

**KARAKTERISASI KOROSI *SHAPE MEMORY ALLOY* Fe-
Mn-Si DENGAN PENAMBAHAN UNSUR (2,04%Mo;
8,04%Ni; 10,23%Cr) DAN *HOT ROLLING* PADA
LARUTAN H₂SO₄, NaCl, SCP**

SKRIPSI

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



Oleh:

Sahla Sar'ana
3334200079

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

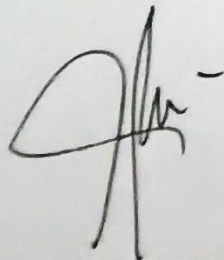
KARAKTERISASI KOROSI *SHAPE MEMORY ALLOY* Fe-Mn-Si DENGAN PENAMBAHAN UNSUR (2,04%Mo; 8,04%Ni; 10,23%Cr) DAN *HOT ROLLING* PADA LARUTAN H₂SO₄, NaCl, SCP

SKRIPSI

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

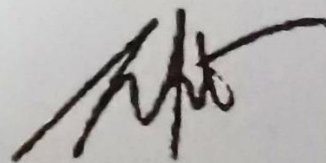
Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 1980030720005011002

Pembimbing II



Miftakhur Rohmah, S.T., M.T.
NIP. 199404082019022005

LEMBAR PERSETUJUAN

KARAKTERISASI KOROSI *SHAPE MEMORY ALLOY* Fe-Mn-Si DENGAN PENAMBAHAN UNSUR (2,04%Mo; 8,04%Ni; 10,23%Cr) DAN *HOT ROLLING* PADA LARUTAN H₂SO₄, NaCl, SCP

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh :

Sahla Sar'ana

3334200079

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal 23 Desember 2024

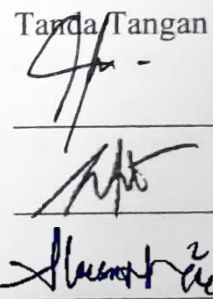
Susunan Dewan Penguji

Penguji I : Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.

Penguji II : Miftakhur Rohmah, S.T., M.T.

Penguji III : Ir.Soesaptri Oediyani, M.E

Tanda Tangan



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

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi


Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 1980030720005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Karakterisasi Korosi *Shape Memory Alloy* Fe-Mn-Si
Dengan Penambahan Unsur (2,04%Mo; 8,04%Ni;
10,23%Cr) Dan *Hot Rolling* Pada Larutan H₂SO₄, NaCl,
SCP

Nama : Sahla Sar'ana

NIM : 3334200079

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Skripsi ini ialah benar hasil karya asli saya dan tidak memuat pernyataan pada skripsi hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan atau literatur yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 07 Februari 2025



Sahla Sar'ana
NIM. 3334200079

ABSTRAK

Korosi merupakan tantangan utama dalam pemanfaatan material, termasuk pada *shape memory alloys* (SMA) berbasis Fe-Mn-Si. SMA adalah material inovatif dengan kemampuan untuk kembali ke bentuk semula setelah deformasi, sehingga banyak diaplikasikan dalam industri teknik dan medis. Namun, korosi dapat menyebabkan SMA menjadi rapuh, kehilangan sifat memori bentuk, dan mengurangi masa pakai material. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan ketahanan korosi SMA berbasis Fe-Mn-Si melalui penambahan unsur Mo, Ni, dan Cr serta variasi persen reduksi ketebalan pada proses *hot rolling*. Metode penelitian yang digunakan meliputi metalografi, *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS), *potensiodynamic*, *open circuit potential* (OCP), dan uji kekerasan untuk menganalisis struktur mikro, sifat mekanik, dan ketahanan korosi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan persen reduksi ketebalan pada proses *hot rolling* secara signifikan meningkatkan ketahanan korosi SMA. Pada persen reduksi 80%, ukuran butir menjadi lebih kecil, menghasilkan nilai laju korosi terendah sebesar 0,289 mpy dalam larutan *simulated concrete pore* (SCP), yang jauh lebih rendah dibandingkan dalam larutan H_2SO_4 (12,45 mpy) dan NaCl (8,67 mpy). Sebaliknya, persen reduksi 50% menghasilkan nilai laju korosi tertinggi sebesar 16,84 mpy. Penambahan unsur Mo, Ni, dan Cr juga terbukti meningkatkan ketahanan korosi SMA, terutama melalui pembentukan lapisan pasif oleh unsur Cr, yang melindungi material dari serangan korosi. Paduan Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr menunjukkan performa terbaik dalam lingkungan korosif H_2SO_4 , NaCl, dan SCP.

Kata Kunci: Fe-Mn-Si, Korosi, Persen Reduksi, *Shape Memory Alloy*, Unsur Paduan

KATA PENGANTAR

Puja dan puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir ini. Penyusunan tugas akhir ini dilaksanakan untuk memenuhi persyaratan kelulusan sebagai sarjana Teknik Metalurgi di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.. selaku Ketua Jurusan sekaligus pembimbing pertama yang membimbing penulis dalam penelitian hingga penyelesaian Skripsi ini
2. Ibu Andinnie Juniarsih, S.T., M.T. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi FT. UNTIRTA.
3. Ibu Miftakhur Rohmah, S.T., M.T. selaku pembimbing kedua dan pembimbing lapangan penulis yang telah membimbing, mengajarkan, memberikan motivasi dan arahan selama penulis melakukan penelitian.
4. Staf pegawai dan peneliti di Laboratorium Karakterisasi Lanjut Metalurgi di BRIN B.J Habibie Serpong yang telah membantu penelitian.
5. Ibu Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T. sebagai dosen pembimbing akademik yang selalu memberikan motivasi bimbingan kepada penulis selama menjalani perkuliahan.
6. Kedua Orang Tua, Alm. Abi Ubaidillah yang sudah memberikan motivasi untuk kuliah terhadap anak-anaknya meski semua anaknya perempuan tapi selalu ditanamkan agar besar menjadi seorang sarjana. Skripsi ini penulis persembahkan untuk Abi semoga Bahagia di alam sana. Umi Endah Rosyidah yang selalu mendoakan dan memberi semangat terhadap penulis sehingga penulis bisa menghadapi sulitnya kehidupan termasuk menjalani skripsi dan menyelesaikannya.

7. Saudara penulis, t dita, t syifa, t hana, najwa dan fiya telah memberi dukungan dan selalu mendengarkan keluhan penulis hingga penulis terus semangat dalam menyelesaikan skripsi ini.
8. Rekan seperjuangan penulis dengan npm 3334200030 yang selalu menemani dan mendukung penuh perjalanan penulis dari mulai mahasiswa baru hingga semester akhir ini.
9. Keluarga Besar Teknik Metalurgi angkatan 2020 yang telah membersamai penulis selama masa pendidikan.dan semua pihak yang turut membantu penulis dalam proses penyusunan Skripsi ini, meskipun tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih terdapat kekurangan, sehingga kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak diharapkan. Penulis berharap agar proposal tugas akhir ini bermanfaat, khususnya bagi penulis dan bagi pembaca pada umumnya. Atas perhatiannya, Penulis mengucapkan Terima Kasih

Cilegon, Desember 2024



Sahla Sar'ana

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
ABSTRAK LEMBAR PERNYATAAN.....	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Sistematika Penulisan	7
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Shape memory alloy</i>	8
2.2 <i>Shape memory alloy Fe-Based</i>	10
2.4 Transformasi Fasa <i>Shape memory alloy</i>	12
2.5 Pengaplikasian <i>Shape memory alloy</i>	15

2.6	<i>Hot rolling</i>	16
2.7	<i>Solution treatment</i>	17
2.8	Korosi	19
2.9	Metalografi	24
2.10	Pengujian <i>Open Circuit Potential</i> (OCP)	26
2.11	Pengujian <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	27
2.12	Pengujian <i>Potentiodynamic</i>	28
2.13	Pengujian Kekerasan	29

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Lokasi dan Waktu Penelitian	31
3.2	Informasi Kode Sampel.....	31
3.3	Diagram Alir Penelitian	32
3.4	Alat dan Bahan	33
3.4.1	Alat-alat yang Digunakan	33
3.4.2	Bahan-bahan yang Digunakan	34
3.5	Prosedur Penelitian	34
3.5.1	Pngujian Spektroskopi Emisi Optik (OES)	35
3.5.2	Proses Austenisasi.....	35
3.5.3	Proses <i>Hot rolling</i>	36
3.5.4	Proses <i>Solution treatment</i>	36
3.5.5	Proses Pengujian dan Analisis	37

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil Pengujian Komposisi Kimia <i>Shape memory alloy</i>	41
-----	---	----

4.2	Hasil Pengujian Metalografi	43
4.3	Hasil Pengujian Kekerasan	50
4.4	Hasil Pengujian Korosi	54
4.4.1	Hasil Pengujian OCP	54
4.4.2	Hasil Pengujian EIS	57
4.4.3	Hasil Pengujian Potensiodinamik	64
4.4.4	Pengamatan Permukaan Setelah Korosi.....	73
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	75
5.2	Saran	76
DAFTAR PUSTAKA		77
LAMPIRAN A CONTOH PERHITUNGAN		84
LAMPIRAN B DATA PENELITIAN		86
LAMPIRAN C GAMBAR ALAT DAN BAHAN		108

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Sifat yang dihasilkan Paduan SMA	11
Tabel 2.2 Komposisi SMA terhadap Transformasi Fasa	14
Tabel 3.1 Informasi Kode Sampel	31
Tabel 4.1 Komposisi Kimia <i>Shape memory alloy</i>	41
Tabel 4.2 Fraksi Fasa dan Ukuran Butir	48
Tabel 4.3 Data Analisis Regresi Linear Berganda Hubungan Fraksi Fasa dan Fraksi Presipitat Terhadap Nilai Kekerasan	53
Tabel 4.4 Hasil Pengujian OCP	57
Tabel 4.5 Parameter EIS baja Fe-Mn-Si-Ni-Cr dalam Larutan H ₂ SO ₄	62
Tabel 4.6 Parameter EIS baja Fe-Mn-Si-Ni-Cr dalam Larutan NaCl	63
Tabel 4.7 Parameter EIS baja Fe-Mn-Si-Ni-Cr dalam Larutan SCP	64
Tabel 4.8 Parameter Korosi Potensiodinamik	71
Tabel B.1 Komposisi Kimia <i>Shape memory alloy</i>	87
Tabel B.2 Data Hasil Ukuran Butir Reduksi 50% dan 80%	87
Tabel B.3 Hasil Uji Kekerasan	88
Tabel B.4 Data Laju Korosi menggunakan H ₂ SO ₄	93
Tabel B.5 Data Laju Korosi menggunakan NaCl	96
Tabel B.6 Data Laju Korosi menggunakan SCP	99

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Prinsip <i>Shape memory alloy</i>	8
Gambar 2.2 Transformasi Fasa pada <i>Shape memory alloy</i>	13
Gambar 2.3 Mekanisme Proses <i>Hot rolling</i>	16
Gambar 2.4. Diagram Keseimbangan Fasa.....	18
Gambar 2.5 Diagram <i>Pourbaix</i> Unsur Paduan	24
Gambar 2.6 Hasil Pengamatan Metalografi SMA Fe-Mn-Si-Cr-Ni-Ti	25
Gambar 2.7 Grafik <i>Open Circuit Potensial</i>	27
Gambar 2.8 (a) Plot <i>Nyquist</i> (b, c) <i>Bode</i> dan <i>phase</i> (d) rangkaian ekuivalen yang digunakan dalam proses <i>fitting</i>	28
Gambar 2.9 Grafik Potensiodinamik	29
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	32
Gambar 3.2 Pengujian OES	35
Gambar 3.3 Proses <i>Hot rolling</i>	36
Gambar 3.4 Proses <i>Solution treatment</i>	36
Gambar 3.5 Mikroskop Optik	38
Gambar 3.6 Pengujian Korosi	39
Gambar 3.7 Pengujian Kekerasan	40
Gambar 4.1 Prediksi Diagram Fasa Menggunakan Jmatpro	42

Gambar 4.2 Struktur Mikro <i>Shape memory alloy</i> Reduksi 50% dan 80% perbesaran 50x Sampel A, sampel B, Sampel C, Sampel D	44
Gambar 4.3 Prediksi Diagram Fasa Paduan Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr Menggunakan Jmatpro	47
Gambar 4.4 Grafik Ukuran Butir Reduksi 50% dan 80%	47
Gambar 4.5 Diagram Batang Nilai Rata-Rata Pengujian Kekerasan SMA	50
Gambar 4.6 Grafik OCP pada Larutan H_2SO_4	55
Gambar 4.7 Grafik OCP pada Larutan NaCl	55
Gambar 4.8 Grafik OCP pada Larutan SCP	56
Gambar 4.9 Rangkaian Sirkuit Model <i>Randles Modified</i> Larutan H_2SO_4	58
Gambar 4.10 Rangkaian Sirkuit Model <i>Randles Modified</i> Larutan NaCl	58
Gambar 4.11 Rangkaian Sirkuit Model <i>Randles Modified</i> Larutan SCP	59
Gambar 4.12 Ilustrasi Mekanisme Perilaku Korosi dan Perilaku Elektrokimia...	59
Gambar 4.13 Grafik EIS pada Larutan H_2SO_4	61
Gambar 4.14 Grafik EIS pada Larutan NaCl	61
Gambar 4.15 Grafik EIS pada Larutan SCP	61
Gambar 4.16 Pengaruh Ukuran Butir terhadap Nilai Laju Korosi a) H_2SO_4 , b) NaCl, c) SCP	67
Gambar 4.17 Grafik Potensiodinamik pada Larutan H_2SO_4	68
Gambar 4.18 Grafik Potensiodinamik pada Larutan NaCl	68
Gambar 4.19 Grafik Potensiodinamik pada Larutan SCP	69
Gambar 4.20 Pengamatan Permukaan Setelah Polarisasi dalam Larutan a) H_2SO_4 , b) NaCl, c) SCP	74

Gambar B.1 Prediksi Diagram Fasa Paduan Fe-Mn-Si	88
Gambar B.2 Prediksi Diagram Fasa Paduan Fe-Mn-Si-Mo	88
Gambar B.3 Prediksi Diagram Fasa Paduan Fe-Mn-Si-Mo-Ni	89
Gambar B.4 Prediksi Diagram Fasa Paduan Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr	89
Gambar B.5 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.A pada Larutan H ₂ SO ₄	91
Gambar B.6 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.B pada Larutan H ₂ SO ₄	91
Gambar B.7 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.C pada Larutan H ₂ SO ₄	91
Gambar B.8 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.D pada Larutan H ₂ SO ₄	92
Gambar B.9 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.A pada Larutan H ₂ SO ₄	92
Gambar B.10 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.B pada Larutan H ₂ SO ₄	92
Gambar B.11 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.C pada Larutan H ₂ SO ₄	93
Gambar B.12 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.D pada Larutan H ₂ SO ₄	93
Gambar B.13 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.A pada Larutan NaCl	94

Gambar B.14 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.B pada	
Larutan NaCl	94
Gambar B.15 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.C pada	
Larutan NaCl	94
Gambar B.16 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.D pada	
Larutan NaCl	95
Gambar B.17 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.A pada	
Larutan NaCl	95
Gambar B.18 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.B pada	
Larutan NaCl	95
Gambar B.19 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.C pada	
Larutan NaCl	96
Gambar B.20 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.D pada	
Larutan NaCl	96
Gambar B.21 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.A pada	
Larutan SCP	97
Gambar B.22 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.B pada	
Larutan SCP	97
Gambar B.23 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.C pada	
Larutan SCP	97
Gambar B.24 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.D pada	
Larutan SCP	98

Gambar B.25 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.A pada Larutan SCP	98
Gambar B.26 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.B pada Larutan SCP	98
Gambar B.27 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.C pada Larutan SCP	99
Gambar B.28 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.D pada Larutan SCP	99
Gambar B.29 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.A pada Larutan H ₂ SO ₄	100
Gambar B.30 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.B pada Larutan H ₂ SO ₄	100
Gambar B.31 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.C pada Larutan H ₂ SO ₄	100
Gambar B.32 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.D pada Larutan H ₂ SO ₄	101
Gambar B.33 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80.A pada Larutan H ₂ SO ₄	101
Gambar B.34 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80.B pada Larutan H ₂ SO ₄	101
Gambar B.35 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80.C pada Larutan H ₂ SO ₄	102
Gambar B.36 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80.D pada Larutan H ₂ SO ₄	102
Gambar B.37 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.A pada Larutan NaCl	102
Gambar B.38 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.B pada Larutan NaCl	103
Gambar B.39 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.C pada Larutan NaCl	103
Gambar B.40 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.D pada Larutan NaCl	103
Gambar B.41 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80.A pada Larutan NaCl	104
Gambar B.42 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80.B pada Larutan NaCl	104
Gambar B.43 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80.C pada Larutan NaCl	104

Gambar B.44 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80.D pada Larutan NaCl	105
Gambar B.45 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.A pada Larutan SCP	105
Gambar B.46 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.B pada Larutan SCP	105
Gambar B.47 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.C pada Larutan SCP	106
Gambar B.48 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 50.D pada Larutan SCP	106
Gambar B.49 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80.A pada Larutan SCP	106
Gambar B.51 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80 B pada Larutan SCP	107
Gambar B.52 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80 C pada Larutan SCP	107
Gambar B.53 Kurva <i>Nyquist</i> Sampel 80 D pada Larutan SCP	107
Gambar C.1 Ampelas	109
Gambar C.2 Aquades	109
Gambar C.3 Baja Paduan Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr	109
Gambar C.4 Cairan <i>Polish</i>	109
Gambar C.5 Cetakan Resin	109
Gambar C.6 <i>Cutting Machine</i>	109
Gambar C.7 Gelas Beker	109
Gambar C.8 Larutan Etsa	109
Gambar C.9 Mesin <i>Grinding Polishing</i>	110
Gambar C.10 Neraca Digital	110
Gambar C.11 <i>Resin Hardener</i>	110
Gambar C.12 Sarung Tangan	110

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi material terus mengalami perkembangan signifikan, salah satunya melalui inovasi baja *Shape memory alloy* (SMA). SMA adalah material yang dicirikan oleh transformasi fase termoelastik yang memungkinkannya kembali ke bentuk aslinya ketika dipanaskan setelah mengalami proses deformasi [1]. Penggunaan SMA ini telah menarik perhatian karena banyak digunakan untuk aplikasi industri rekayasa struktur, misalnya sebagai elemen redaman untuk jembatan dan bangunan bertingkat tinggi di daerah rawan gempa. SMA juga digunakan untuk kopling, aktuator, kawat panduan medis. Namun, dari inovasi kemajuan material tersebut korosi muncul sebagai tantangan utama yang harus diatasi. SMA memiliki sifat unik yaitu mampu kembali menjadi bentuk semula dan memiliki sifat superelastis yang, tetapi dengan adanya korosi menyebabkan kerusakan pada material SMA.

Korosi merupakan proses degradasi material yang disebabkan oleh pengaruh lingkungan sekitar. Fenomena ini menjadi masalah signifikan dalam berbagai industri karena dapat mengurangi umur pakai, kekuatan, dan fungsionalitas material. Proses korosi dapat terjadi di berbagai lingkungan (asam, netral, hingga basa) dengan mekanisme dan laju yang berbeda-beda tergantung pada kondisi lingkungan dan jenis materialnya. Korosi pada SMA menyebabkan material menjadi rapuh, mudah patah, dan kehilangan kemampuan untuk kembali ke bentuk

aslinya setelah dideformasi. Hal ini menjadi hambatan signifikan dalam pemanfaatan SMA. Untuk mengatasi masalah tersebut, penambahan komposisi paduan tertentu merupakan salah satu cara efektif untuk meningkatkan ketahanan korosi pada SMA.

Paduan SMA yang sering digunakan yaitu paduan Ni-Ti berhasil mencapai ketahanan korosi yang tinggi 0,101 mpy dan sifat mekanik yang baik karena terbentuknya lapisan oksida titanium yang stabil di permukaannya. Namun, di balik keunggulannya paduan Ni-Ti memiliki beberapa kekurangan yaitu memerlukan biaya yang tinggi sebesar \$100-\$300 dan proses pengerjaan yang sulit [1]. Oleh karena itu, alternatif paduan lainnya yang lebih ekonomis dan mudah diproses harus dikembangkan, yaitu Paduan SMA berbasis Fe.

SMA berbasis Fe yang ditemukan oleh Sato dkk pada awal 1980-an dengan komposisi Fe-30Mn-1Si menjadi alternatif menarik karena biaya yang relatif rendah 14-18 juta, sifat mekanik baik dengan nilai kekerasan 284,93 HV, dan kemampuan kerja yang sangat baik. Paduan Fe-Mn-Si dengan kandungan 28-34% Mn dan 4-6,5% Si menunjukkan *shape memory effect* yang hampir sempurna dan kekuatan yang lebih tinggi dibanding paduan Ni-Ti. Hal ini dibuktikan dalam penelitian Qiang (2022) yang menunjukkan nilai *yield strength* paduan Fe-32%Mn-6%Si mencapai 330MPa, sedangkan Ni-Ti hanya 49,03-196,1MPa. Sifat mekanik dan ketahanan korosi Paduan Fe-Mn-Si bergantung pada komposisi kimia, perlakuan panas serta proses termomekanik yang diterapkan. Penambahan unsur Ni dan Cr terbukti dapat meningkatkan kekuatan dan ketangguhan Paduan Fe-Mn-Si [2]. Namun, penambahan Mo pada Fe-Mn-Si belum banyak diteliti. Secara

umum, penambahan Mo pada Paduan Fe dapat meningkatkan kekuatan dan ketangguhan [3].

Selain penambahan unsur paduan, pengerolan panas merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan ketahanan korosi dan sifat mekanik SMA. Penelitian sebelumnya pada paduan Fe-14Mn-4Si-8Ni-11Cr yang mengalami *hot rolling* pada temperatur 1000°C menunjukkan peningkatan nilai kekerasan dari 166,93 HV menjadi 299,71 HV [2]. Penelitian Niko (2017), menunjukkan reduksi yang lebih besar meningkatkan laju korosi dari 0,253 mpy menjadi berapa 0,0024 mpy, semakin tinggi persen reduksi *rolling*, semakin besar heat input dan pendinginan lambat, yang meningkatkan penebalan karbida krom di batas butir, sehingga memperburuk laju korosi. Hasil ini sangat kontradiktif dengan penelitian yang dilakukan oleh Zhang (2022), ditemukan bahwa reduksi ketebalan pada proses *rolling* yang lebih besar dapat menurunkan laju korosi dari 1,72 mpy menjadi 0,85 mpy, Semakin tinggi persen reduksi, struktur butir semakin halus dan homogen, mengurangi difusi hidrogen dan memperkuat lapisan pelindung, sehingga ketahanan korosi meningkat. Pengaruh reduksi ketebalan pada proses rolling belum dapat dipastikan secara jelas sehingga diperlukan penelitian spesifik yang membahas pengaruh *rolling* terhadap ketahanan korosi pada Paduan Fe-Mn-Si. Keterbatasan penelitian tentang pengaruh *hot rolling* terhadap sifat mekanik dan korosi SMA membuka peluang besar untuk penelitian lebih lanjut.

Shape Memory Alloys (SMA) memiliki aplikasi yang beragam dalam berbagai kondisi lingkungan seperti basa, asam, dan netral. Penelitian tugas akhir ini menggunakan 3 jenis lingkungan yang berbeda untuk mensimulasikan bahwa material tersebut dapat bertahan dari korosi. Dalam lingkungan basa, SMA

digunakan untuk baja redaman gempa, dengan pengujian menggunakan larutan *Simulated Concrete Pore* (SCP). Larutan SCP mensimulasikan kondisi alkali dalam beton untuk menguji ketahanan material dan kinerjanya, khususnya dalam mensimulasikan kondisi korosif pada permukaan logam di pori-pori beton. Untuk lingkungan asam, pengujian menggunakan H_2SO_4 , yang relevan dengan aplikasi pipa kopling yang mengalirkan fluida asam seperti H_2SO_4 , HCl , dan HNO_3 . Sementara itu, pengujian dalam lingkungan netral menggunakan larutan $NaCl$, yang mensimulasikan kondisi air laut untuk aplikasi kelautan atau pembangkit listrik tenaga air.

Penelitian sebelumnya oleh Miftakhur (2023) pada SMA Fe-14,3Mn-3,85Si-10,56Cr-8,25Ni menunjukkan laju korosi 0,054 mpy dalam larutan SCP dan 3,919 mpy dalam larutan $NaCl$. Sementara Maji (2006) menemukan laju korosi 0,033 mpy pada SMA Fe-15Mn-7Si-9Cr-5Ni dalam larutan H_2SO_4 . Meski penelitian terdahulu telah memberikan dasar penting, masih diperlukan pengembangan lebih lanjut, terutama dalam eksplorasi pengaruh unsur paduan seperti molibdenum yang meningkatkan ketahanan korosi [3], nikel yang meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi [4], serta kromium yang berfungsi sebagai pembentuk ferit dan sumber ketahanan korosi [5]. Penelitian ini bertujuan karakterisasi perilaku korosi paduan ingat bentuk Fe-Mn-Si dengan penambahan unsur paduan (2,04 Molibdenum, 8,04%Nikel, dan 10,23% Kromium) dan pengerolan panas pada larutan asam sulfat, natrium klorida, dan *simulated concrete pore*. Dengan melakukan penelitian ini diharapkan dapat membuka peluang besar bagi pengembangan teknologi material SMA.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, identifikasi masalah pada penelitian ini adalah bagaimana karakterisasi perilaku korosi paduan ingat bentuk Fe-Mn-Si dengan penambahan unsur paduan (2,04 Molibdenum, 8,04%Nikel, dan 10,23% Kromium) dan pengerolan panas pada larutan asam sulfat, natrium klorida, dan *simulated concrete pore*. Ketahanan korosi SMA pada penelitian ini akan ditingkatkan melalui penambahan unsur paduan Mo, Ni, dan Cr dengan variasi persen reduksi *hot rolling*. Penambahan unsur paduan Mo, Ni dan Cr akan meningkatkan sifat mekanik dan membentuk lapisan pasif yang dapat meningkatkan ketahanan korosi. Proses *hot rolling* akan membuat mekanisme rekristalisasi sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi pada SMA karena terjadi pertumbuhan butir yang menghambat proses dislokasi. Diharapkan dari dua variasi ini dapat meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi SMA sehingga dapat diaplikasikan sebagai material pada lingkungan asam, netral, dan basa.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan diatas, maka didapatkan tujuan dari penelitian ini ialah sebagai berikut.

1. Mengetahui karakterisasi morfologi mikrostruktur dan nilai kekerasan pada *shape memory alloy* Fe-Mn-Si dengan penambahan unsur paduan (2,04 Molibdenum, 8,04% Nikel, dan 10,23% Kromium) dan *hot rolling* (reduksi 50% dan 80%)?
2. Mengetahui karakterisasi perilaku korosi *shape memory alloy* Fe-Mn-Si dengan penambahan unsur paduan (2,04 Molibdenum, 8,04% Nikel,

dan 10,23% Kromium) dan *hot rolling* pada larutan asam sulfat, natrium klorida, dan *simulated concrete pore*?

1.4 Batasan Masalah

Adapun ruang lingkup dari penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan di Pusat Riset Metalurgi Badan Riset dan Inovasi Nasional Serpong, Kota Tangerang Selatan.
2. Paduan yang diteliti antara lain : Paduan A (Fe-13,86Mn-4,88Si), paduan B (Fe-13,8Mn-4,9Si-2,04Mo), paduan C (Fe-13,94Mn-4,97Si-2,1Mo-8,04Ni), dan paduan D (Fe-13,5Mn-5,03Si-2,03Mo-8,06Ni-10,23Cr).
3. Proses homogenisasi dilakukan pada temperatur austenisasi 1050 °C dengan waktu tahan 1 jam
4. Proses *hot rolling* dilakukan pada temperatur 1000°C dengan reduksi ketebalan 50% dan 80%.
5. Proses *solution treatment* dilakukan pada temperatur 1000 °C dan selama 1 jam, dengan pendinginan cepat pada media air.
6. Pengamatan metalografi menggunakan mikroskop optik
7. Uji kekerasan dilakukan dengan metode *Vickers*
8. Uji korosi dilakukan dengan menggunakan 3 jenis larutan asam, basa, dan netral. Larutan basa *concrete* terdiri dari 0,1 M Na₂SO₄ + 0,4 M KOH + 0,001 Ca(OH)₂, larutan asam menggunakan H₂SO₄ 0,5 M, dan larutan netral menggunakan NaCl 3,5%.

9. Uji korosi dilakukan dengan menggunakan 3 metode *Open Circuit Potential (OCP)* *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*, dan Potensiodinamik.

1.5 Sistematika Penulisan

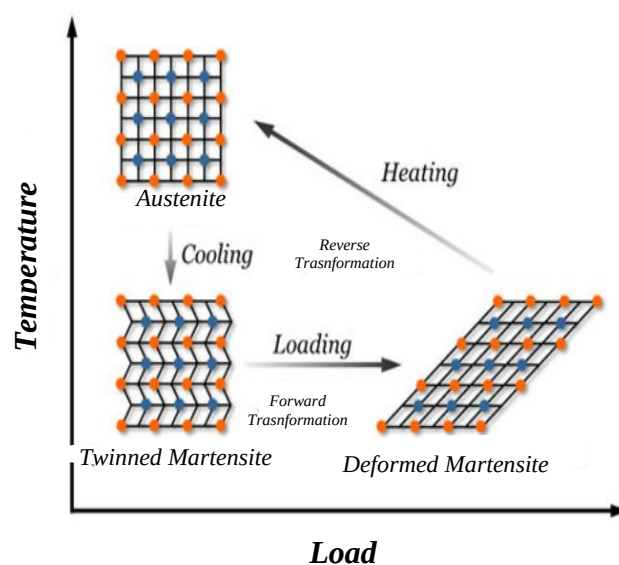
Penulisan laporan skripsi ini terdiri atas lima bab. Bab I merupakan pendahuluan, yang menjelaskan tentang latar belakang dari fenomena korosi yang terjadi pada SMA, identifikasi masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan. Bab II menjelaskan tinjauan pustaka yang berisi teori untuk mendukung penelitian. Bab III berisi metodologi penelitian yang menjelaskan diagram alir penelitian, alat serta bahan yang digunakan saat penelitian, dan prosedur penelitian. Pada Bab IV disajikan hasil dan pembahasan dari pengujian yang telah dilakukan. Pada Bab V disajikan kesimpulan dari hasil penelitian dan saran. Kemudian, ditutup dengan daftar pustaka dan lampiran pendukung dalam penulisan laporan ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Shape memory alloy*

Shape memory alloys (SMA) merupakan jenis material yang memiliki kemampuan luar biasa untuk kembali ke bentuk atau ukuran tertentu dengan aktivasi dari perubahan termal atau tegangan. Ketika terpapar stimulus termal atau mekanikal yang sesuai. Paduan ini telah menarik perhatian signifikan karena sifat-sifat uniknya, seperti efek memoris bentuk dan superelastisitas [6]. Umumnya, Paduan NiTi memiliki sifat ingat bentuk yang memiliki transformasi fase sehingga memungkinkan untuk mengalami perubahan bentuk secara reversible. SMA sering digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi seperti penggunaan implant dalam biomedis [7].



Gambar 2.1 Prinsip *Shape memory alloy* [7].

SMA memiliki karakteristik termo-mekanis karena adanya transformasi antara austenit dan martensit. Hal ini terkait dengan temperatur dan tegangan internal material, dan *Shape memory effect* (SME). Pada temperatur tinggi, SMA berada di fase austenit tanpa deformasi. Ketika diberikan tegangan, austenit berubah menjadi martensit terdeformasi. Pada temperatur rendah, austenit juga bisa berubah menjadi martensit kembar tanpa deformasi. Ketika martensit terdeformasi dipanaskan, SMA kembali ke fase austenit dan bentuk aslinya melalui transformasi balik yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 [7]. Prinsip SMA bersumber dari kemampuan uniknya untuk mengalami transformasi fase yang dapat dibalik, terutama antara fasa martensit dan austenit, sebagai respons terhadap stimulus eksternal seperti temperatur atau tekanan. Fenomena ini memungkinkan SMA "mengingat" bentuk asli material dan memulihkannya setelah deformasi, sifat ini dikenal sebagai efek memori bentuk (SME) [8].

Potensi aplikasi dari SMA sangat beragam, melibatkan berbagai sektor mulai dari industri *aerospace* dan otomotif hingga sektor biomedis dan konstruksi. Sebagai contoh, SMA telah dieksplorasi penggunaannya dalam material komposit guna meningkatkan perilaku struktural seperti *buckling*, getaran, dan kelelahan. Pengembangan terus menerus dilakukan untuk meningkatkan performa SMA, seperti mengoptimalkan komposisi bahan, kontrol temperatur, dan aplikasi struktur. Meskipun SMA menawarkan banyak keunggulan, tantangan seperti biaya produksi dan keterbatasan pada temperatur operasional tertentu masih menjadi fokus penelitian. Namun, potensi aplikasi yang luas membuat SMA tetap menjadi area penelitian yang menarik dan berpotensi membentuk masa depan teknologi yang lebih pintar [9].

