



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI *GREEN CORROSION INHIBITOR* EKSTRAK DAUN BAYAM
MERAH (*Amaranthus Gangeticus*) PADA BAJA KARBON RENDAH DALAM
LARUTAN 1M HCl DENGAN METODE POLARISASI DAN EIS**

TESIS

OKI DARMAWAN

0906579632

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI *GREEN CORROSION INHIBITOR* EKSTRAK DAUN BAYAM
MERAH (*Amaranthus Gangeticus*) PADA BAJA KARBON RENDAH DALAM
LARUTAN 1M HCl DENGAN METODE POLARISASI DAN EIS**

TESIS

**Diajukan sebagai syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik**

**OKI DARMAWAN
0906579632**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
KEKHUSUSAN KOROSI DAN PROTEKSI
DEPOK
2012**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Tesis ini adalah hasil karya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Oki Darmawan

NPM : 0906579632

Tanda Tangan :



Tanggal : 11 Juli 2012



LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Oki Darmawan
NPM : 0906579632
Program Studi : Metalurgi dan Material
Judul Tesis : Studi Green Corrosion Inhibitor Ekstrak Daun Bayam Merah (*Amaranthus Cereifolius*) pada Baja Karbon Rendah dalam Larutan 1M HCl dengan Metode Polarisasi dan EIS

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

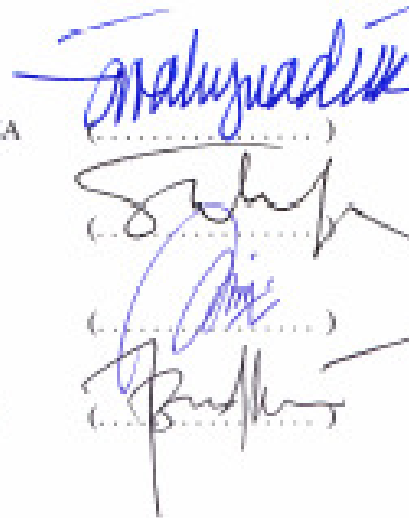
Dewan Penguji

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi S, DEA

Penguji : Dr. Ir. Sutopo, M.Sc

Penguji : Haris Effendi, ST, MSc

Penguji : Badral Munir, ST, M.Eng.Sc, PhD



Ditetapkan : Depok

Tanggal : 11 Juli 2012

KATA PENGANTAR DAN UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah S.W.T karena atas rahmat dan seijin-Nya tesis ini dapat saya selesaikan. Penulisan tesis ini untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan pasca sarjana pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material di Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, rasanya akan sangat sulit bagi saya untuk memulai pembuatan proposal untuk tesis, melakukan penelitian dan hingga menyelesaikan penyusunan tesis ini. Oleh karena itu, saya tidak lupa mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi S, DEA yang telah banyak menyediakan waktu, tenaga dan pikirannya dalam membantu saya menyelesaikan penyusunan tesis ini.
2. Istri dan Anak-anak tercinta yang selalu mendukung dan memberi saya semangat untuk menyelesaikan tesis ini.
3. Para dosen-dosen dan dewan penguji yang tidak dapat saya sebutkan namanya satu persatu, karena tanpa bimbingan dan bantuannya akan sangat sulit bagi saya dalam menyelesaikan tesis ini.
4. Teman-teman seangkatan yang telah memberi inspirasi dan bantuannya untuk saya menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya hanya dapat memanjatkan permohonan kepada Allah S.W.T untuk berkenan memberikan balasannya atas kebaikan semua pihak dalam membantu saya.

Semoga tesis ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu dan khususnya rekan-rekan mahasiswa yang sedang yang menyusun tesis.

Depok, 15 Juli 2012

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UTNUK KEPENRTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Oki Darmawan
NPM : 0906579632
Program Studi : S2 – Kelas Khusus, Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik – Universitas Indonesia
Jenis Karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak **Bebas Royalti Noneklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

STUDI GREEN CORROSION INHIBITOR EKSTRAK DAUN BAYAM MERAH (*Amaranthus Gangeticus*) PADA BAJA KARBON RENDAH DALAM LARUTAN 1M HCI DENGAN METODE POLARISASI DAN EIS

Beserta perangkat yang ada (tidak diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Cilegon
Pada tanggal : 16 Juli 2012

Yang menyatakan


Oki Darmawan

ABSTRAK

Nama : Oki Darmawan
Program Studi : Korosi
Judul : Studi Green Corrosion Inhibitor Ekstrak Daun Bayam Merah (*Amaranthus Gangeticus*) pada Baja Karbon Rendah dalam Larutan 1M HCl dengan Metode Polarisasi dan EIS

Tesis ini dibuat untuk mempelajari laju korosi produk korosi baja karbon didalam larutan HCl dengan pemberian ekstrak daun bayam sebagai green corrosion inhibitor dengan variasi konsentrasi 500, 100, 2000 dan 4000 ppm. Metode Polarisasi dan EIS digunakan untuk mengukur laju korosi dan efisiensi inhibisi ekstrak daun bayam merah ini.

Dari pengujian dengan FTIR dan UV-Vis terhadap sampel baja yang direndam didalam ekstrak daun bayam, diketahui bahwa lapisan inhibisi terbentuk pada permukaan sampel baja.

Dari hasil pengujian Polarisasi diketahui bahwa ekstrak daun bayam bersifat mixed-type inhibitor. Berdasarkan hasil dari Polarisasi dan EIS, kemampuan inhibisi ekstrak daun bayam merah pada baja karbon rendah didalam lingkungan 1M HCl terbatas pada konsentrasi antara 500 sampai 2000 ppm. Efisiensi inhibisi terbaik adalah 73% pada 2000 ppm.

Kata kunci :

Ekstrak daun bayam merah, larutan 1M HCl, polarisasi, EIS

ABSTRACT

Name : Oki Darmawan
Study Program: Metallurgy and Material
Title : Green Corrosion Inhibitor Study of Red Spinach Leaves
Extract (*Amaranthus Gangeticus*) on Low Carbon Steel in
1M HCl Solutions with Polarisation and EIS Methods.

This thesis is prepared to study corrosion rates of low carbon steel in 1M HCl solution with addition of red spinach leaves extract as green corrosion inhibitor with concentration starting from 500, 100, 2000 and 4000 ppm. Polarisation and EIS methods are used to measure corrosion rates and inhibition efficiencies of red spinach leaves extract.

According to results from FTIR and UV-Vis to the carbon steel sample submerged in extract of red spinach leaves for 24 hours, it was found that an inhibition film is formed on the surface of the carbon steel sample.

According to results from Polarisation and EIS, red spinach leaves extract is acting as a mixed-type inhibitor. Good inhibition efficiencies of red spinach leaves extract on low carbon steel in an environment of 1M HCl are achieved at concentrations between 500 to 2000 ppm. The best efficiency is 73% at 2000 ppm of extract concentration.

Key words :

Extract of red spinach leaves, 1M HCl solution, polarization, EIS

DAFTAR ISI

	Hal
Pernyataan Keaslian Tesis	
Lembar Pengesahan	
Abstrak	
Kata Pengantar	i
Daftar Gambar	ii
Daftar Tabel	iv
DAFTAR ISI.....	1
BAB I.....	11
PENDAHULUAN.....	14
1.1 LATAR BELAKANG	14
1.2 PERUMUSAN MASALAH	16
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	16
1.4 BATASAN MASALAH.....	16
BAB II.....	18
TINJAUAN PUSTAKA.....	18
2.1 PRINSIP KOROSI.....	18
2.1.1 Elektrokimia.....	19
2.1.2 Acid Corrosion.....	22
2.2 POLARISASI	23
2.3 CORROSION INHIBITOR	33
2.3.1 Contoh Corrosion Inhibitor.....	38
2.3.2 Green Corrosion Inhibitor.....	38
BAB III	40
METODOLOGI PENELITIAN	40
3.1 TAHAPAN PENELITIAN	40
3.2 PERSIAPAN BAHAN UJI.....	40

3.2.1 Menyiapkan Logam Uji	40
3.2.2 Prosedur Pembuatan Bahan Untuk Ekstraksi.....	42
3.2.3 Prosedur Pembuatan Larutan HCL 1 M.....	44
3.3 PENGUJIAN POLARISASI	45
3.3.1 Persiapan Alat dan Bahan	45
3.3.2 Prosedur Pengujian	46
BAB IV	48
HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN	48
4.1 KARAKTERISASI BAHAN-BAHAN UJI	48
4.1.1 Bahan Uji Logam.....	48
4.1.2 Karakterisasi Ekstrak Daun Bayam Merah.....	49
4.2 PENGUKURAN POLARISASI & EIS.....	51
4.3 MEKANISME INHIBISI	55
4.4 KESIMPULAN.....	58
LAMPIRAN 1	
Perhitungan Konsentrasi HCl	
LAMPIRAN 2	
Data Uji Spektroskopi	
Data Uji FTIR Ekstrak Daun Bayam Merah	
Data Uji FTIR Baja Karbon Rendah direndam didalam Ekstrak	
Data Interpretasi FTIR	
LAMPIRAN 3	
Hasil Uji Polarisasi dengan Voltalab	
LAMPIRAN 4	
Hasil Uji EIS dengan Voltalab	

