



TUGAS AKHIR - TM145502

APLIKASI EKSTRAK KULIT JERUK NIPIS (*CITRUS AURANTIFOLIA*) SEBAGAI INHIBITOR ORGANIK PADA BAJA API 5L GRADE B MEDIA LARUTAN H_2SO_4 1M

**HERU FATKHUROHMAT
NRP. 2114 030 104**

**Dosen Pembimbing
Dr. Atria Pradityana, ST. MT.
19851124 200912 2 008**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN INDUSTRI
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**



TUGAS AKHIR - TM145502

APLIKASI EKSTRAK KULIT JERUK NIPIS (*CITRUS AURANTIFOLIA*) SEBAGAI INHIBITOR ORGANIK PADA BAJA API 5L GRADE B MEDIA LARUTAN H₂SO₄ 1M

**HERU FATKHUROHMAT
NRP. 2114 030 104**

**Dosen Pembimbing
Dr. Atria Pradityana, ST. MT.
19851124 200912 2 008**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN INDUSTRI
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**



FINAL PROJECT - TM145502

**APPLICATION OF PEEL LIME (*CITRUS AURANTIFOLIA*)
EXTRACT AS ORGANIC INHIBITOR FOR STEEL API 5L
GRADE B IN H₂SO₄ 1M SOLUTION**

Heru Fatkhurohmat
NRP. 2114 030 104

Advisor
Dr. Atria Pradityana, ST. MT.
19851124 200912 2 008

MECHANICAL INDUSTRY ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF VOCATIONAL
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017

APLIKASI EKSTRAK KULIT JERUK NIPIS (*CITRUS AURANTIFOLIA*) SEBAGAI INHIBITOR ORGANIK PADA BAJA API 5L GRADE B MEDIA LARUTAN H₂SO₄ 1M

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Satu Syarat
Memperoleh Gelar Ahli Madya

Pada

Bidang Studi Manufaktur

Program Studi Diploma III

Departemen Teknik Mesin Industri

Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

SURABAYA

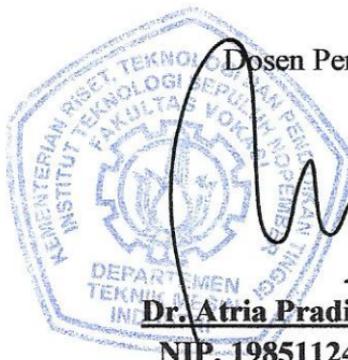
Oleh :

HERU FATKHUROHMAT

NRP. 2114 030 104

Disetujui oleh dosen pembimbing Tugas Akhir :

Dosen Pembimbing



Dr. Atria Pradityana, ST. MT.
NIP. 19851124 200912 2 008

SURABAYA, JULI 2017

APLIKASI EKSTRAK KULIT JERUK NIPIS (*CITRUS AURANTIFOLIA*) SEBAGAI INHIBITOR ORGANIK PADA BAJA API 5L GRADE B MEDIA LARUTAN H₂SO₄ 1M

Nama Mahasiswa : Heru Fatkhurohmat
NRP : 2114030104
Jurusan : Departemen Teknik Mesin Industri
Dosen Pembimbing : Dr. Atria Pradityana, ST. MT.

Abstrak

Korosi yang terjadi pada logam telah menimbulkan permasalahan yang serius di berbagai bidang seperti halnya pada industri dan konstruksi termasuk industri minyak dan gas. Korosi tidak dapat dihindari atau dihilangkan, namun dapat dikendalikan. Salah satu upaya yang dapat digunakan untuk mengendalikan korosi pada logam karena pengaruh lingkungan yaitu dengan menambahkan inhibitor. Inhibitor organik merupakan suatu inhibitor yang berasal dari bahan alami seperti ekstrak sayur, dedaunan ataupun buah. Salah satunya yang dapat digunakan untuk inhibitor organik yaitu kulit jeruk nipis. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh inhibitor kulit jeruk nipis terhadap laju korosi yang terjadi pada baja API 5L *grade* B dengan media larutan H₂SO₄ 1M. Pembuatan ekstrak dengan menggunakan metode maserasi. Konsentrasi inhibitor yang digunakan adalah 0 mg – 250 mg (kelipatan 50 mg). Pengujian yang dilakukan pada sampel uji yaitu Polarisasi, EIS, *weight loss*, FTIR dan SEM. Pada konsentrasi 200 mg menghasilkan efisiensi tertinggi di pengujian polarisasi sebesar 99.238% dan pengujian EIS sebesar 99.050%. Pengujian FTIR menunjukkan adanya gugus fungsi yang teradsorpsi pada permukaan baja API 5L *grade* B. Hasil SEM menunjukkan adanya lapisan tipis yang terbentuk, diduga lapisan ini yang membantu proses penghambatan laju korosi yang sedang terjadi pada spesimen.

Kata Kunci : Korosi, Inhibitor Organik, Kulit Jeruk Nipis, Baja API 5L, H₂SO₄

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**APPLICATION OF PEEL LIME (*CITRUS
AURANTIFOLIA*) EXTRACT AS ORGANIC INHIBITOR
FOR STEEL API 5L GRADE B IN H₂SO₄ 1M SOLUTION**

Student Name : Heru Fatkhurohmat
NRP : 2114030104
Department : Mechanical Industry Engineering
Advisor : Dr. Atria Pradityana, ST. MT.

Abstract

*Corrosion that occurs on metal has caused serious problems in various fields as well in industry and construction including the oil and gas industry. Corrosion cannot be avoided or removed, but can be controlled. One effort that can be used to control corrosion on metal because of the influence of the environment that is by adding an inhibitor. Organic inhibitors is inhibitor derived from natural ingredients such as vegetable extract, foliage or fruit. One of them that can be used for organic inhibitor that is peel lime. This research was conducted with the aim to find out the influence of peel lime (*citrus aurantifolia*) inhibitor against the corrosion rate of the steel API 5L grade B with H₂SO₄ 1M solution. Making of the extract by using method of maceration. The concentration of inhibitor that is used is 0 mg – 250 mg (multiples of 50 mg). Research conducted on a sample test that is polarization, EIS, weight loss, FTIR and SEM. At concentration of 200 mg of the highest efficiency in a result of polarization is 99.238% and EIS result is 99.050%. FTIR result shows the functional groups that adsorption on the surface of the steel API 5L grade B. SEM result shows that there is a thin layer that is formed, supposedly this layer helps the process of the inhibition of the corrosion rate on a specimen.*

Key Words : *Corrosion, Inhibitor Organic, Peel Lime, Steel API 5L, H₂SO₄*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah segala puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, hidayah, petunjuk dan rizkinya sehingga tugas akhir yang berjudul “**Aplikasi Ekstrak Kulit Jeruk Nipis (*Citrus Aurantifolia*) Sebagai Inhibitor Organik Pada Baja Api 51 Grade B Media Larutan H₂SO₄ 1M**” ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik dan lancar.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi untuk memperoleh gelar Ahli Madya (A.Md) oleh setiap mahasiswa Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi-ITS Surabaya sesuai dengan kurikulum yang telah ditetapkan.

Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tidak terlepas dari semua dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terimakasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan memberi dukungan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini antara lain :

1. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT, selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi-ITS.
2. Ibu Dr. Atria Pradityana, ST. MT, selaku Dosen Pembimbing tugas akhir yang selalu bersabar memberi ilmu yang bermanfaat, tidak bosan-bosannya memberikan saran serta membimbing penulis hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Suhariyanto, M.Sc., selaku coordinator tugas akhir Departemen Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi-ITS.
4. Bapak Gathot Dwi Winarto, selaku dosen wali penulis.
5. Tim dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis.

6. Bapak Djahuri dan Ibu Nunung Komariyah orang tua penulis yang tak pernah berhenti berdoa dan selalu memberikan dukungan berupa materiil maupun non materiil, saran, dorongan serta nasihat sehingga penulis selalu berusaha dan pantang menyerah dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Rizaq Prayogi, Fransiskus Tommi P. dan Fatnika Fauziyah, merupakan partner tugas akhir yang merasakan suka dan duka bersama serta mensupport dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Teman-teman seperjuangan D3 Teknik Mesin angkatan 2014, terimakasih semangatnya, waktunya selama 3 tahun ini untuk berbagi cerita dan ilmu bersama-sama.
9. Seluruh Civitas Akademik Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi ITS.
10. Erdin Rahmadani, terimakasih banyak karena telah berjasa meminjamkan laptop disaat laptop penulis masih diservis.
11. Teman-teman kos Abah Family yang telah banyak mensupport penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
12. Seluruh pihak yang belum dapat disebutkan diatas yang telah memberikan bantuan, dukungan dan doa bagi penulis hingga Tugas Akhir ini dapat selesai.

Penulis juga menyadari masih banyak terdapat kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan masukan dari semua pihak. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Industri Oil & Gas	5
2.2 Baja API 5L.....	5
2.3 Korosi	8
2.4 Jenis Korosi	10
2.5 Laju Korosi.....	13
2.6 Faktor yang Mempengaruhi Korosi.....	14
2.6.1 Korosi pada Asam Sulfat (H_2SO_4).....	17
2.7 Korosi pada Baja Karbon	17
2.8 Perlindungan Terhadap Korosi.....	18
2.8.1 Proteksi Katodik dan Anodik.....	19
2.8.2 Coating	21
2.8.3 Pemilihan Material	23
2.8.4 Inhibitor Korosi	23
2.9 Inhibitor.....	23
2.9.1 Mekanisme Kerja Inhibitor	23
2.9.2 Klasifikasi Inhibitor.....	24
2.10 Efisiensi Inhibisi.....	30
2.11 Buah Jeruk Nipis	31

2.11.1 Taksonomi dan Morfologi Kulit Jeruk Nipis ...	32
2.11.2 Kandungan Kulit Jeruk Nipis (<i>Citrus Aurantifolia</i>)	32
2.12 Pengujian Polarisasi Potensiodinamik.....	33
2.13 Pengujian EIS (<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>).....	35
2.14 Pengujian <i>Weight Loss</i>	36
2.15 Pengujian FTIR (<i>Fourier Transform Infra Red</i>)	36
2.16 Pengujian SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>).....	38
2.17 Pengujian Sebelumnya	40

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir	43
3.2 Metode Penelitian.....	44
3.3 Alat Penelitian	44
3.4 Bahan Penelitian.....	45
3.5 Prosedur Penelitian.....	46
3.5.1 Preparasi Inhibitor	46
3.5.2 Preparasi Baja.....	48
3.5.3 Preparasi Larutan H ₂ SO ₄ 1M.....	50
3.6 Pengujian	50
3.6.1 Pengujian Polarisasi Potensiodinamik.....	50
3.6.2 Pengujian EIS (<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>).....	51
3.6.3 Pengujian <i>Weight Loss</i>	52
3.6.4 Pengujian <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR)	53
3.6.5 Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	54
3.7 Rancangan Tabel Pengambilan Data Penelitian.....	55

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Ekstraksi.....	59
4.2 Hasil Pengujian	60
4.2.1 Hasil Pengujian Polarisasi Potensiodinamik	60
4.2.2 Hasil Pengujian EIS (<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>)	64
4.2.3 Hasil Pengujian <i>Weight Loss</i>	67

4.2.4 Hasil Pengujian FTIR (<i>Fourier Transform Infra Red</i>).....	69
4.2.5 Hasil Pengujian SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)	75
4.3 Pembahasan.....	77
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	81
5.2 Saran.....	81
DAFTAR PUSTAKA	83
LAMPIRAN	87
BIODATA PENULIS	131

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pipa Baja API 5L (ASTM A53) <i>grade B</i>	7
Gambar 2.2	Pengaruh Kelarutan Oksigen Terhadap Laju Korosi	15
Gambar 2.3	Hubungan Konsentrasi Oksigen Terlarut Terhadap Temperatur.....	16
Gambar 2.4	Diagram Polarisasi Potensiostat: Perilaku Elektrokimia Logam dalam Larutan yang Mengandung Inhibitor Anodik dan Katodik (a) Perbandingan Larutan yang Sama Tanpa Inhibitor (b).....	27
Gambar 2.5	Ilustrasi Mekanisme Green Inhibitor, berperan melalui adsorpsi inhibitor diatas permukaan logam, dimana “inh” merupakan molekul inhibitor.....	28
Gambar 2.6	Grafik Pengujian Polarisasi Potensiodinamik.....	34
Gambar 2.7	Prinsip Kerja Potensiostat	35
Gambar 2.8	Contoh Spektra FTIR	37
Gambar 2.9	Interaksi Antara Elektron dengan Permukaan Sampel	39
Gambar 2.10	Skema <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	40
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	43
Gambar 3.2	(a) Jeruk Nipis yang Dikumpulkan (b) Larutan Methanol	47
Gambar 3.3	(a) Serbuk Kulit Jeruk Nipis Kering 200 gram (b) Proses Maserasi Kulit Jeruk Nipis Selama 3 Hari.....	48
Gambar 3.4	(a) Pemotongan Spesimen Bentuk Kupon 10 mm x 10 mm (b) Material yang Sudah Disolder dengan Kabel dan Diresin	49
Gambar 3.5	Material Uji <i>Weight Loss</i>	49
Gambar 3.6	Larutan H ₂ SO ₄ 1M 1000 ml	50
Gambar 3.7	Alat Pengujian Polarisasi Potensiodinamik ...	51

Gambar 3.8	Pengujian <i>Weight Loss</i>	53
Gambar 3.9	Alat Pengujian FTIR	54
Gambar 3.10	Alat Pengujian SEM Phenom Pro-X.....	55
Gambar 4.1	Hasil Ekstraksi Kulit Jeruk Nipis.....	59
Gambar 4.2	Grafik Efisiensi Inhibisi Inhibitor Kulit Jeruk Nipis Pengujian Polarisasi Potensiodinamik.....	63
Gambar 4.3	Perbandingan Kurva Hasil Pengujian Polariasi Potensiodinamik.....	64
Gambar 4.4	Grafik Perbandingan Kurva Nyquist Hasil Pengujian EIS	65
Gambar 4.5	Model Rangkaian Sirkuit Pengujian EIS	65
Gambar 4.6	Grafik Perbandingan Rata-Rata Laju Korosi Tanpa Inhibitor dan Dengan Inhibitor	68
Gambar 4.7	Grafik Efisiensi Inhibisi Inhibitor Kulit Jeruk Nipis Pengujian <i>Weight Loss</i>	69
Gambar 4.8	Spektrum Pengujian FTIR Inhibitor Ekstrak Kulit Jeruk Nipis.....	70
Gambar 4.9	Spektrum Pengujian FTIR Spesimen Baja API 5L <i>grade</i> B dengan Penambahan Inhibitor	72
Gambar 4.10	Perbandingan Hasil FTIR Inhibitor Ekstrak dan Spesimen Baja API 5L <i>grade</i> B dengan Inhibitor	74
Gambar 4.11	Hasil Uji SEM Spesimen dengan Perbesaran 1000x (a) Tanpa Inhibitor, (b) Dengan Inhibitor	76

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat Mekanis dari Berbagai Baja API 5L	6
Tabel 2.2	Komposisi Baja API 5L <i>grade</i> B Berdasarkan Sertifikat.....	8
Tabel 2.3	Tabel Hubungan Laju Korosi dan Ketahanan Korosi.....	14
Tabel 2.4	Penelitian Berbahan Dasar Organik.....	41
Tabel 3.1	Komposisi Kimia API 5L <i>grade</i> B	45
Tabel 3.2	Tabel Pengujian Polarisasi Potensiodinamik.....	55
Tabel 3.3	Tabel Pengujian EIS	56
Tabel 3.4	Tabel Pengujian <i>Weight Loss</i>	56
Tabel 4.1	Parameter Pengujian Polarisasi Potensiodinamik.....	61
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Polarisasi Potensiodinamik	62
Tabel 4.3	Tabel Hasil Pengujian EIS.....	66
Tabel 4.4	Hasil FTIR Inhibitor Ekstrak Kulit Jeruk Nipis	71
Tabel 4.5	Hasil FTIR Spesimen Dengan Tambahan Inhibitor	73
Tabel 4.6	Perbandingan Hasil FTIR Inhibitor Ekstrak Kulit Jeruk Nipis dan Spesimen dengan Penambahan Inhibitor	74



BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era yang modern sekarang ini, baja memegang peranan yang penting dalam industri minyak dan gas maupun industri yang lainnya, baik sebagai alat produksi suatu produk ataupun sebagai bahan mentah untuk menghasilkan produk. Jenis baja yang sering digunakan dalam dunia industri yaitu baja karbon. Baja karbon sering digunakan karena memiliki kekerasan yang tinggi dan memiliki kekuatan material yang baik. Salah satu jenis baja yang sering digunakan dalam industri minyak dan gas diantaranya adalah baja API 5L (Purbadi, 2008). Dalam aplikasinya baja API 5L digunakan pada sistem perpipaan dalam industri minyak dan gas. Biasanya pada industri minyak dan gas terjadi suatu permasalahan yang timbul akibat adanya kontak antara baja dengan lingkungan sekitar yaitu adanya korosi.

Korosi merupakan gejala perusakan/destruktif, penurunan mutu dari material (logam) yang mempengaruhi hampir semua jenis logam dan terjadi akibat reaksi dengan lingkungan (Trethewey. KR,1991). Korosi yang terjadi pada logam telah menimbulkan permasalahan yang serius di berbagai bidang seperti halnya pada industri dan konstruksi termasuk industri minyak dan gas serta perusahaan yang bergerak pada pelayanan publik misalnya saja perusahaan pembangkit listrik dan perusahaan air minum. Permasalahan tersebut dapat berupa terjadinya kerusakan pada peralatan, mesin ataupun struktur dari suatu konstruksi. Kerusakan-kerusakan yang terjadi akibat adanya korosi dapat mengakibatkan terhentinya aktivitas produksi dan mengakibatkan membengkaknya alokasi biaya yang dikeluarkan untuk mengatasi masalah tersebut (Uhlig, 2000).

Korosi tidak dapat dihindari atau dihilangkan, namun dapat dikendalikan. Salah satu upaya yang dapat digunakan untuk mengendalikan korosi pada logam karena pengaruh lingkungan yaitu dengan menambahkan senyawa proteksi dari korosi atau disebut juga dengan inhibitor (Sulistijono, 2000). Inhibitor korosi bekerja dengan membentuk lapisan pasif berupa suatu lapisan tipis di permukaan material yang berfungsi sebagai penghalang



antara logam dengan media korosif. Banyak jenis dari inhibitor yang dapat dipilih untuk dapat mengatasi masalah korosi. Secara umum, inhibitor korosi dibagi menjadi 2 kategori yakni organik dan anorganik. Namun karena alasan lingkungan inhibitor anorganik perlahan-lahan mulai ditinggalkan dan beralih ke inhibitor organik yang lebih ramah terhadap lingkungan, lebih mudah didapatkan serta mengandung senyawa antioksidan yang dapat menghambat, menunda, dan mencegah proses oksidasi yang dapat menyebabkan korosi. Inhibitor korosi organik pada umumnya digunakan di oil field, untuk pendingin maupun pemanas (Sofia Loren B, 2009).

Inhibitor organik merupakan suatu inhibitor yang berasal dari bahan alami seperti ekstrak sayur, dedaunan ataupun buah. Jeruk nipis (*Citrus Aurantifolia*) memiliki nilai komersial yang tinggi di pasar terutama karena aroma, ukuran, dan kebermanfaatannya untuk obat. Jeruk nipis merupakan buah yang sangat serbaguna dan digunakan tidak hanya di rumah tangga saja tetapi juga memiliki banyak aplikasi dalam industri kosmetik, farmasi dan pengolahan makanan (Anjani, dkk, 2014)

Jeruk nipis (*Citrus Aurantifolia*) populer karena rasa yang unik dan menarik, serta karena kandungan vitamin C, senyawa flavonoid, limonoid, asam fenolat, alkaloid, pitosterol, aglikon, glukosida, nomilin, limonin dan senyawa biologis aktif lainnya (Jayaprakasha, dkk, 2009). Senyawa flavonoid dan tanin merupakan senyawa antioksidan. Senyawa ini termasuk jenis antioksidan karena dapat menghambat dari serangan radikal bebas.

Pada penelitian sebelumnya, Jeruk Nipis (*Citrus Aurantifolia*) dimanfaatkan ekstrak daunnya untuk diuji menghambat korosi pada baja karbon dengan media larutan HCl 1M. Pengujian tersebut dilakukan dengan berbagai macam variasi konsentrasi yang menghasilkan efisiensi inhibisi tertinggi mencapai 97,51% dengan konsentrasi inhibitor 2,5%.

Oleh karena itu, dalam penelitian kali ini memanfaatkan ekstrak kulit jeruk nipis yang pada penelitian sebelum-sebelumnya belum pernah ada yang melakukan pengujian menggunakan ekstrak kulit jeruk nipis. Kandungan senyawa antioksidan yang ada pada jeruk nipis dapat digunakan sebagai



inhibitor korosi pada baja API 5L grade B yang banyak digunakan pada industri migas. Pada penelitian ini menggunakan media larutan H_2SO_4 1M dan variasi konsentrasi 50 mg, 100 mg, 150 mg, 200 mg, dan 250 mg.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka ada beberapa rumusan masalah yang muncul dan akan dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis (*Citrus Aurantifolia*) terhadap laju korosi baja API 5L grade B dalam media H_2SO_4 1M.
2. Bagaimana mekanisme inhibisi inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis (*Citrus Aurantifolia*) terhadap laju korosi pada baja API 5L grade B dalam media H_2SO_4 1M.

1.3 Batasan Masalah

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai masalah yang dikaji, maka perlu adanya batasan masalah dari penelitian yang dilakukan, antara lain :

1. Material baja API 5L grade B dianggap bersifat homogen dan bebas dari cacat.
2. Dimensi setiap material dianggap homogen.
3. Tingkat kehalusan dari permukaan setiap material dianggap homogen.
4. Tidak ada perubahan yang terjadi pada temperatur, volume larutan, dan pH larutan selama pengujian.
5. Kulit jeruk nipis yang digunakan diasumsikan homogen.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mempelajari efektifitas inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis pada baja API 5L grade B dalam media H_2SO_4 1M dengan beberapa variasi konsentrasi.
2. Menganalisa mekanisme inhibisi dari kandungan antioksidan pada inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis.



1.5 Manfaat Penelitian

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Mempelajari korosi yang biasa terjadi pada pipa *oil* dan *gas*.
2. Memanfaatkan sisa kulit jeruk nipis sebagai alternatif inhibitor yang digunakan pada baja karbon di industri sehingga dapat memperlambat laju korosi.
3. Mampu memberi inspirasi dan motivasi bagi peneliti lain agar dapat terus mengembangkan potensi yang ada pada senyawa-senyawa organik.



BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Industri Oil & Gas

Industri minyak dan gas terutama mengenai eksplorasi, operasi produksi, operator lapangan biasanya menginginkan adanya pasokan minyak dan gas bumi yang tidak terputus ke titik ekspor atau pengolahan (Naili, 2010). Pipa-pipa dan komponen perlengkapan dari *lining* akan mengalami degradasi material dengan berbagai kondisi dari sumur akibat perubahan komposisi fluida, *souring* sumur selama periode tertentu, perubahan kondisi operasi tekan, dan suhu. Degradasi material menyebabkan penurunan sifat mekanis seperti kekuatan, keuletan, kekuatan impact, menyebabkan *loss of material*, pengurangan ketebalan dan mengalami kegagalan/*failure*. Groysman. A. (2010) telah mendefinisikan korosi merupakan interaksi antara bahan dengan lingkungannya, yang menghasilkan kerusakan pada material dan lingkungan.

2.2 Baja API 5L

Proses pemilihan bahan yang digunakan untuk tujuan perpipaan khususnya pipa minyak dan gas adalah suatu proses yang memerlukan pertimbangan yang tepat agar mencapai suatu hasil yang maksimal. Bahan yang dipilih harus benar-benar aman dan tahan terhadap kondisi operasi, suhu, dan tekanan selama umur perancangan yang diinginkan. Kekuatan mekanik dari suatu bahan harus memadai agar mencapai pelayanan dalam jangka waktu panjang dan juga agar mampu menahan perubahan dari proses operasi, misalnya saja siklus mekanis ataupun panas. Selain itu lingkungan yang ada di sekitar sistem perpipaan serta komponen yang digunakan disaat beroperasi juga harus dipertimbangkan. Perubahan sifat-sifat bahan ataupun hialngnya beban efektif yang dapat merubah luas penampang dapat terjadi melalui proses korosi, maupun erosi. Kemampuan bahan untuk dapat dibengkokkan atau dibentuk, kecocokan untuk proses pengelasan atau metode penyambungan lainnya, kemudahan perlakuan panas, keseragaman atau homogenitas serta kestabilan dari struktur mikro dan sifat-sifat dari bahan juga ikut andil pada



kelayakan ekonomis dari pipa yang dipilih (ASTM Handbook, 2005).

Baja yang digunakan dalam perpipaan industri *oil & gas* adalah API 5L, baja API (*American Petroleum Institute*) 5L tersedia dalam berbagai grade, grade tersebut mempengaruhi kepada kekuatan mekanis dan komposisi kimianya (API, 2004). Pipa baja API 5L termasuk jenis pipa tanpa las (*Seamless pipe*) dan jenis pipa las (*welded pipe*). Jenis pipa API 5L ada beberapa yaitu A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X65, X70, X80, dan X100. Tabel 2.1 di bawah ini menampilkan yield strength dan mechanical strength dari berbagai jenis grade baja API 5L, dimana semakin tinggi gradenya, maka akan semakin tinggi pula nilai kekuatannya (Porter, 1982). Perbedaan karakteristik performa baja ini dapat disebabkan oleh sifat batas butir dan juga presipitasi karbon nitride (Gladman, 1974).

Tabel 2.1 Sifat mekanis dari berbagai baja API 5L

Grade	Yield Strength (Mpa)	Mechanical Strength (Mpa)
A25	172	310
A	207	331
B	241	414
X42	290	414
X46	317	434
X52	359	455
X56	386	490
X60	414	517
X65	448	531
X70	483	565
X80	551	620
X100	690	760

Pipa baja API 5L secara reguler dibuat dengan *longitudinal welding* (Arista, 2011), yang dilakukan menggunakan proses *sub merged arc welding*. Jenis baja ini adalah *High Strength Low Alloy (HSLA)* (Friegel, 2005), dimana sifat presipitasi dan juga suhu kelarutannya adalah faktor-faktor kendali utama dari kinerja



respon baja HSLA. Jenis baja ini diperlakukan *microalloyed* dengan elemen kimia seperti titanium, niobium, vanadium dan dimanufaktur dengan *Thermomechanically Controlled Rolling Process* (TMCP), untuk mengontrol precipitation strengthening dari presipitat Nb carbonitride ketika rolling, colling dan coiling (Gladman, 1997).

Dalam proses produksinya, baja tersebut di *hot rolled* pada temperatur tinggi ketika memiliki struktur kristal *austenite* (γ) yang diikuti dengan pendinginan yang relatif cepat (Wang, 1999). Selama pendinginan cepat, *austenite* sebagian berubah menjadi *proeutectoid ferrite* (α) dan *austenite* (γ) yang tersisa berubah menjadi *pearlite*, yang menyebabkan struktur mikronya menjadi *proeutectoid* ditambah *pearlite*. Pearlite terdiri dari *pearlitic ferrite* dan *cementite*. Karakteristik baja ini lebih lanjut diatur dalam ASTM A53.



Gambar 2.1 Pipa Baja API 5L (ASTM A53) grade B

Dalam penelitian ini, material pipa yang digunakan yaitu baja karbon rendah API 5L grade B. Dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada tabel berikut.



Tabel 2.2 Komposisi Baja API 5L *grade* B berdasarkan Sertifikat

Elemen	Kadar (%)
Carbon	0,21
Mangan	0,45
Phospor	0,013
Sulfur	0,01
Silicon	0,23
Cromium	0,033
Nikel	0,018
Aluminium	0,001
Tembaga	0,03
Molibdenum	0,01

(Certificate ASTM A53/API 5L Gr. B, 2017)

Pipa baja API 5L banyak digunakan pada industri minyak dan gas baik onshore maupun offshore. Maksud dari API 5L *grade* B yaitu :

- API : American Petroleum Institute
- 5 : Seri yang digunakan untuk *Turbular Goods* (ex: *Casting, Pipeline, Tubing*)
- L : Line Pipe
- B : Grade yang berhubungan dengan sifat mekanik dan komposisi kimia material

2.3 Korosi

Korosi didefinisikan sebagai suatu proses degradasi dari material yang diakibatkan oleh reaksi kimia dengan material lainnya dan lingkungan (Jones, 1992). Akibat adanya reaksi korosi, suatu material akan mengalami perubahan sifat ke arah yang lebih rendah atau dapat dikatakan kemampuan dari material tersebut akan berkurang. Peristiwa korosi dapat dipandang sebagai suatu peristiwa atau reaksi senyawa kembali ke bentuk asalnya atau bisa disebut sebagai kebalikan dari proses metalurgi ekstraksi (Pierre, 2008).

Peristiwa korosi terjadi akibat adanya reaksi kimia dan elektrokimia. Namun, untuk terjadinya peristiwa korosi terdapat beberapa elemen utama yang harus dipenuhi agar reaksi tersebut



bisa berlangsung (Fontana, 1986). Elemen-elemen utama tersebut adalah sebagai berikut :

a. Anoda

Dalam suatu peristiwa korosi, suatu material akan bersifat sebagai anoda. Anoda adalah suatu bagian dari suatu reaksi yang akan mengalami oksidasi. Akibat reaksi oksidasi, suatu logam akan kehilangan elektron, dan senyawa logam tersebut ion berubah menjadi ion-ion bebas. Anoda biasanya dapat terkorosi dengan melepaskan elektron-elektron dari atom-atom logam netral untuk membentuk ion-ion yang bersangkutan. Ion-ion ini mungkin bereaksi membentuk hasil korosi yang tidak larut. Reaksi pada anoda dapat dituliskan dengan persamaan :



Dengan z adalah valensi logam dan umumnya $z = 1, 2$, atau 3.

b. Katoda

Dalam suatu peristiwa korosi, suatu lingkungan akan bersifat sebagai katoda. Katoda biasanya tidak mengalami korosi, walaupun mungkin menderita kerusakan dalam kondisi-kondisi tertentu. Reaksi yang terjadi pada katoda berupa reaksi reduksi. Akibat reaksi reduksi, lingkungan yang bersifat katoda akan membutuhkan elektron yang akan diambil dari anoda. Beberapa lingkungan yang dapat bersifat katoda adalah lingkungan air, atmosfer, gas, mineral acid, tanah, dan minyak. Reaksi pada katoda tergantung pada pH larutan yang bersangkutan, seperti :

1. $pH < 7 : H^{+} + e^{-} \rightarrow H \text{ (atom)}$
 $2H \rightarrow H_2 \text{ (gas)}$
2. $pH \leq 7 : 2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$

c. Reaksi antara Anoda dan Katoda

Adanya reaksi antara katoda dengan anoda merupakan suatu persyaratan yang sangat penting dalam terjadinya suatu proses korosi. Reaksi korosi hanya akan terjadi jika terdapat hubungan atau kontak langsung antara katoda dan anoda.



Akibat adanya hubungan tersebut, akan terjadi reaksi reduksi dan oksidasi yang berlangsung secara spontan. (Fajar, 2013)

d. Elektrolit

Untuk mendukung suatu reaksi reduksi dan oksidasi dan melengkapi sirkuit elektrik, antara anoda dan katoda harus dilengkapi dengan elektrolit. Elektrolit menghantarkan listrik karena mengandung ion-ion yang mampu menghantarkan *elektroquivalen force* sehingga reaksi dapat berlangsung. Elektrolit merupakan larutan yang mempunyai sifat menghantarkan listrik. Elektrolit dapat berupa larutan asam, basa, dan larutan garam. Larutan elektrolit mempunyai peranan penting dalam korosi logam karena larutan ini dapat menjadikan kontak listrik antara anoda dan katoda.

Keempat elemen diatas sangat berperan penting dalam korosi. Sehingga mekanisme korosi yang terjadi pada baja yang berada didalam suatu larutan berawal dari teroksidasinya suatu logam. Logam yang teroksidasi akan melepaskan elektronnya ke elektrolit, untuk menyetimbangkan muatan pada logam itu sendiri, logam akan melepaskan ion yang bermuatan positif yang akan berikatan dengan ion bermuatan negatif dari elektrolit sehingga membentuk suatu endapan yang melekat pada permukaan logam itu sendiri yang kemudian disebut dengan karat. Larutan akan bertindak sebagai katoda dengan reaksi yang umum terjadi adalah pelepasan H_2 dan reduksi O_2 akibat ion H^+ dan H_2O yang tereduksi. Reaksi yang terjadi di permukaan logam ini akan menyebabkan pengelupasan akibat pelarutan logam kedalam larutan secara berulangulang hingga akhirnya logam akan kehilangan massanya. (Pierre R. Roberge, 2000)

2.4 Jenis Korosi

Korosi memiliki berbagai macam bentuk. Setiap bentuk korosi memiliki karakteristik dan mekanisme yang berbeda-beda. Jenis-jenis korosi adalah sebagai berikut (Denny A, 1997).



1. Korosi Seragam (*Uniform Corrosion*)

Korosi sejenis merupakan jenis korosi dimana korosi terjadi secara menyeluruh dipermukaan. Jenis korosi ini mudah diprediksi, karena kecepatan atau laju korosi di setiap permukaan adalah sama. Pada umumnya, uniform corrosion dicegah dengan melapisi permukaan seperti coating. Tujuannya ialah untuk mengurangi interaksi logam dengan lingkungannya.

2. Korosi Logam Tak Sejenis (*Galvanic Corrosion*)

Merupakan bentuk korosi dimana korosi terjadi jika dua atau lebih logam yang berbeda tersambung melalui elektrolit sehingga salah satu dari logam tersebut akan terserang korosi sedangkan logam yang lainnya terlindungi dari korosi

3. Korosi Celah (*Crevice Corrosion*)

Merupakan bentuk korosi dimana korosi terjadi ketika terdapat celah akibat penggabungan atau penyatuan dua logam yang sama memiliki kadar oksigen berbeda dengan area luarnya. Korosi ini umumnya terjadi pada celah-celah sambungan seperti pada ulir.

4. Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*)

Pitting corrosion atau korosi sumuran merupakan korosi yang menyerang logam dengan penetrasi yang cepat pada luas permukaan yang sempit. Serangan korosi ini lebih berbahaya dibanding dengan serangan akibat korosi merata. Korosi ini sulit diketahui awal terjadinya, karena berlangsung dalam waktu relative singkat. Korosi jenis ini sangat berbahaya karena pada bagian permukaan hanya lubang kecil, sedangkan pada bagian dalamnya terjadi proses korosi membentuk “sumur” yang tidak tampak.

