



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR-TM184835

PENGARUH STRUKTUR MIKRO BAJA SA 210 GRADE A1 TERHADAP PENYERAPAN HIDROGEN MENGUNAKAN METODE *CYCLIC VOLTAMMETRY*

Fariza Julio Residena
NRP 02111640000151

Dosen Pembimbing
Suwarno, S.T., M.Sc., PhD.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
SURABAYA 2021

Halaman ini sengaja dikosongkan



TUGAS AKHIR-TM184835

**PENGARUH STRUKTUR MIKRO BAJA SA 210 GRADE
A1 TERHADAP PENYERAPAN HIDROGEN
MENGUNAKAN METODE *CYLIC VOLTAMMETRY***

Fariza Julio Residena
02111640000151

Dosen Pembimbing:
Suwarno, S.T., M.Sc., PhD.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA - 2021

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT-TM184835

**THE EFFECT OF MICROSTRUCTURES OF SA 210
GRADE A1 STEEL ON HYDROGEN ABSORPTION USING
CYCLIC VOLTAMMETRY METHOD**

Fariza Julio Residena
0211164000151

Advisor:
Suwarno, S.T., M.Sc., PhD.

DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM
ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA - 2021

This page is intentionally left blank

**PENGARUH STRUKTUR MIKRO BAJA SA 210
GRADE A1 TERHADAP PENYERAPAN HIDROGEN
MENGUNAKAN METODE *CYLIC VOLTAMMETRY***

TUGAS AKHIR

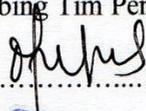
Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa
Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

Fariza Julio Residena

NRP 02111640000151

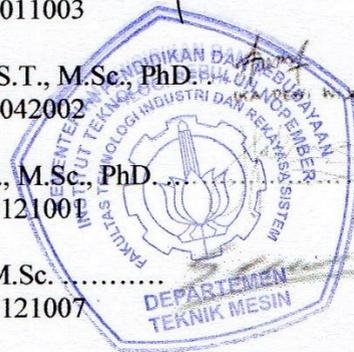
Disetujui Oleh Pembimbing Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Suwarno, S.T., M.Sc., PhD.  (Pembimbing)
NIP. 198005202005011003

2. Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc., PhD.  (Penguji 1)
NIP. 198512022014042002

4. Fahmi Mubarak, S.T., M.Sc., PhD.  (Penguji 2)
NIP. 196709151995121001

3. Putu Suwarta, S.T., M.Sc.  (Penguji 3)
NIP. 198203032009121007



**SURABAYA
MARET 2021**

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENGARUH STRUKTUR MIKRO BAJA SA 210 GRADE A1 TERHADAP PENYERAPAN HIDROGEN MENGUNAKAN METODE *CYCLIC VOLTAMMETRY*

Nama Mahasiswa : Fariza Julio Residena
NRP : 02111640000151
Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Suwarno, S.T., M.Sc., PhD.

ABSTRAK

Pipa baja karbon yang digunakan untuk mensirkulasi fluida air pada *boiler* yang kemudian dipanaskan menjadi uap panas sering kali mengalami kerusakan. Mekanisme kerusakan yang paling sering terjadi diakibatkan oleh *hydrogen damage*. Kerusakan akibat *hydrogen damage* dapat disebabkan oleh beberapa faktor, salah satu contohnya adalah penyerapan hidrogen kedalam struktur mikro baja karbon dan menyebabkan penggetasan hidrogen. Kerusakan ini dapat mengakibatkan kerugian yang sangat besar karena membuat sistem harus *shutdown*. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh struktur mikro material baja terhadap penyerapan hidrogen.

Tahap penelitian dilakukan dengan beberapa langkah yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh struktur mikro baja SA 210 grade A1 terhadap penyerapan hidrogen dan mengetahui perubahan struktur mikro baja SA 210 grade A1 akibat penyerapan hidrogen. Tahap awal adalah penyiapan spesimen menjadi tiga variasi struktur mikro. Kemudian dilakukan pengujian untuk mengetahui perubahan yang didapat sebelum dan setelah uji penyerapan hidrogen. Pengujian metalografi dilakukan untuk melihat struktur mikro awal dan perubahannya setelah dilakukan uji penyerapan hidrogen; pengujian kekerasan untuk mengetahui perubahan nilai kekerasan spesimen sebelum dan setelah uji penyerapan hidrogen; pengujian *SEM-EDS* hanya dilakukan

setelah uji penyerapan hidrogen untuk melihat lapisan oksida dan unsur yang terkandung pada spesimen.

Dalam penelitian ini yang ditujukan untuk mengetahui pengaruh struktur mikro baja SA 210 grade A1, yang digunakan sebagai pipa baja pada *waterwall tube*, terhadap penyerapan hidrogen dan pengaruh pengujian *Electrochemical Hydrogenation Test* terhadap sifat mekaniknya. Pada penelitian ini didapatkan beberapa kesimpulan yaitu struktur mikro dan perlakuan terhadap spesimen dapat mempengaruhi penyerapan hidrogen, dibuktikan dengan grafik *CV before-after H-absorption* pada setiap variasi spesimen uji dan spesimen kode N-2 dengan variasi perlakuan *normalizing* memiliki kemampuan absorpsi konsentrasi hidrogen yang paling tinggi, dibandingkan dengan spesimen kode BM-2 dan Q-2. Hal ini berarti spesimen kode Q-2 dengan variasi perlakuan *quenching* memiliki ketahanan yang paling tinggi terhadap *hydrogen damage*.

Kata kunci: struktur mikro, penyerapan hidrogen, *electrochemical hydrogenation test*, *cyclic voltammetry*, baja SA 210 grade A1

**THE EFFECT OF MICROSTRUCTURES OF SA 210 GRADE
A1 STEEL ON HYDROGEN ABSORPTION USING CYCLIC
VOLTAMMETRY METHOD**

Name : Fariza Julio Residena
NRP : 02111640000151
Department : Mechanical Engineering FT-IRS ITS
Advisor : Suwarno, S.T., M.Sc., PhD.

ABSTRACT

The carbon steel pipe used to circulate air-fluid at a boiler which is then heated into hot steam is often damaged. The worst damage was caused by hydrogen damage. Damage due to hydrogen damage can be caused by several factors, one of the causes is the absorption of hydrogen in the microstructure of carbon steel and causes hydrogen embrittlement. This damage can result in huge losses because it makes the system have to shut down. Therefore, it is necessary to do research on the effect of the microstructure of steel materials on hydrogen absorption.

The research phase was carried out with several steps aimed at seeing the effect of the microstructure of SA 210 grade A1 Steel on hydrogen absorption and changes in the microstructure of SAE 210 grade A1 due to hydrogen. The initial stage is to prepare the specimen into three variations of the microstructure. Metallographic testing is done to see the initial microstructure used as a variation of the test; hardness testing to measure changes in hardness before and after the hydrogen absorption test; SEM-EDS testing is only carried out after the hydrogen absorption test to see the oxide layer and elements contained in the specimen.

In this study, this research aims to determine the effect of the microstructure of SA 210 grade A1 Steel, which is used as a steel pipe in the water-wall tube, on the absorption of hydrogen and the

effect of the Electrochemical Hydrogenation Test on its mechanical properties. Some conclusions were obtained that the microstructure and treatment of specimens could affect the absorption of hydrogen, as evidenced by the CV before-after H-absorption graph for each variation of the test specimens and N-2 code specimens with normalizing treatment variations had the highest absorption ability of hydrogen concentration, compared with specimens coded BM-2 and Q-2. This means that specimen coded Q-2 with a variety of quenching treatments have the highest resistance to hydrogen damage.

Key words: microstructure, hydrogen absorption, electrochemical hydrogenation test, cyclic voltammetry, SA 210 grade A1 steel

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala, yang telah melimpahkan rahmat-Nya dan hidayah-Nya, serta perjuangan nabi Muhammad Subhanahu Wa Ta'ala yang telah membawa umat dari zaman jahiliyah ke zaman yang terang benderang ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Dalam rangka mempersiapkan dan menyelesaikan pengerjaan tugas akhir ini penulis telah banyak memperoleh bantuan baik berupa bimbingan, informasi maupun fasilitas yang sangat membantu kelancaran penulisan ini. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih yang sedalam-dalamnya kepada **diri sendiri** yang tetap berjuang dan tidak menyerah dalam keadaan sulit selama berkuliah, bertanggung jawab dalam organisasi, dan pengerjaan tugas akhir. Rasa terimakasih juga penulis sampaikan kepada berbagai pihak yang telah memberikan bantuan serta dorongan selama penulisan, khususnya kepada:

1. **Orang tua penulis**, Bapak Sudianto dan Ibu Yuni Kurnia yang tidak pernah lelah dalam membimbing, membekali, dan mendoakan penulis.
2. **Kakak dan adik penulis**, mas Adya dan dek Anggito yang telah membantu dengan memberikan canda dan tawa kedalam hidup penulis.
3. **Dosen pembimbing**, Bapak Suwarno, S.T., M.Sc., PhD., yang telah memberikan ilmu, nasihat, dan petunjuk kepada penulis selama pengerjaan tugas akhir.
4. **Dosen penguji**, Ibu Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc., PhD., Bapak Fahmi Mubarak, S.T., M.Sc., PhD., dan Bapak Putu Suwarta, S.T., M.Sc., yang telah memberikan nasihat, kritik, dan saran pada seminar proposal dan sidang tugas akhir penulis.
5. **Dosen wali**, Prof. Dr. Ir. Sutardi, M.Eng., yang telah membantu penulis dengan memberikan tips, nasihat, dan

- bimbingan untuk menghadapi perkuliahan.
6. **Partner tugas akhir dan punggawa Laboratorium Metalurgi**, Furqon Nugroho, Arnaldo Natanael, Nehemia Tegar, dan teman-teman laboratorium metalurgi lainnya yang telah saling membantu dan berkeluh kesah bersama saat pengerjaan tugas akhir.
 7. **Sahabat penulis**, Yusuf Bachtiar, Davian Ramadhan, Andhika Rizki, Daffa Fuad, dan Afli Ghazian, yang telah sangat membantu penulis dalam perkuliahan dan pengerjaan tugas akhir.
 8. **Angkatan M59** yang telah berjuang, berkeluh kesah, berbagi cerita bersama selama perkuliahan di Teknik Mesin ITS.
 9. **Rotor M59**, Furqon Nugroho, Hansel Arden Neil, Burhannudin, Lanang Wahyu, Afli Ghazian, Samuel Barus, dan Reza Buana, yang telah berkerlingat bersama selama 70 hari dalam kegiatan POROS 2016.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Mesin khususnya, dan civitas akademika ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa lain.

Surabaya, 9 Maret 2021



Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	IX
ABSTRACT	XI
KATA PENGANTAR	XIII
DAFTAR ISI	XV
DAFTAR GAMBAR	XVIII
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Baja	8
2.2.1 Baja SA 210 Grade A1	9
2.3 Perlakuan Panas	9
2.3.1 Diagram Fase Fe-Fe₃C	10
2.3.2 Normalizing	12
2.3.2.1 Transformasi Perlit	13
2.3.3 Quenching	14
2.3.3.1 Transformasi Martensit	15
2.4 Korosi	16
2.4.1 Polarisasi	18
2.4.2 Penyerapan Hidrogen	18
2.4.3 Hydrogen Damage	19
2.4.3.1 Penggetasan Hidrogen	20
2.5 Electrochemical Hydrogenation Test	22
2.5.1 Cyclic Voltammetry	23
BAB III	27
METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Flowchart Penelitian	27
3.2 Spesifikasi Material dan Spesimen Uji	29

3.2.1	Material Uji.....	29
3.2.2	Spesimen Uji	30
3.3	Peralatan Penelitian	31
3.3.1	Kamera.....	31
3.3.2	Penggaris dan Jangka Sorong	31
3.3.3	Mesin Pemotong Material.....	31
3.3.4	Mesin <i>Furnace</i>	31
3.3.5	Mesin <i>Grinding</i> dan <i>Polishing</i>	32
3.3.6	Perangkat <i>Etching</i>	33
3.3.7	Mikroskop	33
3.3.8	Mesin <i>Scanning Electron Microscope</i>	34
3.3.9	Mesin <i>Micro Vickers Hardness</i>	34
3.3.10	Peralatan <i>Electrochemical Hydrogenation</i>	
	<i>Test</i>	34
3.3.10.1	Charging Cell.....	34
3.3.10.2	Potensiostat	35
3.3.10.3	Heater	36
3.4	Langkah-langkah Penelitian	37
3.4.1	Perumusan Masalah dan Tujuan.....	37
3.4.2	Persiapan Spesimen Uji	37
3.4.3	Pengujian <i>Spectrometer</i>	38
3.4.4	<i>Heat Treatment</i>	38
3.4.4.1	Normalizing.....	39
3.4.4.2	Quenching	39
3.4.5	Pengujian Metalografi.....	39
3.4.6	Pengujian <i>Hardness</i> Sebelum <i>Electrochemical</i>	
	<i>Hydrogenation Test</i>	40
3.4.7	Prosedur <i>Electrochemical Hydrogenation Test</i>	40
3.4.8	Pengujian <i>Hardness</i> Setelah <i>Electrochemical</i>	
	<i>Hydrogen Test</i>	45
3.4.9	Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy – Energy</i>	
	<i>Dispersive X-ray Spectroscopy</i>	45
3.5	Jadwal Kegiatan	46
BAB IV	.....	47
PEMBAHASAN DATA	.....	47

4.1	Hasil Pengujian <i>Electrochemical Hydrogen Permeation Test</i> Pada Sel Devanathan-Stachurski	47
4.2	Hasil Pengujian Spesimen <i>Base Material</i>	48
4.3	Hasil Pengujian Spesimen Variasi Perlakuan <i>Normalizing</i>	60
4.4	Hasil Pengujian Spesimen Variasi Perlakuan <i>Quenching</i>	70
4.5	Pembahasan Perbandingan Hasil Uji Setiap Variasi Spesimen	81
4.5.1	Pembahasan Uji Metalografi.....	81
4.5.2	Pembahasan <i>Electrochemical Hydrogenation Test</i>	84
4.5.3	Pembahasan Uji <i>Micro Vickers Hardness</i>	89
BAB V	.....	93
KESIMPULAN DAN SARAN	.....	93
5.1	Kesimpulan.....	93
5.2	Saran	93
DAFTAR PUSTAKA	.....	95
LAMPIRAN	.....	97
BIODATA PENULIS	.....	106

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Grafik <i>Damage Mechanism Boiler</i> dari Tahun 2011-2019 [1].....	1
Gambar 1. 2 Contoh Kerusakan Akibat Hydrogen Damage [9]	2
Gambar 1. 3 Pipa Baja pada Waterwall Tube sebagai Material Uji.....	3
Gambar 2. 1 Reaksi Katodik Menghasilkan Hidrogen Adsorpsi pada Permukaan Katodik [2]	5
Gambar 2. 2 Grafik Kurva Permeasi pada Variasi Material [2]	7
Gambar 2. 3 Hasil Pengujian Cyclic Voltammetry (a) Before H-Charging (b) After H-Charging [3]	8
Gambar 2. 4 Diagram Fasa Fe-Fe₃C [6]	11
Gambar 2. 5 Interval Temperatur Normalizing pada Baja Karbon [7].....	12
Gambar 2. 6 Sketsa Perbedaan Perlit Hasil Anil dan Normalisasi [5].....	13
Gambar 2. 7 Struktur Mikro Perlit [8]	14
Gambar 2. 8 Struktur Mikro Martensit [6]	16
Gambar 2. 9 Mekanisme Penyerapan Hidrogen [11].....	19
Gambar 2. 10 Kerusakan Hydrogen Blistering [10]	20
Gambar 2. 11 Skema Retakan Penggetasan Hidrogen [10]..	22
Gambar 2. 12 Kurva Voltammogram	23
Gambar 2. 13 Contoh Pengujian Cyclic Voltammetry dengan H-Charging [3].....	24
Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian	28
Gambar 3. 2 Material Uji Pipa Baja SA 210 A1.....	29
Gambar 3. 3 Spesimen Uji Baja SA 210 Grade A1	30
Gambar 3. 4 Mesin Nabertherm	32
Gambar 3. 5 Mesin Metkon Gripo 300-1V Grinder & Polisher	33
Gambar 3. 6 Mesin Olympus Stereo Microscope	34
Gambar 3. 7 Charging Cell	35

Gambar 3. 8 Potensiostat.....	36
Gambar 3. 9 Heater.....	37
Gambar 3. 10 Skema Susunan Peralatan Uji Electrochemical Hydrogenation Test.....	41
Gambar 3. 11 Pemasangan Spesimen Uji.....	42
Gambar 3. 12 Program Nova 2.1.4 Untuk Cyclic Voltammetry	43
Gambar 3. 13 Program Nova 2.1.4 Untuk <i>Hydrogen Charging</i>	44
Gambar 4. 1 Grafik Pengujian <i>Electrochemical Hydrogen Permeation Test</i> pada Sel Devanathan-Stachurski	48
Gambar 4. 2 Foto Makro Spesimen kode BM	49
Gambar 4. 3 Foto Makro Spesimen BM-2 (a) Sebelum Pengujian <i>EHT</i> (b) Setelah Pengujian <i>EHT</i>	50
Gambar 4. 4 Struktur Mikro Spesimen kode BM (a) Perbesaran 100x (b) Perbesaran 200x (c) Perbesaran 500x ..	52
Gambar 4. 5 Grafik <i>Cyclic Voltammetry Before-After H-absorption</i> Spesimen kode BM.....	53
Gambar 4. 6 Hasil Pengujian Spesimen kode BM-2 (a) <i>Scanning Electron Microscopy</i> (b) <i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i>	56
Gambar 4. 7 Titik Uji Hardness (a) Spesimen kode BM-1 (b) Spesimen kode BM-2.....	57
Gambar 4. 8 Perbandingan Nilai Kekerasan HV Spesimen kode BM-1 dan BM-2.....	59
Gambar 4. 9 Foto Makro Spesimen kode N.....	60
Gambar 4. 10 Foto Makro Spesimen kode N-2 (a) Sebelum Pengujian <i>EHT</i> (b) Setelah Pengujian <i>EHT</i>	61
Gambar 4. 11 Struktur Mikro Spesimen kode N (a) Perbesaran 200x (b) Perbesaran 500x (c) Perbesaran 1000x	63
Gambar 4. 12 Grafik <i>Cyclic Voltammetry Before-After H-absorption</i> Spesimen kode N	64
Gambar 4. 13 Hasil Pengujian Spesimen kode N-2 (a) <i>Scanning Electron Microscopy</i> (b) <i>Electron Dispersive X-ray Spectroscopy</i>	67

Gambar 4. 14 Titik Uji Hardness (a) Spesimen kode N-1 (b) Spesimen kode N-2	68
Gambar 4. 15 Perbandingan Nilai Kekerasan HV Spesimen kode N-1 dan N-2.....	69
Gambar 4. 16 Foto Makro Spesimen kode Q.....	71
Gambar 4. 17 Foto Makro Spesimen kode Q-2 (a) Sebelum Pengujian <i>EHT</i> (b) Setelah Pengujian <i>EHT</i>.....	72
Gambar 4. 18 Struktur Mikro Spesimen kode Q (a) Perbesaran 200x (b) Perbesaran 500x (c) Perbesaran 1000x	74
Gambar 4. 19 Grafik <i>Cyclic Voltammetry Before-After H-absorption</i> Spesimen kode Q.....	75
Gambar 4. 20 Hasil Pengujian Spesimen kode Q-2 (a) <i>Scanning Electron Microscopy</i> (b) <i>Electron Dispersive X-ray Spectroscopy</i>	78
Gambar 4. 21 Titik Uji Hardness (a) Spesimen kode Q-1 (b) Spesimen kode Q-2	79
Gambar 4. 22 Perbandingan Nilai Kekerasan HV Spesimen kode Q-1 dan Q-2	80
Gambar 4. 23 Variasi Struktur Mikro Perbesaran 500x (a) Spesimen kode BM-1 (b) Spesimen kode N-1 (c) Spesimen kode Q-1	82
Gambar 4. 24 Grafik <i>Cyclic Voltammetry</i> Spesimen kode BM-2, N-2, dan Q-2 (a) <i>Before H-absorption</i> (b) <i>H-Charging</i> (c) <i>After H-absorption</i>	86

DAFTAR TABEL

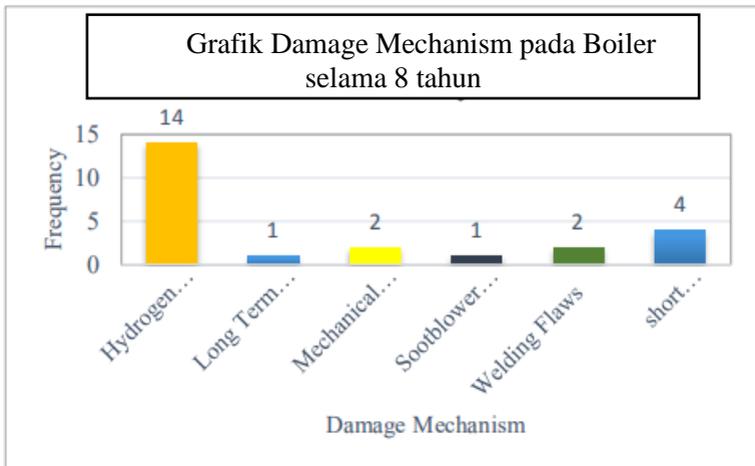
Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Baja SA 210 Grade A1.....	9
Tabel 3. 1 Komposisi Kimia Baja SA 210 Grade A1 Berdasarkan Hasil Uji Spektro	29
Tabel 3. 2 Dimensi Spesimen Uji.....	30
Tabel 3. 3 Tabel Pengujian	45
Tabel 4. 1 Nilai Kekerasan HV Spesimen kode BM-1 dan BM- 2	58
Tabel 4. 2 Nilai Kekerasan HV Spesimen kode N-1 dan N-2	69
Tabel 4. 3 Nilai Kekerasan HV Spesimen kode Q-1 dan Q-2	80
Tabel 4. 4 Nilai Kekerasan Setiap Variasi Spesimen	89

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

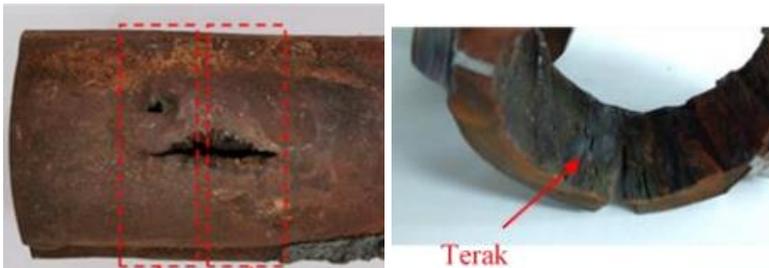
1.1 Latar Belakang

Pipa baja karbon adalah alat atau perangkat yang dirancang untuk mensirkulasi fluida uap panas/kering yang digunakan untuk menggerakkan turbin pada Generator. Dalam pengoperasiannya, sebuah pipa baja karbon yang mengalirkan fluida air akan dipanaskan oleh api dari pembakar pada kompor. Fluida air baja karbon mengandung unsur hidrogen yang dapat merusak material pipa baja karbon jika melalui proses dengan temperatur yang tinggi. Hal ini dapat memungkinkan pipa baja karbon akan mengalami penurunan kualitas sifat mekanik materialnya. Penurunan kualitas sifat mekanik material bisa diakibatkan oleh beberapa faktor seperti difusi hidrogen dan penggetasan hidrogen yang juga dipengaruhi oleh temperatur tinggi.



Gambar 1. 1 Grafik *Damage Mechanism* Boiler dari Tahun 2011-2019 [1]

Pada *boiler* yang telah beroperasi selama kurang lebih 8 tahun. Gambar 1.1 menunjukkan jenis mekanisme kerusakan pada pipa *boiler*-nya. Mekanisme kerusakan berupa *hydrogen damage* merupakan mekanisme kerusakan yang paling sering terjadi yaitu 14 kali dalam kurun waktu 8 tahun. Kegagalan pipa *boiler* dapat mengakibatkan kerugian yang besar, yaitu berupa kehilangan produksi dan biaya *maintenance* yang tinggi untuk melakukan *retubing*.