Daftar Gambar

Hal

Gambar 2-1. Kecenderungan Fe kembali ke bentuk stabil	7
Gambar 2-2. Reaksi elektrokimia pada logam/metal	8
Gambar 2-3. Reaksi oksidasi-reduksi pada sel galvanik	9
Gambar 2-4. Potensial elektroda vs SHE	10
Gambar 2-5. Reaksi reduksi hidrogen dibawah kendali aktivasi	13
Gambar 2-6. Peralatan pengujian elektrokimia	15
Gambar 2-7. Plot η terhadap $\log i_l$ atau Tafel plot menunjukkan exchange current density yang didapat dari perpotongan	16
Gambar 2-8. Skematik dari sirkuit elektrokimia	19
Gambar 2-9. Skematik dari sinusoidal eksitasi potensial	20
Gambar 2-10. Nyquist plot impedansi untuk sirkuit elektrokimia charge control pada Gambar 2-8(a)	22
Gambar 2-11. Klasifikasi inhibitor secara kualitatif	23
Gambar 2-12. Diagram active-passive metal	24
Gambar 2-13. Kurva polarisasi ditandai dengan adanya inhibitor katodik	25
Gambar 2-14a. Adsorpsi inhibitor bermuatan negatif pada permukaan logam bermuatan positif	26
Gambar 2-14b. Molekul inhibitor bermuatan positif tidak berinteraksi dengan permukaan logam bermuatan	26
Gambar 3-1. Diagram alir penelitian	30
Gambar 3-2. Daun-daun bayam dipisahkan dari batangnya	31
Gambar 3-3. Pengaturan suhu dan waktu pengeringan dan bubuk dari hasil blender daun-daun bayam merah yang sudah kering	32
Gambar 3-4. Serbuk besi yang direndam dengan ekstrak daun bayam	32
Gambar 3-5. Bahan dan alat untuk pembuatan HCl 1M	33
Gambar 3-6. Sel elektrokimia untuk pengujian polarisasi	34
Gambar 3-7. Skematik instrumentasi untuk pengujian polarisasi	35
Gambar 4-1. Persyaratan umum untuk Baja	37

Gambar 4-2. FTIR ekstrak daun bayam merah	39
Gambar 4-3. Tafel plot dengan variasi ekstrak	40
Gambar 4-4. Model sirkuit pengujian EIS	42
Gambar 4-5. Nyquist dengan variasi ekstrak	42
Gambar 4-6. Perbandingan efisiensi inhibisi dari pengukuran polarisasi dan EIS	43
Gambar 4-7. FTIR sampel baja yang direndam selama 24 jam didalam ekstrak daun bayam merah	44
Gambar 4-8. Perbandingan spektrum serapan partikel besi dan ekstrak daun bayam merah	46



Daftar Tabel

	Hal
Tabel 2-1. Standar potensial elektroda	11
Tabel 2-2. Perkiraan Exchange current density untuk reduksi ion hidrogen pada berbagai logam pada 25°C	14
Tabel 2-3. Beberapa kelompok fungsional didalam inhibitor organic	27
Tabel 2-4. Toxicity beberapa inhibitor	28
Tabel 3-1. Konversi ekstrak untuk 100ml HCl	35
Tabel 4-1. Hasil uji spectroscopy	37
Tabel 4-2. Spektrum serapan ekstrak daun bayam merah	38
Tabel 4-3. Parameter-parameter pengukuran polarisasi dengan variasi ekstrak	40
Tabel 4-4. Parameter impedansi dengan variasi ekstrak	42
Tabel 4-5. Spektrum serapan sampel baja yang direndam didalam ekstrak daun bayam merah	45

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Media asam semisal HCl (*hydrochloric acid*) banyak dimanfaatkan pada aplikasi *pickling*, *chemical cleaning*, *oil well acidification* dan proses pada petrochemical. Karena media asam ini juga sangat korosif jika berada pada lingkungan logam, maka untuk mengurangi serangan korosi pada logam tersebut, umumnya inhibitor ditambahkan pada proses-proses tersebut.

Inhibitor adalah zat yang apabila sejumlah kecil konsentrasinya ditambahkan pada media yang korosif akan mengurangi atau mencegah logam bereaksi dengan media tersebut. Inhibitor bekerja dengan penyerapan ion atau molekul ke dalam permukaan logam. Inhibitor mengurangi laju korosi dengan menaikkan atau menurunkan reaksi anodik dan atau katodik, mengurangi laju difusi reaktan ke dalam permukaan logam dan menaikkan tahanan listrik permukaan logam^[1]. Umumnya inhibitor-inhibitor untuk media asam berasal dari senyawa-senyawa organik yang mengandung atom N (nitrogen), sulfur (S) dan O (oksigen). Walaupun bahan kimia sintetik ini membuktikan dapat bekerja dengan baik sebagai anti korosi, pada kenyataannya bahwa bahan kimia sintetik ini merupakan bahan kimia yang berbahaya bagi kesehatan dan tidak ramah lingkungan. Adanya efek samping ini menuntun periset untuk menemukan zat anti korosi alternatif yang berasal dari produk-produk alam yang tidak berbahaya dan ramah lingkungan. Saat ini sudah marak dikembangkan corrosion inhibitor alternatif yang ramah lingkungan atau lebih dikenal dengan istilah *green inhibitor*^[2].

Penelitian yang dilakukan oleh A.K. Satapathy et al^[3] terhadap ekstrak Gandarusa (*Justicia gendarusa*) membuktikan ekstrak tersebut mencapai efisiensi inhibisi 93% pada mild steel dilingkungan larutan 1 M HCl. A. Ostovari et al^[4] juga membuktikan bahwa efisiensi inhibisi pada ekstrak tanaman Inai atau Henna (*Lawsonia inermis Linn.*) mencapai 92,06%.

M. Lebrini et al^[5] menemukan bahwa efisiensi inhibisi ekstrak *Oxandra asbeckii* meningkat seiring meningkatnya konsentrasi ekstrak pada C38 steel yang berada

dalam larutan 1M HCl. Meningkatnya efisiensi inhibisi seiring dengan meningkatnya konsentrasi ekstrak juga diketahui oleh Emeka E. Oguzie^[6] dan A.M. Abdel-Gaber et al^[7] saat melakukan penelitian pada ekstrak Kemangi (*Occimum viridis*), Telfairia occidentalis, Mimba (*Azadirachta indica*) dan Rosela (*Hibiscus sabdariffa*), dan ekstrak Lupin (*Lupine*).

Penelitian yang dilakukan oleh M.A. Quraishi et al^[8] terhadap ekstrak daun Salam (*Murraya koenigii*) dan dan A.Y. El-Etre^[9] terhadap ekstrak daun Zaitun (*Olive*) pada mild steel yang direndam didalam larutan asam membuktikan bahwa efek inhibisi akan meningkat dengan bertambahnya konsentrasi ekstrak daun tersebut.

Data yang lengkap mengenai penelitian-penelitian yang berbasis “green inhibitor” yang dilakukan baik dengan ekstrak dari daun, buah-buahan, bunga, kulit kayu maupun akar-akaran telah dilakukan oleh M. Sangeetha et al^[10].

Bayam berasal dari Amerika tropik. Sampai sekarang, tumbuhan ini sudah tersebar di daerah tropis dan subtropis seluruh dunia. Di Indonesia, bayam dapat tumbuh sepanjang tahun dan ditemukan pada ketinggian 5-2.000 m dpl, tumbuh di daerah panas dan dingin, tetapi tumbuh lebih subur di dataran rendah pada lahan terbuka yang udaranya agak panas. Bayam Merah adalah dari tumbuhan keluarga *Amaranthacea*. Nama saintifiknya adalah *Amaranthus gangeticus*. Nama Inggrisnya adalah *Red Spinach*. Ia adalah pokok berbunga tahunan yang mempunyai bunga ungu gelap. Ia mampu tumbuh setinggi 2-3 kaki tinggi. Dari telaah fitokimia daun bayam merah, hasil penapisan menunjukkan daun mengandung saponin, flavonoid, dan steroid^[11]. Flavonoid yang berasal dari pigmen merah pada bayam merah bersifat aktioksidan. Seperti halnya bayam merah, beberapa ekstrak tanaman yang telah diteliti bersifat inhibitor seperti gandarusa, henna, kemangi, rosela, daun salam dan zaitun juga mengandung antioksidan^[13 - 18].

Proses chemical cleaning dilakukan untuk membersihkan permukaan logam seperti pada baja karbon dari kerak-kerak yang melekat dipermukaan logam tersebut, baik berupa produk korosi ataupun produk dari media yang ditampung oleh logam tersebut. Untuk melindungi permukaan logam yang dibersihkan dari *acid corrosion*, inhibitor ditambahkan kedalam larutan asam yang digunakan dalam *chemical cleaning*.

Berdasarkan asumsi bahwa bayam merah kemungkinan dapat berfungsi sebagai corrosion inhibitor karena mengandung antioksidan dan belum ada penelitian sebelumnya dilakukan untuk melihat sifat inhibisi bayam merah, oleh karena itu dirasa perlu dilakukan penelitian untuk melihat sifat inhibisi bayam merah pada baja karbon didalam lingkungan larutan asam seperti yang biasa dilakukan pada proses *chemical cleaning*.

Baja karbon merupakan material logam yang paling terbesar penggunaannya dalam suatu konstruksi industri. Pemilihan material uji menggunakan baja karbon karena selain berdasarkan pertimbangan diatas, umumnya proses *chemical cleaning* ini sebagian besar dilakukan pada baja karbon.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Penelitian kali ini ditujukan untuk mempelajari pengaruh ekstrak daun bayam merah sebagai corrosion inhibitor pada baja karbon didalam lingkungan asam dengan menggunakan HCl yaitu sebagai berikut:

1. Laju korosi baja karbon dalam 1M HCl tanpa inhibitor.
2. Laju korosi baja karbon dalam 1M HCl dengan inhibitor dari ekstrak daun bayam merah dengan variasi konsentrasi.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui laju korosi produk korosi baja karbon didalam larutan HCl.
2. Mengetahui efisiensi ekstrak daun bayam merah sebagai *acid corrosion inhibitor*.
3. Mengetahui sifat *corrosion inhibitor* dari ekstrak daun bayam merah.

1.4 BATASAN MASALAH

Penelitian yang dilakukan pada bahan uji berupa baja karbon yang direndam didalam larutan HCl dibatasi pada:

1. Tekanan operasi selama pengujian dianggap konstan pada tekanan atmosferik (1 atm).

2. Suhu pengujian dianggap konstan pada suhu ruang.
3. Larutan aerasi HCl dengan konsentrasi 1 Molar.
4. Konsentrasi ekstrak daun bayam bervariasi dari 0, 500, 1000, 2000 dan 4000 ppm.
5. Laju korosi dan efisiensi inhibisi diukur berdasarkan metoda polarisasi dengan metode Tafel dan EIS.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PRINSIP KOROSI

Korosi merupakan reaksi antara logam dengan lingkungannya. Seperti reaksi dengan larutan, reaksi dengan oksigen pada suhu tinggi atau reaksi dengan gas lainnya. Korosi terjadi karena kecenderungan logam untuk kembali ke bentuk stabilnya. Contohnya seperti yang digambarkan pada Gambar 2-1, jika Fe berada pada lingkungan yang korosif, Fe cenderung memisahkan diri dari baja dan bereaksi dengan oksigen karena Fe akan stabil jika bereaksi dengan oksigen.