5. Retak Pengaruh Lingkungan (*Environmentally Included Cracking*)

Merupakan bentuk korosi dimana korosi terjadi akibat adanya beban tarik atau beban fatigue yang berulang-ulang dan mengakibatkan timbulnya crack yang menjalar panjang.



Crack tersebut memiliki 3 bentuk yang tergantung dari jenis EIC. Bentuk-bentuk tersebut antara lain :

1.1 Kerusakan Akibat Tegangan Tarik (*Corrosion Cracking*)

Bentuk korosi dimana korosi terjadi akibat adanya tegangan akibat beban tarik pada suatu logam di lingkungan korosif. Hal ini sewaktu-waktu akan menyebabkan material tersebut akan terkena korosi pada satu titik yang menyebabkan crack yang menjalar dan diawali di bagian titik yang terkena korosi.

5.2 Kerusakan Akibat Beban Fatigue (*Corrosion Fatigue Cracking*)

Bentuk korosi dimana korosi terjadi karena adanya tegangan akibat beban fatigue pada suatu material di lingkungan korosif. Hal ini sewaktu-waktu akan menyebabkan material tersebut akan terkena korosi pada satu titik yang menyebabkan crack yang menjalar dan diawali di bagian titik yang terkena korosi.

5.3 Kerusakan Akibat Hidrogen (*Hydrogen Induced Cracking*)

Bentuk korosi dimana korosi terjadi karena adanya tegangan internal pada suatu material karena adanya molekul-molekul gas hidrogen yang berdifusi ke dalam struktur atom logam.

6 Korosi Batas Butir (*Intergranular Corrosion*)

Merupakan bentuk korosi yang biasanya dialami oleh stainless steel atau alloy dimana korosi terjadi pada sekitar batas butir, hal ini akan terjadi crack yang menjalar sepanjang batas butir. Hal tersebut terjadi karena chrome pada sekitar batas butir membentuk presipitat chromium karbida di batas butir. Terbentuknya presipitat chromium karbida terjadi pada temperatur antara 425°C - 815°C.



7 Dealloying

Merupakan bentuk korosi dimana korosi terjadi pada salah satu logam dalam sebuah paduan atau alloy. Misalkan, pada Cu-Zn di lingkungan korosif Zn akan terkorosi menurut deret volta. Akibatnya, Zn akan berkurang jumlahnya dalam paduan dan menyebabkan sifat mekanis yang dihasilkan Zn pada material alloy tersebut akan menurun.

8 Erosion-Corrosional Fretting

Merupakan bentuk korosi dimana korosi terjadi karena fluida korosif yang mengalir, baik fluida liquid (Erosion Corrosion) maupun vapor (Fretting Corrosion) dengan kecepatan tinggi. Karena kecepatan tinggi dari fluida korosif yang mengalir, lapisan proteksi korosif akan tererosi dan menghilang. Oleh sebab itu, kemungkinan terjadinya korosi semakin besar. Korosi jenis ini umumnya terjadi pada bagian internal pipa, dimana fluida gas mengalir dengan tekanan tinggi. Untuk itu bagian internal pipa sebaiknya diberikan coating internal.

2.5 Laju Korosi

Laju korosi didefinisikan sebagai banyaknya logam yang dilepas tiap satuan waktu pada permukaan tertentu (Utoyo, 2000). Laju korosi secara khusus dinyatakan dengan satuan *millimeters per year* (mmpy). Satu *mils* adalah setara dengan 0,001 inchi. Laju korosi dapat ditentukan dengan berbagai cara, diantaranya dengan ekstrapolasi kurva tafel. Pada tabel berikut dapat dilihat hubungan laju korosi dengan ketahanan korosinya (relatif).

$$mmpy = \frac{87600 \cdot W}{D \cdot A \cdot T}$$

Dimana :

W = Berat yang hilang (mg)

D = Densitas dari sampel uji yang digunakan (g/cm^3)

A = Luas area dari sampel uji yang digunakan (cm^2)

T = Waktu ekspos (jam)



Tabel 2.3 Tabel hubungan laju korosi dan ketahanan korosi

Ketahanan Korosi Relatif	Laju Korosi				
	mpy	mm/yr	$\mu\text{m/yr}$	nm/yr	pm/yr
Sangat Baik	<1	<0,02	<25	<2	<1
Baik	1-5	0,02-0,1	25-100	2-10	1-5
Cukup	5-20	0,1-0,5	100-500	10-50	20-50
Kurang	20-50	0,5-1	500-1000	50-150	20-50
Buruk	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200

2.6 Faktor yang Mempengaruhi Korosi

Korosi terjadi dikarenakan dipengaruhi oleh sifat dari kedua logam atau paduan dan lingkungannya. Laju korosi pada lingkungan netral normalnya adalah 1 mpy atau kurang (Halimatuda, 2003). Umumnya problem korosi disebabkan oleh air, tetapi ada beberapa faktor selain air yang dapat mempengaruhi laju korosi, diantaranya :

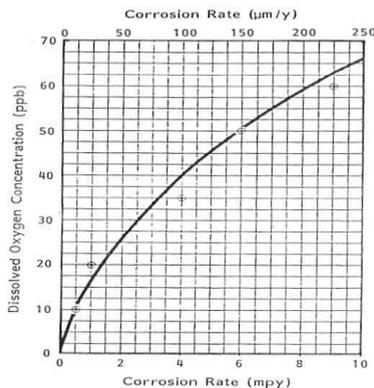
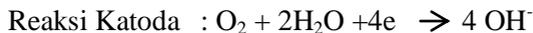
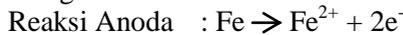
1. Faktor Temperatur

Temperatur mempunyai pengaruh yang bervariasi terhadap adanya korosi. Pada temperatur kamar laju korosi relatif rendah namun dapat meningkatkan kondensasi lapisan film pada permukaan yang berakibat meningkatkan terjadinya korosi. Peningkatan temperatur akan menurunkan laju korosi dengan adanya proses pengeringan pada permukaan. Namun adanya kombinasi antara nilai kelembaban dan temperatur tinggi serta diikuti oleh adanya polutan, maka akan meningkatkan laju korosi. Pada lingkungan berair (*aqueous*), temperatur mempengaruhi laju korosi, temperatur permukaan, heat flux, dan konsentrasi permukaan yang terkait serta gradien transfer kimia. (Pierre R. Roberge, 2000)

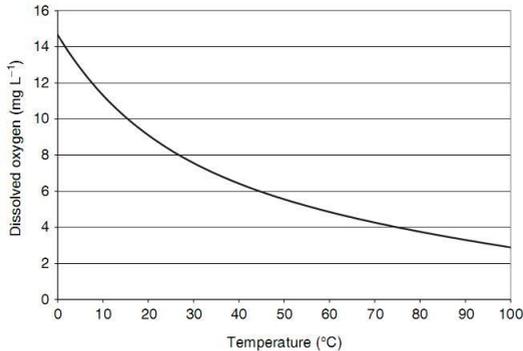


2. Faktor Gas Terlarut

- a. Oksigen (O_2) merupakan oksidator kuat sehingga akan meningkatkan potensial korosi logam di lingkungan air (fluida) yang mengandung oksigen terlarut. Adanya oksigen yang terlarut akan menyebabkan korosi pada metal seperti laju korosi pada mild steel alloy akan bertambah dengan meningkatnya kandungan oksigen. Kelarutan oksigen sendiri dipengaruhi oleh suhu dari air atau pelarut. Semakin tinggi suhu air atau pelarut, maka makin rendah kelarutan oksigen. Selain itu, pada air yang mengandung garam, kandungan oksigen terlarut juga dipengaruhi oleh kadar garam-garam yang terlarut (Jones, 1992). Pengaruh kelarutan oksigen terhadap laju korosi digambarkan pada gambar 2.2. Serta hubungan antara konsentrasi oksigen terlarut terhadap temperatur digambarkan pada gambar 2.3. Reaksi korosi secara umum pada besi terjadi karena adanya kelarutan oksigen sebagai berikut :

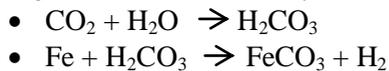


Gambar 2.2 Pengaruh kelarutan oksigen terhadap laju korosi (Jones, 1992)



Gambar 2.3 Hubungan konsentrasi oksigen terlarut terhadap temperatur (Jones, 1992)

- b. Karbondioksida (CO₂), jika karbondioksida dilarutkan dalam air maka akan terbentuk asam karbonat (H₂CO₃) yang dapat menurunkan pH air dan meningkatkan korosifitas. Biasanya bentuk korosinya berupa pitting yang secara umum reaksinya adalah :



FeCO₃ merupakan *corrosion product* yang dikenal sebagai *sweet corrosion*

3. Faktor Padatan Terlarut

- a. Klorida (Cl⁻), klorida menyerang lapisan mild steel dan lapisan stainless steel. Padatan ini menyebabkan terjadinya pitting, crevice corrosion, dan juga dapat menyebabkan pecahnya paduan. Klorida biasanya ditemukan pada campuran minyak dan air dalam konsentrasi tinggi yang akan menyebabkan proses korosi. Proses korosi juga dapat disebabkan oleh kenaikan konduktivitas larutan garam, dimana larutan garam yang lebih konduktif, laju korosinya juga akan lebih tinggi.
- b. Karbonat (CO₃), kalsium karbonat sering digunakan sebagai pengontrol korosi dimana film karbonat diendapkan sebagai lapisan pelindung permukaan logam, tetapi dalam produksi minyak hal ini cenderung menimbulkan masalah scale.



- c. Sulfat (SO_4), ion sulfat ini biasanya terdapat dalam minyak. Dalam air, ion sulfat juga ditemukan dalam konsentrasi yang cukup tinggi dan bersifat kontaminan, dan diperoleh bakteri SRB sulfat diubah menjadi sulfida yang korosif.

4. Faktor pH

pH pada lingkungan merupakan derajat keasaman dari lingkungan yang mengindikasikan konsentrasi H^+ dalam lingkungan tersebut. Perubahan pH lingkungan akan berpengaruh kepada laju korosi baja dalam lingkungan (Videm, 1987). Semakin rendah pH ($\text{pH} < 4$) maka kemungkinan baja untuk terkorosi semakin besar karena baja terurai menjadi ion saat berada di lingkungan asam dan pH akan menurun ketika baja kontak langsung dengan larutan. Sedangkan pada daerah pH 4-10, laju korosi tidak tergantung dari pH, namun bergantung pada kecepatan difusi oksigen ke permukaan logam. Sedangkan apabila $\text{pH} > 10$, laju korosi akan berkurang karena baja membentuk lapisan pasif di permukaannya. Peningkatan laju korosi akan terjadi pada pH yang sangat rendah, laju korosi tidak tergantung pH pada range pH netral, laju korosi akan menurun dengan peningkatan pH (ASM Handbook Volume 13, 2003).

2.6.1 Korosi pada Asam Sulfat (H_2SO_4)

Reaksi korosi yang terjadi pada H_2SO_4 dengan besi menghasilkan besi (II) sulfat dengan hidrogen. Reaksi yang terjadi selama proses korosi dalam media asam sulfat (H_2SO_4) adalah sebagai berikut :



2.7 Korosi pada Baja Karbon

Baja karbon merupakan baja paling banyak digunakan untuk material dalam dunia teknik. Walaupun terdapat keterbatasan terhadap ketahanan korosi, baja karbon banyak digunakan untuk aplikasi maritim, nuklir, proses kimia, transportasi, industri perminyakan, *refining*, pipa saluran, kontruksi pertambangan dan peralatan proses logam. Baja karbon rendah memiliki kadar



karbon yang rendah sekitar 0,05% - 1% dan biasanya banyak digunakan untuk aplikasi pipa saluran air. Baja karbon rendah memiliki elemen paduan lain, sekitar 2% yang sebagian besar meningkatkan sifat mekanisnya. Baja karbon rendah relatif murah, namun kualitas kekuatan dan kekerasannya bisa didapat melalui variasi kandungan karbon, unsur paduan, dan perlakuan panas yang diberikan.

Namun, baja terdiri dari beberapa fasa dan terdapat ketidakhomogenan pada permukaannya sehingga menyebabkan lokal sel elektrokimia. Hal tersebut menyebabkan rendahnya ketahanan korosi dari baja karena reduksi katodik mudah terjadi sehingga menyebabkan *porous* sebagai produk korosi dan tidak terbentuk produk sampingan seperti lapisan pasif (*Pierre R. Roberge, 2000*). Penambahan elemen paduan seperti Cu, Ni, Si dan Cr pada baja karbon rendah menunjukkan pengaruh terhadap korosi. Unsur-unsur tersebut dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Sedangkan penambahan unsur Si, Ti, S, Se dan C akan menurunkan ketahanan terhadap korosi (*ASM Handbook Volume 13, 2003*).

Produk korosi yang dihasilkan pada baja antara lain:

- $2Fe + 2H_2O + O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_2$
- $2Fe(OH)_2 + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3$

2.8 Perlindungan terhadap Korosi

Korosi merupakan proses alami yang tidak dapat dihindari, tetapi korosi itu sendiri harus dikontrol dengan pengendalian dan monitoring agar tidak menimbulkan dampak yang negative. Pengendalian korosi itu sendiri dengan cara mengatur terjadinya laju korosi. Metode perlindungan korosi dapat dibagi-bagi menjadi beberapa pendekatan, antara lain termodinamika (diagram *pourbaix*), kinetika (proteksi katodik), lapisan pelindung (proteksi anodik, *coating*, dan inhibitor), desain struktural, control lingkungan, dan *metallurgical design*. Metode-metode yang dapat digunakan untuk perlindungan suatu material tersebut disesuaikan dengan jenis, karakteristik, dan aplikasi material tersebut, kondisi lingkungan, biaya, ketersediaan, dan efektifitas serta efisiensi metode perlindungan tersebut untuk material dan kondisi



lingkungannya. Pada logam, perlindungan preventif yang biasa dan banyak digunakan karena pertimbangan-pertimbangan diatas antara lain proteksi katodik, *coating*, pemilihan material dan inhibitor (ASM International, 1992).

2.8.1 Proteksi Katodik dan Anodik

Proteksi katodik adalah sistem perlindungan permukaan logam dengan cara melakukan arus searah yang memadai ke permukaan logam dan mengkonversikan semua daerah anoda di permukaan logam menjadi daerah katodik. Sistem ini hanya efektif untuk sistem-sistem yang terbenam dalam air atau dalam tanah. Proteksi katodik biasanya digunakan untuk kapal laut, sebagai pengganti *coating*. Selain itu proteksi katodik dan anodik berhasil mengendalikan laju korosi untuk struktur pinggir pantai, instalasi pipa, dan tangka bawah tanah atau laut dan sebagainya.

Mekanisme proteksi katodik dan anodik :

1. Arus Tanding

Arus tanding merupakan suatu metode perlindungan logam dengan cara memberikan arus searah (DC) dan dari luar struktur (*rectifier*). Prinsip dari penggunaan metode ini adalah saat pemberian arus searah dengan besar arus dan tegangan tertentu kepada anoda, maka pemberian akan menjadi suplai electron kepada katoda. Suplai electron tidak didapat dari anoda namun suplai dari luar. Anoda ini akan mencegah terjadi terlarutnya logam katoda menjadi ion-ionnya. Anoda juga diperlukan dalam penggunaan metode ini dan biasanya anoda yang digunakan dalam sistem proteksi ini adalah logam inert seperti karbon, high silicon cast iron, platinum coated metal, lead silver, dll. Terdapat beberapa keuntungan dan kelemahan dalam penggunaan proteksi katodik ini.

Beberapa keuntungannya yaitu :

- a. Memiliki driving voltage yang besar sehingga efektif dalam melindungi struktur yang besar.
- b. Kontrol tegangan dan arus yang fleksibel.
- c. Dapat diterapkan pada struktur tanpa coating.



Beberapa kelemahan pada metode ini adalah :

- a. Kemungkinan terjadi interaksi dengan struktur lain.
- b. Sangat bergantung dari keberadaan sumber arus dari luar.
- c. Memerlukan maintenance, monitoring, dan inspeksi yang cukup rumit dan rutin.
- d. Gangguan pada anoda akan mempengaruhi kinerja.

2. Anoda Korban

Anoda korban merupakan suatu sistem proteksi katodik dengan memperlakukan logam yang akan diproteksi secara keseluruhan sebagai katoda. Prinsip proteksi ini sama dengan prinsip korosi galvanic dimana logam yang dilindungi harus tidak lebih reaktif dari logam yang akan dikorbankan atau untuk melindunginya berdasarkan deret galvanik. Kereaktifan logam ini berdasarkan nilai potensial dari logam-logam tersebut. Material anoda korban harus lebih aktif.

Banyak logam yang dapat dipakai dalam sistem proteksi anoda korban namun material yang sering dipakai sebagai anoda korban terutama pada industry minyak dan gas seperti pipa, *vessel*, dan fasilitas-fasilitas lainnya adalah logam seng (Zn), Aluminium (Al), dan Magnesium (Mg). Masing-masing logam ini memiliki keistimewaan terutama pada penggunaannya. Pada logam Zn biasanya dipakai untuk daerah perairan air payau seperti sungai, danau, bendungan, dll. Untuk logam Al sering dipakai untuk melindungi peralatan-peralatan pada daerah yang mengandung kadar Cl⁻ yang tinggi seperti pada air laut, sedangkan untuk logam Mg biasa digunakan untuk melindungi peralatan-peralatan di dalam tanah.

Penggunaan dari anoda korban harus selalu dimonitor dan diperhitungkan karena material yang akan jadi dikorbankan nantinya habis sesuai perhitungan luasan yang akan dilindungi dalam jangka waktu tertentu. Terdapat beberapa keuntungan dalam penggunaan metode ini, antara lain :



- a. Tidak memerlukan sumber daya eksternal sehingga metode ini dapat digunakan untuk daerah terpencil.
- b. Biaya instalasi relative rendah.
- c. Perawatan yang dibutuhkan cukup sederhana.
- d. Kemungkinan terjadinya over proteksi kecil.
- e. Tidak terdapat bahaya interferensi
- f. Distribusi arus merata.

Kelemahan dari penggunaan anoda korban antara lain :

- a. Terdapat batasan luasan proteksi.
- b. Tidak terlalu efektif bila digunakan untuk lingkungan resistivitas tinggi.
- c. Membutuhkan jumlah yang besar untuk pemakaian struktur yang besar, seperti pada pipa-pipa berdiameter besar.

Syarat material yang dapat digunakan sebagai anoda korban adalah :

- a. Potensial korosi material anoda harus lebih negatif.
- b. Polarisasi anoda korban harus cukup rendah.
- c. Efisiensi material yang digunakan sebagai anoda harus tinggi.

2.8.2 Coating

Salah satu metode pengendalian korosi yang lain ialah dengan cara memberi lapisan perlindungan (*coating protection*). Proteksi lapisan yang lazim digunakan pada jaringan pipa adalah eksternal pelapisan, yang sering kali dikombinasi dengan proteksi katodik. Untuk korosi bagian dalam pipa (internal korosi) pengendaliannya lebih sukar, apabila terjadi kebocoran/kegagalan umumnya lebih merata sepanjang jaringan yang berhubungan dengan korosi bagian luar. Fungsi dari lapisan tersebut adalah untuk mencegah logam dari kontak langsung dengan elektrolit dan lingkungan sehingga reaksi logam dan lingkungan terhambat.

Fungsi lapisan *coating* :

- a. Lapisan primer merupakan lapisan utama yang berkontak langsung dengan logam yang akan dilindungi dan bersifat anti-*corrosive*. Sifat :



- a. Adhesi pada permukaan logam harus kuat.
 - b. Daya inhibisi inhibitor.
 - c. Daya sacrificial.
- Fungsi utama lapisan primer :
- Inhibisi, menghambat terjadinya proses korosi elektrokimia.
 - Barrier, mencegah kandungan air dan oksigen mencapai permukaan baja.
 - Sacrificial, pigmen yang mengandung logam lebih aktif akan terkorosi menggantikan logam induk (baja).
- b. Lapisan *intermediate* merupakan lapisan yang berada diantara atau setelah lapisan primer yang bertujuan untuk mempertebal.
 - a. Menambah ketebalan.
 - b. Ketahanan kimia.
 - c. Adehisi antara primer dan *topcoat*.
 - c. *Topcoat* (luar) adalah lapisan paling luar selain melindungi juga sebagai estetika.
 - a. Ketahanan cuaca dan kimia.
 - b. Memberikan warna dan kilap.
 - c. Mencegah jamur.

Pelapisan biasanya dimaksudkan untuk memberikan suatu lapisan padat dan merata sebagai bahan isolator atau penghambat aliran listrik diseluruh permukaan logam yang dilindungi. (ASTM D1647, 1996). Secara umum, coating dibagi menjadi tiga jenis (ASM International, 1992) :

1. Pelapisan logam : *electroplating, electroless-plating, hot dip galvanizing, pack cementation, cladding, thermal spraying*, dan *physical vapor deposition*.
2. Pelapisan organik : *barrier effect, sacrificial effect* dan *inhibition effect*.
3. Pelapisan anorganik : *anodizing, chromate filming, phosphate coating, nitriding*, dan lapisan pasif.



2.8.3 Pemilihan Material

Salah satu cara mengendalikan laju korosi yaitu dengan pemilihan material yang digunakan, hal tersebut juga disesuaikan dengan kondisi lingkungan aplikasi dari material tersebut. Hal yang harus dilakukan yaitu peninjauan terhadap lingkungan dimana material tersebut diaplikasikan. Dalam memilih material sebagai metode pengendalian laju korosi terdapat beberapa faktor, seperti faktor ekonomi, sifat dari material, lingkungan dan lainnya. Dalam hal ini faktor-faktor tersebut ditujukan agar mendapatkan penggunaan material secara efektif dan efisien.

2.8.4 Inhibitor Korosi

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya korosi adalah dengan penggunaan inhibitor korosi. Secara umum suatu inhibitor merupakan suatu zat kimia yang dapat menghambat atau memperlambat suatu reaksi kimia. Secara khusus, inhibitor korosi merupakan suatu zat kimia yang bila ditambahkan kedalam suatu lingkungan tertentu, dapat menurunkan laju penyerangan lingkungan itu terhadap suatu logam.

Sedangkan inhibitor korosi adalah suatu zat kimia yang bila ditambahkan ke dalam suatu lingkungan, dapat menurunkan laju penyerangan korosi lingkungan itu terhadap suatu logam. Mekanisme penghambatannya terkadang lebih dari satu jenis. Sejumlah inhibitor menghambat korosi melalui cara adsorpsi untuk membentuk suatu lapisan tipis yang tidak nampak dengan ketebalan beberapa molekul saja, ada pula yang karena pengaruh lingkungan membentuk endapan yang nampak dan melindungi logam dari serangan yang mengkorosi logamnya dan menghasilkan produk yang membentuk lapisan pasif. Ada pula yang menghilangkan konstituen yang agresif.

2.9 Inhibitor

2.9.1 Mekanisme Kerja Inhibitor

Adapun mekanisme kerja inhibitor secara umum dapat dibedakan sebagai berikut (Dalimunthe, 2000) :



1. Melalui pengaruh lingkungan (misal pH) menyebabkan inhibitor dapat mengendap dan selanjutnya teradsorpsi pada permukaan logam serta melindunginya terhadap korosi. Endapan yang terjadi cukup banyak, sehingga lapisan yang terjadi dapat teramati oleh mata.
2. Inhibitor lebih dulu mengkorosi logamnya, dan menghasilkan suatu zat kimia yang kemudian melalui peristiwa adsorpsi dari produk korosi tersebut membentuk suatu lapisan pasif pada permukaan logam.
3. Inhibitor teradsorpsi pada permukaan logam dan membentuk suatu lapisan tipis dengan ketebalan beberapa molekul inhibitor. Lapisan ini tidak dapat dilihat oleh mata biasa namun dapat menghambat penyerangan lingkungan terhadap logamnya.
4. Inhibitor menghilangkan kontituen yang agresif dari lingkungannya. Berdasarkan sifat korosi logam secara elektrokimia, inhibitor dapat mempengaruhi polarisasi anodik dan katodik. Bila suatu sel korosi dapat dianggap terdiri dari empat komponen yaitu : anoda, katoda, elektrolit dan penghantar elektronik. Maka inhibitor korosi memberikan kemungkinan menaikkan polarisasi anodic, atau menaikkan polarisasi katodik atau menaikkan tahanan listrik dari rangkaian melalui pembentukan endapan tipis pada permukaan logam. Mekanisme ini dapat diamati melalui suatu kurva polarisasi yang diperoleh secara eksperimental. Inhibitor bekerja memperlambat laju korosi dengan beberapa cara (Roberge, 2000) :
 1. Meningkatkan sifat polarisasi katodik dan anodik material.
 2. Mereduksi pergerakan atau difusi ionn ke permukaan logam.
 3. Meningkatkan tahanan listrik pada permukaan logam.

2.9.2 Klasifikasi Inhibitor

Berdasarkan fungsinya, inhibitor terbagi menjadi :

1. Inhibitor Anodik (Passivasi)

Seperti namanya inhibitor anodik dapat bekerja dengan menghambat terjadinya reaksi anodik. Inhibitor jenis ini



bekerja dengan mengubah sifat permukaan logam menjadi pasif. Terdapat dua jenis inhibitor anodik yaitu :

- *Oxidizing ion*, yang dapat membentuk perlindungan pada logam tanpa membutuhkan oksigen, contoh inhibitor jenis ini adalah nitrat, nitrit dan kromat.
- *Non-Oxidizing ion*, jenis inhibitor anodik yang membentuk lapisan pasif pada permukaan anoda dengan membutuhkan kehadiran oksigen seperti *phospat, tungsten, molybdate*. (Pierre R. Roberge, 2000)

Inhibitor jenis ini biasa digunakan pada aplikasi recirculation-cooling systems, rectifier dan cooling tower. Kelemahan dari jenis inhibitor ini adalah jumlah inhibitor yang terkandung dalam larutan harus terjaga dengan baik. Sebab jika kandungannya menurun dari batas akan membuat korosi menjadi semakin cepat terjadi, serta dapat membuat korosi sumuran (*pitting corrosion*). (Ismail N. Andijani, 2005).

2. Inhibitor Katodik

Inhibitor katodik bekerja dengan menghambat reaksi katodik suatu logam dan membentuk presipitat di wilayah katoda yang dapat meningkatkan impedansi permukaan sekaligus membatasi difusi pereduksi untuk melindungi logam tersebut. Karena reaksi anodik dan katodik berjalan setimbang, maka penghambatan reaksi katodik akan menyebabkan reaksi anodik (korosi logam) terhambat juga. Penambahan inhibitor katodik menyebabkan potensial korosi dan rapat arus korosi logam turun. Terdapat tiga jenis inhibitor katodik, yaitu :

1. Racun katoda, dapat menghambat reaksi evolusi hidrogen. Contohnya seperti sulfida, selenida, arsenat, dan antimonat.
2. Presipitat katoda, dapat mengendap membentuk oksida sebagai lapisan pelindung pada logam. Contohnya seperti kalsium, seng, dan magnesium.



3. Oxygen scavengers, yang dapat mengikat oksigen terlarut sehingga mencegah reaksi reduksi oksigen pada katoda. Contohnya seperti hidrasin, natrium sulfid, dan hidroksil amin HCl. (Pierre R. Roberge, 2000).

3. Inhibitor Presipitasi

Inhibitor presipitasi bekerja dengan membentuk presipitat di seluruh permukaan suatu logam yang berperan sebagai lapisan pelindung untuk menghambat reaksi anodik dan katodik logam tersebut secara tidak langsung. Contoh yang umum dari inhibitor ini adalah silikat dan *phospat*. Natrium silikat baik digunakan sebagai *water softeners* untuk mencegah terjadinya *rust water*. Namun, pemakaiannya sangat dipengaruhi pH dan *saturation index*. Selain itu *phospat* membutuhkan oksigen untuk meningkatkan efektivitas kerjanya. Silikat dan *phospat* sangat berguna pada sistem lingkungan dimana aditif yang bersifat racun tidak ada. (Nugroho Adhi, 2011).

4. Inhibitor Mudah Menguap

Inhibitor jenis ini bekerja pada ruangan tertutup dengan cara meniupkannya dari tempat dia diuapkan menuju ke lingkungan yang korosif. Inhibitor ini setelah menyentuh permukaan logam yang akan dilindungi nantinya terkondensasi menjadi garam dan memberikan ion yang bisa melindungi logam dari korosi. Kemampuan dan efektifitas dari inhibitor jenis ini tergantung dari kemampuan menguap campuran inhibitor tersebut. Untuk perlindungan yang cepat diperlukan inhibitor yang kemampuan uapnya tinggi. Namun untuk perlindungan yang lebih lambat namun untuk jangka panjang dibutuhkan inhibitor yang mampu uapnya rendah. (Pierre R. Roberge, 2000).

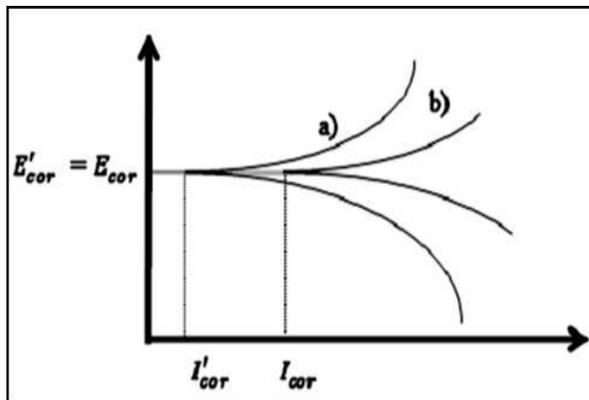
5. Green Inhibitor

Green inhibitor atau biasa disebut dengan inhibitor organik ini sangat diperlukan karena inhibitor jenis ini sangat menguntungkan dunia industri dikarenakan harganya yang



relatif tidak mahal dan pengaplikasiannya yang ramah lingkungan. Efektifitas inhibitor jenis ini sangat bergantung kepada komposisi kimia yang dimilikinya, struktur molekul, dan afinitasnya terhadap permukaan logam. Karena pembentukan lapisan merupakan proses adsorpsi, maka temperatur dan tekanan dalam sistem memegang peranan penting. Kebanyakan inhibitor yang efisien yang digunakan dalam industri adalah senyawa-senyawa organik yang mengandung hetero atom seperti P, O, N, S dan ikatan rangkap di dalam molekul-molekulnya yang memfasilitasi adsorpsi pada permukaan logam yang dilapisi. (Adhi Nugroho, 2011)

Inhibitor ini bekerja dengan membentuk senyawa kompleks yang mengendap pada permukaan logam sebagai lapisan pelindung yang bersifat hidrofobik yang dapat menghambat reaksi logam dengan lingkungannya. Reaksi yang terjadi berupa reaksi anodik, katodik, maupun keduanya. Hal ini bergantung dari reaksi pada permukaan logam dan potensial logam tersebut. Selain itu, juga dapat berfungsi untuk menetralkan konstituen korosif dan mengabsorpsi konstituen korosif tersebut. Penggunaan dengan konsentrasi yang tepat dapat mengoptimalkan perlindungan pada seluruh logam. (Pierre R. Roberge, 2000)



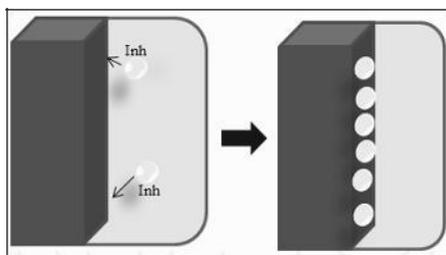
Gambar 2.4 Diagram Polarisasi Potensiostat:
Perilaku elektrokimia logam dalam larutan



yang mengandung inhibitor anodik dan katodik (a)
Perbandingan larutan yang sama tanpa inhibitor (b)

Pada gambar 2.4, menunjukkan tentang teori kurva polarisasi potensiostat, terlihat bahwa pengaruh larutan yang mengandung inhibitor organik pada logam menghadirkan perilaku anodik dan katodik. Setelah penambahan inhibitor, potensial korosi hampir sama, tetapi arus menurun dari I_{cor} menjadi I'_{cor} . (Dariva, Camila G., 2014)

Seperti pada gambar 2.5, mekanisme *green inhibitor*, ketika teradsorpsi pada permukaan logam dan membentuk lapisan protektor di atasnya.



Gambar 2.5 Ilustrasi mekanisme *green inhibitor*, berperan melalui adsorpsi inhibitor di atas permukaan logam, dimana “inh” merupakan molekul inhibitor

Green inhibitor akan teradsorpsi pada permukaan tergantung dari muatan inhibitor dan muatan logam untuk membentuk ikatan dari senyawa kompleks tersebut. Sebagai contoh kation inhibitor seperti amine atau anion inhibitor seperti sulfonat akan teradsorpsi tergantung muatan logam tersebut apakah negative atau positive. Efektifitas dari *green inhibitor* dipengaruhi oleh komposisi kimia, struktur molekul, dan gugus fungsi, ukuran, dan berat molekul, serta afinitas inhibitor terhadap logamnya. (Pierre R. Roberge, 2000). Efisiensi inhibitor organik bergantung pada :

- Struktur kimia, seperti ukuran molekul organik.
- Ikatan aromatik dan/atau konjugasi, seperti panjang rantai karbon.



- Tipe dan jumlah ikatan atom atau grup molekuler (baik π atau σ).
- Muatan permukaan logam dari tipe adsorpsi seperti kekuatan ikatan terhadap substrat logam.
- Kemampuan lapisan menjadi compact.
- Kapabilitas untuk membentuk ikatan kompleks dengan atom sebagai padatan antara kisi logam.
- Jenis larutan elektrolit. (B. Sanyal, 1981)

Inhibitor organik mampu untuk memunculkan efek katodik dan juga anodik. Mekanisme dari inhibitor jenis ini adalah dengan cara membentuk lapisan tipis yang bersifat hidrofobik sebagai hasil adsorpsi ion inhibitor oleh permukaan logam. Inhibitor organik ini membentuk lapisan protektif yang teradsorpsi di permukaan logam dan menjadi penghalang antara logam dan elektrolit sehingga reaksi reduksi dan oksidasi pada proses korosi dapat terhambat. Contoh dari inhibitor organik ini adalah gugus kimia yang bisa membentuk ikatan *co-ordinates* dengan logam seperti *amino* ($-\text{NH}_2$), *carboxyl* ($-\text{COOH}$), dan *phosphonate* ($-\text{PO}_3\text{H}_2$) (Andijani, 2005). Reaksi adsorpsi pada saat pembentukan lapisan yang protektif ini dipengaruhi oleh panas dan tekanan. Inhibitor organik akan teradsorpsi sesuai muatan ion-ion inhibitor dan muatan permukaan. Kekuatan dari ikatan adsorpsi merupakan faktor penting bagi inhibitor dalam menghambat korosi. Pada jenis inhibitor organik, terjadi proses adsorpsi pada permukaan logam untuk membentuk lapisan senyawa kompleks. Namun dalam adsorpsi terbagi menjadi 3 mekanisme yaitu (Roberge, 2008) :

1. *Physical adsorption*

Mekanisme ini terbentuk hasil dari interaksi elektrostatik antara inhibitor dengan permukaan logam. Logam yang diberi muatan positif akan mengikat inhibitor dengan muatan negatif. Begitu juga dengan sebaliknya. Ikatan ini terbentuk dengan cepat dan bersifat



bolak-balik namun mudah hilang atau rusak dari permukaan logam.

