, Vol. 1, No. 2. E.ISSN: 2503-5398. Jul 2013. <http://dx.doi.org/10.52333%2Fdestek.v1i2.173>.

- [21] Iron & Steel Society. "*Steel Product Manual Stainless Steel.*" *The Society Pennsylvania State University*. 1999.

- [22] R.T Kenneth, J Chamberlain. "Korosi Untuk Mahasiswa dan Rekayasawan." PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. 1991.

- [23] N.S Lim, C.W Bang, S Das, H.W Jin, R Ayer, C.G Park. "*Influence of Tempering Temperature on Both the Microstructural Evolution and Elemental Distribution in AISI 4340 Steels.*" *Met. Mater. Int.*, Vol. 18, No. 1, pp. 87-94. Oct 2020. DOI: 10.1007/s11665-020-05164-3.

- [24] Masrufaiyah, A.S Umartono, N.A Hisyamuddin. "Analisa Laju Korosi Galvalum I dan Galvalum II Terhadap Media Air Sumur dan Air Laut." *Jurnal Keilmuan dan Terapan Teknik* vol 9 hal 41-48. Dec 2020.

- [25] Mcguire Michael. *Stainless Steel for Design Engineering. Materials Park, Ohio United State of America* 44073-0002. 2008.

- [26] H Mekky H, A Baset. "*Computational Modelling for Specific Heat and Thermal Conductivity of Austenitic Stainless Steels Alloys at Solid Phase.*" *Journal of Composite and Advanced Material* vol 30 pp. 23-27. Mar 2020. DOI: 10.18280/rcma.300104

- [27] Meryanalinda, A.S Umartono, D Setiawan. "Analisa Laju Korosi Material Stainless Steel Grade SS304 dan Alloy UNS N08020 Terhadap Asam Sulfat dan Natrium Hidroksida." Jurnal Keilmuan dan Terapan Teknik Vol. 09 Hal 39-43. Jun 2020. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5225326>.
- [28] M. N. Mujaddedy, Jufriadi, & A Ibrahim. "Analisa Pengaruh Quenching Dan Tempering Terhadap Sifat Mekanik Pada Baja Aisi 1050." Jurnal Mesin Sains Terapan, vol. 4, no. 2, p. 127. Nov 2020, DOI: 10.30811/jmst.v4i2.2020
- [29] H Okamoto. "*Binary Alloy Phase Diagrams*." 2nd ed. ASM International. 1990.
- [30] H Perdana, M.S Anwar, A Juniarsih, E Mabruri. "Pengaruh Suhu dan Waktu Tempering Terhadap Kekerasan, Struktur Mikro, dan Laju Korosi Baja Tahan Karat Martensitik 13Cr3MO3Ni." Jurnal Metalurgi LIPI 32 (1):37-44. Apr 2017, DOI: 10.14203/metalurgi.v32i1.222.
- [31] A Prastyo, F Ibrahim, M Badaruddin. "*Analysis of Mechanical Properties of CD 304 SS at High Temperature Transient Conditions*." Jurnal Polimesin Lhokseumawe Vol. 20 No. 2 e-ISSN: 259-1999, Aug 2022.
- [32] G Priyotomo, P.A. I Nyoman Gede, F Rokhmanto. "Efek Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik Logam *Stainless Steel* Seri J4." Journal Teknik Vol. 42. No. 2 e-ISSN: 240-9919. Aug 2021, DOI: 10.14710/teknik.v42i2.36461.
- [33] A.K Putra, A Akbar, Y.S Pramesti. "Pengaruh *Quenching* St 304 Terhadap Nilai Kekerasan dengan *Heat Treatment* pada Suhu 750°C Media Pendinginan Larutan Garam." Jurnal Teknik Mesin, e-ISSN: 2549-7952, jul 2020.
- [34] A.A Ramadhan, E.D Kurniawan, Darti, R Hermawan. "Pengaruh Variasi Media Pendingin Quenching Terhadap Kekerasan Baja Aisi 1045." Jurnal Teknik Mesin e-ISSN: 2614-1884 Vol. 11 No. 1. Mar 2023. DOI: <http://10.23887/jptm.v11i1.58757>

- [35] F.M Ridlo, P.A Paristiawan, M.A Prasetyo. “Pengaruh Variasi Holding Time dan Media Pendingin pada Proses Solution Treatment Terhadap Kekerasan dan Ketangguhan Paduan Baja Fe12Mn1,5Mo.” Jurnal Metal Indonesia Vol. 42 No. 2. Dec 2020. DOI: 10.32423/jmi.2020.v42.77-85.