Gambar 2-1. Kecenderungan Fe kembali ke bentuk stabil^[31].

Korosi merupakan reaksi elektrokimia yang terdiri dari dua reaksi setengah sel (half cell reaction), yaitu reaksi anodik atau oksidasi yang melepaskan elektron dan reaksi katodik atau reduksi yang menerima elektron. Umumnya ada 3 reaksi katodik yang terjadi, yaitu: reduksi oksigen (cepat), pelepasan hidrogen dari air netral (lambat), dan pelepasan hidrogen dari asam (cepat). Gambar 2-2 dibawah ini menggambarkan proses elektrokimia yang kemungkinan terjadi.

Penjelasan Gambar 2-2 :

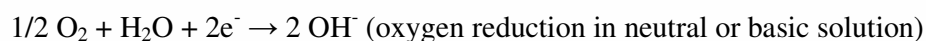
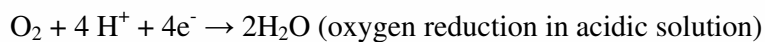
1) Reaksi anodik :

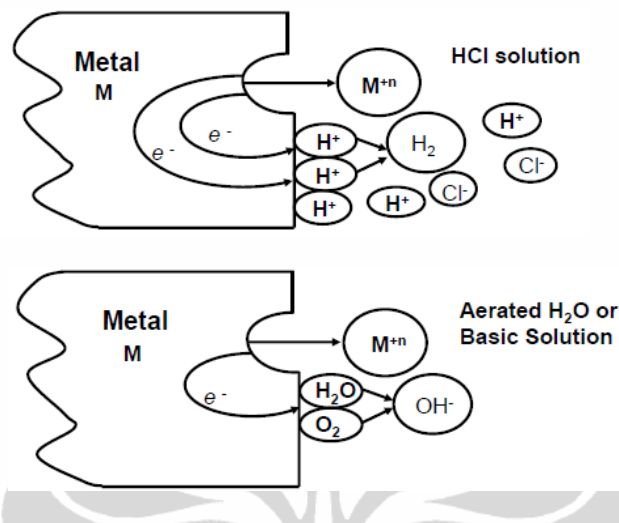
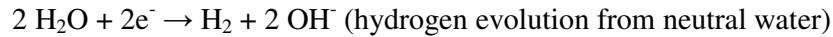
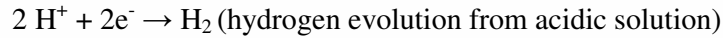


M = Metal atau logam.

n = Sejumlah elektron yang dilepaskan oleh atom dalam logam.

2) Reaksi katodik :





Gambar 2-2. Reaksi elektrokimia pada logam/metal^[31].

2.1.1` Elektrokimia

Elektrokimia berhubungan dengan perubahan kimia yang disebabkan oleh aliran elektron dan menghasilkan energi listrik dari reaksi-reaksi kimia yang terjadi. Oleh karena itu seluruh reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan elektron dan merupakan reaksi redox (*reduction-oxidation*).

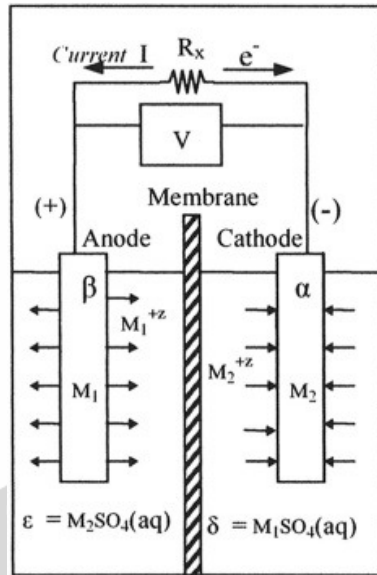
Sel elektrokimia merupakan suatu perangkat yang mewakili reaksi-reaksi elektrokimia. Ada 2 tipe sel elektrokimia;

1. *Electrolytic cell*, dimana sumber listrik dari luar mendorong terjadinya reaksi tidak spontan.
2. *Voltaic* atau sel galvanik, dimana reaksi kimia yang spontan menghasilkan energi listrik yang dapat disuplai keluar.

Aliran listrik masuk dan keluar dari sel melalui elektroda, yaitu suatu permukaan dimana reaksi-reaksi elektrokimia terjadi. Jenis-jenis elektroda tersebut adalah;

1. Katoda, dimana reaksi reduksi terjadi (memperoleh elektron).
2. Anoda, dimana reaksi oksidasi terjadi (melepaskan elektron).

Gambar 2-3 menunjukkan reaksi oksidasi dan reduksi pada sel galvanik dimana terjadi proses korosi pada salah satu logamnya.



Gambar 2-3. Reaksi oksidasi-reduksi pada sel galvanik^[21].

Perbedaan potensial elektroda pada sel elektrokimia disebut kesetimbangan potensial sel E_{cell} (disebut juga *reversible potential* atau *electromotive force emf*).

$$E = E_{cathode} - E_{anode}$$

E merupakan indikator kespontanan dari reaksi redox pada sel, berdasarkan persamaan energi bebas :

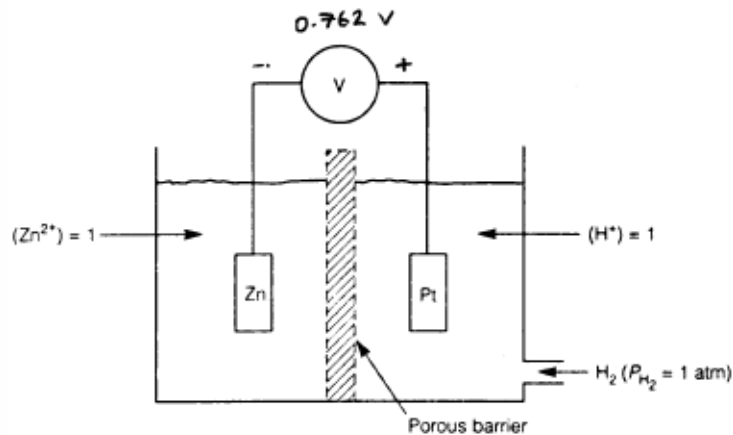
$$\Delta G = -nFE_{cell}$$

Semakin positif potensial sel, (semakin negatif ΔG) mengindikasikan semakin besar *driving force* untuk berlangsungnya reaksi spontan.

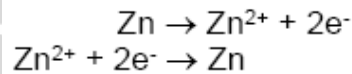
Standar kesetimbangan potensial sel adalah dimana sel bekerja pada kondisi-kondisi yang sudah distandarkan. Potensial elektroda umumnya diukur terhadap standar elektroda hidrogen (SHE); $E_0=0,00V$.

Sebagai contoh, elektroda Zn dan Pt terendam dalam suatu larutan pada kondisi standar, dan kedua tidak dihubungkan melalui konduktor sehingga tidak ada aliran arus listrik antara Zn dan Pt seperti diperlihatkan pada gambar 2-4.

Kecenderungan atom Zn bereaksi dengan larutannya baik terlarut sebagai ion positif (*cation*) yang sudah ada didalam larutan terendap sebagai atom Zn :



Gambar 2-4. Potensial elektroda vs SHE^[21].



Hasil dari reaksi ini adalah adanya penumpukan muatan positif dan negatif pada logam dan merubah potensialnya dimana kecepatan reaksi keduanya akan sama dan berlawanan arah. Nilai potensial ini dikenal sebagai potensial kesetimbangan. Tabel 2-1 menunjukkan nilai standar potensial elektroda yang diukur terhadap standar elektroda hidrogen (SHE).

Akan tetapi, umumnya konsentrasi reaktan berubah selama reaksi dan dalam hal ini E_{cell} dan E_{cell} actual dihubungkan melalui persamaan Nernst :

$$E = E_0 - (RT/nF) \ln K$$

Dimana :

E = potensial kesetimbangan pada kondisi tidak standar

E_0 = potensial kesetimbangan pada kondisi standar

R = konstanta gas, 8,314 J/mol.K

T = Suhu absolut

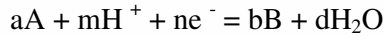
n = jumlah elektron yang dipindahkan

F = konstanta Faraday, 96500 C/mol

F = konstanta Faraday, 96500 C/mol

K = aktivitas produk / aktivitas reaktan

Dari persamaan reaksi setengah sel :



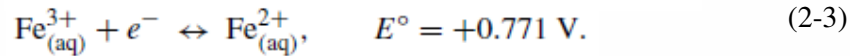
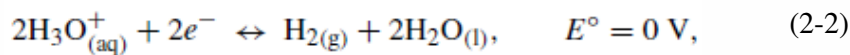
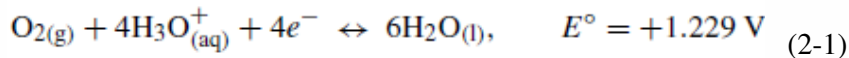
$$K = \frac{(B)^b (H_2O)^d}{(A)^a (H^+)^m}$$

Tabel 2-1. Standar potensial elektroda^[21]