2. *Chemisorption*

Mekanisme ini terbentuk dari transfer atau membagi muatan antara molekul dari inhibitor dengan permukaan logam. Jenis adsorpsi ini sangat efektif karena sifatnya tidak bolak-balik namun dalam pembentukannya berjalan lebih lambat.

3. *Film Forming*

Mekanisme jenis ini dipengaruhi oleh struktur inhibitor, komposisi larutan sebagai media elektrolit, sifat bawaan dari logam, dan potensial elektrokimia pada lapisan antar muka logam-larutan. Adsorpsi inhibitor organik biasanya melibatkan minimal dua dari jenis adsorpsi di atas yang berjalan simultan. Sebagai contoh, adsorpsi inhibitor organik pada logam di lingkungan HCl adalah kombinasi *chemisorptions-physical adsorption* yang memberikan perlindungan fisik dan kimiawi (NACE, 1973).

2.10 Efisiensi Inhibisi

Menurut Sri Hermawan (2012), penentuan efisiensi inhibisi dapat dinyatakan dengan rumus pada persamaan berikut ini :

$$\text{Efisiensi Inhibisi} = \frac{V_{ko} - V_{ki}}{V_{ko}} \times 100\%$$

Dimana : V_{ko} = Laju reaksi korosi tanpa inhibitor

V_{ki} = Laju reaksi korosi dengan inhibitor

Biasanya, efisiensi inhibitor dapat meningkat dengan adanya penambahan konsentrasi inhibitorynya. Inhibitor adalah zat kimia yang bereaksi dengan permukaan logam atau lingkungan pada permukaan yang terekspos, memberikan proteksi pada permukaan. Inhibitor biasanya bekerja dengan cara menyerap inhibitor itu sendiri pada permukaan logam, kemudian inhibitor melindungi permukaan logam dengan membentuk lapisan (film).



Inhibitor terdistribusi normal dari larutan atau menyebar. Inhibitor dapat memperlambat korosi dengan cara :

- Menurunkan pergerakan atau difusi ion pada permukaan logam
- Meningkatkan anoda atau katoda polarisasi
- Meningkatkan ketahanan elektrik permukaan logam (Roberge, 2000)

2.11 Buah Jeruk Nipis

Buah jeruk merupakan salah satu jenis buah-buahan yang paling banyak digemari oleh masyarakat Indonesia. Karena bukan hanya buahnya yang sering dimanfaatkan, kulit serta air perasan buah jeruk juga mempunyai banyak manfaat. Oleh karena itu, tidak mengherankan jika perkembangan tanaman jeruk meningkat seiring kebutuhan masyarakat. Buah jeruk selalu tersedia pada sepanjang tahun, karena tanaman jeruk tidak mengenal musim yang berbunga khusus, dan dapat ditanam di mana saja, baik di dataran rendah maupun di dataran tinggi, tetapi hal yang mempengaruhi kualitas buah jeruk tergantung pada varietasnya. Walaupun populasi buah jeruk terus meningkat disetiap tahunnya, terbatasnya pengetahuan para petani dalam hal bercocok tanam jeruk yang benar dan adanya serangan penyakit CVPD(Citrus Vein Phloem Degeneration) pada tanaman jeruk menyebabkan banyak tanaman jeruk menjadi musnah.(AAK, 1994)

Jeruk terdiri dari berbagai varietas berdasarkan karakteristik (bentuk, sifat fisik buah, dan manfaat), jeruk yang dibudidayakan di Indonesia dapat dibagi menjadi 6 golongan besar, yaitu : Jeruk keprok (*Citrus nobilis L.*), jeruk siem (*Citrus microcarpa*), jeruk manis (*Citrus aurantium*), jeruk besar (*Citrus maximamus Herr.*), jeruk sayur atau bumbu yang terdiri atas jeruk purut dan jeruk nipis (*Citrus aurantifolia*), jeruk sambal (*Citrus hystrix ABC*) dan jeruk lainnya.(Soelarso, 1996)

Jeruk nipis merupakan tanaman yang berasal dari indonesia. Menurut sejarah, sentra utama asal jeruk nipis adalah Asia Tenggara. Akan tetapi, beberapa sumber menyatakan bahwa tanaman jeruk nipis berasal dari Birma Utara, Cina Selatan, India Utara, Himalaya dan Malaysia. Dan tanaman jeruk nipis masuk



ke Indonesia karena dibawa oleh orang Belanda.(Rukmana Rahmat, 2009)

2.11.1 Taksonomi dan Morfologi kulit Jeruk Nipis

Kedudukan tanaman jeruk nipis dalam sistematika tumbuh tumbuhan diklasifikasikan sebagai berikut (Rukmana Rahmat, 2009) :

- Kingdom : Plantae (tumbuh-tumbuhan)
- Divisi : Spermatophyta (tumbuhan berbiji)
- Subdivisi : Angiospermae (berbiji tertutup)
- Kelas : Dicotyledonae (biji berkeping dua)
- Ordo : Rutales
- Famili : Rutaceae
- Genus : Citrus
- Spesies : *Citrus Aurantifolia* Swingle

2.11.2 Kandungan Kulit Jeruk Nipis (*Citrus Aurantifolia*)

Kulit jeruk nipis (*Citrus aurantifolia*) adalah famili dari rutaceae. Kulit yang jarang untuk dikonsumsi tetapi banyak digunakan sebagai pelengkap masakan tertentu dan untuk menghilangkan bau amis pada ikan dan pada saat cuci piring. Hal itu disebabkan karena masih sangat sedikit masyarakat yang mengetahui kegunaan dan kandungan yang dimiliki oleh kulit jeruk nipis, sehingga setelah isinya digunakan kulit lebih sering dibuang oleh masyarakat. Kulit yang muda berwarna hijau yang lebih terang dan lebih muda dibandingkan dengan kulit jeruk nipis yang sudah tua warnanya sedikit lebih tua. Menurut penelitian sebelumnya, kulit jeruk nipis mengandung senyawa Flavonoid dengan konsentrasi yang tinggi daripada bagian lainnya yang dapat digunakan sebagai antioksidan.(Wulandari, 2013)

Flavonoid yang terdapat pada jeruk nipis dikenal sebagai pengeruk radikal bebas yang kuat, apalagi pada inflamasi. Sifat-sifat anti inflamasi dari Flavonoid yang terdapat pada jeruk nipis yaitu hesperidin, dan diosmin analog flavonnya, berdasarkan penghambatan mereka dari kegiatan mediator seperti prostaglandin, proinflamasi E2 dan F2 dan tromboksan A2. Dalam studi *in vitro* juga menunjukkan bahwa Flavonoid pada jeruk dapat menghambat reaksi yang dikatalisis oleh



siklooksigenase, lipooksigenase, dan fosfolipase A2. Flavonoid pada jeruk juga telah terbukti memiliki platelet anti perekat dan sifat anti agregasi. Studi epidemiologis telah menunjukkan hubungan terbalik antara kulit jeruk nipis dapat mengurangi resiko pengembangan penyakit kardiovaskular, aterosklerosis, dan peradangan. Flavonoid juga menunjukkan aktivitas antibakteri dan antivirus. (Caballero, 2016)

Flavonoid paling banyak ditemukan dalam ekstrak *Citrus aurantifolia* yang apigenin , rutin , quercetin , kaempferol dan nobiletin . fraksi *n* - heksan baik kulit dan daun menunjukkan aktivitas inhibisi *acetylcholinesterase* yang baik dengan IC (50) nilai-nilai dalam kisaran 91,4-107,4 mg mL⁻¹ .(Loizzo, 2012)

Flavonoid memiliki sifat oksidan sebagai penangkap radikal bebas karena mengandung gugus hidroksil. Karena sifatnya sebagai reduktor, Flavonoid dapat bertindak sebagai donor hydrogen terhadap radikal bebas. Senyawa ini banyak terdapat pada berbagai jenis buah-buahan dan sayuran salah satu diantaranya adalah pada kulit jeruk nipis. Antioksidan adalah zat yang dalam kadar rendah mampu menghambat laju oksidasi molekul target atau senyawa yang mempunyai struktur molekul yang dapat memberikan elektronnya dengan cuma-cuma kepada molekul radikal bebas tanpa terganggu sama sekali dan dapat memutus reaksi berantai dari radikal bebas. (Wulandari, 2013)

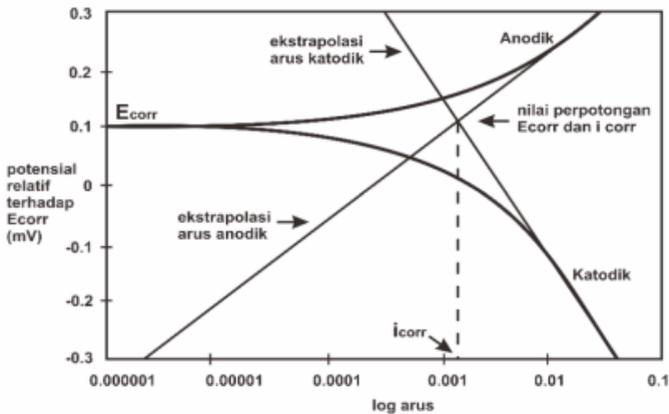
2.12 Pengujian Polarisasi Potensiodinamik

Polarisasi merupakan salah satu fenomena dimana terjadi penyimpangan potensial dari kondisi kesetimbangannya. Dengan metoda polarisasi, laju korosi dapat ditentukan oleh kerapatan arus yang timbul (*current density*) untuk menghasilkan suatu kurva polarisasi (tingkat perubahan potensial sebagai fungsi dari besarnya arus yang digunakan) untuk permukaan yang laju korosinya sedang ditentukan. Semakin tinggi kerapatan arus yang timbul, maka korosi akan semakin hebat begitu pula sebaliknya (Threthewey, 1991). Ketika potensial pada logam terpolarisasi menggunakan arus pada arah positif, maka hal ini disebut sebagai terpolarisasi secara anodik. Apabila potensial pada permukaan



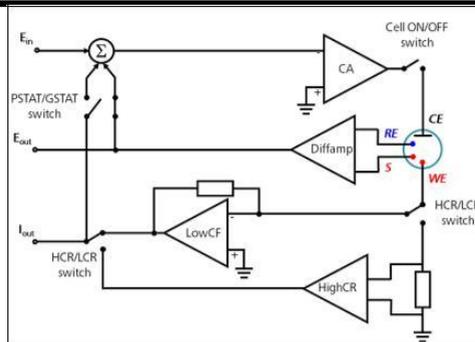
logam terpolarisasi menggunakan arus pada arah negatif, maka disebut terpolarisasi secara katodik.

Nilai polarisasi baik anodik maupun katodik dengan log i berupa satu garis lurus dengan kemiringan sama dengan konstanta tafel. Rapat arus sebanding dengan laju korosi, karena arus yang sama bila terkonsentrasi pada luas permukaan yang lebih kecil menghasilkan laju korosi yang lebih besar. Kinetika elektrokimia pada sebuah metal yang terkosi dapat dikarakteristikan dengan penentuan kurang lebih 3 parameter polarisasi seperti *Corrosion current density*, *corrosion potensial*, dan *Tafel Slopes*. Kemudian perilaku korosi dapat diperlihatkan oleh sebuah kurva polarisasi (E vs log i) pada gambar 2.6. (Rahman, 2016).



Gambar 2.6 Grafik Pengujian Polarisasi Potensiodinamik (Rahman, 2016).

Pada gambar 2.6 diatas merupakan contoh grafik pengujian polarisasi potensiodinamik. Laju korosi dapat dihitung secara otomatis dengan menggunakan software analisis maupun dengan metode manual yaitu dihitung dengan membuat garis linear pada kurva anodik dan katodik, kemudian dilihat perpotongannya dan didapatkan nilai i_{corr} . Kemudian, masukkan nilai tersebut kedalam rumus laju korosi untuk mengetahui nilai laju korosinya.



Gambar 2.7 Prinsip Kerja Potensiostat
(Autolab Application Note EC08, 2011)

Pada gambar 2.7 diatas telah digambarkan prinsip kerja potensiostat. Prinsip kerja potensiostat dengan menggunakan bantuan 3 elektroda diantaranya yaitu elektroda kerja, elektroda acuan dan elektroda bantu. Pasangan elektroda kerja dan elektroda acuan mengukur potensial sel, pada saat yang bersamaan elektroda kerja dan elektroda bantu mengukur arus korosi yang sedang terjadi.

2.13 Pengujian EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*)

EIS telah banyak digunakan secara luas dalam bidang elektrokimia seperti pelapisan material (*coating*), baterai, sel bahan bakar (*fuel cell*) dan lainnya. EIS (*Electrochemical Impedance Spectrometry*) adalah sebuah teknik analisis yang digunakan untuk mempelajari perilaku korosi yang terjadi pada suatu elektroda dengan mengamati sifat karakterisasinya (Rochliadi, 2002). Karakterisasi elektroda yang dimaksud adalah untuk menentukan ketahanan polarisasi (R_p), laju korosi (CR) dan mekanisme elektrokimia. Penggunaan metode ini berdasarkan model dari proses korosi oleh sirkuit elektrik. EIS bekerja berdasarkan respon terhadap sirkuit yang setara untuk *interface* elektroda/larutan. EIS digunakan untuk menentukan parameter kinetika elektrokimia berkaitan dengan unsur-unsur listrik seperti



tahanan, R , kapasitansi, C , dan induktansi, L . Tahanan listrik dalam EIS dinyatakan dengan impedansi (Z). Impedansi adalah ukuran kemampuan suatu rangkaian dalam menahan arus listrik. Dalam impedansi, sinyal potensial dan arus AC berada dalam fasa yang berbeda, dan nilainya dipengaruhi oleh frekuensi. Impedansi elektrokimia diukur melalui potensial AC yang diterapkan pada sel elektrokimia untuk mengukur arus dengan asumsi bahwa potensial yang dibangkitkan sinusoidal. (Nestor Perez, 2004) Impedansi dari sel elektrokimia, Z , ditentukan berdasarkan analogi dari hukum Ohm seperti di bawah ini. Dengan ω adalah frekuensi radial atau kecepatan sudut yang diterapkan (rad sec^{-1}).

2.14 Pengujian Weight Loss

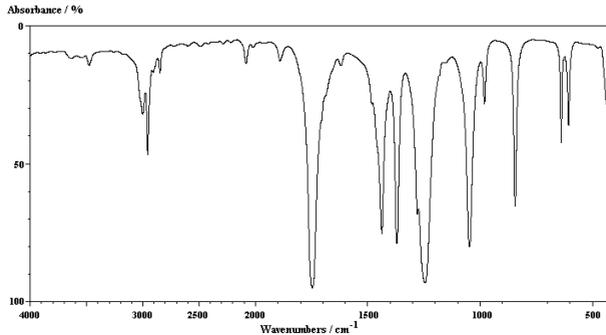
Metode yang paling umum untuk mengetahui laju korosi adalah dengan menggunakan metode kehilangan berat (weight loss) dengan menggunakan sampel (corrosion coupon) yang direndam ke dalam lingkungan korosi. Metode ini didasarkan pada perbedaan berat antara sebelum sampel dimasukkan ke dalam lingkungan korosi dan setelah sampel dimasukkan ke dalam lingkungan korosi. Pada umumnya sampel dapat berupa segi empat maupun dalam bentuk lingkaran. Preparasi sampel dilakukan untuk menghilangkan lapisan oksida yang menempel pada permukaan sampel. Preparasi dilakukan dengan menggunakan kertas amplas dengan beberapa grade. Setelah itu dilakukan perendaman pada lingkungan korosi sesuai dengan waktu yang telah direncanakan. Setelah proses perendaman *sampel* selesai, selanjutnya dapat dilakukan pembersihan dan penimbangan berat akhir sampel. Hasil pengurangan berat awal dan berat akhir yang kemudian digunakan untuk mengukur laju korosi. (Jones, 1996)

2.15 Pengujian FTIR (*Fourier Transformed Infra Red*)

Fourier Transformed Infrared (FTIR) merupakan salah satu metode spektroskopi infrared modern yang dilengkapi dengan teknik transformasi fourier yang digunakan untuk mendeteksi dan menganalisis suatu hasil dari spektrumnya. Spektrum infrared



yang dapat dihasilkan dari suatu senyawa adalah khas untuk masing-masing senyawa, seperti sebuah fingerprint untuk senyawa tersebut (Azzis, S. N. 2012).



Gambar 2.8 Contoh Spektra FTIR (Azzis S.N., 2012)

Prinsip kerja dari FTIR yaitu menggunakan prinsip interferometer, yang berarti sampel dilewati radiasi infrared, kemudian radiasi infrared diabsorpsi oleh sampel dan sebagian dilewatkan atau ditransmisikan. FTIR merupakan salah satu alat yang dipakai untuk mengidentifikasi senyawa, baik alami maupun buatan. Dalam FTIR, dua molekul senyawa dengan struktur kimia yang berbeda memiliki spektrum inframerah yang juga berbeda. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan jenis ikatan dan frekuensi vibrasi. Meskipun jenis ikatan sama, namun jenis senyawa berbeda, frekuensi vibrasi yang dihasilkan juga berbeda, sehingga spektrum inframerah pada FTIR merupakan sidik jari dari suatu molekul. Jika sinar inframerah dilewatkan melalui sampel senyawa organik, maka terdapat sejumlah frekuensi yang diserap dan ada yang diteruskan atau ditransmisikan. Serapan cahaya oleh molekul tergantung pada struktur elektronik dari molekul tersebut. (Prayogha, P. K.G., 2012)

Berdasarkan daerah bilangan gelombang, sinar infrared terbagi menjadi tiga daerah, yaitu daerah infrared dekat ($4.000-14.000\text{ cm}^{-1}$), daerah infrared pertengahan ($400-4000\text{ cm}^{-1}$), dan daerah infrared jauh ($10-400\text{ cm}^{-1}$). Daerah yang paling banyak digunakan untuk berbagai analisis molekul adalah daerah infrared



pertengahan ($400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$), karena daerah tersebut cocok untuk mempelajari energi vibrasi dalam molekul. Identifikasi suatu senyawa organik atau anorganik, baik dalam bentuk padat, cair, maupun gas dapat dideteksi melalui metode. (Prayogha, P. K.G., 2012)

Sampel yang dianalisis menggunakan FTIR akan menghasilkan sebuah spektrum. Spektrum tersebut terdiri dari berbagai puncak yang menunjukkan suatu gugus spesifik tertentu dari suatu senyawa pada frekuensi tertentu. Suatu senyawa yang memiliki struktur kimia yang berbeda, akan memiliki jenis ikatan dan frekuensi gugus fungsi yang berbeda. (Prayogha, P. K.G., 2012)

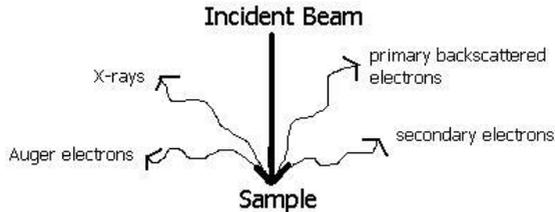
2.16 Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah sebuah alat mikroskop elektron yang didesain untuk mengamati permukaan sampel secara langsung. Analisa SEM dilakukan pada lembar katoda untuk mengetahui distribusi serbuk pada matriks, porositas dan kemampuan serbuk material aktif terhadap matriks. SEM digunakan untuk menganalisis permukaan pada sampel yang tebal. *Scanning Electron Microscope* (SEM) adalah sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk mengamati permukaan objek solid secara langsung. SEM memiliki perbesaran $10 - 3.000.000$ kali, *depth of field* $4 - 0.4\text{ mm}$ dan resolusi sebesar $1 - 10\text{ nm}$. Kombinasi dari perbesaran yang tinggi, *depth of field* yang besar, resolusi yang baik, kemampuan untuk mengetahui komposisi dan informasi kristalografi membuat SEM banyak digunakan untuk keperluan penelitian dan industri.

Ada beberapa sinyal yang penting yang dihasilkan oleh SEM. Dari pantulan inelastis didapatkan sinyal *secondary electron* dan karakteristik sinar X sedangkan dari pantulan elastis didapatkan sinyal *backscattered electron*. Perbedaan dari sinyal *secondary electron* dengan *backscattered electron* adalah *secondary electron* memberikan informasi topografi dari benda yang dianalisa, permukaan yang tinggi berwarna lebih cerah daripada permukaan yang rendah. Sedangkan *backscattered elektron* memberikan perbedaan berat molekul dari atom – atom yang menyusun permukaan, atom dengan berat molekul tinggi

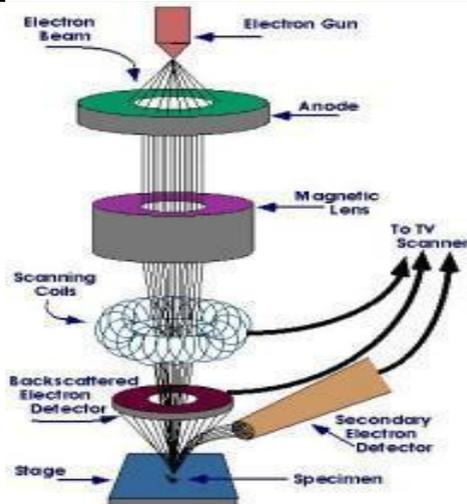


akan berwarna lebih cerah daripada atom dengan berat molekul rendah. Kedua sinyal inilah yang akan dideteksi oleh detektor dan dimunculkan dalam bentuk gambar pada monitor CRT.



Gambar 2.9 Interaksi Antara Elektron dengan Permukaan Sampel (Triwibowo, 2011)

SEM memiliki beberapa peralatan utama diantaranya penembak elektron, lensa magnetik, detektor, sampel holder, dan monitor CRT. Prinsip kerja dari SEM yaitu elektron gun menghasilkan elektron beam dari filamen. Elektron gun yang digunakan adalah tungsten hairpin gun dengan filamen berupa lilitan tungsten yang berfungsi sebagai katoda. Tegangan yang diberikan kepada lilitan mengakibatkan terjadinya pemanasan. Anoda kemudian akan membentuk gaya yang dapat menarik elektron menuju anoda. Lensa magnetik memfokuskan elektron menuju suatu titik pada permukaan sampel. Sinar elektron yang terfokus menyapu (*scanning*) keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil penyapuan. Ketika elektron mengenai sampel, maka akan terjadi hamburan elektron, baik *Secondary Electron* (SE) atau *Back Scattered Electron* (BSE) dari permukaan sampel dan akan dideteksi oleh detektor dan dimunculkan dalam bentuk gambar pada monitor CRT. Penjelasan prinsip kerja SEM dapat dilihat pada Gambar 2.10 dibawah ini :



Gambar 2.10 Skema Scanning Elektron Microscope (SEM) (Triwibowo, 2011)

2.17 Pengujian Sebelumnya

Menurut penelitian yang dilakukan oleh *R. Saratha, dkk* (2009) dengan judul penelitian “Investigation of Citrus Aurantifolia Leaves Extract as Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 1M HCL”. Efisiensi inhibisi dari ekstrak daun jeruk nipis pada laju korosi di baja ringan pada media 1M HCL dengan menggunakan pengujian polarisasi efisiensinya mencapai 97.15%.

Pada penelitian yang dilakukan oleh *K.C. Anjani* (2014) dengan judul penelitian “Inhibitory Action of Aqueous Citrus Aurantifolia Seed Extract on the Corrosion of Mild Steel in H₂SO₄ Solution”1M. Pada pengujian ini menggunakan metode *weight loss* dan dilakukan dengan variasi temperature 25, 50 dan 75°C. Hasil adsorpsi ekstrak biji jeruk nipis dengan menggunakan metode adsorpsi langmuir dan freundlich dengan hasil energy yang terserap hingga -20KJ/mol.

Selain pengujian diatas yang telah dilakukan , ada beberapa penelitian yang yang sudah dilakukan dengan menggunakan



inhibitor ekstrak yang berbahan dasar organik diantaranya dapat dilihat pada tabel 2.0 berikut :

Tabel 2.4 Penelitian Berbahan Dasar Organik

No	Peneliti	Logam	Media	Inhibitor	Metode	Metode Inhibisi
1	M. A. Quraishi, 2010	Mild Steel	HCL 1M dan 0.5 H ₂ SO ₄	Daun Kari	Weight loss, polarisasi, EIS	Langmuir adsorption isotherm
2	J. H. Potgieler, 2009	SS duplex 2205 dan 2507	HCl dan H ₂ SO ₄	Madu	Elektrokimia	Inhibitor Anodik
3	Hastya Anisa, 2016	Baja API 5L grade B	NaCl 3,5% pH 5	Daun Asam Jawa dan Kulit Melinjo	EIS, weight loss, polarisasi, adsorpsi langmuir, FTIR.	Langmuir adsorption isotherm
4	Dendra Ravelia, 2017	Baja AISI 1045	pH, Gas CO ₂	Inhibitor <i>Imidazole</i>	FTIR, polarisasi, EIS, SEM, weight loss, XRD	Langmuir adsorption isotherm, inhibitor anodik
5	E.I. Ating, 2010	Aluminium	HCL	Daun nanas	Weight loss, hydrogen evolution	Langmuir adsorption isotherm
6	K.C. Anjani, 2014	Mild Steel	H ₂ SO ₄ 1M	Biji kulit jeruk	Weight loss	Langmuir adsorption isotherm

Laporan Tugas Akhir
Departemen Teknik Mesin Industri

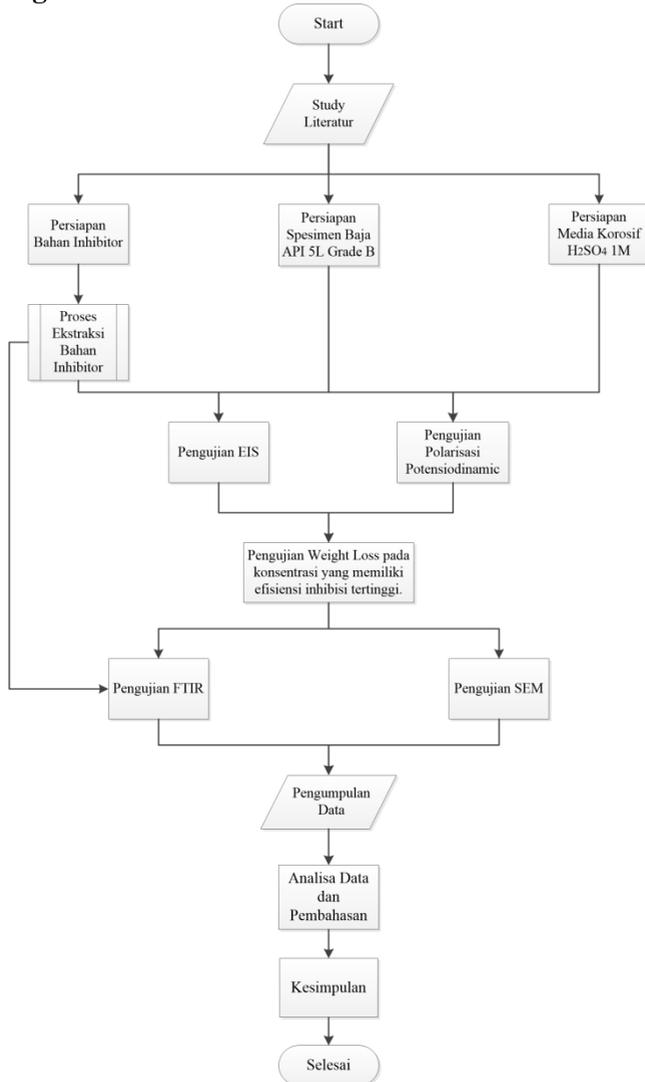


				nipis		
7.	Nouha, 2015	Carbon Steel	H ₂ SO ₄	Kulit Jeruk	EIS,SEM	Langmuir adsorptio n isoterm
8.	Etheram, 2011	Mild Steel	H ₂ SO ₄ 1M	Radish Seeds	EIS, polarisasi.	Temkin adsorptio n isoterm
9.	Maria, 2014	Mild Steel	HCL	Pectin	Weight loss, polarisasi, EIS, SEM,	Mixed inhibitor (katodik dan anodic)
1 0	Karim H Hassan, 2016	Mild Steel	H ₂ SO ₄	Daun jeruk manis	FTIR, SEM	Langmuir adsorptio n isoterm



BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



3.2 Metode Penelitian

Pada penelitian ini akan menggunakan beberapa metode penelitian berikut ini :

1. Study Literatur

Study literatur pada penelitian ini mengacu pada jurnal dan buku yang mempelajari tentang permasalahan korosi serta cara pencegahannya pada material baja API 5L Grade B (ASTM A53) pada media larutan H_2SO_4 , serta jurnal yang membahas tentang kandungan dari ekstrak kulit jeruk nipis yang nantinya dapat digunakan sebagai inhibitor untuk mencegah terjadinya korosi.

2. Eksperimental

Eksperimen yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain : Pengujian *Polarisasi Potensiodinamik*, Pengujian EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*), Pengujian *weight loss*, Pengujian FTIR (*Fourier Transform Infra Red*) dan Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*).

3.3 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Jangka sorong
2. Penggaris
3. Gunting
4. Blender
5. Wadah botol plastik
6. Timbangan digital
7. Kamera
8. Gelas ukur
9. Labu erlenmeyer
10. Pipet
11. Corong
12. Spatula
13. Benang
14. Ember
15. Kertas saring
16. Pipa PVC



17. Resin
18. Catalyst
19. Solder
20. Timah
21. Kertas amplas
22. Kabel
23. Oven/Pemanas
24. Multimeter
25. Alat pemotong baja
26. Alat pengujian EIS
27. Alat pengujian Polarisasi Potensiodinamic
28. Alat pengujian FTIR
29. Alat pengujian SEM

3.4 Bahan Penelitian

1. Material

Spesimen yang digunakan pada penelitian ini adalah baja API 5L (ASTM A53) *grade B* yang telah dipotong-potong menjadi ukuran 10mm x 10mm dengan tebal 6mm yang digunakan untuk pengujian polarisasi dan EIS. Kemudian ukuran 30mm x 30mm dengan tebal 6 mm yang digunakan untuk pengujian *weight loss*, FTIR dan SEM.

Tabel 3.1 Komposisi Kimia API 5L Grade B

<i>Element</i>	Max. (%)
<i>Carbon</i>	0.21
<i>Manganese</i>	0.45
<i>Phosporus</i>	0.013
<i>Sulfur</i>	0.01
<i>Silicon</i>	0.23

(*Certificate ASTM A53/API 5L Gr. B, 2017*)

2. Larutan Media Korosif

Larutan yang digunakan untuk media korosif pada penelitian ini adalah larutan H_2SO_4 1M yang dilarutkan dengan aquades melalui proses pengenceran.



3. Inhibitor

Inhibitor yang digunakan adalah kulit jeruk nipis dari daerah Surabaya yang diambil di soto Cak Har.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang digunakan dalam penelitian ini ada 3 jenis diantaranya yaitu : pengujian pengaruh konsentrasi inhibitor dan efisiensi dengan menggunakan pengujian polarisasi dan *weight loss* serta mekanisme inhibisi pada inhibitor kulit jeruk nipis dengan pengujian EIS. Pada penelitian ini dilakukan dengan beberapa variasi konsentrasi diantaranya 0 mg, 50 mg, 100 mg, 150 mg, 200 mg, 250 mg dengan larutan media korosif H_2SO_4 1M. Untuk mengetahui pengaruh konsentrasi inhibitor dan efisiensinya pada material baja dilakukan pengujian Polarisasi Potensiodinamik dan *weight loss*. Untuk mengetahui mekanisme inhibisi inhibitor dapat dilakukan dengan pengujian EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*). Selain itu, untuk mengetahui gugus fungsi dapat dilakukan dengan pengujian FTIR (*Fourier Transform Infra Red*). Serta untuk mengetahui morfologi pada permukaan spesimen dengan menggunakan pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*).

3.5.1 Preparasi Inhibitor

Proses pembuatan inhibitor berbahan dasar dari limbah kulit jeruk nipis yang digunakan untuk perlindungan dari korosi perlu melewati beberapa tahap proses ekstraksi. Ada banyak metode proses ekstraksi yang digunakan diantaranya : maserasi, perkolasi, soxhlet dan proses ekstraksi yang lain. Namun, proses ekstraksi pada penelitian ini menggunakan cara yang paling sederhana yaitu maserasi. Maserasi merupakan proses penyarian zat aktif yang dilakukan dengan cara merendam serbuk simplisia dalam cairan penyari selama minimal tiga hari pada temperatur kamar dan terlindung dari cahaya, cairan penyari akan masuk ke dalam sel melewati dinding sel. Isi sel akan larut karena adanya perbedaan konsentrasi antara larutan di dalam sel dengan di luar sel. Larutan yang konsentrasinya tinggi akan terdesak keluar dan



diganti oleh cairan penyari dengan konsentrasi rendah (proses difusi).

Kulit jeruk nipis yang telah didapat lalu dikuliti, dibersihkan bagian dalamnya dan kemudian dikeringkan di bawah panas matahari selama beberapa hari agar kulit benar-benar kering. Setelah dijemur di bawah panas matahari hingga kering kemudian di oven agar kulit jeruk nipis tidak ada kandungan airnya lagi. Kulit yang telah kering dijadikan serbuk dengan menggunakan blender/ mesin selep. Setelah itu, serbuk ditimbang sebanyak 200 gram yang dibungkus dengan kertas saring dan dimasukkan pada botol untuk dimaserasi dengan methanol hingga merendam seluruh bagian serbuk kulit jeruk nipis dan direndam selama 3 x 24 jam. Rendaman kulit jeruk nipis kemudian di saring dengan menggunakan kertas saring dan di biarkan menguap agar senyawa dari kulit jeruk nipis akan mengendap atau untuk mempersingkat waktu dapat menggunakan alat rotary evaporator untuk menguapkan methanol. Serbuk kulit jeruk nipis yang digunakan untuk mencukupi kebutuhan dari inhibitor ekstrak yaitu sekitar 1 kg serbuk kulit jeruk nipis.