Gambar 1. 2 Contoh Kerusakan Akibat *Hydrogen Damage* [9]

Pada penelitian yang telah dilakukan saudara Rumahorbo, didapatkan kerusakan pada pipa yang diindikasikan sebagai *hydrogen damage*. Kerusakan pada pipa berbentuk *thick-edged* bagian dalam pipa terdapat terak hitam, seperti pada gambar 1.2. Hal ini terjadi karena adanya korosi pada dinding dalam pipa yang dialiri fluida. Pada penelitiannya, terdapat *microcrack* pada batas butir struktur mikro yang membuktikan bahwa kegagalan yang terjadi disebabkan oleh *hydrogen damage*.

Pada kasus ini fokus tertuju pada penelitian menganalisa pengaruh struktur mikro material baja yang digunakan pada *waterwall tube* terhadap penyerapan hidrogen. Pada gambar 1.3 adalah contoh dari pipa baja karbon yang digunakan pada *waterwall tube*, pada umumnya kerusakan yang terjadi pada pipa adalah penggetasan hidrogen yang disebabkan oleh difusi hidrogen. Tujuan dari analisa ini untuk mengetahui pengaruh struktur mikro material baja yang digunakan pada *waterwall*

tube terhadap penyerapan hidrogen, dengan pengujian *Electrochemical Hydrogen Test* pada material pipa baja karbon.



Gambar 1. 3 Pipa Baja pada *Waterwall Tube* sebagai Material Uji

1.2 Perumusan Masalah

Adapun permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh struktur mikro baja SA 210 Grade A1 terhadap penyerapan hidrogen dengan pengujian *Electrochemical Hydrogenation Test*?
2. Bagaimana pengaruh pengujian *Electrochemical Hydrogenation Test* terhadap sifat mekanik baja SA 210 Grade A1?

1.3 Batasan Masalah

Untuk dapat menyelesaikan permasalahan yang muncul dalam penelitian ini dan mencapai tujuan yang diinginkan, maka diperlukan batasan masalah dalam penelitian ini, antara lain:

1. Sel Devanathan-Stachurski sudah memenuhi standar kebutuhan eksperimen.
2. Temperatur pemanasan pada proses *heat treatment* diasumsikan homogen di seluruh bagian tungku.
3. Komposisi kimia pada semua spesimen dianggap sama.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai Berikut:

1. Mengetahui pengaruh struktur mikro baja SA 210 Grade A1 terhadap penyerapan hidrogen dengan pengujian *Electrochemical Hydrogenation Test*.
2. Mengetahui pengaruh pengujian *Electrochemical Hydrogenation Test* terhadap sifat mekanik baja SA 210 Grade A1?

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik untuk berbagai kalangan. Adapun manfaat yang bisa diberikan yaitu sebagai berikut:

1. Meningkatkan pengetahuan mengenai pengaruh mikrostruktur terhadap *hydrogen damage*.
2. Memberikan pengetahuan dalam memilih logam yang akan digunakan pada lingkungan yang mengandung hidrogen
3. Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi peneliti.

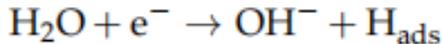
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Adapun penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi pada tugas akhir ini ialah:

- **Eeckhout et al (2018)** melakukan penelitian mengenai efek dari karakteristik struktur mikro pada permeasi hidrogen di paduan martensitik yang mengalami *quenching* dan *tempering*. Penelitian ini berfokus untuk mengevaluasi karakteristik kurva permeasi pada pengujian yang dilakukan pada empat variasi sampel uji, yang mengandung tiga paduan, dengan masing-masing memiliki karbida yang spesifik. Sampel uji yang digunakan memiliki masing-masing karbida berupa W_2C , $Cr_{23}C_6$, TiC , dan V_4C_3 , yang kemudian akan diberikan perlakuan panas *quench* dan *tempering*. Sampel uji kemudian diobservasi difusitas dan permeasi hidrogennya. Kurva permeasi didapatkan dengan metode pengujian Devanathan-Stachurski, yang kemudian dibandingkan dengan *thermal desorption spectroscopy* dan hasil ekstraksi panasnya.

Pada penelitiannya, empat sampel uji diberi perlakuan panas untuk mendapatkan fasa Fe-C-W, Fe-C-Cr, Fe-C-Ti, dan Fe-C-V, yang kemudian dilakukan pengujian permeasi dengan menggunakan sel Devanathan-Stachurski pada temperatur $25^\circ C$. Pada kedua sel, elektrolit yang digunakan adalah 0,1M NaOH yang juga diberikan nitrogen untuk meminimalisir oksigen yang terlarut. Pada sisi masuk, sel katodik dari sampel uji, diberikan arus katodik yang konstan sebesar 3 mA/cm^2 .



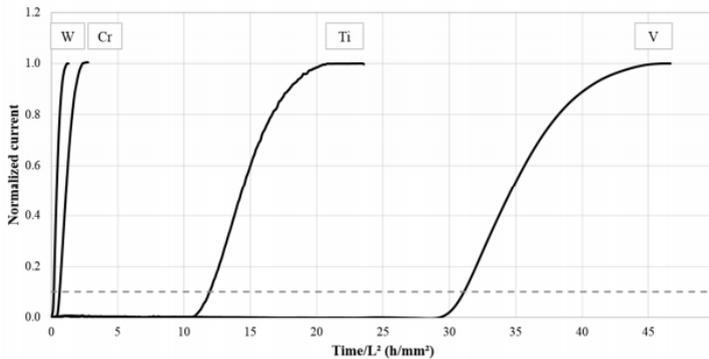
Gambar 2. 1 Reaksi Katodik Menghasilkan Hidrogen Adsorpsi pada Permukaan Katodik [2]

Hidrogen yang terabsorpsi kemudian terdifusi melewati sampel uji ke sel anodik. Pada sel anodik, hidrogen akan teroksidasi yang menghasilkan arus yang kemudian terbaca oleh potensiostat Versastat 3F. Untuk melengkapi reaksi oksidasi, sampel uji diberikan potensial sebesar -500 mV agar sampel terpolarisasi anodik. Untuk menentukan koefisien difusi pada material, digunakan rumus pada gambar 2.5

$$D_{app} = \frac{L^2}{7.7t} [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \dots\dots\dots(2.1)$$

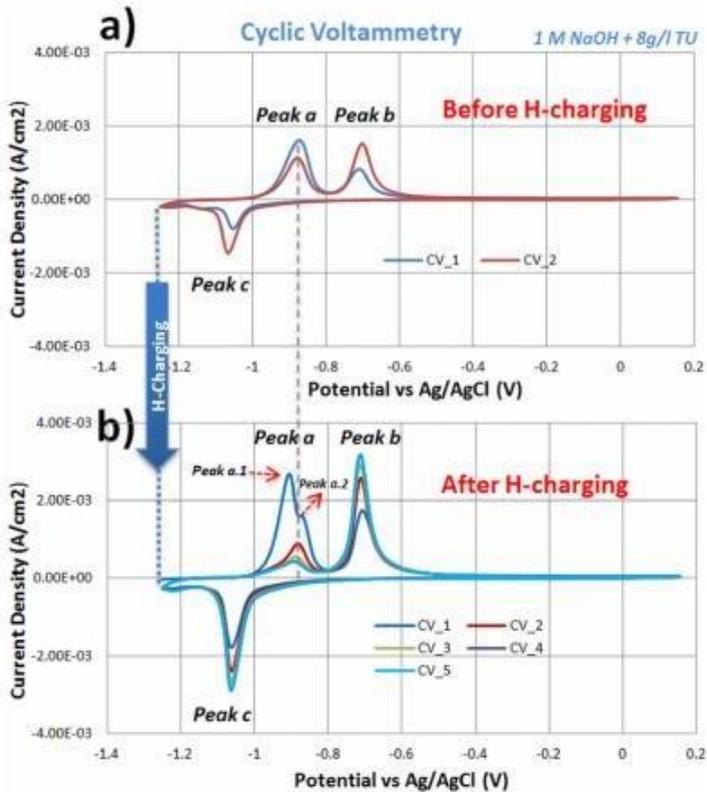
Dimana D_{app} adalah koefisien difusi, t adalah waktu saat arus yang terhitung sudah mencapai kondisi ekuilibriumnya pada grafik kurva permeasi, dan L adalah ketebalan spesimen.

Penelitian ini menghasilkan urutan difusi hidrogen dengan urutan Fe-C-W, Fe-C-Cr, Fe-C-Ti, dan yang terakhir Fe-C-V. Penundaan kenaikan kurva permeasi disebabkan oleh tingginya nilai kemampuan *trapping* pada material. Pada gambar 2.6 menunjukkan bahwa material dengan paduan tungsten memiliki nilai kemampuan *trapping* yang lebih rendah dibandingkan dengan material lainnya, dan material paduan vanadium memiliki nilai kemampuan *trapping* yang paling tinggi.



Gambar 2. 2 Grafik Kurva Permeasi pada Variasi Material [2]

- **Ozdirik et al (2017)** melakukan penelitian yang berjudul “*Development of an Electrochemical Procedure for Monitoring Hydrogen Sorption/Desorption in Steel*” yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh-pengaruh yang dihasilkan dari pengujian *cyclic voltametric* dengan berbagai metode yang dilakukan. Penelitian dilakukan beberapa cara seperti menambahkan thiourea ke dalam larutan 1 M NaOH, waktu eksperimen, dan *hot extraction* hidrogen. Penelitian ini menyimpulkan bahwa adanya pengaruh dari penambahan thiourea dan waktu eksperimen. Dengan begitu, didapatkan prosedur paling baik dalam melakukan eksperimen menggunakan metode *cyclic voltametric*.



Gambar 2. 3 Hasil Pengujian Cyclic Voltammetry (a) Before H-Charging (b) After H-Charging [3]

2.2 Baja

Baja adalah logam paduan, dimana besi sebagai unsur utama dan karbon sebagai unsur paduan utama yang beratnya tidak lebih dari 2%. Selain karbon, unsur paduan lain yang umum ditambahkan adalah mangan, kromium, dan silikon dengan tujuan untuk memperbaiki sifat mekanik baja. Kombinasi antara karbon dan unsur paduan tersebut mampu menghasilkan berbagai jenis kualitas baja. Berdasarkan komposisi kimianya, baja dapat diklasifikasikan menjadi baja karbon dan baja paduan. [4]

2.2.1 Baja SA 210 Grade A1

Baja karbon merupakan baja dengan unsur paduan utama karbon, dimana jumlah unsur paduan lain terlalu kecil untuk mempengaruhi sifatnya. Salah satu contoh baja karbon adalah baja SA 210 Grade A1. Material baja karbon SA 210 Grade A1 adalah baja karbon yang biasa digunakan untuk tube. Nilai kekerasan maksimum menurut standar sebesar 143 HB. Komposisi standar baja karbon SA 210 Grade A1 didefinisikan menurut tabel dibawah.

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Baja SA 210 Grade A1

Unsur	Komposisi
<i>Carbon</i>	0,27 % max
<i>Manganese</i>	0,93 % max
<i>Phosporus</i>	0,035 % max
<i>Sulfur</i>	0,035 % max
<i>Silicon</i>	0,1 % min

Dengan nilai komposisi maksimum karbon 0,27%, material baja karbon SA 210 Grade A1 bisa dikategorikan sebagai baja karbon rendah (*low carbon steel*). Fasa-fasa yang terbentuk dapat ditunjukkan melalui diagram Fe-Fe₃C. Fasa-fasa yang terbentuk pada baja karbon dengan kadar karbon antara 0,2-0,27% pada temperatur kamar adalah perlit dan ferit.

2.3 Perlakuan Panas

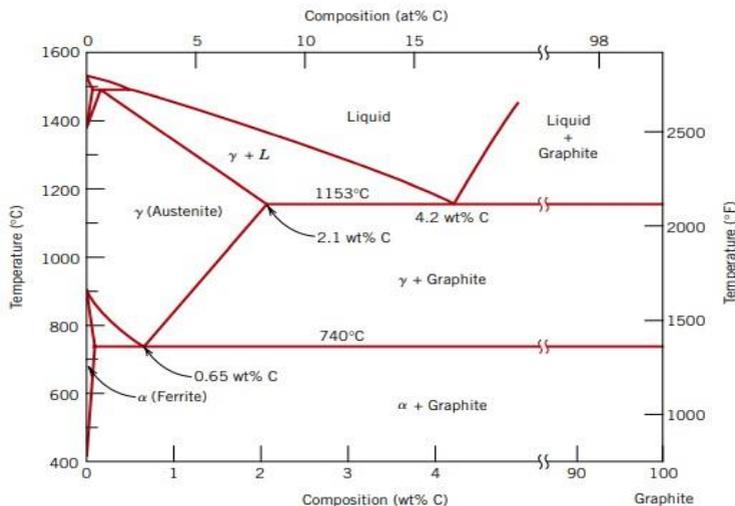
Perlakuan panas atau *heat treatment* dapat didefinisikan sebagai kombinasi operasi pemanasan dan pendinginan terhadap logam atau paduan dalam keadaan padat dengan waktu tertentu,

dimaksudkan untuk memperoleh sifat tertentu. Langkah pertama dalam setiap proses laku panas adalah memanaskan logam atau paduan sampai ke suatu temperatur tertentu, lalu menahan beberapa saat pada temperatur tersebut, kemudian mendinginkannya dengan laju pendinginan tertentu. Selama pemanasan dan pendinginan ini akan terjadi beberapa perubahan struktur mikro, dapat berupa perubahan fase dan/atau bentuk atau ukuran butir kristalnya, dan perubahan struktur mikro ini akan menyebabkan perubahan sifat dari logam atau paduan tersebut.

Struktur mikro yang terjadi pada akhir suatu proses laku panas, selain ditentukan oleh komposisi kimia dari logam atau paduan dan proses laku panas yang dialami, juga ditentukan oleh struktur atau kondisi awal benda kerja. Paduan dengan komposisi kimia yang sama, mengalami proses laku panas yang sama, mungkin menghasilkan struktur mikro dan sifat yang berbeda bila kondisi awalnya berbeda. Struktur atau kondisi awal ini banyak ditentukan oleh pengerjaan dan/atau laku panas yang dialami. [5]

2.3.1 Diagram Fase Fe-Fe₃C

Baja dan besi tuang yang banyak digunakan pada dasarnya adalah paduan besi dengan karbon. Karbon di dalam paduan ini dapat berupa karbon bebas (grafit), atau berupa senyawa interstisial (sementit, Fe₃C). Grafit adalah karbon dalam bentuk paling stabil, karena itu sistem paduan dimana karbonnya berupa grafit dinamakan sistem paduan Fe-C yang stabil. Sedang sementit adalah suatu struktur yang metastabil, dan sistem paduan ini dinamakan sistem Fe-C yang metastabil. Diagram fase kedua sistem ini terlihat pada gambar 2.4.

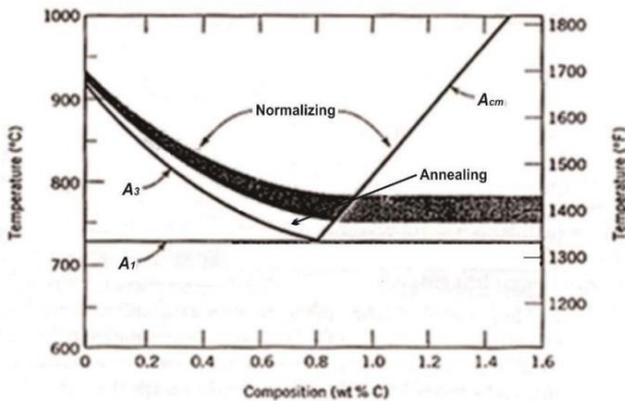


Gambar 2. 4 Diagram Fasa Fe-Fe₃C [6]

Besi mempunyai tiga macam bentuk allotropi, besi alpha dari temperatur kamar sampai sekitar 910 °C . besi gamma dari sekitar 910°C sampai sekitar 1400°C, dan besi delta dari 1400 °C sampai mencair pada temperatur sekitar 1539 °C. Baja dan karbon juga dapat membentuk senyawa, yaitu karbida besi (sementit, Fe₃C), dan antara karbida besi ini dengan larutan padat gamma (austenit) dapat membentuk campuran eutektik dengan kadar karbon sekitar 4,3% (reaksi eutektik terjadi pada sekitar temperatur 1130°C), dan dengan larutan padat alpha (ferit) membentuk campuran eutektoid (perlit) dengan kadar karbon sekitar 0,8% (reaksi eutektoid terjadi pada sekitar temperatur 723°C). Struktur perlit terdiri dari lamel-lamel ferit dan sementit berselang-seling. [5]

2.3.2 Normalizing

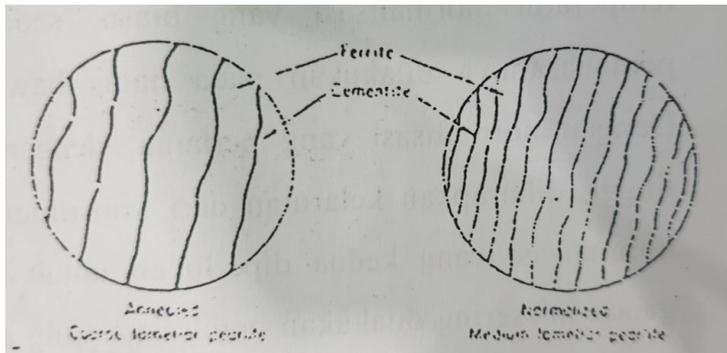
Proses *normalizing* atau dapat disebut juga anil normalisasi adalah proses perlakuan panas yang hampir sama dengan full anil. Spesimen dipanaskan sampai ke temperatur seperti pada full anil atau sedikit lebih tinggi, sekitar 10-50°C di atas garis A_3 . Spesimen ditahan beberapa saat selama 10 sampai 20 menit pada temperatur yang ditentukan, kemudian didinginkan dengan udara diam. Tujuan dari perlakuan anil normalisasi adalah untuk memperhalus butiran kristal, menaikkan sedikit kekerasan atau kekuatan, meningkatkan *machinability*, dan menghilangkan tegangan sisa jika mengalami *cold-working*.



Gambar 2. 5 Interval Temperatur Normalizing pada Baja Karbon [7]

Pada saat pemanasan mencapai temperatur di atas temperatur kritis di atas garis A_3 strukturnya adalah austenit dengan butiran yang masih halus, jika didinginkan dengan laju yang agak tinggi seperti pada proses normalisasi ini maka akan dihasilkan butiran yang halus, konstituen proeutektoid

lebih tipis, *interlamellar spacing* pada perlit lebih tipis dan lebih banyak seperti pada gambar 2.6. Ini semua akan mengakibatkan terjadinya kenaikan kekuatan atau kekerasan.



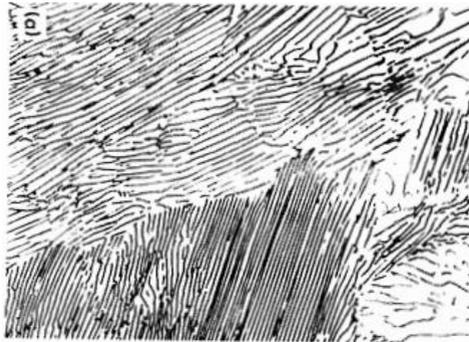
Gambar 2. 6 Sketsa Perbedaan Perlit Hasil Anil dan Normalisasi [5]

Normalisasi biasanya dilakukan terhadap baja karbon rendah. Baja ini biasanya sangat ulet sehingga *machinability*-nya kurang baik, dengan naiknya kekerasan maka *machinability* akan lebih baik. Dengan normalisasi selain diperoleh butiran yang lebih halus juga struktur menjadi lebih homogen. Ini akan membuat baja akan memberi respons lebih baik terhadap proses pengerasan. Karena ini biasanya baja yang akan dikeraskan akan dinormalisasi terlebih dahulu. [5]

2.3.2.1 Transformasi Perlit

Produk transformasi perlit terjadi di atas dari wilayah *nose*. Perlit merupakan mikrostruktur yang menunjukkan bentuk seperti *mother-of-pearl* jika dilihat pada mikroskop, memiliki karakteristik struktur lamelar dari lapisan ferit dan sementit. Pada bagian tepat di bawah garis Ae_1 , struktur *coarse lamellar pearlite* terbentuk dengan kekerasan rockwell sekitar C 15. Jika temperatur transformasi menurun, karakteristik

struktur lamelar tetap, tetapi jarak antara ferit dan karbida menjadi semakin kecil sampai lapisan pemisah tidak bisa larut lagi. Jika temperatur transformasi semakin turun dan kehalusan dari perlit juga menurun, terlihat bahwa nilai kekuatan akan meningkat. Hal disebabkan oleh penurunan jarak antara unsur penguat, sementit, dalam matriks ferit halus. [8]



Gambar 2. 7 Struktur Mikro Perlit [8]

2.3.3 Quenching

Proses *quenching* adalah proses perlakuan panas dengan cara memanaskan baja sampai temperatur 871°C [5], sedikit di atas garis A_3 , agar semua karbida larut kembali dan austenit menjadi homogen, lalu dilakukan pendinginan secara cepat dengan media pendingin berupa air atau oli. Dengan pendingin cepat ini tidak sempat terjadi presipitasi karbida. Presipitasi karbida dapat terjadi pada baja mangan austenitik jika didinginkan dalam cetakan dari temperatur penuangan, ini akan menyebabkan rendahnya kekuatan impact.

Dengan larut kembalinya karbida ini diikuti pula oleh penurunan kekerasan. Untuk baja austenitik baik pada waktu pemanasan maupun pada pendinginan tidak terjadi perubahan fase yang dapat menghasilkan penghalusan butir kristal,

bahkan dapat terjadi pertumbuhan butir kristal. Tetapi pada baja ini pertumbuhan butir kristal tidak berpengaruh buruk terhadap ketangguhan baja ini. Bahkan *solution treatment* pada baja mengan austenitik justru menaikkan ketangguhannya. Perbaikan ketangguhan ini lebih tampak nyata pada benda dengan ukuran besar, dimana presipitasi karbida sangat mudah terjadi.

Pada baja austenitik yang mengalami *cold-work* dengan pemanasan kembali akan terjadi rekristalisasi. Ini bahkan akan memberikan tingkat kekerasan yang lebih rendah. Bila tingkat pengerjaan dingin ini pada tingkat yang kritis, maka dapat terjadi pertumbuhan butir kristal yang luar biasa.

2.3.3.1 Transformasi Martensit

Bila austenit didinginkan dengan cepat dan dapat mencapai temperatur M_s sebelum menjadi struktur lain maka pada saat itu mulai terbentuk martensit. Pada temperatur yang sangat rendah ini austenit mengalami *driving force* yang sangat besar untuk berubah dari FCC menjadi BCC, yang menimbulkan *shear force* terhadap atom-atom. Ini menyebabkan atom-atomnya sedikit tergeser untuk menuju BCC, tetapi karena didalamnya masih terdapat banyak karbon (yang tadinya larut dalam austenit dan masih belum sempat keluar) dan karbon ini sudah tidak lagi dapat berdifusi keluar karena temperatur sudah terlalu rendah, maka struktur BCC tidak tercapai, salah satu rusuk sel satuannya lebih panjang daripada yang lain, ia menjadi BCT (*Body Centered Tetragonal*). Struktur BCT ini sangat tegang, karena itu struktur ini menjadi sangat keras dan getas.

Pada mikroskop struktur BCT yang dinamakan martensit ini tampak seperti jarum-jarum yang tersebar, ditunjukkan pada gambar 2.8. Pada gambar tampak

jarum-jarum martensit (hitam) dan sisa austenit yang tidak bertransformasi (putih).



Gambar 2. 8 Struktur Mikro Martensit [6]

Bila dibandingkan transformasi perlit, bainit, dan martensi, dapat dilihat bahwa transformasi austenit-perlit terjadi sepenuhnya dengan difusi, pada transformasi austenit-bainit sebagian dengan terjadinya *shear* dan sebagian difusi, sedangkan pada transformasi austenit-martensit sepenuhnya terjadi dengan *shear*, tanpa difusi.

2.4 Korosi

Korosi didefinisikan sebagai perusakan atau penurunan kualitas sifat mekanik material yang disebabkan oleh reaksi terhadap lingkungannya. Selain pada material berbahan logam, korosi pun dapat terjadi pada material non-logam contohnya seperti keramik, plastik, dan karet. Korosi dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu korosi basah dan korosi kering. Korosi

basah terjadi saat material berinteraksi dengan cairan atau uap basah, seperti dengan larutan air atau elektrolit dan kelembaban udara, sedangkan korosi kering terjadi saat material berinteraksi dengan uap kering dan gas, dimana korosi sering dihubungkan dengan korosi pada temperatur tinggi.