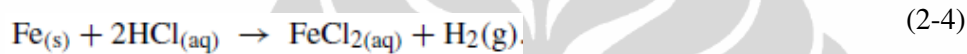
	Reduction Reaction	$E^\circ (V_{SHE})$
Anodic ↑	$O_3 + 2H^+ + 2e^- = O_2 + H_2O$	+2.070
	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- = 2H_2O$	+1.776
	$MnO_2 + 4H^+ + 4e^- = Mn^{+2} + 2H_2O$	+1.230
	$O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$	+1.229
	$AuCl_4^- + 3e^- = Au + 4Cl^-$	0.994
	$TiO_2 + 4H^+ + 4e^- = Ti + 2H_2O$	0.860
	$NiO_2 + 2H_2O + 2e^- = Ni(OH)_2 + 2(OH^-)$	0.760
	$Ag_2SO_4 + 2e^- = 2Ag + SO_4^{2-}$	0.653
	$AgNO_2 + e^- = Ag + NO_2^-$	0.590
	$O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4(OH^-)$	0.401
	$Ag_2O + H_2O + 2e^- = 2Ag + 2(OH^-)$	0.342
	$AgCl + e^- = Ag + Cl^-$	0.222
	$Pt(OH)_2 + 2e^- = Pt + 2(OH^-)$	0.40
	$Pd(OH)_2 + 2e^- = Pd + 2(OH^-)$	0.100
↓	$2H^+ + 2e^- = H_2$	0.000
	$AgCN + e^- = Ag + CN^-$	-0.020
	$WO_2 + 4H^+ + 4e^- = W + 2H_2O$	-0.120
	$Cu(OH)_2 + 2e^- = Cu + 2(OH^-)$	-0.224
	$PbSO_4 + 2e^- = Pb + SO_4^{2-}$	-0.359
	$Ni(OH)_2 + 2e^- = Ni + 2(OH^-)$	-0.660
	$Co(OH)_2 + 2e^- = Co + 2(OH^-)$	-0.730
	$Fe(OH)_3 + 3e^- = Fe + 3(OH^-)$	-0.771
	$2H_2O + 2e^- = H_2 + 2(OH^-)$	-0.828
	$Fe(OH)_2 + 2e^- = Fe + 2(OH^-)$	-0.877
Cathodic ↓	$Mn(OH)_2 + 2e^- = Mn + 2(OH^-)$	-1.470

2.1.2 Acid Corrosion

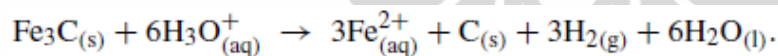
Acid corrosion adalah korosi material pada lingkungan asam. Jika baja karbon terendam didalam lingkungan asam, situasinya hampir sama saat terendam didalam air. Fasa besi adalah anoda terhadap karbida besi Fe_3C (katoda). Elektron akan membebaskan diri pada reaksi anodik dan mengalir ke katoda dengan potensial listrik yang lebih besar dan mencari kelompok yang mampu menerimanya. Kelompok tersebut adalah : kation H_3O^+ , oksigen terlarut O_2 dan kation Fe^{3+} yang terbentuk dari oksidasi Fe^{2+} oleh oksigen terlarut. Reaksi katodik yang dapat terjadi pada permukaan baja karbon :



Korosi terjadi jika $E^\circ_{(\text{katodik})} > E^\circ_{(\text{anodik})}$. Potensial listrik ketiga reaksi katodik lebih positif dibanding dengan reaksi anodik pada Fe. Oleh karena itu apabila baja karbon kontak dengan lingkungan asam, ketiga reaksi katodik tersebut mungkin terjadi. Reaksi total pelarutan besi (dissolution) didalam HCl (tanpa adanya oksigen terlarut) menjadi :



Jika baja karbon terendam didalam lingkungan asam dengan oksigen terlarut, kation Fe^{2+} teroksidasi oleh oksigen terlarut menjadi Fe^{3+} . Oleh karena itu reaksi katodik pada persamaan (2-3) berperan penting setelah beberapa saat baja karbon terendam didalam lingkungan asam dan oksigen terlarut mencapai permukaan logam. Selanjutnya satu reaksi anoda (oksidasi besi) akan berhubungan dengan beberapa reaksi katodik pada saat yang bersamaan. Inklusi katodik Fe_3C pada baja karbon berpengaruh terhadap reaksi pada persamaan (2-2). Reduksi kation H_3O^+ semakin deras seiring besarnya jumlah inklusi katodik pada permukaan baja karbon. Deposit karbon hitam akan terbentuk pada permukaan baja karbon karena reaksi berikut :



2.2 POLARISASI

Misalkan dua atau lebih proses kesetimbangan terjadi pada sebuah permukaan logam, seperti misalnya pada *Zinc* yang terendam didalam larutan HCl yang bebas oksigen ataupun didalam aerasi HCl, potensial korosi yang terjadi merupakan kompromi antara beberapa potensial dari reaksi kesetimbangan anodik dan katodik yang terlibat. Perbedaan antara resultan potensial (E) dan masing-masing potensial reaksi kesetimbangan (E_{eq}) disebut sebagai polarisasi dan diukur sebagai *overpotential* (η). yaitu :

Pada kenyataannya, laju perpindahan elektron pada berbagai logam adalah bervariasi, sehingga laju pelepasan hidrogen pada tiap permukaan logam menjadi bervariasi.

Exchange current density (I_0) adalah satu variabel yang paling penting yang dapat menerangkan perbedaan laju reaksi hidrogen pada permukaan logam. Tabel 2-2 berisi perkiraan Exchange current density untuk reduksi ion hidrogen pada berbagai logam.

Tabel 2-2. Perkiraan Exchange current density untuk reduksi ion hidrogen pada berbagai logam pada 25°C^[21].

Metal	$\log_{10} i_0$ (A/cm ²)
Pb, Hg	-13
Zn	-11
Sn, Al, Be	-10
Ni, Ag, Cu, Cd	-7
Fe, Au, Mo	-6
W, Co, Ta	-5
Pd, Rh	-4
Pt	-2

Akan tetapi, exchange current density seperti tabel diatas harus ditentukan melalui pengujian dengan memindai potensial melalui peralatan pengujian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-6. Alat instrumentasi yang melakukan pengukuran-pengukuran *potentiodynamic* dimana pengendali daya (*potentiostat/galvanostat*) digunakan untuk dilewati arus melalui elektroda kerja (W), dan elektroda tambahan direndamkan didalam larutan untuk memonitor potensial elektroda kerja bersama dengan elektroda referensi dan sebuah *Luggin capillary*.

Pernyataan umum yang menjelaskan polarisasi diberikan oleh persamaan Butler-Volmer :

$$i_{\text{reaction}} = i_0 \left\{ \exp\left(-\beta \frac{nF}{RT} \eta_{\text{reaction}}\right) - \exp\left((1-\beta) \frac{nF}{RT} \eta_{\text{reaction}}\right) \right\} \quad (2-6)$$

Dimana :

i_{reaction} = Arus anodik atau katodik

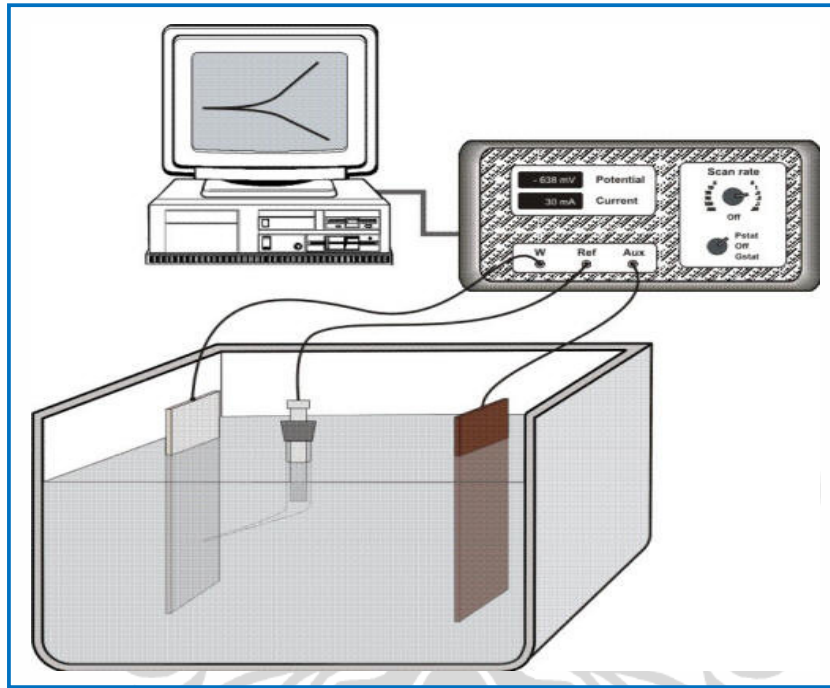
β = Penghalang (*barrier*) terjadinya perpindahan muatan untuk reaksi anodik atau katodik

n = Jumlah elektron yang berpartisipasi

R = Konstanta gas, misalnya $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

T = Suhu absolut (K)

F = $96.485 \text{ C/(mol electron)}$



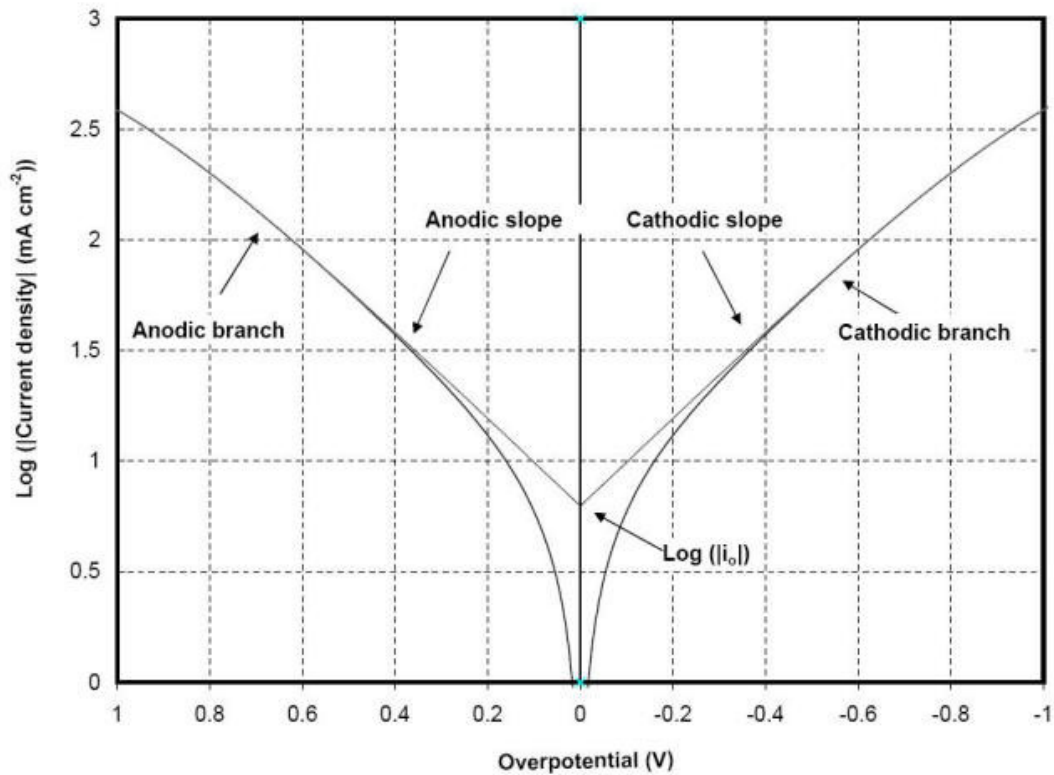
Gambar 2-6. Peralatan pengujian elektrokimia^[1].