2.2 *Shape memory alloy Fe-Based*

Fe-based Shape memory alloy (SMA) Fe-based adalah jenis paduan ingat bentuk yang menggunakan besi (Fe) sebagai unsur utamanya. Paduan ingat bentuk berbasis besi (Fe-SMA) adalah jenis material yang telah menarik perhatian karena potensi aplikasinya di berbagai bidang, khususnya dalam konstruksi dan rekayasa struktural. Fe-SMA menunjukkan kekuatan tarik tinggi sebesar 700 MPa, pemulihan bentuk yang sangat baik, dan kekakuan elastis yang tinggi dengan nilai *tensile strain recovery* sebesar 8,1%, sehingga cocok untuk memperkuat material beton bertulang dan balok logam [10]. Khususnya, SMA *Fe-Based* sering menggabungkan besi dengan elemen lain seperti nikel (Ni) atau mangan (Mn) untuk memperoleh sifat transformasi fase yang diperlukan untuk efek ingat bentuk. Penelitian ini membahas komposisi kimia dari empat variasi paduan SMA berbasis besi (Fe) yang dikembangkan dengan menambahkan unsur paduan molibdenum (Mo), nikel (Ni), dan kromium (Cr) secara bertahap. Paduan dasar yang digunakan adalah Fe, yaitu SMA berbasis besi yang dikenal karena kemampuannya menunjukkan efek memori bentuk. Unsur paduan seperti mangan (Mn) dan nikel (Ni) dapat menstabilkan fasa austenit, serta membantu transformasi martensit. Hal ini sangat penting dalam menentukan efektivitas SMA, terutama dalam hal kemampuan material untuk kembali ke bentuk semula setelah mengalami deformasi. Sementara itu, silikon (Si) memperkuat paduan dan membantu dalam proses pemulihan bentuk, paduan yang mengandung penambahan silikon juga dapat meningkatkan ketahanan korosi dari paduan [11]. Kombinasi unsur-unsur paduan ini juga berperan dalam mengoptimalkan transformasi fasa martensit-austenit yang menjadi kunci efek ingat bentuk.

Tabel 2.1 Sifat yang dihasilkan Paduan SMA

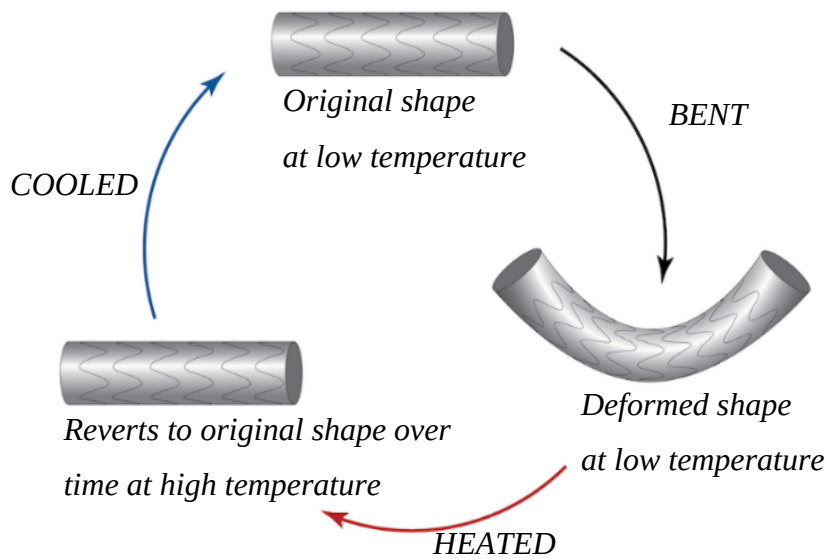
Komposisi	Sifat Yang Dihasilkan	Referensi
Fe-14Mn-3Si-10Cr-23Ni	• <i>Tensile Strain Recovery</i> 8,1% • Kekerasan 284,93 HV.	[2]
Fe-17Mn-5Si-10Cr-4Ni	<i>Stress Recovery</i> 4%	[13]
Fe-14Mn-3Si-10Cr-8Ni	• Laju Korosi 0,0544 mpy (SCP) • Laju Korosi 3,919 mpy (NaCl)	[12]
Fe-14Mn-3.Si-2Al	Laju korosi 5,91 mpy	[12]
Fe-15Mn-7Si-9Cr-5Ni	• Laju Korosi 0,0029 mpy (H₂SO₄) • Laju Korosi 0,0023 mpy (NaCl)	[14]

Tabel 2.1 menunjukkan *shape memory alloy* base fe dengan berbagai paduan yang mengasilkan sifat mekanik sesuai yang diinginkan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa molibdenum memiliki kemampuan untuk meningkatkan ketahanan korosi, khususnya korosi *pitting*, melalui pembentukan lapisan pasif yang protektif di permukaan material [15]. Selain itu, Mo berperan dalam meningkatkan kekuatan mekanik paduan, seperti ketangguhan fraktur dan ketahanan mulur [16]. Ni berperan dalam meningkatkan kekerasan material dan menambah ketahanan terhadap deformasi serta korosi[4]. Kromium merupakan unsur yang banyak digunakan dalam berbagai jenis baja paduan karena

kemampuannya meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi [18]. Penambahan elemen paduan ini juga dapat meningkatkan stabilitas fasa austenit, yang penting untuk memastikan efek memori bentuk pada SMA. Kombinasi optimal Mo, Ni, dan Cr tidak hanya meningkatkan sifat mekanik tetapi juga meningkatkan ketahanan korosi pada material SMA.

2.4 Transformasi Fasa SMA

Transformasi fasa pada SMA adalah aspek penting yang menentukan sifat fungsional unik material ini. Perilaku transformasi fasa pada SMA telah banyak dipelajari, dengan berbagai faktor seperti temperatur, tekanan, mikrostruktur, dan komposisi diketahui memengaruhi proses tersebut. Transformasi fasa ini melibatkan perubahan struktur kristal tanpa melewati proses peleburan. Transformasi martensit dipengaruhi oleh temperatur [20]. Transformasi martensit terjadi ketika material didinginkan di bawah temperatur tertentu temperatur M_s , menyebabkan perubahan dari fasa austenit (fase stabil pada temperatur tinggi) menjadi fasa martensit (fase metastabil pada temperatur rendah). Fasa martensit memiliki struktur kristal berbeda yang memungkinkan terjadinya deformasi pada material. Sebaliknya, transformasi de-martensitik terjadi ketika material dipanaskan di atas temperatur A_s , material kembali ke fasa austenit dari fasa martensit, memungkinkan material kembali ke bentuk semula seperti pada Gambar 2.2. Transformasi martensit ini melibatkan pergeseran atom-atom dalam kisi kristal, atom-atom mengatur ulang posisinya untuk membentuk struktur baru. Pergeseran ini bersifat terkoordinasi, seperti barisan benda yang saling bergerak secara berurutan, menciptakan perubahan struktur kristal secara keseluruhan.



Gambar 2.2 Transformasi Fasa pada *Shape memory alloy* [20].

Saat dilakukan pemanasan, SMA mulai bertransformasi dari fase martensit menjadi austenit. Dua titik temperatur selama transformasi ini adalah “As-austenit temperatur awal pembentukan austenit”, di mana transformasi dimulai dan “Af-austenit-yaitu selesai-temperatur austenit”, di mana transformasi berakhir. Setelah SMA dipanaskan melampaui As, martensit bertransformasi menjadi struktur austenit, yaitu kembali ke bentuk aslinya. Selama proses pendinginan, transformasi mulai berbalik ke martensit pada temperatur awal pembentukan *martensite start* (Ms) dan selesai saat mencapai temperatur akhir pembentukan *martensite finish* (Mf) [21]. Temperatur Ms dan Mf sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia material SMA. Nilai Ms akan mempengaruhi kemampuan SMA untuk mengembalikan bentuknya setelah deformasi. Perhitungan Ms dapat menggunakan persamaan (2.1) untuk mengetahui nilai Ms [22].

$$Ms (^{\circ}C) = 1302 - 42(\%Cr) - 61(\%Ni) - 33(\%Mn) - 28(\%Si) - 1667(\%C + \%N) \dots\dots\dots(2.1)$$

Tabel 2.2 Komposisi SMA terhadap Transformasi Fasa

<i>Shape memory alloy</i>	Ms (°C)	As (°C)	Referensi
Fe-28Mn-6Si	69,85	139,85	[22]
Fe-32Mn-6Si	19,85	114,85	[22]
Fe-11Mn-5Si-12Cr-7Ni	-7,15	95,85	[22]
Fe-13Mn-5Si-12Cr-7Ni	-30,15	93,85	[22]
Fe-24Mn-6Si	118,85	182,85	[23]
Fe-13Mn-5Si-9Cr-7Ni	-20		[24]
Fe-14Mn-6Si-9Cr-5Ni	17,85	119,85	[25]
Fe-15Mn-7Si-9Cr-5Ni	24	112	[14]
Fe-14Mn-5Si-4Al	35,1	150	[26]

Tabel 2.2 memperlihatkan data Ms dan As pada beberapa SMA dengan komposisi yang berbeda, Temperatur Ms adalah titik di mana paduan mulai berubah dari fase austenit, yang stabil pada temperatur tinggi, menjadi fase martensit, yang lebih stabil pada temperatur rendah dan lebih mudah terdeformasi. Transformasi martensitik terjadi ketika paduan didinginkan di bawah temperatur Ms, yang mengarah pada pembentukan martensit, fase yang umumnya lebih stabil pada temperatur rendah. Sebaliknya, saat dipanaskan di atas temperatur As, material akan bertransformasi kembali ke fase austenit, yang stabil pada temperatur tinggi. temperatur transformasi (Ms dan As) dipengaruhi oleh komposisi dan mikrostruktur paduan, serta kondisi pemrosesan yang telah dilalui [27].

Transformasi fasa martensit terbentuk dari austenit melalui proses pendinginan cepat (*quenching*). Ketika baja yang dipanaskan ke temperatur tinggi

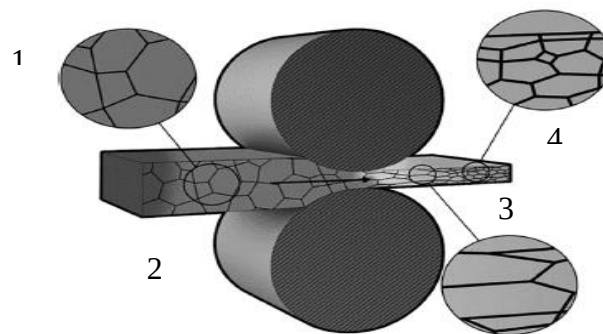
(di atas titik austenit) didinginkan dengan cepat, struktur FCC (*Face-Centered Cubic*) austenit berubah menjadi struktur BCT (*Body-Centered Tetragonal*) martensit. Proses ini terjadi tanpa difusi atom, menghasilkan struktur yang sangat keras namun rapuh. Penguatan karena fasa martensit dalam baja merupakan hasil dari kombinasi beberapa mekanisme penguatan, terutama melalui mekanisme *transformation strengthening* [27].

2.5 Pengaplikasian *Shape memory alloy*

SMA telah dimanfaatkan untuk meningkatkan perilaku struktural seperti *buckling*, getaran, dan kelelahan karena memiliki *shape memory effect* [28]. Selain itu, sifat unik dari SMA juga telah diterapkan dalam kontrol respons seismik, anggota beton *self-pre-stressing*, dan kontrol seismik dinding geser beton, menyoroti potensi material dalam mengurangi dampak peristiwa seismik pada struktur [29]. Di industri *aerospace*, sifat-sifat SMA telah dimanfaatkan untuk mewujudkan struktur adaptif, menunjukkan signifikansinya dalam mencapai solusi inovatif dan adaptif [9]. Sifat-sifat SMA juga telah dimanfaatkan dalam bidang biomedis, di mana efek memori bentuk dan pseudo-elastisitas material telah digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk alat dan implan biomedis [30]. Material ini sedang digencarkan untuk digunakan sebagai material anti gempa karena memiliki superelastisitas. Oleh karena itu potensinya yang sangat luas SMA perlu mengatasi masalah utama yang dihadapi yaitu korosi seperti *pitting* dan *uniform*. Potensi besar dari SMA dalam berbagai bidang membuat pengembangan material ini terus berlanjut untuk meningkatkan kinerjanya. Upaya untuk meningkatkan ketahanan korosi.

2.6 Hot rolling

Hot rolling adalah proses pengolahan logam yang dilakukan pada temperatur tinggi, di mana material logam dipanaskan dan kemudian digulung untuk membentuk lembaran atau produk lainnya. Proses ini biasanya dilakukan pada temperatur di atas titik rekristalisasi material, yang memungkinkan deformasi plastis terjadi tanpa memerlukan banyak energi. Dalam konteks ini, *hot rolling* memiliki beberapa keuntungan, termasuk peningkatan sifat mekanik dan pengurangan ketebalan material, yang sangat penting dalam industri manufaktur dan konstruksi. Pada Gambar 2.3 mekanisme *hot rolling* melibatkan beberapa tahap. Pertama, material logam, biasanya dalam bentuk *slab* atau *billet*, dipanaskan dalam *furnace* hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Setelah itu, material tersebut dimasukkan ke dalam mesin *rolling*, di mana dua rol berputar untuk mengurangi ketebalan material. Selama proses ini, material mengalami deformasi plastis yang signifikan, yang menghasilkan struktur mikro yang lebih halus, mengalami perubahan bentuk pada butirnya sehingga membentuk struktur yang seragam dan meningkatkan kekuatan material [31]. Hal ini menunjukkan bahwa proses *hot rolling* tidak hanya berfungsi untuk membentuk material, tetapi juga untuk meningkatkan performa material dalam aplikasi yang lebih luas, seperti dalam pembuatan pipa baja dan komponen struktural lainnya [32].



Gambar 2.3 Mekanisme Proses *Hot rolling* [32].

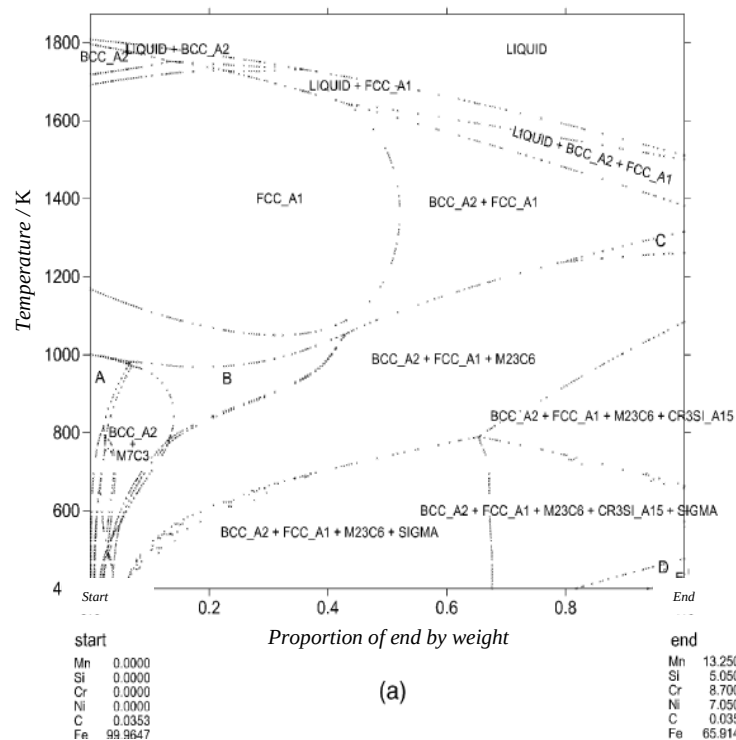
Keterangan:

1. Material awal
2. Material saat ditekan
3. Material setelah *roll*
4. Material akhir

2.7 *Solution treatment*

Solution treatment adalah proses perlakuan panas yang dilakukan untuk mengubah struktur mikro dari paduan logam dengan cara melarutkan fase-fase tertentu ke dalam matriks logam. Proses ini biasanya dilakukan pada temperatur tinggi, di mana paduan dipanaskan hingga mencapai temperatur tertentu, kemudian didinginkan dengan cepat (*quenching*) untuk menghasilkan struktur yang diinginkan. Tujuan utama *solution treatment* adalah meningkatkan sifat mekanik material, seperti kekerasan dan ketahanan terhadap deformasi. Mekanisme dari *solution treatment* melibatkan beberapa langkah. Pertama, paduan logam dipanaskan pada temperatur yang cukup tinggi untuk melarutkan unsur-unsur paduan yang tidak terdistribusi merata. Setelah mencapai temperatur yang diinginkan, paduan tersebut kemudian didinginkan dengan cepat, biasanya menggunakan air atau media pendingin lainnya, untuk mengendalikan fase yang telah terbentuk. Proses pendinginan yang cepat ini mencegah pembentukan kembali fase yang tidak diinginkan, sehingga meningkatkan kekerasan material [33]. Penguatan melalui *solid solution treatment* merupakan metode untuk meningkatkan kekuatan logam dengan mendispersikan atom-atom *solute* ke dalam kisi atom dari logam dasar (*solvent*). Mekanisme penguatannya didasarkan pada interaksi atom-

atom *solute* yang menyebabkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi. Ketika atom paduan ditambahkan ke dalam logam, maka dapat berfungsi sebagai atom interstitial. Penambahan ini menciptakan tegangan kisi di sekitar atom paduan, yang menyebabkan peningkatan kekuatan material [34]. Terdapat mekanisme penguatan presipitat (*Precipitation Hardening*) pada dasarnya terjadi pada unsur yang memiliki kelarutan yang tinggi pada temperatur tinggi dan unsur tersebut harus dapat membentuk endapan yang dapat menghalangi dislokasi, sehingga akan terjadi mekanisme penguatan [35]. Pada *Shape memory alloy* terdapat penambahan kromium dan molibdenum untuk meningkatkan sifat mekanik atau korosinya. Pada SMA terdapat potensi pembentukan presipitasi. Gambar 2.4 menunjukkan bahwa fasa-fasa yang diprediksi terbentuk pada temperatur 1000 °C adalah austenit (FCC), ferit (BCC), dan karbida M₂₃C₆. M₂₃C₆ merupakan senyawa karbida logam dengan symbol M mewakili campuran jenis logam seperti Fe dan Cr [36].



Gambar 2.4. Diagram Keseimbangan Fasa [36].

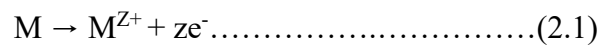
2.8 Korosi

Korosi merupakan degradasi material yang diakibatkan oleh reaksi kimia dan elektrokimia antara material logam dengan lingkungan sehingga menyebabkan penurunan mutu material logam. Sedangkan reaksi elektrokimia yang dimaksud apabila reaksinya berlangsung dalam suatu elektrolit dan terjadi perpindahan elektron baik pelepasan elektron (reaksi oksidasi) atau penerima elektron (reaksi reduksi) antara material yang digunakan. Dari kedua reaksi ini dapat dibedakan secara sederhana dilihat dari ada atau tidaknya uap air [37]. Korosi merupakan proses alami yang tidak akan pernah berhenti atau akan terus terjadi selama material logam tersebut mengalami kontak dengan lingkungannya. Akan tetapi, proses korosi dapat diminimalisasi, dikendalikan atau diperlambat lajunya dengan memperlambat proses perusakannya [37].

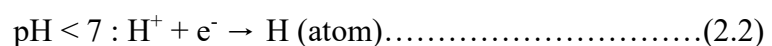
Korosi merupakan masalah utama pada material. Korosi adalah kehancuran atau kerusakan material karena reaksi dengan lingkungannya. Korosi pada logam juga dapat diartikan sebagai reaksi kebalikan dari pemurnian logam. Korosi ini sendiri bisa mengakibatkan menurunnya kualitas baja sehingga mengakibatkan baja menjadi cepat rusak. Korosi didefinisikan sebagai penghancuran paksa zat seperti logam dan bahan bangunan mineral media sekitarnya, yang biasanya cair (agen korosif) [38]. Korosi akan menyebabkan logam kehilangan fungsinya sebagai komponen dalam suatu sistem. Unsur logam yang sudah bereaksi dengan lingkungannya sehingga membentuk komponen baru. Proses biasanya dimulai pada permukaan dan disebabkan oleh reaksi elektrokimia. Kehancuran kemudian dapat menyebar ke bagian dalam materi. Produk korosi *uniform* dan *pitting* berupa karat dengan warna merah bata atau coklat tua. Organisme juga dapat berkontribusi pada

korosi bahan bangunan. selain itu korosi juga dapat diartikan sebagai penurunan mutu logam yang disebabkan oleh reaksi elektrokimia antara logam dengan lingkungan sekitarnya. Korosi juga dapat jelaskan sebagai penurunan kualitas yang disebabkan oleh reaksi kimia bahan logam dengan unsur-unsur lain yang terdapat di alam [38]. Korosi dapat terjadi apabila terdapat empat elemen di bawah ini [38]:

- a. Anoda, anoda biasanya terkorosi dengan melepaskan elektron-elektron dari atom-atom logam netral untuk membentuk ion-ion yang bersangkutan. Ion-ion ini mungkin tetap tinggal dalam larutan atau bereaksi membentuk hasil korosi yang tidak larut. Selama proses korosi, atom logam di anoda kehilangan elektron dan membentuk ion positif. Anoda adalah area pada logam yang mengalami oksidasi, Anoda bisa berupa bentuk jenis logam apapun apabila nilai potensialnya lebih tinggi. Reaksi pada anoda dapat dituliskan dengan persamaan [39].



- b. Katoda, Katoda adalah tempat di mana elektron-elektron yang dilepaskan oleh anoda akan diterima kembali dan digunakan dalam reaksi kimia lainnya. Katoda adalah area yang bertindak sebagai tempat terjadinya reduksi, yaitu menerima elektron yang dilepaskan dari anoda. Katoda biasanya tidak mengalami korosi, walaupun mungkin menderita kerusakan dalam kondisi-kondisi tertentu. Reaksi yang terjadi pada katoda berupa reaksi reduksi. Material katoda sering dipilih berdasarkan ketahanannya terhadap reaksi reduksi dan Reaksi pada katoda tergantung pada pH larutan [39].



- c. Elektrolit, elektrolit adalah zat yang memungkinkan aliran ion-ion dalam larutan. Dalam konteks korosi, air dengan kontaminan atau larutan garam seperti air laut berperan sebagai elektrolit. Elektrolit memungkinkan aliran ion-ion seperti ion logam yang terlarut dan ion oksigen, yang diperlukan untuk reaksi elektrokimia antara anoda dan katoda. Elektrolit adalah larutan yang mempunyai sifat menghantarkan listrik. Larutan elektrolit menghubungkan aliran listrik antara anoda dan katoda [39].
- d. Anoda dan Katoda harus terhubung secara elektris, Untuk menjaga reaksi elektrokimia terus berlanjut, anoda dan katoda harus terhubung secara elektris. Untuk menjaga reaksi elektrokimia terus berlanjut, anoda dan katoda harus terhubung secara elektris. Antara anoda dan katoda harus ada hubungan listrik agar arus dalam sel korosi dapat mengalir. Hubungan secara fisik tidak diperlukan jika anoda dan katoda merupakan bagian dari logam yang sama [39].

Korosi adalah proses degradasi material akibat reaksi kimia dengan lingkungan sekitarnya, yang dapat mengurangi daya tahan dan umur pakai material. Salah satu faktor utama yang memengaruhi ketahanan korosi suatu material adalah komposisi unsur-unsur paduannya. Unsur-unsur ini dapat memengaruhi kemampuan material untuk membentuk lapisan pelindung yang mencegah kontak langsung dengan agen korosif, serta memperkuat struktur mikro material untuk menahan reaksi kimia yang merusak. Beberapa unsur, seperti silikon (Si), molibdenum (Mo), nikel (Ni), kromium (Cr), dan mangan (Mn), memiliki peran penting dalam meningkatkan ketahanan korosi material. Masing-masing unsur ini

bekerja dengan cara yang berbeda, seperti membentuk lapisan oksida pelindung, meningkatkan stabilitas mikrostruktur, atau mengubah sifat mekanik material, yang pada akhirnya berkontribusi pada pengurangan laju korosi. Berikut merupakan pengaruh unsur paduan terhadap ketahanan korosi :

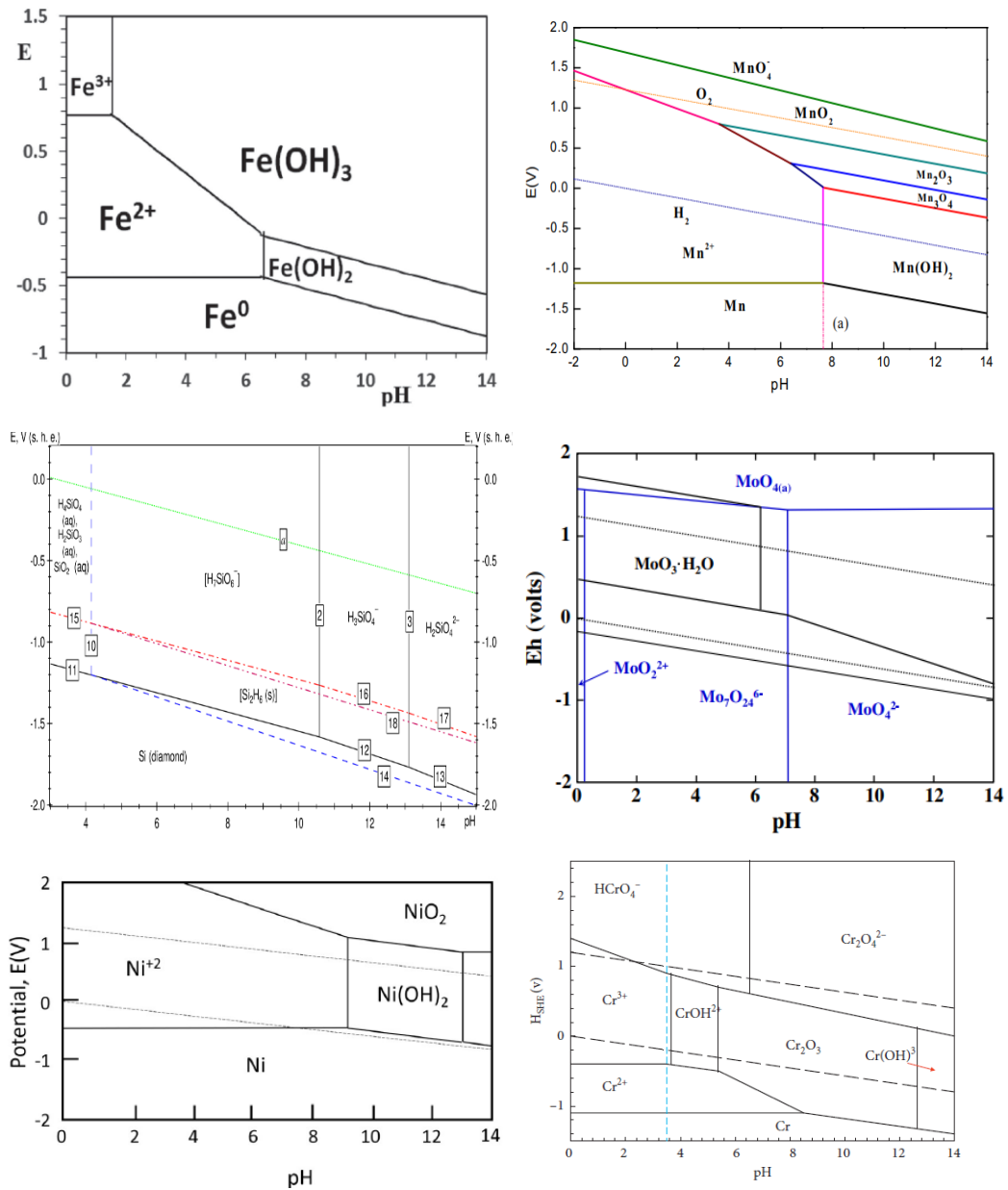
- a. Unsur silikon (Si) memiliki pengaruh signifikan terhadap ketahanan korosi pada berbagai jenis material, terutama pada paduan logam. Silikon juga berfungsi sebagai elemen paduan yang dapat membentuk lapisan oksida pelindung pada permukaan logam [40]. Hal ini menunjukkan bahwa silikon dapat berperan dalam meningkatkan stabilitas lapisan pelindung yang terbentuk, sehingga mengurangi laju korosi [40].
- b. Unsur molybdenum (Mo) memiliki kemampuan untuk meningkatkan ketahanan korosi, khususnya korosi *pitting*, melalui pembentukan lapisan pasif yang protektif di permukaan material [3]. Molibdenum berperan dalam mengubah struktur mikro paduan, yang dapat mempengaruhi sifat mekanik dan ketahanan korosi. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan molibdenum dapat meningkatkan ketahanan korosinya. Dalam paduan berbasis besi, molibdenum dapat mempengaruhi komposisi karbida yang terbentuk. Dengan menggantikan sebagian kromium dalam karbida logam, molibdenum membantu mencegah pembentukan karbida yang tidak diinginkan, yang dapat menjadi titik lemah bagi korosi [42].
- c. Unsur Nikel (Ni) berperan dalam meningkatkan kekerasan material dan menambah ketahanan terhadap deformasi serta korosi [4]. Nikel

berfungsi sebagai unsur penstabil austenit, yang membantu menciptakan struktur mikro yang lebih stabil dan tahan terhadap lingkungan korosif. Paduan dengan kadar nikel yang lebih tinggi cenderung menunjukkan laju korosi yang lebih rendah dibandingkan dengan paduan yang memiliki kadar nikel rendah atau tanpa nikel sama sekali [43].

- d. Unsur Kromium (Cr) adalah unsur pembentuk ferit dan sumber ketahanan korosi. Kromium bereaksi dengan oksigen untuk membentuk lapisan oksida yang protektif. Lapisan ini berfungsi sebagai penghalang terhadap ion dan zat-zat korosif, sehingga mengurangi laju korosi. Fenomena ini umum terlihat pada baja-baja yang mengandung kromium tinggi [5].
- e. Unsur Mangan (Mn) menambahkan mangan dapat meningkatkan stabilitas fase austenit, yang berkontribusi pada pengurangan laju korosi. Mangan berfungsi untuk memperkuat struktur mikro paduan, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan korosif. Paduan Fe-Mn-Si-Cr-Ni yang mengandung mangan menunjukkan peningkatan ketahanan korosi, yang dihubungkan dengan pembentukan lapisan oksida pelindung yang lebih efektif pada permukaan paduan [45].

Masing-masing unsur memiliki diagram pourbaix, diagram pourbaix menunjukkan stabilitas unsur-unsur dalam larutan berdasarkan pH dan potensial elektroda. Diagram ini membantu memahami kondisi di mana unsur berada dalam bentuk stabil, seperti logam, ion, atau senyawa oksida, yang mempengaruhi

ketahanan korosi material terhadap lingkungan asam, netral, atau basa seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.5.



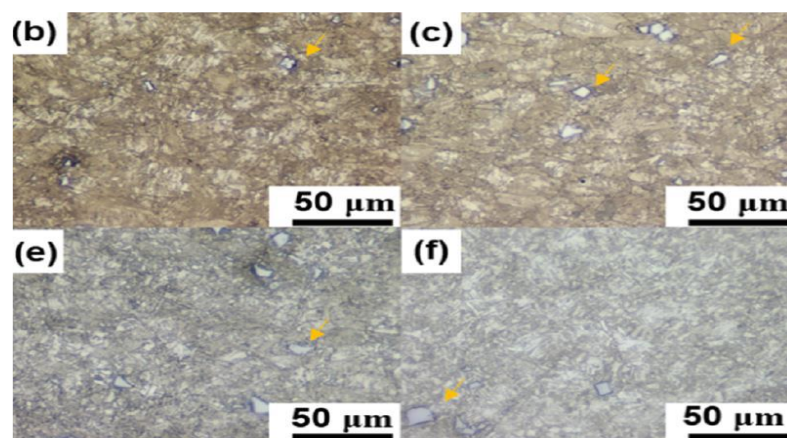
Gambar 2.5 Diagram Pourbaix Unsur Paduan

2.9 Metalografi

Metalografi merupakan analisis dari suatu struktur dan komponen fisis suatu logam atau paduan yang dapat dilihat secara langsung secara visual maupun dengan

bantuan Metode yang digunakan dalam metalografi meliputi preparasi sampel, pengamatan dengan mikroskop optik atau elektron, serta analisis menggunakan peralatan seperti spektroskopi dan difraksi sinar-X. Analisis metalografi merupakan pengujian yang cukup penting dalam proses fabrikasi karena dapat digunakan untuk menentukan fasa yang terbentuk, ukuran butir, dan berbagai karakteristik fisis lainnya [45].

Dengan menguji dan mengamati mikrostruktur suatu material, maka performa material tersebut dapat dilihat. Metalografi digunakan di semua tahap selama pembuatan material tersebut dari mulai pengembangan, produksi, *manufacturing process control*, dan bahkan analisis kegagalan logam [46]. Metalografi biasanya dilakukan dengan alat mikroskop optik yang sudah dihubungkan dengan komputer yang dilengkapi dengan sistem analisis gambar yang akurat [45]. Gambar 2.6 menunjukkan hasil pengamatan metalografi SMA Fe-Mn-Si-Cr-Ni-Ti dengan mikroskop optik perbesaran 50x setelah dilakukan proses homogenisasi 1250 °C selama 6 jam, dilanjutkan dengan *Hot Rolled* pada 1000°C hingga ketebalan 5 mm dan kemudian di *cold rolled* pada temperatur ruang dengan 10% reduksi ketebalan.