Pada korosi basah terdapat proses elektron/muatan yang dapat memberikan efek terhadap korosi pada permukaan material. Reaksi elektrokimia yang terjadi menunjukkan adanya perubahan energi bebas yang terdapat pada material. Jika pada perubahan energi bebas dari suatu kondisi ke kondisi lain bernilai negatif, hal tersebut menunjukkan bahwa reaksi terjadi secara spontan. Kondisi material yang tidak mendapat perlakuan pada sebuah sistem, sistem akan cenderung berubah ke tingkat energi terendah. Sedangkan perubahan energi bebas yang bernilai positif menunjukkan adanya peningkatan energi yang menjelaskan bahwa terdapat energi yang ditambahkan pada sistem.

Terdapat tiga aspek utama yang mempengaruhi korosi, yaitu material, lingkungan, dan reaksi yang terjadi. Struktur metalurgi dan sifat dari material sangat berpengaruh terhadap terjadinya korosi. Sifat material dapat terbentuk karena proses perlakuan ataupun disebabkan sifat komposisi kimia yang terkandung. Kondisi material yang menerima dibandingkan dengan material yang tidak menerima perlakuan. Perlakuan terhadap material dapat menyebabkan perubahan sifat dari material tersebut, seperti perubahan besar butir, presipitasi, homogenitas, atau adanya deformasi plastis. Semua perubahan yang terjadi pada material akibat perlakuan menunjukkan adanya perubahan energi dari kondisi ekuilibrium, dimana semakin tidak ekuilibrium material maka semakin mudah material untuk terkorosi.

Pada proses korosi terjadi reaksi reduksi dan oksidasi akibat adanya perbedaan potensial antara kedua material. Material yang memiliki potensial lebih rendah cenderung akan melepaskan ion yang disebut reaksi anodik. Sedangkan material yang memiliki potensial yang tinggi cenderung akan mengalami oksidasi yang disebut reaksi katodik. Reaksi antara lingkungan dengan material

terjadi karena pada media korosif mengandung ion-ion aktif dengan konduktivitas tertentu yang bergerak secara kinetis, membentuk reaksi elektrokimia yang kemudian membentuk produk korosi. [10]

2.4.1 Polarisasi

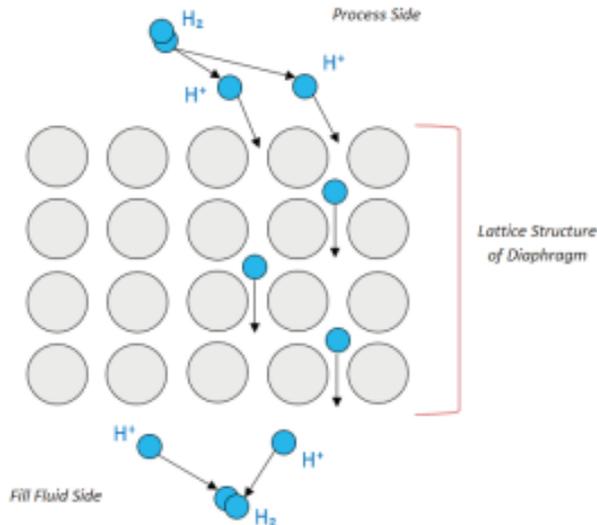
Pada pengukuran laju korosi, elektroda tidak berada pada keadaan keseimbangan ketika dialiri oleh arus. Potensial yang diukur dari elektroda dipengaruhi oleh besarnya arus eksternal dan arah potensial. Perubahan arah potensial selalu berlawanan bergeser dari kesetimbangannya, hal itu disebabkan adanya arus berlawanan dari eksternal maupun dari galvanik. Saat arus mengalir dalam sel galvanik, anoda bersifat lebih negatif dan katoda menjadi lebih positif. Perbedaan potensial antara anoda dan katoda menjadi lebih kecil dengan meningkatnya arus. Perubahan potensial yang disebabkan pergerakan arus ke atau dari elektroda, diukur dalam volt, disebut polarisasi.

Diagram polarisasi dari logam yang terkorosi merupakan grafik potensial dengan log *current density*. Untuk membentuk diagram polarisasi elektroda yang biasa digunakan adalah elektroda kerja, elektroda acuan, dan elektroda bantu. Pengukuran biasanya menggunakan potensiostat, sebuah alat yang secara otomatis mengatur potensial antara elektroda kerja dan elektroda bantu. Arus antara elektroda kerja dan elektroda bantu dikendalikan dan potensial antara elektroda kerja diukur berdasarkan elektroda acuan. [12]

2.4.2 Penyerapan Hidrogen

Hidrogen akan masuk ke dalam logam melewati rongga pada logam atau kekosongan atom pada kisi kristal. Hidrogen yang masuk ke dalam logam berbentuk atom hidrogen. Terdapat dua mekanisme masuknya hidrogen ke dalam logam, yaitu mekanisme interstisial atau substitusional

(kekosongan). Kedua mekanisme tersebut ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Mekanisme Penyerapan Hidrogen [11]

Pada mekanisme interstisial, molekul hidrogen dalam beberapa kondisi dapat terpecah menjadi ion hidrogen. Ion hidrogen berukuran cukup kecil untuk masuk ke dalam logam melewati ruang di antara dua kisi kristal tanpa menghilangkan struktur kisi dari logam tersebut, seperti pada gambar 2.9. Pada mekanisme substitusional, jika ada kekosongan pada struktur kisi logam maka atom hidrogen dapat masuk ke dalam ruang kosong tersebut dan terus terdifusi ke dalam. [11]

2.4.3 Hydrogen Damage

Hydrogen damage atau kerusakan hidrogen adalah istilah umum dari kerusakan mekanik suatu material yang disebabkan oleh adanya interaksi dari material tersebut terhadap hidrogen. Kerusakan hidrogen dapat diklasifikasikan ke dalam empat tipe:

1. *Hydrogen blistering*
2. *Hydrogen embrittlement*
3. *Decarburization*
4. *Hydrogen attack*

Hydrogen blistering atau pelepuhan hidrogen adalah hasil dari penetrasi hidrogen ke dalam sebuah logam. Contoh dari pelepuhan hidrogen dapat dilihat pada gambar 2.10. Kerusakan yang dihasilkan dapat berupa deformasi lokal, dalam kasus ekstrem, kerusakan total dari dinding kapal. Sama seperti pelepuhan hidrogen, *hydrogen embrittlement* atau penggetasan hidrogen juga terjadi karena adanya penetrasi hidrogen ke dalam sebuah logam, yang menghasilkan turunya keuletan dan kekuatan. *Decarburization* menurunkan kekuatan dari logam. *Hydrogen attack* dapat diartikan dengan interaksi antara hidrogen dan komponen dari paduan pada temperatur tinggi. Contoh paling umum dari *hydrogen attack* adalah disintegrasi dari oksigen yang mengandung tembaga yang disebabkan oleh keberadaan hidrogen. *Decarburization* dan *hydrogen attack* adalah proses yang biasanya terjadi pada temperatur tinggi. [10]



Gambar 2. 10 Kerusakan Hydrogen Blistering [10]

2.4.3.1 Penggetasan Hidrogen

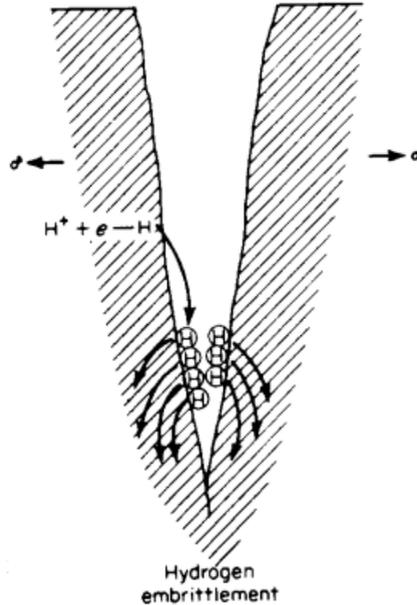
Tanda pertama adanya hidrogen yang larut dalam kisi kristal adalah penggetasan hidrogen. Bentuk

mayor dari penggetasan hidrogen adalah keretakan yang diinduksi oleh hidrogen atau *hydrogen-induced cracking* (HIC). Baja dengan kekuatan rendah dan paduan non-logam dengan keuletan yang tinggi juga dapat mengalami penggetasan atau penurunan nilai keuletannya, tetapi akan tetap mengalami patahan ulet jika adanya korosi atau hidrogen dengan tekanan tinggi. Penggetasan hidrogen juga sering digambarkan sebagai efek merugikan dari hidrogen yang terabsorpsi pada logam cair dan nantinya akan terpresipitasi dalam struktur metalurgi selama proses solidifikasi dan pendinginan.

Penggetasan hidrogen dapat dikembalikan jika hidrogen dihilangkan dari logam dengan memanggng pada temperatur sekitar 700°C, penggetasan hidrogen pada temperatur tinggi cenderung tidak terlalu merusak karena pada temperatur tinggi hidrogen lebih mudah untuk bergerak. Hidrogen dapat dikeluarkan dari logam pada temperatur tertentu, tetapi akan mudah untuk diabsorpsi kembali pada temperatur yang lebih tinggi, dimana austenit dalam kondisi stabil. Pendinginan tertentu dapat menyebabkan kerusakan hidrogen jika hidrogen yang sebelumnya larut dalam austenit dikeluarkan dari ferit pada temperatur rendah. [13]

Mekanisme yang biasa terjadi, yang disebabkan oleh penggetasan hidrogen, disebabkan oleh interferensi slip karena hidrogen yang terlarut. Interferensi slip ini dapat terjadi karena banyaknya hidrogen yang terkumpul pada dislokasi atau *microvoids*, tetapi mekanismenya masih diragukan. Penggetasan hidrogen dibedakan dari *stress-corrosion cracking* yang biasanya terjadi karena interaksi dengan arus yang diberikan. Sebuah fenomena dimana retakan timbul karena adanya reaksi evolusi hidrogen yang terus meningkat, disebabkan oleh arus dari sisi yang

berkebalikan, dapat disebut sebagai penggetasan hidrogen.

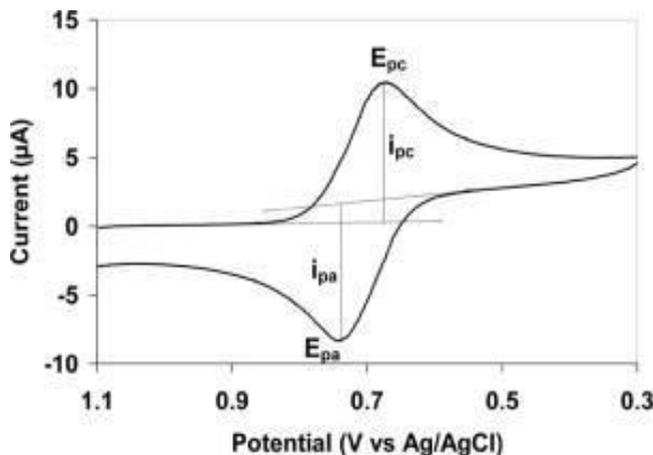


Gambar 2. 11 Skema Retakan Penggetasan Hidrogen [10]

2.5 Electrochemical Hydrogenation Test

Penurunan sifat mekanik dari logam yang disebabkan oleh penyerapan hidrogen mengancam keamanan peralatan yang bekerja atau berada di lingkungan hidrogen. Teknik elektrokimia memungkinkan hidrogen terserap kedalam logam adalah metode umum untuk mempelajari difusivitas hidrogen dan fenomena penggetasan (*embrittlement*) logam. Umumnya, hidrogen diperoleh dari larutan elektrolit percobaan atau gas H_2S . Atom hidrogen yang didifusi ke dalam logam. Peralatan standar untuk pengujian ini mampu menghasilkan energi listrik dari reaksi kimia atau menggunakan energi listrik untuk menjalankan reaksi kimia.

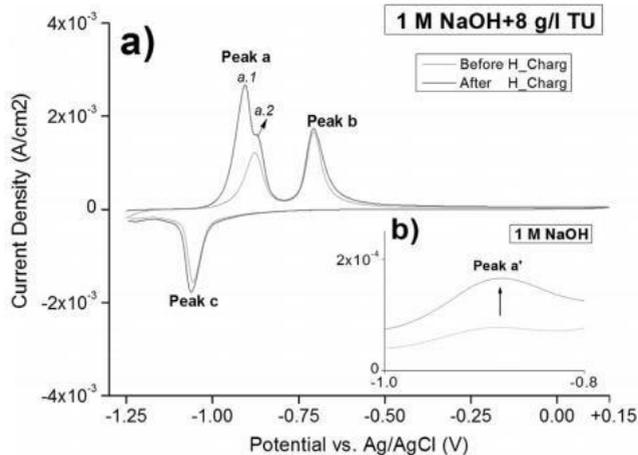
2.5.1 Cyclic Voltammetry



Gambar 2. 12 Kurva Voltammogram

Cyclic voltammetry (CV) merupakan suatu metoda digunakan untuk mengamati sifat kapasitan dari material. *Cyclic voltammetry* dilakukan menggunakan potentiostat yang dikontrol dengan komputer. Teknik elektroanalisis menggunakan *cyclic voltammetry* pada dasarnya adalah teknik elektroanalisis dengan memberikan voltase yang berubah-ubah secara linear (*ramp voltage*) pada sebuah elektroda. Voltase yang diteliti (*voltage scan*) pada umumnya berkisar $\pm 2V$ dari potensial elektroda ketika tidak diberi arus (potensial jeda) sehingga reaksi pada elektroda dapat diteliti dengan baik. Selagi voltase yang diberikan mendekati potensial reversibel, arus mengalir yang besarnya meningkat secara parabolik namun kemudian berhenti pada potensial tertentu dikarenakan berkurangnya reaktan. Berkurangnya reaktan ini disebabkan oleh reaksi yang berlangsung di permukaan elektroda. Metode *cyclic voltammetry* memberikan informasi kualitatif dan kuantitatif mengenai karakter redoks elektroda. Berdasarkan karakteristik daripada grafik yang didapatkan dari

pengujian maka dapat ditentukan apakah reaksi reduksi yang terjadi *reversible*, *semi-reversible*, atau *irreversible*.



Gambar 2. 13 Contoh Pengujian *Cyclic Voltammetry* dengan *H-Charging* [3]

Pada gambar 2.13 terlihat adanya beberapa puncak atau *peak* yang menjadi indikasi penting dalam pengujian. Terlihat terdapat puncak a.1 dan puncak a.2 dimana berkaitan dengan pengisian hidrogen ke dalam spesimen. Puncak a.1 dan a.2 dianggap berasal dari oksidasi hidrogen yang terserap dan reaksi terkait tiourea. Untuk puncak b dan c umumnya dikaitkan dengan reaksi oksidasi / reduksi baja atau spesimen yang digunakan. Untuk eksperimen mengenai kerusakan hidrogen, biasanya hanya melihat dari puncak a.1 karena berkaitan erat dengan hidrogen yang terserap ke dalam spesimen. Untuk puncak a.2 hanya berkaitan dengan reaksi dari tiourea yang digunakan dalam eksperimen.

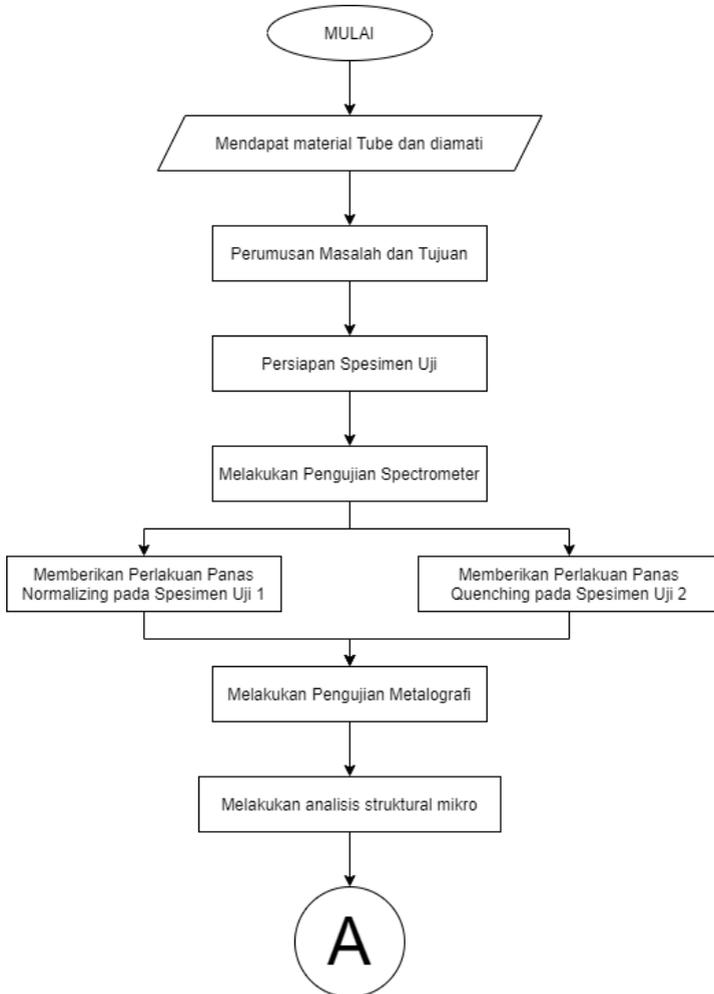
Potentiostatic polarization merupakan salah satu metode yang digunakan untuk memasukan atau difusi hidrogen ke dalam baja. Pada lingkungan elektrokimia, atom hidrogen dapat dihasilkan oleh reduksi katodik air (H₂O) dan

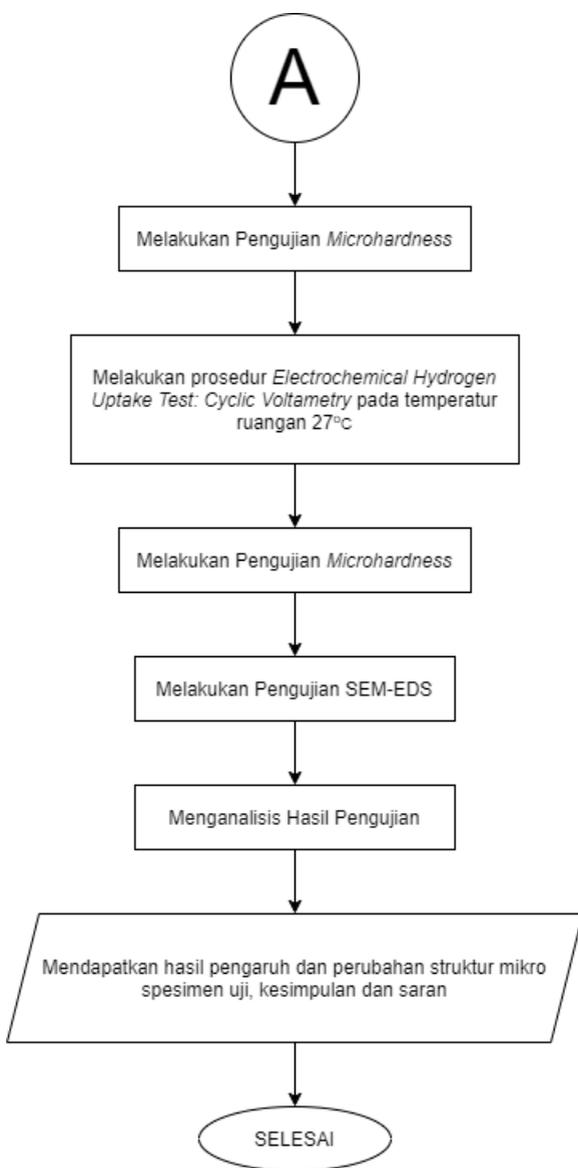
dapat teradsorpsi pada permukaan logam. Hidrogen yang teradsorpsi pada permukaan dapat terjadi rekombinasi untuk menghasilkan gas hidrogen yang dapat meninggalkan permukaan sampel lagi atau absorpsi dan difusi dalam mikrostruktur logam. Laju absorpsi hidrogen dapat sangat dipengaruhi oleh apa yang disebut "racun rekombinasi", yang membatasi reaksi pembentukan gas hidrogen. Dari beberapa literatur thiourea dianggap sebagai penghambat korosi dan digunakan untuk meningkatkan absorpsi hidrogen ke dalam kisi logam transisi inang Fe, Ti, Pd dan Ni.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 *Flowchart* Penelitian





Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian

3.2 Spesifikasi Material dan Spesimen Uji

3.2.1 Material Uji

Pada penelitian ini digunakan benda uji berupa pipa baja SA 210 grade A1 dari *waterwall tube* yang telah diuji komposisi kimia di Laboratorium Uji Bahan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, dengan foto material uji dan hasil komposisi kimia sebagai berikut:



Gambar 3. 2 Material Uji Pipa Baja SA 210 A1

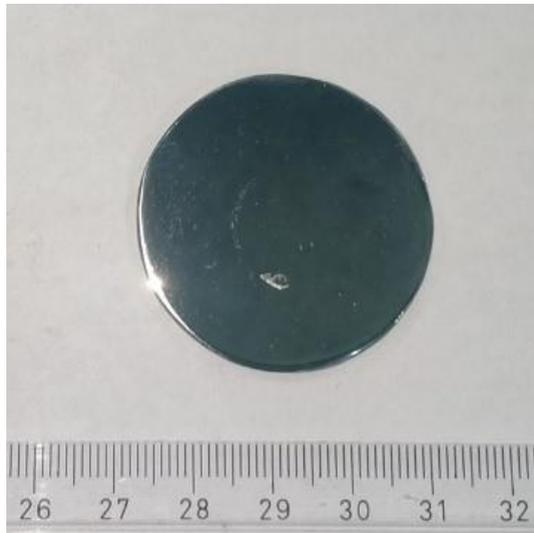
Tabel 3. 1 Komposisi Kimia Baja SA 210 Grade A1 Berdasarkan Hasil Uji Spektro

Komposisi Kimia	% Berat
Besi (Fe)	98,6
Karbon (C)	0,227
Silika (Si)	0,19
Mangan (Mn)	0,825
Fosfor (P)	<0,003
Sulfur (S)	<0,002
Nikel (Ni)	0,0079

Alumunium (Al)	0,0048
Kromium (Cr)	0,045
Molibdenum (Mo)	0,0053
Tungsten (W)	0,0529
Timbal (Pb)	0,0265

3.2.2 Spesimen Uji

Pada komponen ini digunakan material baja tipe SA 210 grade A1. Material dipotong menjadi plat dengan bentuk lingkaran agar memudahkan untuk penelitian. Foto makro dan dimensi dari spesimen dapat dilihat pada gambar dan tabel berikut:



Gambar 3. 3 Spesimen Uji Baja SA 210 Grade A1

Tabel 3. 2 Dimensi Spesimen Uji

Dimensi Spesimen	
Diameter	35 mm
Ketebalan	± 1 mm

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan penelitian digunakan untuk mendukung peneliti mengumpulkan dan mengolah data. Berikut adalah peralatan-peralatan yang digunakan peneliti:

3.3.1 Kamera

Alat yang membantu untuk melakukan pengamatan visual yang dilakukan pada benda kerja dan juga untuk mendokumentasikan benda kerja.

3.3.2 Penggaris dan Jangka Sorong

Penggaris digunakan pada penelitian ini memiliki ketelitian 0,1 mm, sedangkan jangka sorong yang digunakan memiliki ketelitian 0,01 mm. Penggaris dan jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi tebal dan diameter benda kerja, serta mengukur dimensi lain yang dianggap perlu.

3.3.3 Mesin Pemotong Material

Spesimen uji dipotong dalam ukuran yang lebih kecil dengan bentuk lingkaran dengan menggunakan mesin gerinda dan bubut, tujuannya untuk mempermudah proses pemberian perlakuan panas dan proses *grinding* dan *polishing* sebelum dilakukannya pengujian metalografi dan mempermudah proses eksperimen.

3.3.4 Mesin Furnace

Mesin *Furnace* digunakan untuk memberikan perlakuan panas kepada spesimen yang bertujuan untuk

mengubah struktur mikro pada spesimen. Mesin *furnace* yang digunakan pada penelitian ini adalah Nabertherm seperti pada gambar 3.4. Hasil dari mesin *furnace* adalah spesimen dengan struktur mikro yang berbeda sebagai variasi pada penelitian.