(a)



(b)

Gambar 3.2 (a) Jeruk Nipis yang dikumpulkan
(b) Larutan Methanol



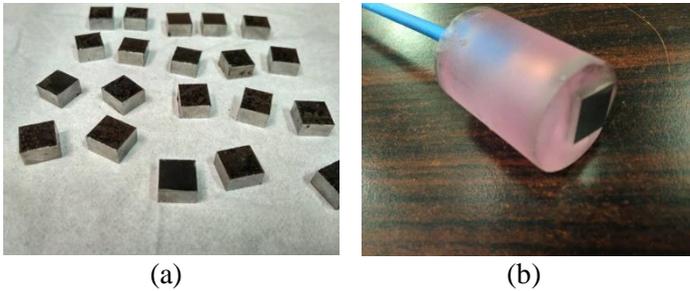
Gambar 3.3 (a) Serbuk Kulit Jeruk Nipis Kering 200 gram
(b) Proses Maserasi Kulit Jeruk Nipis Selama 3 Hari

3.5.2 Preparasi Baja

Material yang digunakan pada pengujian ini yaitu baja API 5L (ASTM A53) Grade B yang berbentuk pipa silindris yang memiliki schedule ketebalan 40 atau sekitar 6 mm.

Adapun prosedur preparasi baja untuk pengujian Polarisasi Potensiodinamik dan EIS, diantaranya yaitu :

1. Material yang berbentuk pipa silindris dipotong dengan plasma cutting.
2. Material yang telah dipotong dipres menjadi pelat.
3. Material dipotong menjadi kecil-kecil dengan ukuran 10 mm x 10 mm.
4. Material yang telah dipotong dihubungkan dengan kabel tembaga yang disambung ke material dengan menggunakan solder.
5. Material yang telah selesai disambung dengan kabel dimasukkan kedalam cetakan untuk dilapisi resin agar terlindungi dan hanya permukaannya saja yang terekspos.
6. Permukaan material dihaluskan dengan diamplas agar terhilang dari karat.



Gambar 3.4 (a) Pemotongan Spesimen bentuk Kupon 10mm x 10mm (b) Material yang sudah disolder dengan kabel dan diresin

Selain preparasi material untuk pengujian polarisasi dan EIS adapula preparasi material untuk pengujian weight loss, FTIR dan SEM, diantaranya yaitu :

1. Material yang berbentuk pipa silindris dipotong dengan plasma cutting.
2. Material yang telah dipotong dipres menjadi pelat.
3. Material dipotong menjadi kecil-kecil dengan ukuran 30 mm x 30 mm.
4. Material dibor pada bagian tengahnya dengan menggunakan alat bor.
5. Permukaan material dihaluskan dengan diampelas agar terhilang dari karat.



Gambar 3.5 Material Uji *Weight Loss*



3.5.3 Preparasi Larutan H₂SO₄ 1M

Larutan yang digunakan yaitu H₂SO₄ dengan konsentrasi 1M yang diencerkan dengan menambahkan aquades didalamnya. Cara pembuatan larutan H₂SO₄ 1 M 500 ml adalah sebagai berikut :

1. Isi labu takar ukuran 1 liter dengan aquades sebanyak 200 ml, lalu tambahkan 54.5 ml larutan H₂SO₄ 98% secara perlahan.
2. Setelah tercampur lalu tambahkan aquades sampai 1000 ml atau sampai tanda batas pada labu takar.
3. Aduk campuran larutan H₂SO₄ dengan aquades hingga tercampur rata.
4. Pada pengenceran H₂SO₄ pastikan labu takar selalu diisi aquades terlebih dahulu untuk menghindari perubahan panas yang spontan yang nantinya bisa menghasilkan letupan.



Gambar 3.6 Larutan H₂SO₄ 1M 1000 ml

3.6 Pengujian

3.6.1 Pengujian Polarisasi Potensiodinamik

Pengujian polarisasi potensiodinamik (tafel) dilakukan untuk mengetahui laju korosi pada spesimen dengan penambahan konsentrasi inhibitor kulit jeruk nipis. Kemudian hasil pengujian polarisasi dilakukan ekstrapolasi dengan teknik tafel untuk memperoleh besaran-besaran yang berkaitan dengan korosi. Hasil yang didapat berupa potensial korosi



(E_{corr}), rapat arus (I_{corr}) dan laju korosi. Sampel Baja API 5L grade B yang digunakan pada pengujian polarisasi ini berdimensi 10 mm x 10 mm.

Prosedur pengujian polarisasi potensiodinamik adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan alat dan bahan yaitu spesimen baja API 5L grade B dengan *surface* kontak sebesar 10 mm x 10 mm dan larutan H_2SO_4 1M dan variasi konsentrasi inhibitor kulit jeruk nipis.
2. Memasukkan larutan H_2SO_4 1M ke dalam gelas ukur sebesar 100 ml.
3. Memasukkan inhibitor ke dalam gelas ukur dengan berbagai macam varian konsentrasi.
4. Memasang elektroda kerja, elektroda bantu, dan elektroda acuan pada rangkaian alat.
5. Pengujian dapat dilakukan dengan menggunakan software Autolab Nova 1.8.
6. Melakukan ekstrapolasi dengan teknik tafel untuk mendapatkan hasil pengujian polarisasi.



Gambar 3.7 Alat Pengujian Polarisasi Potensiodinamik

3.6.2 Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Pengujian EIS dilakukan untuk mengetahui tahanan terhadap korosi yang terjadi dengan penambahan inhibitor kulit jeruk nipis. Pengujian ini dilakukan dengan cara menjepit spesimen baja API 5L grade B pada alat uji EIS dan dianalisa



dengan menggunakan bantuan software. Uji EIS digunakan dengan bantuan 3 elektroda yang terdiri dari elektroda kerja, elektroda acuan dan elektroda bantu. Metode EIS dimaksudkan untuk mengetahui inhibisi pada logam dengan inhibitor. Pada prinsipnya EIS digunakan untuk menentukan parameter kinetika elektrokimia berkaitan dengan elemen-elemen listrik seperti CPE, tahanan larutan (R_s) dan tahanan polarisasi (R_p). Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian EIS dengan menggunakan media korosif H_2SO_4 1M. Alat yang digunakan untuk pengujian EIS sama seperti alat pengujian polarisasi potensiostatik.

Prosedur pengujian EIS sama seperti pengujian Polarisasi potensiostatik, diantaranya yaitu :

1. Mempersiapkan alat dan bahan yaitu spesimen baja API 5L grade B dengan *surface* kontak sebesar 10 mm x 10 mm dan larutan H_2SO_4 1M dan inhibitor.
2. Memasukkan larutan H_2SO_4 1M ke dalam gelas ukur.
3. Memasukkan inhibitor ke dalam gelas ukur dengan berbagai macam varian konsentrasi.
4. Memasang elektroda kerja, elektroda bantu, dan elektroda acuan pada rangkaian alat.
5. Pengujian dapat dilakukan dengan menggunakan software Autolab Nova 1.8.
6. Melakukan proses fitting pada grafik Nyquist untuk mendapatkan hasil pengujian EIS.

3.6.3 Pengujian *Weight Loss*

Pengujian *weight loss* bertujuan untuk mengetahui laju korosi pada baja API 5L grade B dengan media korosif H_2SO_4 1M yang dicampur berbagai variasi konsentrasi penambahan inhibitor kulit jeruk nipis. Pengujian *weight loss* yaitu dengan cara berikut ini :

1. Menyiapkan wadah plastik untuk tempat perendaman spesimen.
2. Menyiapkan spesimen baja API 5L grade B dengan dimensi 30 mm x 30 mm.



3. Melakukan penimbangan awal pada masing-masing spesimen.
4. Memasukkan larutan H_2SO_4 1M ke dalam wadah plastik.
5. Memasukkan konsentrasi inhibitor yang telah ditentukan ke dalam wadah plastik.
6. Merendam baja API 5L *grade* B ke dalam campuran inhibitor dengan larutan H_2SO_4 1M.
7. Kemudian direndam dengan beberapa varian waktu dan dilakukan penimbangan berat akhir dari material setelah direndam.



Gambar 3.8 Pengujian *Weight Loss*

3.6.4 Pengujian *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Pengujian FTIR digunakan untuk mengetahui gugus-gugus fungsi yang terdapat pada inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis dan baja API 5L *grade* B yang telah dilakukan perendaman dengan uji *weight loss*. Metode spektroskopi yang digunakan dalam pengujian FTIR adalah metode absorpsi yaitu suatu metode yang didasarkan atas perbedaan penyerapan radiasi inframerah. Spektrum inframerah tersebut dihasilkan dari penransmision cahaya yang melewati *sample*. Dari panjang gelombang tersebut, akan dapat ditentukan gugus fungsi yang bersesuaian dengan panjang gelombang yang terekam pada masing-masing sampel. Dengan melakukan pengujian FTIR akan dihasilkan kurva *peak* atau gelombang



dengan intensitas yang berbeda-beda dari perbedaan *peak* tersebut maka dapat ditentukan gugus fungsinya sehingga diketahui kandungan (tipe senyawa) yang terkandung dalam masing masing sampel.



Gambar 3.9 Alat Pengujian FTIR

3.6.5 Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah sebuah alat mikroskop elektron yang didesain untuk mengamati permukaan sampel secara langsung. Analisa SEM dilakukan pada lembar katoda untuk mengetahui distribusi serbuk pada matriks, porositas dan kemampuan serbuk material aktif terhadap matriks. SEM digunakan untuk menganalisis permukaan pada sampel yang tebal. Pengamatan struktur mikro menggunakan SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi fasa intermetalik yang terbentuk dengan pengambilan gambar SEM dengan perbesaran 500-1000 kali. Prinsipnya pengujian ini adalah dengan menembakan sampel dengan menggunakan elektron, dan nantinya pantulan elektron dari tumbukan dengan sampel tadi akan ditangkap oleh detektor-detektor yang kemudian dapat menampilkan gambar struktur mikro pada monitor.



Gambar 3.10 Alat Pengujian SEM Phenom Pro-X

3.7 Rancangan Tabel Pengambilan Data Penelitian

Untuk memudahkan dalam mengolah dan menganalisa data yang didapat, maka dibuat rancangan percobaan sebagai berikut :

Tabel 3.2 Tabel Pengujian Polarisasi Potensiodinamik

Pengujian Polarisasi Potensiodinamik							
Material : Baja API 5L grade B / ASTM A53							
Media Larutan : H ₂ SO ₄ 1M							
Konsentrasi Inhibitor (mg)		ba (mV/dec)	bc (mV/dec)	Ecorr (mV)	Icorr (μA/cm ²)	CR (mm/year)	%IE
0	1						
	2						
	3						
50	1						
	2						
	3						
100	1						
	2						
	3						
150	1						
	2						
	3						
200	1						
	2						
	3						
250	1						
	2						
	3						



Tabel 3.3 Tabel Pengujian EIS

Pengujian Electrochemical Impedance Spectroscopy					
Material : Baja API 5L grade B / ASTM A53					
Media : H ₂ SO ₄ 1M					
Konsentrasi Inhibitor (mg)		CPE (μF)	R _p (Ω)	R _s (Ω)	%IE
0	1				
	2				
	3				
50	1				
	2				
	3				
100	1				
	2				
	3				
150	1				
	2				
	3				
200	1				
	2				
	3				
250	1				
	2				
	3				

Tabel 3.4 Tabel Pengujian *Weight Loss*

Pengujian <i>Weight Loss</i>							
Material : Baja API 5L grade B / ASTM A53							
Konsentrasi :							
Waktu (Jam)		Berat Awal	Berat Akhir	Selisih	Laju Korosi	Rata-Rata	Efisiensi
1	1						
	2						

Laporan Tugas Akhir
Departemen Teknik Mesin Industri



	3						
2	1						
	2						
	3						
3	1						
	2						
	3						
4	1						
	2						
	3						
5	1						
	2						
	3						



(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB IV
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Ekstraksi

Proses ekstraksi kulit jeruk nipis dilakukan untuk mendapatkan kandungan yang ada didalam kulit jeruk nipis yaitu kandungan antioksidan. Proses pembuatan ekstrak dilakukan di Laboratorium Kimia Organik, Departemen Teknik Kimia Industri Fakultas Vokasi-ITS.

Pada proses ekstrak kulit jeruk nipis (*Citrus Aurantifolia*) dilakukan dengan tahap awal mengumpulkan kulit jeruk nipis yang segar lalu kemudian kulit tersebut di kupas dan dikeringkan sampai kering dibawah panas matahari. Agar kulit jeruk nipis benar-benar kering dapat dikeringkan dengan mengoven kulit jeruk nipis. Setelah proses tersebut, kulit jeruk nipis dapat dihaluskan agar mudah proses penyerapan senyawa yang ada dalam kulit jeruk nipis. Selanjutnya, dimaserasi selama 3 hari dengan direndam ke dalam pelarut methanol yang bertujuan untuk menarik kandungan yang ada dalam kulit jeruk nipis untuk dijadikan ekstrak. Setelah direndam selama 3 hari, Ekstrak selanjutnya dapat disaring dengan menggunakan kertas saring untuk memisahkan kandungan ekstrak dengan kulit yang telah dihaluskan. Setelah dimaserasi, ekstrak dapat di rotary evaporator untuk mempercepat proses penguapan pelarut methanol agar mendapatkan ekstrak yang diinginkan.



Gambar 4.1 Hasil Ekstrak Kulit Jeruk Nipis



Pada gambar 4.1 diatas, merupakan hasil dari ekstrak kulit jeruk nipis yang telah jadi. Sifat dari ekstrak kulit jeruk nipis tersebut berbentuk kental dan pekat yang kemudian hasil ekstrak tersebut digunakan sebagai inhibitor.

4.2 Hasil Penelitian

Hasil penelitian yang sesuai dengan prosedur penelitian pada bab sebelumnya diperoleh sejumlah data yaitu berupa : efisiensi inhibisi ekstrak kulit jeruk nipis dengan pengujian Polarisasi Potensiodinamik dan pengujian *weight loss*, mekanisme inhibisi yang terjadi dengan pengujian EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*), gugus fungsi yang terkandung pada ekstrak serta pada permukaan spesimen dengan pengujian FTIR (*Fourier Transform Infra Red*), serta untuk mengetahui morfologi pada permukaan spesimen dengan menggunakan pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*).

4.2.1 Hasil Pengujian Polarisasi Potensiodinamik

Pada pengujian polarisasi potensiodinamik atau lebih sering dikenal sebagai pengujian tafel dilakukan untuk mengetahui laju korosi yang terjadi pada baja API 5L *grade B* dengan penambahan ekstrak kulit jeruk nipis yang variasi konsentrasinya antara lain 0 mg, 50 mg, 100 mg, 150 mg, 200 mg, dan 250 mg dengan campuran media korosif larutan H_2SO_4 1M. Pengujian polarisasi potensiodinamik (tafel) dilakukan di Laboratorium Korosi, Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.

Pada pengujian polarisasi potensiodinamik (tafel) ini menggunakan alat uji korosi Autolab Potentiostat Galvanostat PGSTAT302N AUT84992 dengan menggunakan software Nova 1.8. Pada pengujian ini menggunakan 3 rangkaian elektroda diantaranya yaitu WE (*Working Electrode*) atau elektroda kerja, CE (*Counter Electrode*) atau elektroda bantu dan RE (*Reference Electrode*) atau elektroda acuan. Spesimen yang digunakan untuk pengujian ini berukuran 10mm x 10 mm dengan tebal 6 mm yang disambung kabel dan dilapisi resin. Adapun beberapa parameter yang dipakai dalam pengujian polarisasi potensiodinamik yang harus disetting terlebih dahulu pada software NOVA 1.8 sebelum menjalankan pengujiannya.



Tabel 4.1 Parameter Pengujian Polarisasi Potensiodinamik

Elektroda Kerja	API 5L grade B
<i>Equivalent Weight</i> (g/mol)	27,925
Densitas (g/cm ³)	7,86
Luasan Terekspos (cm ²)	1
<i>Counter Electrode</i>	Pt (Platina)
<i>Reference Electrode</i>	Ag/AgCl
<i>Scan Rate</i> (mV/s)	10
<i>Start Potential</i>	-0,100 V
<i>Finish Potential</i>	+0,100 V

Dari tabel diatas, parameter tersebut merupakan sifat dari material yang akan diuji dan diinputkan pada software NOVA 1.8. Equivalent weight yang digunakan berdasarkan standart yaitu dengan nilai 27,925 (g/mol). Sedangkan densitas baja API 5L grade B yaitu 7,86 g/cm³ maka data tersebut yang dimasukkan ke dalam parameter. Luasan material yang terekspos yaitu 1cm². Didalam pengujian polarisasi, alat ini menggunakan elektroda counter yaitu pt (platina) dan menggunakan elektroda reference yaitu Ag/AgCl. Scan rate yang digunakan dalam pengujian ini yaitu 10 mV/s serta menggunakan start potensial -0,100 V dan finish potensial sebesar +0,100 V yang sesuai dengan standart pengujian polarisasi potensiodinamik.

Pada pengujian polarisasi potensiodinamik didapatkan hasil pengujian dengan 5 variabel konsentrasi inhibitor serta 1 variabel untuk mengukur hasil larutan yang tanpa menggunakan inhibitor. Hasil pengujian polarisasi dapat ditunjukkan pada tabel berikut ini.



Tabel 4.2 Hasil Pengujian Polarisasi Potensiodinamik

Pengujian Polarisasi Potensiodinamik						
Material : Baja API 5L <i>grade</i> B/ ASTM A53						
Media Larutan : H ₂ SO ₄ 1M						
Konsentrasi Inhibitor (mg)	ba (mV/dec)	bc (mV/dec)	E _{corr} (mV)	I _{corr} (μA/cm ²)	CR (mm/year)	IE (%)
Tanpa	220.870	146.550	-436.150	6456	75.018	-
50	83.7960	25.1130	-402.770	101.160	1.1755	98.433
100	81.6310	30.3420	-396.590	81.5160	0.94721	98.737
150	89.4220	33.8450	-407.020	67.4500	0.78377	98.955
200	56.9980	27.9170	-400.340	49.1790	0.57146	99.238
250	96.8550	51.2710	-417.970	72.0390	0.83709	98.884

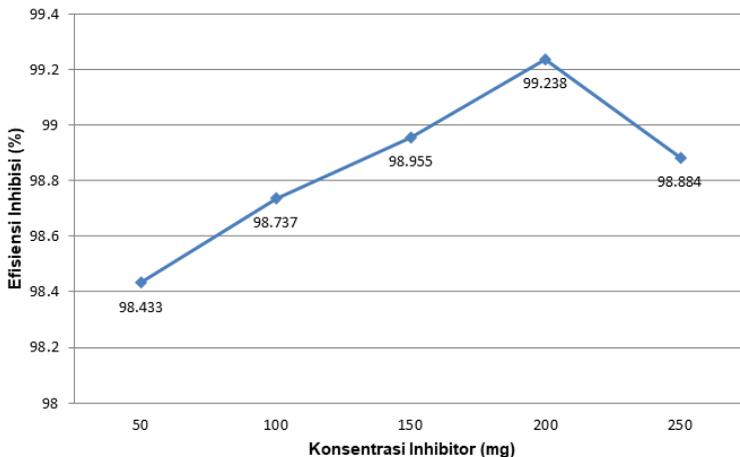
Pada tabel 4.2 tersebut didapatkan hasil pengujian polarisasi potensiodinamik pada 6 variasi konsentrasi dengan berbagai parameter yang didapat dari hasil pengujian polarisasi, yaitu ba, bc, E_{corr}, I_{corr} dan laju korosi. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa semakin banyaknya konsentrasi inhibitor maka akan menurunkan laju korosi sampel baja API 5L *grade* B dan juga akan menurunkan nilai I_{corr} juga. Harga laju korosi tertinggi berada pada larutan H₂SO₄ 1M tanpa campuran inhibitor yaitu sebesar 75.018 mm/year. Harga laju korosi terus mengalami penurunan sampai laju korosi terendah pada konsentrasi 200 mg yaitu sebesar 0.57146 mm/year. Hal tersebut dikarenakan kulit jeruk nipis mengandung antioksidan yang mampu menghambat laju korosi. Namun pada pengujian dengan inhibitor konsentrasi 250 mg laju korosi mengalami kenaikan yaitu sebesar 0.83709 mm/year. Hal itu menyebabkan tren laju korosi menjadi turun dan hal tersebut merupakan titik kritis polarisasi yang mengalami titik jenuh sehingga laju korosi akan naik jika konsentrasi ditambah terus.

Pada tabel 4.2 diatas terlihat bahwa harga I_{corr} trennya mengikuti seperti pada tren laju korosi. Harga I_{corr} tertinggi pada larutan H₂SO₄ tanpa penambahan inhibitor yaitu sebesar 6456 μA/cm². Harga I_{corr} terus mengalami penurunan sampai harga I_{corr} terendah pada konsentrasi 200 mg yaitu sebesar 49.1790 μA/cm². Kemudian harga I_{corr} pada konsentrasi 250 mg mengalami kenaikan yaitu sebesar 72.0390 μA/cm².



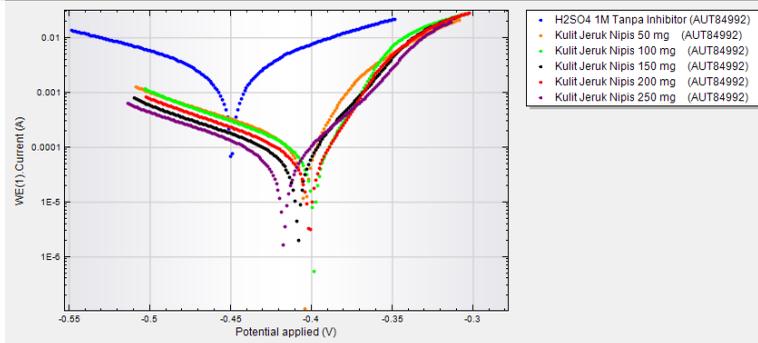
Selain nilai I_{corr} ada juga nilai E_{corr} yang didapatkan dari tabel 4.2. Jika nilai E_{corr} setelah pengurangan antara tanpa inhibitor dikurangi dengan inhibitor nilainya lebih dari 85 mV maka sifatnya dapat digolongkan lebih anodik/katodik dengan dilihat pada grafiknya. Sedangkan jika nilai E_{corr} kurang dari 85mV maka sifatnya dapat digolongkan campuran atau bisa bersifat anodik dan bisa katodik (Atria,2017). Jadi dapat disimpulkan dari hasil pengujian polarisasi sifat inhibitor kulit jeruk nipis menjadi campuran atau bisa bersifat anodik dan katodik.

Efisiensi dari suatu inhibitor dapat diperoleh dari harga laju korosi tanpa inhibitor dikurangi laju korosi dengan inhibitor dan dibagi laju korosi tanpa inhibitor lalu dikalikan 100 persen. Untuk mengetahui detail grafik nilai laju korosi dari ekstrak kulit jeruk nipis dengan 5 variabel konsentrasi inhibitor dapat dilihat pada grafik dibawah ini :



Gambar 4.2 Grafik Efisiensi Inhibisi Inhibitor Kulit Jeruk Nipis Pengujian Polarisasi Potensiodinamik

Pada gambar 4.2 diatas, dapat diketahui efisiensi inhibisi tertinggi inhibitor kulit jeruk nipis dengan media larutan H_2SO_4 1M pada pengujian polarisasi potensiodinamik terdapat pada konsentrasi inhibitor 200 mg yaitu sebesar 99.238%.



Gambar 4.3 Perbandingan Kurva Hasil Pengujian Polarisasi

Pada gambar 4.3 menunjukkan bahwa dengan bertambahnya konsentrasi inhibitor, maka akan menggeser kurva tafel ke arah bawah dan ke arah kanan. Bergesernya kurva tafel dengan pemberian inhibitor korosi ke arah bawah menunjukkan menurunnya nilai I_{corr} sehingga laju korosi menurun. Bergesernya kurva tafel ke arah kanan setelah diberikan inhibitor korosi membuat nilai potensial menjadi naik dan menunjukkan reaksi elektrokimia yang terjadi antara larutan H₂SO₄ 1M dengan sampel uji menjadi lebih dominan anodik.

4.2.2 Hasil Pengujian EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*)

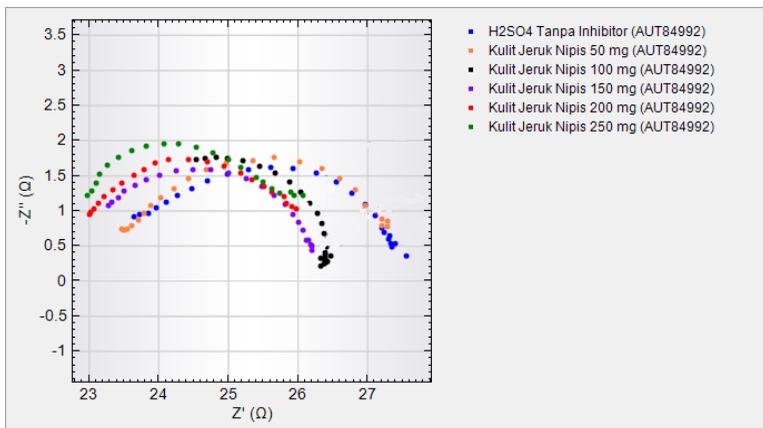
Pada pengujian EIS dilakukan untuk mengetahui mekanisme inhibisi yang terjadi pada baja API 5L grade B dengan penambahan ekstrak kulit jeruk nipis yang variasi konsentrasinya antara lain 0 mg, 0,5 mg, 1 mg, 1,5 mg, 2 mg, dan 2,5 mg dengan campuran media korosif larutan H₂SO₄ 1M. Pengujian EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*) dilakukan di Laboratorium Korosi, Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.

Pada pengujian EIS ini menggunakan alat yang sama seperti pengujian polarisasi potensiostatik yaitu menggunakan alat uji korosi Autolab Potentiostat Galvanostat PGSTAT302N AUT84992 dengan menggunakan software Nova 1.8. Pada

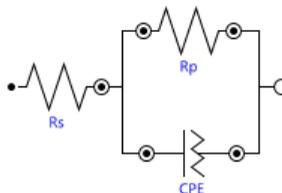


pengujian ini menggunakan 3 rangkaian elektroda diantaranya yaitu WE (*Working Electrode*) atau spesimen kerja, CE (*Counter Electrode*) atau elektroda bantu dan RE (*Reference Electrode*) atau elektroda referensi. Spesimen yang digunakan untuk pengujian ini berukuran 10mm x 10 mm dengan tebal 6 mm yang disambung kabel dan dilapisi resin.

Hasil dari pengujian EIS adalah dalam bentuk kurva Nyquist. Setelah didapatkan kurva Nyquist, kemudian dilakukan proses *fitting* untuk menghasilkan *equivalent circuit*, pada software NOVA 1.8. Kemudian dihasilkan parameter-parameter elektrokimia berupa R (Resistor), C (Capasitor), dan CPE (*Constant Phase Element*).



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Kurva Nyquist Hasil Pengujian EIS



Gambar 4.5 Model Rangkaian Sirkuit Pengujian EIS



Pada gambar 4.4, grafik hasil pengujian EIS dengan inhibitor dan tanpa penambahan inhibitor dapat dilihat, bahwa adanya peningkatan diameter dari kurva Nyquist dengan penambahan konsentrasi inhibitor mulai dari 0 mg, 0,5 mg, 1 mg, 1,5 mg, 2 mg, dan 2,5 mg. Menurut (Zhang, Guoan. 2007), peningkatan diameter kurva Nyquist menandakan adanya peningkatan efisiensi inhibitor dengan adanya penambahan konsentrasi. Penambahan diameter kurva Nyquist ini dikarenakan adanya transfer muatan pada permukaan logam. Selain itu, ion-ion yang berperan sebagai inhibitor korosi membentuk lapisan pasif untuk memproteksi permukaan logam.

Sedangkan pada gambar 4.5, merupakan rangkaian sirkuit pengujian EIS, dimana tahanan larutan (R_s) merupakan suatu tahanan yang terjadi pada larutan sebelum dilakukan *running* pengujian EIS. Selain itu, setelah tahanan larutan (R_s) kemudian ada tahanan polarisasi (R_p) dan CPE yang posisinya satu baris, hal itu merupakan hasil dari proses pengujian EIS setelah dilakukan *running*.

Dari pengujian EIS pada material baja API 5L *grade B* dengan berbagai variasi konsentrasi pada media larutan H_2SO_4 1M, maka didapatkan beberapa parameter-parameter hasil pengujian yang dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 4.3 Tabel Hasil Pengujian EIS

Pengujian Electrochemical Impedance Spectroscopy				
Material : Baja API 5L <i>grade B</i> / ASTM A53				
Media Larutan : H_2SO_4 1M				
Konsentrasi Inhibitor (mg)	CPE (μF)	R_p (Ω)	R_s (Ω)	IE (%)
Tanpa	65.866	4.2105	23.305	-
50	59.529	328.87	184.82	98.719
100	46.327	349.21	193.03	98.794
150	42.549	367.44	1.2414	98.854
200	37.255	443.48	1.6771	99.050
250	32.341	404.17	53.282	98.958



Dari tabel 4.3 didapatkan hasil pengujian EIS pada 6 variasi konsentrasi dengan berbagai parameter yang didapat dari pengujian EIS, diantaranya yaitu CPE, tahanan polarisasi (Rp) dan tahanan larutan (Rs). Dari hasil pengujian didapatkan bahwa semakin banyaknya konsentrasi inhibitor maka akan membuat harga Rp semakin besar sehingga membuat laju korosi semakin kecil dan membuat efisiensi inhibitor semakin tinggi. Harga Rp terendah terdapat pada larutan H₂SO₄ tanpa penambahan inhibitor yaitu sebesar 4.2105 Ω. Harga Rp terus mengalami kenaikan dari konsentrasi 50 mg hingga konsentrasi 200 mg yaitu sebesar 328.87 Ω naik hingga 443.48 Ω. Kemudian turun lagi pada konsentrasi 250 mg yaitu sebesar 404.17 Ω. Dari hasil tersebut menandakan bahwa inhibitor sangat efektif dalam memproteksi permukaan logam yang dapat dilihat dari nilai efisiensi inhibitor tertinggi pada penambahan inhibitor 200 mg dengan efisiensi 99.050%. Hal ini menunjukkan bahwa adanya lapisan pasif yang terbentuk pada permukaan logam (Feng, Lijuan. 2011).

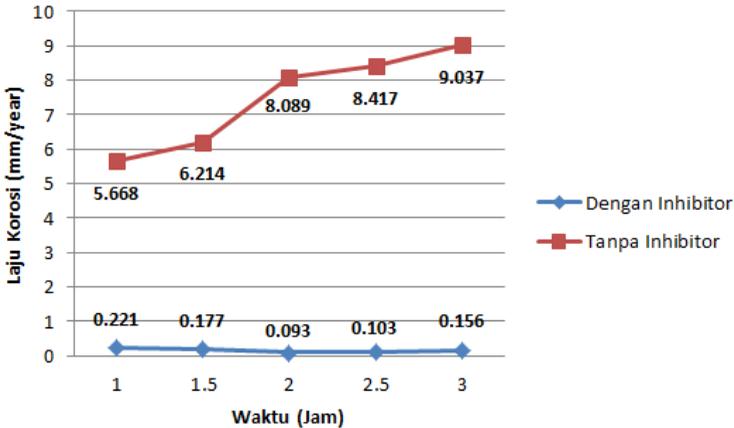
4.2.3 Hasil Pengujian *Weight Loss*

Pengujian *weight loss* ini bertujuan agar dapat mengetahui efisiensi inhibisi dari ekstrak kulit jeruk nipis (*Citrus Aurantifolia*) pada lingkungan H₂SO₄ 1M dengan konsentrasi inhibisi tertinggi dari ekstrak yang telah didapatkan dari pengujian polarisasi potensiodinamik yaitu dengan penambahan inhibitor kulit jeruk nipis sebanyak 200 mg dan kemudian hasil efisiensi yang terbaik dari pengujian *weight loss* ini digunakan untuk pengujian FTIR dan SEM. Pengujian *weight loss* dilakukan di Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material, Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Spesimen baja API 5L *grade B* yang digunakan untuk pengujian *weight loss* berukuran 30cm x 30cm dengan ketebalan 6 mm. Sampel yang digunakan pada pengujian ini sebanyak 30 sampel dan sampel harus terendam seluruhnya didalam media larutan korosif agar mendapatkan hasil yang maksimal dalam mencari laju korosinya.

Pada pengujian *weight loss* ini dilakukan dengan variasi waktu diantaranya : 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam dengan iterasi pengulangan 3 kali agar mendapatkan hasil data yang maksimal. Pada data gambar pengujian *weight loss* dibawah ini



dilakukan dengan menggunakan larutan H_2SO_4 1M tanpa penambahan inhibitor dan dengan penambahan inhibitor. Dari variasi waktu tersebut, maka akan diperoleh gambar grafik perbandingan seperti berikut ini :



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Rata-Rata Laju Korosi Tanpa Inhibitor dan Dengan Inhibitor

Pada gambar 4.6 diatas, didapatkan nilai laju korosi tanpa inhibitor dari spesimen dengan beberapa perbedaan waktu perendaman. Pengaruh lamanya waktu perendaman terhadap laju korosi terlihat, bahwa semakin lama perendaman spesimen akan berpengaruh pada laju korosi yang terjadi pada spesimen tersebut.

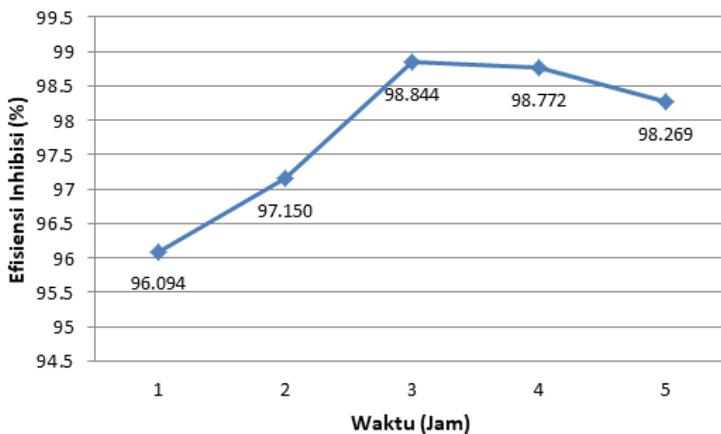
Pada pengujian *weight loss* di waktu 1 jam, rata-rata laju korosi terendah adalah 5.668 mm/year. Sedangkan rata-rata laju korosi pengujian *weight loss* tertinggi pada waktu 5 jam adalah 9.037 mm/year. Dapat disimpulkan bahwa laju korosi pada pengujian *weight loss* tanpa menggunakan inhibitor mengalami kenaikan pada setiap jamnya dan rata-rata laju korosi pada waktu 5 jam merupakan nilai laju korosi tertinggi.