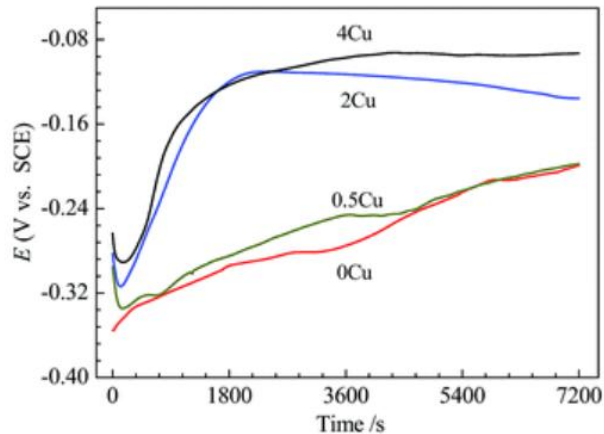
Gambar 2.6 Hasil Pengamatan Metalografi SMA

Fe-Mn-Si-Cr-Ni-Ti [47]

2.10 Pengujian *Open Circuit Potential* (OCP)

Open Circuit Potential (OCP) merupakan sebuah metode atau teknik yang digunakan untuk monitoring proteksi katodik pada material yang akan dianalisis laju korosi yang disesuaikan dengan kriteria standar NACE SP0290. Standar ini menjelaskan bahwa baja dalam kondisi terproteksi dapat dicapai ketika potential decay minimum 100 mV selama periode antara 4 dan 24 jam. Untuk menghindari terjadinya penggetasan hidrogen (*hydrogen embrittlement*) potensial pada saat “off” (“instant-off” voltage) lebih besar dari -950 mV (SCE). Arus DC yang berasal dari power supply di nyalakan pada masing-masing arus proteksi (100, 150 dan 200 mA/m²) selama 30 menit. Setelah itu *power supply* di matikan untuk menguji potential decay dengan menggunakan teknik OCP menggunakan alat *Gamry Instruments* seri G750. Sampel dianggap bisa digunakan pada analisis laju korosi jika hasil kurva OCP-nya stabil. Kondisi stabil hasil pengujian sampel akan ditunjukkan dengan kurva pada monitor computer [48]. Pengujian korosi menggunakan metode *Open Circuit Potential* (OCP) merupakan teknik yang umum digunakan untuk mengevaluasi perilaku korosi material dalam lingkungan tertentu. OCP mengukur potensi elektroda dalam kondisi terbuka, yaitu tanpa arus yang mengalir, sehingga memberikan informasi tentang kecenderungan material untuk terkorosi. Grafik yang dihasilkan dari pengujian menunjukkan perubahan potensi seiring waktu, yang dapat memberikan stabilitas dan ketahanan korosi material yang diuji. Potensial OCP yang tinggi biasanya memiliki ketahanan korosi yang lebih baik dari paduan, karena menunjukkan kecenderungan material untuk teroksidasi atau melepaskan komponen terlarut. Gambar 2.7 menunjukkan grafik *Open Circuit Potential* (OCP) perubahan potensial elektroda material terhadap

elektroda referensi seiring waktu tanpa arus eksternal. Peningkatan OCP positif menandakan material lebih pasif dan tahan korosi, sedangkan penurunan OCP negatif menunjukkan korosi aktif. OCP yang stabil menunjukkan keseimbangan material dengan larutan elektrolit, dan puncak atau lembah dalam grafik bisa menunjukkan perubahan dalam tingkat korosi.

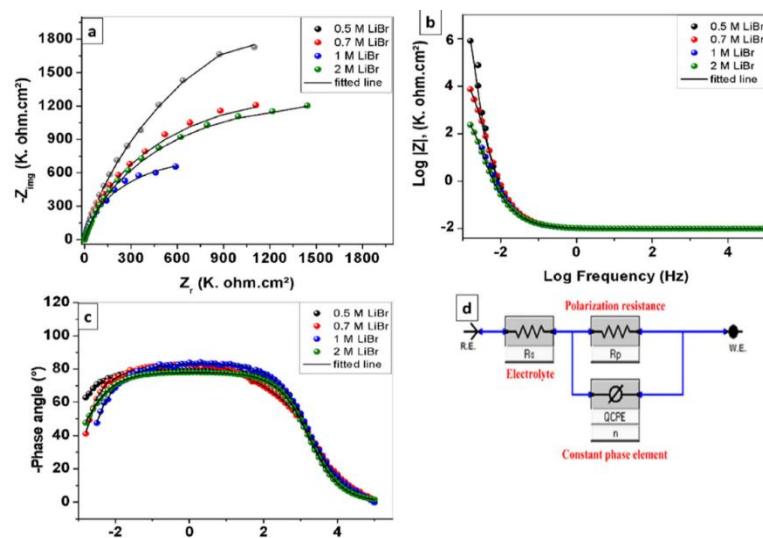


Gambar 2.7 Grafik Open Circuit Potensial [49].

2.11 Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) adalah suatu metode yang digunakan untuk mengetahui perilaku korosi pada suatu elektroda dengan mengamati karakterisasinya. Karakterisasi elektroda yang dimaksud adalah ketahanan polarisasi (R_p), laju korosi (CR) dan mekanisme elektrokimia. Penggunaan metode ini berdasarkan model dari proses korosi oleh sirkuit elektrik. Metode *electrochemical impedance spectroscopy* adalah metode yang menggunakan prinsip polarisasi sangat berguna untuk mengetahui karakteristik logam yang terkorosi. Metode ini menganalisis respon suatu elektroda terkorosi terhadap suatu sinyal potensial AC pada amplitudo rendah (± 10 mV) dari rentang frekuensi yang sangat lebar. Gambar 2.8 menjelaskan tentang data impedansi yang diperoleh dapat direpresentasikan secara grafis dalam plot *Nyquist* dan Bode. Pada

gambar a kurva *Nyquist* menunjukkan hubungan antara resistansi dan kapasitansi sistem., gambar b kurva bode menampilkan magnitudo dan fase impedansi terhadap frekuensi, gambar c kurva phase menunjukkan perubahan sudut fase impedansi terhadap frekuensi, gambar d digunakan untuk memodelkan impedansi sistem elektrokimia yang melibatkan resistansi, kapasitas, dan induktansi, menggambarkan proses elektrokimia pada antarmuka elektrode [50].

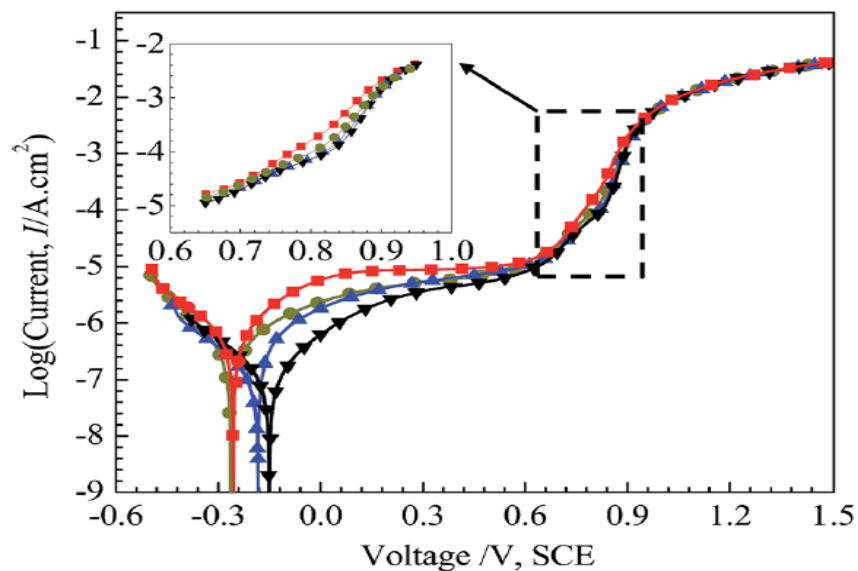


Gambar 2.8 (a) Plot *Nyquist* (b, c) Bode dan phase (d) rangkaian ekivalen yang digunakan dalam proses *fitting* [50].

2.12 Pengujian *Potentiodynamic*

Uji polarisasi potensiodinamik adalah salah satu teknik yang banyak digunakan untuk mengukur korosi pada suatu benda. Teknik ini melibatkan pengukuran perbedaan potensial antara dua elektroda, yaitu elektroda referensi dan elektroda kerja, serta pengukuran arus yang dihasilkan. Arus yang diukur memberikan indikasi tentang seberapa cepat korosi terjadi pada elektroda kerja, biasanya dalam satuan arus per satuan luas, yang disebut sebagai rapat arus. Metode ini berguna untuk menentukan laju korosi aktif/pasif pada potensial yang berbeda

dan membantu dalam memahami proses yang terjadi pada permukaan logam [51]. Gambar 2.9 menunjukkan. ketika logam terpapar pada medium korosif, reaksi reduksi dan oksidasi terjadi, membentuk mikrosel katodik dan anodik pada logam. Proses ini menghasilkan arus dari kedua mikrosel, yang mengakibatkan terbentuknya potensial korosi, E_{corr} , di mana potensial anoda dan katoda saling menyamakan. Parameter elektrokimia yang diukur melalui polarisasi ini mencakup E_{corr} (potensial korosi), I_{corr} (Arus Korosi), CR (Laju Korosi), dan Epasivasi yang terbentuk [49].



Gambar 2.9 Grafik Potensiodinamik [49].

2.13 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan (*hardness test*) adalah suatu proses yang bertujuan untuk mengetahui ketahanan suatu material terhadap deformasi pada daerah lokal atau permukaan material yaitu deformasi plastis. Deformasi plastis adalah suatu keadaan dari material yang ketika diberikan gaya maka material tidak akan kembali ke bentuk semula [52]. Pengujian kekerasan atau hardness test merupakan salah satu cara untuk mengetahui kekuatan atau ketahanan suatu material. Harga kekerasan

bahan tersebut dapat dianalisis dari besarnya beban yang diberikan terhadap luasan bidang yang menerima pembebanan. Secara garis besar terdapat tiga metode pengujian kekerasan logam yaitu penekanan, goresan, dan dinamik. Proses pengujian yang mudah dan cepat dalam memperoleh angka kekerasan yaitu dengan metode penekanan. Dikenal ada tiga jenis metode penekanan, yaitu: Rockwell, Brinnel, Vickers yang masing-masing memiliki perbedaan dalam cara menentukan angka kekerasannya [53].

Metode vickers sebagai pengujian kekerasan material dilakukan dengan cara menekan material atau spesimen uji dengan menggunakan indentor piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besar sudut antar permukaan piramida intan yang saling berhadapan adalah 136° . Pengujian ini dapat digunakan untuk menguji hampir semua jenis logam mulai dari yang lunak hingga yang keras. Pengujian kekerasan pada material mikro dapat dilakukan menggunakan vickers. Rentang beban uji yang digunakan pada pengujian kekerasan vickers berkisar antara 1 kgf sampai 120 kgf, dan beban uji yang umum digunakan adalah 5, 10, 30 dan 50 kgf. Sedangkan waktu penerapan beban uji (*dwell time*) standar biasanya dilaksanakan selama 10 -15 detik. Di dalam pengujian kekerasan vickers perlu diperhatikan mengenai jarak minimal dari titik pusat jejak ke bagian pinggir spesimen, di mana menurut standar ASTM adalah sebesar 2,5 kali diagonal jejak. Jarak minimal antara jejak-jejak yang berdekatan juga 2,5 kali diagonal jejak. Sedangkan menurut standar ISO, jarak minimal dari titik pusat jejak ke bagian pinggir benda uji adalah 2,5 d untuk baja dan paduan tembaga dan 3 d untuk logam-logam ringan, sementara jarak minimal antara jejak adalah 3 d untuk baja dan paduan tembaga, dan 6 d untuk logam-logam ringan [54].

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai Maret 2024 sampai dengan bulan Agustus 2024 di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Tangerang Selatan, Banten, Indonesia. Semua proses pengujian dan preparasi dalam penelitian mulai dari preparasi sampel, uji metalografi, uji kekerasan, uji OCP, uji EIS dan uji Potensiodinamik juga dilakukan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Tangerang Selatan, Banten, Indonesia.

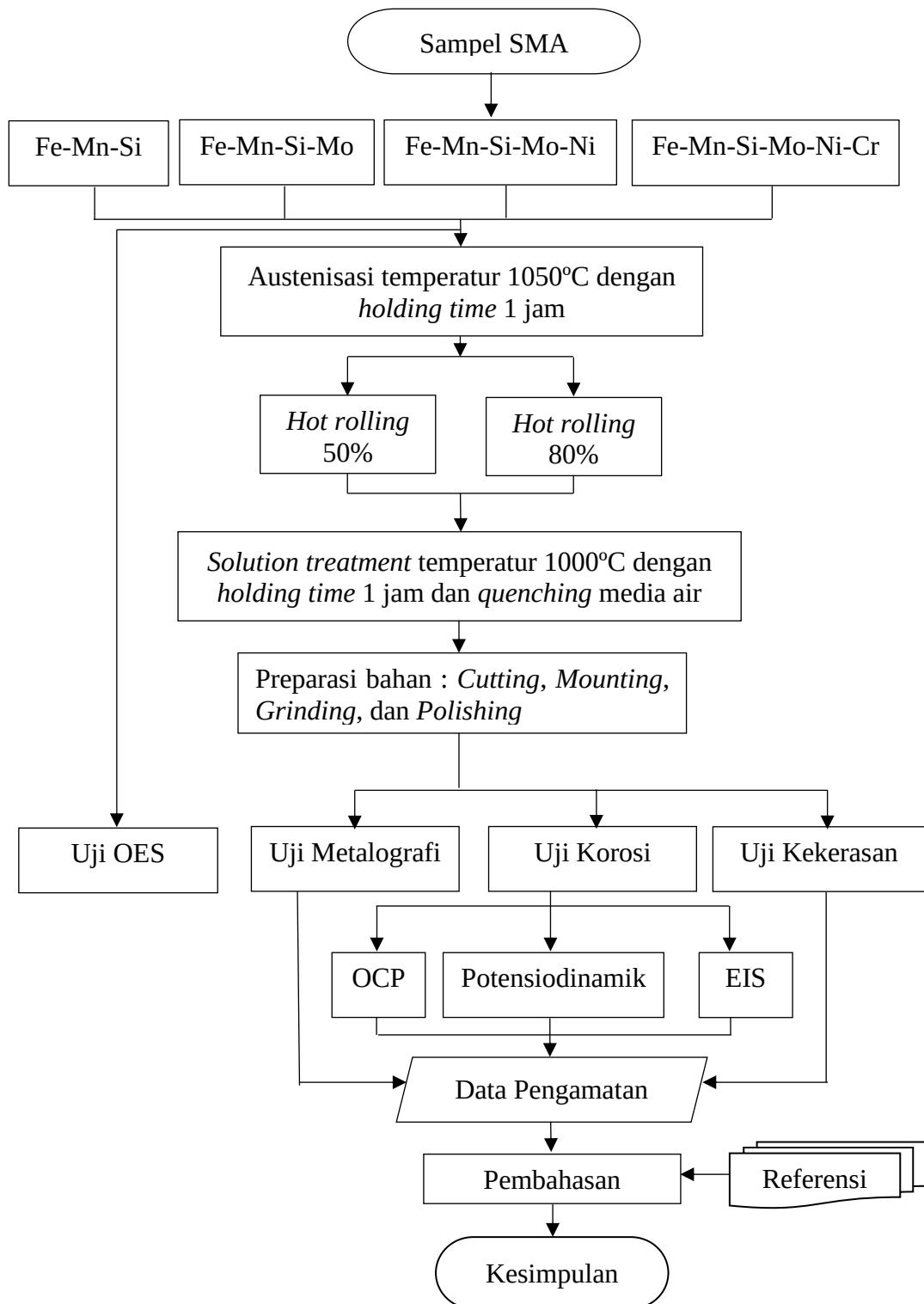
3.2 Informasi Kode Sampel

Tabel 3.1 Informasi Kode Sampel

Kode Sampel	Keterangan
50.A	Paduan Fe-Mn-Si dengan proses <i>hot rolling</i> ketebalan 50%
50.B	Paduan Fe-Mn-Si-Mo dengan proses <i>hot rolling</i> ketebalan 50%
50.C	Paduan Fe-Mn-Si-Mo-Ni <i>hot rolling</i> ketebalan 50%
50.D	Paduan Fe-Mn-Si- Mo-Ni-Cr dengan proses <i>hot rolling</i> ketebalan 50%
80.A	Paduan Fe-Mn-Si dengan proses <i>hot rolling</i> ketebalan 80%
80.B	Paduan Fe-Mn-Si-Mo dengan proses <i>hot rolling</i> ketebalan 80%
80.C	Paduan Fe-Mn-Si-Mo-Ni <i>hot rolling</i> ketebalan 80%
80.D	Paduan Fe-Mn-Si- Mo-Ni-Cr <i>hot rolling</i> ketebalan 80%

3.3 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir prosedur penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat-alat yang Digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya sebagai berikut.

1. Cetakan resin silikon
2. *Cutting machine*
3. Ember
4. *Gamry instruments*
5. Gelas beker
6. Helm
7. Mesin *grinding*
8. Mesin *polishing*
9. Mesin *rolling*
10. Mesin *wire cut*
11. *Microscop optic*
12. *Muffle furnace*
13. Sarung tangan
14. Tang penjepit
15. *Vickers Harness*

3.4.2 Bahan-bahan yang Digunakan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya sebagai berikut.

1. Air media *quenching*
2. Amplas *grade* 80#, 150#, 220#, 400#, 600#, 800#, 1200#, dan 2000#
3. Aquades
4. Baja paduan Fe-Mn-Si, Fe-Mn-Si-Mo, Fe-Mn-Si Mo-Ni, Fe-Mn-Si Mo-Ni-Cr
5. Cairan *polishing*
6. Ca(OH)_2 0,01M
7. Etanol
8. H_2SO_4 0,5 M
9. KOH 0,4 M
10. Larutan Etsa
11. NaCl 3,5%
12. Na_2SO_4 0,1M
13. Resin

3.5 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan pada penelitian kali ini dibagi menjadi beberapa proses yaitu preparasi, *hot rolling*, *solution treatment*, dan beberapa jenis pengujian (OCP, EIS, Potensiodinamik, kekerasan, dan metalografi) diantaranya sebagai berikut.

3.5.1 Pengujian Spektroskopi Emisi Optik (OES)

Pengujian OES dilakukan pada sampel dengan variasi 4 komposisi yaitu sampel (A) Fe-Mn-Si, sampel (B) Fe-Mn-Si-Mo, sampel (C) Fe-Mn-Si-Mo-Ni, dan sampel (D) Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr untuk diketahui komposisi kimianya dengan menggunakan alat OES yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Pengujian OES

3.5.2 Proses Austenisasi

Sampel dimasukkan ke dalam *furnace* untuk menjalani proses austenisasi. Proses ini dilakukan pada temperatur 1050°C untuk memastikan transformasi mikrostruktur berlangsung secara optimal. Selama proses austenisasi, sampel ditahan pada temperatur tersebut selama 1 jam untuk mencapai homogenisasi struktur. Setelah itu, sampel akan didinginkan sesuai prosedur yang ditentukan untuk mencapai sifat material yang diinginkan.

3.5.3 Proses *Hot rolling*

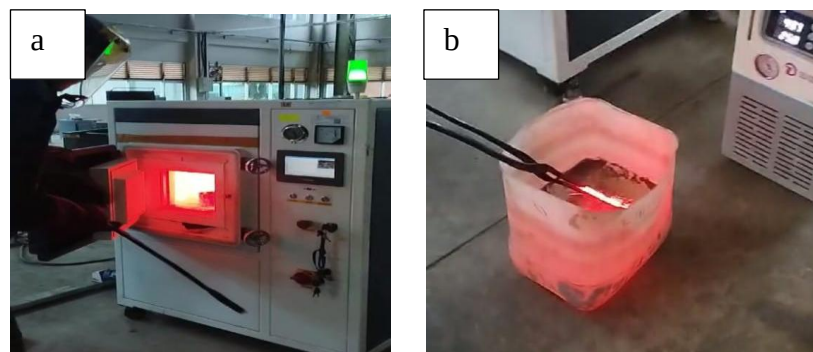
Proses *hot rolling* yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 dilakukan pada sampel (A) Fe-Mn-Si, sampel (B) Fe-Mn-Si-Mo, sampel (C) Fe-Mn-Si-Mo-Ni, dan sampel (D) Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr dengan variasi ketebalan 50% dan 80% sebanyak 8 sampel, 4 sampel ABCD dengan persen reduksi 50% dan 4 sampel ABCD dengan persen reduksi 80% dengan temperatur 1000-1050 °C



Gambar 3.3 Proses *Hot rolling*

3.5.4 Proses *Solution treatment*

Proses *solution treatment* dilakukan pada 8 sampel hasil *hot rolling* dengan menggunakan *furnace* temperatur 1000 °C dan *holding time* selama 1 jam yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 (a) kemudian dilakukan *quenching* dengan media air yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 (b).



Gambar 3.4 Proses *Solution treatment*

3.5.5 Proses Pengujian dan Analisis

Proses pengujian dilakukan dengan 2 jenis pengujian dan 1 pengamatan untuk mengevaluasi sampel secara menyeluruh. Pengujian kekerasan dan pengujian korosi digunakan untuk mengukur sifat mekanik dan ketahanan material. Selain itu, dilakukan juga pengamatan metalografi untuk menganalisis mikrostruktur sampel secara visual.

a. Pengamatan Metalografi

Sebelum dilakukan pengamatan metalografi sampel disiapkan sebanyak 8 sampel dan dipotong dengan bentuk persegi hingga berukuran 1 x 1 cm dengan menggunakan mesin *cutting*. Kemudian dilakukan proses *mounting* pada sampel yang telah terhubung dengan kabel, proses ini dilakukan dengan mencampurkan resin dengan *hardener* yang dicetak di dalam cetakan resin silikon berbentuk bulat hingga mengeras. Setelah itu dilakukan proses *grinding* dengan menggunakan kertas ampelas berukuran 80#, 150#, 220#, 400#, 600#, 800#, 1200#, dan 2000# yang bertujuan untuk membersihkan dan menghaluskan permukaan sampel, dilanjutkan proses *polishing* dengan menggunakan pasta diamond pada *wool polishing* hingga sampel menjadi mengkilap dan tidak ada goresan. Kemudian dilakukan etsa dengan etsa kaling (terbuat dari 5 g CuCl_2 + 100 mL HCl + 100 mL ethanol) selama ± 5 detik dan keringkan kembali sesuai dengan standar ASTM E407. Setelah itu dilakukan pengamatan metalografi menggunakan mikroskop optik *Olympus* dengan menggunakan perbesaran 50x yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.

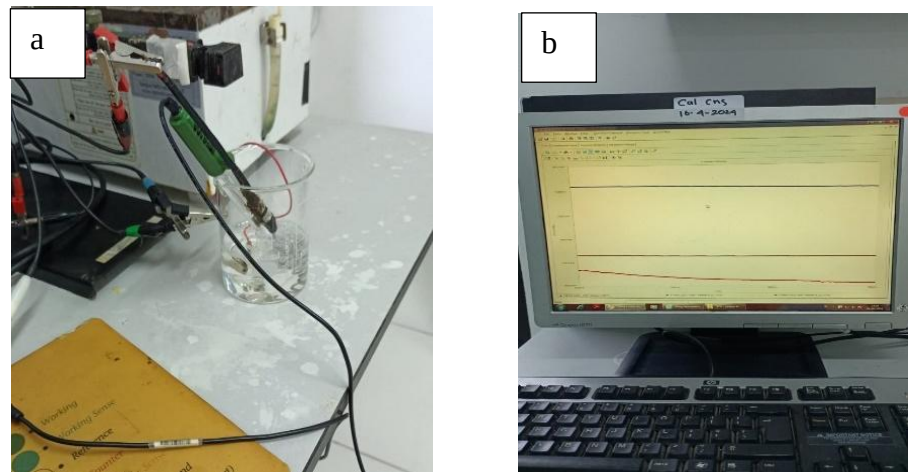


Gambar 3.5 Mikroskop Optik

b. Pengujian Korosi

Sebelum dilakukan pengujian korosi, sampel dilakukan preparasi terlebih dahulu, sebanyak 8 sampel SMA dipotong bentuk persegi hingga berukuran 1 x 1 cm dengan menggunakan mesin *cutting*. Lalu sampel dihubungkan dengan kabel dengan cara disolder,. Selanjutnya dilakukan proses *mounting* pada sampel yang telah terhubung kabel dengan mencampurkan resin dan *hardener* yang dicetak di dalam cetakan resin silikon berbentuk bulat hingga mengeras. Kemudian proses *grinding* dilakukan dengan menggunakan kertas ampelas berukuran 80#, 150#, 220#, 400#, 600#, 800#, 1200#, dan 2000# yang bertujuan untuk membersihkan dan menghaluskan permukaan sampel. Selanjutnya sampel dilakukan pengukuran area sampel untuk dimasukkan datanya dalam *software Gamry Instruments*. Kemudian dibuat larutan asam H_2SO_4 0,5 M, larutan basa SCP dengan komposisi 0,01 M Na_2SO_4 + 0,4 M KOH + 0,001 M $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dan larutan netral

NaCl 3,5 % untuk tiga kali percobaan. Menempatkan elektroda referensi elektroda referensi perak/perak klorida (Ag/AgCl) (Hanna HI 5311 3,5 M larutan KCl), elektroda *counter* platina, dan sampel pada gelas beker betukuran 250 ml yang disusun menjadi suatu rangkaian, lalu sampel direndam yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 (a). Kemudian dilakukan proses elektrokimia di potensiostat dengan perangkat lunak *Gamry Instruments* yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 (b) dengan metode uji OCP, EIS, dan Potensiodinamik.



Gambar 3.6 Pengujian Korosi

C. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers dengan indenter piramida intan dengan standar ASTM E92 yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. Pengujian kekerasan dilakukan dalam 5 titik yang berbeda pada setiap sampel untuk memperoleh nilai rata-rata kekerasan yang dimiliki sampel dengan pembebanan sebesar 0.5 Kgf.



Gambar 3.7 Pengujian Kekerasan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia *Shape memory alloy*

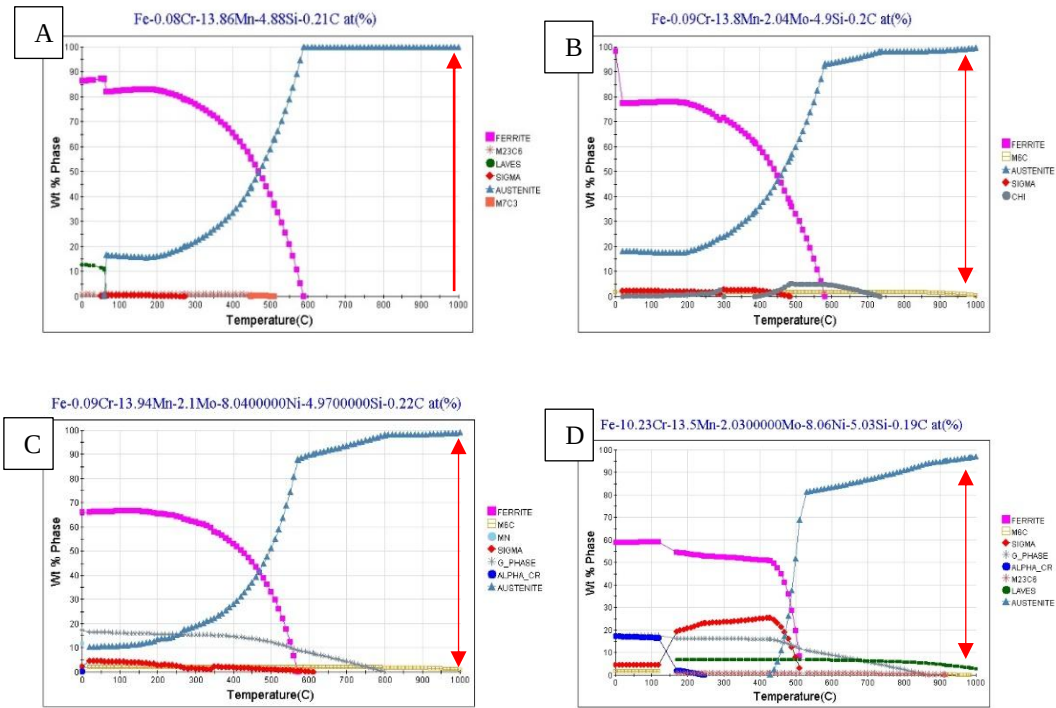
Shape memory alloy (SMA) merupakan material yang memiliki kemampuan untuk kembali ke bentuk aslinya setelah mengalami deformasi ketika diberi perlakuan panas tertentu. Pengujian komposisi kimia untuk mengetahui elemen-elemen penyusun yang mempengaruhi sifat unik material tersebut. Melalui pengujian komposisi kimia dengan alat Spektroskopi Emisi Optik (OES) maka akan menghasilkan persentase dari elemen-elemen penyusun SMA secara akurat. Tabel 4.1 menunjukkan komposisi setiap paduan dan nilai Ms. Nilai Ms dihitung tanpa memasukan unsur Mo pada rumus Ms.

Tabel 4.1 Komposisi Kimia *Shape memory alloy* Hasil Pengujian OES

Alloy	Elements (wt %)							Ms (°C)
	Fe	Mn	Si	Mo	Ni	Cr	C	
A	80,97	13,86	4,88	0	0	0,08	0,21	372.91
B	78,97	13,8	4,9	2,04	0	0,09	0,2	372.64
C	70,64	13,94	4,97	2,1	8,04	0,09	0,22	-151.56
D	60,96	13,5	5,03	2,03	8,06	10,23	0,19	-527.9

Penambahan Mo, Ni, dan Cr dalam SMA berbasis Fe-Mn-Si secara bertahap memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan sifat-sifat paduan.

Setiap unsur memiliki peran unik dalam memperkuat kekuatan mekanik, memperbaiki sifat memori bentuk, serta meningkatkan ketahanan korosi. Pengaruh masing-masing unsur ini akan diuji lebih lanjut melalui serangkaian pengujian metalografi, uji kekerasan, dan uji ketahanan korosi.



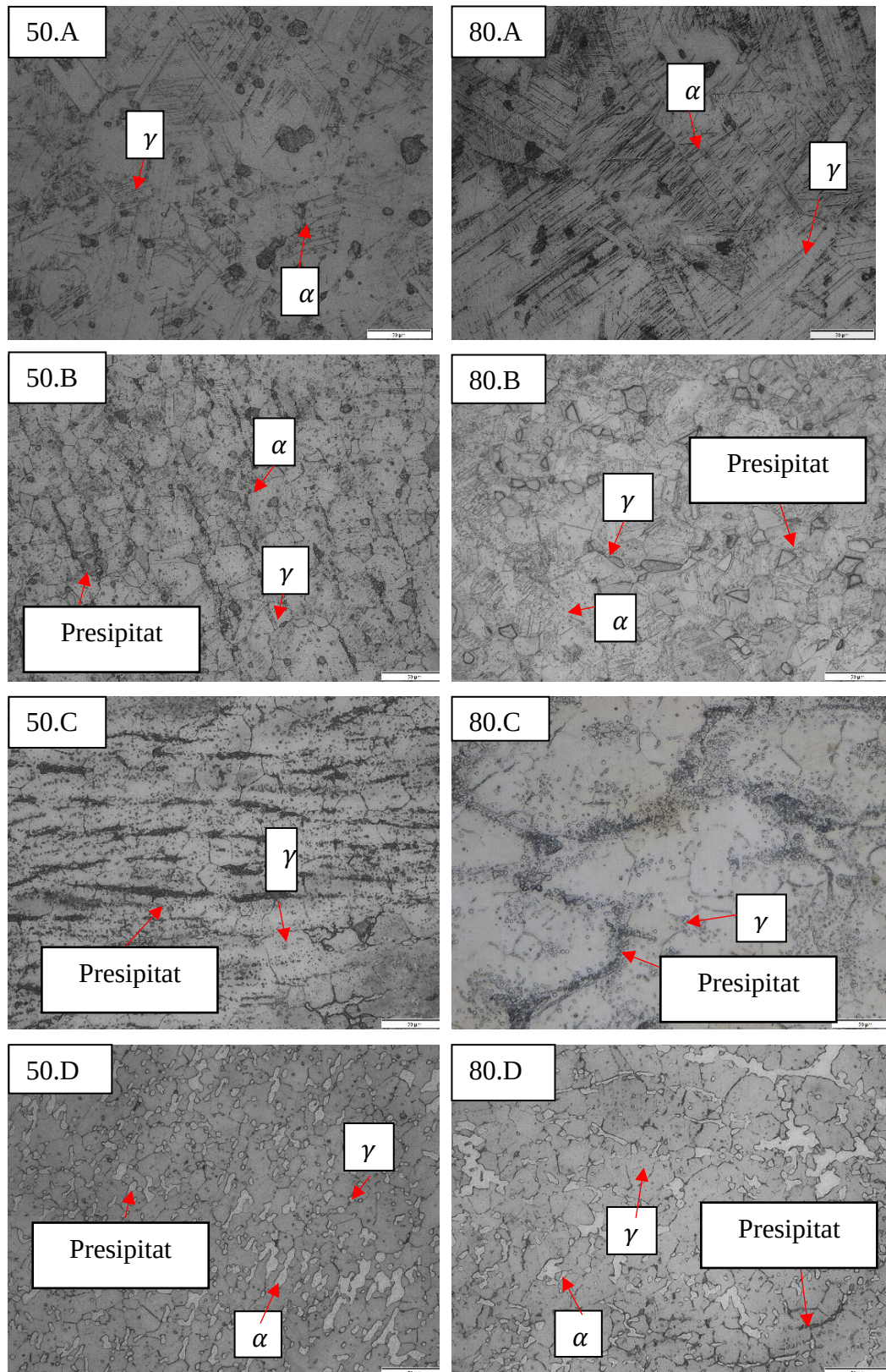
Gambar 4.1 Prediksi Diagram Fasa Menggunakan Jmatpro

Gambar 4.1 memprediksi fasa apa yang terbentuk dengan tambahan unsur yang berbeda di setiap paduannya dan proses perlakuan panas pada temperatur 1000°C. Paduan A Fe-Mn-Si dapat dilihat terbentuk fasa austenit. Paduan B Fe-Mn-Si-Mo terbentuk fasa austenit dan presipitat karbida. Paduan C Fe-Mn-Si-Mo-Ni terbentuk fasa austenit dan presipitat karbida. Paduan D Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr terbentuk fasa austenit dan presipitat karbida. Hal ini sesuai dengan literatur pada temperature 1000°C menghasilkan fasa austenite dan adanya penambahan Mo,Ni, Cr menghasilkan presipitat [36].

4.2 Hasil Pengujian Metalografi

Setelah komposisi kimia dari empat variasi SMA berbasis besi (Fe) dianalisis, langkah berikutnya adalah melakukan pengujian metalografi untuk memahami struktur mikro yang terbentuk, termasuk transformasi fasa, ukuran butir, dan adanya presipitasi yang dapat mempengaruhi sifat mekanik dan korosi SMA setelah dilakukan proses *hot rolling* dan *solution treatment*. Pengamatan struktur mikro dilakukan pada semua spesimen menggunakan *optical microscope* dengan perbesaran 50x untuk mengetahui pengaruh komposisi dari setiap paduan dipengaruhi oleh penambahan unsur paduan seperti Mo 2,04%, Ni 8,04%, Cr 10,23%, dan persen reduksi *hot rolling* 50% dan 80% terhadap hasil mikrostruktur SMA.