Jika η_{reaction} adalah katodik (negatif), pernyataan kedua pada persamaan (2-6) dapat diabaikan dan arus jenis katodik (i_c) (selanjutnya disebut *current density*) dapat dinyatakan dengan persamaan yang lebih sederhana :

$$i_{\text{reaction}} = i_c = i_0 \exp\left(-\beta \frac{nF}{RT} \eta_{\text{reaction}}\right)$$

$$\eta_{\text{reaction}} = \eta_c = b_c \log_{10} \left(\frac{i_c}{i_0} \right)$$

$$b_c = -2.303 \frac{RT}{\beta nF}$$



Gambar 2-7. Plot η terhadap $\log |i|$ atau Tafel plot menunjukkan exchange current density yang didapat dari perpotongan^[1].

Dimana b_c pada persamaan diatas adalah koefisien Tafel katodik yang didapat dari slop pada diagram η terhadap $\log |i|$, dengan perpotongannya yang menghasilkan harga i_0 seperti yang dilihat pada Gambar 2-7.

Jika sebaliknya η_{reaction} adalah anodik (positif), pernyataan pertama pada persamaan (2-6) dapat diabaikan dan current density katodik (i_a) dapat dinyatakan dengan persamaan seperti dibawah ini berikut b_a yang didapat melalui plot η terhadap $\log |i|$:

$$\eta_a = b_a \log_{10} \left(\frac{|i_a|}{i_0} \right)$$

$$b_a = 2.303 \times \frac{RT}{\beta nF}$$

$$i_{\text{reaction}} = i_a = -i_0 \exp \left((1-\beta) \frac{nF}{RT} \eta_{\text{reaction}} \right)$$

Laju reaksi elektrokimia dan kimia karena overpotensial anodik atau katodik dapat diprediksi melalui persamaan Faraday :

$$R_F = \frac{iA_{w,j}}{zF} \quad (2-7)$$

Dimana :

i = Current density (A/cm²)

$A_{w,j}$ = Berat atom spesies j (g/mol)

F = konstanta Faraday, 96500 C/mol

z = Nomor valensi elemen yang teroksidasi

Secara umum, logam yang terkorosi adalah *equivalen short-circuit cell* atau *energy-producing system*, dimana terjadi penghamburan (*dissipation*) energi selama produksi dari hasil korosi^[19]. Jadi oksidasi pada logam sama dengan logam yang terkorosi. Membagi persamaan Faraday pada (2-7) dengan berat jenis logam ρ akan menyatakan laju korosi (*rate of metal dissolution*) sebagai :

$$C_R = \frac{R_F}{\rho}$$

$$C_R = \frac{i_{corr} A_w}{zF\rho}$$

Dimana :

C_R = Laju korosi (cm/tahun)

ρ = Berat jenis logam (g/cm³)

Selain dengan ekstrapolasi Tafel, metoda polarisasi lainnya yang dapat melakukan karakterisasi pada elektroda termasuk menentukan resistansi polarisasi (R_p), laju korosi (C_R) adalah dengan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS).

EIS bekerja berdasarkan *transient response* terhadap sirkuit yang setara dengan antar muka elektroda/larutan. Tanggapan yang terjadi dapat dianalisa melalui transfer function berdasarkan rangsangan potensial dengan amplitudo kecil yang diterapkan dengan sinyal yang bervariasi. Pada gilirannya, rangsangan potensial

menghasilkan tanggapan berupa arus dan sebaliknya. Pada metoda impedansi, gangguan gelombang sinus pada amplitudo kecil diaplikasikan pada sistim korosi dan dimodelkan dengan sirkuit yang setara (Gambar 2-8) untuk menentukan mekanisme korosi dan tahanan polarisasi. Jadi, sebuah *transfer function* yang komplek berupa :

$$T = \frac{\text{Output}}{\text{Input}}$$

Transfer function tergantung pada frekuensi angular dan dinyatakan sebagai *impedance* $Z(\omega)$ dan *admittance* $Y(\omega)$. $Z(\omega)$ adalah faktor frekuensi yang tergantung pada kesepadanan dari transfer function antara rangsangan berupa potensial dan tanggapan berupa arus. Jadi untuk arus berupa gangguan sinusoidal, transfer function adalah sistim impedansi [$Z(\omega)$] dan potensial berupa gangguan sinusoidal, transfer function adalah admittance sistim [$Y(\omega)$]. Oleh karena itu :

$$Z(\omega) = \frac{E(t)}{I(t)} = Z'(\omega) + jZ''(\omega)$$

$$Y(\omega) = \frac{I(t)}{E(t)} = Y'(\omega) + jY''(\omega)$$

Dimana :

$E(t)$ = *time-dependent potential* (V)

$I(t)$ = *time-dependent current* (A)

$\omega = 2\pi f$ = Frekuensi angular (Hz)

f = Frekuensi (Hz)

$Z'(\omega)$, $Y'(\omega)$ = Bagian dari real

$Z''(\omega)$, $Y''(\omega)$ = Bagian dari imaginary

$j = -1^{1/2}$ = Operator imaginary

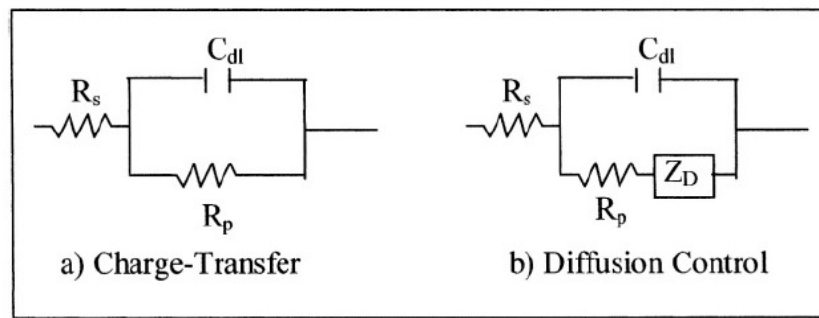
t = Waktu (d)

Dari hukum Ohm :

$$E = IR \quad \text{For DC, } f = 0 \text{ Hz} \quad (2-8)$$

$$E = I|Z(\omega)| \quad \text{For AC, } f \neq 0 \text{ Hz}$$

$[Z(\omega)]$ adalah besarnya impedansi yang mengandung sebuah sirkuit yang setara, seperti kapasitor atau induktor. Dalam memodelkan sebuah sistem elektrokimia sebagai sebuah sirkuit elektrokimia, potensial berupa gelombang diterapkan pada sirkuit dan tanggapan arus berupa signal frekuensi menghasilkan data impedansi. Sehingga data impedansi berkenaan dengan variasi dalam bentuk amplitudo potensial dan arus, dan sudut pergeseran gelombang (*phase shift angle*). Teknik ini digunakan sebagai pendekatan untuk menganalisa sifat korosi pada logam. Gambar 2-8 memperlihatkan 2 model skematik dari sirkuit elektrokimia.



Gambar 2-8. Skematik dari sirkuit elektrokimia^[21].

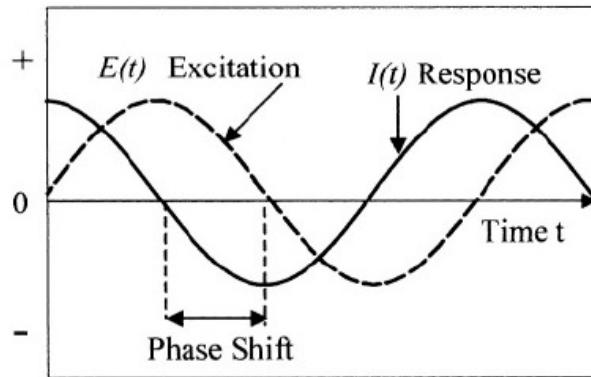
Untuk skematik a) pada Gambar 2-8, yang diperlukan dalam sirkuit hanya tahanan untuk larutan (*solution resistance* R_s), tahanan untuk polarisasi (*polarization resistance* R_p), dan kapasitor (C_{dl}). Sebaliknya jika sistem elektrokimia adalah berupa *diffusion-control*, impedansi difusi (Z_D) digabungkan kedalam sirkuit.

Eksitasi potensial dan respon arus secara skematik ditunjukkan pada Gambar 2-9 sebagai eksitasi sinusoidal.