- [36] Sailon, S Rizal. “Analisa Perubahan Kekerasan dan Struktur Mikro Hasil Perlakuan Panas Produk Pandai Besi dengan Menggunakan Media Pendingin Batang Pisang.” Jurnal Austenit ISSN 2085-1286 Vol. 6 No. 2. Oct 2014.

- [37] A Setiawan, P Pribadhi, M Ari. “Analisa Pengaruh *Heat Treatment* terhadap Sifat Mekanik dan Ketahanan Korosi Intergranular SA-240 TP316L.” Jurnal Sains Terapan Vol. 6 No. 1 e-ISSN 2477-5525. Apr 2020. DOI: 10.32487/jst.v6i1.803.

- [38] M Sugeng, F.M Ismail, J.P Utomo. “Analisa Perbedaan Laju Korosi Hasil Pengujian *Weight Loss* dan Polarisasi pada Pipa dengan Pengujian Korosi Standar ASTM G59 DAN ASTM G31.” Jurnal Tera e-ISSN 2776-9666 Vol. 2 Page 48-56. Mar 2022.

- [39] H Sunandrio, L.N Sari. “Serangan Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*) pada *Roll Bearing* Pipa Distribusi.” Jurnal B2TKS, 11 (2);123-130. Dec 2011. <https://doi.org/10.29122/MKK.V11I2.556>.

- [40] Sungkono, S Ismarwanti. “Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Perilaku Tarik dan Struktur Mikro Baja Tahan Karat AISI 304 Paska Perlakuan Panas pada Daerah Sensitisasi 600 – 700°C.” Jurnal ilmiah daur bahan bakar nuklir vol. 27 123-132. Oct 2021. DOI: 10.17146/urania.2021.27.3.6570

- [41] S Tanhaei, K.H Gheisari, A Zaree. “*Effect of Cold Rolling on the Microstructural, Magnetic, Mechanical, and Corrosion Properties of AISI 316L Austenitic Stainless Steel.*” *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*. Vol. 25, No. 6, Jun 2018, doi.org/10.1007/s12613-018-1610-y.

- [42] K.E Thelning. *Steel and It's Heat Treatment*. 2nd edition. Butterworths London. 1984.

- [43] B Utomo. "Jenis Korosi dan Penanggulangannya." Jurnal Teknik Perkapalan Undip Vol. 6 No. 2. Jun 2009. DOI: <https://doi.org/10.14710/kpl.v6i2.2731>.
- [44] W.B Utomo, B Hasan. "Penentuan Laju Korosi Baja Kontruksi Menggunakan Metode Tafel Analisis." Prosiding 6th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Masyarakat. 2022.
- [45] A.L Yáñez, E Narváez, A Salinas, E Bonifaz. "*Annealing and Normalizing of AISI 1045 Steel: A Lamellae Analysis.*" Int Journal of Metallurgy Met Phys, 5(2). May 2020. DOI: 10.35840/2631-5076/9253.
- [46] C Zheng, Y Wangwei. "*Effect of low-temperature on mechanical behavior for an AISI 304 austenitic stainless steel.*" Materials Science and Engineering A 710. National Safety Engineering Technology Research Center for Pressure Vessels and Pipelines. Nov 2017. DOI: 10.1016/j.msea.2017.11.003.
- [47] *Pressure Gauge system*, <https://omika.in/products/pressure-gauge/>. Diakses pada 15 Februari 2025 pukul 10.44.
- [48] *Diaphragm Pressure Gauge* <https://blog.wika.com/en/knowhow/advantages-of-diaphragm-pressure-gauges-2-solution-for-critical-media/>. Diakses pada 15 Februari 2025 pukul 14.32.
- [49] Aziz A. *Inspection Certificate Raw Material SUS304-UFCSS (0.10t)- 0,5 um*. Tokushu Kinzoku Excel CO., LTD. no.0184490212.