Analisis mikrostruktur pada empat jenis SMA menunjukkan variasi yang berbeda dalam komposisi fasa dan karakteristik strukturalnya, yang masing-masing dipengaruhi oleh penambahan unsur paduan dan kondisi pemrosesan yang berbeda. Pengamatan ini dilakukan dengan perbesaran 50x pada dua kondisi reduksi yang berbeda 50% dan 80%. Pada paduan A yang Fe-Mn-Si, struktur mikro terbentuk fasa austenit (77,62%) dan fasa martensit (22,38%) Fasa austenit terbentuk karena adanya unsur Mn yang dapat meningkatkan stabilitas fase austenit [45]. Fasa martensit terbentuk ketika paduan didinginkan di bawah temperatur M_s , yang menyebabkan transisi menjadi martensit. Nilai M_s untuk paduan A dapat dihitung menggunakan perhitungan M_s yang didapat dari literatur. Nilai M_s pada paduan A 372,91 °C. dan proses pendinginan menggunakan media air dengan temperatur ruang 25°C Hal ini sesuai dengan literatur transformasi martensitik terjadi ketika paduan didinginkan di bawah temperatur M_s sehingga terbentuk martensit. [14].



Gambar 4.2 Struktur Mikro *Shape memory alloy* Reduksi 50% dan 80% perbesaran 50x Sampel A, sampel B, Sampel C, Sampel D.

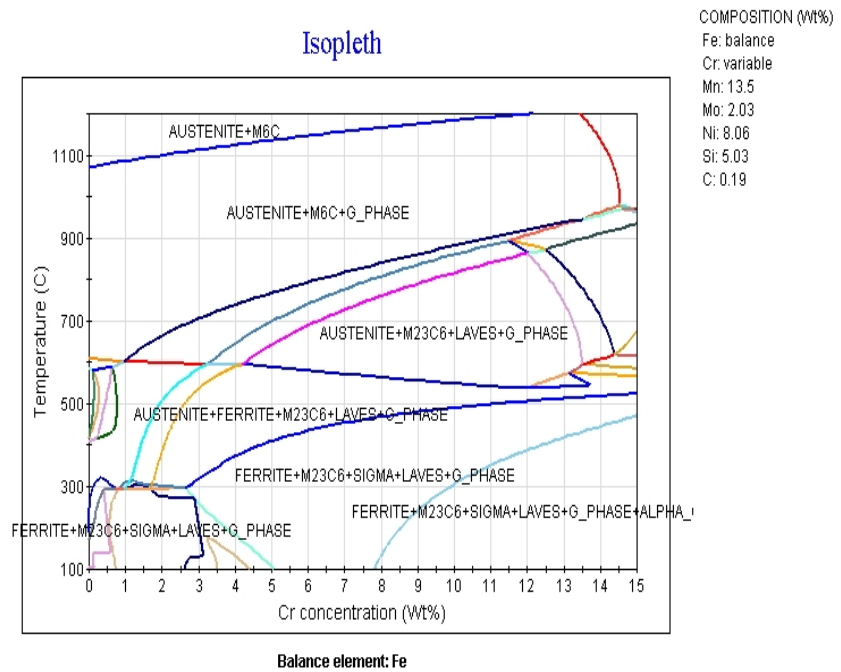
Pada paduan B yang terdiri dari Fe-Mn-Si-Mo, struktur mikro fasa γ -austenit (75,01%), martensit (20,96%), dan presipitat (4,03%) diantara batas butir yang tetap stabil selama tahap pemrosesan homogenisasi, pengerolan panas, dan perlakuan *solution treatment* pada temperatur 1000°C. Jika dibandingkan dengan paduan A terlihat fasa martensit berkurang dan terdapat kemunculan persipitat diantara batas butir. Berkurangnya martensit dikarenakan Nilai Ms pada paduan B lebih kecil yaitu 372,64°C. Mo berfungsi untuk menurunkan temperatur Ms, yang berarti bahwa martensit dapat terbentuk pada temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan paduan yang tidak mengandung Mo. Penambahan molibdenum pada paduan, terutama pada paduan berbasis Fe-Mn-Si, dapat memperkuat pengendalian pembentukan fasa dan mencegah pembentukan fasa yang tidak diinginkan [55]. Selain itu seperti yang diketahui, Mo adalah elemen pembentuk karbida [56]. Pembentukan ini, yang dikenal sebagai fase presipitat, merupakan kondisi yang terjadi umumnya di batas butir. Menurut literatur, diketahui bahwa presipitat di batas butir meningkatkan kekuatan dan kekerasan dengan mencegah transformasi, meningkatkan ketahanan material terhadap kohesi dengan meningkatkan kelenturan dan ketangguhan, serta menghasilkan hasil morfologi yang berbeda untuk *superalloy* [57].

Pada paduan C yang terdiri dari Fe-Mn-Si-Mo-Ni, struktur mikro menunjukkan fasa austenit yang stabil (67,32%) dan terdapat presipitat yang lebih banyak (32,68%) jika dibandingkan dengan paduan B, terlihat juga tidak ada fasa martensit pada paduan ini. Hal ini disebabkan penambahan nikel sebagai unsur penstabil austenit sehingga menghasilkan fasa austenit yang stabil dan secara efektif mengurangi pembentukan α -martensit sehingga tidak terlihat adanya fasa α -

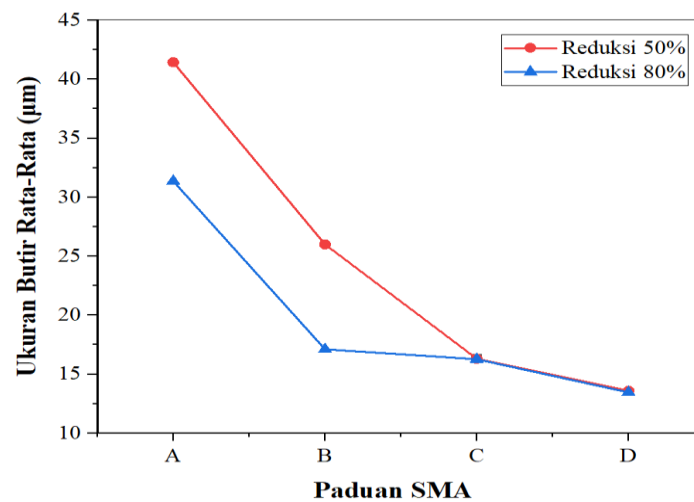
martensit [43]. Terlihat adanya banyak presipitat diantara batas butir yang diprediksi merupakan presipitat karbida $M_{26}C_3$, bentuk presipitat serupa dengan yang dihasilkan dari penelitian [24] dengan ciri presipitat membentuk karbida bulat-bulat hitam diantara batas butir. Presipitat ini juga diprediksi terbentuk dengan menggunakan diagram prediksi fasa pada Gambar 4.3. Penambahan nikel memperkuat keterbatasan matriks untuk mempertahankan elemen ini dalam larutan padat, sehingga meningkatkan peluang pembentukan presipitat menjadi semakin banyak. Batas kelarutan karbon dalam nikel sangat rendah, hanya sekitar 0,03% pada temperatur 1000°C, ketika karbon tidak larut dalam matriks nikel cenderung membentuk senyawa atau fasa sekunder melalui mekanisme presipitasi. Proses ini dimulai ketika karbon melebihi batas kelarutan nikel pada temperatur tinggi, kemudian terpisah dan berkumpul di titik-titik seperti batas butir atau dislokasi saat temperatur menjadi turun [58].

Pada paduan D yang terdiri dari Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr, struktur mikro menunjukkan fasa γ -austenit (50,20 %), terdapat presipitat (2,16%) di batas butir dan terbentuknya fasa ferrit (47,64%). Penambahan kromium dalam paduan dapat menyebabkan terbentuknya struktur mikro ferrit karena Cr merupakan unsur penstabil ferrit [18]. Terbentuknya fasa ferrit sesuai dengan prediksi diagram fasa dengan menggunakan *software* jmatpro pada Gambar 4.3 yang menunjukkan dengan kadar Cr 10,23% pada temperatur 1000°C akan terbentuk fasa austenit, jika temperatur diturunkan pada temperatur yang lebih rendah maka akan terbentuk fasa austenit, ferrit, dan karbida $M_{23}C_6$. Meski Cr bukan merupakan unsur penstabil austenit tetapi, Cr sering dipadukan dengan unsur lain seperti nikel (Ni), yang berfungsi sebagai penstabil austenit. Kombinasi ini menciptakan keseimbangan

antara kekuatan dan keuletan, Cr tetap berfungsi untuk meningkatkan ketahanan korosi dan kekerasan tanpa menghilangkan stabilitas austenit [18].



Gambar 4.3 Prediksi Diagram Fasa Paduan Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr Menggunakan Jmatpro



Gambar 4.4 Hubungan antara Tingkat reduksi ketebalan dan Ukuran Butir pada Paduan Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr

Perbandingan antara sampel dengan reduksi 50% dan 80% menunjukkan perbedaan deformasi paduan ini. Berdasarkan analisis metalografi dan data ukuran butir yang ditampilkan pada Gambar 4.4 dan Tabel 4.2, terdapat korelasi yang jelas antara persentase reduksi *hot rolling* dengan fraksi fasa dan ukuran butir yang dihasilkan pada paduan *shape memory alloy*. Pada reduksi 50%, sampel menunjukkan ukuran butir yang lebih besar dibandingkan dengan sampel yang mengalami reduksi 80%. Hal ini dapat diamati secara konsisten pada semua variasi komposisi paduan (A, B, C, dan D). Semakin tinggi persen reduksi yang diterapkan selama *hot rolling*, semakin besar deformasi yang dialami oleh material, ukuran butir dapat berkurang secara signifikan seiring dengan peningkatan persen reduksi, karena proses rekristalisasi yang terjadi di dalam matriks material [59].

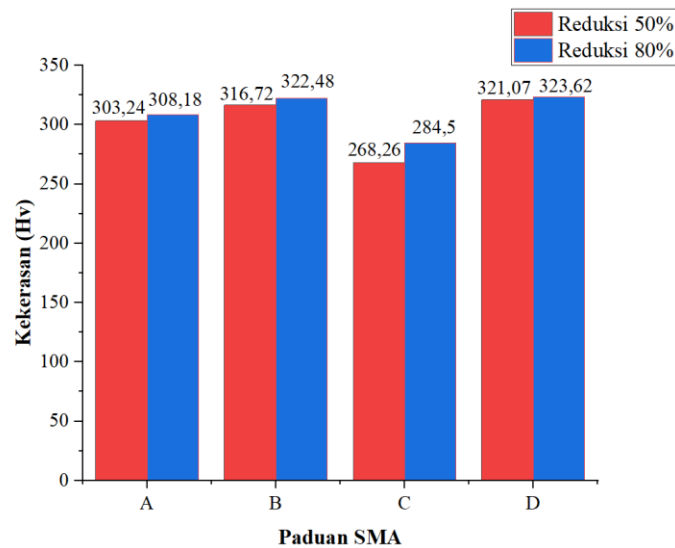
Tabel 4.2 Fraksi Fasa dan Ukuran Butir

Sampel	Fraksi Fasa				Ukuran Butir (μm)
	Austenit (%)	Martensit (%)	Ferit (%)	Presipitat (%)	
50.A	77,62	22,38	0	0	41,44
50.B	75,01	20,96	0	4,03	26
50.C	67,32	0	0	32,68	16,31
50.D	50,20	0	47,64	2,16	13,60
80.A	74,75	25,25	0	0	31,36
80.B	72,22	22,31	0	5,47	17,11
80.C	66,45	0	0	33,55	16,27
80.D	49,42	0	47,51	3,07	13,46

Pengaruh unsur paduan juga terlihat jelas dalam pola penghalusan butir. Paduan A Fe-Mn-Si menunjukkan ukuran butir terbesar dan perbedaan ukuran yang paling signifikan antara reduksi 50% dan 80%. Pada paduan B Fe-Mn-Si-Mo terjadi penghalusan ukuran butir dari paduan A meski dilakukan deformasi dengan persen reduksi yang sama karena adanya penambahan Mo, penambahan molibdenum dapat menyebabkan *refining grain size*, yaitu penurunan ukuran butir, proses ini terjadi karena Mo berfungsi sebagai penghambat pertumbuhan butir selama proses pemanasan dan pendinginan, sehingga menghasilkan butir yang lebih kecil dan lebih homogen [42]. Begitupun pada paduan C terjadi penghalusan ukuran butir dari paduan A Fe-Mn-Si meski dilakukan deformasi dengan persen reduksi yang sama karena adanya penambahan Ni, nikel dalam paduan berbasis Fe dapat berfungsi sebagai agen penghalus butir. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan nikel dalam paduan dapat menghasilkan ukuran butir yang lebih kecil, yang berkontribusi pada peningkatan sifat mekanik, seperti kekuatan tarik dan ketahanan terhadap *creep* [60]. Hal ini disebabkan oleh interaksi antara nikel dan unsur-unsur lain dalam paduan, yang dapat mempengaruhi proses pembentukan fasa dan distribusi ukuran butir selama proses pengolahan. Berbeda halnya dengan paduan D Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr hanya terjadi sedikit penghalusan butir dengan adanya penambahan unsur Cr, penambahan unsur Cr menunjukkan kemampuan unsur terhadap elongasi pada deformasi, kromium membantu mempertahankan ukuran butir meskipun baja telah mengalami proses *rolling*. Dengan meningkatkan stabilitas mikrostruktur, Cr mencegah pertumbuhan butir yang berlebihan, sehingga mempertrahankan sifat mekanik yang diinginkan setelah deformasi [18].

4.3 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan digunakan untuk mengetahui sifat mekanik yang dihasilkan dari pengaruh penambahan paduan dan persen reduksi *hot rolling* terhadap nilai kekerasan. Pengujian kekerasan dengan menggunakan metode *Micro Vickers Hardness* terhadap seluruh sampel dilakukan pada lima titik yang berbeda di permukaan sampel, dengan menggunakan pembebanan sebesar 0,5 Kgf. Data hasil rata-rata pengujian kekerasan dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Diagram Batang Nilai Rata-Rata Pengujian Kekerasan SMA

Analisis nilai kekerasan pada berbagai paduan SMA yang telah mengalami proses *hot rolling* dengan variasi reduksi 50% dan 80% menunjukkan hasil yang berbeda-beda. Pada paduan A (Fe-Mn-Si), peningkatan kekerasan dari 303,24 HV (reduksi 50%) menjadi 308,18 HV (reduksi 80%) relatif moderat. Hal ini berkaitan dengan struktur mikronya yang terdapat banyak fasa α -martensit, sebagaimana terlihat pada hasil metalografi. Terdapat peningkatan fraksi martensit dari paduan A 50% dan 80% yang dihasilkan karena *hot rolling*, Peningkatan fraksi martensit berkontribusi langsung terhadap peningkatan kekerasan material. Martensit

memiliki struktur kristal tetragonal berpusat pada badan (*body-centered tetragonal*, BCT) yang terbentuk dari transformasi austenit. Struktur ini menyebabkan distorsi dalam kisi kristal atom karbon terjebak di dalamnya. Distorsi ini menciptakan tegangan internal yang signifikan, berkontribusi pada peningkatan kekerasan pada material [59].

Paduan B (Fe-Mn-Si-Mo) menunjukkan peningkatan kekerasan yang lebih signifikan, dari 316,72 HV pada reduksi 50% menjadi 322,48 HV pada reduksi 80%. Selain itu paduan B memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan paduan A pada reduksi 50% dan 80%. Penambahan Mo meningkatkan kekerasan dari paduan A tanpa Mo, hal ini menunjukkan komposisi suatu paduan sangat mempengaruhi kekerasannya melalui mekanisme penguatan larutan padat, pembentukan fasa dan mikrostruktur, interaksi antar unsur, serta pengaruh ukuran butir. Dengan adanya penambahan unsur Mo mampu meningkatkan kekerasan. Hal yang paling berpengaruh yaitu dengan penambahan Mo terbentuk presipitat pada struktur mikronya yang dapat meningkatkan kekerasan. Presipitat, seperti karbida atau berfungsi sebagai penghalang bagi pergerakan dislokasi dalam kisi kristal. Akibatnya, material menjadi lebih keras karena pergerakan dislokasi yang terhambat meningkatkan kekuatan material secara keseluruhan [62]. Peningkatan fraksi presipitat dan fraksi martensit pada paduan B dengan persen reduksi 50% dan 80% menyebabkan kekerasan semakin meningkat.

Paduan C (Fe-Mn-Si-Mo-Ni) menunjukkan fenomena menarik terjadi yang menunjukkan nilai kekerasan terendah di antara semua paduan (268,26 HV pada reduksi 50% dan 284,5 HV pada reduksi 80%). Hal ini dikarenakan adanya penambahan unsur nikel yang merupakan unsur penstabil austenit, penstabil

austenit tidak terlalu banyak meningkatkan kekerasan fasa austenit itu sendiri. Justru dengan keberadaan nikel dapat menurunkan kekerasan fasa austenit [18]. Menurunnya nilai kekerasan jika dibandingkan dengan paduan B yaitu karena tidak terdapat martensit pada paduan ini. Peningkatan fraksi presipitat dan penghalusan ukuran butir membuat kekerasan meningkat pada paduan C jika dibandingkan persen reduksi 50% dan 80%. Hal ini dikarenakan ketika material mengalami deformasi, dislokasi terbentuk dan butir-butirnya menjadi lebih kecil, yang meningkatkan kekerasan [63].

Paduan D (Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr) menunjukkan nilai kekerasan tertinggi diantara paduan A,B, dan C (321,07 HV pada reduksi 50% dan 324,62 HV pada reduksi 80%). Hal ini dikarenakan adanya penambahan unsur Cr dapat meningkatkan kekerasan [18]. Kromium berfungsi sebagai unsur penguat dengan membentuk larutan padat dalam matriks logam. Ketika Cr ditambahkan ke dalam paduan, atom-atom Cr yang larut mengganggu kisi kristal besi, menciptakan distorsi yang menghambat pergerakan dislokasi. Hal ini dikenal sebagai *solid solution strengthening*, peningkatan konsentrasi atom *solute* (kromium) berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan kekerasan material [64]. Kekerasan pada paduan D yang lebih tinggi dengan penambahan Cr dapat dijelaskan melalui teori *Ruled Mixed*. Teori ini menyatakan bahwa kekerasan total suatu material merupakan gabungan kekerasan dari fasa-fasa penyusunnya, yang dihitung berdasarkan fraksi volumetrik dan sifat mekanik masing-masing fasa. Dalam paduan D, keberadaan fasa austenit, ferrit, dan presipitat memberikan kontribusi yang berbeda terhadap kekerasan. Meskipun jumlah presipitat dalam paduan D relatif sedikit, keberadaannya tetap mampu memberikan peningkatan kekerasan

yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh sifat penguatan presipitat yang cenderung meningkat secara eksponensial seiring dengan keberadaan presipitat dalam struktur mikro [65].

Tabel 4.3 Data Analisis Regresi Linear Berganda Hubungan Fraksi Fasa dan Fraksi Presipitat Terhadap Nilai Kekerasan

Hasil Regresi Statistik	
R^2	0,8895
Galat	88,84
<i>Significant F</i>	0,040
P-value Fraksi Martensit	0,0017
P-value Fraksi Austenit	0,0019
P-value Fraksi Ferrit	0,122
P-value Fraksi Presipitat	0,269

Besarnya pengaruh ukuran butir dan fraksi fasa martensit terhadap kekerasan dapat hitung dengan analisis regresi linear berganda menghasilkan data pada Tabel 4.3. Dari hasil analisis statistik yang dilakukan, nilai R^2 menunjukkan 88,95% variabel fraksi fasa dan fraksi presipitat berpengaruh terhadap kekerasan SMA dengan standar error sebesar 88,84. Nilai *significant F* sebesar 0,040 ($<0,05$) menunjukkan bahwa model regresi yang digunakan signifikan secara keseluruhan pada tingkat kepercayaan 95%. Nilai P-value adalah probabilitas bahwa hasil yang ditemukan terjadi secara kebetulan jika tidak ada hubungan antara variabel yang diuji. P-value kecil (misalnya $<0,05$) menunjukkan hubungan yang signifikan. Fasa yang paling dominan menentukan nilai kekerasan adalah fraksi martensit, karena

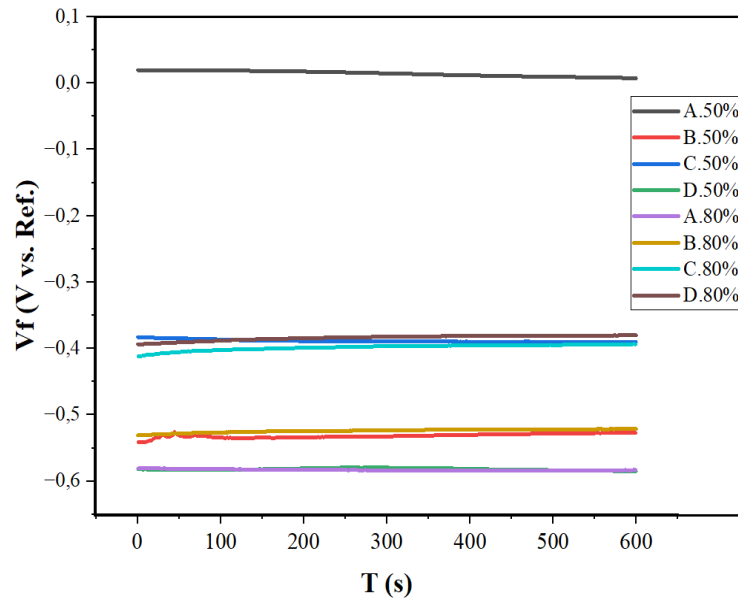
memiliki P-value terkecil (0,0017). Hal ini menunjukkan bahwa fraksi martensit memiliki hubungan yang paling kuat dan signifikan terhadap nilai kekerasan dibandingkan dengan fasa lainnya.

4.4 Hasil Pengujian Korosi

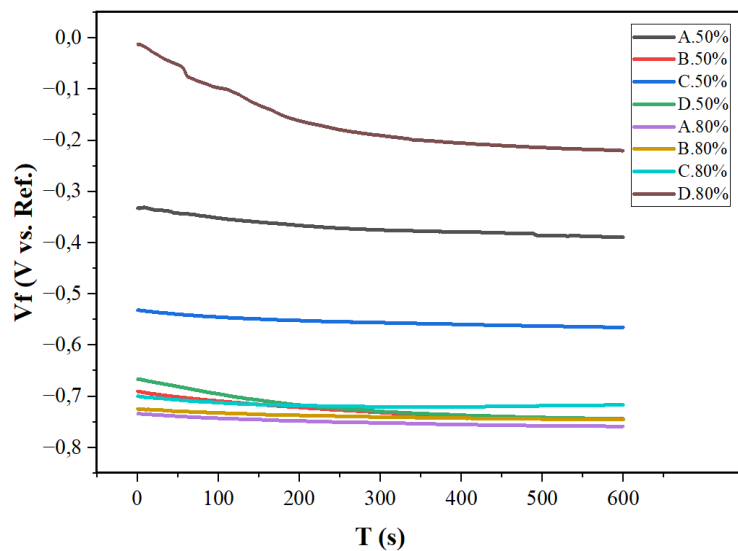
4.4.1 Hasil Pengujian OCP (*Open Circuit Potential*)

Pengujian *Open Circuit Potential* merupakan salah satu metode penting yang bisa dilakukan dalam analisis pengujian korosi pada suatu material, tujuannya untuk mengukur tegangan elektrokimia suatu material dalam larutan korosif tanpa adanya arus listrik yang mengalir untuk mengetahui kecenderungan material terhadap korosi. Semakin negatif nilai OCP, semakin besar kemungkinan material tersebut mengalami korosi. Jika dilihat dalam bentuk grafik menunjukkan perubahan potensi elektrokimia suatu material terhadap waktu dalam larutan korosif. Jika grafik menunjukkan garis yang stabil, itu berarti material dalam kondisi pasif, yang artinya material terlindungi dengan baik dari korosi. Jika potensial naik secara bertahap, itu menunjukkan material sedang membentuk lapisan pelindung (pasif) yang meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Sebaliknya, jika grafik menunjukkan penurunan potensial, ini menandakan bahwa material mulai terkorosi atau lapisan pelindungnya rusak, membuat material lebih rentan terhadap korosi [66]. Pengujian korosi pada penelitian ini dilakukan pada semua sampel SMA dengan menggunakan 3 larutan yang berbeda untuk diketahui masing-masing pengaruhnya, larutan asam berupa H_2SO_4 , larutan netral berupa NaCl , dan larutan basa berupa campuran 0,01 M Na_2SO_4 + 0,4

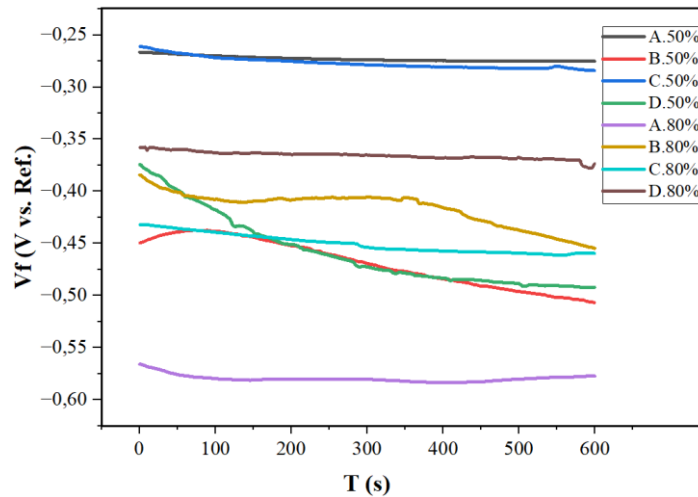
M KOH + 0,001 M Ca(OH)₂ yang merupakan larutan *simulated concrete pore* (SCP). Setelah dilakukan perendaman pada ketiga larutan selama 600 detik didapatkan data OCP setiap paduan yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 larutan H₂SO₄, Gambar 4.7 larutan NaCl, Gambar 4.8 dalam larutan SCP. Nilai hasil OCP dapat dilihat pada Tabel 4.4.



Gambar 4.6 Grafik OCP pada Larutan H₂SO₄



Gambar 4.7 Grafik OCP pada Larutan NaCl



Gambar 4.8 Grafik OCP pada Larutan SCP

Dapat dilihat pada Gambar 4.6 dalam lingkungan asam paduan 50.A memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan paduan lain, sedangkan paduan 50.D memiliki nilai yang lebih rendah, dengan urutan nilai kestabilan OCP yaitu : Paduan 50.A>80.D>50.C>80C>80B>50B>80A>50D. Pada Gambar 4.7 dalam lingkungan netral paduan 80.D memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan paduan lain, sedangkan paduan 80.A memiliki nilai yang lebih rendah, dengan urutan nilai kestabilan OCP yaitu : Paduan 80.D>50.A>50C>80C>80B>50D>50B>80A. Pada Gambar 4.8 dalam lingkungan basa paduan 50.A memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan paduan lain sama dengan tren pada larutan asam, sedangkan paduan 80.A memiliki nilai yang lebih rendah sama dengan tren pada dalam larutan netral, dengan urutan nilai kestabilan OCP yaitu : Paduan 50.A>80.C>.80D>80B>80.C>50D>50B>80A.

Perbedaan nilai OCP pada setiap paduan dalam tiga larutan dilihat pada Tabel 4.4 yang berbeda dipengaruhi oleh persen reduksi pengerolan dan

unsur paduan yang ditambahkan. Perlakuan *rolling* yang berbeda dapat mempengaruhi perilaku korosi, di mana pengurangan *rolling* yang lebih besar berhubungan dengan penurunan kecenderungan korosi [67]. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menentukan penambahan paduan yang sesuai seperti Cr, Ni, Cu, Co, dan N, yang akan meningkatkan ketahanan korosi tanpa mengurangi sifat memori bentuknya [14]. Jika dilihat pada grafik OCP dalam ketiga larutan, paduan SMA lebih mulia di lingkungan SCP dibandingkan dengan larutan H₂SO₄, dan larutan NaCl 3,5%. Hal ini umumnya menunjukkan paduan SMA tidak menimbulkan korosi pada larutan basa (pH 13,10) [12].

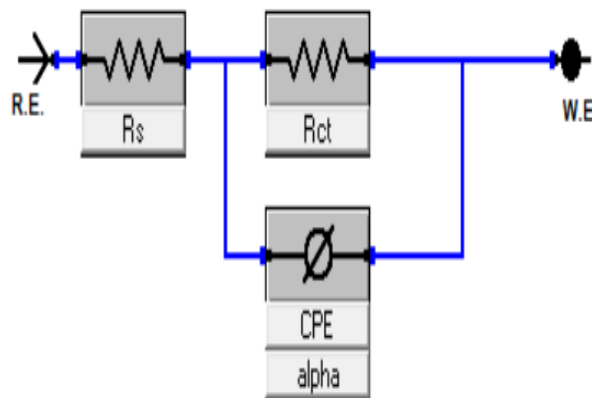
Tabel 4.4 Hasil Pengujian OCP

Sampel	Larutan H ₂ SO ₄		Larutan NaCl		Larutan SCP	
	Min (mV)	Max (mV)	Min (mV)	Max (mV)	Min (mV)	Max (mV)
50.A	7,465	19,57	-388,9	-331,1	-275,2	-266,5
50.B	-541,6	-525,4	-743,9	-690,7	-506,7	-437,2
50.C	-390,5	-382,7	-565,3	-531,8	-284,1	-261,2
50.D	-584,8	-579,4	-744,3	-666,7	-492,2	-374,4
80.A	-584,0	-580,5	-758,7	-733,9	-454,5	-384,2
80.B	-530,7	-521,3	-745,6	-724,7	-461,2	-432,0
80.C	-411,6	-393,3	-720,7	-700,1	-377,7	-357,5
80.D	-393,7	-380,0	-220	-12,10	-583,3	-565,9

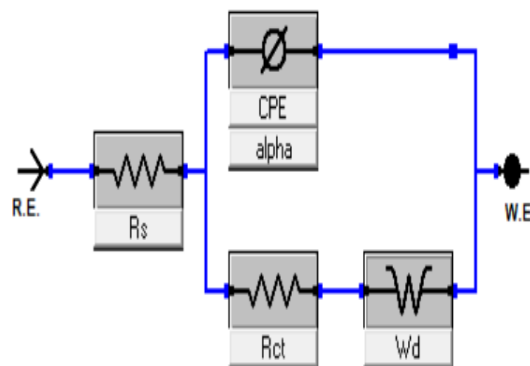
4.4.2 Hasil Pengujian EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*)

Pengujian *electrochemical impedance spectroscopy* merupakan pengujian lain yang dapat dilakukan untuk menganalisis pengujian korosi

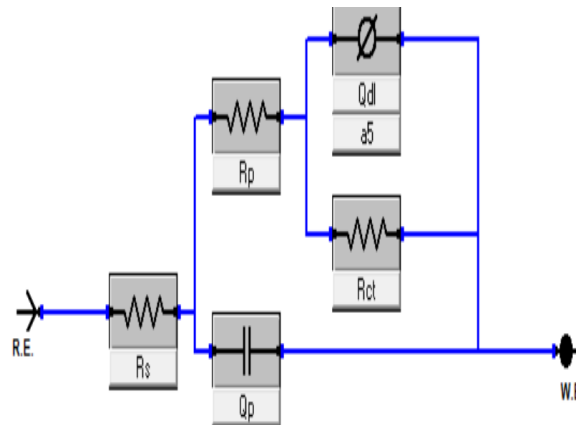
pada sampel SMA dengan menggunakan prinsip elektrokimia, tujuan dilakukan pengujian ini untuk mengukur ketahanan material terhadap korosi dengan melihat bagaimana material merespons arus listrik pada berbagai frekuensi. EIS membantu mengetahui seberapa efektif lapisan pelindung material dan mengidentifikasi proses korosi yang terjadi. Prinsip dasar EIS melibatkan penerapan sinyal AC ke dalam sistem dan pengukuran tahanan, yang merupakan resistansi kompleks pada berbagai frekuensi. Model *Randles Modified* digunakan sebagai sirkuit sederhana untuk dapat mendeskripsikan perilakunya dalam larutan elektrolit [26]. Model *Randles Modified* dapat dilihat pada Gambar 4.9, 4.10, dan 4.11.