Sedangkan rata-rata laju korosi pada larutan H_2SO_4 1M dengan penambahan inhibitor kulit jeruk nipis sebesar 200 mg mengalami penurunan di interval waktu 1 jam, 2 jam, dan 3 jam diantaranya yaitu 0,221 mm/year, 0,177 mm/year dan 0,093



mm/year. Namun di interval waktu 4 jam dan 5 jam laju korosi mengalami kenaikan lagi diantaranya yaitu 0.103 mm/year dan 0.156 mm/year. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa rata-rata laju korosi terendah terdapat pada interval waktu 3 jam, dimana rata-rata laju korosinya adalah 0,093 mm/year.

Setelah didapatkan rata-rata laju korosi dengan menggunakan inhibitor dan tanpa menggunakan inhibitor, selanjutnya dapat dihitung efisiensi inhibisi tertinggi yang dapat dilihat pada gambar grafik dibawah ini :



Gambar 4.7 Grafik Efisiensi Inhibisi Inhibitor Kulit Jeruk Nipis Pengujian *Weight Loss*

Pada gambar grafik 4.7 diatas, dijelaskan bahwa efisiensi inhibisi tertinggi kulit jeruk nipis pada pengujian *weight loss* dengan waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam serta iterasi pengulangan 3x terjadi pada waktu perendaman 3 jam dengan efisiensi inhibisi mencapai 98.844%.

4.2.4 Hasil Pengujian FTIR (*Fourier Transform Infra Red*)

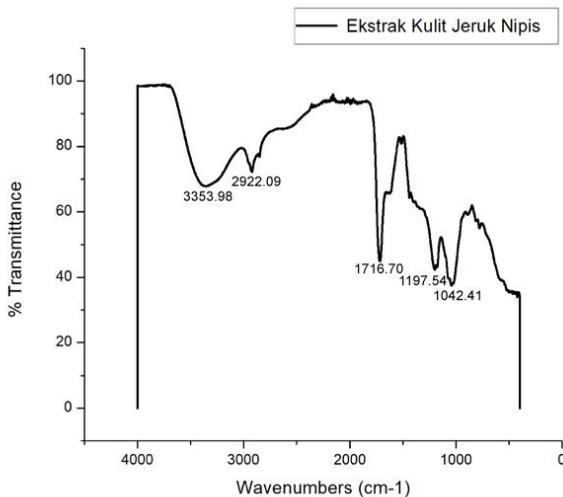
Pengujian ini dilakukan setelah mendapatkan efisiensi inhibisi tertinggi pada pengujian *weight loss* yaitu pada konsentrasi inhibitor 200 mg dengan waktu perendaman 3 jam. Pengujian FTIR dilakukan di Laboratorium Divisi Karakterisasi



Material, Departemen Teknik Material dan Metallurgi – FTI ITS. Pada pengujian FTIR ini ada 2 pengujian yang dilakukan yaitu pengujian spesimen dengan inhibitor dan inhibitor ekstrak. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi yang ada pada inhibitor ekstrak dan juga pada permukaan spesimen yang terlindungi dan tidak terlindungi inhibitor. Dari hasil pengujian FTIR pada inhibitor korosi didapatkan berbagai ikatan yang terkandung yang ditunjukkan dalam bentuk *peak*.

4.2.4.1 Hasil Pengujian FTIR Inhibitor Ekstrak Kulit Jeruk Nipis

Pada penelitian sebelumnya mengatakan bahwa jeruk nipis terdapat kandungan antioksidan yaitu flavonoid. Flavonoid merupakan senyawa yang dapat menghambat laju korosi. Berikut ini adalah analisis dari hasil FTIR inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis yang dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Spektrum Pengujian FTIR
Inhibitor Ekstrak Kulit Jeruk Nipis

Dari gambar 4.8, inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis terdapat beberapa *peak*. Peak ini masing-masing memiliki nilai



frekuensi yang akan dihubungkan dengan range frekuensi pada referensi.

Tabel 4.4 Hasil FTIR Inhibitor Eksrak Kulit Jeruk Nipis

No	Wavelength (cm ⁻¹)	Daerah Wavelength (cm ⁻¹)	Tipe Senyawa	Gugus Fungsi
1.	3353.98	3300-3500	Amina,Amida	N-H
2.	2922.09	2850-2970	Alkana	C-H
3.	1716.70	1690-1760	Aldehid, Keton, Asam Karboksilat, Ester	C=O
4.	1197.54	1040-1300	Alkohol, Eter, Asam Karboksilat, Ester	C-O
5.	1042.41	1000-1400	Alkyl Halida, Eter,Ester	C-F C-O

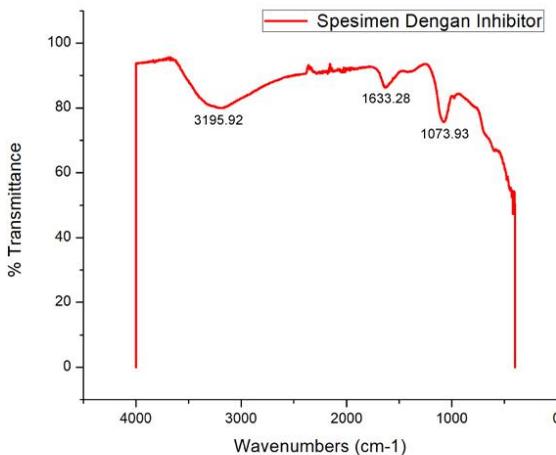
Pada tabel 4.4, menunjukkan hasil pengujian FTIR dari ekstrak kulit jeruk nipis. Terdapat 5 peak hasil dari pengujian ekstrak kulit jeruk nipis yang pada tiap *peak (wavelength)* tersebut terdapat beberapa gugus fungsi yang terkandung didalamnya. Ikatan pada 3353.98 cm⁻¹ terdapat senyawa amida dan amina dengan gugus fungsi N-H. Ikatan pada 2922.09 cm⁻¹ terdapat senyawa alkana dengan gugus fungsi C-H. Ikatan pada 1716.70 cm⁻¹ terdapat senyawa aldehid, keton, asam karboksilat, dan ester dengan gugus fungsi C=O. Ikatan pada 1197.54 cm⁻¹ terdapat senyawa alkohol, eter, asam karboksilat, dan ester



dengan gugus fungsi C-O. Ikatan pada 1042.41 cm^{-1} terdapat senyawa alkyl halida, eter, ester dengan gugus fungsi C-F dan C-O. Dari gugus fungsi tersebut, terdapat beberapa gugus fungsi yang menunjukkan bahwa ada senyawa flavonoid pada ekstrak kulit jeruk nipis. Gugus fungsi flavonoid tersebut diantaranya adalah C-H, C=O dan C-O.

4.2.4.2 Hasil Pengujian FTIR pada Baja API 5L Grade B dengan Penambahan Inhibitor

Hasil spektrum dari pengujian FTIR pada sampel baja API 5L *grade* B yang telah direndam kedalam larutan H_2SO_4 1M dengan penambahan inhibitor sebanyak 200 mg dan direndam selama 3 jam dapat dilihat pada gambar 4.9. Frekuensi *peak* ini dihubungkan dengan range frekuensi pada referensi, sehingga dapat diketahui senyawa yang terbentuk pada permukaan baja tersebut.



Gambar 4.9 Spektrum Pengujian FTIR Spesimen Baja API 5L *grade* B dengan Penambahan Inhibitor

Dari gambar 4.9, mengenai spektrum pengujian FTIR spesimen baja API 5L *grade* B dengan penambahan inhibitor

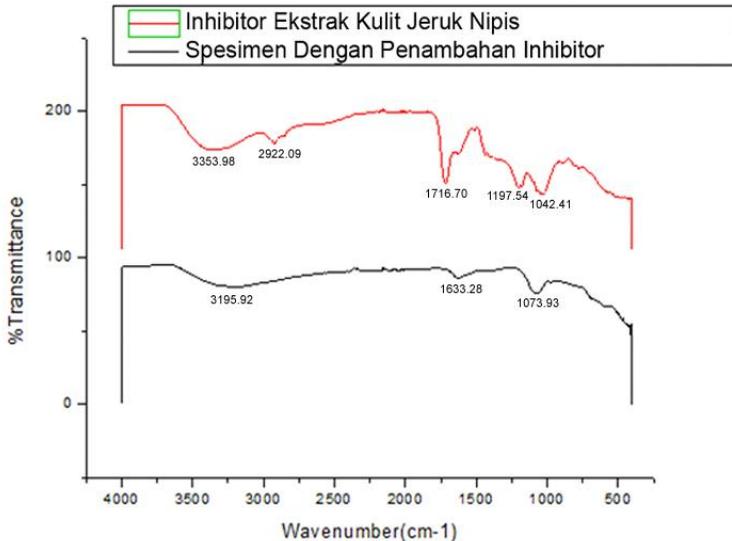


terdapat beberapa *peak*. Peak ini masing-masing memiliki nilai frekuensi yang akan dihubungkan dengan range frekuensi pada referensi.

Tabel 4.5 Hasil FTIR Spesimen Dengan Tambahan Inhibitor

No	Wavelength (cm ⁻¹)	Daerah Wavelength (cm ⁻¹)	Tipe Senyawa	Gugus Fungsi
1.	3195.92	3100-3500	Amida	N-H
2.	1633.28	1610-1682	Alkena	C=C
3.	1073.93	1040-1300	Alkohol, Eter, Asam Karboksilat, Ester	C-O
4.	428.00	-	-	-
5.	416.40	-	-	-
6.	408.62	-	-	-

Pada tabel 4.5 diatas, menunjukkan beberapa peak yang terdapat pada spesimen baja API 5L *grade* B dengan penambahan inhibitor kulit jeruk nipis. Pada peak tersebut terdapat beberapa gugus fungsi yang terkandung didalamnya. Ikatan pada 3195.92 cm⁻¹ terdapat senyawa amida dengan gugus fungsi N-H. Ikatan pada 1633.28 cm⁻¹ terdapat senyawa alkena dengan gugus fungsi C=C. Ikatan pada 1073.93 cm⁻¹ terdapat senyawa alkohol, eter, asam karboksilat, dan ester dengan gugus fungsi C-O. Sedangkan pada ikatan frekuensi dibawah 500 cm⁻¹ diantaranya yaitu 428 cm⁻¹, 416.40 cm⁻¹, dan 408.62 cm⁻¹ dianggap sebagai finger print region atau daerah sidik jari dari penguji sehingga tidak ada senyawa dan gugus fungsi didalamnya.



Gambar 4.10 Perbandingan Hasil FTIR Inhibitor Ekstrak dan Spesimen Baja API 5L *grade* B dengan Inhibitor

Dari gambar 4.10, terlihat bahwa terdapat beberapa *peak* dari spesimen baja API 5L *grade* B dengan penambahan inhibitor yang kontur spektrumnya hampir sama dengan inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis. Beberapa *peak* yang sama tersebut menunjukkan tingkat adsorpsi permukaan baja terhadap inhibitor kulit jeruk nipis, dimana adsorpsi ini berfungsi sebagai pembentuk lapisan proteksi terhadap serangan korosi.

Tabel. 4.6 Perbandingan Hasil FTIR Inhibitor Ekstrak Kulit Jeruk Nipis dan Spesimen dengan Penambahan Inhibitor

No.	Gugus Fungsi	Tipe Senyawa	Daerah Wavelength (cm-1)	Inhibitor Kulit Jeruk Nipis	Spesimen baja API 5L dengan Inhibitor
1.	N-H	Amida	3100-3500	3353.98	3195.92



2.	C-H	Alkana	2850-2970	2922.09	-
3.	C=O	Aldehid, Keton, Asam Karboksilat, Ester	1690-1760	1716.70	-
4.	C=C	Alkena	1610-1682	-	1633.28
5.	C-O	Alkohol, Eter, Asam Karboksilat, Ester	1040-1300	1197.54	-
6.	C-F	Alkyl Halide	1000-1400	1042.41	-
7.	C-O	Alkohol, Eter, Asam Karboksilat, Ester	1040-1300	1042.41	1073.93

Pada tabel 4.6 diperoleh kesamaan gugus fungsi N-H dengan tipe senyawa amida dan juga senyawa C-O dengan tipe senyawa Alkohol, Eter, Asam Karboksilat, Ester. Kedua gugus fungsi tersebut terdapat pada kedua spektrum hasil pengujian FTIR inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis dengan spesimen yang ditambah inhibitor. Hal tersebut membuktikan adanya senyawa-senyawa yang teradsorpsi pada permukaan baja API 5L *grade B*. Terdapatnya kandungan gugus fungsi yang melekat pada permukaan spesimen memungkinkan untuk menghambat laju korosi yang terjadi.

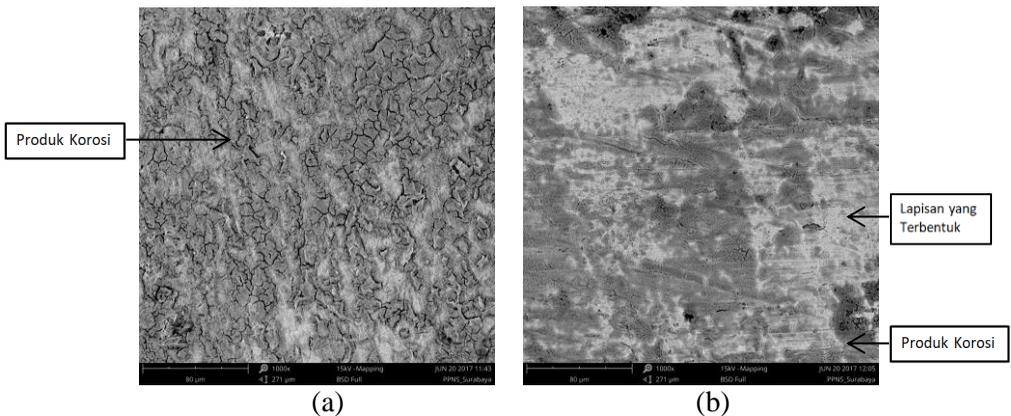
4.2.5 Hasil Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

Pada pengujian SEM ini bertujuan untuk mengetahui morfologi pada permukaan spesimen baja API 5L *grade B* yang telah dilindungi oleh inhibitor kulit jeruk nipis dan permukaan spesimen yang tidak dilindungi oleh inhibitor. Pengujian SEM



dilakukan di Laboratorium Teknologi Manufaktur, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Pengujian SEM ini dilakukan setelah mendapatkan efisiensi inhibisi tertinggi dari pengujian *weight loss* sebelumnya yaitu efisiensi inhibisi tertinggi terletak pada waktu perendaman 3 jam. Spesimen yang telah diuji *weight loss* kemudian dapat langsung diuji SEM untuk melihat morfologi yang ada pada permukaannya.

Pengujian SEM ini menggunakan alat SEM jenis Phenom Pro-X. Alat ini memiliki kemampuan perbesaran elektron optikal 20-130.000 kali dan dapat di zoom sampai 12x, dengan resolusi mencapai lebih dari 14 nm, kemampuan perbesaran optik 20-135 kali, serta penggambaran dan analisis pada daya 5kV, 10kV dan 15kV. Hasil dari pengujian dengan menggunakan alat SEM jenis Phenom Pro-X dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.11 Hasil Uji SEM Spesimen dengan Perbesaran 1000x (a) Tanpa Inhibitor, (b) dengan Inhibitor

Berdasarkan gambar 4.11 tersebut, pada setiap permukaan dari spesimen tanpa inhibitor (a) terlihat bahwa material baja API 5L *grade B* terdapat kerusakan berupa lubang-lubang kecil dan banyak produk korosi berbentuk pulau-pulau yang menyelimuti seluruh permukaan material. Sedangkan pada permukaan dari spesimen dengan penambahan inhibitor (b) terlihat bahwa



terdapat lapisan tipis berwarna putih yang terbentuk pada permukaan baja API 5L *grade* B dan selain itu pada permukaan material juga sedikit terdapat produk korosi yang berbentuk pulau-pulau. Hal tersebut menandakan bahwa spesimen baja API 5L *grade* B tanpa penambahan inhibitor mengalami jenis korosi seragam (*uniform corrosion*). Korosi seragam merupakan jenis korosi yang menyerang permukaan secara menyeluruh. Korosi ini biasa terjadi pada baja karbon yang berada dalam lingkungan atmosfer maupun lingkungan korosif. Sedangkan pada spesimen baja API 5L *grade* B yang ditambahkan inhibitor terdapat lapisan tipis berwarna putih yang terbentuk pada permukaan spesimen. Lapisan putih tersebut merupakan lapisan yang membantu proses penghambatan korosi yang sedang terjadi pada spesimen.

4.3 Pembahasan

Dari hasil pengujian Polarisasi Potensiodinamik (tafel) yang dilakukan pada 6 sampel uji, yaitu berupa larutan tanpa inhibitor, dan larutan dengan campuran inhibitor yang ada 5 variasi konsentrasi didapatkan bahwa terdapat penurunan laju korosi dan peningkatan efisiensi inhibitor yang cukup signifikan meningkatnya dengan pemberian inhibitor kedalamnya. Efisiensi tertinggi yang didapat dari ekstrak kulit jeruk nipis (*citrus aurantifolia*) terdapat pada konsentrasi inhibitor sebesar 200 mg dengan efisiensi inhibitor mencapai 99.238%. Dari grafik kurva polarisasi potensiodinamik (tafel), dengan adanya pemberian inhibitor menggeser kurva kebawah yang mengindikasikan adanya penurunan nilai I_{corr} . Sehingga dapat diketahui bahwa inhibitor kulit jeruk nipis (*citrus aurantifolia*) bekerja untuk mengurangi laju korosi pada baja API 5L *grade* B. Menurut Atria (2017), inhibitor dapat dikategorikann anodik atau katodik jika nilai E_{corr} bergeser lebih dari 85 mV terhadap E_{corr} tanpa inhibitor. Sedangkan inhibitor dapat dikategorikan campuran (mixed inhibitor) anodik dan katodik jika nilai E_{corr} bergeser kurang dari 85 mV terhadap E_{corr} tanpa inhibitor. Sehingga dapat disimpulkan bahwa inhibitor kulit jeruk nipis bersifat mixed inhibitor. Dari sifat mixed inhibitor dapat ditentukan sifat dari inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis dari perbandingan kurva polarisasi yang bergeser lebih ke kanan dari pada kurva tanpa



inhibitor. Sehingga inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis lebih dominan bersifat anodik

Dari hasil pengujian EIS, didapatkan kesimpulan bahwa dengan adanya penambahan inhibitor kulit jeruk nipis dapat meningkatkan nilai tahanan polarisasi (R_p) dan membuat efisiensi menjadi tinggi. Tahanan tersebut mewakili adanya perpindahan muatan pada antar muka antara logam dan larutan. Dengan peningkatan nilai tahanan, menunjukkan adanya lapisan pasif yang terbentuk di permukaan logam (Feng, Lijuan. 2011). Menurut Wahyuningsih (2010), hal ini berkaitan dengan perpindahan elektron, semakin cepat elektron berpindah maka tahanan yang terbentuk akan semakin kecil dan laju korosi akan semakin rendah. Begitu juga bila semakin lambat elektron berpindah maka tahanan yang terbentuk akan semakin besar dan laju korosinya tinggi. Sehingga, tahanan polarisasi yang semakin kecil dikarenakan oleh inhibitor yang belum bekerja dengan baik untuk menghambat korosi pada spesimen baja sehingga belum terjadi pembentukan lapisan pasif pada permukaan baja.

Untuk mengetahui efisiensi inhibitor kulit jeruk nipis, maka dilakukan pengujian *weight loss* berdasarkan pengurangan berat awal dan akhir. Dari hasil pengujian *weight loss*, didapatkan kesimpulan bahwa inhibitor kulit jeruk nipis dapat menurunkan laju korosi secara signifikan pada baja API 5L *grade B* dengan media larutan H_2SO_4 1M. Dari hasil pengujian didapatkan rata-rata tertinggi laju korosi spesimen baja API 5L *grade B* tanpa penambahan inhibitor terdapat pada waktu perendaman 5 jam dimana laju korosinya mencapai 9.037 mm/year. Sedangkan rata-rata laju korosi terendah pada spesimen baja API 5L *grade B* dengan penambahan inhibitor sebanyak 200 mg terdapat pada waktu perendaman 3 jam dimana laju korosinya 0.093 mm/year. Dari hasil tersebut dapat dihitung bahwa efisiensi inhibitor tertinggi pada waktu perendaman 3 jam dengan efisiensi mencapai 98,844 %.

Dari hasil pengujian FTIR, pada tabel 4.4 menyatakan bahwa inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis mengandung senyawa flavonoid untuk menghambat laju korosi yang terjadi pada spesimen baja API 5L *grade B*. Gugus fungsi flavonoid yang terkandung dalam inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis tersebut



diantaranya adalah C-H, C=O dan C-O. Penambahan inhibitor kulit jeruk nipis ke dalam larutan H_2SO_4 1M membentuk senyawa-senyawa tertentu pada permukaan baja API 5L *grade* B. Adanya kesamaan gugus fungsi N-H dengan tipe senyawa amida dan juga senyawa C-O dengan tipe senyawa Alkohol, Eter, Asam Karboksilat, Ester. Kedua gugus fungsi tersebut terdapat pada kedua spektrum hasil pengujian FTIR inhibitor ekstrak kulit jeruk nipis dengan spesimen yang ditambah inhibitor. Senyawa tersebut terdapat pada permukaan baja API 5L *grade* B, sehingga dapat dikatakan bahwa senyawa-senyawa tersebut teradsorpsi. Adanya senyawa yang teradsorpsi di permukaan logam mengindikasikan bahwa inhibitor kulit jeruk nipis bereaksi dengan logam dan menghambat terjadinya korosi pada logam.

Dari hasil pengujian SEM, didapatkan kesimpulan bahwa permukaan spesimen baja API 5L *grade* B yang tidak ditambahkan dengan inhibitor terdapat kerusakan berupa lubang-lubang kecil dan banyak produk korosi berbentuk pulau-pulau yang menyelimuti seluruh permukaan material. Sedangkan pada permukaan dari spesimen dengan penambahan inhibitor terlihat bahwa terdapat lapisan tipis berwarna putih yang terbentuk pada permukaan baja API 5L *grade* B dan selain itu pada permukaan material juga sedikit terdapat produk korosi yang berbentuk pulau-pulau. Hal tersebut menandakan bahwa spesimen baja API 5L *grade* B tanpa penambahan inhibitor mengalami jenis korosi seragam (*uniform corrosion*). Korosi seragam merupakan jenis korosi yang menyerang permukaan secara menyeluruh. Korosi ini biasa terjadi pada baja karbon yang berada dalam lingkungan atmosfer maupun lingkungan korosif. Sedangkan pada spesimen baja API 5L *grade* B yang ditambahkan inhibitor terdapat lapisan tipis berwarna putih yang terbentuk pada permukaan spesimen. Lapisan putih tersebut merupakan lapisan yang membantu proses penghambatan korosi yang sedang terjadi pada spesimen.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut ini :

1. Penambahan inhibitor kulit jeruk nipis (*Citrus Aurantifolia*) dapat menurunkan laju korosi pada baja API 5L grade B dengan efisiensi sebagai berikut :
 1. Efisiensi tertinggi pada pengujian polarisasi potensiodinamik maksimal sebesar 99,238% pada konsentrasi inhibitor 200 mg.
 2. Efisiensi tertinggi pada pengujian EIS maksimal sebesar 99.050% yang terletak pada konsentrasi inhibitor 200 mg.
 3. Pada pengujian weight loss efisiensi tertinggi yaitu sebesar 98,844% yang terletak pada perendaman 3 jam dengan konsentrasi inhibitor 200 mg.
2. Mekanisme inhibisi inhibitor kulit jeruk nipis yang terjadi yaitu inhibitor kulit jeruk nipis bersifat lebih dominan anodik.

5.2 Saran

1. Perlu adanya variasi temperature pada pengujian selanjutnya untuk melihat kinerja efisiensi inhibitor pada aplikasi yang sebenarnya dengan temperature yang berbeda.
2. Perlu adanya variasi kecepatan putar pada pengujian selanjutnya untuk melihat pengaruh efisiensi inhibitor korosi pada kondisi yang sebenarnya.
3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut lagi.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR PUSTAKA

- A. Groysman. 2010. *Corrosion for Everybody*. Springer Science + Business Media B. V.
- AAK. 1994. Budidaya tanaman jeruk. Kanisius. Yogyakarta; p.13-4
- Andi Tenri U. 2016. Eektivitas Ekstrak Kulit Jeruk Nipis (*Citrus Aurantifolia*) dengan NaOCl 5,25% Sebagai Alternatif Larutan Irigasi Saluran Akar dalam Menghambat Bakteri *Enterococcus faecalis*
- API SPESIFICATION 5L. *Specification for Line Pipe, Forty-Third Edition*. 2004
- ASM Handbook. 2005. *Corrosion Materials volume 13B*. USA: ASTM International.
- ASTM A53/A53 M – 02. *Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless*. ASTM International.
- Caballero, benjamin. Finglas, Paul. 2016. Encyclopedia of food and health. Elsevier. Oxford; 2016.p.40
- Dalimuthe, Indra Surya. 2004. *Kimia dari Inhibitor Korosi*. Universitas Sumatera Utara
- Dariva, Camila G. Galio, Alexandre F. 2014. *Corrosion Inhibitors-Principles, Mechanisms and Applications*. INTECH
- Denny A. Jones. 1997. Principles and Prevention of Corrosion. 2nd Edition. Singapore : Prentice Hall International, Inc.
- Feng, Lijuan. 2011. *Experimental and theoretical studies for corrosion inhibition of carbon steel by imidazoline derivative in 5% NaCl saturated Ca(OH)₂ solution*. Shenyang : Chinese Academy of Sciences
- Fontana, Mars. 1986. *Corrosion Engineering*. 3rd Edition. Houston : McGraw-Hill Companies Inc. USA.
- H.H Uhlig, R.W. Revie. 1985. *Corrosion and Corrosion Control*. 3rd edition. John Wiley & Sons.
- Halimatuddahlia. 2003. *Pencegahan Korosi dan Scale pada Proses Produksi Minyak Bumi*. Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik-Universitas Sumatra Utara.



- Hassan, Karim H. 2016. Citrus aurantium leaves extracts as a sustainable corrosion inhibitor of mild steel in sulfuric acid. South Africa Journal. 1-5
- Hermawan, Sri, dkk. 2012. *Penentuan Efisiensi Inhibisi Korosi Baja Menggunakan Ekstrak Kulit Buah Kakao (Theobroma cacao)*. Universitas Sumatera Utara
- Ismail N., Andijani and Mohammad Mobin. 2005. *Studies on the Determination of Maximum Chloride Level in Product Water Transmitted Through Pipelines A, B, and C*.
- Jaiprakash R. Patil, G.K. Jayaprakasha, K.N Chidambara Murthy. 2009. Characterization of Citrus Aurantifolia bioactive compounds and their inhibition of human pancreatic cancer cells through apoptosis. Microchemical Journal 94(2010) 108-117
- Jones, Denny A. 1992. *Principles and Prevention of Corrosion*. Toronto : Maxwell Macmillan Canada
- K. C. Anjani, A. S Abdulrahman & E. Mudiare. (2014). Inhibitory Action of Aqueous Citrus Aurantifolia Seed Extract on the Corrosion of Mild Steel in H₂SO₄ Solution.
- K. Videm. A. Daugstad. 1987. *Effect of Flow Rate, pH, Fe²⁺ concentration, and Steel Quality on CO₂ Corrosion of Carbon Steel*. CORROSION/87, Paper no. 42. NACE International
- L. F. Porter & P.E. Repas. 1982. The Evolution of HSLA Steels. *Journal of Metals*. Vol. 34, no. 4, pp. 14-21.
- Loizzo. Tundis. Bonesi, et al. 2012. Evaluation of citrus aurantifolia peel and leaves extracts for their chemical composition, antioxidant and anti-cholinesterase. J Sci Food Agric. 2012 Dec;92(15):2960-7. doi: 10.1002/jsfa.5708. Epub 2012 May 16
- NACE International. 1973. *Corrosion Inhibitor*. Texas: Nathan, C. C
- Naili, K. 2010. *Corrosion and its Mitigation in the Oil & Gas Industry – An Overview*. Petromin Pipeliner. Pp. 10-16.
- Perez, Nestor. 2004. *Electrochemistry and Corrosion Science*. Kluwer Academic Publisher.
- Pierre R. Roberge. 2008. *Corrosion Engineering Principles and Practice*. TheMcGraw-Hill Companies Inc. USA.



- Pradityana, Atria. 2017. *Sarang Semut (Mymecodia Pendans) Extract As A Green Corrosion Inhibitor For Mild Steel in Acid Solution*. International Journal of Technology 48 : 57
- Purbadi. 2008. *Penilaian Kelayakan KKS*. Surabaya : ITS
- R. Saratha, S. V. Priya & P. Thilagavathy. (2009). Investigation of *Citrus Aurantifolia* Leaves Extract as Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 1 M HCL
- Rukmana Rahmat. 2009. Jeruk nipis prospek agribisnis, budi daya dan pasca panen. Kanisius. P 13-4
- Sanyal, B., *Organic Compounds as Corrosion Inhibitors in Different Environments*. A review Progress in Organic Coatings, vol. 9, pp. 165-236, 1981.
- Soelarso B, 1996. *Budidaya jeruk bebas penyakit*. Yogyakarta : editor
- Sunarya, A. Wahyuningsih, Y. Aisyah S. 2010. *Merenamina sebagai inhibitor korosi baja karbon dalam lingkungan sesuai kondisi pertambangan minyak bumi*. Jurusan pendidikan kimia. Universitas pendidikan Indonesia.
- T. Gladman. 1997. *The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels*. UK : The Institute of Materials. p. 185.
- Trethewey. K.R. dan J. Chamberlain. 1991. *Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*. Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Triwibowo, Joko. 2011. *Rekayasa Bahan LiTiMnFe(PO₄)₃ Sebagai Katoda Solid Polymer Battery (SPB) Lithium*. Jurusan Material dan Metalurgi UI
- Utoyo, Widartono. 2000. *Gas Production Operation*. In House Training Gulf Indonesia Resources.
- Wulandari, Mulyani. Idiawati, Nora. 2013. *Aktivitas antioksidan ekstrak n-Heksana, etil asetat dan metanol kulit buah jeruk sambal (Citrus microcarpa bunge)*. Jkk, tahun 2013, volume 2 (2). Hal.90-4
- Wulandari, Sri, dkk. 2012. *Inhibisi Xiantin Oksidae oleh Ekstrak Etanol Kulit Melinjo (Gnetum Gnemon) Relatif terhadap Allopurinol*. Universitas Negeri Malang
- Zhang, Guoan. 2007. *Evaluation of inhibition efficiency of an imidazoline derivative in CO₂-containing aqueous solution*. Beijing : China University of Petroleum



(halaman ini sengaja dikosongkan)



LAMPIRAN

1. Pembuatan Larutan H₂SO₄ 1M 1L

Diketahui pada larutan H₂SO₄ 98% :

$$\rho = 1,84 \text{ gr/cm}^3$$

$$BM = 98,08$$

Rumus Pengenceran H₂SO₄ 1M :

$$M = \frac{\rho \times 10 \times \%}{BM}$$

$$= \frac{1,84 \times 10 \times 98}{98,08}$$

$$= 18,384 \text{ M}$$

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$18,384 \times V_1 = 1 \times 1000$$

$$V_1 = 54,395 \text{ ml}$$

2. Pembuatan Elektroda Kerja

Material baja API 5L grade B dipotong dan kemudian dipress hingga menjadi bentuk pelat



Material dipotong kecil-kecil hingga berukuran 10 mm x 10 mm untuk pengujian polarisasi serta EIS dan 30 mm x 30 mm untuk pengujian weight loss





Material yang telah terpotong ukuran 10 mm x 10 mm dapat disambung dengan kabel dengan menggunakan solder



Material dimasukkan ke dalam cetakan untuk dilapisi dengan resin agar permukaan saja yang terekspose



Permukaan dihaluskan dengan menggunakan amplas

3. Preparasi Inhibitor Kulit Jeruk Nipis

Pengumpulan kulit jeruk nipis dan pengupasan jeruk nipis untuk diambil kulitnya saja.



Proses penjemuran kulit hingga benar-benar kering serta proses pengovenan kulit jeruk nipis



Kulit diblender/diselep agar menjadi halus





Penimbangan serbuk kulit jeruk nipis sebanyak 200 gr x 5. Jadi total ada 1 kg serbuk kulit yang diekstrak



Perendaman dengan larutan methanol ke dalam serbuk.



Dilakukan proses maserasi selama 3 hari 3 malam untuk mendapatkan hasil ekstrak.



Setelah dimaserasi, dilakukan penyaringan dengan kertas saring kemudian dilakukan rotary evaporator

4. Proses Pengujian Polarisasi

Persiapkan alat dan bahan yang akan dibuat untuk pengujian, yaitu spesimen, larutan dan variasi konsentrasi inhibitor



Masukkan larutan H₂SO₄ ke dalam gelas ukur sebesar 100 ml dan campurkan variasi konsentrasi inhibitor





Pasang elektroda kerja, elektroda bantu dan elektroda acuan pada rangkaian alat



Buka software Nova 1.8 lalu pilih prosedur, pilih standart dan pilih linear polarization. Pastikan autolab terkoneksi dengan alat



Setting profile menjadi intermediate dan interfacial electrochemistry yang dicentang.



Setting remarks sebagai nama dari sampel uji, ubah option highest current range menjadi 10 mA dan lowest range menjadi 100 nA



Ubah W.E Current Range menjadi 10 mA, lalu max time OCP menjadi 60 s



Pastikan Start potensial di -0.100 V dan Stop potensial di 0.100 V



Setelah setting selesai, jalankan proses pengujian polarisasi, tunggu hingga hasilnya selesai





Setelah selesai running, kemudian lakukan fitting di menu measure view untuk mendapatkan hasil pengujian

5. Proses Pengujian EIS

Persiapkan alat dan bahan yang akan dibuat untuk pengujian, yaitu spesimen, larutan dan variasi inhibitor



Masukkan larutan H_2SO_4 ke dalam gelas ukur 100 ml dan campurkan dengan variasi konsentrasi inhibitor



Pasang elektroda kerja, elektroda bantu dan elektroda acuan pada rangkaian alat



Buka software Nova 1.8 lalu pilih prosedur, pilih standart dan pilih FRA impedance potentiostatic. Pastikan autolab terkoneksi dengan alat



Setting profile menjadi intermediate dan interfacial electrochemistry yang dicentang.