LAMPIRAN A
CONTOH PERHITUNGAN

Lampiran A. Contoh Perhitungan

1. Perhitungan Nilai Kekerasan

Contoh Perhitungan kekerasan *stainless steel 304 thin foil* setelah tempering, pengujian kekerasan dilakukan dengan tiga indentasi kemudian dirata-ratakan:

$$HVN = \frac{\text{Indentasi}_1 + \text{Indentasi}_2 + \text{Indentasi}_3}{3}$$

$$HVN = \frac{341,57 + 363,26 + 315,56}{3}$$

$$HVN = 340,13$$

2. Perhitungan Nilai Kekerasan metode *rule of mixtures*

Contoh: T250 – H 60 persen martensit 55% dan austenit 45%

Diketahui kekerasan murni martensit 500 HV, austenit 200 HV

$$HV_{\text{total}} = (f_m \times HV_m) + (f_a \times HV_a)$$

$$HV_{\text{total}} = \left(\frac{55}{100} \times 500\right) + \left(\frac{45}{100} \times 200\right) = 275 + 90 = 365 \text{ HV}$$

3. Perhitungan Nilai Laju Korosi

Diketahui:

a. Luas Permukaan Sampel (A)

$$\text{Panjang} = 5 \text{ cm}$$

$$\text{Lebar} = 0,5 \text{ cm}$$

$$\text{Tebal} = 0,01 \text{ cm}$$

Hasil perhitungan luas Permukaan sampel ada pada persamaan 4.2

b. Selisih Berat Awal dan Akhir

Menggunakan persamaan 4.1

$$= 0,2521 - 0,2519 \text{ (gram)}$$

$$= 0,0002 \text{ gram}$$

c. Nilai Laju Korosi

Menggunakan persamaan 2.2

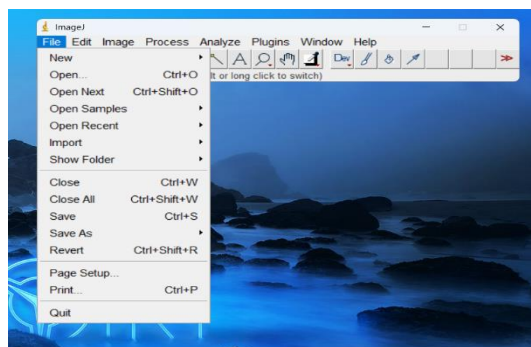
$$= \frac{8,76 \times 10^4 \times 0,0002}{8 \times 5,11 \times 720}$$

$$= 0,00059 \text{ mm/year} = 0,0006 \text{ mm/year}$$

4. Perhitungan % Fraksi Fasa

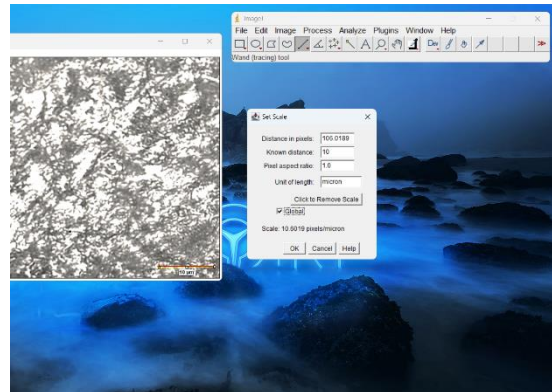
Analisis persen fraksi fasa struktur mikro hasil tempering dilakukan menggunakan software ImageJ dengan fitur threshold. Dimana pada fitur ini bisa membedakan daerah berwarna gelap dan terang pada struktur mikro menjadi warna hitam dan putih. Berikut adalah contoh perhitungannya:

1. Pilih gambar struktur mikro yang akan dianalisis dengan cara klik **File** kemudian open atau bisa dengan *command* **Ctrl + O**



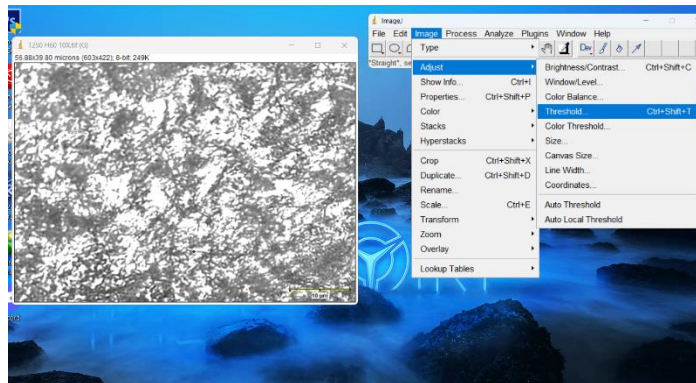
Gambar A.1 Memilih Gambar Struktur Mikro