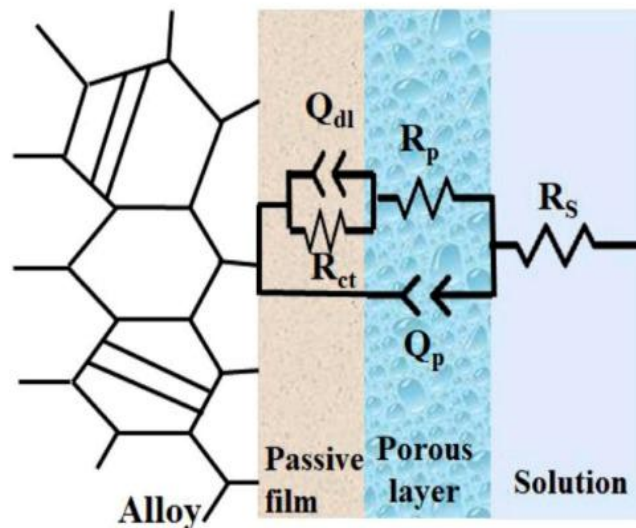
Gambar 4.9 Rangkaian Sirkuit Model *Randles Modified* Larutan H_2SO_4



Gambar 4.10 Rangkaian Sirkuit Model *Randles Modified* Larutan NaCl



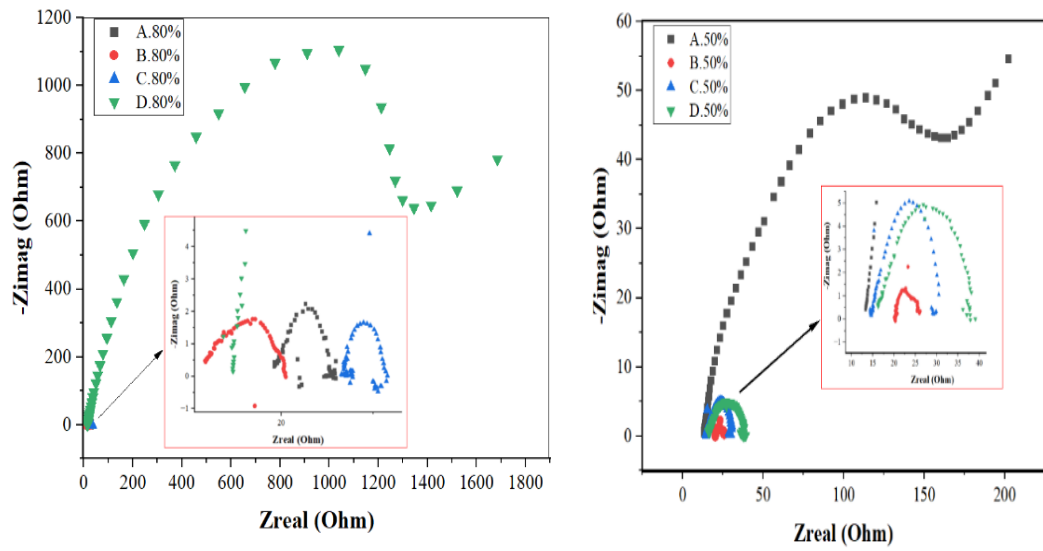
Gambar 4.11 Rangkaian Sirkuit Model *Randles Modified* Larutan SCP



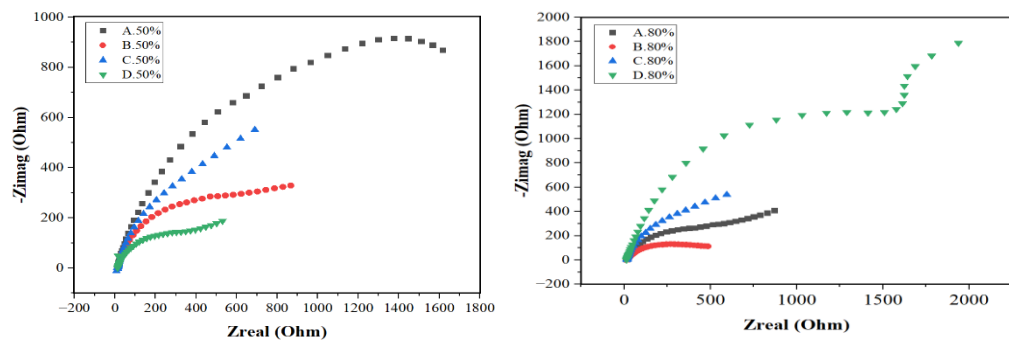
Gambar 4.12 Ilustrasi Mekanisme Perilaku Korosi dan Perilaku Elektrokimia

Gambar 4.9, 4.10, dan 4.11 menunjukkan rangkaian listrik dengan model *Randles Modified* yang terbentuk untuk menganalisis sistem elektrokimia. Terdapat beberapa parameter penting dalam rangkaian ekivalen, pada larutan H_2SO_4 (R_s, R_{ct}, CPE), larutan NaCl ($R_s, R_{ct}, \text{CPE}, \text{WD}$), larutan SCP ($R_s, R_p, R_{ct}, Q_{dl}, Q_p$). Dalam ketiga larutan

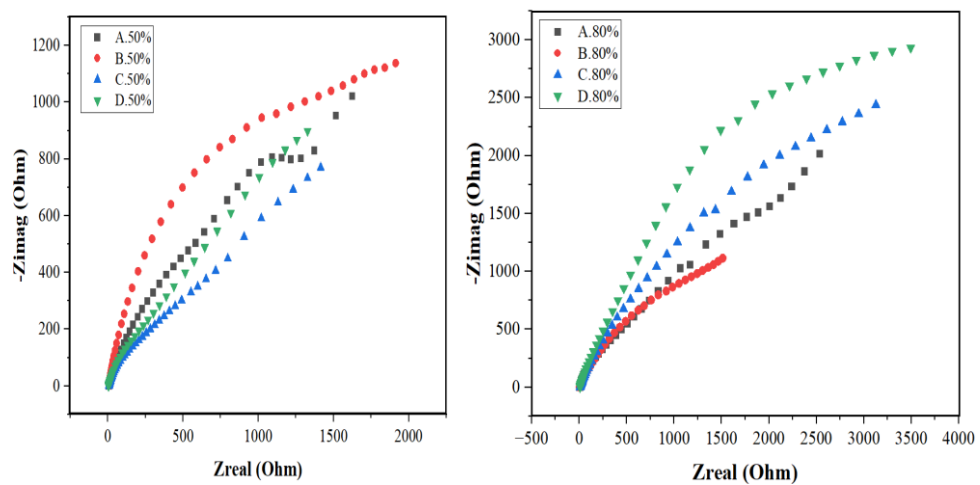
elemen-elemen tersebut menunjukkan R_s berarti resistensi elektrolit antara elektroda kerja dan elektroda referensi, R_{ct} berarti resistansi dari lapisan antarmuka antara elektroda dan elektrolit, CPE berarti elemen fase konstan, yang dalam teori akan mewakili kapasitas lapisan ganda elektrik (Q_{dl}), WD menggambarkan impedansi yang berhubungan dengan proses difusi pada larutan elektrolit, R_p berarti resistensi polarisasi menggambarkan pengaruh lapisan pelindung, Q_p menggambarkan ketidaksempurnaan kapasitas pada proses polarisasi, tetapi di sini berarti kapasitor yang tidak sempurna ($n < 1$). Ketidaksempurnaan ini bisa bersifat mekanik (permukaan kasar) atau komposisi kimia yang tidak merata [26]. Dapat dilihat bahwa larutan H_2SO_4 menunjukkan proses korosi terjadi melalui satu reaksi kimia, begitupun dengan larutan $NaCl$ dengan difusi, larutan SCP menunjukkan adanya perilaku lapisan pasif. Gambar 4.12 menunjukkan ilustrasi korosi pada paduan logam dihambat melalui beberapa lapisan pelindung. Ion dalam larutan pertama-tama dihambat oleh resistansi larutan (R_s) yang memperlambat pergerakan ion menuju logam. Selanjutnya, lapisan pori memberikan perlindungan tambahan melalui resistansi pori (R_p) dan kapasitansi pori (Q_p) yang menahan difusi ion. Jika ion melewati lapisan pori, lapisan pasif melindungi logam dengan resistansi transfer muatan (R_{ct}) yang menghalangi reaksi elektrokimia dan kapasitansi lapisan pasif (Q_{dl}) yang menahan muatan. Namun, jika ion agresif menembus semua hambatan ini, lapisan pasif dapat rusak, memungkinkan korosi terjadi pada logam. Parameter hasil pengujian EIS dilihat pada tabel 4.5 larutan H_2SO_4 , Tabel 4.6 larutan $NaCl$, dan Tabel 4.7 larutan SCP



Gambar 4.13 Grafik EIS pada Larutan H_2SO_4



4.14 Grafik EIS pada Larutan NaCl



Gambar 4.15 Grafik EIS pada Larutan SCP

Tabel 4.5 Parameter EIS baja Fe-Mn-Si-Ni-Cr dalam Larutan H₂SO₄

Sampel	Rs (ohm)	CPE	n	Rct (ohm)
50.A	12,15	0,692 x 10 ⁻³	560,8 x 10 ⁻³	197,1
50.B	20,11	15,18 x 10 ⁻³	509,9 x 10 ⁻³	5,915
50.C	14,70	4,614 x 10 ⁻³	699,5 x 10 ⁻³	15,95
50.D	16,04	1,847 x 10 ⁻³	528,0 x 10 ⁻³	22,80
80.A	19,47	0,182 x 10 ⁻³	809,2 x 10 ⁻³	5,286
80.B	11,18	5,546 x 10 ⁻³	415,2 x 10 ⁻³	9,641
80.C	27,10	3,406 x 10 ⁻³	955,9 x 10 ⁻³	3,680
80.D	14,43	0,102 x 10 ⁻³	805,4 x 10 ⁻³	2.016

Pada Tabel 4.5 larutan H₂SO₄, paduan 80D memiliki nilai Rct paling tinggi 2.016 ohm itu berarti menunjukkan ketahanan korosi yang lebih tinggi dibandingkan paduan lainnya, sedangkan paduan 80C memiliki nilai Rct yang sangat rendah 5.286 ohm, hal ini sesuai dengan diameter semi lingkaran kurva *Nyquist* pada Gambar 4.13, Gambar 4.14, dan Gambar 4.15. Kurva *Nyquist* dari hasil pengujian EIS menunjukkan bahwa semakin ke kanan semakin besar jari-jari dari kurva tersebut. Semakin besar jari-jari kurva, menandakan nilai tahanan polarisasi yang semakin meningkat dan berakibat pada laju korosi yang menurun [69]. Nilai Rs berkisar antara 11.18 ohm hingga 27.10 ohm, yang mencerminkan resistansi listrik larutan H₂SO₄ Nilai yang lebih tinggi sampel 80.C menunjukkan larutan yang memiliki hambatan listrik lebih besar, kemungkinan karena perubahan kondisi larutan di sekitar sampel. Paduan 80D

memiliki nilai CPE yang paling rendah itu berarti menunjukkan lapisan pelindung yang lebih homogen dan stabil. Persen reduksi *hot rolling* yang lebih tinggi akan menghasilkan perlindungan yang lebih baik [67].

Tabel 4.6 Parameter EIS baja Fe-Mn-Si-Ni-Cr dalam Larutan NaCl

Sampel	Rs (ohm)	CPE (S*s ^a)	N	Wd S*s ^a (1/2)	Rct (ohm)
50.A	9,939	0,087 x 10 ⁻³	760,1 x 10 ⁻³	0,872 x 10 ⁻³	1.304
50.B	16,13	0,136 x 10 ⁻³	832,9 x 10 ⁻³	2,375 x 10 ⁻³	545,7
50.C	12,29	0,539 x 10 ⁻³	889,3 x 10 ⁻³	1,955 x 10 ⁻³	538,6
50.D	12,69	0,332 x 10 ⁻³	734,0 x 10 ⁻³	4,998 x 10 ⁻³	365,3
80.A	15,40	0,089 x 10 ⁻³	829,9 x 10 ⁻³	1,903 x 10 ⁻³	496,7
80.B	12,65	0,694 x 10 ⁻³	622,8 x 10 ⁻³	102,9 x 10 ⁻³	555,7
80.C	14,54	0,671 x 10 ⁻³	882,3 x 10 ⁻³	1,794 x 10 ⁻³	555,1
80.D	12,60	0,053 x 10 ⁻³	854,1 x 10 ⁻³	0,552 x 10 ⁻³	1.592

Pada Tabel 4.6 larutan NaCl, paduan 80D memiliki nilai Rct paling tinggi 1.592 ohm dibandingkan paduan lainnya, Paduan 50D memiliki nilai Rct yang sangat rendah 365.3 ohm. Nilai Rs berkisar antara 9,939 ohm hingga 16,13, yang mencerminkan resistansi listrik larutan NaCl nilai yang lebih tinggi sampel 50.B. Nilai CPE paling rendah dimiliki Paduan 80D. Pada Tabel 4.7 larutan SCP paduan 80A memiliki nilai Rct paling tinggi 22.000 ohm, paduan 50A memiliki nilai Rct yang sangat rendah 3.185 ohm. Nilai Rs

berkisar antara 4,446 ohm hingga 11,07. Berbeda dengan larutan yang lainnya dalam larutan SCP ini terbentuk lapisan ganda yang terbentuk.

Tabel 4.7 Parameter EIS baja Fe-Mn-Si-Ni-Cr dalam Larutan SCP

Sam pel	Rs (ohm)	N	Rp (ohm)	Qdl (S*s^a)	Qp (F)	Rct (ohm)
50.A	6,915	$538,2 \times 10^{-3}$	1,577	$0,003 \times 10^{-3}$	$0,275 \times 10^{-3}$	3.185
50.B	7,198	$436,3 \times 10^{-3}$	0,0008	$0,228 \times 10^{-3}$	$0,009 \times 10^{-3}$	5.171
50.C	8,067	$0,551 \times 10^{-3}$	0,00004	$0,551 \times 10^{-3}$	$0,005 \times 10^{-3}$	3.657
50.D	4,446	$563,0 \times 10^{-3}$	1,549	$0,467 \times 10^{-3}$	$0,009 \times 10^{-3}$	3.229
80.A	9,825	$427,5 \times 10^{-3}$	0,00004	$0,271 \times 10^{-3}$	$0,008 \times 10^{-3}$	22.000
80.B	4,668	$546,8 \times 10^{-3}$	0,0003	$0,230 \times 10^{-3}$	$0,004 \times 10^{-3}$	3.462
80.C	11,07	$517,3 \times 10^{-3}$	1,914	$0,160 \times 10^{-3}$	$0,003 \times 10^{-3}$	11.290
80.D	9,699	$492,3 \times 10^{-3}$	0,00003	$0,137 \times 10^{-3}$	$0,003 \times 10^{-3}$	17.510

4.4.3 Hasil Pengujian Potensiodynamik

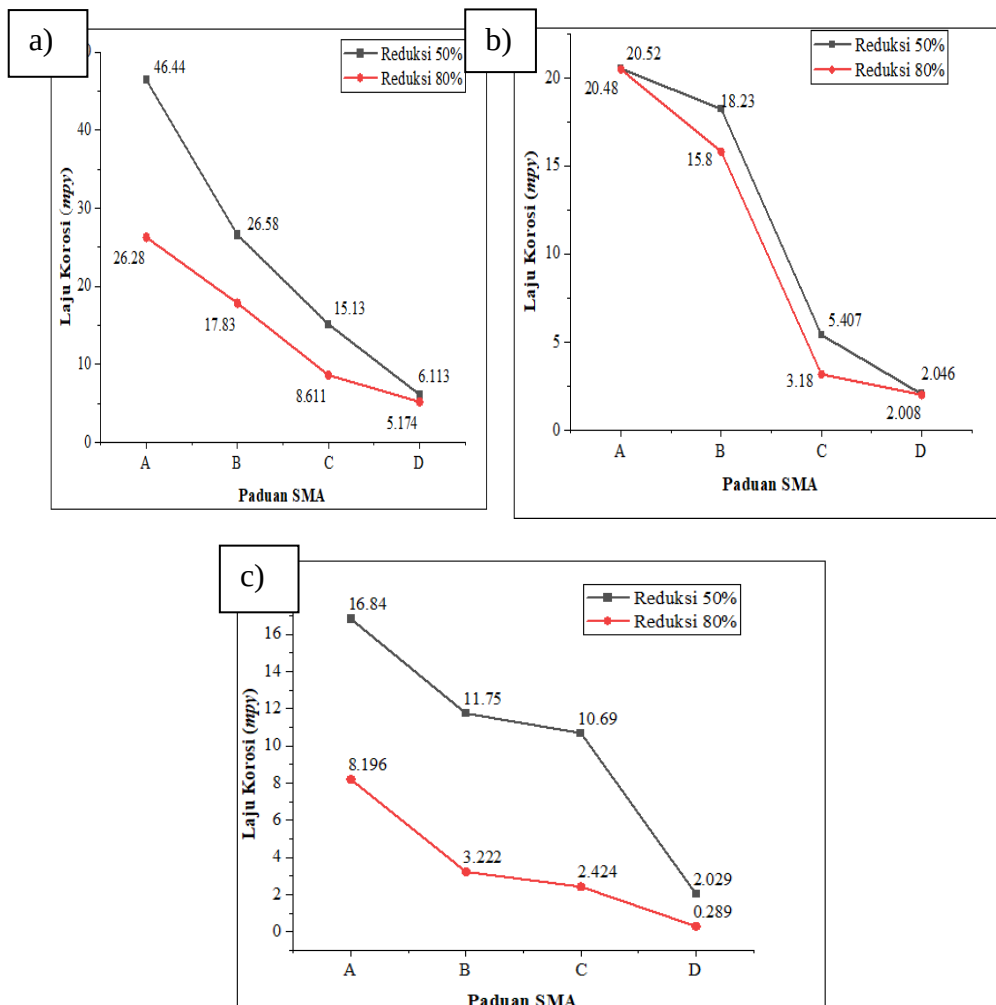
Pengujian potensiodynamik bertujuan untuk mengevaluasi perilaku korosi material dalam lingkungan tertentu melalui analisis elektrokimia. Uji ini memungkinkan penentuan laju korosi dengan mengukur densitas arus korosi (*icorr*), yang menggambarkan seberapa cepat material mengalami degradasi. Selain itu, potensial korosi (*Ecorr*) dapat diidentifikasi untuk mengetahui kecenderungan material terhadap korosi. Pengujian ini juga menilai kemampuan material dalam membentuk lapisan pasif pelindung, yang terlihat dari potensial pasivasi (*Epasivasi*). Informasi terkait parameter

korosi, seperti korosi potensial (E_{corr}), korosi kerapatan arus (I_{corr}), dan laju korosi dalam Tabel 4.8. Kurva polarisasi potensiodinamik yang diperoleh dalam larutan H_2SO_4 , NaCl 3,5% dan SCP ditunjukkan pada Gambar.

Dapat dilihat pada Gambar 4.17, 4.18, 4.19, dan Tabel 4.8 menunjukkan hasil pengujian potensiodinamik yang diperoleh pada ketiga larutan H_2SO_4 , NaCl 3,5% dan SCP. Pada persen reduksi 50% dalam larutan H_2SO_4 , paduan D memiliki laju korosi (*corrosion rate*) paling rendah yaitu 6,113 mpy dengan nilai i_{corr} yang kecil yaitu $6,690E-03 A/cm^2$, sedangkan paduan 50.A memiliki laju korosi (*corrosion rate*) paling tinggi yaitu 46,44 mpy dengan nilai i_{corr} yang tinggi yaitu $48,80 E-03 A/cm^2$ diantara paduan yang lainnya. Tren yang sama ditampilkan dalam larutan NaCl dan SCP paduan 50.D memiliki laju korosi dan i_{corr} yang kecil. Sedangkan paduan 50.A memiliki nilai laju korosi dan i_{corr} yang tinggi. Nilai laju korosi paduan 50.D pada larutan NaCl 2,046 mpy dengan nilai i_{corr} $1,815 E-06$, paduan 50.A nilai laju korosinya yaitu 20,52 mpy dengan nilai i_{corr} $21,60E-06 A/cm^2$. Nilai laju korosi paduan 50.D pada larutan SCP 2,029 mpy dengan nilai i_{corr} $2,220 E-06 A/cm^2$, paduan 50.A nilai laju korosinya yaitu 16,84 mpy dengan nilai i_{corr} $17,70 E-06A/cm^2$.

Hal serupa ditunjukkan pada persen reduksi 80% paduan 80.D memiliki nilai laju korosi yang rendah dengan nilai i_{corr} yang kecil dan paduan 80.A memiliki nilai laju korosi yang tinggi dengan nilai i_{corr} yang besar dalam ketiga larutan. Pada larutan H_2SO_4 paduan 80.D nilai laju korosinya yaitu 5,174 mpy dengan nilai i_{corr} $9,620E-06 A/cm^2$, paduan 80.A nilai laju korosinya yaitu 26,28 mpy dengan nilai i_{corr} $34,50E-03 A/cm^2$. Pada larutan

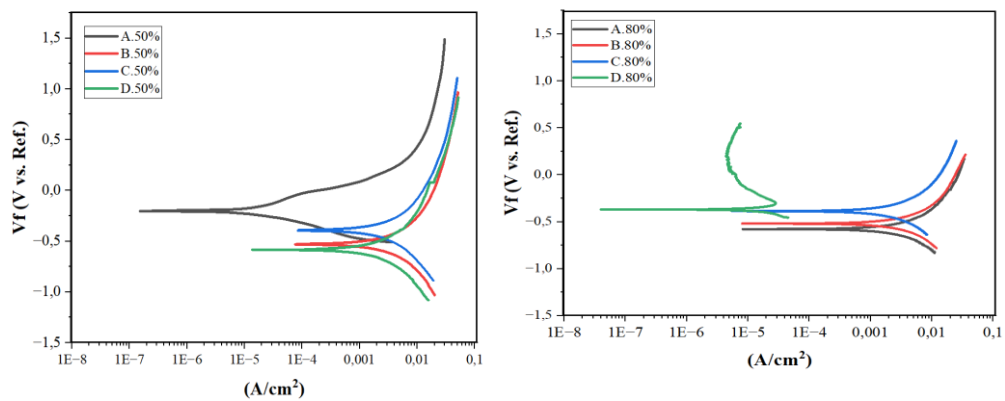
NaCl paduan 80.D nilai laju korosinya yaitu 2,008 mpy dengan nilai *icorr* 2,220 E-06A/cm², paduan 80.A nilai laju korosinya yaitu 20,48 mpy dengan nilai *icorr* 3,030 E-06A/cm². Pada larutan SCP paduan 80.D nilai laju korosinya yaitu 0,289 mpy dengan nilai *icorr* 5,38E-07A/cm², paduan 80.A nilai laju korosinya yaitu 8,196 mpy dengan nilai *icorr* 10,80 E-06A/cm². Hal ini berkaitan dengan struktur mikro yang dihasilkan pada paduan A baik 50% dan 80% nilai laju korosi terburuk disebabkan oleh fasa martensit yang terbentuk dimana semakin banyak fraksi fasa martensit maka akan menaikkan laju korosi yang dapat dilihat pada grafik Gambar 4.16 Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Zhang, dkk [70] bahwa paduan Fe-Mn-Si dalam larutan NaCl dan Na₂SO₄ memiliki nilai korosi yang rendah ketika martensit meningkat. Martensit memiliki kecenderungan untuk lebih mudah mengalami pelarutan karena kerapatan tinggi cacat tumpukan (*stacking faults*) dalam strukturnya. Selain itu, interaksi antara fasa austenit dan martensit dapat membentuk mikro galvanik, yang mempercepat terjadinya korosi lokal (*pitting*) baik pada martensit ϵ maupun di sepanjang batas antara kedua fasa tersebut. Transformasi $\gamma \rightarrow \epsilon$ pada martensit dalam paduan Fe-Mn-Si terbukti mengurangi ketahanan material terhadap korosi elektrokimia secara signifikan [70]. Pada paduan D reduksi 50% dan 80% memiliki nilai korosi yang terbaik karena adanya penambahan unsur Cr yang dapat membantu ketahanan korosi karena membentuk lapisan pasif [14]. Selain itu paduan D tidak ditemukan adanya martensit, fraksi fasa pada paduan D austenit dan ferrit hampir memiliki fraksi fasa yang sama sehingga menurunkan resiko terjadinya mikro galvanik.



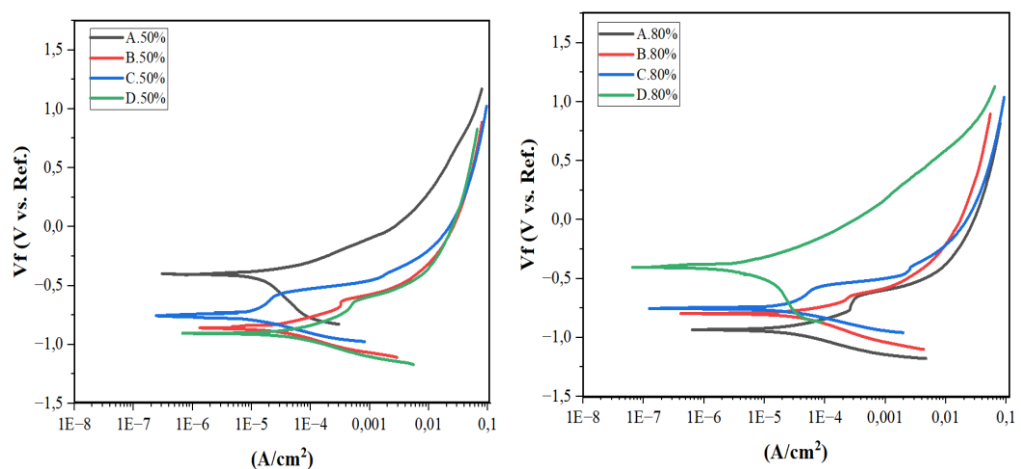
Gambar 4.16 Pengaruh Paduan terhadap Nilai Laju Korosi a) H₂SO₄, b) NaCl, c) SCP.

Jika dilihat dari perbedaan persen reduksi keduanya 50% dan 80%, paduan 80% cenderung memiliki nilai laju korosi yang lebih kecil dibandingkan dengan paduan 50% baik paduan A,B,C, dan D. Hal ini dikarenakan semakin besar persentase reduksi *hot rolling*, biasanya menghasilkan butir yang lebih halus, permukaan yang lebih halus, dan distribusi elemen paduan yang lebih baik, yang bisa meningkatkan ketahanan korosi [14]. Berdasarkan ketiga larutan pada Gambar 4.17, 4.18, dan 4.19 secara umum, semua paduan SMA menunjukkan *I_{corr}* yang lebih rendah dan

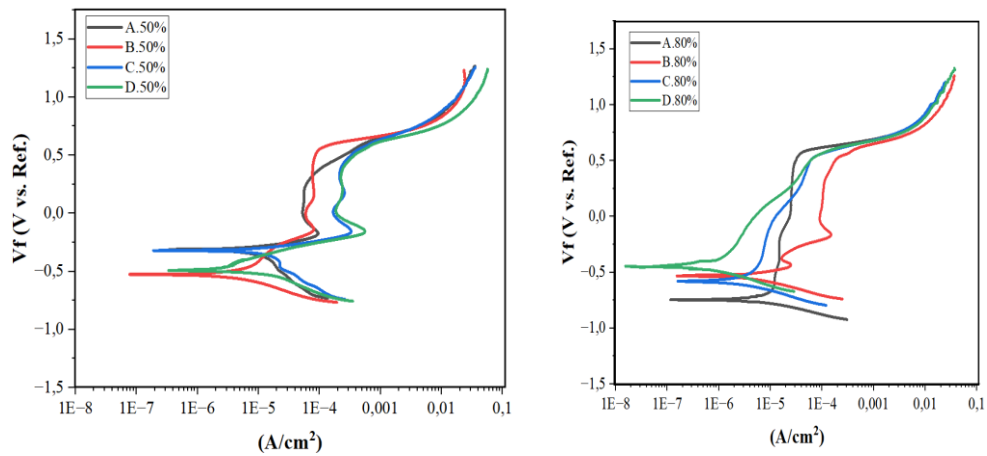
Ecorr yang lebih positif, menunjukkan ketahanan korosi yang lebih baik ketika terkena lingkungan SPC dibandingkan larutan NaCl dan H₂SO₄, yang sesuai dengan pengamatan OCP. Selain itu, larutan beton cenderung memiliki pasivasi yang stabil tanpa adanya indikasi kerusakan lubang akibat pembentukan oksida. Bisa dilihat pada tabel terdapat epasivasi dalam larutan SCP. Hal ini sesuai dengan percobaan yang dilakukan oleh Miftakhur,dkk dengan menggunakan larutan SCP dan NaCl [12]. Dalam diagram Pourbaix Fe-Mn-Si menunjukkan pada pH basa menunjukan daerah imun atau daerah pasivasi.



4.17 Grafik Potensiiodinamik pada Larutan H₂SO₄



Gambar 4.18 Grafik Potensiiodinamik pada Larutan NaCl



Gambar 4.19 Grafik Potensiodinamik pada Larutan SCP

Lapisan oksida yang terbentuk pada masing-masing permukaan paduan SMA dapat terdiri dari beberapa jenis senyawa oksida, bergantung komposisi unsur pada diagram Pourbaix dalam larutan SCP (pH 13,10) menunjukkan besi dalam bentuk Fe^{2+} ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) campuran oksida besi, dan mangan sebagai Mn^{2+} dan Mn^{4+} , Molibdenum terlarut MoO_4^{2-} , dan kromium terutama terdapat dalam bentuk Cr^{3+} (Cr_2O_3 atau $\text{Cr}(\text{OH})_3$). Dalam larutan NaCl (pH 6.49) berdasarkan potensi korosi dalam larutan klorida dan analisis dari diagram Pourbaix untuk setiap elemen paduan, dapat disimpulkan bahwa perilaku pelarutan unsur-unsur tersebut berbeda-beda. Besi (Fe) cenderung larut sebagai ion Fe^{2+} , menunjukkan bahwa unsur ini rentan mengalami korosi. Hal serupa terjadi pada mangan (Mn), yang juga larut sebagai ion Mn^{2+} . Sementara itu, silikon (Si) larut secara perlahan dalam bentuk senyawa H_7SiO_6 , menunjukkan bahwa pelarutannya tidak secepat besi dan mangan. Nikel (Ni) menunjukkan pelarutan yang relatif lebih sedikit, dengan larutan dalam bentuk ion Ni^{2+} . Di sisi lain, kromium (Cr) memiliki kecenderungan

untuk membentuk lapisan $\text{Cr}(\text{OH})_3$, yang berperan sebagai lapisan pasif pelindung. Hal ini menjadikan kromium elemen penting dalam mencegah korosi lebih lanjut pada paduan. Secara keseluruhan, perilaku masing-masing elemen dalam larutan klorida memperlihatkan bagaimana kehadiran ion klorida dapat mempengaruhi stabilitas dan ketahanan korosi dari paduan tersebut [12]. Dalam larutan H_2SO_4 (pH 2,43) terbentuk lapisan oksida yang terdiri dari Si^{4+} , Cr^{3+} , CrOH^{2+} dan Fe^{2+} campuran Fe^{3+} , hal ini berarti dalam keadaan asam sangat korosif [71]. Jika dilihat dari perbedaan persen reduksi keduanya 50% dan 80%, paduan 80% cenderung memiliki nilai laju korosi yang lebih kecil dibandingkan dengan paduan 50% baik paduan A, B, C, dan D. Hal ini dikarenakan semakin besar persentase reduksi *hot rolling*, biasanya menghasilkan butir yang lebih halus, permukaan yang lebih halus, dan distribusi elemen paduan yang lebih baik, yang bisa meningkatkan ketahanan korosi [14]. Berdasarkan ketiga larutan pada Gambar 4.17, 4.18, dan 4.19 secara umum, semua paduan SMA menunjukkan I_{corr} yang lebih rendah dan E_{corr} yang lebih positif, menunjukkan ketahanan korosi yang lebih baik ketika terkena lingkungan SPC dibandingkan larutan NaCl dan H_2SO_4 , yang sesuai dengan pengamatan OCP. Selain itu, larutan beton cenderung memiliki pasivasi yang stabil tanpa adanya indikasi kerusakan lubang akibat pembentukan oksida. Bisa dilihat pada tabel terdapat epasivasi dalam larutan SCP. Hal ini sesuai dengan percobaan yang dilakukan oleh Miftakhur, dkk dengan menggunakan larutan SCP dan NaCl [12]. Karena dalam diagram *pourbaix* Fe-Mn-Si menunjuka pada pH basa menunjukkan daerah imun atau daerah pasivasi.