Gambar 3. 4 Mesin Nabertherm

3.3.5 Mesin *Grinding* dan *Polishing*

Mesin *grinding* dan *polishing* digunakan untuk menghaluskan dan membuat permukaan spesimen menjadi datar dengan menggunakan kertas gosok. Penelitian ini menggunakan mesin *grinding* dan *polishing* Metkon Gripo 300-IV *Grinder & Polisher* seperti pada gambar 3.6. Hasil dari mesin *grinding* dan *polishing* adalah permukaan spesimen yang mengkilap dan tidak ada goresan bekas *grinding*.



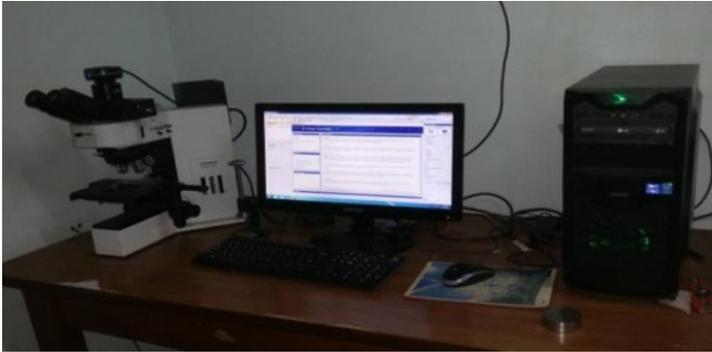
Gambar 3. 5 Mesin Metkon GriPO 300-1V Grinder & Polisher

3.3.6 Perangkat *Etching*

Proses ini menggunakan larutan nital secukupnya. Diperlukan gelas ukur, pipet, wadah kaca, pengering, dan aquades.

3.3.7 Mikroskop

Mikroskop merupakan salah satu instrumen optik yang digunakan untuk mendeteksi benda yang sangat kecil dan tidak dapat terlihat secara langsung oleh mata. Mesin mikroskop yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Olympus Stereo Microscope* seperti pada gambar 3.7.



Gambar 3. 6 Mesin *Olympus Stereo Microscope*

3.3.8 Mesin *Scanning Electron Microscope*

Merupakan alat yang digunakan untuk melihat lapisan yang terdapat pada permukaan spesimen. Pada penelitian ini, digunakan untuk mendapatkan data komposisi dan kristalografi dari spesimen uji.

3.3.9 Mesin *Micro Vickers Hardness*

Pada dasarnya, uji kekerasan logam memiliki tujuan untuk mengukur nilai kekerasan dari sebuah bahan atau sebuah logam terhadap deformasi plastis. Uji kekerasan merupakan salah satu uji merusak material dimana material di uji dengan beban tertentu.

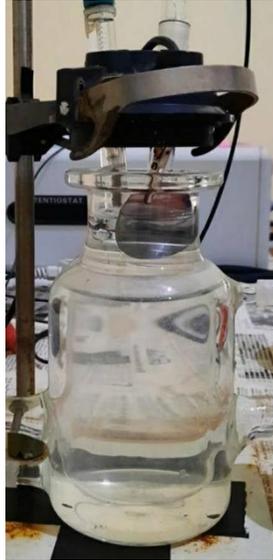
3.3.10 Peralatan *Electrochemical Hydrogenation Test*

Peralatan *electrochemical hydrogenation test* terdiri dari beberapa alat:

3.3.10.1 *Charging Cell*

Cell charging digunakan untuk melakukan pengujian *electrochemical hydrogenation test*. Sel ini akan digunakan untuk menentukan *cyclic voltametry before/after H-absorption* dan *hydrogen charging*. Pada gambar 3.8 ditunjukkan penggunaan sel dengan

memakai *reference electrode*, *counter electrode*, dan *working electrode*.



Gambar 3.7 Charging Cell

3.3.10.2 Potensiostat

Potensiostat adalah perangkat keras elektronik yang digunakan dengan prinsip kerja mengontrol sel tiga elektroda dan digunakan pada sebagian besar eksperimen elektroanalitik yang berhubungan dengan arus listrik atau tegangan listrik. Pada penelitian ini, potensiostat digunakan untuk mengatur voltase pada *anodic cell* dari Sel Devanathan-Stachurski agar terjadi polarisasi anodik dan mengukur arus yang muncul melewati proses polarisasi yang terjadi. Elektroda yang ada pada potensiostat yaitu elektroda kerja (*working electrode*), *reference electrode*, dan *counter electrode*.



Gambar 3. 8 Potensiostat

3.3.10.3 Heater

Heater digunakan untuk memanaskan air sebagai fluida pemanas pada Sel *Charging*. Air dipompa ke dalam *double jacket* pada Sel Devanathan-Stachurski dengan debit 8 liter/menit dan dibagi kepada dua cabang ke *charging cell* dan *anodic cell*.



Gambar 3. 9 Heater

3.4 Langkah-langkah Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini, ada beberapa tahap pengerjaan:

3.4.1 Perumusan Masalah dan Tujuan

Perumusan masalah ini disertai dengan batasan masalah untuk memperjelas lingkup penelitian yang akan dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui proses mekanisme terjadinya *hydrogen damage* dan pengaruh struktur mikro pada baja karbon SA 210 Grade A1 dengan pengujian *Electrochemical Hydrogenation Test*.

3.4.2 Persiapan Spesimen Uji

Material berupa pipa baja SA 210 grade A1 yang masih berbentuk tabung perlu dipersiapkan menjadi spesimen untuk memudahkan penelitian. Langkah-langkah dari persiapan spesimen adalah sebagai berikut:

1. Pipa baja karbon SA210 A1 dipotong melintang menggunakan gerinda.
2. Potongan melintang hasil proses pertama, ditempa (tanpa menggunakan panas) menjadi datar dan diukur untuk membentuk spesimen.
3. Hasil tempa dipotong menggunakan gerinda hingga membentuk lingkaran. Proses pemotongan menggunakan gerinda dilakukan secara perlahan agar tidak menimbulkan panas.
4. Hasil potongan menggunakan gerinda mengalami proses *finishing* menggunakan mesin bubut. Hal ini bertujuan agar hasil spesimen berbentuk lingkaran rapih, memiliki permukaan yang rata, dan dapat mengurangi ketebalan dari spesimen.
5. Spesimen mengalami proses *normalizing* akibat adanya tegangan sisa yang ditimbulkan pada proses permesinan (pada proses tempa).
6. Spesimen dibersihkan dan diukur dimensinya.

3.4.3 Pengujian Spectrometer

Pengujian spectrometer bertujuan untuk mengetahui komposisi kimiawi yang ada pada spesimen uji. Dengan cara cahaya putih ditembakkan ke lensa kolimator. Cahaya kemudia diteruskan ke cermin prisma kemudian cahaya terurai menjadi spectrum optic dan bias mengukur panjang gelombang yang tercipta.

3.4.4 Heat Treatment

Heat treatment yang dilakukan bertujuan untuk mendapat variasi struktur mikro yang akan diteliti. Selain bertujuan untuk mendapat variasi pada penelitian, sifat mekanik dan karakteristik dari spesimen uji harus dikembalikan ke dalam kondisi normalnya untuk memvalidasi penelitian yang dilakukan dan tidak diperlukan pertimbangan

mengenai hal yang tidak dibutuhkan atau diteliti pada penelitian.

3.4.4.1 Normalizing

Material pipa baja karbon yang dibentuk menjadi spesimen uji sudah melalui proses permesinan yang mengakibatkan perubahan struktur mikro dan adanya tegangan sisa. Spesimen diberikan perlakuan panas *normalizing* untuk memberikan menghaluskan butiran kristal pada struktur mikronya dan menghilangkan tegangan sisa. Proses perlakuan panas diberikan dengan suhu 900°C dan *holding time* selama 1 jam, lalu didinginkan dengan media udara terbuka. [5]

3.4.4.2 Quenching

Spesimen uji diberikan perlakuan *quenching* sebagai variasi ketiga dari eksperimen. Perlakuan panas *quench* bertujuan untuk membentuk fasa martensit. Proses perlakuan panas diberikan dengan temperatur 900°C dan langsung didinginkan dengan media air untuk pendinginan cepat. [5]

3.4.5 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi bertujuan untuk mengetahui struktur mikro yang terdapat pada spesimen. Pengujian metalografi dilakukan sebelum dan sesudah pengujian *Electrochemical Hydrogenation Test*. Langkah-langkah pengujian metalografi sebelum dilakukan pengujian *Electrochemical Hydrogenation Test* adalah sebagai berikut:

1. *Grinding*, penghalusan spesimen uji dengan metode dengan menggunakan kertas amplas 80, 220, 400, 600, 800, 1000, 2000, dan 5000.
2. *Polishing*, spesimen uji dipoles dengan menggunakan kain bludru dan auto sol untuk mengkilatkan dan menghilangkan goresan pada spesimen uji.

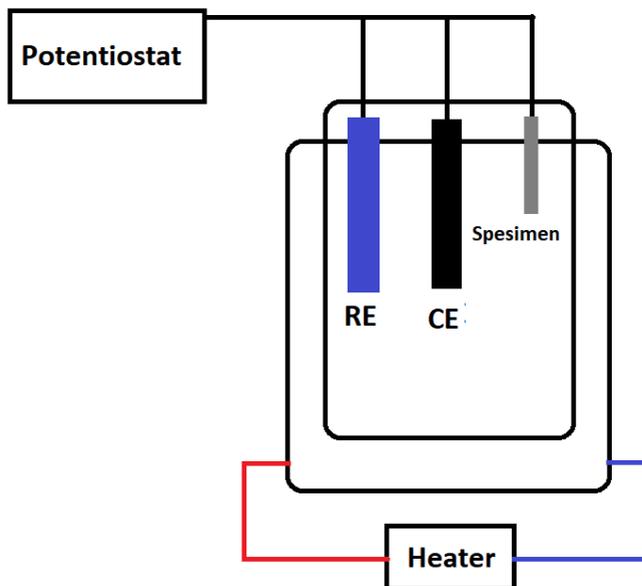
3. *Etching*, spesimen uji yang sudah dihaluskan akan diberikan ke dalam larutan nital. Dimana larutan nital memiliki kandungan 3 mL HNO_3 + 100 mL ethanol. Diberikannya larutan itu bertujuan untuk memperjelas struktur mikro agar dapat terlihat pada mikroskop optik.
4. Dilakukan pengamatan dengan menggunakan mikroskop elektronik dengan perbesaran 200x, 500x, dan 1000x untuk menganalisa struktur mikro.

3.4.6 Pengujian *Hardness* Sebelum *Electrochemical Hydrogenation Test*

Pengujian *hardness* yang digunakan ada *micro vickers hardness* bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan pada titik yang diinginkan dan juga dapat mengetahui nilai-nilai kekerasan yang dirata-rata kan di beberapa titik. Pengujian kekerasan dilakukan yang dilakukan sebelum uji *Electrochemical Hydrogenation Test* bertujuan sebagai pembandingan nilai kekerasannya.

3.4.7 Prosedur *Electrochemical Hydrogenation Test*

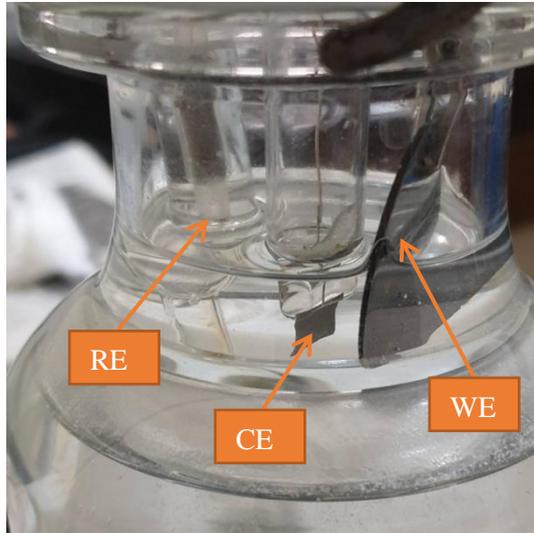
Pengujian *Electrochemical Hydrogenation Test* terbagi menjadi beberapa langkah [3].



Gambar 3. 10 Skema Susunan Peralatan Uji *Electrochemical Hydrogenation Test*

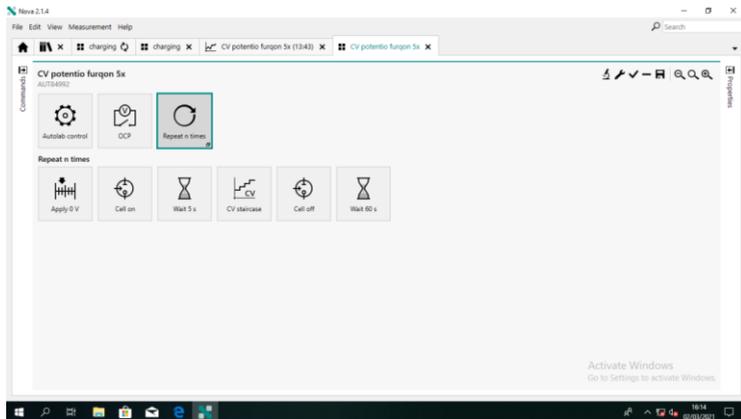
Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Persiapan alat, seluruh peralatan disusun dan dinyalakan sesuai dengan skema yang terdapat pada gambar 3.10. Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut:
 - a. Spesimen Uji sebagai *working electrode*
 - b. *Charging Cell*
 - c. Potensiostat
 - d. *Heater*
 - e. *Counter Electrode* untuk potensiostat (platina)
 - f. *Reference Electrode* untuk potensiostat (Ag.AgCl)



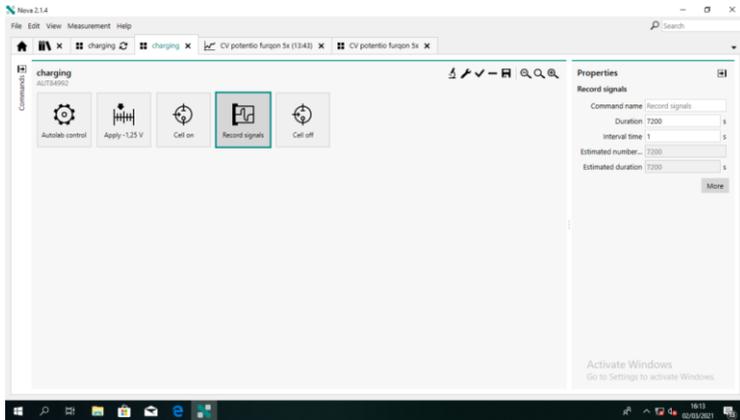
Gambar 3. 11 Pemasangan Spesimen Uji

2. Pemasangan spesimen uji sebagai *working electrode*, Platina sebagai *counter electrode*, dan Ag.AgCl sebagai *reference electrode* seperti pada gambar 3.11.
3. Pembuatan larutan elektrolit dengan 10gram NaOH + 2gram Thiourea + 250 gram H₂O yang akan dituangkan kedalam *charging cell*. [3]
4. Air pada *heater* dipompa ke dalam cell dan penahanan 42ptic42on42re dilakukan pada 42ptic42on42re ruangan yaitu 27°C , agar tidak ada 42ptic42on ruangan yang harus dipertimbangkan.
5. Temperatur pada elektrolit diukur dengan menggunakan *thermocouple* agar pengujian sesuai dengan 42ptic42on42re yang diinginkan.



Gambar 3. 12 Program Nova 2.1.4 Untuk Cyclic Voltammetry

6. Mengatur program Nova 2.1.4 seperti pada gambar 3.12 untuk mencari *cyclic voltammetry before H-absorption*, lalu program dijalankan
7. *Open current potential* dicari dengan program Nova 2.1.4 yang dilakukan selama 3600 detik.
8. *Cylic voltammetry before H-absorption* dilakukan dengan *start* dan *stop potential* diatur pada -1,4 V dan *scan rate* - 0,005 V/s.
9. *Cylic voltammetry before H-absorption* dilakukan sampai 5 kali *scan* dan grafik akan terdeteksi pada program Nova 2.1.4.



Gambar 3. 13 Program Nova 2.1.4 Untuk *Hydrogen Charging*

10. Mengatur program 2.1.4 seperti pada gambar 3.13 untuk melakukan *hydrogen charging*, lalu program dijalankan.
11. *Hydrogen charging* dilakukan dengan memberi potensial sebesar $-1,25$ V dan waktu 7200 detik.
12. Grafik *hydrogen charging* akan terdeteksi pada program Nova 2.1.4.
13. Mengatur program Nova 2.1.4 seperti pada gambar 3.13 untuk mencari *cyclic voltammetry after H-harging*, lalu program dijalankan
14. *Open current potential* dicari dengan program Nova 2.1.4 yang dilakukan selama 3600 detik.
15. *Cylic voltammetry after H-absorption* dilakukan dengan *start* dan *stop potential* diatur pada $-1,4$ V dan *scan rate* - $0,005$ V/s.
16. *Cyclic voltammetry after H-absorption* dilakukan sampai 5 kali *scan* dan grafik akan terdeteksi pada program Nova 2.1.4.
17. Grafik hasil *cyclic voltammetry before H-absorption* dan *after H-absorption* dibandingkan dan dianalisa pengaruh

hydrogen charging pada pengujian *electrochemical hydrogenation test*.

3.4.8 Pengujian *Hardness* Setelah *Electrochemical Hydrogen Test*

Pengujian *hardness* yang digunakan ada *micro 45 ptic 45 o hardness* bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan pada titik yang diinginkan dan juga dapat mengetahui nilai-nilai kekerasan yang dirata-rata kan di beberapa titik. Hasil pengujian kekerasan pada spesimen uji yang telah dilakukan uji *Electrochemical Hydrogenation Test* akan dibandingkan dengan hasil spesimen uji sebelum dilakukan uji *Electrochemical Hydrogenation Test*.

3.4.9 Pengujian *Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*

Pengujian *Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* adalah sebuah mikroskop 45ptic45on yang didesain untuk memiliki perbesaran yang jauh lebih besar dibandingkan dengan mikroskop 45ptic biasa. Fungsi utama SEM untuk mengetahui morfologi dan komposisi pada spesimen uji.

Tabel 3. 3 Tabel Pengujian

No	Spesimen Uji	Perlakuan (kode)	Pengujian				
			Spektrometer	Metalografi	Hardness	EHUT	SEM-EDS
1	Spesimen BM-1	Base Material (BM)	√	√	√	Tidak dilakukan	Tidak dilakukan
2	Spesimen BM-2		Tidak dilakukan	Tidak dilakukan	√	√	√
3	Spesimen N-1	Normalizing (N)	Tidak dilakukan	√	√	Tidak dilakukan	Tidak dilakukan
4	Spesimen N-2		Tidak dilakukan	Tidak dilakukan	√	√	√
5	Spesimen Q-1	Quenching (Q)	Tidak dilakukan	√	√	Tidak dilakukan	Tidak dilakukan
6	Spesimen Q-2		Tidak dilakukan	Tidak dilakukan	√	√	√

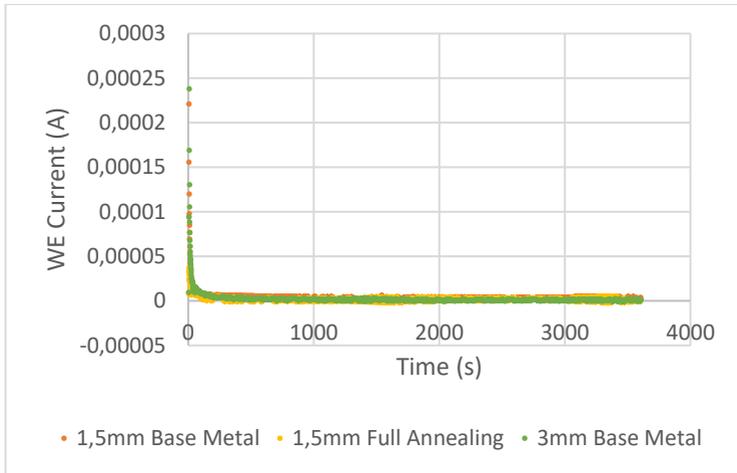
BAB IV

PEMBAHASAN DATA

Pada bab ini akan dibahas hasil pengujian pada ketiga variasi spesimen, yaitu spesimen kode BM sebagai *base material*, spesimen kode N dengan variasi perlakuan *normalizing*, dan spesimen kode Q dengan variasi perlakuan *quenching*. Pengujian yang diberikan kepada ketiga variasi spesimen adalah uji metalografi untuk melihat struktur mikro spesimen setelah diberikan perlakuan, uji *electrochemical hydrogenation test* (EHT) untuk mengetahui kemampuan absorpsi hidrogen dari spesimen dengan struktur mikronya, uji *micro Vickers hardness* untuk mengetahui pengaruh hidrogen yang terabsorpsi terhadap sifat mekanik dari spesimen, dan uji *scanning electron microscopy – energy dispersive X-ray spectroscopy* (SEM-EDS) untuk melihat morfologi dari permukaan spesimen setelah melewati pengujian EHT dan unsur kimiawi yang terkandung pada permukaan spesimen. Selain itu akan juga dijelaskan metode *electrochemical hydrogenation test* dengan menggunakan Sel Devanathan-Stachurski yang mengalami kegagalan.

4.1 Hasil Pengujian *Electrochemical Hydrogen Permeation Test* Pada Sel Devanathan-Stachurski

Pengujian penyerapan hidrogen sebelumnya menggunakan metode *electrochemical hydrogen permeation test* yang menggunakan sel devanathan-stachurski.

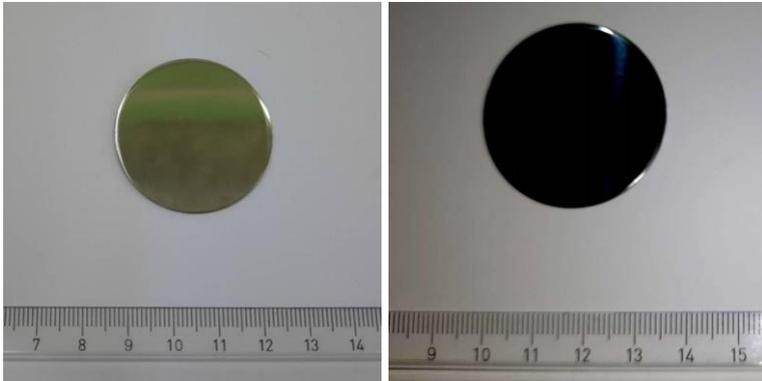


Gambar 4. 1 Grafik Pengujian *Electrochemical Hydrogen Permeation Test* pada Sel Devanathan-Stachurski

Pengujian ini gagal dilakukan karena hasil uji coba tidak sesuai dengan yang didapatkan oleh peneliti terdahulu seperti pada referensi sub-bab 2.1, yang dilakukan oleh Eeckhout et al. Referensi metode yang digunakan untuk pengujian penyerapan hidrogen adalah *cyclic voltammetry* untuk pengujian *electrochemical hydroge test* yang dilakukan oleh Ozdirik et al, yang selanjutnya akan dibahas pada bab 4.

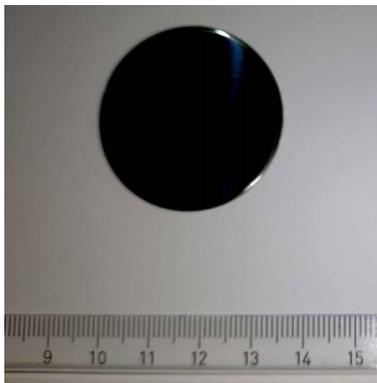
4.2 Hasil Pengujian Spesimen *Base Material*

Pada gambar 4.2 ditunjukkan kedua spesimen tanpa variasi perlakuan, yaitu spesimen dengan kode BM-1 dan spesimen dengan kode BM-2. Spesimen kode BM-1 digunakan sebagai data referensi awal yang akan diuji komposisi kimia, metalografi, dan *hardness*.