2. Kemudian kalibrasi gambar dengan cara klik ikon ***Straight*** lalu membuat garis lurus pada skala, selanjutnya klik tools ***Analyze*** dan klik ***Set Scale***



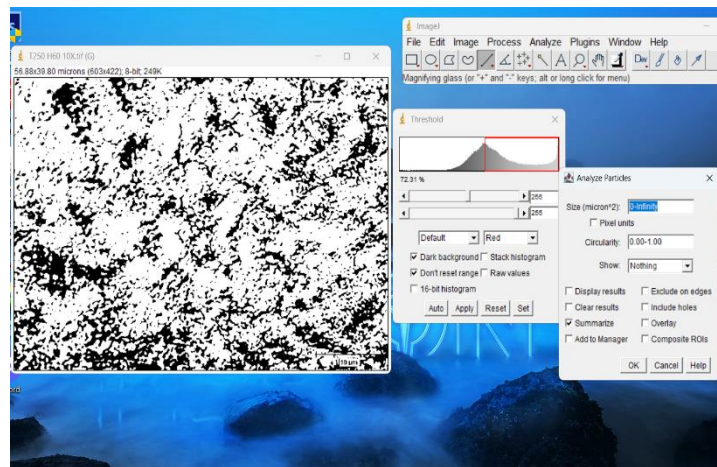
Gambar A.2 Kalibrasi Gambar

3. Selanjutnya masuk pada menu ***tools Image*** dan pilih ***Adjust*** kemudian klik ***Threshold***, lalu atur area fasa gelap dan terang.



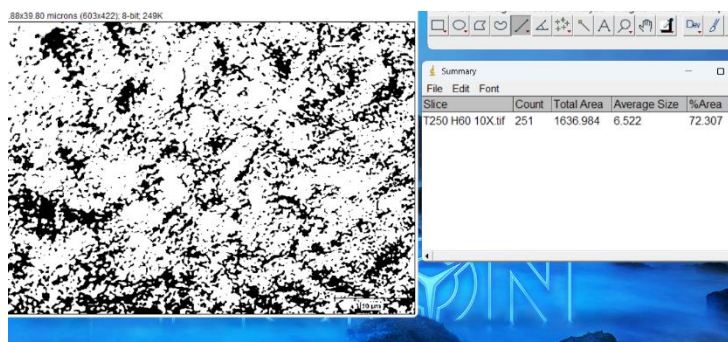
Gambar A.3 Menentukan Warna Ambang Batas

4. Lalu langkah selanjutnya masuk pada ***tools Analyze***, kemudian klik ***Analyze Particle*** dan centang kolom ***summarize***



Gambar A.4 Menentukan *Limit to Threshold*

5. Selanjutnya, kembali masuk pada menu **Analyze** kemudian klik **Measure** dan hasilnya akan muncul otomatis



Gambar A.5 Hasil Persen Fraksi Fasa Struktur Mikro

LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN

Lampiran B. Data Penelitian

1. Data Penelitian Hasil Uji Kekerasan ada pada Tabel 4.1
2. Data Penelitian Hasil Uji Laju Korosi ada pada Tabel 4.2
3. Data Perhitungan Persen Fraksi Fasa Struktur Mikro

Tabel B.1 Perhitungan % Area Fraksi Fasa

Temperatur Tempering (°C)	Holding Time (menit)	% Area	
		Martensit	Austenit
250	60	55	45
	90	47	53
	120	40	60
400	60	45	55
	90	35	65
	120	30	70
550	60	24	76
	90	16	84
	120	17	83