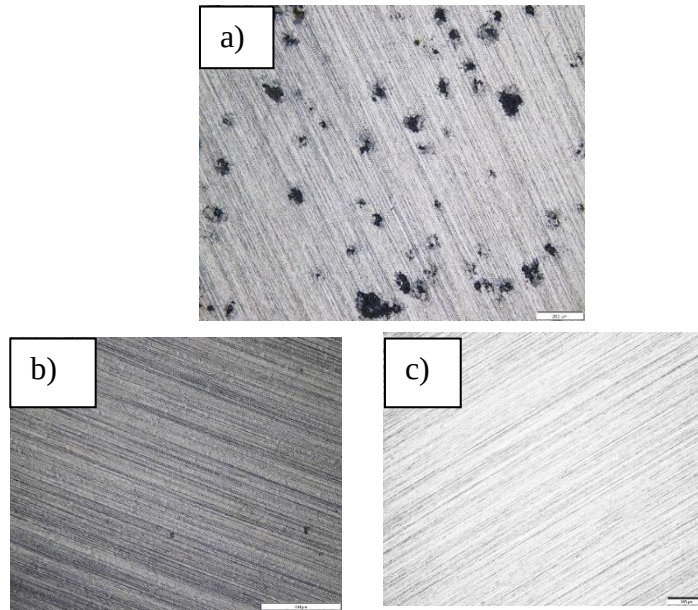
Tabel 4.8 Parameter Korosi Potensiodinamik

Elektrolit	Sampel	<i>Corrosion Rate (mpy)</i>	<i>I_{corr}</i> (A/cm ²)	<i>E_{corr}</i> (mV)	<i>E_{pasivasi}</i> (mV)	
					Awal	Akhir
H ₂ SO ₄	50.A	46,44	48,80 E-03	-203		
	50.B	26,58	29,10E-03	-530		
	50.C	15,13	14,60E-03	-393		
	50.D	6,113	6,690E-03	-393		
	80.A	26,28	34,50E-03	-578		
	80.B	17,83	23,40E-03	-520		
	80.C	8,611	12,20E-03	-387		
	80.D	5,174	9,620E-06	-370		
NaCl	50.A	20,52	21,60 E-06	-401		
	50.B	18,23	20,00 E-06	-861	-683,2	-627,5
	50.C	5,407	5,210 E-06	-757	-685,9	-599,0
	50.D	2,046	1,815 E-06	-405	-695,5	-652,5
	80.A	20,48	26,90 E-06	-935	-745,4	-674,8
	80.B	15,80	20,70 E-06	-873	-701,7	-646,0
	80.C	3,180	4,520 E-06	-754	-443,1	-413,4
	80.D	2,008	2,860E-06	-403		
SCP	50.A	16,84	17,70 E-06	-313	-175,7	255,0
	50.B	11,75	12,90 E-06	-527	-108,9	514,9
	50.C	10,69	10,30 E-06	-320	-146,0	351,5
	50.D	2,029	2,220 E-06	-489	-131,5	321,8
	80.A	8,196	10,80 E-06	-746	-628,7	479,0
	80.B	3,222	4,230E-06	-533	-168,6	277,2
	80.C	2,424	3,450E-06	-582	-420,8	522,3
	80.D	0,289	5,8E-07	-450	-242,6	1.317

Lapisan oksida yang terbentuk pada masing-masing permukaan paduan SMA dapat terdiri dari beberapa jenis senyawa oksida, bergantung komposisi unsur pada diagram Pourbaix dalam larutan SCP (pH 13,10) menunjukkan besi dalam bentuk Fe^{2+} ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) campuran oksida besi, dan mangan sebagai Mn^{2+} dan Mn^{4+} , Molibdenum terlarut MoO_4^{2-} , dan kromium terutama terdapat dalam bentuk Cr^{3+} (Cr_2O_3 atau $\text{Cr}(\text{OH})_3$). Dalam larutan NaCl (pH 6.49) berdasarkan potensi korosi dalam larutan klorida dan analisis dari diagram Pourbaix untuk setiap elemen paduan, dapat disimpulkan bahwa perilaku pelarutan unsur-unsur tersebut berbeda-beda. Besi (Fe) cenderung larut sebagai ion Fe^{2+} , menunjukkan bahwa unsur ini rentan mengalami korosi. Hal serupa terjadi pada mangan (Mn), yang juga larut sebagai ion Mn^{2+} . Sementara itu, silikon (Si) larut secara perlahan dalam bentuk senyawa H_7SiO_6 , menunjukkan bahwa pelarutannya tidak secepat besi dan mangan. Nikel (Ni) menunjukkan pelarutan yang relatif lebih sedikit, dengan larutan dalam bentuk ion Ni^{2+} . Di sisi lain, kromium (Cr) memiliki kecenderungan untuk membentuk lapisan $\text{Cr}(\text{OH})_3$, yang berperan sebagai lapisan pasif. Hal ini menjadikan kromium elemen penting dalam mencegah korosi lebih lanjut pada paduan. Secara keseluruhan, perilaku masing-masing elemen dalam larutan klorida memperlihatkan bagaimana kehadiran ion klorida dapat mempengaruhi stabilitas dan ketahanan korosi dari paduan tersebut [12]. Dalam larutan H_2SO_4 (pH 2.43) terbentuk lapisan oksida yang terdiri dari terdiri dari Si^{4+} , Cr^{3+} , CrOH_2^+ dan Fe^{2+} campuran Fe^{3+} , hal ini berarti dalam keadaan asam sangat korosif [71]

4.4.4 Pengamatan Permukaan Setelah Korosi

Setelah dilakukan pengujian korosi dengan metode OCP, Potensiodinamik, dan EIS pada ketika lingkungan yang berbeda. Dapat dilihat pada Gambar 4.20 (b) menunjukkan terdapat lubang yang terlihat jelas akibat terjadinya korosi pada permukaan paduan yang direndam dalam larutan NaCl, disebabkan oleh kehadiran ion klorida (Cl^-), yang dapat menembus dan merusak lapisan pasif pada permukaan logam. Selain itu, struktur mikro dan keberadaan fase lain dalam paduan, seperti martensit atau presipitat tertentu, dapat menciptakan area yang lebih aktif secara elektrokimia dan rentan terhadap serangan korosi. Pada Gambar 4.20 dalam larutan H_2SO_4 hanya terlihat sedikit lubang samar pada permukaannya, lapisan oksida pasif yang lebih stabil dalam kondisi asam (H_2SO_4), lapisan ini dapat memberikan perlindungan tambahan terhadap korosi, sehingga mengurangi jumlah lubang atau kerusakan lokal di permukaan logam. Lubang-lubang pada dua larutan tersebut tumbuh di bawah lapisan lapisan oksida yang rusak [12]. Menariknya pada Gambar 4.20 c dalam larutan SCP diperlihatkan permukaan yang bersih dari lubang akibat kerusakan yang terjadi setelah uji korosi. Hal ini dikarenakan kondisi alkalin yang sangat tinggi (pH 12-13). Lingkungan yang basa ini mendukung pembentukan lapisan oksida pasif yang stabil dan tebal pada permukaan logam, yang melindungi dari korosi. Selain itu, SCP tidak mengandung ion klorida agresif seperti larutan NaCl, sehingga risiko pitting corrosion lebih rendah [72].



Gambar 4.20 Pengamatan Permukaan Setelah Polarisasi dalam Larutan a) H_2SO_4 , b) NaCl , c) SCP.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan terkait dengan paduan *shape memory* Fe-Mn-Si melalui variasi komposisi dan reduksi *hot rolling*, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Karakterisasi morfologi dan nilai kekerasan pada *shape memory alloy* Fe-Mn-Si dengan penambahan unsur Mo, Ni, dan Cr dan *hot rolling* membuat nilai kekerasan semakin meingkat karena adanya fasa martensit, ferrit dan presipitat. dalam struktur mikronya.
2. Karakterisasi perilaku korosi pada *shape memory alloy* Fe-Mn-Si dengan penambahan unsur Mo, Ni, dan Cr dan *hot rolling* membuat nilai ketahanan korosi. Paduan dengan persen reduksi 80% memiliki nilai ketahanan korosi yang baik pada paduan 80.D dengan nilai laju korosi yang kecil yaitu 0,289 mpy pada larutan SCP, sedangkan paduan dengan persen reduksi 50% memiliki nilai ketahanan korosi yang buruk pada paduan 80.A nilai laju korosi yang besar yaitu 16,84 mpy pada larutan SCP. Peningkatan persen reduksi menyebabkan ukuran butir menjadi lebih kecil sehingga membuat ketahanan korosinya meningkat dalam semua larutan. Nilai laju korosi paling rendah terdapat dalam larutan SCP karena memiliki lingkungan yang basa dengan pH 13,10.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya yaitu sebagai berikut :

1. Melakukan pengujian XRD agar presipitat yang dihasilkan dapat diketahui dengan jelas.
2. Melakukan analisis terkait SME agar mengetahui pengaruh penambahan unsur terhadap nilai SME pada *shape memory alloy*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. M. Frenck, M. Vollmer, M. Mandel, L. Krüger, and T. Niendorf, "On the influence of microstructure on the corrosion behavior of Fe–Mn–Al–Ni *shape memory alloy* in 5.0 wt% NaCl solution," *Advanced Engineering Materials*, vol. 23, no. 2, p. 2000865, 2021.
- [2] M. Rohmah, E. C. Sendouw, R. A. Tanjung, D. P. Utama, and E. Maburi, "*Effect of Hot Rolling and Solution Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Fe-Mn-Si-Ni-Cr Shape Memory Alloy*," *Metalurgi*, vol. 2, pp. 57-64, 2023.
- [3] H. Y. Ha, T. H. Lee, J. H. Bae, and D. W. Chun, "Molybdenum effects on pitting corrosion resistance of FeCrMnMoNC austenitic stainless steels," *Metals*, vol. 8, no. 8, p. 653, 2018.
- [4] A. Saifullah, "Pengaruh penambahan Nikel (Ni) terhadap sifat kekerasan dan struktur mikro pada paduan aluminium–silikon (Al-Si) melalui proses pengecoran," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [5] M. V. Boniardi and A. Casaroli, "*Stainless steels*," Lucefin SpA, 2014.
- [6] F. Niccoli, C. Maletta, E. Sgambitterra, and F. Furgiele, "A thermo-mechanical model for *shape memory alloy*-based crank heat engines," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 26, no. 6, pp. 652–662, 2014, doi: 10.1177/1045389x14554131.
- [7] W. S. Chu et al., "Review of biomimetic underwater robots using smart actuators," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, pp. 1281–1292, 2012.
- [8] S. Wang et al., "Memory-steel for smart steel structures: A review on recent developments and applications," *CE/Papers*, vol. 6, no. 3-4, pp. 949–958, 2023, doi: 10.1002/cepa.2756.
- [9] S. A. Roslan et al., "Dynamic instability response of smart composite material," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 50, no. 3, pp. 302–310, 2019, doi: 10.1002/mawe.201800213.

- [10] K. Hong, Y. Yeon, S. Ji, and S. Lee, "Flexural behavior of RC beams using Fe-Based *shape memory alloy* rebars as tensile reinforcement," *Buildings*, vol. 12, no. 2, p. 190, 2022, doi: 10.3390/buildings12020190.
- [11] H. Khodaverdi, M. Mohri, E. Ghafoori, A. Sabet Ghorabaei, and M. Nili-Ahmadabadi, "Enhanced pseudoelasticity of an Fe–Mn–Si-based *shape memory alloy* by applying microstructural engineering through recrystallization and precipitation," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 10, 2022, pp. 1-9, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.10.092.
- [12] M. Rohmah, M. Y. Hasbi, R. Roberto, D. P. Utama, D. Irawan, P. A. Paristiawan, M. A. Prasetyo, B. Adjiantoro, T. B. Romijarso, and E. Maburi, "Corrosion behavior of *shape memory alloy* Fe-Mn-Si-Ni-Cr in chloride solution and simulated concrete pore solution," *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, vol. 12, no. 4, pp. 1392-1407, 2023.
- [13] M. Mohri,, "Effect of thermomechanical treatment and microstructure on pseudo-elastic behavior of Fe–Mn–Si–Cr–Ni-(V, C) *shape memory alloy*," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 855, p. 143917, 2022.
- [14] B. C. Maji, C. M. Das, M. Krishnan, and R. K. Ray, "The corrosion behaviour of Fe–15Mn–7Si–9Cr–5Ni *shape memory alloy*," **Corrosion Science**, vol. 48, no. 4, pp. 937–949, 2006.
- [15] H. Y. Ha, T. H. Lee, J. H. Bae, and D. W. Chun, "Molybdenum effects on pitting corrosion resistance of FeCrMnMoNC austenitic stainless steels," *Metals*, vol. 8, no. 8, p. 653, 2018.
- [16] S. Lyon et al., "Corrosion of molybdenum and its alloys," in *Shreir's Corrosion: Volume 3: Corrosion and Degradation of Engineering Materials*, Elsevier, 2009.
- [17] V. B. Sardi, S. Jokosisworo, and H. Yudo, "Pengaruh normalizing dengan variasi waktu penahanan panas (Holding Time) baja ST 46 terhadap uji kekerasan, uji tarik, dan uji mikrografi," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 6, no. 1, 2018.
- [18] A. Yafi, "Pengaruh Kadar Kromium (Cr) terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Baja Paduan Fe-Cr-Mn melalui Proses Peleburan," 2016
- [19] R. Shu, H. Gong, G. Hu, and J. Huang, "A novel intelligent fan clutch for large hybrid vehicles," *Energies*, vol. 15, no. 12, p. 4308, 2022, doi: 10.3390/en15124308.

- [20] S. Wu and Y. Chang, "Thermal cycling effect on transformation temperatures of different transformation sequences in TiNi-based *shape memory alloys*," *Materials*, vol. 12, no. 16, p. 2512, 2019, doi: 10.3390/ma12162512.
- [21] K. Mehta and K. Gupta, "Fabrication and processing of *shape memory alloys*," in *Fabrication and processing of shape memory alloys*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 6-7.
- [22] H. Otsuka et al., "Effects of alloying additions on Fe-Mn-Si *shape memory alloys*," *ISIJ International*, vol. 30, no. 8, pp. 674–679, 1990.
- [23] Y. Tomota, Y. Xia, and K. Inoue, "Mechanism of low temperature brittle fracture in high nitrogen bearing austenitic steels," *Acta Materialia*, vol. 46, no. 5, pp. 1577-1587, 1998.
- [24] N. Stanford and D. P. Dunne, "Thermo-mechanical processing and the shape memory effect in an Fe–Mn–Si-based *shape memory alloy*," **Materials Science and Engineering: A**, vol. 422, no. 1-2, pp. 352–359, 2006.
- [25] B. C. Maji, M. Krishnan, V. Hiwarkar, I. Samajdar, and R. K. Ray, "Development of texture and microstructure during cold rolling and annealing of a Fe-based *shape memory alloy*," **Journal of Materials Engineering and Performance**, vol. 18, pp. 588–593, 2009.
- [26] A. M. Roman et al., "Microstructure, shape memory effect, chemical composition and corrosion resistance performance of biodegradable FeMnSi-Al alloy," *Crystals*, vol. 13, no. 1, p. 109, 2023.
- [27] F. F. D. Putra, "Analisis Pengaruh Variasi Media Pendingin Dan Holding Time Artificial Aging Paduan Cu-14,6Zn-7,41Al Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan Dan Shape Memory Effect," Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2022.
- [28] Z. Rao et al., "Experimental and numerical studies on a novel shape-memory alloy wire–woven trusses capable of undergoing large deformation," *Journal of Intelligent Material*, vol. 30, no. 15, pp. 2283–2298, 2019,
- [29] E. Choi, J. W. Hu, J. Lee, and B. Cho, "Recovery stress of *shape memory alloy* wires induced by hydration heat of concrete in reinforced concrete beams," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 26, no. 1, pp. 29–37, 2014, doi: 10.1177/1045389x13519005.
- [30] O. E. Ozbulut, R. F. Hamilton, M. M. Sherif, and A. Lanba, "Feasibility of self-pre-stressing concrete members using *shape memory alloys*," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 26, no. 18, pp. 2500–2514, 2015, doi: 10.1177/1045389x15604405.

- [31] F. Mert, "A comparison of the dry sliding wear behavior of As-cast and hot rolled Az31B magnesium alloy," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 1, pp. 417-426, 2018.
- [32] O. M. Ikumapayi, E. T. Akinlabi, P. Onu, and O. P. Abolusoro, "Rolling operation in metal forming: Process and principles—A brief study," **Materials Today: Proceedings**, vol. 26, pp. 1644–1649, 2020.
- [33] F. Rokhmanto, M. D. Panghihutan, A. P. Putri, B. T. Prayoga, I. Kartika, A. Erryani, and C. Sutowo, "Pengaruh Variasi Temperatur *Solution treatment* pada Kekerasan dan Presipitat Paduan Co-30Cr-5Mo-0,32C-0,23N," *TEKNIK*, vol. 44, no. 1, pp. 1-6. 2023.
- [34] Wahyu, B. Penguatan Logam melalui Solid *Solution treatment*. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(2), 78-85. 2008.
- [35] Putra, A. Penguatan Presipitat pada Paduan Logam. *Jurnal Teknik Metalurgi*, 12(3), 45-52. 2008.
- [36] N. Stanford and D. P. Dunne, "Martensite/particle interactions and the shape memory effect in an Fe–Mn–Si-based alloy," **Journal of Materials Science**, vol. 42, pp. 4334-4343, 2007.
- [37] A. Rahardi, "Pemanfaatan Green Inhibitor Daun Pandan Wangi terhadap laju korosi pada baja AI 5L Grade B di lingkungan NaCl 3,5% dan H2SO4 1M," *Jurusan Teknik Material dan Metalurgi*, ITS, Surabaya, Indonesia, 2014.
- [38] Y. K. Afandi, I. S. Arief, and A. Amiadji, "Analisa laju korosi pada pelat baja karbon dengan variasi ketebalan coating," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 4, no. 1, pp. G1–G5, 2015.
- [39] M. F. Sidiq, "Analisa korosi dan pengendaliannya," *Jurnal Foundry*, vol. 3, no. 1, pp. 25–30, 2013.
- [40] S. T. Dwiyati and M. T. Pangestu, "Kehilangan Massa Lapisan Tembaga-nikel/tembaga-nikel-silikon pada Larutan HCl," *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, pp. 27-34, 2022.
- [41] X. Qiang, L. Chen, and X. Jiang, "Achievements and perspectives on Fe-based shape memory alloys for rehabilitation of reinforced concrete bridges: An overview," *Materials*, vol. 15, no. 22, p. 8089, 2022..
- [42] Sujianto, "Pengaruh penambahan unsur molibdenum (Mo) terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja tahan karat tipe AISI 410," *Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Tangerang Selatan, Indonesia*, 2019.

- [43] S. Novita, E. G. Suka, and W. Astuti, "Analisis laju korosi dan kekerasan pada stainless steel 304 dan baja nikel laterit dengan variasi kadar Ni (0, 3, dan 10%) dalam medium korosif," *JURNAL Teori Fisika*, pp. 21-32, 2018.
- [44] H. Farhat, R. Griffin, I. N. A. Oguocha, and R. Evitts, "An investigation of the corrosion behaviour of a FeNiCoAlTa *shape memory alloy* in 3.5 wt-% NaCl solution," *Corrosion Engineering, Science and Technology*, vol. 53, no. 8, pp. 611–616, 2018.
- [45] M. Rațoi, S. Stanciu, N. Cimpoeșu, I. Cimpoeșu, B. Constantin, and C. Paraschi, "A potential biodegradable metallic material with shape memory effect based on iron," *Advanced Materials Research*, vol. 814, pp. 110-114, 2013.
- [45] Y. Tiandho, A. A. Tiandho, and F. Afriani, "Analisis kuantitatif metalografi berdasarkan pengolahan citra menggunakan Wolfram Mathematica," in *Prosiding Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian pada Masyarakat*, vol. 2, pp. 205–209, 2018.
- [46] I. Fadhilah, "Analisis Struktur Mikro (Metalografi)," Program Studi Teknik Metalurgi ITB, Bandung, 2019.
- [47] D. Kim, K. Hong, J. Sim, J. Lee, and W. Lee, "Shape Memory and Mechanical Properties of Cold Rolled and Annealed Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-1Ti-0.3 C Alloy," **Materials**, vol. 14, no. 2, p. 255, 2021.
- [48] H. Kuat, "Quality of corrosion analysis sample preparation using potentiostate," 2019.
- [49] C. W. Yang, C. Liu, D. J. Lin, M. L. Yeh, and T. M. Lee, "Hydrothermal treatment and butylphosphonic acid derived self-assembled monolayers for improving the surface chemistry and corrosion resistance of AZ61 magnesium alloy," **Scientific Reports**, vol. 7, no. 1, p. 16910, 2017.
- [50] S. A. A. Kiey, E. A. E. Meguid, and S. A. E. Rehim, "Electrochemical Investigations on the Corrosion Behavior of 904L Stainless Steel in LiBr Solutions," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 32, no. 20, pp. 9163-9173, 2023.
- [51] R. Keshavamurthy, C. S. Ramesh, G. S. P. Kumar, and V. Tambrallimath, "Experimental investigation of tribocorrosion," in *Tribocorrosion*, A. Siddaiah, R. Ramachandran, and P. L. Menezes, Eds., Academic Press, 2021, pp. 17–42, doi: 10.1016/B978-0-12-818916-0.00001-8.
- [52] M. Sulaeman, H. Budiman, and E. Koswara, "Proses uji dimensi, uji kekerasan dengan metode Rockwell dan uji komposisi kimia pada cangkul di

Balai Besar Logam dan Mesin (BBLM) Bandung," in Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar, vol. 10, no. 1, 2019.

- [53] R. D. Putra and M. A. Buqi, "Analisa Pengaruh Heat Treatment dan Variasi Kecepatan Putaran Pada Pengelasan Gesek Baja AISI 1045 Terhadap Kekuatan Tarik Struktur Mikro dan Kekerasan," Doctoral dissertation, Institut Teknologi Nasional Malang, 2023.
- [54] F. A. Rauf, F. P. Sappu, and A. M. Lakat, "Uji kekerasan dengan menggunakan alat microhardness Vickers pada berbagai jenis material teknik," Jurnal Tekno Mesin, vol. 5, no. 1, 2018.
- [55] S. G. Sukaryo, B. Badriyana, and P. Sebleku, "Pengaruh penambahan Molibdenum terhadap morfologi struktur mikro, sifat mekanik dan ketahanan korosi paduan Zr-Nb untuk material implan," **Metalurgi**, vol. 29, no. 1, pp. 17–26, 2018.
- [56] O. Armağan and T. Kırındı, "Microstructure investigation of thermally induced phase transformation in Fe–Mn–Mo–Si alloys," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 25, no. 2, pp. 419–431, 2021.
- [57] H. Cai, Z. Ma, J. Zhang, L. Qi, J. Hu, and J. Zhou, "Different Heat-Exposure Temperatures on the Microstructure and Properties of Dissimilar GH4169/IC10 Superalloy Vacuum Electron Beam Welded Joint," **Metals**, vol. 14, no. 3, p. 348, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/met14030348>.
- [58] A. Zulfikar, "Pengaruh penambahan nikel (Ni) terhadap kekerasan dan struktur mikro paduan FeCr-Ni melalui metode pengecoran," Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [59] M. Y. Hasbi, D. P. Malau, and B. Adjiantoro, "Pengaruh variasi reduksi terhadap kekerasan dan struktur mikro baja laterit melalui pengerolan panas," **Prosiding Semnastek**, 2016.
- [60] C. Xia, W. Zhang, Z. Kang, Y. Jia, Y. Wu, R. Zhang, ... and M. Wang, "High strength and high electrical conductivity Cu–Cr system alloys manufactured by *hot rolling*–quenching process and thermomechanical treatments," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 538, pp. 295–301, 2012.
- [61] Y. Tiandho, "Pengaruh unsur pepadu Mo dan proses fabrikasi terhadap kekerasan plat Zirlo-Mo," **Bangka Belitung University**, vol. 1, no. 1, 2013.
- [62] A. Hanrevo, "Pengaruh presipitat terhadap sifat mekanik paduan nikel," *Jurnal Metalurgi*, vol. 16, no. 1, pp. 23–31, 2023.

- [63] H. Aghamohammadi, S. J. Hosseini pour, S. M. Rabiee, and R. Jamaati, "Effect of *hot rolling* on microstructure, crystallographic texture, and hardness of AZ31 alloy," **Materials Chemistry and Physics**, 2021.
- [64] A. Shirzadi and S. Jackson, *Structural Alloys for Power Plants: Operational Challenges and High-Temperature Materials*, Cambridge: Elsevier, 2014.
- [65] Hamdan, A. Mass Loss Pada Pemaduan Logam Ni Fe Mn Al Metode Vacuum Arc Melting Furnace Terhadap Hume-Rothery Rules. *Jurnal Metalurgi*, 14(3), 45-52. (2017).
- [66] X. Feng, H. Jia, Y. Liu, Y. Li, W. Li, T. Zhanget al., "Effects of microstructures on the tensile properties and corrosion resistance of high-purity magnesium", *Materials Science Forum*, vol. 849, p. 114-120, 2016. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.849.114>
- [67] Y. Zheng, Y. r, Y. Liu, Y. Tian, X. Zheng, and L. Chen, "Microstructure characteristics and corrosion behaviors of Mg-2Zn-2Er-0.3 Zr-0.3 Mn alloy under various rolling reductions," **Metals**, vol. 12, no. 2, p. 365, 2022.
- [68] Ana, "Corrosion Behavior of Aluminum Alloy in Simulated Concrete Pore Solution", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 22, no. 7, pp. 1822-1827, 2013.
- [69] A. Nikitasari, I. M. Astuti, S. Musabikha, R. Kusumastuti, S. Prifiharni, and G. Priyotomo, "Chasew (*Anacardium Occidentale*) Leaves Extract as Green Corrosion Inhibitor of API 5L X52 in Acidic Media," *Trends in Sciences*, vol. 20, no. 7, p. 4733, Mar. 2023, doi: 10.48048/tis.2023.4733.
- [70] Z. Xuemei and Z. Yansheng, "Effect of ϵ -martensite on the electrochemical corrosion behaviour of an Fe-Mn-Si *shape memory alloy* in aqueous solutions," *J. Mater. Sci. Lett.*, 1997.
- [71] C. A. Della Rovere, J. H. Alano, R. Silva, P. A. P. Nascente, J. Otubo, and S. E. Kuri, "Characterization of passive films on shape memory stainless steels," **Corrosion Science**, vol. 57, pp. 154-161, 2012.
- [72] Deni, D. P., Alfianarrochmah, '., & Kurnianingsih, O. (2023). Penetrasi dan sorptivitas klorida beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi substitusi metakaolin. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 8(02), 115-126. <https://doi.org/10.29244/jsil.8.02.115-126>

LAMPIRAN A
CONTOH PERHITUNGAN

Lampiran A. Contoh Perhitungan

1. Perhitungan Nilai Ms

$$Ms (^{\circ}C) = 1302 - 42(\%Cr) - 61(\%Ni) - 33(\%Mn) - 28(\%Si) - 1667(\%C + \%N)$$

a. Paduan A

$$\begin{aligned} Ms (^{\circ}C) &= 1302 - 42(0,08) - 33(13,86) - 28(4,88) - 1667(0,21) \\ &= 372,91 ^{\circ}C \end{aligned}$$

b. Paduan B

$$\begin{aligned} Ms (^{\circ}C) &= 1302 - 42(0,09) - 33(13,8) - 28(4,9) - 1667(0,2) \\ &= 372,64 ^{\circ}C \end{aligned}$$

c. Paduan C

$$\begin{aligned} Ms (^{\circ}C) &= 1302 - 42(0,09) - 61(8,04) - 33(13,94) - 28(4,97) - 1667(0,22) \\ &= -151,56^{\circ}C \end{aligned}$$

d. Paduan.D

$$\begin{aligned} Ms (^{\circ}C) &= 1302 - 42(10,23) - 61(8,06) - 33(5,03) - 28(4,9) - 1667(0,19) \\ &= -527,9^{\circ}C \end{aligned}$$

LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN

Lampiran B. Data Penelitian

1. Data Komposisi Material

Tabel B.1 Komposisi Kimia *Shape memory alloy*

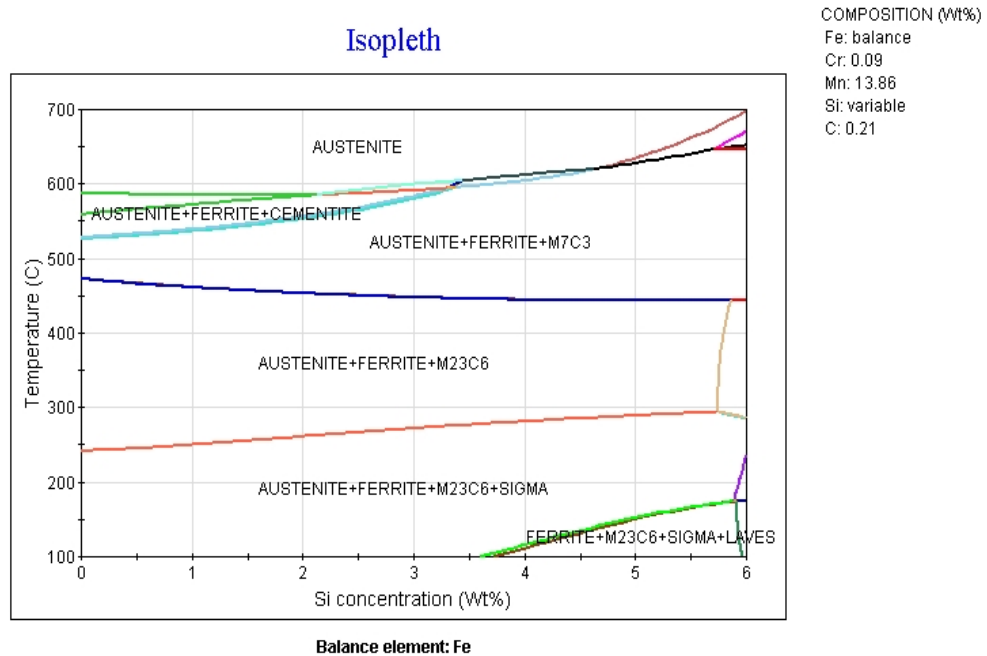
Alloy	Elements (wt %)						
	Fe	Mn	Si	Mo	Ni	Cr	C
A	80,97	13,86	4,88	0	0	0,08	0,21
B	78,97	13,8	4,9	2,04	0	0,09	0,2
C	70,64	13,94	4,97	2,1	8,04	0,09	0,22
D	60,96	13,5	5,03	2,03	8,06	10,23	0,19

2. Data Ukuran Butir

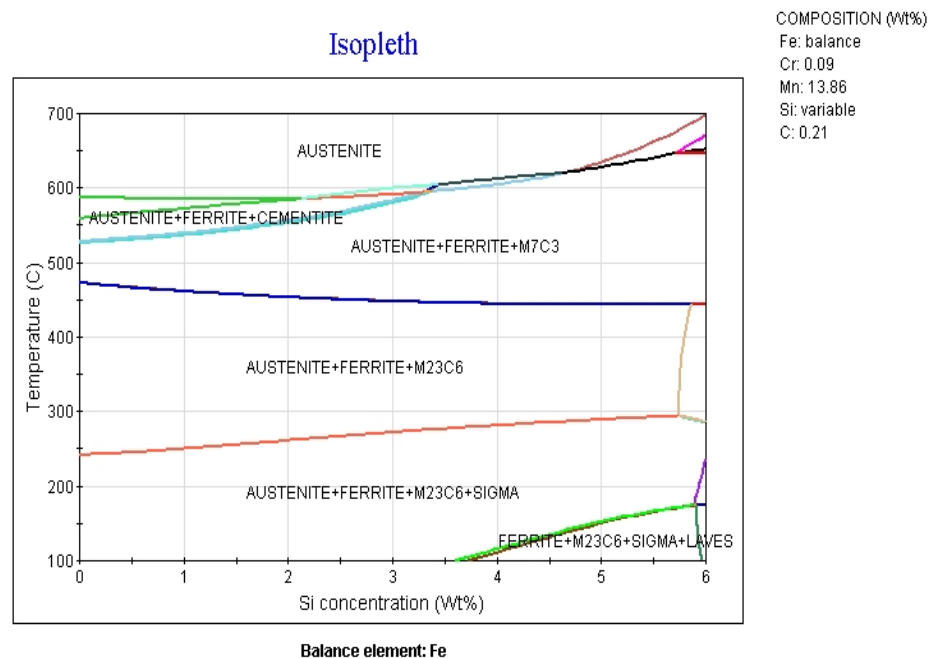
Tabel B.2 Data Hasil Ukuran Butir Reduksi 50% dan 80%

Sampel	Ukuran Butir Rata-Rata
	(μm)
50.A	41,44
50.B	26
50.C	16,31
50.D	13,60
80.A	31,36
80.B	17,11
80.C	16,27
80.D	13,46

3. Data Diagram Fasa Menggunakan Jmatpro

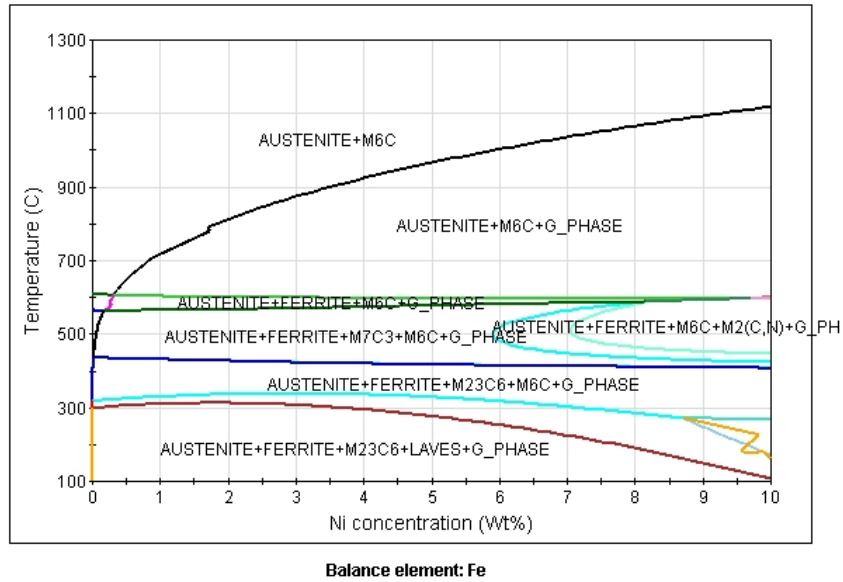


Gambar B.1 Prediksi Diagram Fasa Paduan Fe-Mn-Si



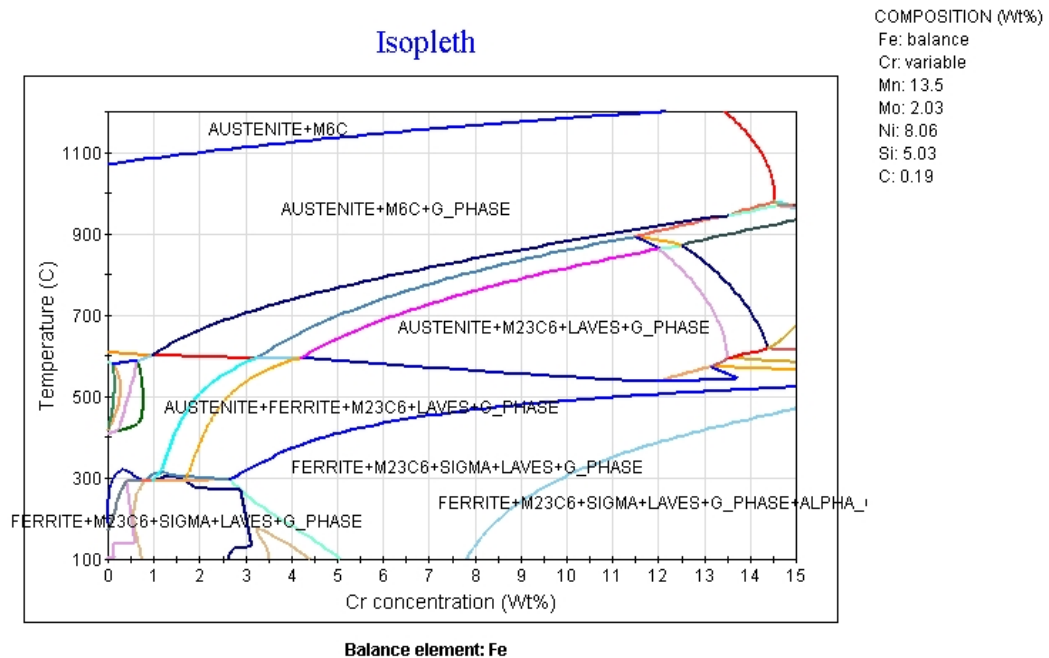
Gambar B.2 Prediksi Diagram Fasa Paduan Fe-Mn-Si-Mo