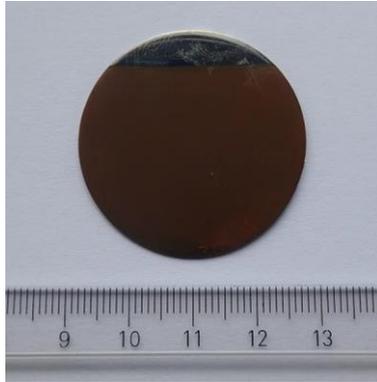


Gambar 4. 2 Foto Makro Spesimen kode BM

Spesimen kode BM-2 digunakan sebagai spesimen yang akan diuji *electrochemical hydrogenation test*, lalu diuji SEM-EDS dan *hardness*. Kedua spesimen akan dibandingkan nilai kekerasannya dan akan diteliti pengaruh uji *electrochemical hydrogenation test*.



(a)



(b)

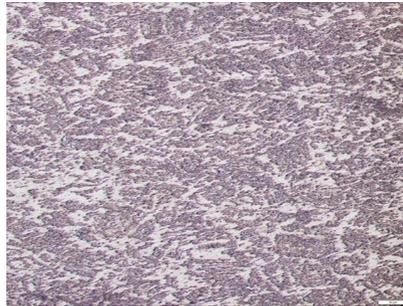
Gambar 4.3 Foto Makro Spesimen BM-2 (a) Sebelum Pengujian EHT (b) Setelah Pengujian EHT

Spesimen pada gambar 4.3(a) adalah kondisi awal sebelum dilakukan *electrochemical hydrogenation test* dan gambar 4.3(b) adalah kondisi akhir setelah dilakukan *electrochemical hydrogenation test*. Spesimen yang berdiameter ± 35 mm tidak seluruh permukaannya terkena elektrolit, melainkan bagian yang warna pada permukaan berubah adalah daerah yang terkena elektrolit saat pengujian berlangsung. Terlihat bahwa adanya lapisan oksida berwarna kuning kecokelatan yang merupakan hasil reaksi saat pengujian berlangsung.

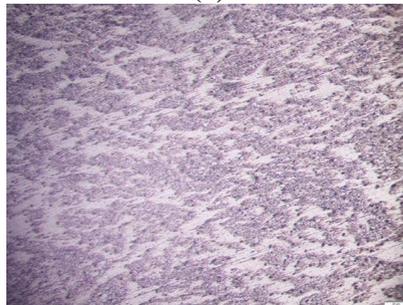
A. Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui perubahan bentuk struktur mikro menggunakan mikroskop optik. Pengujian metalografi diawali dengan mempersiapkan spesimen dari material uji berbentuk pipa terlebih dahulu, dengan membentuk spesimen berdiameter 35mm dengan tebal 1mm. Spesimen lalu dibersihkan agar tidak ada kotoran yang menempel dan dapat mengganggu pengujian metalografi, lalu spesimen digrinding dengan urutan grid 80, 220, 400, 600, 800, 1000, 2000, dan 5000. Grinding material bertujuan untuk

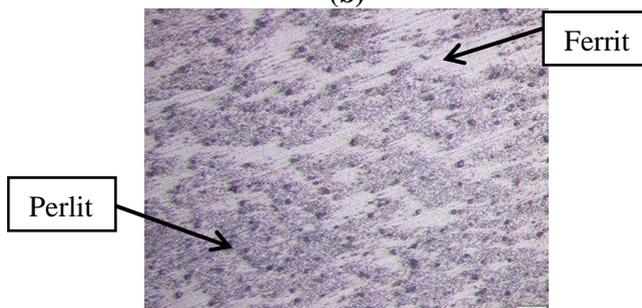
menghaluskan permukaan spesimen dan mempermudah terlihat struktur mikronya. Setelah material digrinding, spesimen akan dilakukan proses polishing dengan menggunakan kain bludru dan etching dengan larutan nital. Hasil pengujian metalografi dapat dilihat pada gambar 4.4



(a)



(b)



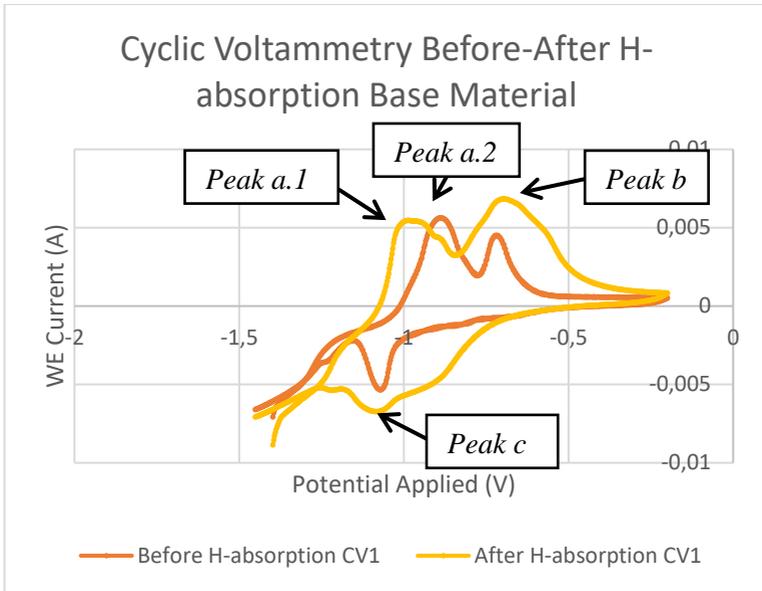
©

**Gambar 4. 4 Struktur Mikro Spesimen kode BM (a)
Perbesaran 100x (b) Perbesaran 200x (c) Perbesaran 500x**

Dari hasil pengujian dan pengamatan metalografi dengan menggunakan alat Olympus terlihat bahwa struktur mikro yang didominasi dengan fasa perlit yang memiliki butiran yang tidak teratur dan sedikit ferrit. Pada gambar 4.4, fasa perlit ditunjukkan dengan warna yang lebih gelap dan berbentuk menggumpal dan acak. Fasa ferrit ditunjukkan dengan warna putih atau bagian yang lebih terang. Pada gambar 4.4 dapat diindikasikan bahwa material dari spesimen berasal dari bagian *fireside* saat digunakan pada *waterwall tube*, yang berarti material telah mengalami perlakuan full anil. Pada gambar 4.4(a), terlihat bahwa presentase fasa perlit lebih banyak dibandingkan dengan fasa ferrit dan memiliki butiran yang lebih besar. Sesuai dengan variasi pengujian yang diinginkan oleh peneliti yaitu struktur mikro fasa perlit dan ferrit.

B. Electrochemical Hydrogenation Test

Pada gambar 4.5 ditunjukkan kurva *cyclic voltammetry* antara spesimen yang belum di-charge dengan hidrogen dan yang sudah di-charge dengan hidrogen.



Gambar 4.5 Grafik *Cyclic Voltammetry Before-After H-absorption* Spesimen kode BM

Eksperimen dilakukan dengan mengatur potensial mulai dan selesai pada -1,4 V, lalu potensial maksimal pada -0,2 V. *Open Current Potential* ditentukan dengan program Nova 2.1.4 selama 3600 s, lalu eksperimen dilakukan selama ± 45 menit dengan hasil 5 scan CV. Scan CV1 diambil untuk pembahasan karena kurva yang paling merepresentasikan eksperimen *electrochemical hydrogenation test*.

Kurva *cyclic voltammetry* pada gambar 4.5 memiliki tiga puncak a, b, dan c. Puncak a.1 dan a.2 pada kurva CV *before H-absorption* menunjukkan kurva referensi dari spesimen uji dan reaksi yang berkaitan dengan thiourea (zat yang membantu pembacaan *current* pada percobaan). Puncak b dan c secara berurutan menunjukkan reaksi oksidasi dan reduksi dari spesimen uji terhadap ion yang ada pada elektrolit. Pada CV *after H-absorption*, puncak a.1 menunjukkan reaksi

oksidasi yang dianggap berasal dari hidrogen yang telah terabsorpsi kedalam spesimen dan puncak a.2 menunjukkan reaksi yang berkaitan dengan thiourea. Pada puncak b dan c secara berurutan menunjukkan reaksi oksidasi dan reduksi dari spesimen uji terhadap ion yang ada pada elektrolit. Pembahasan ini akan difokuskan pada puncak a.

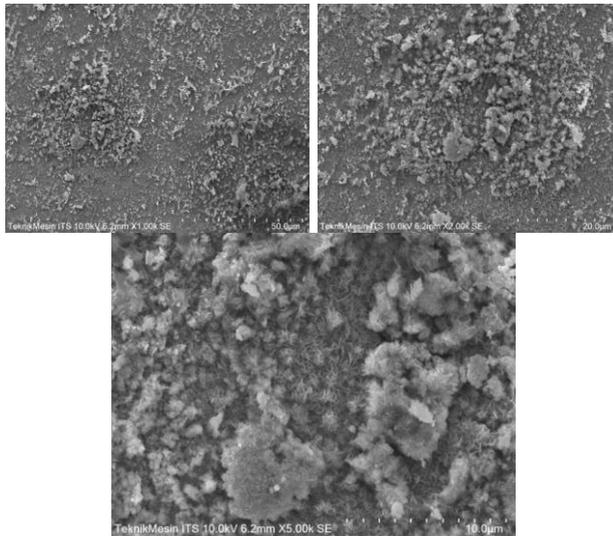
Garis berwarna oranye menunjukkan kurva spesimen BM-2 yang belum di-charge dengan hidrogen. Terlihat bahwa puncak a.1 tidak ada pada kurva, sedangkan puncak a.2 terdapat pada nilai yang tinggi sekitar 0,0057 A. Garis berwarna kuning menunjukkan kurva spesimen BM-2 yang sudah di-charge dengan hidrogen. Terlihat bahwa puncak a.1 berada pada nilai sekitar 0,0055 A, sedangkan puncak a.2 nilainya jauh dibawa puncak a.2 milik spesimen yang belum di-charge, yaitu pada sekitar 0,0044 A. Pada puncak b, kurva garis kuning yaitu spesimen yang sudah di-charge terdapat pada nilai yang sangat tinggi yaitu sekitar 0,0068 A. Sedangkan pada kurva garis oranye yaitu spesimen yang belum di-charge terdapat nilai yang jauh lebih rendah yaitu sekitar 0,0045 A. Pada puncak c, kurva garis kuning yaitu spesimen yang sudah di-charge terdapat pada nilai yang jauh lebih tinggi yaitu sekitar -0,0067 A. Sedangkan pada kurva garis oranye yaitu spesimen yang belum di-charge terdapat nilai yang lebih tinggi yaitu sekitar -0,0051 A.

Hal ini terjadi karena pada *CV before H-absorption*, spesimen BM-2 diasumsikan tidak terdapat hidrogen yang telah terabsorpsi maka dari itu puncak a.1 tidak ada. Setelah dilakukannya *H-Charging*, pada kurva *CV after H-absorption* nilai puncak a.1 sangat signifikan kenaikannya, disebabkan oleh penyerapan hidrogen. Atom hidrogen yang teradsorpsi pada permukaan spesimen memiliki kecenderungan untuk terabsorpsi dan berdifusi pada fitur dalam struktur mikro seperti kisi kristal secara intertisi. Saat berdifusi secara intertisi pada kisi kristal, atom hidrogen dapat terperangkap oleh fitur-fitur dalam struktur mikro seperti ruang dislokasi,

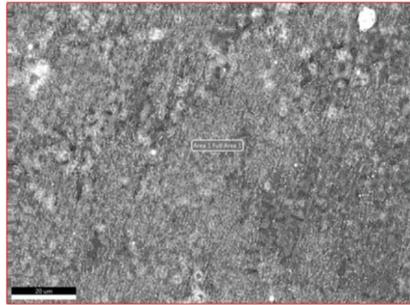
batas butir, dan *vacancy*. Hal ini yang menyebabkan hidrogen terabsorpsi kedalam spesimen dan merubah nilai dari puncak a.1 dalam kurva voltammogram pada gambar 4.5.

C. Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

Pengujian *scanning electron microscopy* dilakukan untuk mengetahui morfologi lapisan oksida yang terbentuk setelah pengujian *EHT* pada permukaan spesimen uji.



(a)



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	1.51	5.05	85.00	10.64	0.0041	1.2663	0.2164	1.0000
O K	12.63	31.76	2758.75	6.71	0.0685	1.2181	0.4454	1.0000
NaK	0.87	1.52	57.31	14.62	0.0013	1.1126	0.1326	1.0004
SiK	0.61	0.88	170.84	8.56	0.0030	1.1186	0.4394	1.0030
MnK	0.63	0.46	123.34	5.69	0.0067	0.9390	0.9996	1.1384
FeK	83.75	60.33	13030.11	1.49	0.8037	0.9549	1.0037	1.0012

(b)

Gambar 4. 6 Hasil Pengujian Spesimen kode BM-2 (a) Scanning Electron Microscopy (b) Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

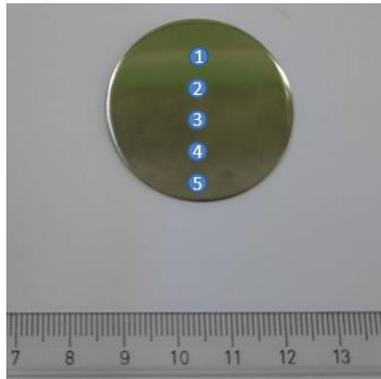
Gambar 4.6(a) adalah foto morfologi lapisan oksida pada spesimen BM-2 dengan perbesaran 1000x, 2000x, dan 5000x. Lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan spesimen adalah berupa Fe_2O_3 , yang terbentuk dari ion oksigen yang bereaksi dengan spesimen uji. Pembentukan lapisan oksida berhubungan dengan kurva voltammogram *cyclic voltammetry* pada gambar 4.5, yaitu pada puncak b saat spesimen uji mengalami reaksi oksidasi dengan ion oksigen pada elektrolit dan puncak c saat spesimen uji mengalami reaksi reduksi. Adanya perbedaan nilai pada puncak b dan c, walaupun tidak terlalu signifikan, adalah penyebab pembentukan lapisan oksida pada permukaan spesimen uji.

Pengujian *energy dispersive X-ray spectroscopy* dilakukan untuk mengetahui presentase lapisan oksida yang terbentuk setelah pengujian *EHT* pada permukaan spesimen uji. Gambar

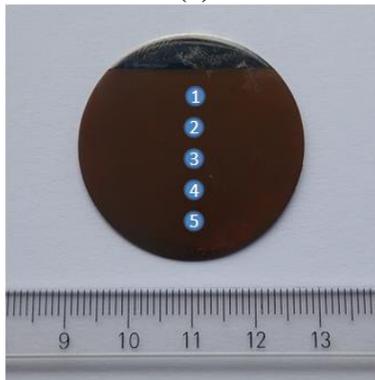
4.6(b) adalah foto titik pengambilan data *EDS* dan data presentase setiap elemen yang ada pada lapisan oksida.

D. Micro Vickers Hardness

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari pengujian *electrochemical hydrogenation test* pada nilai kekerasan permukaan spesimen.



(a)



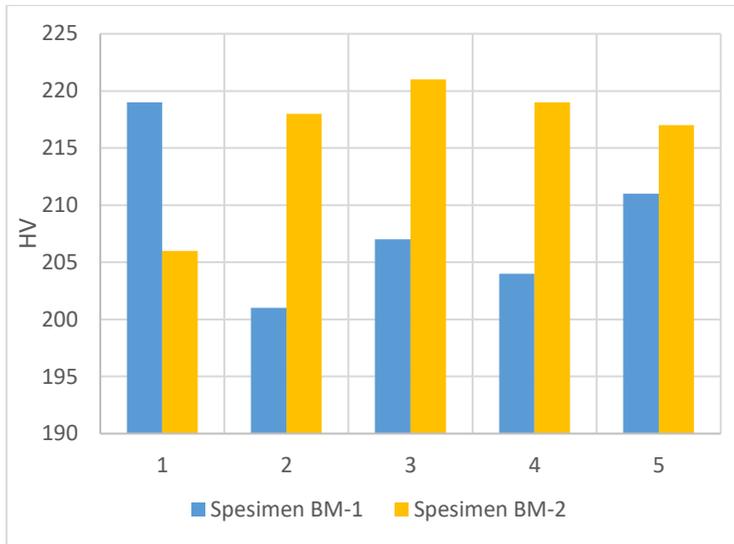
(b)

Gambar 4. 7 Titik Uji Hardness (a) Spesimen kode BM-1 (b) Spesimen kode BM-2

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan indentasi vickers pada mesin *microhardness*. Pengujian dilakukan sebanyak 5 titik pada spesimen dengan kode BM-1 sebagai data referensi awal dan pada spesimen dengan kode BM-2 sebagai data akhir yang hasil keduanya akan dibandingkan. Pada penelitian terdahulu dengan menggunakan material yang sama yaitu baja SA 210 grade A1 [9], nilai kekerasan rata-rata yang didapatkan adalah sebesar 204,6 HV dan akan digunakan sebagai referensi hasil pengujian pada spesimen kode BM-2.

Tabel 4. 1 Nilai Kekerasan HV Spesimen kode BM-1 dan BM-2

<i>Micro Vickers Hardness (HV)</i>						
Spesimen	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Rata-rata
BM-1	219	201	207	204	211	208,4
BM-2	206	218	221	219	217	216,2



Gambar 4. 8 Perbandingan Nilai Kekerasan HV Spesimen kode BM-1 dan BM-2

Spesimen dengan kode BM-1 yang tidak diuji *electrochemical hydrogenation test* memiliki nilai kekerasan vickers pada titik pertama sebesar 219 HV, titik kedua sebesar 201 HV, titik ketiga sebesar 207 HV, titik keempat sebesar 204 HV, dan titik kelima sebesar 211 HV. Rata-rata nilai kekerasan vickers sebesar 208,4 HV. Nilai kekerasan yang cukup tinggi pada spesimen kode BM-1 didapatkan dari struktur mikro dengan fasa perlit dan ferrit, sesuai dengan teori bahwa fasa perlit bersifat lebih keras dari fasa ferrit. Pada gambar 4.4 terlihat bahwa presentase fasa perlit pada spesimen BM-1 lebih banyak jika dibandingkan dengan fasa ferrit.

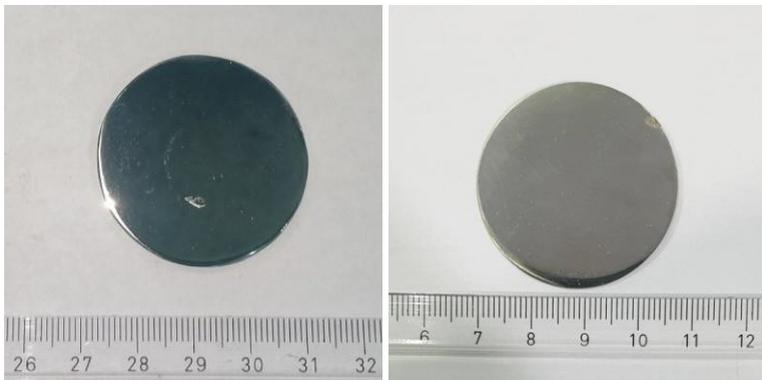
Spesimen dengan kode BM-2 yang telah diuji *electrochemical hydrogenation test* memiliki nilai kekerasan vickers pada titik pertama sebesar 206 HV, titik kedua sebesar 218 HV, titik ketiga sebesar 221 HV, titik keempat sebesar

219 HV, dan titik kelima sebesar 217 HV. Rata-rata nilai kekerasan vickers sebesar 216,2 HV. Nilai kekerasan yang meningkat disebabkan oleh hidrogen yang terabsorpsi kedalam spesimen telah terjebak dalam *trapping sites* yang ada pada struktur mikro, seperti ruang dislokasi, batas butir, dan *vacancy*.

Hasil perbandingan uji kekerasan menunjukkan kenaikan yang tidak terlalu signifikan pada setiap titik uji, ada beberapa titik uji yang tidak menunjukkan naiknya nilai kekerasan. Nilai rata-rata menunjukkan kenaikan yang juga tidak terlalu signifikan.

4.3 Hasil Pengujian Spesimen Variasi Perlakuan *Normalizing*

Pada gambar 4.9 ditunjukkan kedua spesimen dengan variasi perlakuan *normalizing*, yaitu spesimen dengan kode N-1 dan spesimen dengan kode N-2.



Gambar 4. 9 Foto Makro Spesimen kode N

Spesimen kode N-1 digunakan sebagai data referensi awal yang akan diuji metalografi dan *hardness*. Spesimen kode N-2 digunakan sebagai spesimen yang akan diuji *electrochemical hydrogenation test*, lalu diuji SEM-EDS dan *hardness*. Kedua

spesimen akan dibandingkan nilai kekerasannya dan akan diteliti pengaruh uji *electrochemical hydrogenation test*.



(a)



(b)

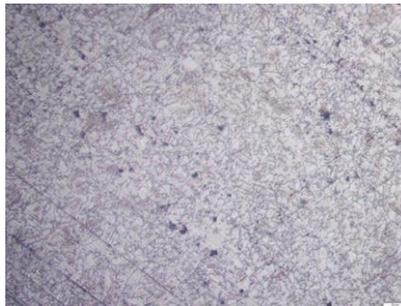
Gambar 4. 10 Foto Makro Spesimen kode N-2 (a) Sebelum Pengujian EHT (b) Setelah Pengujian EHT

Spesimen pada gambar 4.10(a) adalah kondisi awal sebelum dilakukan *electrochemical hydrogenation test* dan gambar 4.10(b) adalah kondisi akhir setelah dilakukan *electrochemical hydrogenation test*. Spesimen yang berdiameter ± 35 mm tidak seluruh permukaannya terkena elektrolit, melainkan bagian yang

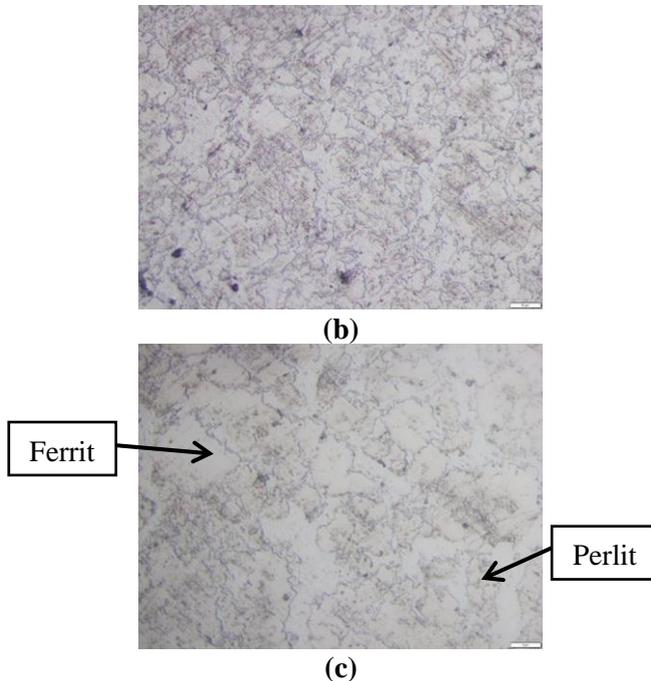
warna pada permukaan berubah adalah daerah yang terkena elektrolit saat pengujian berlangsung. Terlihat bahwa adanya lapisan oksida berwarna kuning kecokelatan yang merupakan hasil reaksi saat pengujian berlangsung.

A. Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui perubahan bentuk struktur mikro menggunakan mikroskop optik. Pengujian metalografi diawali dengan mempersiapkan spesimen dari material uji berbentuk pipa terlebih dahulu, dengan membentuk spesimen berdiameter 35mm dengan tebal 1mm. Spesimen lalu dibersihkan agar tidak ada kotoran yang menempel dan dapat mengganggu pengujian metalografi, lalu spesimen digrinding dengan urutan grid 80, 220, 400, 600, 800, 1000, 2000, dan 5000. Grinding material bertujuan untuk menghaluskan permukaan spesimen dan mempermudah terlihat struktur mikronya. Setelah material digrinding, spesimen akan dilakukan proses polishing dengan menggunakan kain bludru dan etching dengan larutan nital. Hasil pengujian metalografi dapat dilihat pada gambar 4.11.