Jika sinusoidal eksitasi potensial diaplikasikan pada antar muka elektroda / larutan, maka potensial, arus dan impedansi dapat diprediksi berdasarkan pemodelan matematika yang dikembangkan oleh Bard dan Faulkner^[20] :

$$E(t) = I(t) Z(\omega) = E_o \sin(\omega t)$$

$$I(t) = I_o \sin(\omega t + \theta)$$



Gambar 2-9. Skematik dari sinusoidal eksitasi potensial^[21]

Dimana :

E_0, I_0 =Konstan

θ = Sudut pergeseran gelombang antara $E(t)$ dan $I(t)$

$\omega = 2\pi f$ dan $10 \text{ Hz} \leq f \leq 100 \text{ Hz}$

Besarnya $Z(\omega)$ dan $Y(\omega)$ adalah :

$$|Z(\omega)| = \sqrt{[Z(\omega)']^2 + [Z(\omega)'']^2}$$

$$|Y(\omega)| = \sqrt{[Y(\omega)']^2 + [Y(\omega)'']^2}$$

Dan sudut pergeseran gelombang didefinisikan sebagai :

$$\theta = \tan^{-1} [Z(\omega)'' / Z(\omega)']$$

Karakteristik signal AC pada sirkuit elektrokimia pada Gambar (2-8a) dijelaskan melalui impedansi dalam bentuk :

$$Z(\omega) = \left[R_s + \frac{R_p}{1 - \omega^2 C^2 R_p^2} \right] - j \left[\frac{\omega C R_p^2}{1 - \omega^2 C^2 R_p^2} \right] \quad (2-9)$$

Dimana C adalah kapasitansi antarmuka sebuah *electrical double layer* pada permukaan elektroda (Farad/cm²).

Untuk amplitudo frekuensi rendah dan tinggi, persamaan (2-9) menghasilkan :

$$Z(\omega)_o = R_s + R_p \quad @ \quad \omega = 0 \quad (2-10)$$

$$Z(\omega)_\infty = R_s \quad @ \quad \omega = \infty \quad (2-11)$$

Mengkombinasikan persamaan (2-10) dan (2-11) menghasilkan resistansi polarisasi sebagai berikut :

$$R_p = Z(\omega)_o - R_s = Z(\omega)_o - Z(\omega)_\infty \quad (2-12)$$

Menggabungkan persamaan polarisasi resistansi untuk polarisasi linier dan persamaan (2-12) akan menghasilkan arus jenis (*current density*) dalam hubungannya dengan impedansi :

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} = \frac{\beta}{i_{corr}}$$

$$i_{corr} = \frac{\beta}{[Z(\omega)_o - Z(\omega)_\infty]} \quad (2-13)$$

Menggunakan hukum Faraday, persamaan (2-13) menjadi :

$$C_R = \frac{\beta A_w}{[Z(\omega)_o - Z(\omega)_\infty] Z F \rho} \quad (2-14)$$

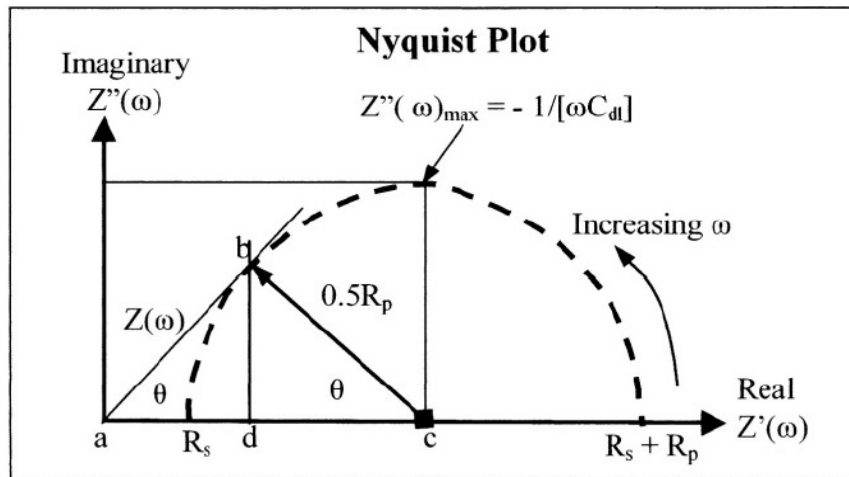
Analisa lanjutan pada persamaan (2-9) bersama dengan persamaan (2-8) akan menghasilkan persamaan impedansi lingkaran untuk mekanisme *charge control*:

$$\left[Z'(\omega) - \left(R_s + \frac{1}{2} R_p \right) \right]^2 + [Z''(\omega)]^2 = \left[\frac{1}{2} R_p \right]^2 \quad (2-15)$$

Geometri dari persamaan (2-15) secara skematik ditunjukkan pada Gambar 2-10 dengan radius $R_p/2$. Gambar ini dikenal sebagai **Nyquist plot**, dimana sudut pergeseran gelombang (*phase shift angle*) dan resistansi polarisasi (*polarization resistance*) menjadi :

$$\tan(\theta) \simeq \frac{|Z(\omega)|}{R_p/2}$$

$$R_p \simeq \frac{2|Z(\omega)|}{\tan(\theta)}$$



Gambar 2-10. Nyquist plot impedansi untuk sirkuit elektrokimia charge control pada Gambar 2-8(a)^[21].

Selanjutnya, kapasitansi double layer dapat dihitung dengan menggunakan ekspresi berikut ini :

$$C_{dl} = 1/[\omega R_p]$$

2.3 CORROSION INHIBITOR

Corrosion inhibitor adalah senyawa kimia yang mana apabila ditambahkan dalam jumlah konsentrasi yang sedikit kedalam lingkungannya akan meminimalkan atau menghambat korosi. Inhibitor yang efisien adalah yang cocok dengan lingkungannya, dapat digunakan secara ekonomis, dan menghasilkan pengaruh yang diharapkan apabila dalam konsentrasi yang sedikit didalam lingkungannya.

Efisiensi inhibitor dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini :

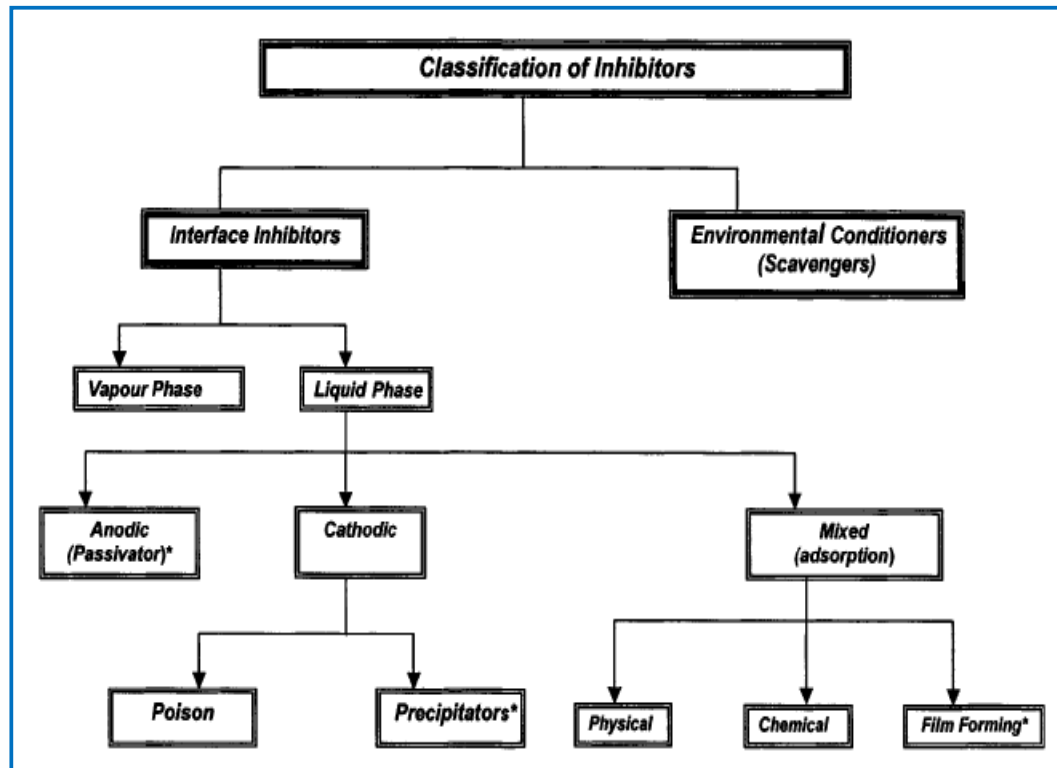
$$\text{Efisiensi inhibitor (\%)} = 100 \frac{(CR_{\text{uninhibited}} - CR_{\text{inhibited}})}{CR_{\text{uninhibited}}}$$

Dimana :

$CR_{\text{uninhibited}}$: laju korosi tanpa inhibitor

$CR_{\text{inhibited}}$: Lajukorosi dengan inhibitor

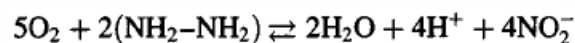
Pemilihan inhibitor diambil berdasarkan pada logam dan lingkungan dimana inhibitor tersebut diaplikasikan. Inhibitor diklasifikasikan kedalam inhibitor sebagai pengkondisi lingkungan (*environmental conditioner*) dan antarmuka (*interface*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-11.



Gambar 2-11. Klasifikasi inhibitor secara kualitatif^[22].

Environment conditioner

Inhibitor ini bekerja dengan mengendalikan spesies yang korosif didalam sebuah media. Menurunkan sifat korosif dari media tersebut dengan mengikat senyawa yang agresif. Mekanismenya dicontohkan seperti *hydrazine* mengikat oksigen melalui reaksi berikut ini :

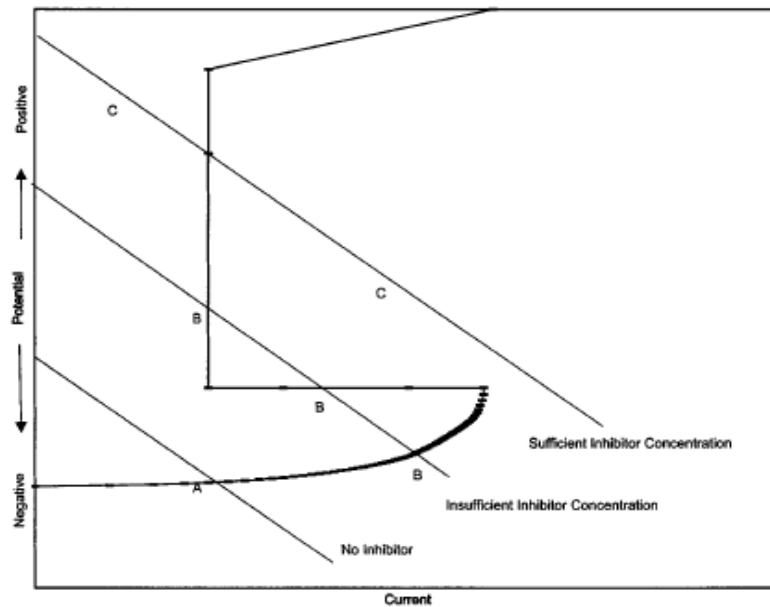


Interface inhibitor mengendalikan korosi dengan membentuk lapisan (*film*) pada antarmuka antara logam dan lingkungannya. Inhibitor ini diklasifikasikan kedalam

fasa cair dan fasa uap. Inhibitor fasa cair seperti inhibitor anodik, katodik atau gabungan keduanya (*mixed inhibitor*).