Isopleth



Gambar B.3 Prediksi Diagram Fasa Paduan Fe-Mn-Si-Mo-Ni

Isopleth



Gambar B.4 Prediksi Diagram Fasa Paduan Fe-Mn-Si-Mo-Ni-Cr

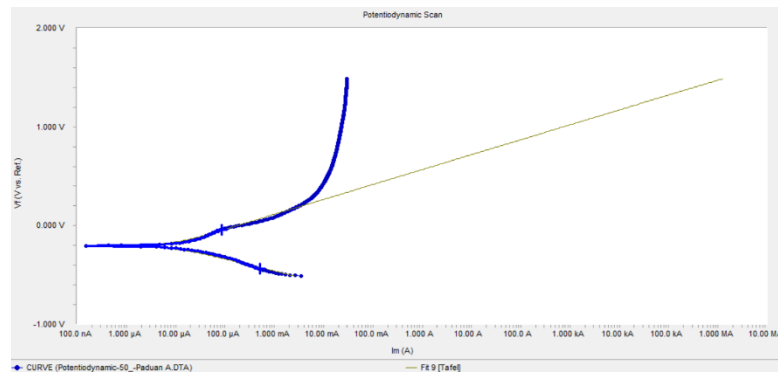
4. Data Uji Kekerasan

Tabel B.3 Hasil Uji Kekerasan

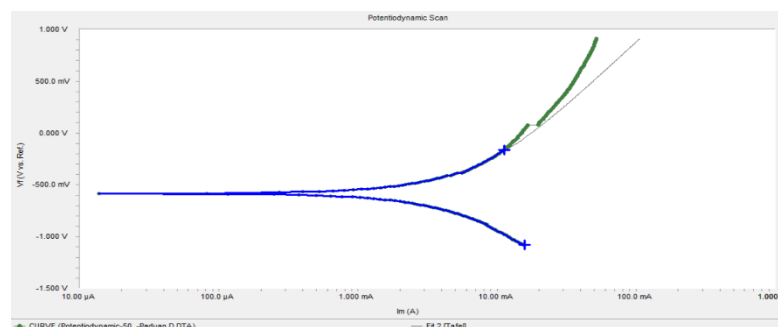
Tritik	50A	50B	50C	50D	80A	80B	80C	80D
Diagonal 1	56,63	52,61	58,5	52,78	54,2	53,58	55,9	52,64
Diagonal 1	56,72	54,44	57,54	54,25	54,57	55,19	56,9	53,15
Diagonal 1	54,9	55	59,34	54,84	54,84	53,58	58,1	53,26
Diagonal 1	55,04	54,09	57,65	53,51	55,88	53,45	57,3	53,58
Diagonal 1	53,16	55,6	60,8	54,91	54,91	53,62	57,9	53,3
Diagonal 1	56,78	53,3	57,17	54,12	55,29	53,55	55,3	53,16
Diagonal 1	57,47	53,44	59,41	53,65	55,38	53,86	58,4	54,45
Diagonal 1	54,4	54,77	57,56	53,93	53,38	52,88	55	54,06
Diagonal 1	53,02	54,31	60,01	53,79	54,34	53,52	58,3	53,3
Hv	288,4	330,7	277,2	330,1	316,1	311,9	300	330,5
Hv	284,5	318,7	269,8	318,6	307,3	323,2	279	328,2
Hv	310,4	307,8	271,4	313,4	305,3	327,2	290	319,7
Hv	317,6	315,6	267,9	305,3	305,3	324,1	278	320,1
Hv	315,3	310,8	255	306,9	308,2	322,5	276	324,63
Rata-Rata Hv	303,2	316,7	268,3	321,08	322,5	322,2	285	324,63

5. Data Uji Korosi

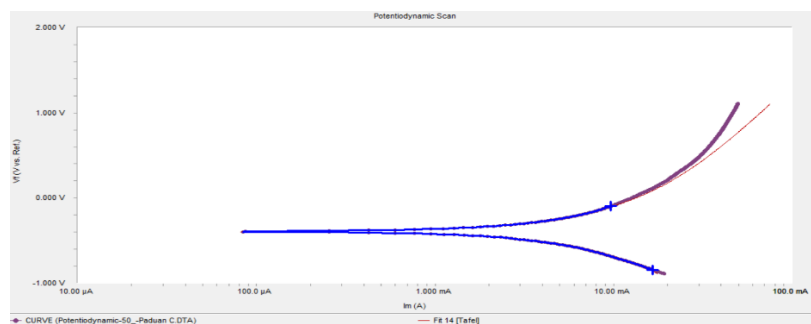
a. Menggunakan Larutan H_2SO_4



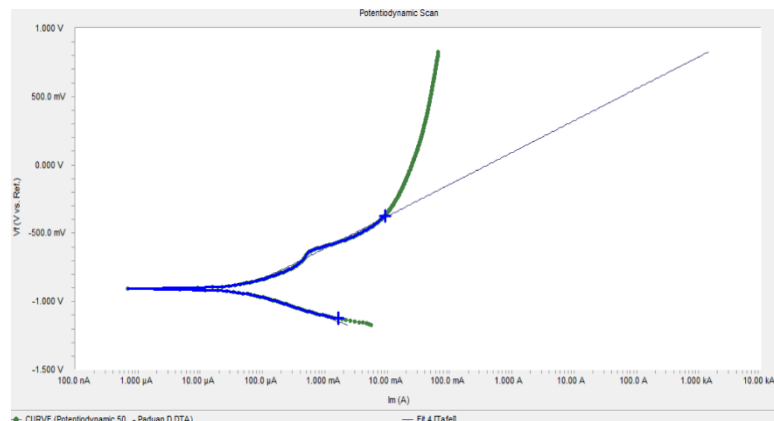
Gambar B.5 Data Pengujian Korosi Potensi dinamik Sampel 50.A pada Larutan H_2SO_4 .



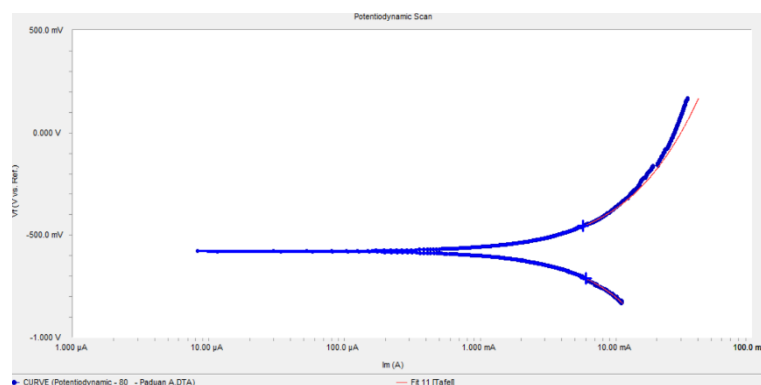
Gambar B.6 Data Pengujian Korosi Potensi dinamik Sampel 50.B pada Larutan H_2SO_4 .



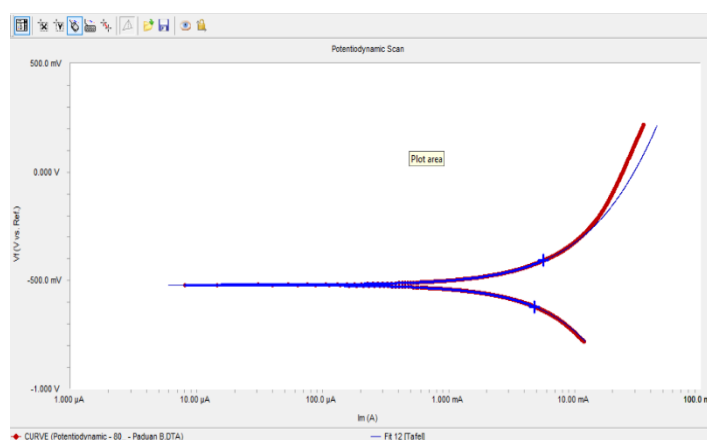
Gambar B.7 Data Pengujian Korosi Potensi dinamik Sampel 50.C pada Larutan H_2SO_4 .



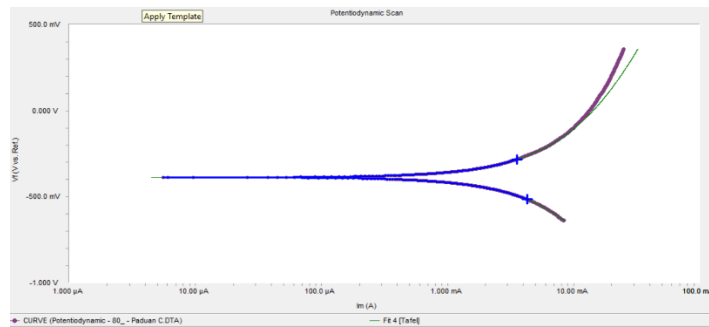
Gambar B.8 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 50.D pada Larutan H_2SO_4 .



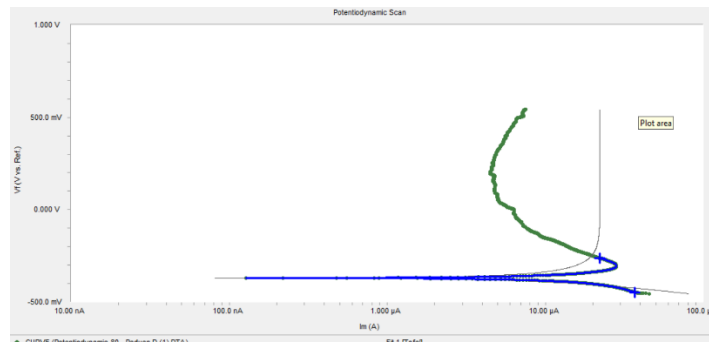
Gambar B.9 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.A pada Larutan H_2SO_4 .



Gambar B.10 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.B pada Larutan H_2SO_4 .



Gambar B.11 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.C H₂SO₄.

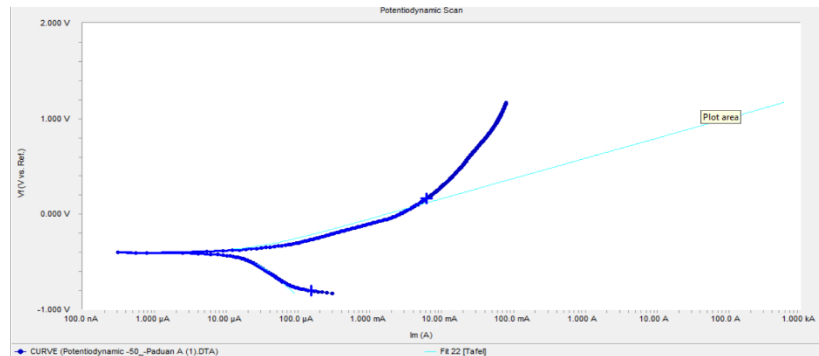


Gambar B.12 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.D H₂SO₄.

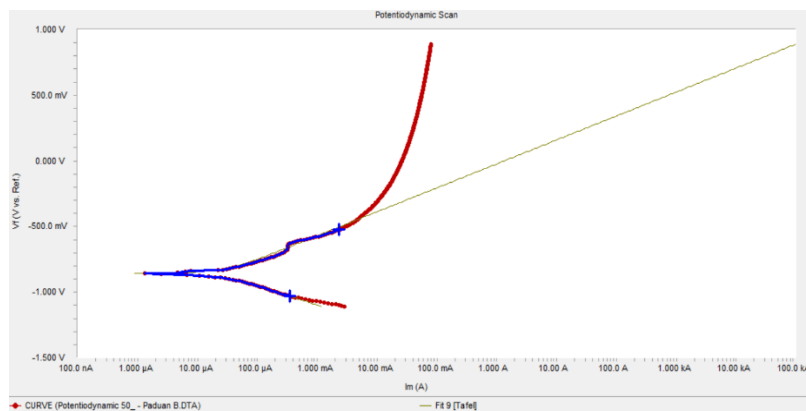
Tabel B.4 Data Laju Korosi menggunakan H₂SO₄

Sampel	Corrosion		Ecorr (mV)
	Rate (mpy)	I _{corr} (A/cm ²)	
50.A	46,44	48,80 E-03	-203
50.B	26,58	29,10E-03	-530
50.C	15,13	14,60E-03	-393
50.D	6,113	6,690E-03	-393
80.A	26,28	34,50E-03	-578
80.B	17,83	23,40E-03	-520
80.C	8,611	12,20E-03	-387
80.D	5,174	9,620E-06	-370

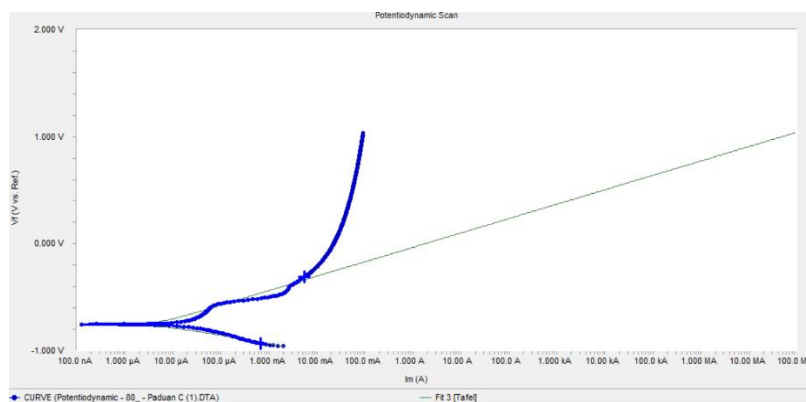
b. Menggunakan Larutan NaCl



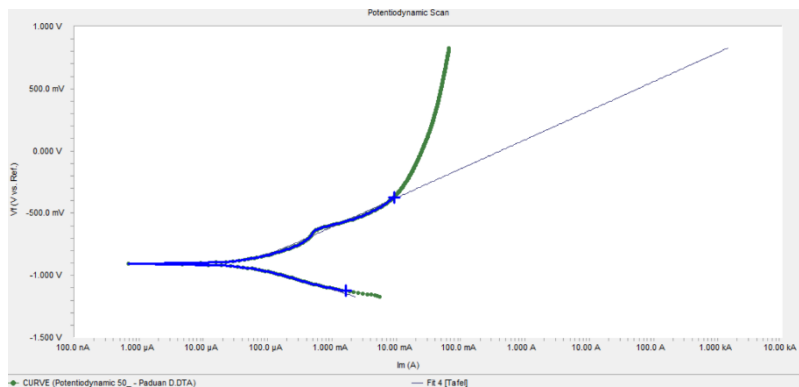
Gambar B.13 Data Pengujian Korosi Potensiiodinamik Sampel 50.A pada Larutan NaCl



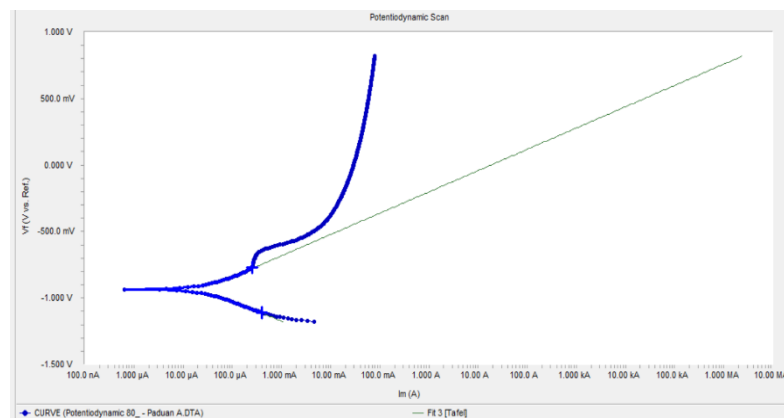
Gambar B.14 Data Pengujian Korosi Potensiiodinamik Sampel 50.B pada Larutan NaCl



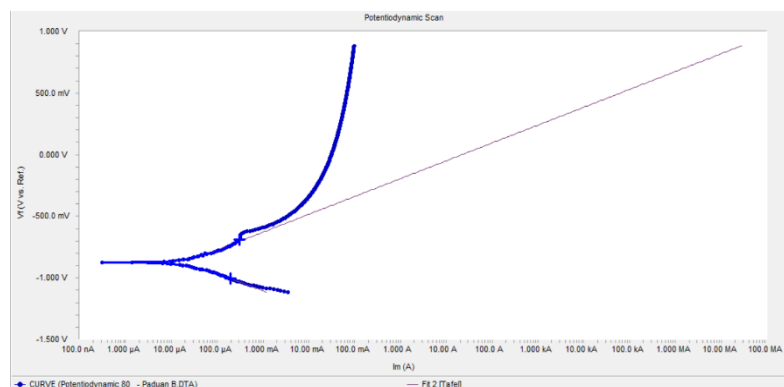
Gambar B.15 Data Pengujian Korosi Potensiiodinamik Sampel 50.C pada Larutan NaCl



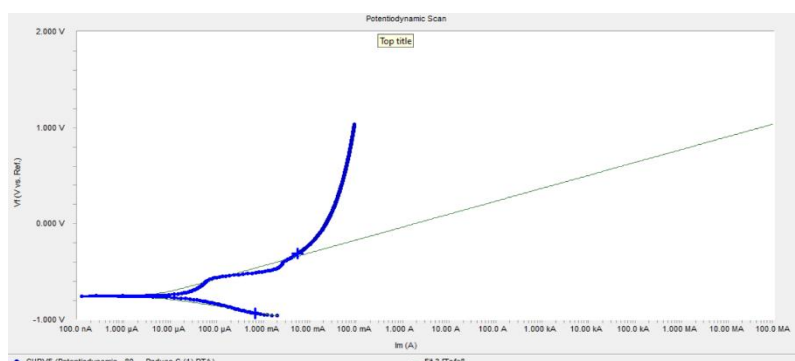
Gambar B.16 Data Pengujian Korosi Potensiodynamik Sampel 50.D pada Larutan NaCl



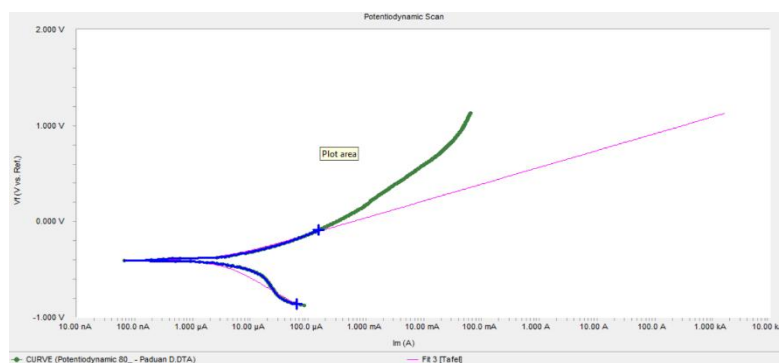
Gambar B.17 Data Pengujian Korosi Potensiodynamik Sampel 80.A pada Larutan NaCl



Gambar B.18 Data Pengujian Korosi Potensiodynamik Sampel 80.B pada Larutan NaCl



Gambar B.19 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.C NaCl

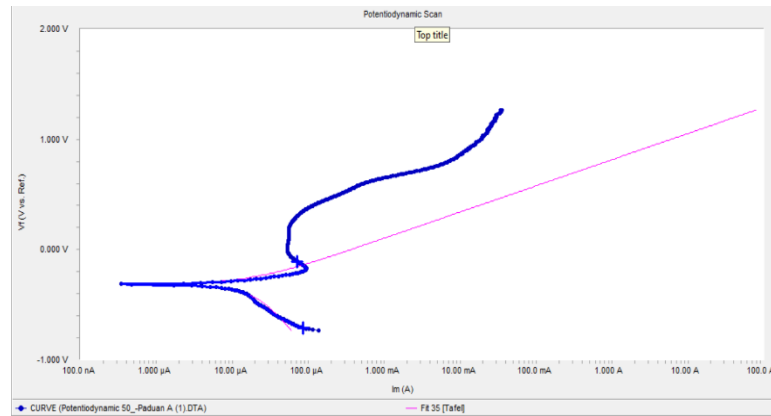


Gambar B.20 Data Pengujian Korosi Potensiodinamik Sampel 80.D NaCl

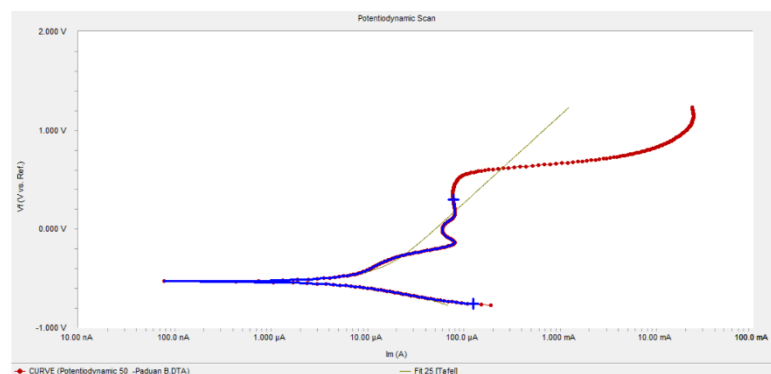
Tabel B.5 Data Laju Korosi menggunakan NaCl

Sampel	<i>Corrosion</i>		<i>Ecorr</i> (mV)	<i>Epasivasi (mV)</i>	
	<i>Rate</i> (mpy)	<i>Icorr</i> (A/cm ²)		Awal	Akhir
50.A	20,52	21,60 E-06	-401		
50.B	18,23	20,00 E-06	-861	-683,2	-627,5
50.C	5,407	5,210 E-06	-757	-685,9	-599,0
50.D	2,046	1,815 E-06	-405.1	-695,5	-652,5
80.A	20,48	26,90 E-06	-935	-745,4	-674,8
80.B	15,80	20,70 E-06	-873	-701,7	-646,0
80.C	3,180	4,520 E-06	-754	-443,1	-413,4
80.D	2,008	2,860E-06	-403		

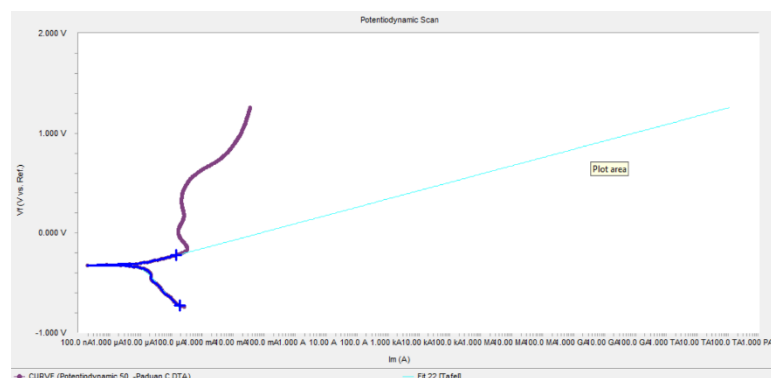
c. Menggunakan Larutan SCP



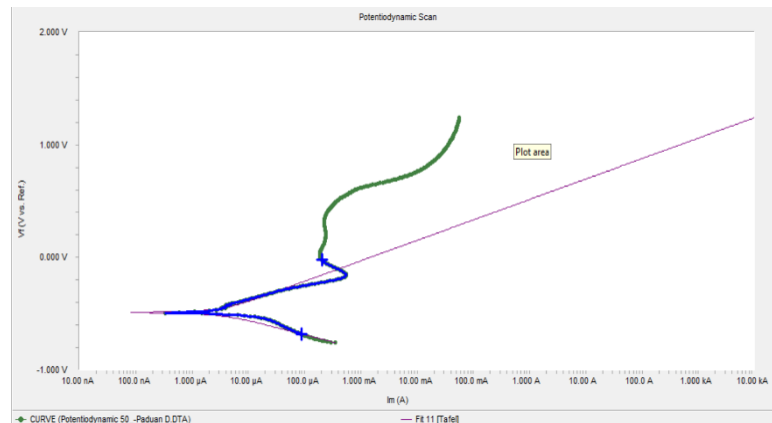
Gambar B.21 Data Pengujian Korosi Potensiodynamik Sampel 50.A pada Larutan SCP



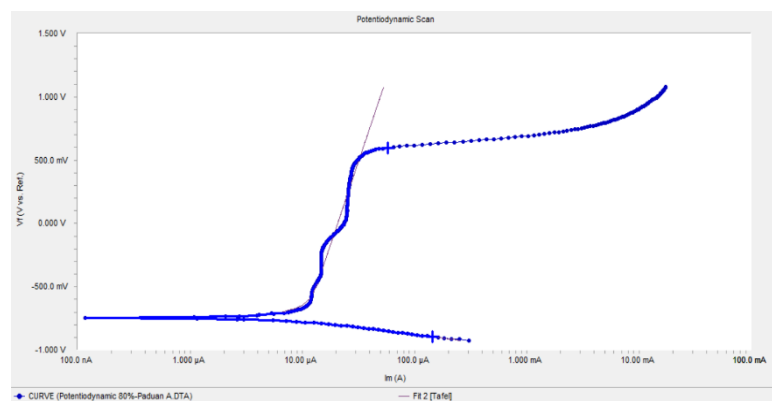
Gambar B.22 Data Pengujian Korosi Potensiodynamik Sampel 50.B pada Larutan SCP



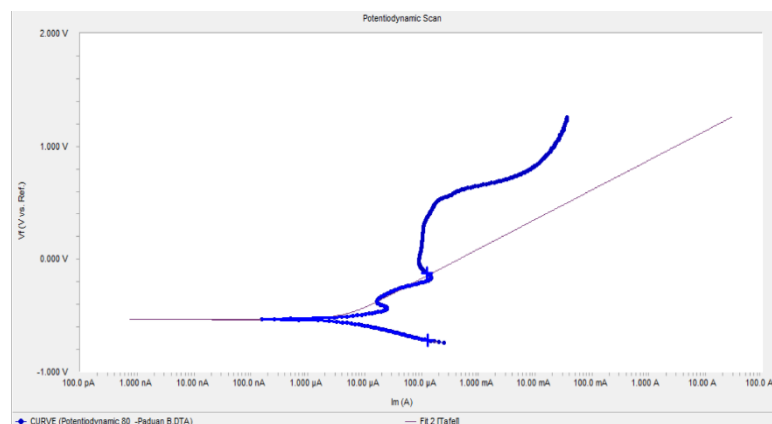
Gambar B.23 Data Pengujian Korosi Potensiodynamik Sampel 50.C pada Larutan SCP



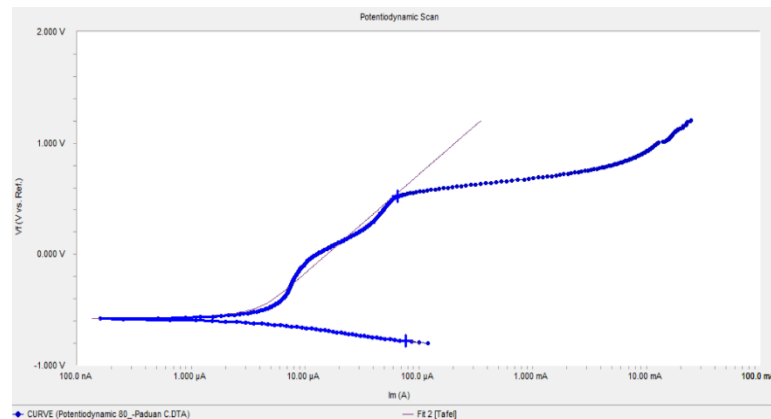
Gambar B.24 Data Pengujian Korosi Potensiodynamik Sampel 50.D pada Larutan SCP



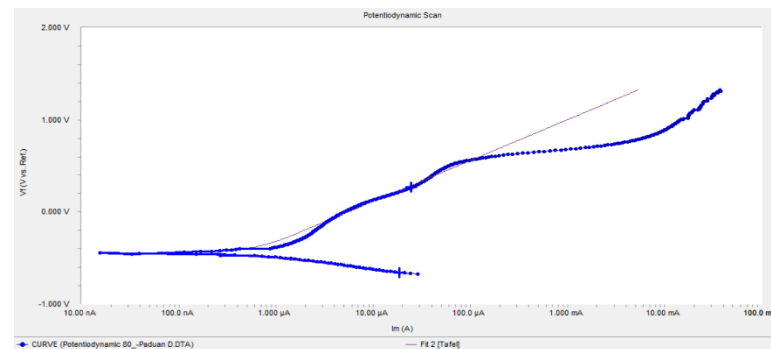
Gambar B.25 Data Pengujian Korosi Potensiodynamik Sampel 80.A pada Larutan SCP



Gambar B.26 Data Pengujian Korosi Potensiodynamik Sampel 80.B pada Larutan SCP



Gambar B.27 Data Pengujian Korosi Potensiiodinamik Sampel 80.C SCP



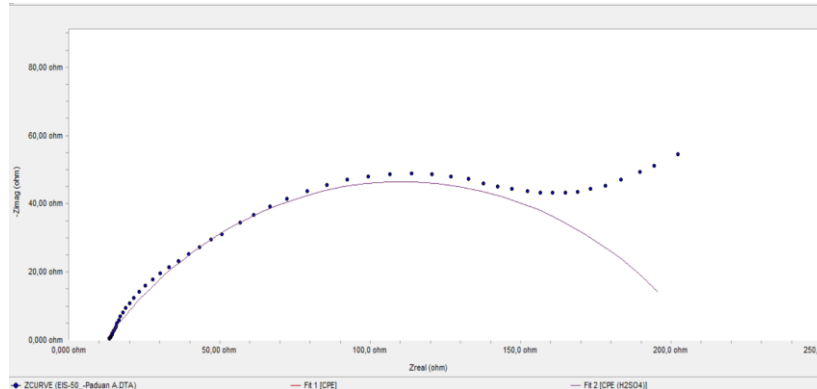
Gambar B.28 Data Pengujian Korosi Potensiiodinamik Sampel 80.D SCP

Tabel B.6 Data Laju Korosi menggunakan SCP

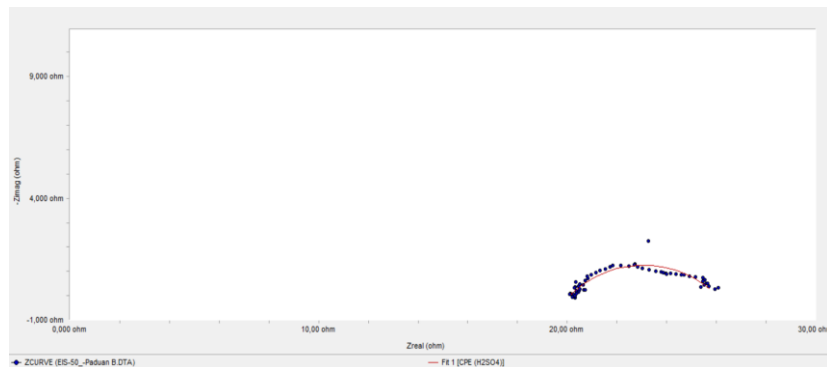
Sampel	<i>Corrosion</i>		<i>Ecorr</i> (mV)	<i>Epasivasi (mV)</i>	
	<i>Rate</i> (mpy)	<i>Icorr</i> (A/cm ²)		Awal	Akhir
50.A	16,84	17,70 E-06	-313	-175,7	255,0
50.B	11,75	12,90 E-06	-527	-108,9	514,9
50.C	10,69	10,30 E-06	-320	-146,0	351,5
50.D	2,029	2,220 E-06	-489	-131,5	321,8
80.A	8,196	10,80 E-06	-746	-628,7	479,0
80.B	3,222	4,230E-06	-533	-168,6	277,2
80.C	2,424	3,450E-06	-582	-420,8	522,3
80.D	0,289	5,8E-07	-450	-242,6	1.317

6. **Data Hasil Pengujian EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*)**

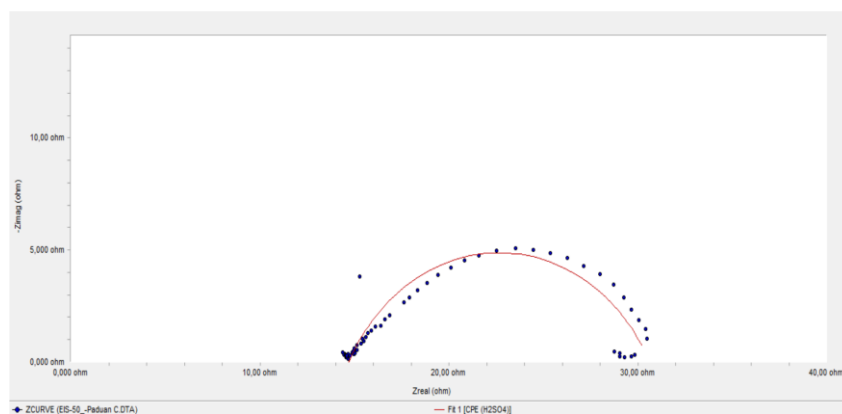
a. **Menggunakan Larutan H_2SO_4**



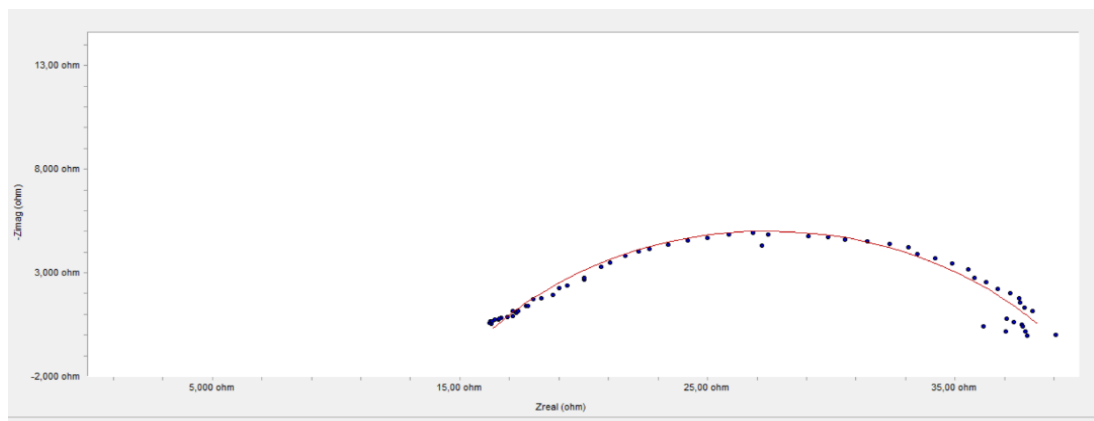
Gambar B.29 Kurva Nyquist Sampel 50.A pada Larutan H_2SO_4 .