(a)

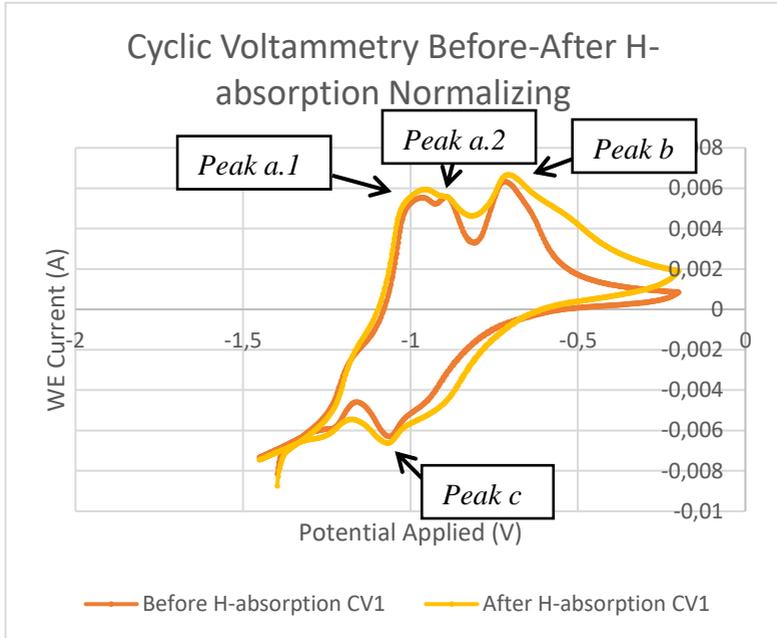


Gambar 4. 11 Struktur Mikro Spesimen kode N (a) Perbesaran 200x (b) Perbesaran 500x (c) Perbesaran 1000x

Dari hasil pengujian dan pengamatan metalografi dengan menggunakan alat Olympus terlihat bahwa struktur mikro yang didominasi dengan fasa perlit dan ferrit. Pada gambar 4.11, fasa perlit ditunjukkan dengan warna yang lebih gelap dan berbentuk menggumpal dan acak. Fasa ferrit ditunjukkan dengan warna putih atau bagian yang lebih terang. Sesuai dengan variasi pengujian yang diinginkan oleh peneliti yaitu struktur mikro fasa perlit dan ferrit.

B. *Electrochemical Hydrogenation Test*

Pada gambar 4.12 ditunjukkan kurva *cyclic voltammetry* antara spesimen yang belum di-charge dengan hidrogen dan yang sudah di-charge dengan hidrogen.



Gambar 4. 12 Grafik *Cyclic Voltammetry Before-After H-absorption* Spesimen kode N

Eksperimen dilakukan dengan mengatur potensial mulai dan selesai pada -1,4 V, lalu potensial maksimal pada -0,2 V. *Open Current Potential* ditentukan dengan program Nova 2.1.4 selama 3600 s, lalu eksperimen dilakukan selama ± 45 menit dengan hasil 5 *scan CV*. *Scan CV1* diambil untuk pembahasan karena kurva yang paling merepresentasikan eksperimen *electrochemical hydrogenation test*.

Kurva *cyclic voltammetry* pada gambar 4.12 memiliki tiga puncak a, b, dan c. Puncak a.1 dan a.2 pada kurva *CV before H-absorption* menunjukkan kurva referensi dari spesimen uji dan reaksi yang berkaitan dengan thiourea (zat yang membantu pembacaan *current* pada percobaan). Puncak b dan c secara berurutan menunjukkan reaksi oksidasi dan reduksi dari spesimen uji terhadap ion yang ada pada elektrolit. Pada *CV after H-absorption*, puncak a.1 menunjukkan reaksi oksidasi yang dianggap berasal dari hidrogen yang telah terabsorpsi kedalam spesimen dan puncak a.2 menunjukkan reaksi yang berkaitan dengan thiourea. Pada puncak b dan c secara berurutan menunjukkan reaksi oksidasi dan reduksi dari spesimen uji terhadap ion yang ada pada elektrolit. Pembahasan ini akan difokuskan pada puncak a.

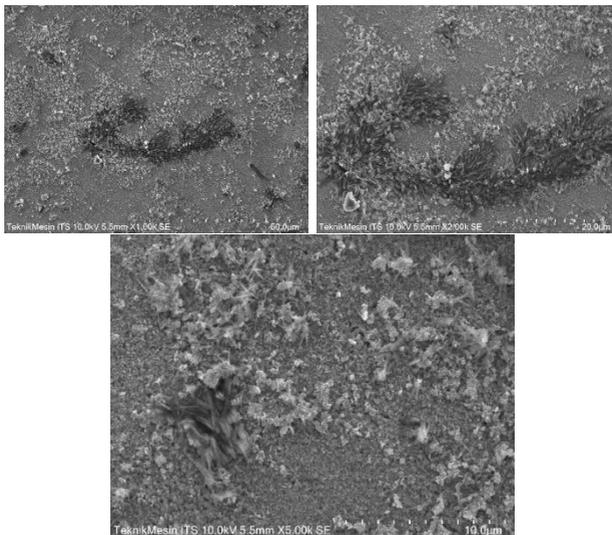
Garis berwarna oranye menunjukkan kurva spesimen N-2 yang belum di-charge dengan hidrogen. Terlihat bahwa puncak a.1 berada pada 0,0059 A, sedangkan puncak a.2 terdapat pada nilai yang tinggi sekitar 0,0056 A. Garis berwarna kuning menunjukkan kurva spesimen N-2 yang sudah di-charge dengan hidrogen. Terlihat bahwa puncak a.1 berada pada nilai sekita 0,0059 A, sedangkan puncak a.2 nilainya sama dengan puncak a.2 milik spesimen yang belum di-charge, yaitu pada sekitar 0,0057 A. Pada puncak b, kurva garis kuning yaitu spesimen yang sudah di-charge terdapat pada nilai yang sangat tinggi yaitu sekitar 0,0066 A. Sedangkan pada kurva garis oranye yaitu spesimen yang belum di-charge terdapat nilai yang jauh lebih rendah yaitu sekitar 0,0066 A. Pada puncak c, kurva garis kuning yaitu spesimen yang sudah di-charge terdapat pada nilai yang jauh lebih tinggi yaitu sekitar -0,0066 A. Sedangkan pada kurva garis oranye yaitu spesimen yang belum di-charge terdapat nilai yang lebih rendah yaitu sekitar -0,0066 A.

Hal ini terjadi karena pada *CV before H-absorption*, spesimen N-2 diasumsikan sudah terdapat hidrogen yang telah terabsorpsi maka dari itu puncak a.1 ada dengan nilai

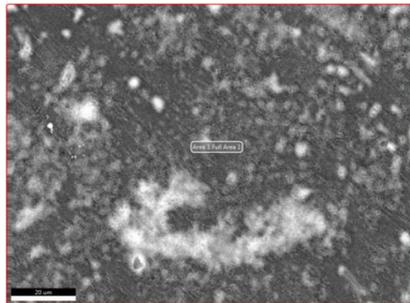
yang tinggi. Setelah dilakukannya *H-Charging*, pada kurva *CV after H-absorption* nilai puncak a.1 mengalami kenaikan yang disebabkan oleh penyerapan hidrogen. Atom hidrogen yang teradsorpsi pada permukaan spesimen memiliki kecenderungan untuk terabsorpsi dan berdifusi pada fitur dalam struktur mikro seperti kisi kristal secara intertisi. Saat berdifusi secara intertisi pada kisi kristal, atom hidrogen dapat terperangkap oleh fitur-fitur dalam struktur mikro seperti ruang dislokasi, batas butir, dan *vacancy*. Hal ini yang menyebabkan hidrogen terabsorpsi kedalam spesimen dan merubah nilai dari puncak a.1 dalam kurva voltammogram pada gambar 4.12.

C. Scanning Electron Microscopy – Electron Dispersive X-ray Spectroscopy

Pengujian *scanning electron microscopy* dilakukan untuk mengetahui morfologi lapisan oksida yang terbentuk setelah pengujian *EHT* pada permukaan spesimen uji.



(a)



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	1.72	5.56	104.69	10.53	0.0046	1.2608	0.2117	1.0000
O K	11.37	27.61	2723.12	6.75	0.0609	1.2127	0.4414	1.0000
NaK	6.12	10.34	469.79	10.44	0.0094	1.1075	0.1392	1.0004
SiK	0.54	0.75	166.44	8.91	0.0027	1.1133	0.4356	1.0029
MnK	0.51	0.36	111.49	8.35	0.0055	0.9340	0.9995	1.1396
FeK	76.60	53.31	13200.87	1.51	0.7325	0.9498	1.0037	1.0031
CoK	3.14	2.07	460.49	3.39	0.0290	0.9290	0.9918	1.0043

(b)

Gambar 4. 13 Hasil Pengujian Spesimen kode N-2 (a) Scanning Electron Microscopy (b) Electron Dispersive X-ray Spectroscopy

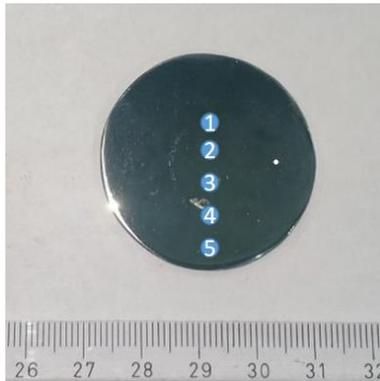
Gambar 4.13(a) adalah foto morfologi lapisan oksida pada spesimen N-2 dengan perbesaran 1000x, 2000x, dan 5000x. Lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan spesimen adalah berupa Fe_2O_3 , yang terbentuk dari ion oksigen yang bereaksi dengan spesimen uji. Pembentukan lapisan oksida berhubungan dengan kurva voltammogram *cyclic voltammetry* pada gambar 4.12, yaitu pada puncak b saat spesimen uji mengalami reaksi oksidasi dengan ion oksigen pada elektrolit dan puncak c saat spesimen uji mengalami reaksi reduksi. Adanya perbedaan nilai pada puncak b dan c, walaupun tidak terlalu signifikan, adalah penyebab pembentukan lapisan oksida pada permukaan spesimen uji.

Pengujian *energy dispersive X-ray spectroscopy* dilakukan untuk mengetahui presentase lapisan oksida yang terbentuk setelah pengujian *EHT* pada permukaan spesimen uji. Gambar

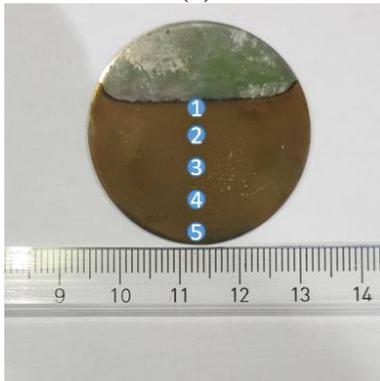
4.13(b) adalah foto titik pengambilan data *EDS* dan data presentase setiap elemen yang ada pada lapisan oksida.

D. *Micro Vickers Hardness*

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari pengujian *electrochemical hydrogenation test* pada nilai kekerasan permukaan spesimen.



(a)



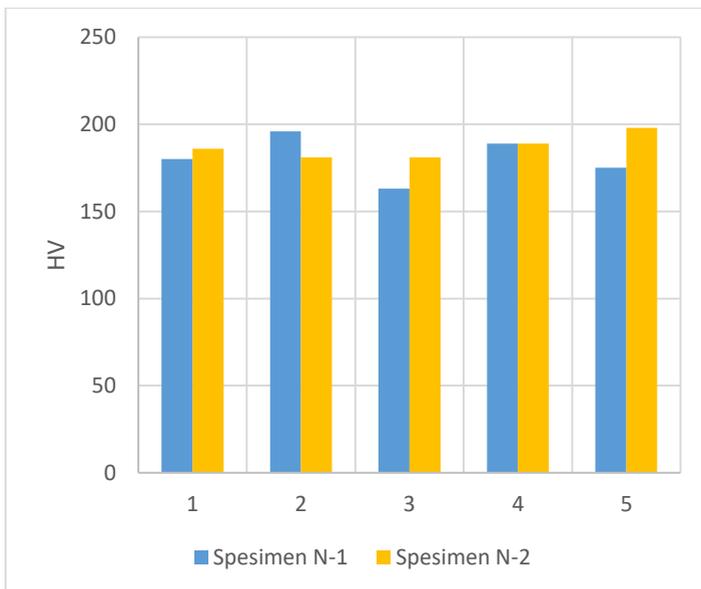
(b)

Gambar 4. 14 Titik Uji Hardness (a) Spesimen kode N-1 (b) Spesimen kode N-2

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan indentasi vickers pada mesin *microhardness*. Pengujian dilakukan sebanyak 5 titik pada spesimen dengan kode N-1 sebagai data referensi awal dan pada spesimen dengan kode N-2 sebagai data akhir yang hasil keduanya akan dibandingkan.

Tabel 4. 2 Nilai Kekerasan HV Spesimen kode N-1 dan N-2

<i>Micro Vickers Hardness (HV)</i>						
Spesimen	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Rata-rata
N-1	180	196	163	189	175	180,6
N-2	186	181	181	189	198	187



Gambar 4. 15 Perbandingan Nilai Kekerasan HV Spesimen kode N-1 dan N-2

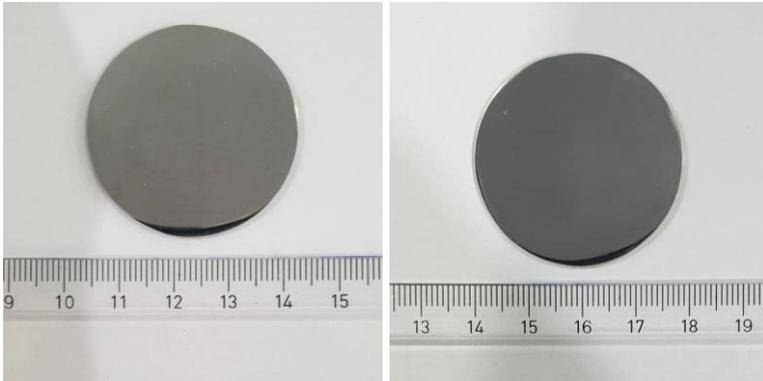
Spesimen dengan kode N-1 yang tidak diuji *electrochemical hydrogenation test* memiliki nilai kekerasan vickers pada titik pertama sebesar 180 HV, titik kedua sebesar 196 HV, titik ketiga sebesar 163 HV, titik keempat sebesar 189 HV, dan titik kelima sebesar 175 HV. Rata-rata nilai kekerasan vickers sebesar 180,6 HV. Nilai kekerasan yang cukup tinggi pada spesimen kode N-1 didapatkan dari struktur mikro dengan fasa perlit dan ferrit, sesuai dengan teori bahwa fasa perlit bersifat lebih keras dari fasa ferrit. Pada gambar 4.11 terlihat bahwa presentase fasa perlit pada spesimen N-1 lebih banyak jika dibandingkan dengan fasa ferrit dan banyaknya butir yang ada pada struktur mikro.

Spesimen dengan kode N-2 yang telah diuji *electrochemical hydrogenation test* memiliki nilai kekerasan vickers pada titik pertama sebesar 186 HV, titik kedua sebesar 181 HV, titik ketiga sebesar 181 HV, titik keempat sebesar 189 HV, dan titik kelima sebesar 198 HV. Rata-rata nilai kekerasan vickers sebesar 187 HV. Nilai kekerasan yang meningkat disebabkan oleh hidrogen yang terabsorpsi kedalam spesimen telah terjebak dalam *trapping sites* yang ada pada struktur mikro, seperti ruang dislokasi, batas butir, dan *vacancy*.

Hasil perbandingan uji kekerasan menunjukkan kenaikan yang tidak terlalu signifikan pada setiap titik uji, ada beberapa titik uji yang tidak menunjukkan naiknya nilai kekerasan. Nilai rata-rata menunjukkan kenaikan yang juga tidak terlalu signifikan.

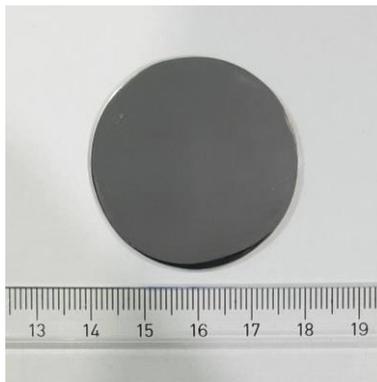
4.4 Hasil Pengujian Spesimen Variasi Perlakuan *Quenching*

Pada gambar 4.16 ditunjukkan kedua spesimen dengan variasi perlakuan *quenching*, yaitu spesimen dengan kode Q-1 dan spesimen dengan kode Q-2.

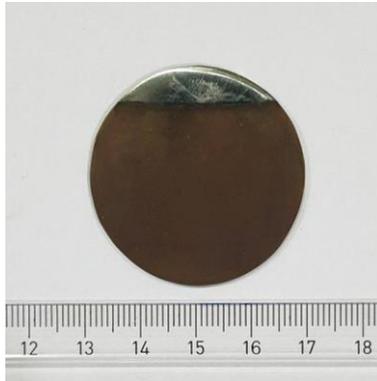


Gambar 4. 16 Foto Makro Spesimen kode Q

Spesimen kode Q-1 digunakan sebagai data referensi awal yang akan diuji metalografi dan *hardness*. Spesimen Q-2 digunakan sebagai spesimen yang akan diuji *electrochemical hydrogenation test*, lalu diuji SEM-EDS dan *hardness*. Kedua spesimen akan dibandingkan nilai kekerasannya dan akan diteliti pengaruh uji *electrochemical hydrogenation test*.



(a)



(b)

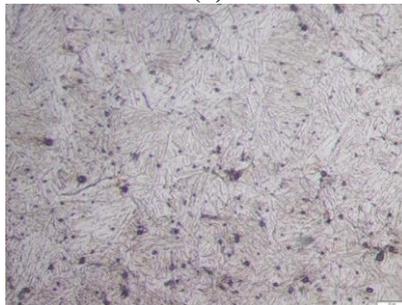
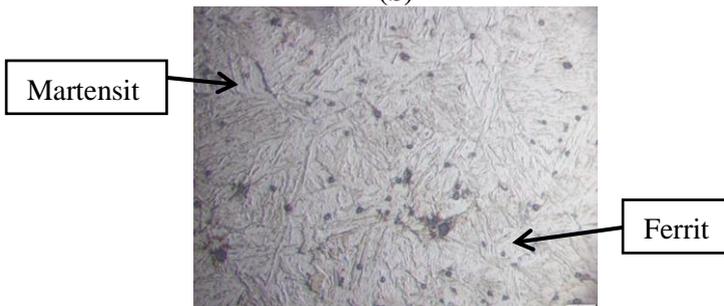
Gambar 4. 17 Foto Makro Spesimen kode Q-2 (a) Sebelum Pengujian EHT (b) Setelah Pengujian EHT

Spesimen pada gambar 4.17(a) adalah kondisi awal sebelum dilakukan *electrochemical hydrogenation test* dan gambar 4.17(b) adalah kondisi akhir setelah dilakukan *electrochemical hydrogenation test*. Spesimen yang berdiameter ± 35 mm tidak seluruh permukaannya terkena elektrolit, melainkan bagian yang warna pada permukaan berubah adalah daerah yang terkena elektrolit saat pengujian berlangsung. Terlihat bahwa adanya lapisan oksida berwarna kuning kecokelatan yang merupakan hasil reaksi saat pengujian berlangsung.

A. Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui perubahan bentuk struktur mikro menggunakan mikroskop optik. Pengujian metalografi diawali dengan mempersiapkan spesimen dari material uji berbentuk pipa terlebih dahulu, dengan membentuk spesimen berdiameter 35 mm dengan tebal 1 mm. Spesimen lalu dibersihkan agar tidak ada kotoran yang menempel dan dapat mengganggu pengujian metalografi, lalu spesimen digrinding dengan urutan grid 80, 220, 400, 600, 800, 1000, 2000, dan 5000. Grinding material

bertujuan untuk menghaluskan permukaan spesimen dan mempermudah terlihat struktur mikronya. Setelah material digrinding, spesimen akan dilakukan proses polishing dengan menggunakan kain bludru dan etching dengan larutan nital. Hasil pengujian metalografi dapat dilihat pada gambar 4.18.

**(a)****(b)**

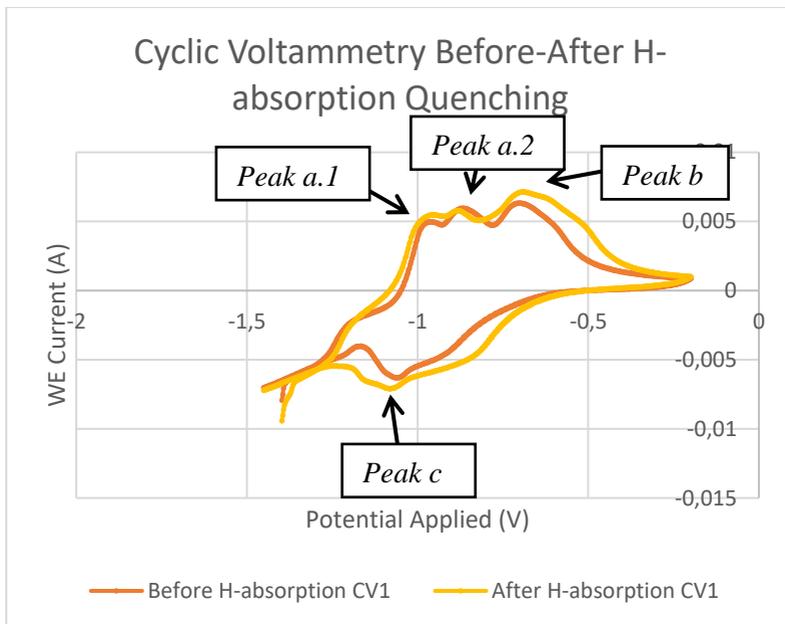
(c)

**Gambar 4. 18 Struktur Mikro Spesimen kode Q (a)
Perbesaran 200x (b) Perbesaran 500x (c) Perbesaran 1000x**

Dari hasil pengujian dan pengamatan metalografi dengan menggunakan alat Olympus terlihat bahwa struktur mikro yang didominasi dengan fasa martensit dan ferrit. Pada gambar 4.18, fasa martensit ditunjukkan dengan warna coklat muda dan berbentuk seperti jarum. Fasa ferrit ditunjukkan dengan warna putih atau bagian yang lebih terang. Sesuai dengan variasi pengujian yang diinginkan oleh peneliti yaitu struktur mikro fasa martensit.

B. *Electrochemical Hydrogenation Test*

Pada gambar 4.19 ditunjukkan kurva *cyclic voltammetry* antara spesimen yang belum di-charge dengan hidrogen dan yang sudah di-charge dengan hidrogen.



Gambar 4. 19 Grafik *Cyclic Voltammetry Before-After H-absorption* Spesimen kode Q

Eksperimen dilakukan dengan mengatur potensial mulai dan selesai pada -1,4 V, lalu potensial maksimal pada -0,2 V. *Open Current Potential* ditentukan dengan program Nova 2.1.4 selama 3600 s, lalu eksperimen dilakukan selama ± 45 menit dengan hasil 5 scan CV. Scan CV1 diambil untuk pembahasan karena kurva yang paling merepresentasikan eksperimen *electrochemical hydrogenation test*.

Kurva *cyclic voltammetry* pada gambar 4.4 memiliki tiga puncak a, b, dan c. Puncak a.1 dan a.2 pada kurva CV *before H-absorption* menunjukkan kurva referensi dari spesimen uji dan reaksi yang berkaitan dengan thiourea (zat yang membantu pembacaan *current* pada percobaan). Puncak b dan c secara berurutan menunjukkan reaksi oksidasi dan reduksi dari spesimen uji terhadap ion yang ada pada elektrolit. Pada

CV after H-absorption, puncak a.1 menunjukkan reaksi oksidasi yang dianggap berasal dari hidrogen yang telah terabsorpsi kedalam spesimen dan puncak a.2 menunjukkan reaksi yang berkaitan dengan thiourea. Pada puncak b dan c secara berurutan menunjukkan reaksi oksidasi dan reduksi dari spesimen uji terhadap ion yang ada pada elektrolit. Pembahasan ini akan difokuskan pada puncak a.