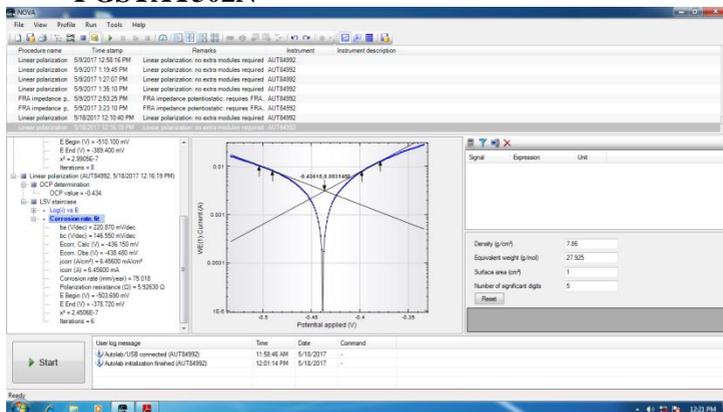
Setting remarks sebagai nama dari sampel uji, ubah option highest current range menjadi 10 mA dan lowest range menjadi 100 nA

Ubah W.E Current Range menjadi 10 mA

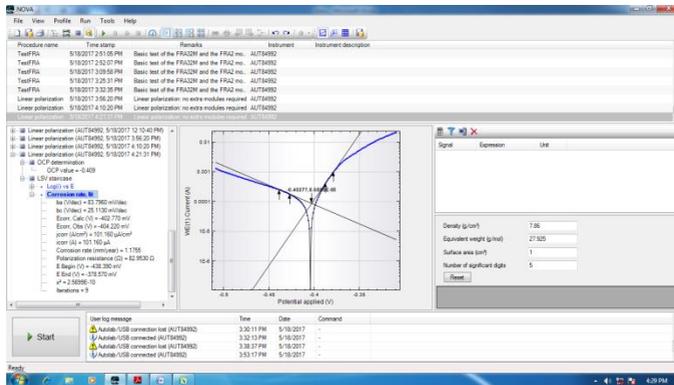
Setelah setting selesai, jalankan proses pengujian EIS, tunggu hingga hasilnya selesai

Setelah selesai running, kemudian lakukan fitting pada grafik Nyquist di menu measure view untuk mendapatkan hasil pengujian

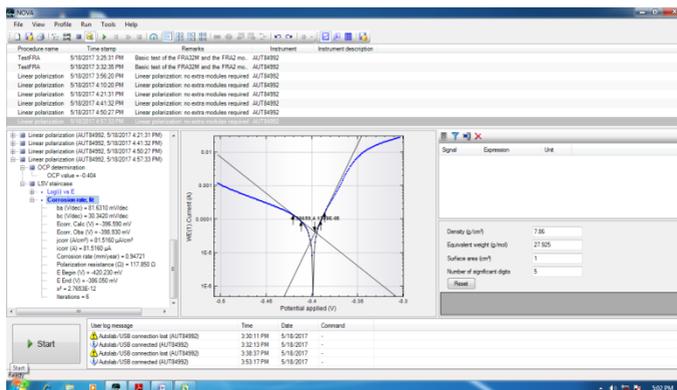
6. Hasil Ekstrapolasi Tafel Potensiostat Autolab PGSTAT302N



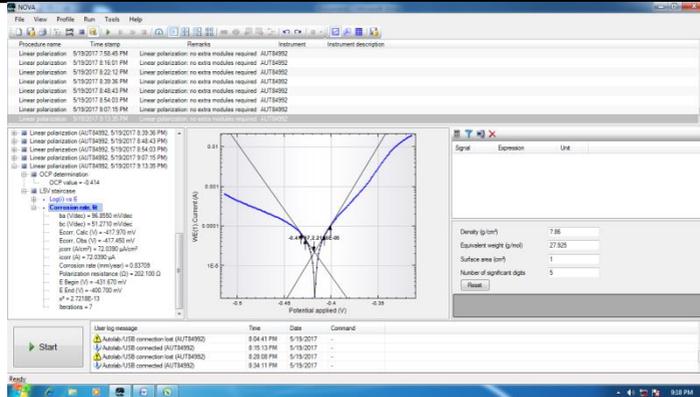
Gambar 1. Hasil Ekstrapolasi Pengujian Polarisis Tanpa Inhibitor



Gambar 2. Hasil Ekstrapolasi Pengujian Polarisasi Konsentrasi 50 mg

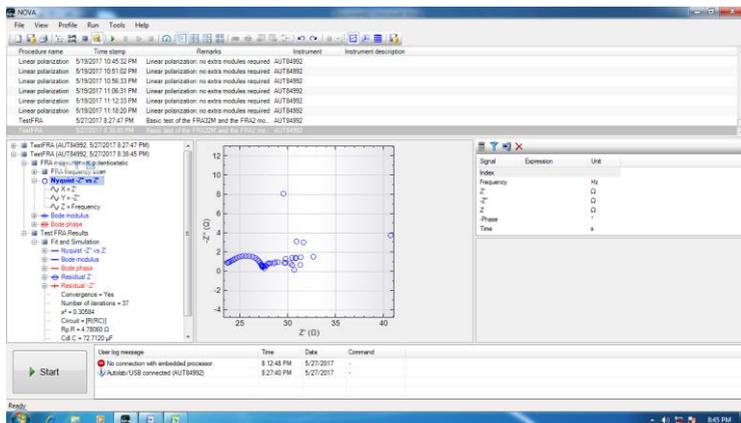


Gambar 3. Hasil Ekstrapolasi Pengujian Polarisasi Konsentrasi 100 mg



Gambar 6. Hasil Ekstrapolasi Pengujian Polarisasi Konsentrasi 250 mg

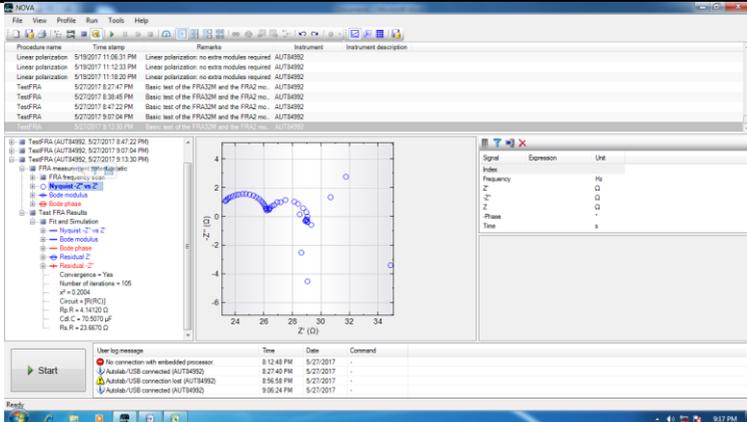
7. Pengujian Analisa EIS



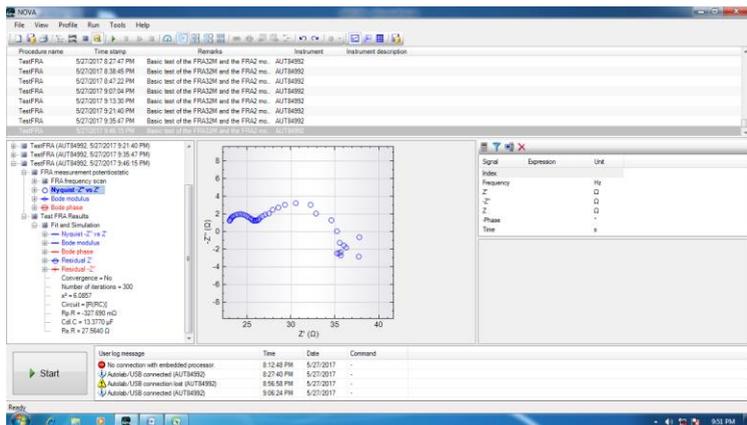
Gambar 7. Hasil Fitting Pengujian EIS Tanpa Inhibitor

Laporan Tugas Akhir

Departemen Teknik Mesin Industri



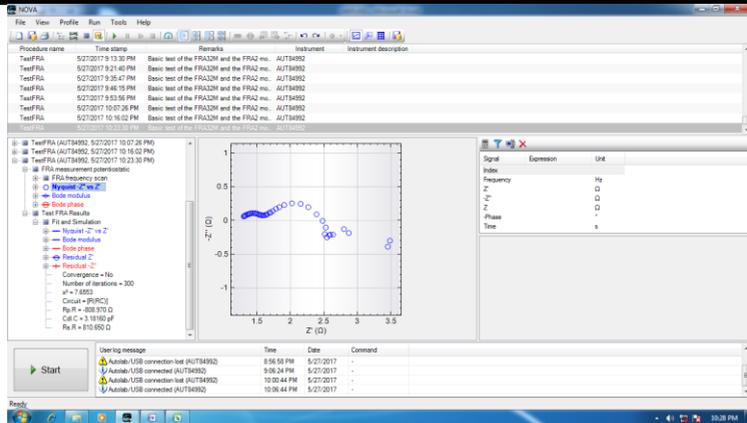
Gambar 8. Hasil Fitting Pengujian EIS dengan Penambahan Inhibitor konsentrasi 50 mg



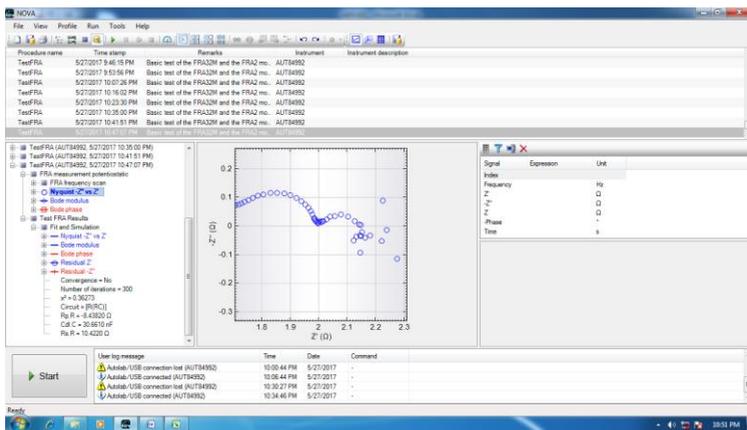
Gambar 9. Hasil Fitting Pengujian EIS dengan Penambahan Inhibitor konsentrasi 100 mg

Laporan Tugas Akhir

Departemen Teknik Mesin Industri



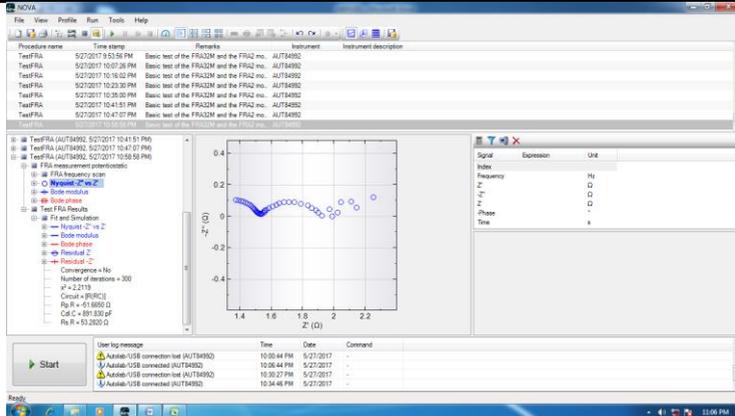
Gambar 10. Hasil Fitting Pengujian EIS dengan Penambahan Inhibitor konsentrasi 150 mg



Gambar 11. Hasil Fitting Pengujian EIS dengan Penambahan Inhibitor konsentrasi 200 mg

Laporan Tugas Akhir

Departemen Teknik Mesin Industri



Gambar 12. Hasil Fitting Pengujian EIS dengan Penambahan Inhibitor konsentrasi 250 mg

8. Pengujian Weight Loss

Perhitungan laju korosi :

Hitung terlebih dahulu luas permukaan material dengan menggunakan rumus :

$$\begin{aligned}
 L &= 2(p \times l) + (l \times t) + (p \times t) \\
 &= 2(0,3 \times 0,3) + (0,3 \times 0,06) + (0,3 \times 0,06) \\
 &= 2(0,126) \\
 &= 0,252 \text{ m}^2 = 2520 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

Kemudian hitung laju korosi dengan menggunakan rumus :

$$\text{Laju Korosi (mm/year)} = \frac{87600 \times \text{Weight Loss}}{D \times A \times T}$$

WL = Berat yang hilang (gr)

D= Berat jenis logam (gr/cm³)

A= Luas permukaan kontak (cm²)

T= Waktu (jam)

Laporan Tugas Akhir
Departemen Teknik Mesin Industri



Misalnya laju korosi pada pengujian 1 dalam waktu 1 jam pada konsentrasi 200 mg

$$\begin{aligned} \text{Laju Korosi (mm/year)} &= \frac{87600 \times \text{Weight Loss}}{D \times A \times T} \\ &= \frac{87600 \times 0,004}{7,85 \times 2520 \times 1} \\ &= 0,177130725 \text{ mm/year} \end{aligned}$$

Tabel 1. Hasil Pengujian Weight Loss Konsentrasi 200 mg

Pengujian Weight Loss						
Material : Baja API 5L grade B/ ASTM A53						
Konsentrasi : 200 mg						
Waktu (jam)		Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Weight Loss (gr)	Laju Korosi (mmpy)	Rata-rata (mmpy)
1	1	35.169	35.165	0.004	0.177130725	0.221413406
	2	36.638	36.631	0.007	0.309978769	
	3	38.557	38.553	0.004	0.177130725	
2	1	36.057	36.045	0.012	0.265696087	0.177130725
	2	34.648	34.646	0.002	0.044282681	
	3	34.429	34.419	0.01	0.221413406	
3	1	37.772	37.769	0.003	0.044282681	0.09348566
	2	36.626	36.618	0.008	0.11808715	
	3	41.676	41.668	0.008	0.11808715	
4	1	35.996	35.986	0.01	0.110706703	0.103326256
	2	36.488	36.48	0.008	0.088565362	
	3	37.068	37.058	0.01	0.110706703	
5	1	41.998	41.982	0.016	0.14170458	0.156465474
	2	39.684	39.673	0.011	0.097421899	
	3	37.884	37.858	0.026	0.230269942	



Tabel 2. Hasil Pengujian Weight Loss Tanpa Inhibitor

Pengujian Weight Loss						
Material : Baja API 5L grade B/ ASTM A53						
Konsentrasi : 0 mg						
Waktu (jam)		Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Weight Loss (gr)	Laju Korosi (mmpy)	Rata-rata (mmpy)
1	1	32.696	32.569	0.127	5.623900516	5.668183197
	2	33.343	33.22	0.123	5.446769791	
	3	37.358	37.224	0.134	5.933879284	
2	1	36.937	36.655	0.282	6.243858053	6.214336265
	2	37.979	37.682	0.297	6.575978162	
	3	40.537	40.274	0.263	5.823172581	
3	1	45.112	44.47	0.642	9.476493782	8.08896977
	2	40.049	39.554	0.495	7.306642402	
	3	39.139	38.632	0.507	7.483773127	
4	1	35.859	35.074	0.785	8.69047619	8.417399656
	2	37.992	37.265	0.727	8.048377313	
	3	37.021	36.252	0.769	8.513345466	
5	1	37.828	36.805	1.023	9.060236579	9.036619149
	2	38.282	37.286	0.996	8.8211101	
	3	41.111	40.069	1.042	9.228510767	

9. Perhitungan Efisiensi Inhibitor

$$Efisiensi\ Inhibisi = \frac{V_{ko} - V_{ki}}{V_{ko}} \times 100\%$$

Dimana :

V_{ko} = Laju reaksi korosi tanpa inhibitor

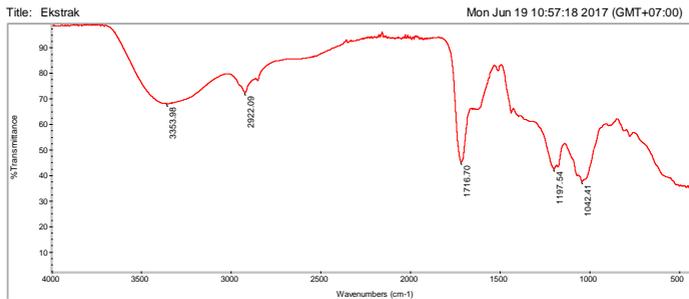
V_{ki} = Laju reaksi korosi dengan inhibitor

Misalnya efisiensi inhibitor pada waktu 1 jam



$$\begin{aligned}
 \text{Efisiensi Inhibisi} &= \frac{V_{ko} - V_{ki}}{V_{ko}} \times 100\% \\
 &= \frac{5.668183197 - 0.221413406}{5.668183197} \times 100\% \\
 &= 96.09375 \%
 \end{aligned}$$

10. Hasil Pengujian FTIR

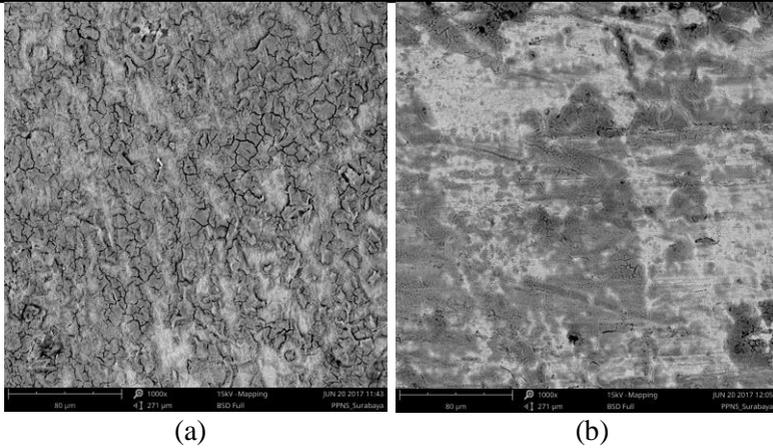


Collection time: Mon Jun 19 10:55:53 2017 (GMT+0) Mon Jun 19 10:57:04 2017 (GMT+07:00)

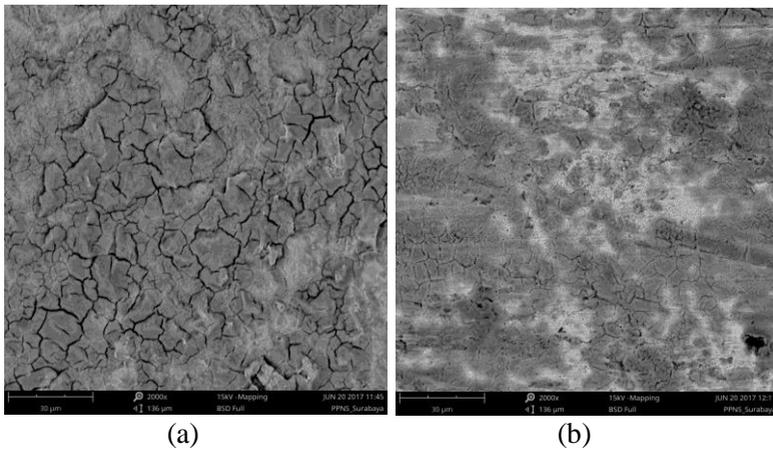
Region:	4000.00	400.00
Absolute threshold:	84.849	
Sensitivity:	50	
Peak list:		
Position:	1042.41	Intensity: 37.459
Position:	1197.54	Intensity: 42.347
Position:	1716.70	Intensity: 44.966
Position:	2922.09	Intensity: 72.258
Position:	3353.98	Intensity: 67.820

Index	Match	Compound name	Library
17763	67.34	Poly(acrylic acid), average MW ca. 4,000	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
17762	67.34	Poly(acrylic acid), average MW ca. 3,000	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
17760	67.33	Poly(acrylic acid), average MW ca. 750.0	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
17759	67.01	Poly(acrylic acid), average mv ca. 450.0	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
822	67.01	Poly(acrylic acid)	HR Nicolet Sampler Library
17761	66.16	Poly(acrylic acid), average MW ca. 1,250	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
441	61.19	Poly(acrylic acid)	HR Nicolet Sampler Library
1955	57.42	Bromosuccinic acid	HR Hummel Polymer and Additives
3892	57.25	Polycaprolactone triol, average mn ca. 3	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
00	00		
700	57.25	Poly(caprolactone) triol, m. w. 300	HR Nicolet Sampler Library

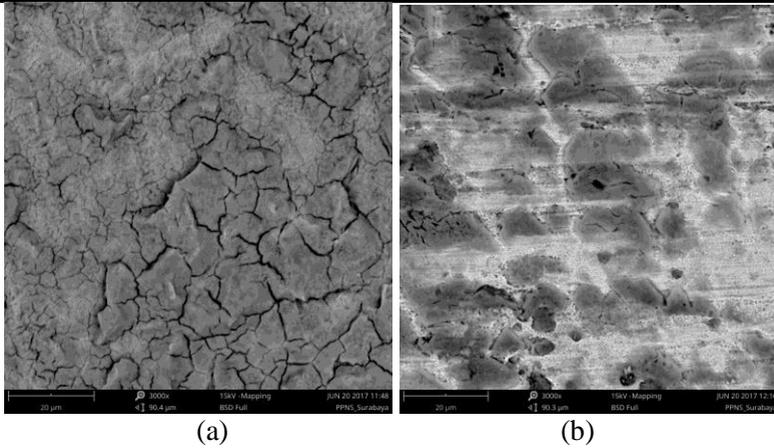
Gambar 13. Spektrum Hasil FTIR Inhibitor Ekstrak Kulit Jeruk Nipis



Gambar 16. Pebandingan Hasil Pengujian SEM Perbesaran 1000x (a) Tanpa Inhibitor (b) Dengan Inhibitor

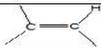


Gambar 17. Pebandingan Hasil Pengujian SEM Perbesaran 2000x (a) Tanpa Inhibitor (b) Dengan Inhibitor



Gambar 18. Perbandingan Hasil Pengujian SEM Perbesaran 3000x (a) Tanpa Inhibitor (b) Dengan Inhibitor

12. Tabel Spektra FTIR

Ikatan	Tipe Senyawa	Daerah frekuensi (cm ⁻¹)	Intensitas
C - H	Alkana	2850 – 2970 1340 - 1470	Kuat Kuat
C - H	Alkena 	3010 – 3095 675 - 995	Sedang Kuat
C - H	Alkuna 	3300	Kuat
C - H	Cincin Aromatik	3010 – 3100 690 – 900	Sedang Kuat
O - H	Fenol, monomer alkohol, alkohol ikatan hidrogen, fenol	3590 – 3650 3200 – 3600	Berubah-ubah Berubah-ubah, terkadang melebar
	monomer asam karboksilat, ikatan hidrogen asam karboksilat	3500 – 3650 2500 - 2700	Sedang Melebar
N - H	Amina, Amida	3300 – 3500	Sedang
C=C	Alkena	1610 – 1680	Berubah-ubah
C=C	Cincin Aromatik	1500 – 1600	Berubah-ubah
C≡C	Alkuna	2100 – 2260	Berubah-ubah
C - N	Amina, Amida	1180 – 1360	Kuat
C≡N	Nitril	2210 – 2280	Kuat
C - O	Alkohol, Eter, Asam Karborsilat, Ester	1050 – 1300	Kuat
C=O	Aldehid, Keton, Asam Karboksilat, Ester	1690 – 1760	Kuat
NO ₂	Senyawa Nitro	1500 – 1570 1300 - 1370	Kuat Kuat

Sumber : *Principle of Instrumental Analysis*, Skoog, Holler, Nieman, 1998.



14. Standar Pengujian ASTM G 5 - 87



Designation: G 5 - 87

Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements¹

This standard is issued under the fixed designation G 5; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

1. Scope

1.1 This test method describes an experimental procedure which can be used to check one's experimental technique and instrumentation. If followed, this test method will provide repeatable potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements that will reproduce data determined by others at other times and in other laboratories.

1.2 Values stated in SI units are to be regarded as the standard. Inch-pound units given in parentheses are for information only.

1.3 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Document

2.1 *ASTM Standard:*

G 3 Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing²

3. Significance and Use

3.1 The availability of a standard procedure, standard material, and a standard plot should make it easy for an investigator to check his techniques. This should lead to polarization curves in the literature which can be compared with confidence.

3.2 Samples of a standard ferritic Type 430 stainless steel (UNS S43000) used in obtaining standard reference plot are available for those who wish to check their own test procedure and equipment.³

3.3 Standard potentiostatic and potentiodynamic polarization plots are supplied with the purchase of the reference material. These reference data are based on the results from different laboratories that followed the standard procedure, using that material in 1.0 N H₂SO₄. Maximum and minimum current values are shown at each potential to indicate the acceptable range of values.

3.4 This test method may not be appropriate for polarization test of all materials or in all environments.

4. Apparatus

4.1 The test cell should be constructed to allow the following items to be inserted into the solution chamber: the test electrode, two auxiliary electrodes, a Luggin capillary with salt-bridge connection to the reference electrode, inlet and outlet for an inert gas, and a thermometer. The test cell shall be constructed of materials that will not corrode, deteriorate, or otherwise contaminate the test solution.

NOTE 1—Borosilicate glass and TFE-fluorocarbon have been found suitable.

4.1.1 A suitable cell is shown in Fig. 1 (1).⁴ A 1-L, round-bottom flask has been modified by the addition of various necks to permit the introduction of electrodes, gas inlet and outlet tubes, and a thermometer. The Luggin probe-salt bridge separates the bulk solution from the saturated calomel reference electrode, and the probe tip can be easily adjusted to bring it in close proximity with the working electrode.

4.2 *Potentiostat* (Note 2):

4.2.1 A potentiostat that will maintain an electrode potential within 1 mV of a preset value over a wide range of applied currents should be used. For the type and size of standard specimen supplied, the potentiostat should have a potential range from -0.6 to 1.6 V and an anodic current output range from 1.0 to 10³ μ A.

4.3 *Potential-Measuring Instruments* (Note 2):

4.3.1 The potential-measuring circuit should have a high input impedance on the order of 10⁷ to 10⁹ Ω to minimize current drawn from the system during measurements. Such circuits are provided with most potentiostats. Instruments should have sufficient sensitivity and accuracy to detect a change of 1.0 mV over a potential range between -0.6 and 1.6 V.

4.4 *Current-Measuring Instruments* (Note 2):

4.4.1 An instrument that is capable of measuring a current accurately to within 1 % of the absolute value over a current range between 1.0 and 10³ μ A for Type 430 stainless steel (UNS S43000) specimen with a surface area of approximately 5 cm².

4.5 *Anodic Polarization Circuit:*

4.5.1 A schematic potentiostatic anodic polarization wiring diagram (2) is illustrated in Fig. 2.

4.5.2 A scanning potentiostat is used for potentiodynamic measurements. For such measurements the potentiostat shall be capable of automatically varying the potential at a constant rate between two preset potentials. A record of the

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee G-1 on Corrosion of Metals.

Current edition approved March 27, 1987. Published May 1987. Originally published as G 5 - 69. Last previous edition G 5 - 82².

² Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.02.

³ These standard samples are available from ASTM Headquarters. Generally, one sample can be repolished and reused for many runs. This procedure is suggested to conserve the available material. Order PCN 12-700694-01.

⁴ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this test method.



G5

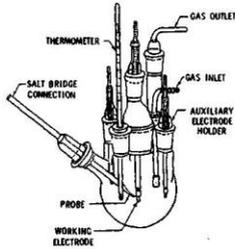


FIG. 1 Schematic Diagram of Polarization Cell (1)

potential and current is plotted continuously using such instruments as an X-Y recorder and a logarithmic converter incorporated into the circuit shown in Fig. 2. Some potentiostats have an output of the logarithm of the current as a voltage, which allows direct plotting of the potential log current curve using an X-Y recorder.

NOTE 2—The instrumental requirements are based upon values typical of the instruments in 15 laboratories.

4.6 Electrode Holder (1):

4.6.1 The auxiliary and working electrodes are mounted in the type of holder shown in Fig. 3. A longer holder is required for the working electrode than for the auxiliary electrode. A leak-proof assembly is obtained by the proper compression fit between the electrode and a TFE-fluorocarbon gasket. (Too much pressure may cause shielding of the electrode or breakage of the glass holder, and too little pressure may cause leakage and subsequently crevice corrosion which may affect the test results.)

4.7 Electrodes:

4.7.1 *Working Electrode*, prepared from a 12.7-mm (1/2-in.) length of 9.5-mm (3/8-in.) diameter rod stock. Each electrode is drilled, tapped, and mounted in the manner discussed in 4.6.1.

NOTE 3—If specimen forms are used other than those called for by this test method, for example, flat sheet specimen, care should be taken since it was shown that crevices may be introduced which can lead to erroneous results (see Fig. XI.1).

4.7.1.1 The standard AISI Type 430 stainless steel (UNS S43000) should be used if one wishes to reproduce a standard reference plot. This material is prepared from a single heat of metal that is mill-annealed for 1/2 h at 815°C (1500°F) and air cooled. The chemical composition of the standard stainless steel is supplied with the purchase of reference material.

4.7.2 Auxiliary Electrodes:

4.7.2.1 Two platinum auxiliary electrodes are prepared from high-purity rod stock. Each electrode is drilled, tapped, and mounted with a TFE-fluorocarbon gasket in the same manner as the working electrode. A large platinum sheet sealed into a glass holder is also acceptable.

4.7.2.2 A platinized surface may be utilized because of the increased surface area. This may be accomplished by clean-

ing the surface in hot aqua regia (3 parts concentrated HCl and 1 part concentrated HNO₃), washing, and then drying. Both electrodes are platinized by immersing them in a solution of 3% platinum chloride and 0.02% lead acetate and electrolyzing at a current density of 40 to 50 mA/cm² for 4 or 5 min (1,3). The polarity is reversed every minute. Occluded chloride is removed by electrolyzing in a dilute (10%) sulfuric acid solution for several minutes with a reversal in polarity every minute. Electrodes are rinsed thoroughly and stored in distilled water until ready for use. Since certain ions can poison these electrodes, periodic checks of platinized

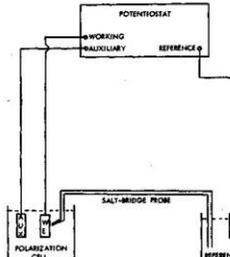


FIG. 2 Schematic Potentiostatic Anodic Polarization Wiring Diagram (2)

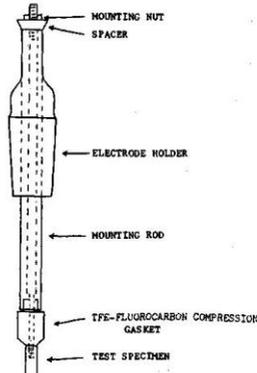


FIG. 3 Specimen Mounted on Electrode Holder



platinum potentials against a known reference electrode should be made.

4.7.2.3 Alternatively, graphite auxiliary electrodes can be used, but material retained by the graphite may contaminate subsequent experiments. This contamination can be minimized by using high-density graphite or avoided by routinely replacing the graphite electrode.

4.7.3 Reference Electrode (4):

4.7.3.1 A saturated calomel electrode with a controlled rate of leakage (about 3 $\mu\text{L/h}$) is recommended. This type of electrode is durable, reliable, and commercially available. Precautions shall be taken to ensure that it is maintained in the proper condition. The potential of the calomel electrode should be checked at periodic intervals to ensure the accuracy of the electrode. For other alloy-electrolyte combinations a different reference electrode may be preferred in order to avoid contamination of the reference electrode or the electrolyte.

4.7.3.2 Alternatively, a saturated calomel electrode utilizing a semi-permeable membrane or porous plug tip may be used. These may require special care.

5. Experimental Procedure

5.1 Prepare 1 L of 10% H_2SO_4 from A.C.S. reagent grade acid and distilled water, for example, by using 27.8 mL of 98% H_2SO_4 solution. Transfer 900 mL of solution to the clean polarization cell.

5.2 Place the platinized auxiliary electrodes, salt-bridge probe, and other components in the test cell and temporarily close the center opening with a glass stopper. Fill the salt bridge with test solution.

NOTE 4—When using a controlled leakage salt bridge, the levels of the solution in the reference and polarization cells should be the same to avoid siphoning. If this is impossible, a closed solution-wet (not greased) stopcock can be used in the salt bridge to eliminate siphoning, or a semi-permeable membrane or porous plug tip may be used on the salt bridge.

5.3 Bring the temperature of the solution to 30 \pm 1°C by immersing the test cell in a controlled-temperature water bath or by other convenient means.

5.4 Reduce oxygen levels in solution prior to immersion of the test specimen. This may be accomplished by bubbling an oxygen-free gas such as hydrogen, argon, or nitrogen at a rate of 150 cm^3/min for a minimum of 1/2 h.

5.5 Prepare the working electrode surface within 1 h of the experiment. Wet grind with 240-grit SiC paper, wet polish with 600-grit SiC paper until previous coarse scratches are removed, rinse, and dry. (Drilled and tapped specimens can be threaded onto an electrode holder rod and secured in a lathe or electric drill for this operation.)

5.6 Determine the surface area by measuring all dimensions to the nearest 0.01 mm, subtracting the area under the gasket (usually 0.20 to 0.25 cm^2).

5.7 Mount the specimen on the electrode holder as described in 4.6.1. Tighten the assembly by holding the upper end of the mounting rod in a vise or clamp while tightening the mounting nut until the gasket is properly compressed.

5.8 Degrease the specimen just prior to immersion and then rinse in distilled water.

5.9 Transfer the specimen to the test cell and adjust the salt-bridge probe tip so it is about 2 mm or 2 times the tip diameter, whichever is larger from the specimen electrode.

5.10 Record the open-circuit specimen potential, that is, the corrosion potential, after 55 min immersion. If platinum counter electrodes and hydrogen gas are used, record the platinum potential 50 min after immersion of the specimen.

5.11 Potential Scan:

5.11.1 Start the potential scan or step 1 h after specimen immersion, beginning at the corrosion potential (E_{corr}) for potentiodynamic measurements and the nearest 50-mV increment above E_{corr} for the potentiostatic measurements. Proceed through +1.60 V versus saturated calomel electrode (SCE) (active to noble).

5.11.2 In the potentiostatic method, use a potentiostatic potential step rate of 50 mV every 5 min, recording the current at the end of each 5-min period at potential. These steps are repeated until a potential of +1.6 V SCE is reached.

5.11.3 In the potentiodynamic method, use a potentiodynamic potential sweep rate of 0.6 V/h ($\pm 5\%$) recording the current continuously with change in potential from the corrosion potential to +1.6 V SCE.