Inhibitor anodik (passivator)

Cara kerja inhibitor anodik dapat dijelaskan dengan menggunakan diagram polarisasi active-passive metal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-12.



Gambar 2-12. Diagram active-passive metal^[22].

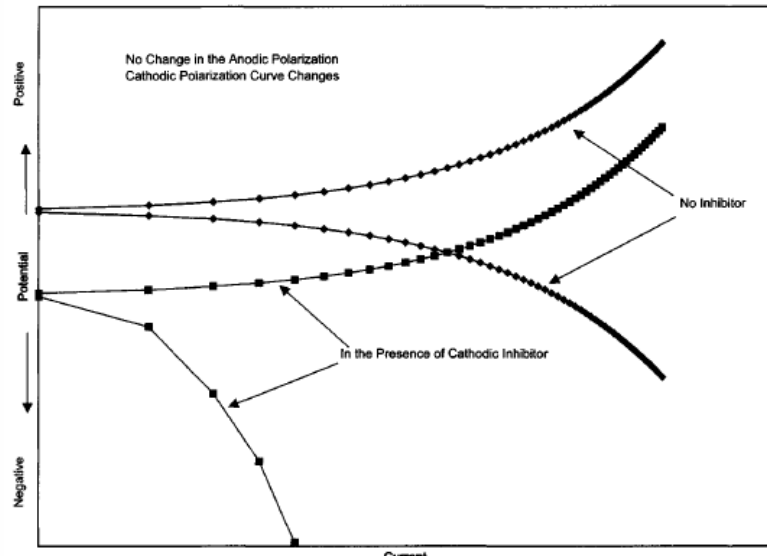
Tanpa adanya inhibitor, logam terkorosi pada laju korosi yang bersesuaian dengan titik A. Dengan meningkatnya konsentrasi inhibitor, laju korosi juga meningkat sampai konsentrasi kritis tercapai pada titik B. Kemudian ada transisi yang cepat dari logam menjadi pasif dan laju korosi menurun (titik C).

Inhibitor katodik

Pada larutan asam, reaksi katodik ditandai adanya reduksi ion hidrogen menjadi atom hidrogen, kemudian bergabung membentuk molekul hidrogen. Inhibitor katodik akan menghambat reaksi katodik seperti diatas. Gambar 2-13 menunjukkan pengaruh inhibitor katodik pada kurva polarisasi. Dalam hal ini, slop pada kurva anodik tidak terpengaruh, akan tetapi slop pada kurva katodik berubah.

Mixed inhibitor

Sekitar 80% inhibitor adalah sebagai senyawa organik yang secara khusus tidak dapat dikategorikan sebagai anodik atau katodik, oleh karena itu disebut *mixed inhibitor*. Efektifitas inhibitor organik tergantung bagaimana inhibitor diserap dan melindungi permukaan logam. Penyerapan (*adsorption*) tergantung pada struktur inhibitor, muatan dari permukaan logam, dan tipe elektrolit.

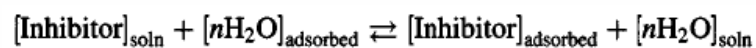


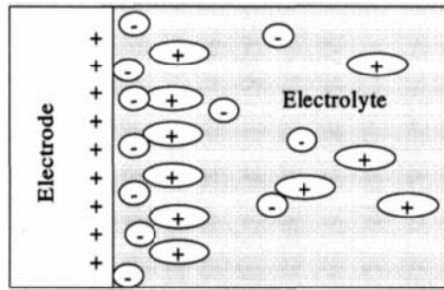
Gambar 2-13. Kurva polarisasi ditandai dengan adanya inhibitor katodik^[22].

Mixed inhibitor melindungi logam melalui 3 cara, yaitu :

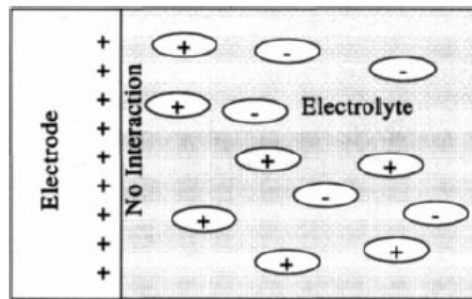
- *Physical adsorption*

Merupakan hasil dari interaksi elektrostatis antara inhibitor dan permukaan logam. Jika permukaan logam bermuatan positif, adsorpsi inhibitor akan bermuatan negatif (Gambar 2-14a). Aksi molekul-molekul bermuatan positif yang berkombinasi dengan muatan negatif diantaranya dapat menghambat logam bermuatan positif (Gambar 2-14b). Molekul-molekul air terserap di permukaan metal yang terendam didalam cairan. Molekul-molekul organik tersebut menggantikan sejumlah n molekul-molekul air seperti diilustrasikan dibawah ini :





Gambar 2-14a. Adsorpsi inhibitor bermuatan negatif pada permukaan logam bermuatan positif^[22].



Gambar 2-14b. Molekul inhibitor bermuatan positif tidak berinteraksi dengan permukaan logam bermuatan^[22]

- *Chemisorption*

Melibatkan transfer muatan atau berbagi muatan antara molekul inhibitor dan permukaan logam. Dengan berinteraksi dengan atom-atom pada permukaan logam, inhibitor ini mengganggu proses disolusi logam. Proses *chemisorption* lebih lambat dibanding *physical adsorption*, semakin meningkatnya suhu, proses adsorpsi dan inhibisi juga meningkat.

- *Film formation*

Molekul-molekul inhibitor yang terserap juga dapat membentuk lapisan-lapisan film polimer pada reaksi-reaksi permukaan. Proteksi terhadap korosi akan meningkat seiring berkembangnya lapisan film dengan ketebalan beberapa ratus angstrom. Inhibisi akan efektif apabila lapisan film tidak larut dan menghambat masuknya larutan menuju logam.

2.3.1 Contoh Corrosion Inhibitor

Inhibitor komersial dalam prakteknya jarang sebagai zat yang murni, umumnya berupa campuran dengan bahan-bahan aktif untuk inhibitor, termasuk surfactant, demulsifier, carrier dan biocide.

Bahan-bahan aktif dari inhibitor organik mengandung satu atau lebih dari kelompok fungsional yang mengandung satu atau lebih atom-atom N, O, S, P atau Se hingga inhibitor melekat diatas permukaan logam. Beberapa kelompok fungsional disusun berdasarkan Tabel 2-3. Kelompok tersebut melekat pada rantai utamanya, yang mana meningkatkan kemampuan molekul inhibitor untuk menutupi sejumlah besar luas permukaan.

Tabel 2-3. Beberapa kelompok fungsional didalam inhibitor organik^[22].

Structure	Name	Structure	Name
-OH	hydroxy	-CONH ₂	Amide
-C≡C-	-yne	-SH	Thiol
-C-O-C-	epoxy	-S-	Sulfide
-COOH	carboxy	-S=O	Sulfoxide
-C-N-C-	amine	-C=S-	Thio
-NH ₂	amino	-P=O	Phosphonium
-NH	imino	-P-	Phospho
-NO ₂	nitro	-As-	Arsano
-N=N-N-	triazole	-Se-	Seleno

2.3.2 Green Corrosion Inhibitor

Dengan meningkatnya keprihatinan atas lingkungan diseluruh dunia, sehingga kemungkinan berpengaruh atas pemilihan inhibitor dimasa mendatang. Persyaratan lingkungan masih dikembangkan, akan tetapi beberapa elemen sudah disetujui.

Biodegradation, atau *biological oxygen demand* (BOD) sekurang-kurangnya harus 60% dan inhibitor harus bebas racun (*nontoxic*). BOD mengukur inhibitor dengan melihat seberapa lama inhibitor akan bertahan dilingkungan. *Toxicity* didalam inhibitor diukur dengan LC₅₀ atau EC₅₀. LC₅₀ adalah konsentrasi inhibitor yang diperlukan untuk membunuh 50% total populasi didalam pengujian dalam jangka waktu 24 dan 48 jam. EC₅₀ adalah konsentrasi inhibitor efektif yang berpengaruh merugikan bagi 50% populasi. Toxicity beberapa inhibitor ditunjukkan pada Tabel 2-4.

Permintaan akan corrosion inhibitor yang *biogradable* dibandingkan dengan formulasi yang sudah berjalan semakin meningkat. *Green inhibitor* memperlihatkan perbaikan yang substansial bagi lingkungan dan kemungkinan akan menjadi inhibitor yang digunakan dimasa mendatang.