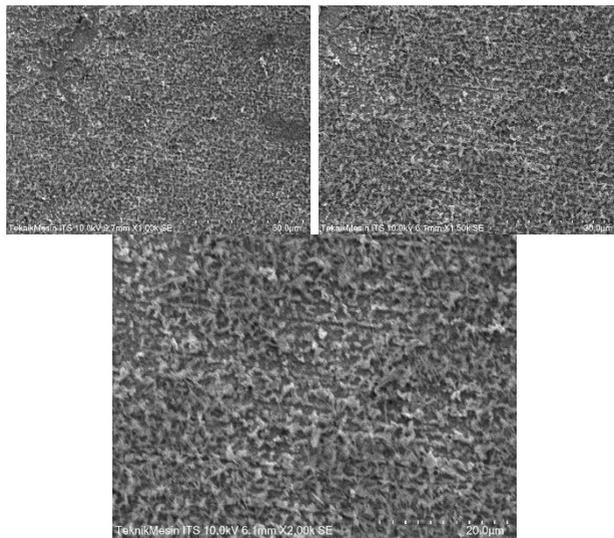
Garis berwarna oranye menunjukkan kurva spesimen BM-2 yang belum di-charge dengan hidrogen. Terlihat bahwa puncak a.1 berada pada 0,0053 A, sedangkan puncak a.2 terdapat pada nilai yang tinggi sekitar 0,0058 A. Garis berwarna kuning menunjukkan kurva spesimen BM-2 yang sudah di-charge dengan hidrogen. Terlihat bahwa puncak a.1 berada pada nilai sekitar 0,0055 A, sedangkan puncak a.2 nilainya jauh dibawa puncak a.2 milik spesimen yang belum di-charge, yaitu pada sekitar 0,0057 A. Pada puncak a.1 kurva *CV after H-absorption* lebih tinggi dari kurva *CV before H-absorption*, sedangkan pada puncak a.2 terjadi sebaliknya. Pada puncak b, kurva garis kuning yaitu spesimen yang sudah di-charge terdapat pada nilai yang sangat tinggi yaitu sekitar 0,0071 A. Sedangkan pada kurva garis oranye yaitu spesimen yang belum di-charge terdapat nilai yang jauh lebih rendah yaitu sekitar 0,0063 A. Pada puncak c, kurva garis kuning yaitu spesimen yang sudah di-charge terdapat pada nilai yang jauh lebih tinggi yaitu sekitar -0,00703 A. Sedangkan pada kurva garis oranye yaitu spesimen yang belum di-charge terdapat nilai yang lebih rendah yaitu sekitar -0,0062 A.

Hal ini terjadi karena pada *CV before H-absorption*, spesimen Q-2 diasumsikan sudah terdapat hidrogen yang telah terabsorpsi maka dari itu puncak a.1 ada dengan nilai yang tinggi. Setelah dilakukannya *H-Charging*, pada kurva *CV after H-absorption* nilai puncak a.1 mengalami kenaikan yang disebabkan oleh penyerapan hidrogen. Atom hidrogen yang teradsorpsi pada permukaan spesimen memiliki kecenderungan untuk terabsorpsi dan berdifusi pada fitur

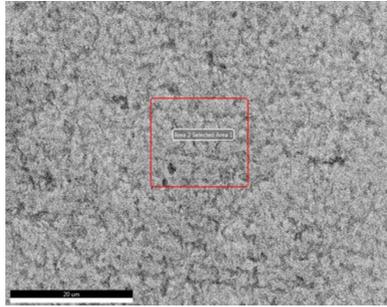
dalam struktur mikro seperti kisi kristal secara intertisi. Saat berdifusi secara intertisi pada kisi kristal, atom hidrogen dapat terperangkap oleh fitur-fitur dalam struktur mikro seperti ruang dislokasi, batas butir, dan *vacancy*. Hal ini yang menyebabkan hidrogen terabsorpsi kedalam spesimen dan merubah nilai dari puncak a.1 dalam kurva voltammogram pada gambar 4.19.

C. Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

Pengujian *scanning electron microscopy* dilakukan untuk mengetahui morfologi lapisan oksida yang terbentuk setelah pengujian *EHT* pada permukaan spesimen uji.



(a)



Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	19.05	42.36	7.31
NaK	6.68	10.34	16.3
FeK	74.26	47.3	4.28

(b)

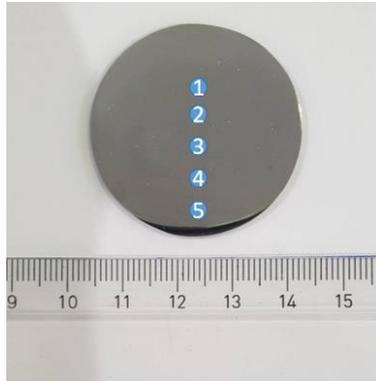
Gambar 4. 20 Hasil Pengujian Spesimen kode Q-2 (a) Scanning Electron Microscopy (b) Electron Dispersive X-ray Spectroscopy

Gambar 4.20(a) adalah foto morfologi lapisan oksida pada spesimen Q-2 dengan perbesaran 1000x, 1500x, dan 2000x. Lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan spesimen adalah berupa Fe_2O_3 , yang terbentuk dari ion oksigen yang bereaksi dengan spesimen uji. Pembentukan lapisan oksida berhubungan dengan kurva voltammogram *cyclic voltammetry* pada gambar 4.19, yaitu pada puncak b saat spesimen uji mengalami reaksi oksidasi dengan ion oksigen pada elektrolit dan puncak c saat spesimen uji mengalami reaksi reduksi. Adanya perbedaan nilai pada puncak b dan c, walaupun tidak terlalu signifikan, adalah penyebab pembentukan lapisan oksida pada permukaan spesimen uji.

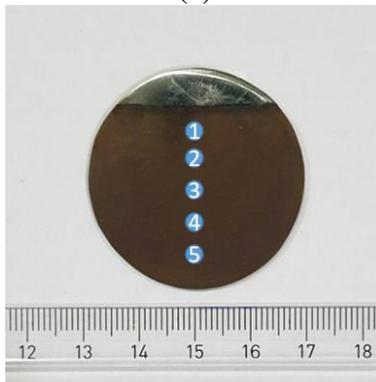
Pengujian *energy dispersive X-ray spectroscopy* dilakukan untuk mengetahui presentase lapisan oksida yang terbentuk setelah pengujian *EHT* pada permukaan spesimen uji. Gambar 4.20(b) adalah foto titik pengambilan data *EDS* dan data presentase setiap elemen yang ada pada lapisan oksida.

D. *Micro Vickers Hardness*

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari pengujian *electrochemical hydrogenation test* pada nilai kekerasan permukaan spesimen.



(a)



(b)

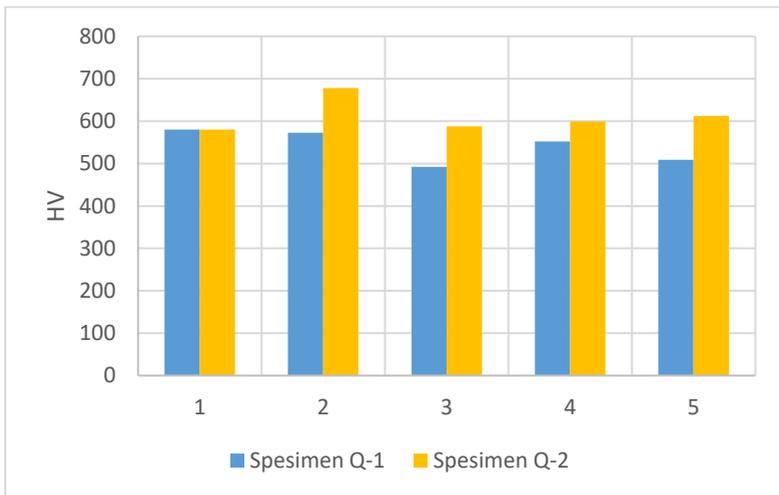
Gambar 4. 21 Titik Uji Hardness (a) Spesimen kode Q-1 (b) Spesimen kode Q-2

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan indentasi vickers pada mesin *microhardness*. Pengujian

dilakukan sebanyak 5 titik pada spesimen dengan kode Q-1 sebagai data referensi awal dan pada spesimen dengan kode Q-2 sebagai data akhir yang hasil keduanya akan dibandingkan.

Tabel 4. 3 Nilai Kekerasan HV Spesimen kode Q-1 dan Q-2

<i>Micro Vickers Hardness (HV)</i>						
Spesimen	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Rata-rata
Q-1	580	573	492	552	509	541,2
Q-2	580	678	588	599	612	611,4



Gambar 4. 22 Perbandingan Nilai Kekerasan HV Spesimen kode Q-1 dan Q-2

Spesimen dengan kode Q-1 yang tidak diuji *electrochemical hydrogenation test* memiliki nilai kekerasan vickers pada titik pertama sebesar 580 HV, titik kedua sebesar 573 HV, titik ketiga sebesar 492 HV, titik keempat sebesar

552 HV, dan titik kelima sebesar 509 HV. Rata-rata nilai kekerasan vickers sebesar 541,2 HV. Nilai kekerasan yang tinggi pada spesimen kode Q-1 didapatkan dari struktur mikro dengan fasa martensit dan ferrit, sesuai dengan teori bahwa fasa martensit memiliki sifat yang keras karena struktur kristal yang berbentuk BCT (*body centered tetragonal*). Pada gambar 4.18 terlihat bahwa fasa martensit, dengan bentuk seperti jarum, pada spesimen Q-1 mendominasi fasa pada struktur mikro.

Spesimen dengan kode Q-2 yang telah diuji *electrochemical hydrogenation test* memiliki nilai kekerasan vickers pada titik pertama sebesar 580 HV, titik kedua sebesar 678 HV, titik ketiga sebesar 588 HV, titik keempat sebesar 599 HV, dan titik kelima sebesar 612 HV. Rata-rata nilai kekerasan vickers sebesar 611,4 HV. Nilai kekerasan yang meningkat disebabkan oleh hidrogen yang terabsorpsi kedalam spesimen telah terjebak dalam *trapping sites* yang ada pada struktur mikro, seperti ruang dislokasi, batas butir, dan *vacancy*.

Hasil perbandingan uji kekerasan menunjukkan kenaikan yang cukup signifikan pada setiap titik uji dan pada nilai rata-ratanya, yaitu sebesar 60,4 HV.

4.5 Pembahasan Perbandingan Hasil Uji Setiap Variasi Spesimen

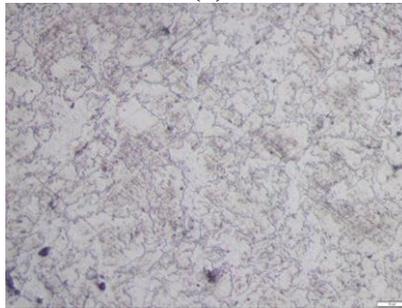
Pada Sub-bab ini akan dijelaskan pembahasan mengenai perbandingan dari ketiga variasi spesimen uji kode BM, N, dan Q dalam pengujian metalografi, *electrochemical hydrogenation test*, dan uji *micro Vickers hardness*.

4.5.1 Pembahasan Uji Metalografi

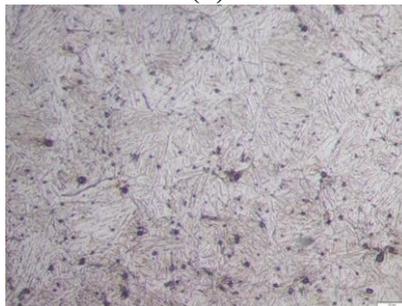
Pengujian Metalografi dilakukan pada spesimen kode BM-1 (*base material*), spesimen kode N-1 (*normalized*), dan spesimen kode Q-1 (*quenched*) untuk dianalisa struktur mikronya dan digunakan sebagai variasi pada pengujian *electrochemical hydrogenation test*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 23 Variasi Struktur Mikro Perbesaran 500x (a) Spesimen kode BM-1 (b) Spesimen kode N-1 (c) Spesimen kode Q-1

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui perubahan bentuk struktur mikro menggunakan mikroskop optik. Pengujian metalografi diawali dengan mempersiapkan spesimen dari material uji berbentuk pipa terlebih dahulu, dengan membentuk spesimen berdiameter ± 35 mm. Spesimen lalu digrinding dengan urutan grid 80, 220, 400, 600, 800, 1000, 2000, dan 5000. Grinding material bertujuan untuk menghaluskan permukaan spesimen dan mempermudah terlihat struktur mikronya. Setelah material digrinding, spesimen akan dilakukan proses polishing dengan menggunakan kain bludru dan etching dengan larutan nital. Hasil pengujian metalografi dapat dilihat pada gambar 4.22.

Spesimen kode BM-1, yaitu tanpa variasi perlakuan panas atau *base material*, memiliki struktur mikro yang didominasi fasa perlit dan ferrit. Pada gambar 4.22(a), fasa perlit ditunjukkan dengan warna cokelat gelap dengan struktur sejajar dan lebih besar. Fasa ferrit ditunjukkan dengan warna putih atau pada bagian yang lebih terang. Penyebab dari bentuk struktur mikro yang seperti pada gambar 4.22(a) adalah dengan diasumsikan material dari spesimen telah mengalami proses perlakuan panas full anil pada saat pengoperasiannya di *waterwall*, temperature operasi mencapai 1000°C dan penahanan yang lama.

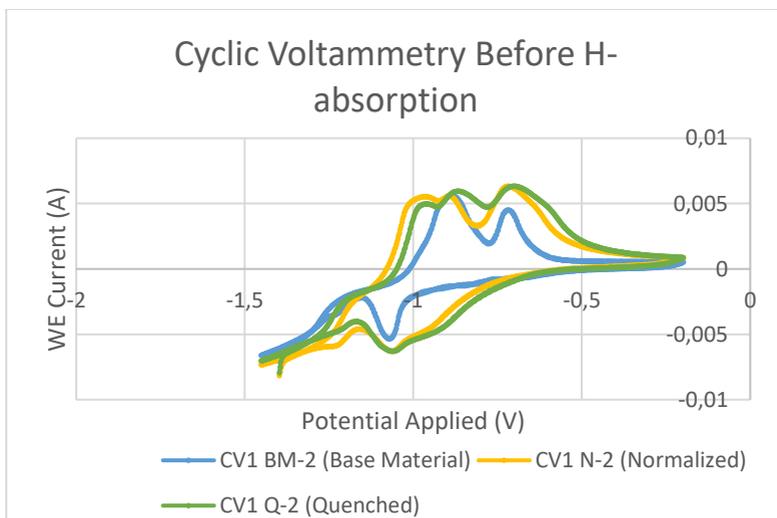
Spesimen kode N-1, yaitu dengan variasi perlakuan panas *normalizing*, memiliki struktur mikro yang didominasi fasa perlit dan ferrit. Pada gambar 4.22(b), fasa perlit ditunjukkan dengan warna cokelat berbentuk menggumpal dengan struktur yang acak dan *uniform*. Fasa ferrit ditunjukkan dengan warna putih atau pada bagian yang lebih terang. Penyebab dari bentuk struktur mikro yang seperti pada gambar 4.22(b) adalah karena spesimen telah mengalami proses perlakuan panas *normalizing* dengan pendinginan media temperatur ruangan. Bertujuan untuk mengembalikan struktur mikro yang berubah akibat proses *cold working* pada pembuatan bentuk pipa yang digunakan pada *waterwall*.

Struktur mikro spesimen kode N-1 memiliki fasa yang sama dengan BM-1 yaitu perlit dan ferrit, tetapi memiliki bentuk yang berbeda yaitu lebih *uniform* dan tidak sejajar.

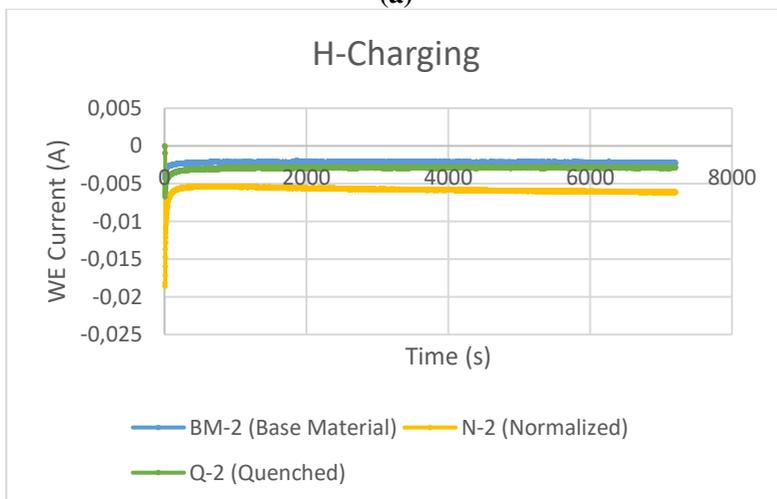
Spesimen kode Q-1, yaitu dengan variasi perlakuan panas *quenching*, memiliki struktur mikro yang didominasi fasa martensit dan ferrit. Pada gambar 4.22(c), fasa martensit ditunjukkan dengan warna coklat muda berbentuk seperti jarum dengan struktur yang acak dan *uniform* pada setiap areanya. Fasa ferrit ditunjukkan dengan warna putih atau pada bagian yang lebih terang diantara fasa martensit. Penyebab dari bentuk struktur mikro yang seperti pada gambar 4.22(c) adalah karena spesimen telah mengalami proses perlakuan panas *quenching* dengan pendinginan cepat media air. Fasa austenit saat proses pemanasan didinginkan secara cepat membuat austenit tidak sempat bertransformasi menjadi perlit.

4.5.2 Pembahasan *Electrochemical Hydrogenation Test*

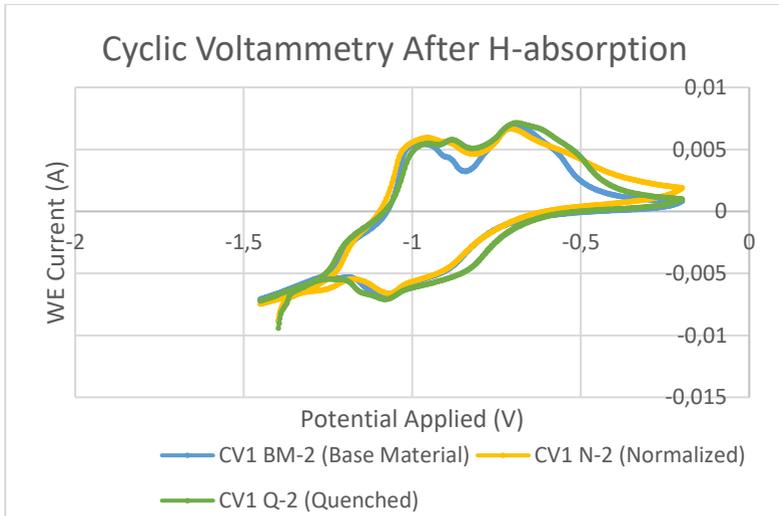
Pada gambar 4.24 ditunjukkan kurva perbandingan *CV before H-absorption*, *H-Charging*, dan *CV after H-absorption* ketiga variasi spesimen BM-2 (*base material*), N-2 (*Normalized*), dan Q-2 (*Quenched*).



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 24 Grafik *Cyclic Voltammetry* Spesimen kode BM-2, N-2, dan Q-2 (a) *Before H-absorption* (b) *H-Charging* (c) *After H-absorption*

Eksperimen dilakukan dengan *CV before H-absorption* terlebih dahulu, dengan mengatur potensial mulai pada -1,4 V, lalu mengatur potensial maksimal pada -0,2 V sebelum kembali ke potensial akhir pada -1,4 V. Terdapat tiga puncak yaitu a.1.2, b, dan c. Ketiga variasi dibandingkan pada ketiga puncaknya. Eksperimen dilanjutkan dengan melakukan *H-Charging* dengan memberikan potensial sebesar -1,25 V selama 7200 s pada ketiga spesimen untuk melihat respon dari struktur mikro variasi spesimen. Eksperimen lalu dilanjutkan dengan melakukan *CV after H-absorption* dengan prosedur yang sama dengan *CV before H-absorption*.

Pada gambar 4.24(a), yaitu grafik kurva *CV before H-absorption*, terlihat bahwa kurva spesimen kode BM-2 dengan warna biru tidak memiliki puncak a.1 dan hanya terdapat puncak a.2 yang nilai hampir sama dengan puncak

kurva spesimen kode N-2 dengan warna kuning. Pada puncak b, spesimen kode BM-2 memiliki nilai terendah jika dibandingkan dengan spesimen lainnya. Pada puncak c, spesimen kode BM-2 memiliki nilai yang tertinggi jika dibandingkan dengan kedua spesimen lainnya. Spesimen kode N-2 dengan warna kuning memiliki puncak a.1 dan a.2 yang nilainya hampir sama. Pada puncak b, spesimen kode N-2 memiliki nilai yang cukup tinggi dan hampir sama dengan spesimen Q-2. Pada puncak c, spesimen kode N-2 memiliki nilai yang hampir sama dengan spesimen Q-2 dan lebih tinggi dari spesimen BM-2. Spesimen kode Q-2 dengan warna hijau memiliki puncak a.1 yang lebih rendah dibandingkan dengan spesimen kode N-2, tetapi memiliki puncak a.2 yang paling tinggi jika dibandingkan dengan spesimen lainnya. Pada puncak b, spesimen kode Q-2 memiliki nilai yang cukup sama dengan spesimen kode N-2, dengan *slope* yang lebih besar. Pada puncak c, spesimen kode Q-2 memiliki nilai yang sama tingginya dengan spesimen N-2, dengan *slope* yang lebih besar.

Hal ini menunjukkan bahwa spesimen kode BM-2 diasumsikan tidak memiliki hidrogen yang telah terabsorpsi sebelum dilakukannya penelitian. Berbeda dengan kedua spesimen lainnya, yaitu spesimen kode N-2 dan Q-2, yang memiliki puncak a.1 sebelum dilakukannya *H-Charging*, yang dapat diasumsikan bahwa sebelum dilakukannya penelitian *electrochemical hydrogenation test* ini kedua spesimen sudah memiliki hidrogen yang terabsorpsi atau adanya impuritis yang mengganggu penelitian.

Pada gambar 4.24(b), yaitu grafik kurva *H-Charging*, terlihat bahwa spesimen kode BM-2 yang ditunjukkan dengan kurva warna biru mengalami *slope* yang paling tinggi yaitu pada $-0,0021$ A, lalu konstan pada nilai yang sama sampai waktu *charging* selesai. Spesimen kode Q-2 yang ditunjukkan dengan kurva warna hijau mengalami *slope* yang juga tinggi yaitu pada $-0,0029$ A, lalu konstan pada nilai yang sama

sampai waktu *charging* selesai. Spesimen kode N-2 yang ditunjukkan dengan kurva warna kuning mengalami *slope* pada $-0,0055$ A, tetapi nilai cenderung menurun semakin lamanya waktu *charging*.

Pada gambar 4.24(c), yaitu grafik kurva *CV after H-absorption*, terlihat bahwa kurva spesimen kode BM-2 dengan warna biru memiliki puncak a.1 yang sama tingginya dengan spesimen Q-2 dan puncak a.2 yang nilai paling rendah dari puncak kurva spesimen lainnya. Pada puncak b, spesimen kode BM-2 memiliki nilai yang sama dengan spesimen kode N-2. Pada puncak c, spesimen kode BM-2 memiliki nilai yang hampir sama dengan spesimen kode N-2, tetapi memiliki *slope* yang lebih besar. Spesimen kode N-2 dengan warna kuning memiliki puncak a.1 yang lebih besar dari puncak a.2, yang nilainya lebih rendah dari spesimen kode Q-2. Pada puncak b, spesimen kode N-2 memiliki nilai yang cukup tinggi dan hampir sama dengan spesimen BM-2, dengan *slope* yang lebih kecil. Pada puncak c, spesimen kode N-2 memiliki nilai yang hampir sama dengan spesimen BM-2, dengan *slope* yang juga lebih kecil. Spesimen kode Q-2 dengan warna hijau memiliki puncak a.1 yang nilainya sama dengan spesimen kode BM-2 dan memiliki puncak a.2 yang nilainya hampir sama dengan spesimen N-2. Pada puncak b, spesimen kode Q-2 memiliki nilai yang paling tinggi jika dibandingkan dengan spesimen lainnya. Pada puncak c, spesimen kode Q-2 memiliki nilai yang paling tinggi, dengan *slope* yang lebih besar.

Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi hidrogen yang ter-absorpsi kedalam spesimen kode N-2 lebih tinggi jika dibandingkan kedua spesimen lainnya. Spesimen kode BM-2 dan Q-2 memiliki nilai puncak a.1 yang hampir sama, yang artinya dalam waktu *H-Charging* 7200 s konsentrasi hidrogen yang ter-absorpsi kedalam kedua spesimen tersebut juga hampir sama. Spesimen kode N-2 memiliki struktur mikro yang sama dengan spesimen kode BM-2 dengan nilai puncak

a.1 yang berbeda, mengindikasikan adanya perbedaan ukuran butir pada struktur mikro yang juga berfungsi sebagai *trapping site* pada struktur mikro. Dibuktikan dengan gambar 4.22(a) dan (b) yang menunjukkan perbedaan ukuran butir fasa pada spesimen kode N-2 dan spesimen kode BM-2.