5.12 Plot anodic polarization data on semilogarithmic paper in accordance with Practice G 3, (potential-ordinate, current density-abscissa). If a potentiostat with a logarithmic converter is used, this plot can be produced directly during the measurement.

6. Standard Reference Plots

6.1 Standard polarization plots prepared from data obtained by following the standard procedure discussed in this test method are supplied with the purchase of reference material. Typical data are shown in Figs. 4 and 5 (S). The plots show a range of acceptable current density values at each potential. The average corrosion potential is -0.52 V, and the average platinized platinum potential is -0.26 V.

6.2 Typical deviations from the standard potentiostatic plot are shown and discussed in Appendix XI. Reference to this discussion may be helpful in determining the reasons for differences between an experimental curve and the standard plots.

6.3 The potentiodynamic standard curve shows good agreement with the potentiostatic standard curve determined at an equivalent overall polarization rate.

7. Precision and Bias

7.1 The repeatability of this test method is illustrated by Fig. 6. Current variability in regions where the effect of potential on current is small will generally be 10% or less.

7.2 The ability of different laboratories to reproduce the results in this test method is shown in Fig. 4. The band shows a better than plus or minus two standard deviations for all laboratories providing results.

7.3 Factors that contribute bias to this test method are discussed in Appendix XI. In general, the major effects which can bias results are: reference electrode problems, crevice problems in the specimen mounting assembly, oxygen contamination, and current measurement instrument inaccuracies.



G5

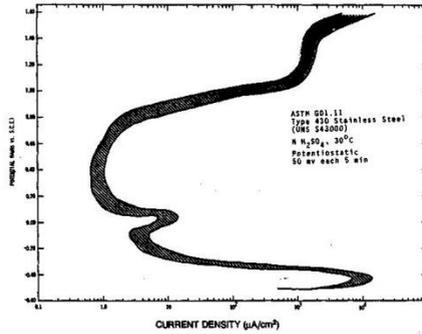


FIG. 4 Typical Standard Potentiostatic Anodic Polarization Plot

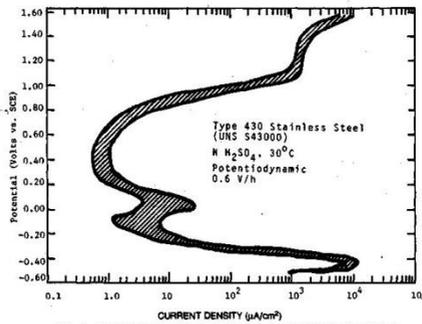


FIG. 5 Typical Standard Potentiodynamic Anodic Polarization Plot



G 5

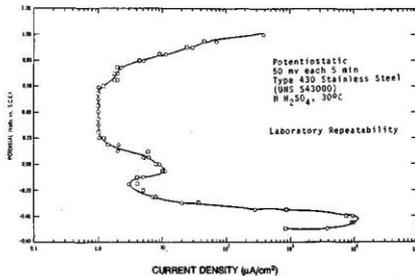


FIG. 6 Laboratory Repeatability of Potentiostatic Anodic Polarization Curve

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

XI. DEVIATIONS FROM STANDARD POLARIZATION PLOTS

XI.1 High Passive Current Densities (Crevice Effect)

XI.1.1 Examples of passive current densities which are greater than those for a standard potentiostatic plot are shown in Fig. XI.1. This, effect is attributable to a crevice between the specimen and mounting material (6). The crevice may be the result of the mounting technique or the material used for mounting.

XI.1.2 The potential drop along the narrow path of the electrolyte within the crevice between the specimen and the mounting material prevents this area from passivating. Although the face of the specimen passivates, the high current density associated with the active crevice contributes to an increase in the measured current density. Specimen electrodes for polarization measurements must be mounted without crevice sites to avoid such erroneous passive current densities.

XI.2 Low Passive Current Densities (Instrumental Effect)

XI.2.1 The low passive current densities shown in Fig.

XI.2 are undoubtedly the result of instrumental problems. This effect can be eliminated by calibrating the current over the entire range of interest before conducting an experiment.

XI.3 Cathodic Currents During Anodic Polarization (Oxygen Effect)

XI.3.1 The "negative loop" at potentials between -0.350 V and -0.050 V, shown by dashed lines in Fig. XI.3, occurs when the total cathodic current exceeds the total anodic current. Such results are characteristic of oxygen being present in the solution (7). This effect can be anticipated if the recorded platinum potential is considerably more noble than -0.26 V. The gas purge should remove oxygen from the system, but there may be an air leak or the purge gas may be contaminated with oxygen. It is necessary to take extreme care in the design of glassware equipment and to ensure a high order of purity in the gas that is used to avoid oxygen contamination.



45

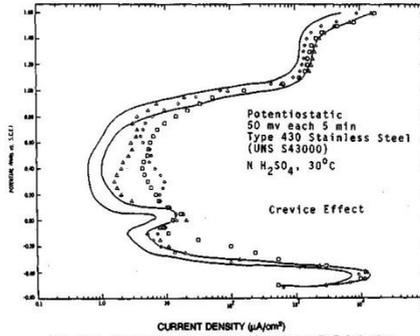


FIG. X1.1 Crevice Effect During Potentiostatic Anodic Polarization

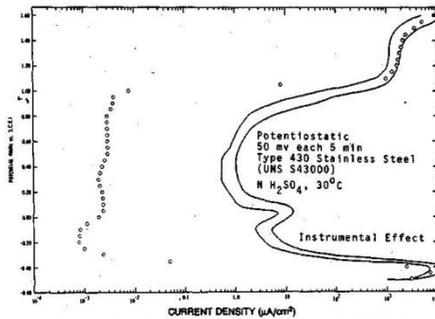


FIG. X1.2 Instrumental Effect During Potentiostatic Anodic Polarization



G 5

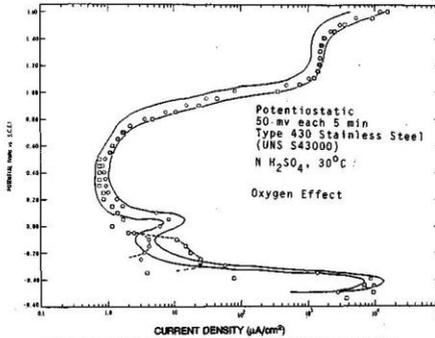


FIG. X1.3 Oxygen Effect During Potentiostatic Anodic Polarization

REFERENCES

- (1) Greene, N. D., *Experimental Electrode Kinetics*, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 1965.
- (2) France, Jr., W. D., "Controlled Potential Corrosion Tests, Their Applications and Limitations," *Materials Research and Standards*, Vol 9, No. 8, 1969, p. 21.
- (3) Melton, M. G., *Quantitative Analysis*, Thomas Y. Crowell Co., New York, 1955.
- (4) Ives, D. J., and Janz, G. J., *Reference Electrodes, Theory and Practice*, Academic Press, New York, NY, 1961.
- (5) "The Reproducibility of Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements," ASTM Subcommittee G-1/X1, Section 1, Interlaboratory Testing Program, June, 1967. Available from ASTM Headquarters as RR: G01-1000.
- (6) Greene, N. D., France, Jr., W. D., and Wilde, B. E., "Electrode Mounting for Potentiostatic Anodic Polarization Studies," *Corrosion*, CORRA, Vol 21, 1965, p. 275.
- (7) Greene, N. D., "Effect of Oxygen on the Active-Passive Behavior of Stainless Steel," *Journal of the Electrochemical Society*, JESOA, Vol 107, 1960, p. 457.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.



15. Standar Pengujian ASTM G102



Designation: G 102 – 89 (Reapproved 1994)¹

Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements¹

This standard is issued under the fixed designation G 102; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

¹ NOTE—Section 6 was added editorially in May 1994.

1. Scope

1.1 This practice is intended to provide guidance in converting the results of electrochemical measurements to rates of uniform corrosion. Calculation methods for converting corrosion current density values to either mass loss rates or average penetration rates are given for most engineering alloys. In addition, some guidelines for converting polarization resistance values to corrosion rates are provided.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D2776 Test Methods for Corrosivity of Water in the Absence of Heat Transfer (Electrical Methods)²
- G 5 Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements³
- G 59 Practice for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements³

3. Significance and Use

3.1 Electrochemical corrosion rate measurements often provide results in terms of electrical current. Although the conversion of these current values into mass loss rates or penetration rates is based on Faraday's Law, the calculations can be complicated for alloys and metals with elements having multiple valence values. This practice is intended to provide guidance in calculating mass loss and penetration rates for such alloys. Some typical values of equivalent weights for a variety of metals and alloys are provided.

3.2 Electrochemical corrosion rate measurements may provide results in terms of electrical resistance. The conversion of these results to either mass loss or penetration rates requires additional electrochemical information. Some approaches for estimating this information are given.

3.3 Use of this practice will aid in producing more consistent corrosion rate data from electrochemical results. This will make results from different studies more comparable and minimize calculation errors that may occur in transforming electrochemical results to corrosion rate values.

4. Corrosion Current Density

4.1 Corrosion current values may be obtained from galvanic cells and polarization measurements, including Tafel extrapolations or polarization resistance measurements. (See Reference Test Method G 5 and Practice G 59 for examples.) The first step is to convert the measured or estimated current value to current density. This is accomplished by dividing the total current by the geometric area of the electrode exposed to the solution. It is assumed that the current distributes uniformly across the area used in this calculation. In the case of galvanic couples, the exposed area of the anodic specimen should be used. This calculation may be expressed as follows:

$$i_{cor} = \frac{I_{cor}}{A} \quad (1)$$

where:

i_{cor} = corrosion current density, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$,
 I_{cor} = total anodic current, μA , and
 A = exposed specimen area, cm^2 .

Other units may be used in this calculation. In some computerized polarization equipment, this calculation is made automatically after the specimen area is programmed into the computer. A sample calculation is given in Appendix X1.

4.2 *Equivalent Weight*—Equivalent weight, EW, may be thought of as the mass of metal in grams that will be oxidized by the passage of one Faraday ($96\,489 \pm 2\text{ C}$ (amp-sec)) of electric charge.

NOTE 1—The value of EW is not dependent on the unit system chosen and so may be considered dimensionless.

For pure elements, the equivalent weight is given by:

$$EW = \frac{W}{n} \quad (2)$$

where:

W = the atomic weight of the element, and
 n = the number of electrons required to oxidize an atom of the element in the corrosion process, that is, the valence of the element.

4.3 For alloys, the equivalent weight is more complex. It is usually assumed that the process of oxidation is uniform and does not occur selectively to any component of the alloy. If this is not true, then the calculation approach will need to be adjusted to reflect the observed mechanism. In addition, some rationale must be adopted for assigning values of n to

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G01 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.11 on Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.

Current edition approved Feb. 24, 1989. Published May 1989.

² Discontinued—See 1990 Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.02.

Laporan Tugas Akhir

Departemen Teknik Mesin Industri



G 102

the elements in the alloy because many elements exhibit more than one valence value.

4.4 To calculate the alloy equivalent weight, the following approach may be used. Consider a unit mass of alloy oxidized. The electron equivalent for 1 g of an alloy, Q is then:

$$Q = \sum \frac{n_i f_i}{W_i} \quad (3)$$

where:

f_i = the mass fraction of the i^{th} element in the alloy,
 W_i = the atomic weight of the i^{th} element in the alloy, and
 n_i = the valence of the i^{th} element of the alloy.
 Therefore, the alloy equivalent weight, EW , is the reciprocal of this quantity:

$$EW = \frac{1}{\sum \frac{n_i f_i}{W_i}} \quad (4)$$

Normally only elements above 1 mass percent in the alloy are included in the calculation. In cases where the actual analysis of an alloy is not available, it is conventional to use the mid-range of the composition specification for each element, unless a better basis is available. A sample calculation is given in Appendix X2 (1).⁴

4.5 Valence assignments for elements that exhibit multiple valences can create uncertainty. It is best if an independent technique can be used to establish the proper valence for each alloying element. Sometimes it is possible to analyze the corrosion products and use those results to establish the proper valence. Another approach is to measure or estimate the electrode potential of the corroding surface. Equilibrium diagrams showing regions of stability of various phases as a function of potential and pH may be created from thermodynamic data. These diagrams are known as Potential-pH (Pourbaix) diagrams and have been published by several authors (2, 3). The appropriate diagrams for the various alloying elements can be consulted to estimate the stable valence of each element at the temperature, potential, and pH of the contacting electrolyte that existed during the test.

NOTE 2—Some of the older publications used inaccurate thermodynamic data to construct the diagrams and consequently they are in error.

4.6 Some typical values of EW for a variety of metals and alloys are given in Table 1.

4.7 *Calculation of Corrosion Rate*—Faraday's Law can be used to calculate the corrosion rate, either in terms of penetration rate (CR) or mass loss rate (MR) (4):

$$CR = K_1 \frac{i_{\text{cor}}}{\rho} EW \quad (5)$$

$$MR = K_2 i_{\text{cor}} EW \quad (6)$$

where:

CR is given in mm/yr, i_{cor} in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$,
 $K_1 = 3.27 \times 10^{-3}$, mm g/ $\mu\text{A cm yr}$ (Note 3),

⁴ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

ρ = density in g/cm³, (see Practice G 1 for density values for many metals and alloys used in corrosion testing),
 $MR = \text{g}/\text{m}^2\text{d}$, and
 $K_2 = 8.954 \times 10^{-3}$, g cm²/ $\mu\text{A m}^2 \text{d}$ (Note 3).

NOTE 3— EW is considered dimensionless in these calculations.

Other values for K_1 and K_2 for different unit systems are given in Table 2.

4.8 Errors that may arise from this procedure are discussed below.

4.8.1 Assignment of incorrect valence values may cause serious errors (5).

4.8.2 The calculation of penetration or mass loss from electrochemical measurements, as described in this standard, assumes that uniform corrosion is occurring. In cases where non-uniform corrosion processes are occurring, the use of these methods may result in a substantial underestimation of the true values.

4.8.3 Alloys that include large quantities of metalloids or oxidized materials may not be able to be treated by the above procedure.

4.8.4 Corrosion rates calculated by the method above where abrasion or erosion is a significant contributor to the metal loss process may yield significant underestimation of the metal loss rate.

5. Polarization Resistance

5.1 Polarization resistance values may be approximated from either potentiodynamic measurements near the corrosion potential (see Practice G 59) or stepwise potentiostatic polarization using a single small potential step, ΔE , usually either 10 mV or -10 mV, (see Test Method D 2776). Values of ± 5 and ± 20 mV are also commonly used. In this case, the specimen current, ΔI , is measured after steady state occurs, and $\Delta E/\Delta I$ is calculated. Potentiodynamic measurements yield curves of I versus E and the reciprocal of the slope of the curve (dE/dI) at the corrosion potential is measured. In most programmable potentiodynamic polarization equipment, the current is converted to current density automatically and the resulting plot is of i versus E . In this case, the polarization resistance is given by dE/di at the corrosion potential and 5.2 is not applicable.

5.2 It is necessary to multiply the dE/dI or $\Delta E/\Delta I$ value calculated above by the exposed specimen geometric area to obtain the polarization resistance. This is equivalent to the calculation shown in 4.1 for current density.

5.3 The Stern-Geary constant B must be estimated or calculated to convert polarization resistance values to corrosion current density (6, 8).

5.3.1 Calculate Stern-Geary constants from known Tafel slopes where both cathodic and anodic reactions are activation controlled, that is, there are distinct linear regions near the corrosion potential on an $E \log i$ plot:

$$B = \frac{ba bc}{2.303 (ba + bc)} \quad (7)$$

where:

ba = slope of the anodic Tafel reaction, when plotted on base 10 logarithmic paper in V/decade,
 bc = slope of the cathodic Tafel reaction when plotted on base 10 logarithmic paper in V/decade, and
 B = Stern-Geary constant, V.

Laporan Tugas Akhir

Departemen Teknik Mesin Industri



G 102

TABLE 1 Equivalent Weight Values for a Variety of Metals and Alloys

Common Designation	UNS	Elements w/Constant Valence	Lowest		Second		Third		Fourth	
			Variable Valence	Equivalent Weight	Variable Valence	Equivalent Weight	Element/Valence	Equivalent Weight	Element/Valence	Equivalent Weight
Aluminum Alloys:										
AA1100	A91100	Al/3		8.99						
AA2024	A92024	Al/3, Mg/2	Cu/1	9.38	Cu/2	9.32				
AA2219	A92219	Al/3	Cu/1	9.51	Cu/2	9.42				
AA3003	A93003	Al/3	Mn/2	9.07	Mn/4	9.03	Mn 7	8.98		
AA3004	A93004	Al/3, Mg/2	Mn/2	9.09	Mn/4	9.06	Mn 7	9.00		
AA3005	A93005	Al/3, Mg/2		9.01						
AA5050	A95050	Al/3, Mg/2		9.03						
AA5052	A95052	Al/3, Mg/2		9.05						
AA5083	A95083	Al/3, Mg/2		9.09						
AA5086	A95086	Al/3, Mg/2		9.09						
AA5154	A95154	Al/3, Mg/2		9.08						
AA5454	A95454	Al/3, Mg/2		9.06						
AA5456	A95456	Al/3, Mg/2		9.11						
AA6061	A96061	Al/3, Mg/2		9.01						
AA6070	A96070	Al/3, Mg/2, Si/4		8.98						
AA6101	A96101	Al/3		8.99						
AA7072	A97072	Al/3, Zn/2		9.06						
AA7075	A97075	Al/3, Zn/2, Mg/2	Cu/1	9.58	Cu/2	9.55				
AA7079	A97079	Al/3, Zn/2, Mg/2		9.37						
AA7178	A97178	Al/3, Zn/2, Mg/2	Cu/1	9.71	Cu/2	9.68				
Copper Alloys:										
CDA110	C11000		Cu/1	63.55	Cu/2	31.77				
CDA220	C22000	Zn/2	Cu/1	58.07	Cu/2	31.86				
CDA230	C23000	Zn/2	Cu/1	55.55	Cu/2	31.91				
CDA260	C26000	Zn/2	Cu/1	49.51	Cu/2	32.04				
CDA280	C28000	Zn/2	Cu/1	46.44	Cu/2	32.11				
CDA444	C44300	Zn/2	Cu/1, Sn/2	50.42	Cu/1, Sn/4	50.00	Cu/2, Sn/4	32.00		
CDA657	C68700	Zn/2, Al/3	Cu/1	48.03	Cu/2	30.29				
CDA608	C60800	Al/3	Cu/1	47.114	Cu/2	27.76				
CDA510	C51000		Cu/1, Sn/2	63.32	Cu/1, Sn/4	60.11	Cu/2, Sn/4	31.66		
CDA524	C52400		Cu/1, Sn/2	63.10	Cu/1, Sn/4	57.04	Cu/2, Sn/4	31.55		
CDA655	C65500	Si/4	Cu/1	50.21	Cu/2	28.51				
CDA706	C70600	Ni/2	Cu/1	56.92	Cu/2	31.51				
CDA715	C71500	Ni/2	Cu/1	46.69	Cu/2	30.98				
CDA752	C75200	Ni/2, Zn/2	Cu/1	46.38	Cu/2	31.46				
Stainless Steels:										
304	S30400	Ni/2	Fe/2, Cr/3	25.12	Fe/3, Cr/3	18.99	Fe/3, Cr/6	15.72		
321	S32100	Ni/2	Fe/2, Cr/3	25.13	Fe/3, Cr/3	19.08	Fe/3, Cr/6	15.78		
309	S30900	Ni/2	Fe/2, Cr/3	24.62	Fe/3, Cr/3	19.24	Fe/3, Cr/6	15.33		
310	S31000	Ni/2	Fe/2, Cr/3	24.44	Fe/3, Cr/3	19.73	Fe/3, Cr/6	15.36		
316	S31600	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3	25.30	Fe/2, Cr/3, Mo/4	25.33	Fe/3, Cr/6, Mo/6	19.14	Fe/3, Cr/6, Mo/6	16.11
317	S31700	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3	25.26	Fe/2, Cr/3, Mo/4	25.03	Fe/3, Cr/3, Mo/6	19.15	Fe/3, Cr/6, Mo/6	15.82
410	S41000		Fe/2, Cr/3	25.94	Fe/3, Cr/3	18.45	Fe/3, Cr/6	16.28		
430	S43000		Fe/2, Cr/3	25.30	Fe/3, Cr/3	18.38	Fe/3, Cr/6	15.58		
446	S44600		Fe/2, Cr/3	24.22	Fe/3, Cr/3	18.28	Fe/3, Cr/6	14.46		
20CB3 ^a	N08020	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3, Cu/1	23.98	Fe/2, Cr/3, Mo/4, Cu/1	23.63	Fe/3, Cr/3, Mo/6, Cu/2	18.98	Fe/3, Cr/6, Mo/6, Cu/2	15.50
Nickel Alloys:										
200	N02200	Ni/2		29.36	Ni/3	19.57				
400	N04400	Ni/2	Cu/1	36.82	Cu/2	30.12				
600	N06900	Ni/2	Fe/2, Cr/3	26.41	Fe/3, Cr/3	25.44	Fe/3, Cr/6	20.73		
800	N08800	Ni/2	Fe/2, Cr/3	25.10	Fe/3, Cr/3	20.76	Fe/3, Cr/6	16.59		
825	N08825	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3, Cu/1	25.52	Fe/2, Cr/3, Mo/4, Cu/1	25.32	Fe/3, Cr/3, Mo/6, Cu/2	21.70	Fe/3, Cr/6, Mo/6, Cu/2	17.10

Laporan Tugas Akhir

Departemen Teknik Mesin Industri



G 102

TABLE 1 Continued

Common Designation	UNS	Elements w/Constant Valence	Lowest		Second		Third		Fourth	
			Variable Valence	Equivalent Weight	Variable Valence	Equivalent Weight	Element/Valence	Equivalent Weight	Element/Valence	Equivalent Weight
Nickel Alloys (continued)										
B	N10001	Ni/2	Mo/3, Fe/2	30.05	Mo/4, Fe/2	27.50	Mo/6, Fe/2	23.52	Mo/6, Fe/3	23.23
C-22 ^a	N06022	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3, W/4	26.04	Fe/2, Cr/3, Mo/4, W/4	25.12	Fe/2, Cr/3, Mo/6, W/6	23.28	Fe/3, Cr/6, Mo/6, W/6	17.88
C-276	N10276	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3, W/4	27.09	Cr/3, Mo/4	25.90	Fe/2, Cr/3, Mo/6, W/6	23.63	Fe/3, Cr/6, Mo/6, W/6	19.14
G	N06007	Ni/2	(1)	25.46	(2)	22.22	(3)	22.04	(4)	17.03
Carbon Steel:										
(1) = Fe/2, Cr/3, Mo/3, Cu/1, Nb/4, Mn/2										
(2) = Fe/2, Cr/3, Mo/4, Cu/2, Nb/5, Mn/2										
(3) = Fe/3, Cr/3, Mo/6, Cu/2, Nb/5, Mn/2										
(4) = Fe/3, Cr/6, Mo/6, Cu/2, Nb/5, Mn/4										
Other Metals:										
Vq	M14142	Mg/2		12.15						
Mg	R03600		Mo/3	31.98	Mo/4	23.98	Mo/6	15.99		
Ag	P07016		Ag/1	107.87	Ag/2	53.93				
Ta	R05210	Ta/5		36.19						
Sn	L13002			59.34	Sn/4	29.67				
Ti	R50400		Ti/2	23.95	Ti/3	15.97	Ti/4	11.98		
Zn	Z19001	Zn/2		32.68						
Zr	R60701	Zr/4		22.80						
Pb	L50045		Pb/2	103.59	Pb/4	51.80				

^a Registered trademark Carpenter Technology.

^b Registered trademark Haynes International.

Note 1—Alloying elements at concentrations below 1% by mass were not included in the calculation, for example, they were considered part of the basis metal.

Note 2—Mid-range values were assumed for concentrations of alloying elements.

Note 3—Only consistent valence groupings were used.

Note 4—Equation (4) was used to make these calculations.

TABLE 2 Values of Constants for Use in Faraday's Equation Rate

A				
Penetration Rate Unit (CR)	i_{cor} Unit	ρ Unit	K_1	Units of K_1^a
mpy	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	g/cm^3	0.1288	mpy $\mu\text{A}/\text{cm}$
mm/yr ^b	A/m^2	kg/m^3	327.2	mm $\text{kg}/\text{A m y}$
	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	g/cm^3	3.27×10^{-3}	mm $\mu\text{A}/\text{cm y}$
B				
Mass Loss Rate Unit	i_{cor} Unit	K_2	Units of K_2^a	
$\text{g}/\text{m}^2\text{d}^b$	A/m^2	0.8953	g/Ad	
$\text{mg}/\text{dm}^2\text{d}$ (mdd)	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.0895	$\text{mg cm}^2/\mu\text{A dm}^2 \text{d}$	
$\text{mg}/\text{dm}^2\text{d}$ (mdd)	$\mu\text{A}/\text{m}^2$	8.953×10^{-3}	$\text{mg m}^2/\text{A dm}^2 \text{d}$	

^a EW is assumed to be dimensionless.

^b SI unit.

5.3.2 In cases where one of the reactions is purely diffusion controlled, the Stern-Geary constant may be calculated:

$$B = \frac{b}{2.303} \quad (8)$$

where:

b = the activation controlled Tafel slope in V/decade.

It should be noted in this case that the corrosion current density will be equal to the diffusion limited current density. A sample calculation is given in Appendix X4.

Cases where both activation and diffusion effects are similar in magnitude are known as mixed control. The reaction under mixed control will have an apparently larger b value than predicted for an activation control, and a plot of E versus $\log I$ will tend to curve to an asymptote parallel to the potential axis. The estimation of a B value for situations

involving mixed control requires more information in general and is beyond the scope of this standard. In general, Eqs 7 and 8 may be used, and the corrosion rate calculated by these two approximations may be used as lower and upper limits of the true rate.

NOTE 4—Electrodes exhibiting stable passivity will behave as if the anodic reaction were diffusion limited, except that the passive current density is not affected by agitation.

5.3.3 It is possible to estimate b_a and b_c from the deviation from linearity of polarization curves in the 20–50 mV region around the corrosion potential. Several approaches have been proposed based on analyses of electrode kinetic models. See Refs (9–11) for more information.

5.3.4 In cases where the reaction mechanism is known in detail, the Tafel slopes may be estimated from the rate controlling step in the mechanism of the reaction. In general, Tafel slopes are given by (12):



G 102

$$b = \frac{KRT}{nF} \quad (9)$$

where:

- K = a constant,
- R = the perfect gas constant,
- T = the absolute temperature,
- n = the number of electrons involved in the reaction step, and
- F = Faraday's constant.

At 25°C, $\left(\frac{RT}{2.303 F}\right)$ is 59.2 mV/decade. For simple one electron reactions, K is usually found to be 2.0.

5.3.5 In cases where the Tafel slopes cannot be obtained from any of the methods described above, it may be necessary to determine the Stern-Geary constant experimentally by measuring mass loss and polarization resistance values.

5.4 The corrosion current density may be calculated from the polarization resistance and the Stern-Geary constant as follows:

$$i_{\text{cor}} = \frac{B}{R_p} \quad (10)$$

The corrosion rate may then be calculated from the corrosion current, as described in Section 4. A sample calculation is given in Appendix X5.

5.5 There are several sources of errors in polarization resistance measurements:

5.5.1 Solution resistivity effects increase the apparent polarization resistance, whether measured by the potentiostatic or potentiodynamic methods (13). The effect of solution resistance is a function of the cell geometry, but the following expression may be used to approximate its magnitude.

$$R_p = R_a - \rho l \quad (11)$$

where:

- R_p = the apparent polarization resistance, ohm cm²,
- ρ = the electrolyte resistivity in ohm cm,

l = the distance between the specimen electrode and the Luggin probe tip, or the reference electrode in cm, and

R_p = the true polarization resistance in ohm cm². Significant solution resistivity effects cause the corrosion rate to be underestimated. A sample calculation is given in Appendix X6.

5.5.2 Potentiodynamic techniques introduce an additional error from capacitive charging effects. In this case, the magnitude of the error is proportional to scan rate. The error is illustrated by Eq (12):

$$I_{\text{total}} = I_f + c \left(\frac{dV}{dt}\right) \quad (12)$$

where:

- I_{total} = the cell current,
- I_f = the Faradaic current associated with anodic and cathodic processes,
- c = the electrode capacitance, and
- dV/dt = the scan rate.

The capacitance charging effect will cause the calculated polarization resistance to be in error. Generally, this error is small with modest scan rates (14).

5.5.3 Corroding electrodes may be the site for other electrochemical reactions. In cases where the corrosion potential is within 50 to 100 mV of the reversible potential of the corroding electrode, the electrochemical reactions will occur simultaneously on the electrode surface. This will cause either the anodic or cathodic b value to appear smaller than the corrosion reaction above. Consequently, the Stern-Geary constant B will be inflated and the predicted corrosion current will be overestimated (15). In this case, the concentration of the corroding electrode ions is generally of the same magnitude or higher than other ions participating in the corrosion process in the electrolyte surrounding the electrode. Other redox couples that do not necessarily participate in the corrosion reaction may have similar effects. This is especially true for metals exhibiting passive behavior.

6. Keywords

6.1 corrosion current; corrosion rate; electrochemical; equivalent weight; polarization resistance; Tafel slopes

APPENDICES

(Nonmandatory Information)

X1. SAMPLE CALCULATION—CORROSION CURRENT DENSITY

X1.1 Data:

- X1.1.1 Corrosion Current—27.0 μA .
- X1.1.2 Specimen Size—round anode area exposed.
- X1.1.3 Diameter—1.30 cm.
- X1.2 Calculation—See Eq (1) in text:

$$i_{\text{cor}} = \frac{27.0}{(1.30)^2 \frac{\pi}{4}} = \frac{27.0}{1.32} = 20.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

X2. SAMPLE CALCULATION—ALLOY EQUIVALENT WEIGHT

X2.1 Data:

- X2.1.1 Alloy—UNS S31600, actual composition not available.

X2.1.2 Corrosion Potential—300 mV versus SCE in sulfuric acid.

X2.2 Assumptions:



REFERENCES

- (1) Dean, S. W., *Materials Performance*, Vol 26, 1987, pp. 51-52.
- (2) Pourbaix, M., "Atlas of Electrochemical Equilibrium in Aqueous Solutions," National Association of Corrosion Engineers, Houston, TX, 1974.
- (3) Silverman, D. C., *Corrosion*, Vol 37, 1981, pp. 546-548.
- (4) Dean, S. W., Jr., W. D. France, Jr., and S. J. Ketcham, "Electrochemical Methods," *Handbook on Corrosion Testing and Evaluation*, W. H. Ailor, Ed., John Wiley, New York, 1971, pp. 173-174.
- (5) Dean, S. W., Jr., "Electrochemical Methods of Corrosion Testing," *Electrochemical Techniques for Corrosion*, R. Baboian, Ed., National Association of Corrosion Engineers, Houston, TX, 1977, pp. 52-53.
- (6) Stern, M. and Roth, R. M., *Journal of the Electrochemical Society*, Vol 105, 1957, p. 390.
- (7) Stern, M., *Corrosion*, Vol 14, 1958, p. 440t.
- (8) Mansfeld, F., "The Polarization Resistance Technique for Measuring Corrosion Currents," *Corrosion Science and Technology*, Plenum Press, New York, Vol IV, 1976, p. 163.
- (9) Barnartt, S., *Electrochemical Nature of Corrosion, Electrochemical Techniques for Corrosion*, R. Baboian, Ed., National Association of Corrosion Engineers, Houston, TX, pp. 1-10, 1977.
- (10) Oldham, K. B. and Mansfeld, F., "Corrosion Rates from Polarization Curves-A New Method," *Corrosion Science*, Vol 13, No. 70, p. 813 (1973).
- (11) Mansfeld, F., "Tafel Slopes and Corrosion Rates from Polarization Resistance Measurements," *Corrosion*, Vol 29, p. 10 (1972).
- (12) Glasstone, S., Laidler, K. J., and Eyring, H., "The Theory of Rate Processes," McGraw Hill, New York, 1941, pp. 552-599.
- (13) Mansfeld, F., "The Effect of Uncompensated Resistance on True Scan Rate in Potentiodynamic Experiments," *Corrosion*, Vol 38, No. 10, pp. 556-559 (1982).
- (14) Mansfeld, F., and Kendig, M., "Concerning the Choice of Scan Rate in Polarization Measurements," *Corrosion*, Vol 37, No. 9, pp. 545-546 (1981).
- (15) Mansfeld, F., and Oldham, K. L., "A Modification of the Stern-Geary Linear Polarization Equation," *Corrosion Science*, 1971, Vol 11, pp. 787-796.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.



16. Standar Uji ASTM G106



Designation: G 106 – 89 (Reapproved 2004)

Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements¹

This standard is issued under the fixed designation G 106; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This practice covers an experimental procedure which can be used to check one's instrumentation and technique for collecting and presenting electrochemical impedance data. If followed, this practice provides a standard material, electrolyte, and procedure for collecting electrochemical impedance data at the open circuit or corrosion potential that should reproduce data determined by others at different times and in different laboratories. This practice may not be appropriate for collecting impedance information for all materials or in all environments.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

D 1193 Specification for Reagent Water

G 3 Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing

G 5 Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements

G 15 Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing

G 59 Practice for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of corrosion related terms, see Terminology G 15.

3.2 *Symbols:*

C = capacitance (farad-cm⁻²)

E' = real component of voltage (volts)

E'' = imaginary component of voltage (volts)

E = complex voltage (volts)

f = frequency (s⁻¹)

I' = real component of current (amp-cm⁻²)

I'' = imaginary component of current (amp-cm⁻²)

I = complex current (amp-cm⁻²)

j = $\sqrt{-1}$

L = inductance (henry-cm²)

R_s = solution resistance (ohm-cm²)

R_p = polarization resistance (ohm-cm²)

R_t = charge transfer resistance (ohm-cm²)

Z' = real component of impedance (ohm-cm²)

Z'' = imaginary component of impedance (ohm-cm²)

Z = complex impedance (ohm-cm²)

α = phenomenological coefficients caused by depression of the Nyquist plot below the real axis, α is the exponent and τ is the time constant(s).

θ = phase angle (deg)

ω = frequency (radians-s⁻¹)

Subscripts:

x = in-phase component

y = out-of-phase component

4. Summary of Practice

4.1 Reference impedance plots in both Nyquist and Bode format are included. These reference plots are derived from the results from nine different laboratories that used a standard dummy cell and followed the standard procedure using a specific ferritic type alloy UNS-S43000³ in 0.005 M H₂SO₄ and 0.495 M Na₂SO₄. The plots for the reference material are presented as an envelope that surrounds all of the data with and without inclusion of the uncompensated resistance. Plots for one data set from one laboratory are presented as well. Since the results from the dummy cell are independent of laboratory, only one set of results is presented.