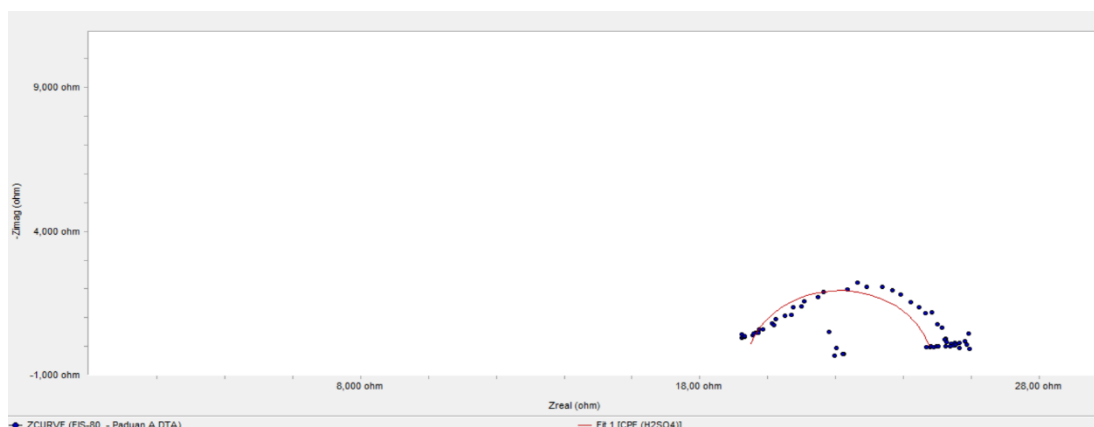
Gambar B.30 Kurva Nyquist Sampel 50.B pada Larutan H_2SO_4 .



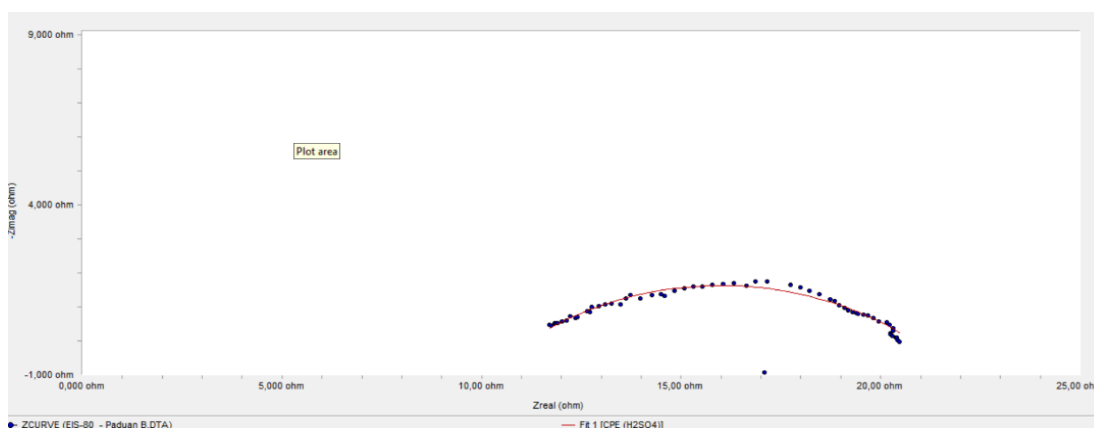
Gambar B.31 Kurva Nyquist Sampel 50.C pada Larutan H_2SO_4 .



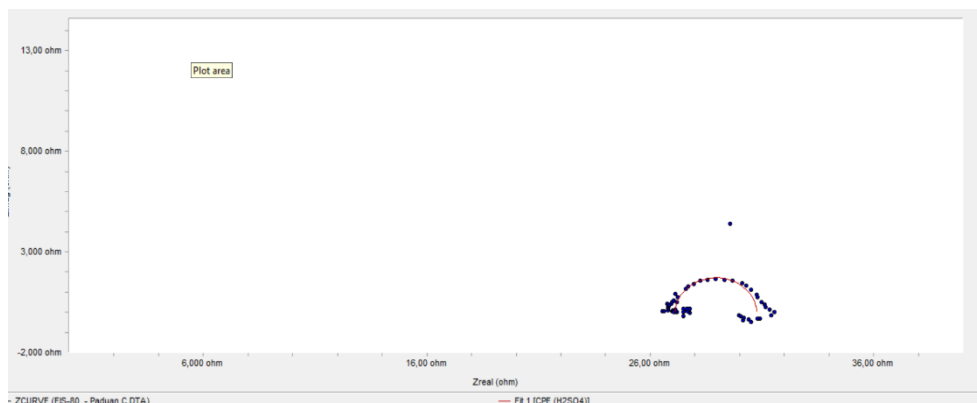
Gambar B.32 Kurva *Nyquist* Sampel 50.D pada Larutan H_2SO_4 .



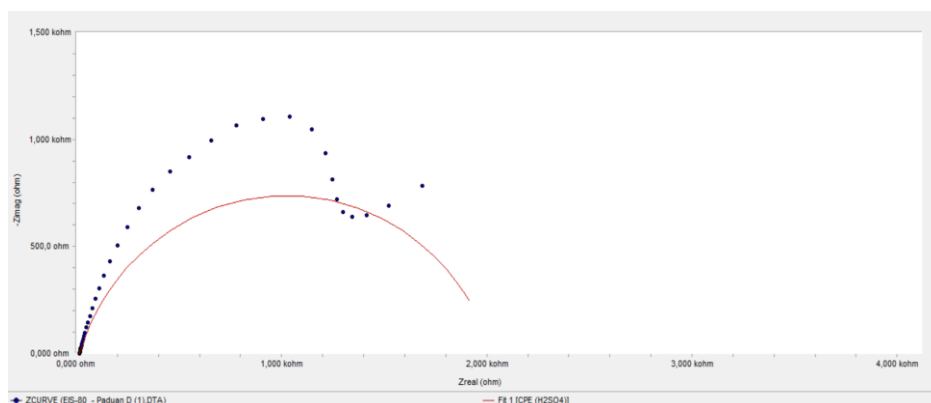
Gambar B.33 Kurva *Nyquist* Sampel 80.A pada Larutan H_2SO_4 .



Gambar B.34 Kurva *Nyquist* Sampel 80.B pada Larutan H_2SO_4 .

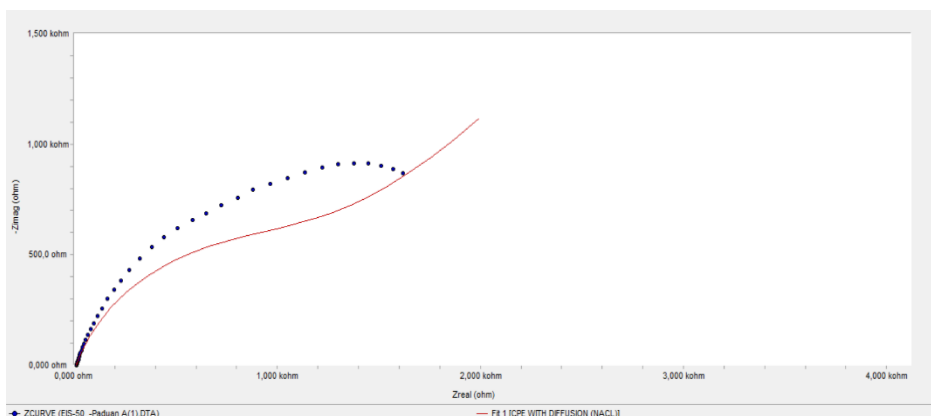


Gambar B.35 Kurva *Nyquist* Sampel 80.C pada Larutan H_2SO_4 .

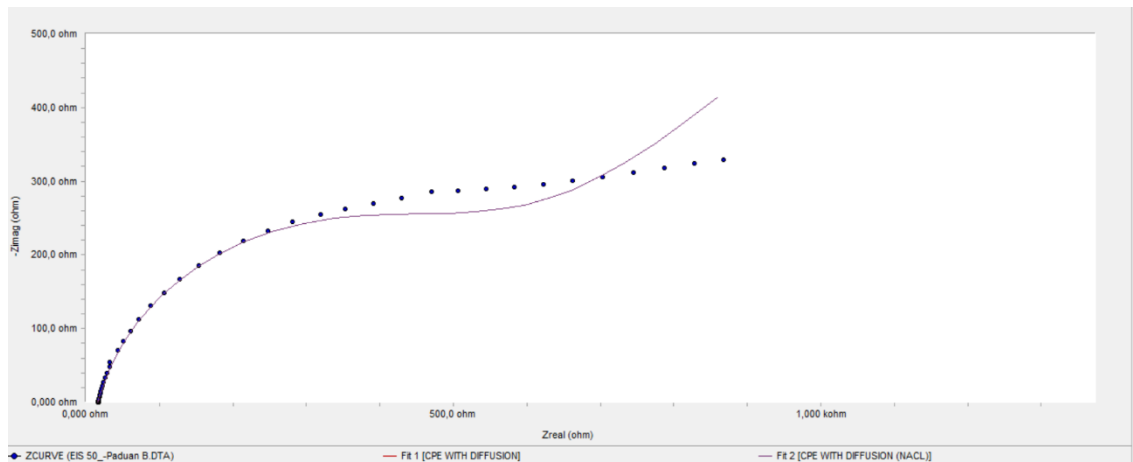


Gambar B.36 Kurva *Nyquist* Sampel 80.D pada Larutan H_2SO_4 .

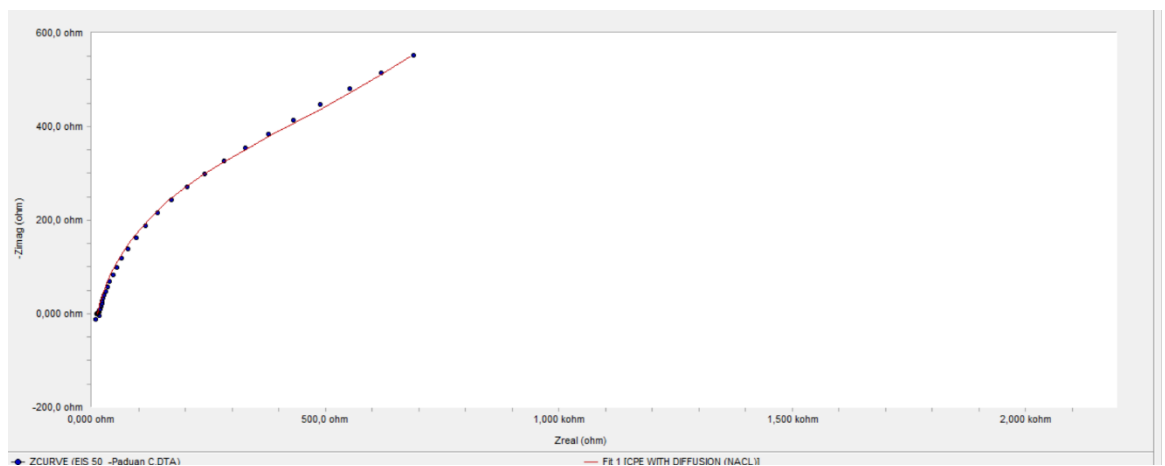
b. Menggunakan Larutan NaCl



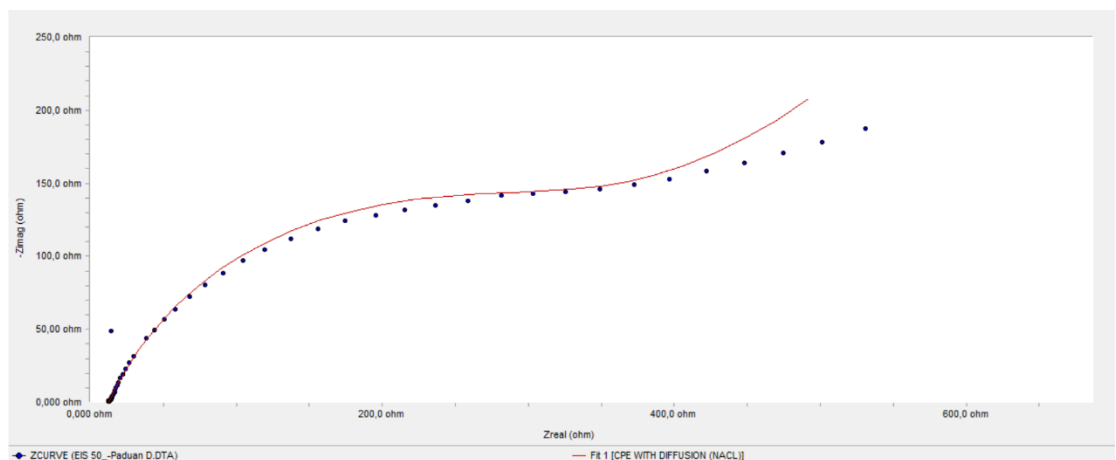
Gambar B.37 Kurva *Nyquist* Sampel 50.A pada Larutan NaCl



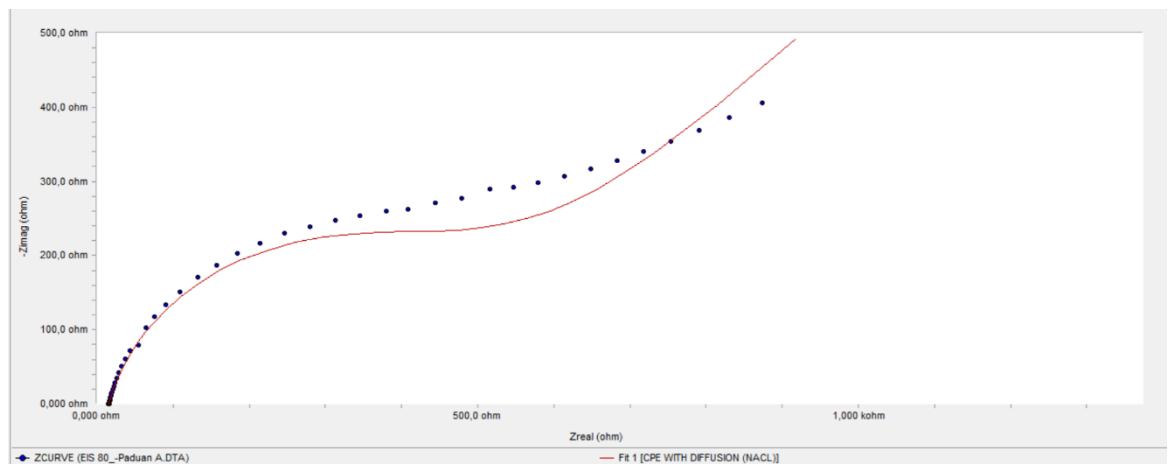
Gambar B.38 Kurva Nyquist Sampel 50.B pada Larutan NaCl



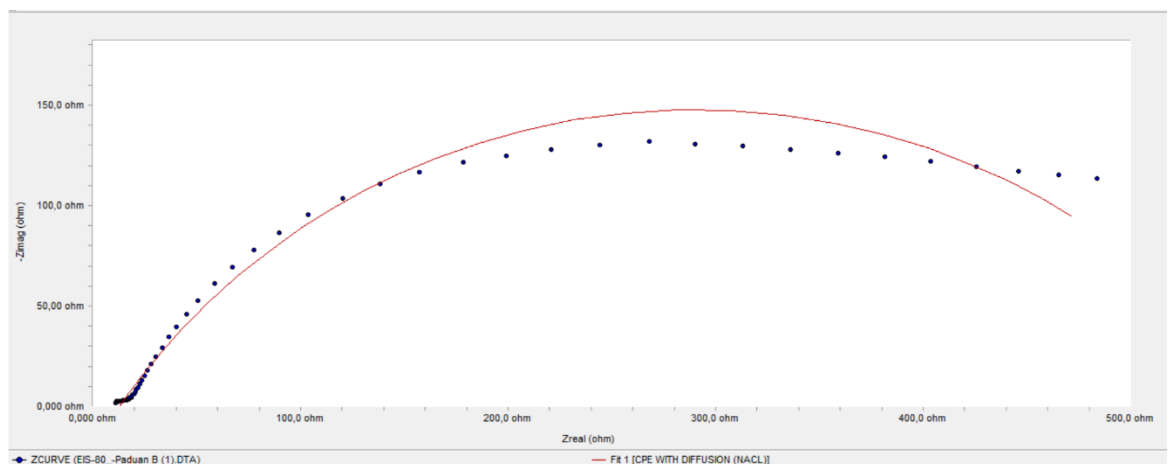
Gambar B.39 Kurva Nyquist Sampel 50.C pada Larutan NaCl



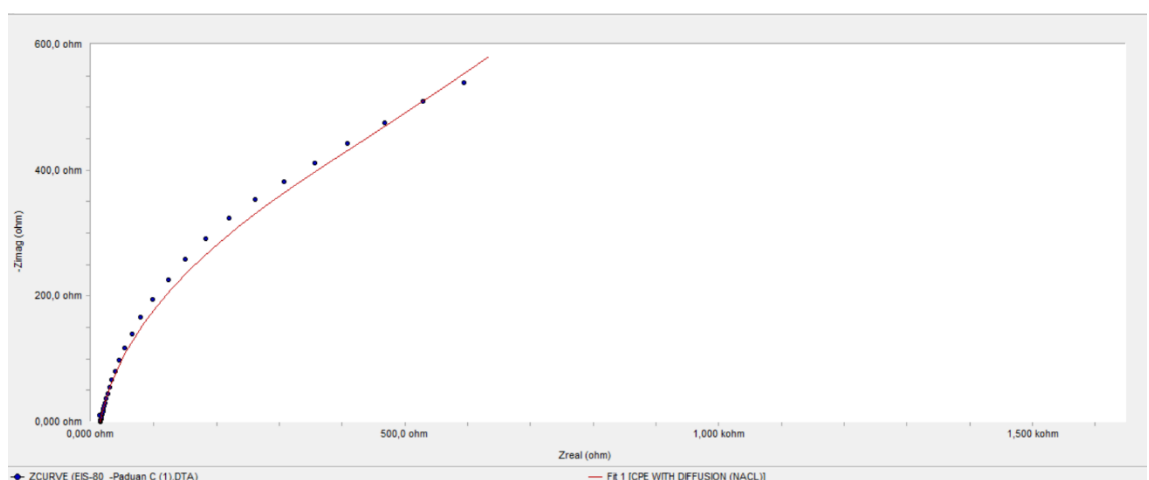
Gambar B.40 Kurva Nyquist Sampel 50.D pada Larutan NaCl



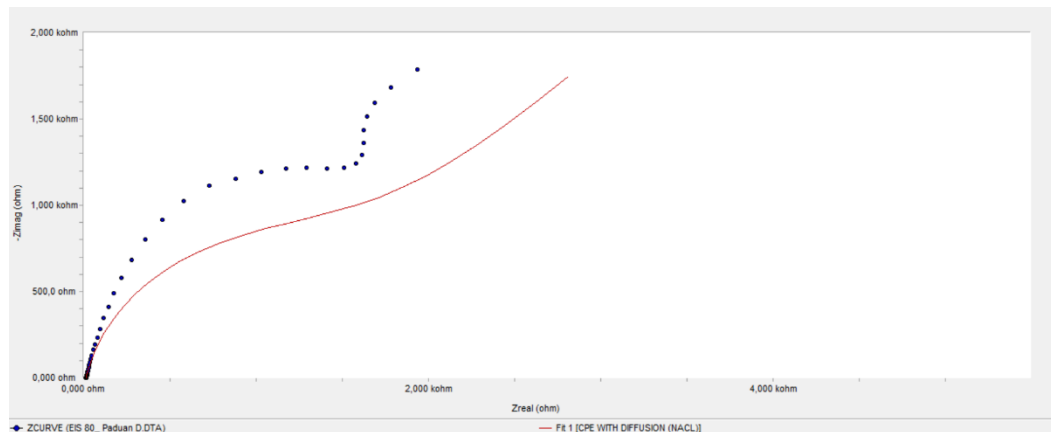
Gambar B.41 Kurva *Nyquist* Sampel 80.A pada Larutan NaCl



Gambar B.42 Kurva *Nyquist* Sampel 80.B pada Larutan NaCl

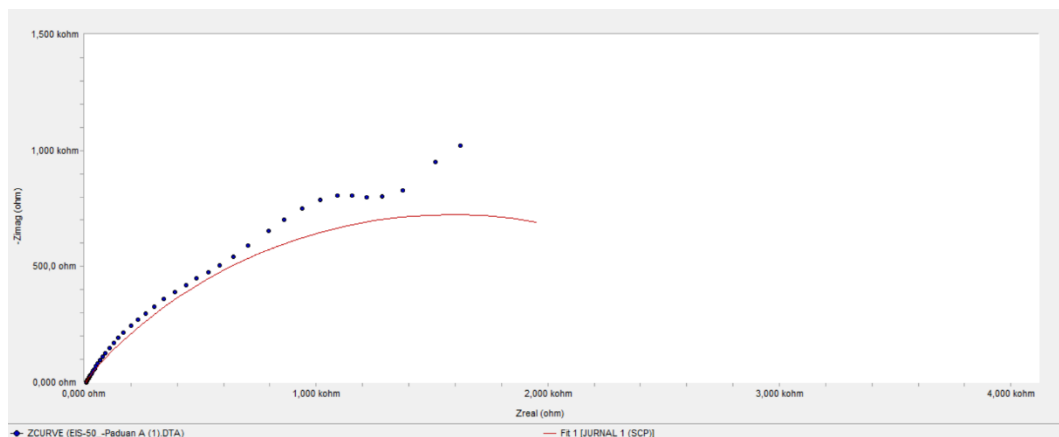


Gambar B.43 Kurva *Nyquist* Sampel 80.C pada Larutan NaCl

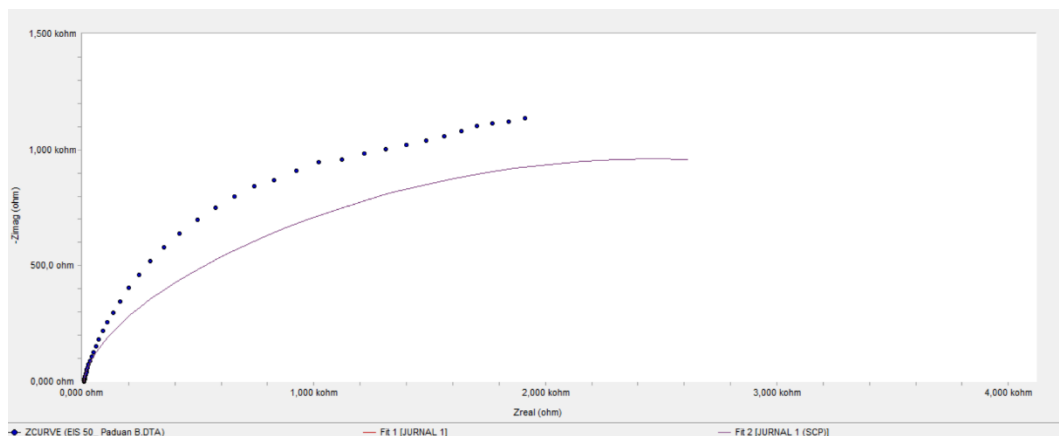


Gambar B.44 Kurva *Nyquist* Sampel 80.D pada Larutan NaCl

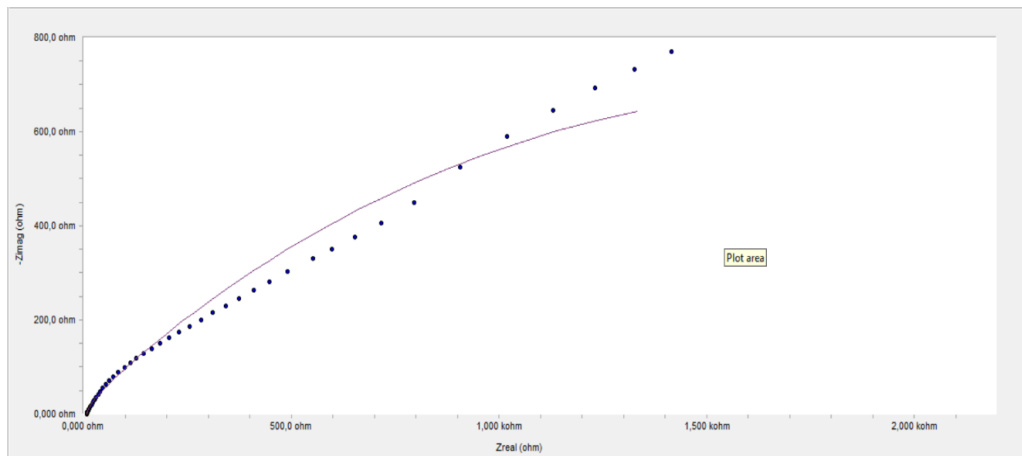
c. Menggunakan Larutan SCP



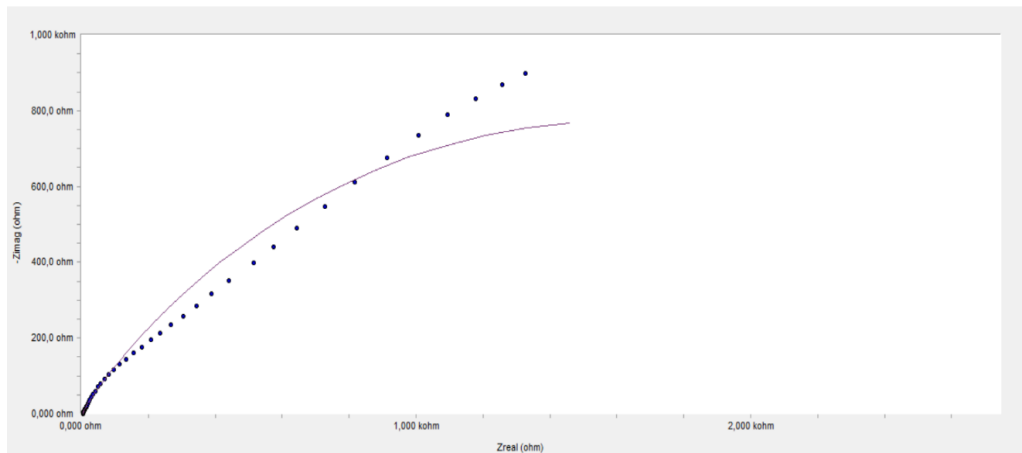
Gambar B.45 Kurva *Nyquist* Sampel 50.A pada Larutan SCP



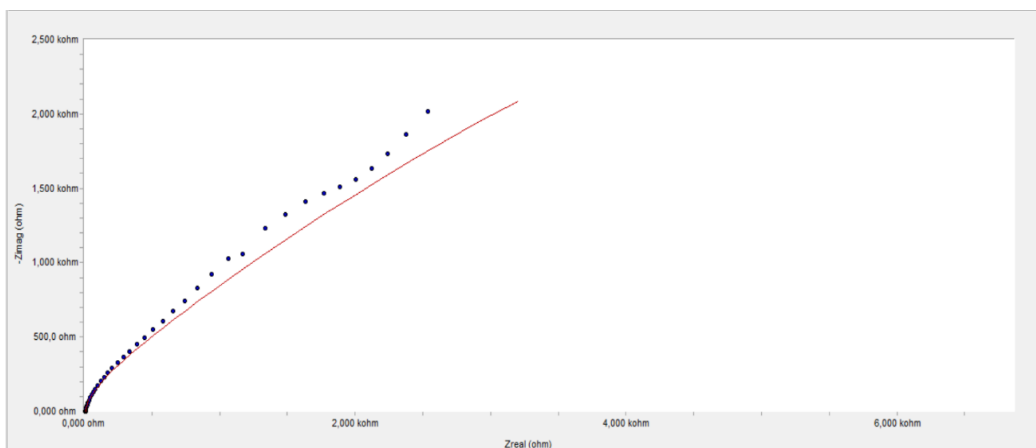
Gambar B.46 Kurva *Nyquist* Sampel 50.B pada Larutan SCP



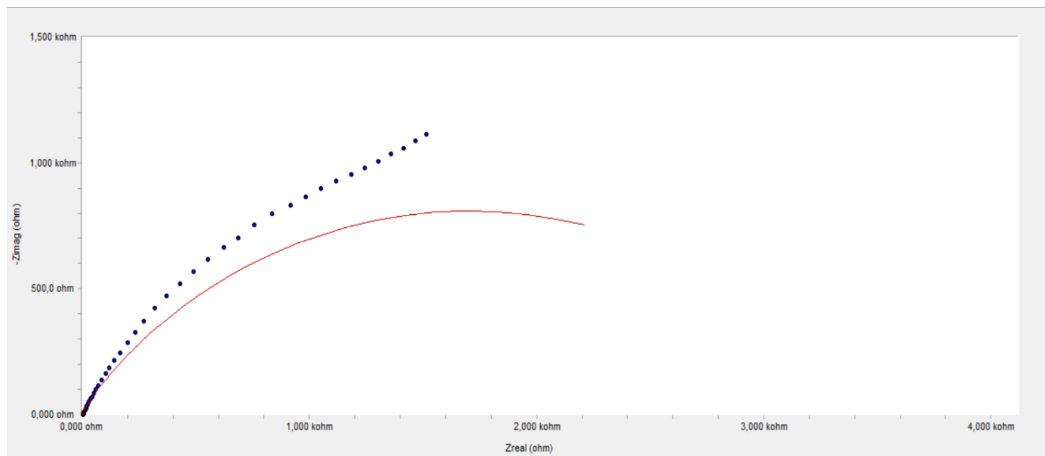
Gambar B.47 Kurva Nyquist Sampel 50.C pada Larutan SCP



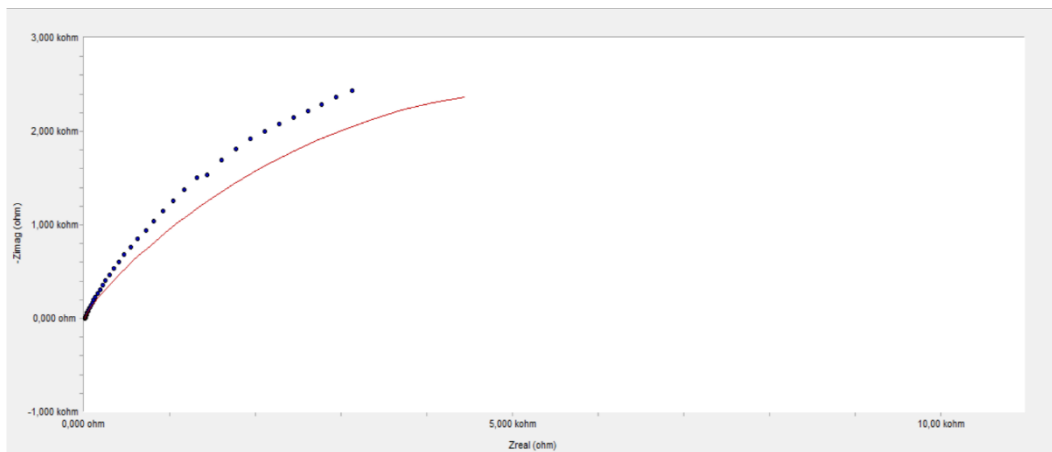
Gambar B.48 Kurva Nyquist Sampel 50 D pada Larutan SCP



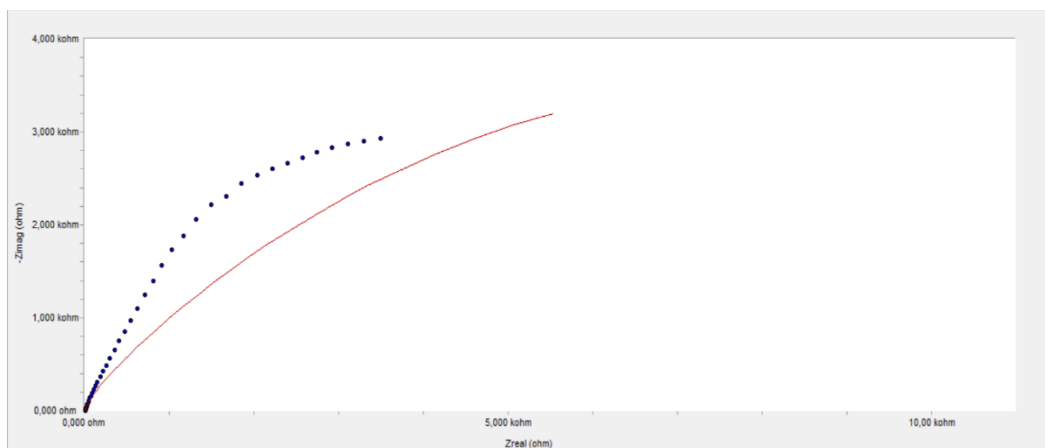
Gambar B.49 Kurva Nyquist Sampel 80.A pada Larutan SCP



Gambar B.50 Kurva *Nyquist* Sampel 80 B pada Larutan SCP



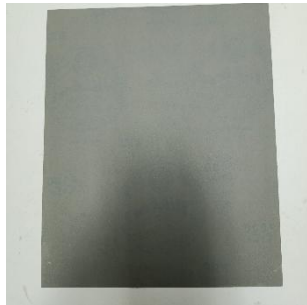
Gambar B.51 Kurva *Nyquist* Sampel 80 C pada Larutan SCP



Gambar B.52 Kurva *Nyquist* Sampel 80 D pada Larutan SCP

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

Lampiran C. Gambar Alat dan bahan



Gambar C.1 Ampelas



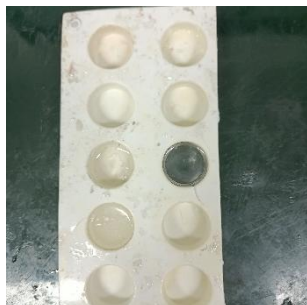
Gambar C.2 Aquades



Gambar C.3 Baja Paduan Fe-Mn-Si-
Mo-Ni-Cr



Gambar C.4 Cairan *Polish*



Gambar C.5 Cetakan Resin



Gambar C.6 *Cutting Machine*



Gambar C.7 Gelas Beker



Gambar C.8 Larutan Etsa



Gambar C.9 Mesin *Grinding*



Gambar C.10 Neraca Digital



Gambar C.11 Resin *Hardener*



Gambar C.12 Sarung Tangan