4.5.3 Pembahasan Uji *Micro Vickers Hardness*

Pada tabel 4.4 ditunjukkan nilai kekerasan pada ketiga variasi spesimen dalam kondisi tanpa uji *EHT* (BM-1, N-1, dan Q-1) dan dengan uji *EHT* (BM-2, N-2, dan Q-2).

Tabel 4. 4 Nilai Kekerasan Setiap Variasi Spesimen

<i>Micro Vickers Hardness (HV)</i>							
Spesimen tanpa <i>EHT</i>				Spesimen setelah <i>EHT</i>			
Spesimen	Titik	Nilai Kekerasan	Rata-rata	Spesimen	Titik	Nilai Kekerasan	Rata-rata
BM-1	1	219	208,4	BM-2	1	206	216,2
	2	201			2	218	
	3	207			3	221	
	4	204			4	219	
	5	211			5	217	
N-1	1	180	180,6	N-2	1	186	187
	2	196			2	181	
	3	163			3	181	
	4	189			4	189	
	5	175			5	198	
Q-1	1	580	541,2	Q-2	1	580	611,4
	2	573			2	678	
	3	492			3	588	
	4	552			4	599	

	5	509			5	612	
--	---	-----	--	--	---	-----	--

Pengujian *micro vickers hardness* bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan dari setiap variasi spesimen yang memiliki struktur mikro yang berbeda, yang disebabkan oleh perlakuan berbeda yang dialami masing-masing variasi spesimen seperti yang sudah dijelaskan pada sub-bab 4.5.1 mengenai pengujian metalografi. Ada pula variasi spesimen yang mengalami pengujian *electrochemical hydrogenation test* yang menurut teori juga mempengaruhi nilai kekerasan dari setiap spesimen.

Tabel 4.4 menunjukkan nilai kekerasan ketiga variasi spesimen. Spesimen kode Q-1 yang memiliki bentuk struktur mikro fasa martensit dan ferrit memiliki rata-rata nilai kekerasan yang paling tinggi, yaitu pada 541,2 HV. Disusul dengan spesimen kode BM-1 yang memiliki bentuk struktur mikro fasa perlit dan ferrit yang lebih sejajar dengan nilai kekerasan rata-rata yaitu pada 208,4 HV. Spesimen kode N-1, yang memiliki bentuk struktur mikro fasa perlit dan ferrit, memiliki nilai kekerasan rata-rata pada 180,6 HV.

Pada tabel 4.4 juga ditunjukkan nilai kekerasan ketiga variasi spesimen yang mengalami pengujian *electrochemical hydrogenation test*, yaitu spesimen kode BM-2, N-2, dan Q-2. Ketiga variasi spesimen mengalami peningkatan nilai kekerasan rata-rata. Spesimen kode BM-2 memiliki nilai kekerasan rata-rata 216,2 HV, meningkat sebesar 7,8 HV setelah mengalami pengujian *electrochemical hydrogen test*. Spesimen kode N-2 memiliki nilai kekerasan rata-rata 187 HV, meningkat sebesar 6,4 HV. Spesimen kode Q-2 memiliki nilai kekerasan rata-rata 611,4 HV, meningkat sebesar 70,2 HV. Spesimen Q-2 mengalami peningkatan nilai kekerasan rata-rata yang paling tinggi jika dibandingkan dengan variasi spesimen lainnya.

Nilai kekerasan pada semua variasi spesimen mengalami peningkatan nilai kekerasan. Hal ini dapat terjadi akibat absorpsi hidrogen yang merata pada seluruh permukaan spesimen. Nilai kekerasan pada permukaan ini juga dapat diindikasikan sebagai pengaruh absorpsi hidrogen yang terjadi pada semua variasi spesimen.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal dari penelitian. Diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Struktur mikro dan perlakuan terhadap spesimen dapat mempengaruhi penyerapan hidrogen, dibuktikan dengan grafik *CV before-after H-absorption* pada setiap variasi spesimen uji.
2. Spesimen kode N-2 dengan variasi perlakuan *normalizing* memiliki kemampuan absorpsi konsentrasi hidrogen yang paling tinggi, dibandingkan dengan spesimen kode BM-2 dan Q-2. Hal ini berarti spesimen kode Q-2 dengan variasi perlakuan *quenching* memiliki ketahanan yang paling tinggi terhadap *hydrogen damage*.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan beberapa saran. Diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan peralatan yang lebih memadai untuk pengambilan data *electrochemical hydrogenation test*.
2. Menambah variabel waktu *H-charging* dalam penelitian selanjutnya untuk mendapatkan hasil yang lebih valid.
3. Menghilangkan *absorbed hydrogen* pada spesimen sebelum diuji *electrochemical hydrogenation test*, agar hasil pengujian lebih tepat dengan menghitung *absorbed hydrogen* yang hanya diberikan saat *H-charging*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

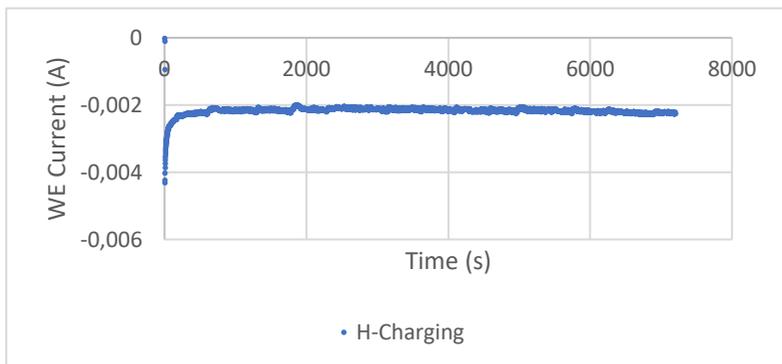
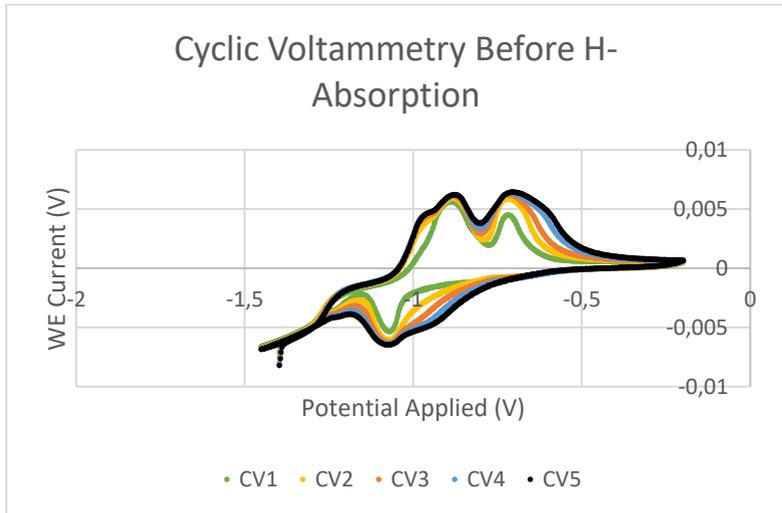
DAFTAR PUSTAKA

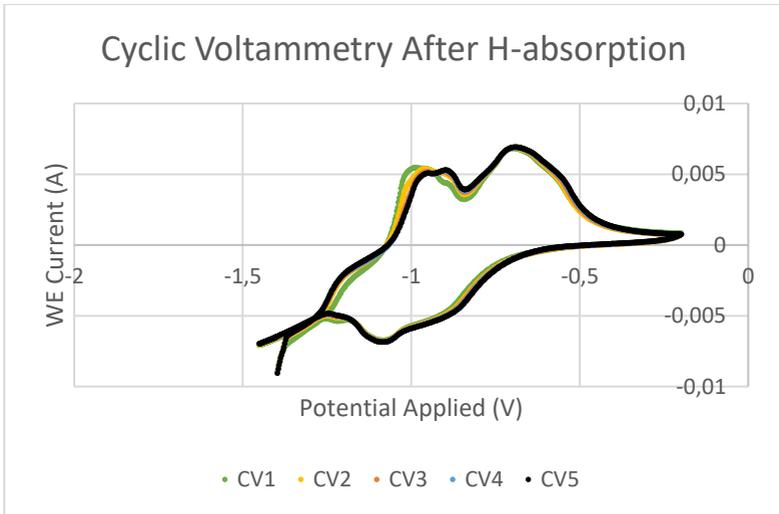
- [1] Sidang, Agung. (2020). **Studi Analisis Kerusakan Tube Area Waterwall Boiler Akibat Hydrogen Damage pada PLTU Batubara**. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [2] Eeckhout et al. (2018). *The Effect of Microstructural Characteristics on the Hydrogen Permeation Transient in Quenched and Tempered Martensitic Alloys*.
- [3] Ozdirik et al. (2018). *Comparison of Electrochemical and Thermal Evaluation of Hydrogen in Steel Alloys Having Different Microstructures*. Journal of The Electrochemical Society.
- [4] Edward L. Langer. (1990). *ASM Handbook Properties and Selection: Iron, Steel and High-Performance Alloy, First Edition*, The Material Information Society.
- [5] Suherman, Wahid. (2001). **Perlakuan Panas**. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [6] Callister, William. (2007). *Material Science and Engineering an Introduction*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [7] Brooks, C. R. & A. Choudbury. (2002). *Failure Analysis of Engineering Materials*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [8] Avner, Sidney H. (1974). *Introduction to Physical Metallurgy*. McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- [9] Rumahorbo, Zhulkivly. (2020). *Analisis Kegagalan Waterwall Tube Pada Boiler Subcritical Kapasitas Pembangkit 625 MW*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [10] Fontana, Mars. (1986). *Corrosion Engineering, Third Edition*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [11] Yokogawa Inc. (2017). *Application Note: Hydrogen Permeation*. Yokogawa Corporation of America.

- [12] Revie, W. & Uhlig, H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control, Fourth Edition*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken New Jersey.
- [13] Jones, Denny A. (1996). *Principles and Prevention of Corrosion, Second Edition*, Prentice-Hall Inc., New Jersey.

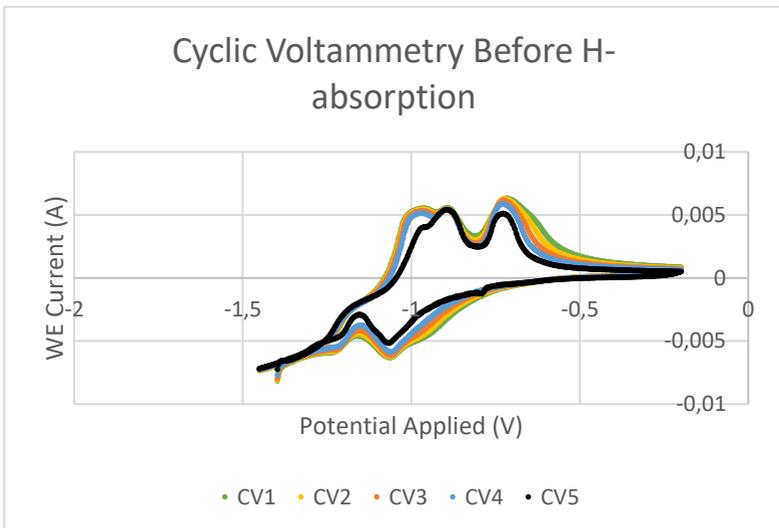
LAMPIRAN

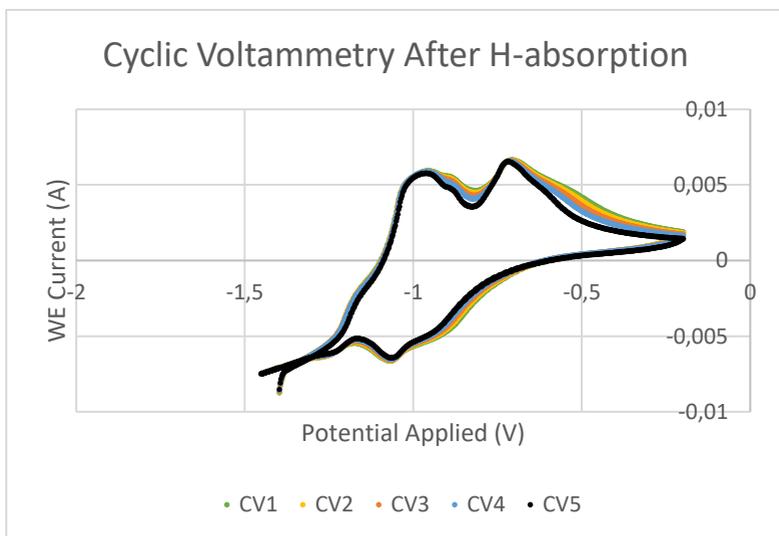
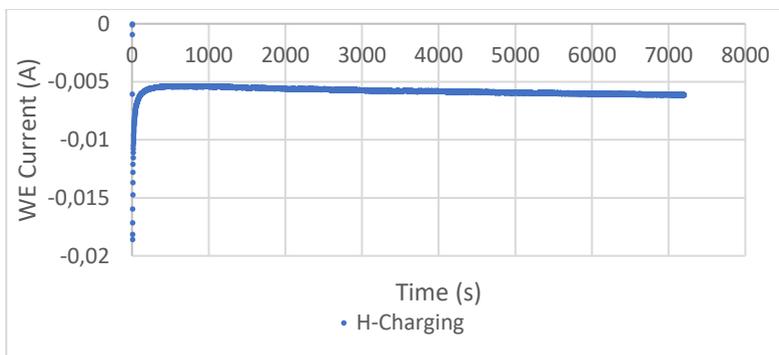
- Hasil pengujian *Electrochemical Hydrogenation Test* dengan metode *Cyclic Voltammetry*



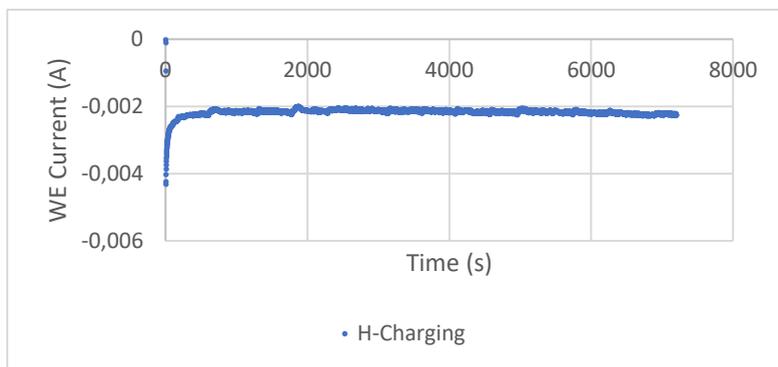
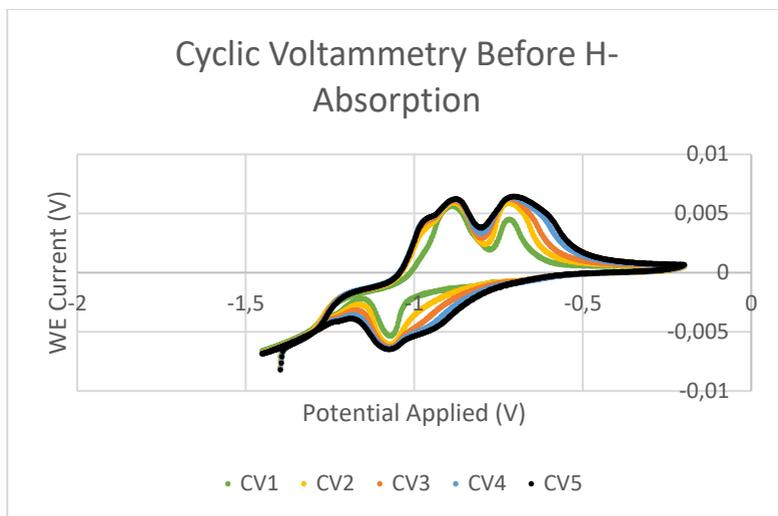


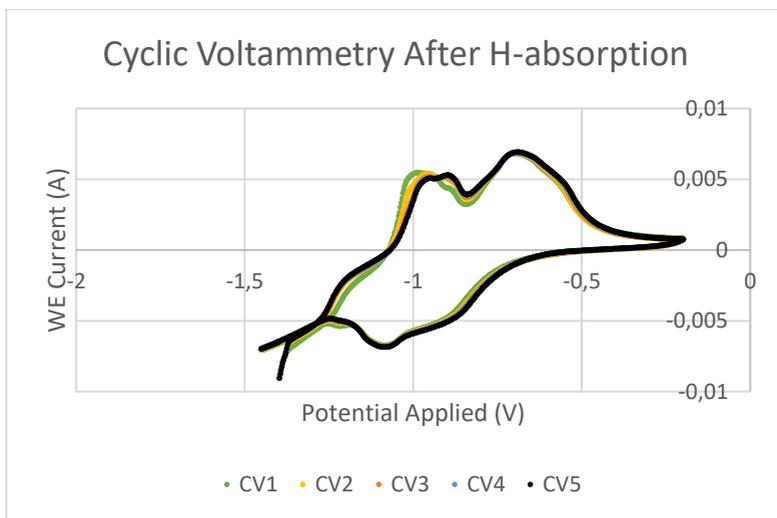
Spesimen Base Material





Specimen Normalized





Spesimen *Quenched*

• Hasil Pengujian *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*

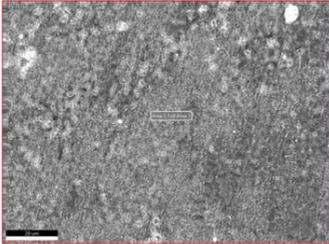
EDAX APEX

Page 1

04032021

Author: Teknik Mesin ITS
 Creation: 03/04/2021 2:16:27 PM
 Sample Name: A1

Area 1

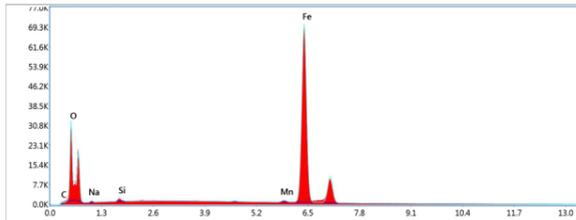


Page 2

EDAX APEX

Full Area 1

137.200 Mg: 1000 Takeoff: 30 LiveTime (s): 78.4 AmpTime (uA.s): 3.84 ResoluTion: (eV)103.6



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	1.51	5.05	85.00	10.64	0.0041	1.2663	0.2164	1.0000
O K	12.63	31.76	2758.75	6.71	0.0685	1.2181	0.4454	1.0000
NaK	0.87	1.52	57.31	14.62	0.0013	1.1126	0.1326	1.0004
SiK	0.81	0.88	170.84	8.56	0.0030	1.1186	0.4394	1.0030
MnK	0.63	0.46	123.34	5.69	0.0057	0.9390	0.9996	1.1384
FeK	83.75	60.33	13030.11	1.49	0.8037	0.9549	1.0037	1.0012

Spesimen kode BM-2

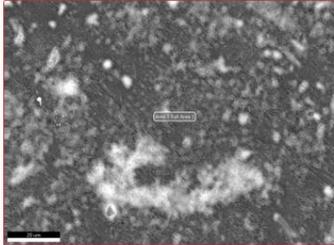
EDAX APEX

Page 1

04032021

Author: Teknik Mesin ITS
 Creation: 03/04/2021 12:25:55 PM
 Sample Name: A2

Area 1

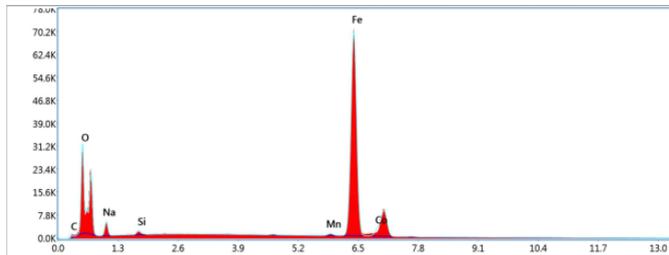


EDAX APEX

Page 2

Full Area 1

EV:20 Mag:1000 Takeoff:30 LiveTime(s):77.8 AmpTime(μs):3.84 Resolution:(eV)133.0



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	1.72	5.56	104.69	10.53	0.0046	1.2608	0.2117	1.0000
O K	11.37	27.61	2723.12	6.75	0.0609	1.2127	0.4414	1.0000
NaK	6.12	10.34	469.79	10.44	0.0094	1.1075	0.1392	1.0004
SiK	0.54	0.75	166.44	8.91	0.0027	1.1133	0.4356	1.0029
MnK	0.51	0.36	111.49	8.35	0.0055	0.9340	0.9995	1.1396
FeK	76.60	53.31	13200.87	1.51	0.7325	0.9498	1.0037	1.0031
CoK	3.14	2.07	460.49	3.39	0.0290	0.9290	0.9918	1.0043

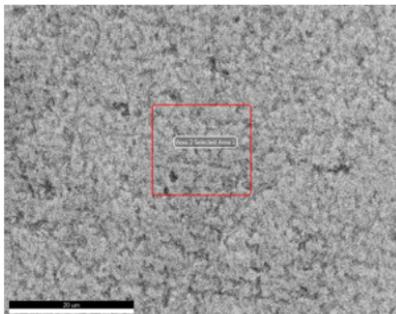
Spesimen kode N-2

EDAX APEX

SWR 2021

Author: Teknik Mesin ITS
Creation: 3/1/2021 3:04:15 PM
Sample Name: B2 Fariza

Area 2

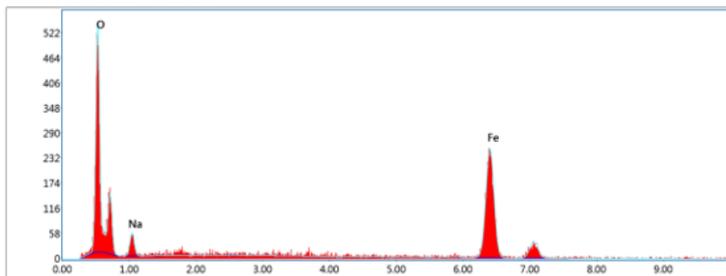


Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	19.05	42.36	7.31
NaK	6.66	10.34	16.3
FeK	74.28	47.3	4.28

Selected Area 1

KV: 15 Mag:2000 Takeoff: 23.0 Live Time(s): 100 Amp 3.84 Resolution:(eV) 133.8



Spesimen kode Q-2

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Fariza Julio Residena, lahir di Yogyakarta pada 13 Juli 1998. Merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Sudianto Surip Diposumarto dan Ibu Yuni Kurnia Putra. Penulis telah menempuh pendidikan formal pertama di TK ABA Karanganyar, kemudian melanjutkan pendidikan ke SDIP Daarul Jannah, kemudian melanjutkan pendidikan ke SMP Pilar Indonesia, dan kemudian melanjutkan ke SMA Labschool Cibubur. Penulis diterima di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2016, dengan NRP 02111640000151.

Selama menjalani status sebagai mahasiswa, penulis aktif dalam berbagai kegiatan kemahasiswaan. Kegiatan kemahasiswaan penulis dimulai menjadi ketua angkatan ketiga di angkatan M59. Kemudian penulis aktif mengikuti kepanitiaan dalam kegiatan kecil maupun besar, seperti kegiatan MAKRAB M59, Mechanical City 2016, Kontes Mobil Hemat Energi 2017 (KMHE), GERIGI ITS 2018, dsb. Penulis juga mengemban tanggung jawab sebagai salah satu staf Departemen PSDM, yang kemudian diberikan tanggung jawab sebagai Kepala Biro Kaderisasi Departemen PSDM Himpunan Mahasiswa Mesin FT-IRS ITS, sekaligus menjadi *Steering Committee* dalam kegiatan kaderisasi pada tahun 2018 yang bernama PISTON. Setelah aktif dalam organisasi, penulis aktif dalam kegiatan di Laboratorium Metalurgi Teknik Mesin FT-IRS ITS seperti menjadi asisten praktikum. Untuk kepentingan penelitian ini, penulis dapat dihubungi melalui *email*: fariza.julio@gmail.com