(a) 55% Martensit, 45% Austenit

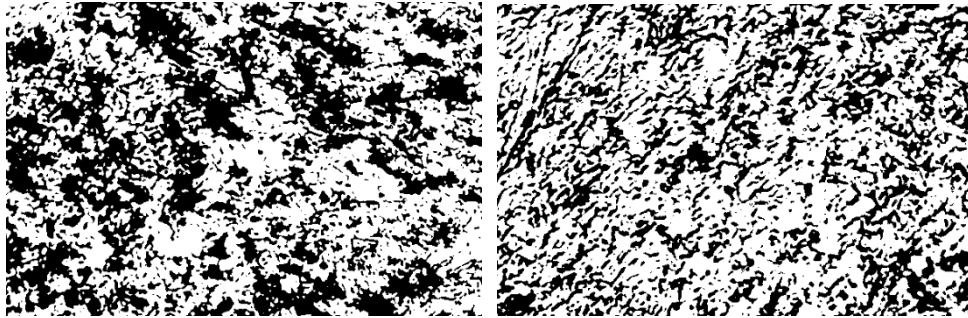


(b) 47% Martensit, 53% Austenit



(c) 40% Martensit, 60% Austenit

Gambar B.1 Hasil *ImageJ* T 250 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120



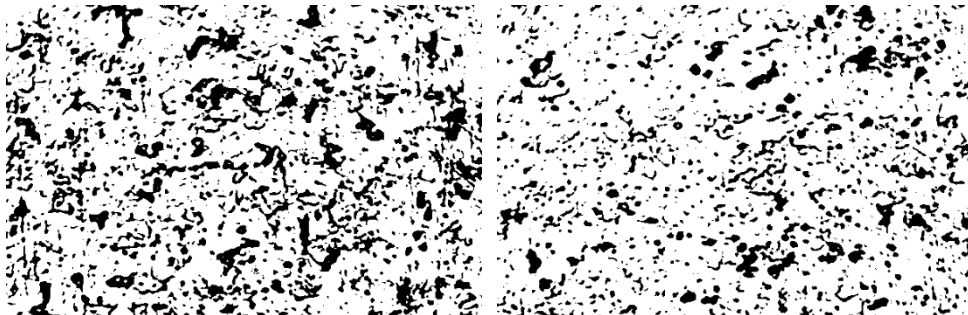
(a) 45% martensit, 55% Austenit

(b) 35% Martensit, 65% Austenit



(c) 30% Martensit, 70% Austenit

Gambar B.2 Hasil *ImageJ* T 400 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120



(a) 24% Martesit, 76% Austenit

(b) 16% Martensit, 84% Austenit



(c) 17% Martensit, 83% Austenit

Gambar B.3 Hasil *ImageJ* T 550 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan



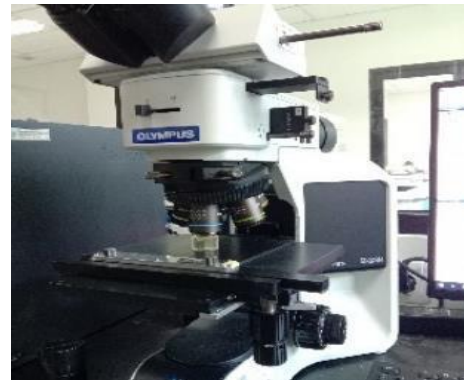
Gambar C.1 Mesin *Grinding* dan *Polishing*



Gambar C.2 *Furnace Germany*



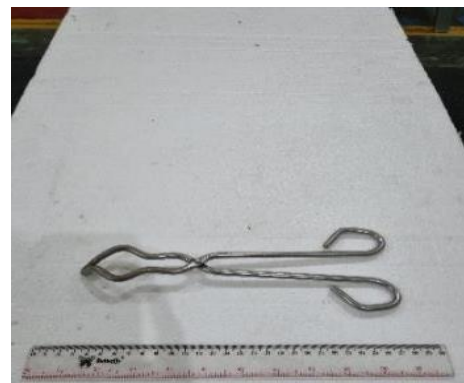
Gambar C.3 *Micro Vickers Hardness*



Gambar C.4 Mikroskop Optik



Gambar C.5 *Crucible*



Gambar C.6 Tang Penjepit



Gambar C.7 Wadah Media Pendingin



Gambar C.8 *Helm Safety*



Gambar C.9 Sarung Tangan



Gambar C.10 Pipet Tetes



Gambar C.11 *Aquades*



Gambar. C 12 Larutan H_2SO_4



Gambar C.13 Ampelas



Gambar C.14 Apron