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G01 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.11 on Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.

Current edition approved Nov 1, 2004. Published November 2004. Originally approved in 1989. Last previous edition approved in 1999 as G 106 – 89 (1999).

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ These standard samples are available from ASTM Headquarters. Generally, one sample can be repolished and reused for many runs. This procedure is suggested to conserve the available material.



4.2 A discussion of the electrochemical impedance technique, the physics that underlies it, and some methods of interpreting the data are given in the Appendix XI-Appendix X6. These sections are included to aid the individual in understanding the electrochemical impedance technique and some of its capabilities. The information is not intended to be all inclusive.

5. Significance and Use

5.1 The availability of a standard procedure, standard material, and standard plots should allow the investigator to check his laboratory technique. This practice should lead to electrochemical impedance curves in the literature which can be compared easily and with confidence.

5.2 Samples of a standard ferritic type 430 stainless steel (UNS 430000) used to obtain the reference plots are available for those who wish to check their equipment. Suitable resistors and capacitors can be obtained from electronics supply houses.

5.3 This test method may not be appropriate for electrochemical impedance measurements of all materials or in all environments.

6. Apparatus

6.1 *Dummy Cell*—The dummy cell used to check the equipment and method for generating electrochemical impedance data is composed of a 10 Ω precision resistor placed in series with a circuit element composed of a 100 Ω precision resistor in parallel with a 100 μF capacitor. The resistors should have a stated precision of $\pm 0.1\%$. The capacitor can have a precision of $\pm 20\%$. The cell can be constructed from readily available circuit elements by following the circuit diagram shown in Fig. 1.

6.2 *Test Cell*—The test cell should be constructed to allow the following items to be inserted into the solution chamber: the test electrode, two counter electrodes or a symmetrically arranged counter electrode around the working electrode, a Luggin-Haber capillary with salt bridge connection to the reference electrode, an inlet and an outlet for an inert gas, and a thermometer or thermocouple holder. The test cell must be constructed of materials that will not corrode, deteriorate, or otherwise contaminate the solution.

6.2.1 One type of suitable cell is described in Reference Test Method G 5. Cells are not limited to that design. For example, a 1-L round-bottom flask can be modified for the addition of various necks to permit the introduction of electrodes, gas inlet and outlet tubes, and the thermometer holder. A Luggin-Haber

capillary probe could be used to separate the bulk solution from the saturated calomel electrode. The capillary tip can be easily adjusted to bring it into close proximity to the working electrode. The minimum distance should be no less than two capillary diameters from the working electrode.

6.3 *Electrode Holder*—The auxiliary and working electrodes can be mounted in the manner shown in Reference Test Method G 5. Precautions described in Reference Test Method G 5 about assembly should be followed.

6.4 *Potentiostat*—The potentiostat must be of the kind that allows for the application of a potential sweep as described in Reference Test Method G 5 and Reference Practice G 59. The potentiostat must have outputs in the form of voltage versus ground for both potential and current. The potentiostat must have sufficient bandwidth for minimal phase shift up to at least 1000 Hz and preferably to 10 000 Hz. The potentiostat must be capable of accepting an external excitation signal. Many commercial potentiostats meet the specification requirements for these types of measurements.

6.5 *Collection and Analysis of Current-Voltage Response*—The potential and current measuring circuits must have the characteristics described in Reference Test Method G 5 along with sufficient band-width as described above. The impedance can be calculated in several ways, for example, by means of a transfer function analyzer, Lissajous figures on an oscilloscope, or transient analysis of a white noise input using a Fast Fourier Transform algorithm. Other methods of analysis exist.

6.6 Electrodes:

6.6.1 Working electrode preparation should follow Reference Test Method G 5, which involves drilling and tapping the specimen and mounting it on the electrode holder.

6.6.2 Auxiliary electrode preparation should follow Reference Test Method G 5. The auxiliary electrode arrangement should be symmetrical around the working electrode.

6.6.3 Reference electrode type and usage should follow Reference Test Method G 5. The reference electrode is to be a saturated calomel electrode.

7. Experimental Procedure

7.1 *Test of Algorithm and Electronic Equipment (Dummy Cell)*:

7.1.1 Measure the impedance of a dummy cell consisting of a 10 Ω resistor in series with a parallel combination of a 100 Ω resistor and a 100 μF capacitor. The circuit diagram is shown in Fig. 1.

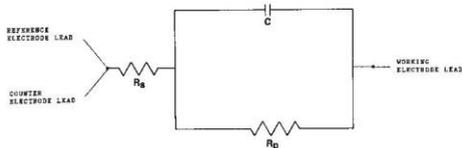


FIG. 1 Circuit Diagram for Dummy Cell Showing Positions for Hook-Up to Potentiostat



7.1.2 Typical connections from the potentiostat are shown in Fig. 1. Connect the auxiliary electrode and reference electrode leads to the series resistor side of the circuit. Connect the working electrode lead to the opposite side of the circuit beyond the resistor-capacitor parallel combination.

7.1.3 Set the potential at 0.0V. Collect the electrochemical impedance data between 10 000 Hz (10 kHz) and 0.1 Hz (100 mHz) at 8 to 10 steps per frequency decade. The amplitude must be the same as that used to check the electrochemical cell, 10 mv. The resulting frequency response when plotted in Nyquist format (the negative of the imaginary impedance versus the real impedance) must agree with that shown in Figs. 2-4. Testing with the electrochemical cell should not be attempted until that agreement is established. Results using the dummy circuit were found to be independent of laboratory.

7.2 Test of Electrochemical Cell:

7.2.1 Test specimens of the reference material should be prepared following the procedure described in Reference Test Method G 5. This procedure involves polishing the specimen with wet SiC paper with a final wet polish using 600 grit SiC paper prior to the experiment. There should be a maximum delay of 1 h between final polishing and immersion in the test solution.

7.2.2 Prepare a 0.495 M Na_2SO_4 solution containing 0.005 M H_2SO_4 from reagent grade sulfuric acid and sodium sulfate and Type IV reagent water described in Specification D 1193. The test is to be carried out at $30 \pm 1^\circ\text{C}$.

7.2.3 At least 1 h before specimen immersion, start purging the solution with oxygen-free argon, hydrogen, or nitrogen gas at a flow rate of about 100 to 150 cm^3/min . Continue the purge throughout the test.

7.2.4 Transfer the specimen to the test cell. Adjust the Luggin-Haber probe tip so that it is no less than two capillary diameters from the sample. However, since this distance will

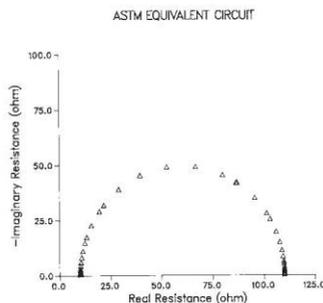


FIG. 2 Nyquist Plot of Electrochemical Impedance Response for Dummy Cell

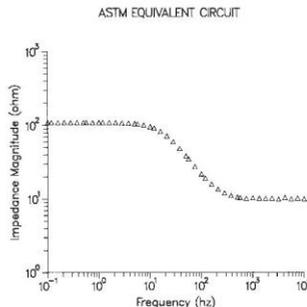


FIG. 3 Bode Plot, Impedance Magnitude Versus Frequency, of Electrochemical Impedance Response for Dummy Cell

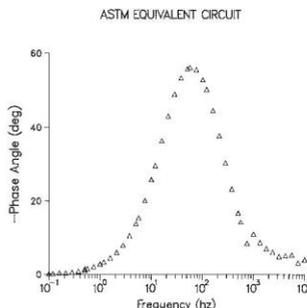


FIG. 4 Bode Plot, Phase Angle Versus Frequency, of Electrochemical Impedance Response for Dummy Cell

affect the uncompensated solution resistance, the greater the distance, the larger the resistance. Therefore, close placement is important.

7.2.5 Connect the potentiostat leads to the appropriate electrodes, for example, working electrode lead to working electrode, counter electrode lead to counter electrode, and reference electrode lead to reference electrode. Hook-up instructions provided with the potentiostat must be followed.

7.2.6 Record the open circuit potential, that is, the corrosion potential, for 1 h. The potential should be about $-645 \text{ mV} \pm 10 \text{ mV}$ relative to the saturated calomel electrode. If the potential



is more positive than -600 mv (SCE) then the specimen may have passivated. If so, remove the specimen and repolish with 600 grit wet silicon carbide paper. Then reimmerse the sample and monitor the corrosion potential for 1 h. If the potential again becomes more positive than -600 mv (SCE) check for oxygen contamination of the solution.

7.2.7 Record the frequency response between 10 000 Hz (10 kHz) and 0.1 Hz (100 mHz) at the corrosion potential recorded after 1 h of exposure using 8 to 10 steps per frequency decade. The amplitude must be the same as that used in 6.1.3, 10 mv.

7.2.8 Plot the frequency response in both Nyquist format (real response versus the negative of the imaginary response) and Bode format (impedance modulus and phase angle versus frequency). Frequency can be reported in units of radians/second or hertz (cycles/s).

7.2.9 There was no attempt to estimate circuit analogues for the electrochemical impedance curves since there is no universally recognized, standard method for making such estimates.

8. Standard Reference Results and Plots

8.1 Dummy Cell:

8.1.1 The results from nine different laboratories were virtually identical and overlaid each other almost perfectly. Typical plots of the raw data are shown in Figs. 2-4. No attempt has been made to estimate the variance and standard deviation of the results from the nine laboratories. The measured values of R_p , R_p , and the frequency at which the phase angle is a maximum must agree with these curves within the specifications of the instrumentation, resistors, and capacitors before testing of the electrochemical cell commences. See 9.1.1.

8.2 Electrochemical Cell:

8.2.1 Standard electrochemical impedance plots in both Nyquist format and Bode format are shown in Figs. 5-7. These are actual results from one laboratory. Figs. 8-10 show plots in both Nyquist and Bode formats which envelop all of the results from the nine laboratories. The solution resistance from each laboratory was not subtracted out prior to making this plot.

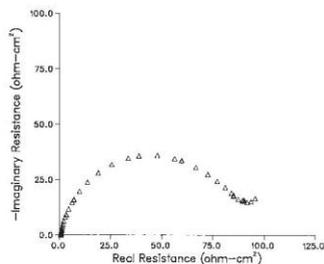


FIG. 5 Nyquist Plot of Typical Frequency Response for UNS-S43000 From One Laboratory

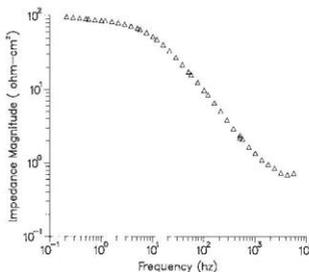


FIG. 6 Bode Plot, Impedance Magnitude Versus Frequency, for UNS-S43000 From One Laboratory

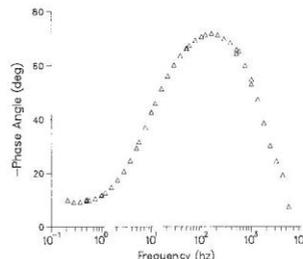


FIG. 7 Bode Plot, Phase Angle Versus Frequency, for UNS-S43000 From One Laboratory

8.2.2 The average solution resistance from the nine laboratories in $3.3 \Omega\text{-cm}^2 \pm 1.8 \Omega\text{-cm}^2$ (one standard deviation). The solution resistance of the user's test cell as measured by the high frequency intercept on the Nyquist plot must lie in this range to use agreement with Figs. 8-10 for verification of the electrochemical test cell. If the uncompensated resistance lies outside of this range, it should be subtracted from the results (see 7.2.4). Then, results from the electrochemical test cell can be compared with the results in Figs. 11-13 to verify the test cell. Figs. 11-13 envelop all of the results from the nine laboratories with the uncompensated resistance subtracted out.

9. Precision and Bias

9.1 Dummy Cell:

9.1.1 Reproducibility of the results for the dummy cell is dependent on the precision of the resistors and capacitor used



G 106 – 89 (2004)

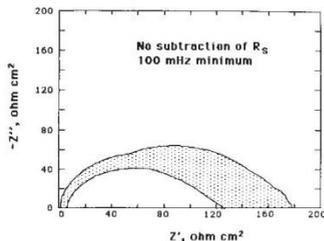


FIG. 8 Envelope of Data From All Laboratories, Nyquist Plot, Solution Resistance Included

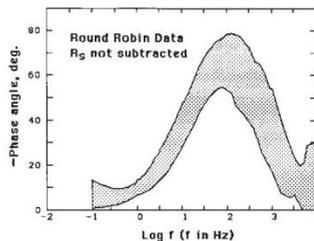


FIG. 10 Envelope Of Data From All Laboratories, Bode Plot (Phase Angle Versus Frequency), Solution Resistance Included

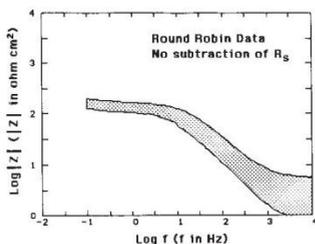


FIG. 9 Envelope of Data From All Laboratories, Bode Plot (Impedance Magnitude Versus Frequency), Solution Resistance Included

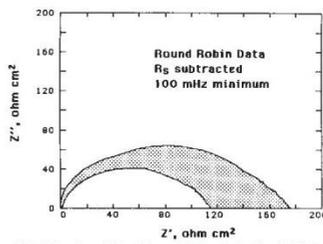


FIG. 11 Envelope Of Data From All Laboratories, Nyquist Plot, Solution Resistance Removed

to construct the dummy cell. Precision resistors ($\pm 0.1\%$) should be used to construct the dummy cell. Most capacitors have a precision of $\pm 20\%$. A change in the value of the capacitor will change the frequency at which the maximum phase angle occurs in Fig. 4. In Nyquist format the intercepts with the real axis should agree with the resistor values (R_u and R_p) shown in Fig. 2.

9.2 Electrochemical Cell:

9.2.1 The reported corrosion potential was $-645 \text{ mV} \pm 9 \text{ mV}$ (one standard deviation). The corrosion potential varied between -627 mV and -662 mV with most of the results lying between -640 mV and -650 mV .

9.2.2 The increasing scatter with decreasing frequency seen in the plots is most likely caused by a competing (mass transfer) contribution becoming important at low frequency. This mechanism results in a second time constant arising at frequencies lower than 50 to 100 mHz. The magnitude of this time constant is dependent on the cell geometry and its effect on convection. Thus, reproducibility of the second time con-

stant between laboratories would be expected to be poor. Since this effect will have a greater effect on the frequency response at the lower frequencies in the test, the scatter in the results increases with decreasing frequency.

9.2.3 The increasing scatter in the high frequency portion of Figs. 8-10 is caused by the variation in uncompensated resistance among laboratories. A large contributor to the uncompensated resistance is the solution resistance. This resistance is a function of cell geometry, position of the reference electrode sensing point relative to the working electrode, etc. Further information can be found in Refs (1-2),⁴

10. Keywords

10.1 ac impedance; algorithm verification; Bode; dummy cell; equipment verification; electrochemical impedance; electrochemical impedance spectroscopy; electrochemical measurement; Nyquist; polarization resistance; steel

⁴ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.



G 106 – 89 (2004)

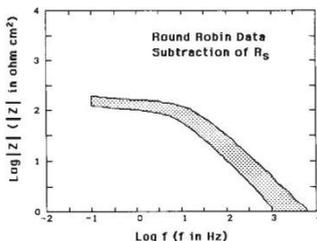


FIG. 12 Envelope Of Data From All Laboratories, Bode Plot (Impedance Magnitude Versus Frequency), Solution Resistance Removed

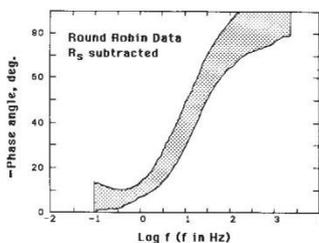


FIG. 13 Envelope Of Data From All Laboratories, Bode Plot (Phase Angle Versus Frequency), Solution Resistance Removed

APPENDICES

(Nonmandatory Information)

XI. TECHNIQUE BACKGROUND

XI.1. An electrochemical process may often be modeled by linear circuit elements such as resistors, capacitors, and inductors. For example, the corrosion reaction itself can often be modeled by one or more resistors. The ability to model a corrosion process in this manner gives rise to one practical attribute of the electrochemical impedance technique. Simple AC circuit theory in terms of circuit analogues can be used to model the electrochemical corrosion process. Such modeling can facilitate understanding and lead to better prediction of corrosion rates and overall corrosion behavior. A number of reviews exist on the electrochemical impedance technique (3-7)⁴ that illustrate the utility of this type of modeling.

XI.2. Direct current can be viewed as current generated in the limit of zero frequency. Under conditions of direct current, for example zero frequency, Ohm's law can be written as:

$$E = I \times R \quad (X1.1)$$

XI.3. All symbols are defined in 3.2. In this case, the proportionality factor relating current to voltage is composed only of one or more actual resistors. When the frequency is not zero, as would occur from an imposition of a frequency dependent voltage or current, Ohm's law becomes:

$$E = I \times Z \quad (X1.2)$$

Laporan Tugas Akhir

Departemen Teknik Mesin Industri



G 106 – 89 (2004)

X1.4 Under these conditions, the proportionality factor Z is composed of all elements that can impede or oppose the current. The magnitude of the resistance or opposition to the current created by some of these elements, for example, capacitors and inductors, is dependent on the frequency. The magnitude of the opposition created by the resistor is independent of frequency.

X1.5 The technique can most easily be described in terms of a response to a frequency dependent input signal. When a voltage sine or cosine wave is applied across a circuit composed of a resistor only, the resultant current is also a sine or cosine wave of the same frequency with no phase angle shift but with an amplitude which differs by an amount determined by the proportionality factor. The values of the input voltage and output current are related by equation (X1.1). On the other hand, if the circuit consists of capacitors and inductors, the resulting current not only differs in amplitude but is also shifted in time. It has a phase angle shift. This phenomenon is shown in Fig. X1.1.

X1.6 Use of sines and cosines is cumbersome mathematically. Vector analysis provides a convenient method of describing the analogous circuit in mathematical terms. The relationship between such vector analysis and imaginary or complex numbers provides the basis for electrochemical impedance analysis. A sinusoidal current or voltage can be pictured as a rotating vector as shown in Fig. X1.2. In this figure, the current vector rotates at a constant angular frequency f (hertz) or ω (radians/s = $2\pi f$). In Fig. X1.2, the x component defines the in-phase current. Therefore, it becomes the "real" component of the rotating vector. The y component is shifted out-of-phase by 90° . By convention, it is termed the "imaginary" component of the rotating vector. The mathematical description of the two components is

$$\text{Real Current} = I_x = |I| \cos(\omega t) \quad (\text{X1.3})$$

$$\text{Imaginary Current} = I_y = |I| \sin(\omega t) \quad (\text{X1.4})$$

$$|I|^2 = |I_x|^2 + |I_y|^2 \quad (\text{X1.5})$$

X1.7 The voltage can be pictured as a similar rotating vector with its own amplitude E and the same rotation speed ω . As shown in Fig. X1.3, when the current is in phase with the applied voltage, the two vectors are coincident and rotate together. This response is characteristic of a circuit containing

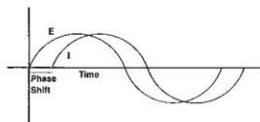


FIG. X1.1 Sinusoidal AC Voltage and Current Signals

only a resistor. When the current and voltage are out-of-phase, the two vectors rotate at the same frequency, but they are offset by an angle called the phase angle, θ . This response is characteristic of a circuit which contains capacitors and inductors in addition to resistors.

X1.8 In electrochemical impedance analysis, one "views" one of the vectors from the frame of reference of the other. Thus, the reference point rotates and the time dependence of the signals (ωt) is not viewed. In addition, both the current and voltage vectors are referred to the same reference frame. The voltage vector is "divided" by the current vector to yield the final result in terms of the impedance as shown in Fig. X1.4. The impedance is the proportionality factor between the voltage and the current.

X1.9 The mathematical convention for separating the real (x) and imaginary (y) components is to multiply the magnitude of the imaginary contribution by j and report the real and imaginary values as a complex number. The equations for electrochemical impedance become:

$$E = E_{\text{real}} + E_{\text{imaginary}} = E' + jE'' \quad (\text{X1.6})$$

$$I = I_{\text{real}} + I_{\text{imaginary}} = I' + jI'' \quad (\text{X1.7})$$

$$Z = Z' + jZ'' = \frac{E' + jE''}{I' + jI''} \quad (\text{X1.8})$$

$$\tan \theta = \frac{Z''}{Z'} \quad (\text{X1.9})$$

$$|Z|^2 = (Z')^2 + (Z'')^2 \quad (\text{X1.10})$$

X1.10 Note that by convention, the term Z is reported as $Z' + jZ''$ so that the Nyquist plot of the circuit in Fig. 1 lies in the first quadrant. The goal of the electrochemical impedance technique is to measure the impedance Z (Z' and Z'') as a function of frequency and to derive corrosion rate or mechanism information from the values. Use of simple circuit analogues to model the response is one methodology to achieve this goal. The amplitude of the excitation signal must be small enough so that the response is linearly related to the input, that is, the response is independent of the magnitude of the excitation. If a voltage excitation is used, an amplitude of 10 mv peak-to-peak will often suffice though systems exist in which the excitation may have to be smaller, for example, 2 mv peak-to-peak. If such linearity exists, then the measured response may often be assumed to be modelable by a linear array of resistors, capacitors, and inductors. The three basic circuit elements can be written as shown in Table X1.1. Table X1.1 shows that a resistor has a real contribution only. That is, the response of a resistor would be a point on the real axis, independent of frequency. Both the capacitor and inductor have purely imaginary contributions. These would appear on the imaginary axis only. One method of electrochemical impedance analysis is to model the corrosion process in terms of circuit elements such as those shown in Table X1.1 and from that model to make conclusions about the physics of corrosion process.



G 106 – 89 (2004)

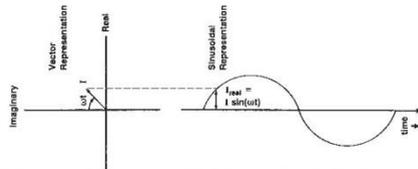


FIG. X1.2 Relationship Between Sinusoidal AC Current and Rotating Vector Representation

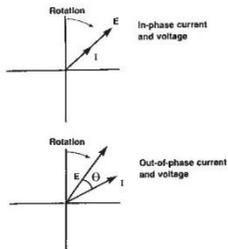


FIG. X1.3 In-Phase and Out-Of-Phase Rotation of Current and Voltage Vectors

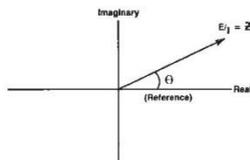


FIG. X1.4 Impedance Vector

TABLE X1.1 Circuit Elements

Element	Equation
Resistor	$Z = R$
Capacitor	$Z = -1/(ωC) = -2πfC$
Inductor	$Z = jωL = 2πfL$



X2. SIMPLE CORROSION PROCESS

X2.1 The simplest type of corrosion process would be a combination of a corrosion reaction consisting of two simple electrochemical reactions and a double layer. Corrosion would proceed uniformly on the surface. For example, the corrosion of carbon steel in 1 M sulfuric acid can be considered to fall into this category (8). (Eq X2.1).



describes the corrosion reaction. This reaction may be represented by a simple resistor. The double layer is created by the voltage change across the interface. On the metal side of the interface, there may be an excess (or deficiency) of electrons. This excess (or deficiency) is balanced on the solution side by oppositely charged ions (9). Some are specifically adsorbed at the surface (inner layer). Others are non-specifically adsorbed and are hydrated. They extend out into the solution in the diffuse layer. The response of this interfacial structure to varying voltage (for example sinusoidal excitation) can be modeled by a capacitor, the double layer capacitance.

X2.2 For this simple process, the model circuit is that shown in Fig. X2.1. The circuit is a resistor R_p in parallel with another resistor R_s . The utility of this model for the frequency response lies in the fact that R_p equals the solution resistance

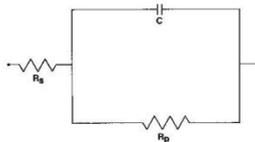


FIG. X2.1 Circuit That Models Simple Impedance Response

not compensated by the potentiostat and R_p equals the polarization resistance as long as the measurement is made at the corrosion potential. By combining R_p with the Tafel slopes for the half-cell reactions by an equation such as the Stern-Geary equation (8), the corrosion rate can be estimated. Thus, analysis of electrochemical impedance enables the corrosion rate to be estimated rapidly in the absence of uncompensated solution resistance when the measurement is made at the corrosion potential. Methods of plotting these data are shown in Practice G 3. Unfortunately, corrosion processes exist which are not as simple as the case just discussed. These more complex processes can still be analyzed.

X3. DIFFUSION CONTROL

X3.1 Sometimes the rate of a chemical reaction can be influenced by the diffusion of one or more reactants or products to or from the surface. This situation can arise when diffusion through a surface film or hydrodynamic boundary layer becomes the dominating process. Examples are the surface being covered with reaction products of limited solubility. An example of this type of corrosion process that has extreme practical importance is the corrosion of carbon steel in concentrated sulfuric acid in which the product FeSO_4 has limited solubility. Such corrosion has been shown to be controlled by the diffusion of FeSO_4 from a saturated film at the surface to the bulk fluid (10). Another example is corrosion of steel in water in which the mass transfer of dissolved oxygen can control the corrosion rate (5).

X3.2 Very often, electrochemical impedance data for such systems has a unique characteristic known as the Warburg impedance. In the low frequency limit, the current is a constant 45° out-of-phase with the potential excitation (4, 5). The impedance response should ultimately deviate from this relationship. It will return to the real axis at very low frequencies that may be impossible to measure (11).

X3.3 The equivalent circuit is shown in Fig. X3.1. The term W is the Warburg impedance. By appropriate manipulation of the data, the values of the circuit elements can be evaluated (4, 5). These circuit elements can be used to obtain a value for a resistance (charge transfer resistance) that can sometimes be related to a corrosion rate (12).

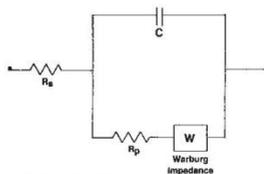


FIG. X3.1 Circuit That Models Impedance In The Presence of Diffusion



X4. INDUCTANCE

X4.1 Sometimes, the Nyquist type plot exhibits a low frequency portion lying in the fourth quadrant. This behavior seems to have one of a number of causes (5, 13-16), for example, some type of equilibrium adsorption of a reaction intermediate followed by a rapid desorption of the product. This inductance may be named pseudo-inductance because the processes giving rise to this response are not necessarily the same as those in a real inductor (15). Indeed, sometimes the behavior is caused by the response not being linearly related to the excitation. Decreasing the amplitude of the excitation might eliminate the pseudo-inductive behavior. Care must be exercised when this behavior is observed.

X4.2 If there is one time constant, the circuit giving rise to the response might be modeled as shown in Fig. X4.1. Such a circuit can be solved as long as R_p can be estimated (12). The accuracy of the values of R_p and R_L so calculated can be

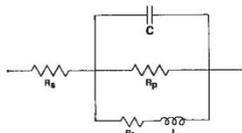


FIG. X4.1 Circuit That Models Impedance In The Presence Of Pseudo-Inductance

ascertained by comparing the calculated Nyquist and Bode plots with the measured Nyquist and Bode plots. Thus the corrosion rate may be estimated in the presence of inductance.

X5. DEPRESSION OF NYQUIST SEMICIRCLE

X5.1 In real systems, the Nyquist type of semicircle for a simple corrosion process often exhibits some depression below the real axis. An example is shown in Fig. X5.1. This behavior has a number of potential causes. Some are improper cell design, surface roughness, dispersion of the time constant caused by the reaction having more than one step, surface porosity, and so forth.

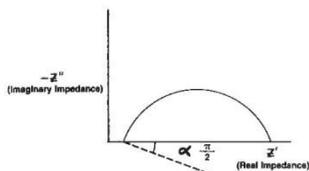


FIG. X5.1 Nyquist Type of Plot Showing Depression Below The Real Axis

X5.2 The significance of this depression of the semicircle is the fact that Fig. X5.1 and not the Nyquist plot shown in Practice G 3 often represents the appearance of a real Nyquist plot of even a simple charge transfer process. Examples that can fit this characteristic are carbon steel in 1 M sulfuric acid and carbon steel in water. Thus, the ability to extract the polarization resistance from this type of curve is important if one is to use the data to estimate corrosion rates, especially when the cause of the depression is unclear. One type of circuit that can model such depression is given by:

$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + (j\omega\tau)^\alpha} \quad (X5.1)$$

X5.3 In Eq X5.1, the phenomenological term $(j\omega\tau)^\alpha$ replaces the term $j\omega R_p C$ when $\alpha < 1$. In the simple response described by the circuit in Fig. X1.4, $\alpha = 1$. The exponent α accounts for the depression below the real axis. The value of R_p can still be estimated by curve-fitting the semicircle and by allowing both the radius and origin to vary (12, 17). Thus, corrosion rates can still be estimated even in the presence of such depression, whatever its cause. Controversy surrounds the physical meaning of (Eq X5.1).



X6. MORE COMPLEX PHENOMENA

X6.1 When a metal is coated with a porous non-conducting film, the equivalent circuit must simultaneously account for the polarization resistance caused by the corrosion process and the pore resistance. Sometimes, two or more time constants can arise for a corrosion process (18, 19). The cause can be a multi-step reaction in which both steps have comparable rates or an adsorbed intermediate, among others. These phenomena require more complex equivalent circuits. However, the pro-

cedure for analyzing these complex responses still requires maintaining linearity between excitation and response, the proposal of an equivalent circuit, and then the examination of the predicted versus measured frequency response to verify the model. Even in these cases, the value of the polarization resistance can be estimated from an appropriate model so that the corrosion rate and possibly mechanism might be determined and corrosion predictions can be made.

REFERENCES

- (1) McKubre, M. C. H., "Techniques for AC Impedance Measurements in Corrosion Systems," *CORROSION/87*, Paper 480, San Francisco, CA, March 1987, pp 9-13.
- (2) Caham, B., Nagy, Z., and Genshaw, M., "Cell Design for Potentiostatic Measuring Systems," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol 119, No. 1, 1972, p. 64.
- (3) Mansfeld, F., *Corrosion*, Vol 36, No. 5, 1981, p. 301.
- (4) "Basics of AC Impedance Measurements," EG&G Princeton Applied Research, Application Note AC-1.
- (5) Gabrielli, C., "Identification of Electrochemical Processes by Frequency Response Analysis," Soltaron Instrumentation Group, 1980.
- (6) Macdonald, D. D., and McKubre, M. H., "Impedance Measurement in Electrochemical Systems," *Modern Aspects of Electrochemistry*, (Bockris, J. O'M., Conway, B. E., and White, R. E., ed.), Vol. 14, Plenum Press, New York, 1982, p. 61.
- (7) Hladky, K., Callow, L. M., and Dawson, J. L., *Bt Corrosion Journal*, Vol. 15, No. 1, 1980, p. 20.
- (8) Mansfeld, F., *Corrosion*, Vol. 29, 1973, p. 397.
- (9) Bockris, J.O.M, and Reddy, A. K. N., *Modern Electrochemistry*, Plenum Press, New York, 1970.
- (10) Ellison, B. T., and Schmeal, W. R., *Journal of the Electrochemical Society*, Vol 125, 1978, p. 524.
- (11) Dawson, J. L., and John, D. G., *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol 110, 1980, p. 37.
- (12) Silverman, D. C., and Carrico, J. E., *Corrosion*, Vol 44, No. 5, 1988, p. 280.
- (13) Lorenz, W. J., and Mansfeld, F., *Corrosion Science*, Vol 21, No. 9, 1981, p. 647.
- (14) Epelboin, I., Keddani, M., and Takenouti, H., *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol 2, 1972, p. 71.
- (15) Armstrong, R. D., and Edmondson, K., *Electrochimica Acta*, Vol 18, 1973, p. 937.
- (16) Macdonald, D. D., *Journal of the Electrochemical Society*, Vol 125, No. 12, 1978, p. 2062.
- (17) Kendig, M. W., Meyer, E. M., Lindberg, G., and Mansfeld, F., *Corrosion Science*, Vol 23, No. 9, 1983, p. 1007.
- (18) Mansfeld, F., "Evaluation of Corrosion Protection Methods With Electrochemical Impedance Spectroscopy," *Corrosion/87*, paper 481, San Francisco, March 1987.
- (19) Armstrong, R. D., Bell, M. F., and Metcalfe, A. A., "The AC Impedance of Complex Electrochemical Reactions," *Electrochemistry*, Vol 6, The Chemical Society, Burlington House, London, 1976, p. 98.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either approved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Heru Fatkhurohmat yang merupakan anak ke 4 dari 4 bersaudara dari pasangan Bapak Djahuri dan Ibu Nunung Komariyah. Penulis lahir di Kota Kediri, pada tanggal 20 Juli 1996. Penulis menyelesaikan studi formalnya di MI Miftahul Huda Tinalan Kediri, SMP Pawayatan Daha 1 Kediri, SMA Negeri 4 Kediri. Kemudian pada tahun 2014 penulis melanjutkan pendidikannya di Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi-ITS Surabaya dengan mengambil program studi Diploma III dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 2114030104. Penulis mengambil bidang keahlian Manufaktur dan mengambil Tugas Akhir dengan tema inhibitor korosi.

Selama duduk di bangku perkuliahan, penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Penulis juga pernah aktif mengikuti berbagai kegiatan dan organisasi mahasiswa. Penulis sempat menjadi Staff Dept. Hubungan Mahasiswa Himpunan Mahasiswa DIII Teknik Mesin (HMDM) FTI-ITS periode 2015-2016, menjadi Staff Kementerian Dalam Negeri BEM ITS periode 2015-2016 dan menjadi Ketua KPU Pemilihan Umum ITS 2016. Penulis juga pernah menjadi Greder Mata Kuliah Proses Manufaktur, Greder Mata Kuliah Pemesinan Logam dan Asisten Laboratorium Mekatronika. Kegiatan yang pernah diikuti penulis diantaranya OC inti GERIGI ITS 2015 dan Konseptor GERIGI ITS 2016, GUYUB ITS 2015. Penulis juga aktif mengikuti pelatihan diantaranya PKTI HMDM FTI ITS 2014, LKMM Pra-TD FTI ITS, LKMM TD VIII HMDM FTI ITS. Selain itu penulis juga kerja praktek di PT. Swadaya Graha-Gresik selama 1 bulan pada 18 Juli-18 Agustus 2016.

Penulis dapat dihubungi pada nomor telepon 085784988878 dan email yang dapat dihubungi fatkhurohmatheru@gmail.com.