Tabel 2-4. Toxicity beberapa inhibitor^[22]

Compound	LC ₅₀ , (mg/kg)
Propargyl alcohol	55
Hexynol	34
Cinnamaldehyde	2200
Formaldehyde	800
Dodecylpyridinium bromide	320
Naphthylmethylquinolinium chloride	644
Nonylphenol-ethylene oxide surfactants	1310



$$\eta = E - E_{eq}$$

Ada tiga tipe polarisasi yang diekspresikan sebagai :

$$\eta_{total} = \eta_{act} + \eta_{conc} + iR$$

Dimana :

η_{act} = Activation overpotential

η_{conc} = Concentration overpotential

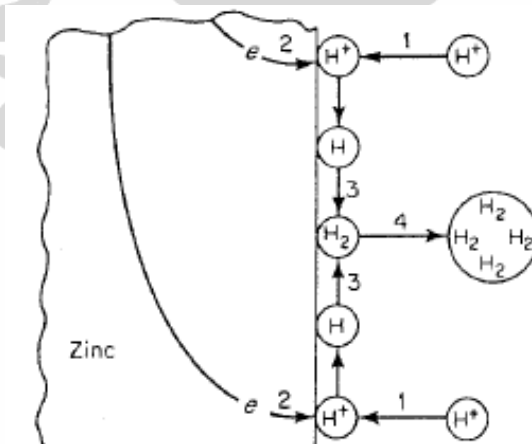
iR = Ohmic drop

Secara umum aktivasi polarisasi adalah fenomena elektrokimia yang berhubungan dengan perpindahan arus, dimana tahapan dari reaksi mengendalikan laju aliran electron dari permukaan dan mengalami oksidasi.

Sebagai contoh (lihat Gambar 2-5), reaksi katodik pada hidrogen seperti dibawah ini :



Langkah 3 : Molekul-molekul H_2 bergabung dan membentuk gas-gas hidrogen



Gambar 2-5. Reaksi reduksi hidrogen dibawah kendali aktivasi^[31].

Tiap langkah dari reaksi diatas mengendalikan laju reaksi dan menyebabkan polarisasi aktivasi. Sementara reaksi diatas terlihat sederhana, pada kenyataannya laju dimana ion hidrogen ditransformasikan menjadi gas hidrogen merupakan fungsi beberapa faktor, termasuk laju perpindahan elektron logam menuju ion hidrogen.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 TAHAPAN PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan secara garis besar terdiri dari 3 tahapan, yaitu mempersiapkan ekstrak dari daun bayam merah dan logam baja sebagai elektroda kerja, tahap kedua adalah karakterisasi senyawa ekstrak menggunakan FTIR dan karakterisasi elektroda kerja dengan uji spektroskopi. Tahap terakhir pengukuran laju korosi dan efisiensi ekstrak daun bayam merah sebagai produk inhibitor dengan metode Tafel dan EIS. Tahapan-tahapan ditampilkan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3-1.

3.2 PERSIAPAN BAHAN UJI

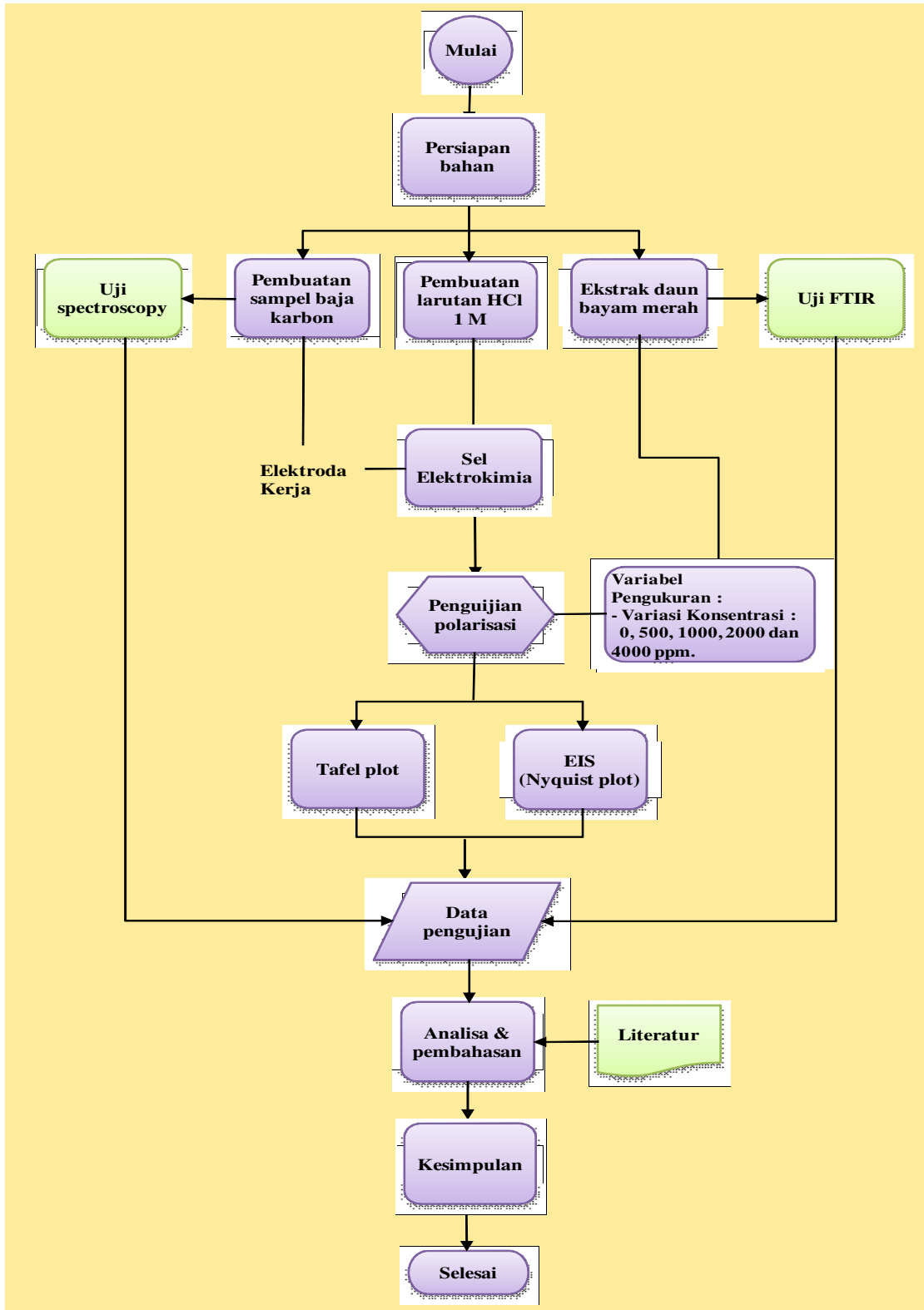
3.2.1 Menyiapkan Logam Uji

A. Peralatan dan Bahan

1. Material yang akan di uji (*carbon steel*, ketebalan 1 mm).
2. Kertas amplas dengan kekerasan 600, 800, 1000 dan 1200.
3. HCl pekat 30%.
4. Aquades.
5. Desikator.

B. Prosedur persiapan

1. Potong baja karbon dengan bentuk lingkaran dengan diameter 11mm sebanyak 2 buah untuk elektroda kerja dan 2 buah dengan bentuk persegi panjang dengan ukuran 25x50mm untuk sampel uji komposisi dan pembuatan serbuk baja.
2. Bersihkan kotoran-kotoran minyak, lemak dan *grease* yang menempel pada plat dengan menggunakan *alkali cleaning*.
3. Bersihkan karat yang terdapat pada permukaan plat dengan merendam didalam HCl yang sudah diencerkan selama 1 menit, kemudian bilas dan keringkan.



Gambar 3-1. Diagram alir penelitian.

4. Haluskan permukaan plat dengan amplas kekerasan 600, 800, 1000 dan 1200 grit hingga permukaan plat benar-benar halus. Kemudian bilas plat dengan aquades hingga bersih dan keringkan dengan udara panas.
5. Kemudian simpan pelat yang sudah halus didalam toples yang sudah berisi desicant atau desikator.

Untuk mengetahui komposisi logam, satu buah pelat sampel diujikan dengan spektrometer di laboratorium pengujian logam FT UI. Hasil pengujian dapat dilihat di Lampiran 1.

3.2.2 **Prosedur Pembuatan Bahan Untuk Ekstrak**

A. Peralatan dan Bahan

1. Bayam merah
2. Pemanas listrik
3. Blender

B. Prosedur persiapan

1. Bayam merah yang sudah dicuci dipisahkan daunnya dengan batangnya (Gambar 3-2).



Gambar 3-2. Daun-daun bayam dipisahkan dari batangnya.

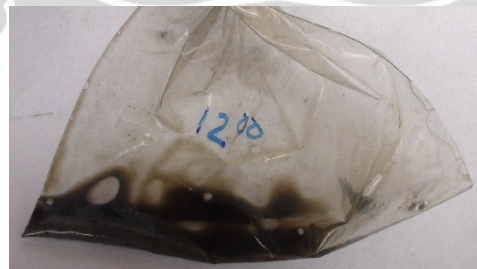
2. Daun-daun tersebut kemudian dimasukkan kedalam pemanas. Atur suhu pemanas pada 250 derajat celcius dengan waktu 10 menit untuk mengeringkan daun-daun bayam (Gambar 3-3).



Gambar 3-3. Pengaturan suhu dan waktu pengeringan dan bubuk dari hasil blender daun-daun bayam merah yang sudah kering.

3. Daun-daun yang sudah dalam keadaan kering dari pemanas kemudian dihancurkan lalu dimasukkan kedalam blender untuk dihancurkan menjadi semacam serbuk (Gambar 3-3).

Ekstrak dari serbuk daun bayam merah dilakukan di Laboratorium pusat studi Biofarmaka IPB Bogor. Sementara itu siapkan bubuk baja dari sampel yang telah dibuat dengan mengkilir sampel. Setelah dirasa cukup, serbuk direndamkan didalam ekstrak daun bayam merah selama 24 jam (Gambar 3-4).



Gambar 3-4. Serbuk besi yang direndam dengan ekstrak daun bayam .

Karakterisasi dengan FTIR untuk serbuk baja yang telah mengalami perendaman ini dilakukan dilaboratorium Pusat Studi Biofarmaka LPPM IPB. Overlay kemudian dilakukan untuk melihat pengaruh ekstrak daun bayam merah terhadap serbuk baja. Hasil pengujian dapat dilihat di Lampiran 1.

3.2.3 **Prosedur Pembuatan Larutan HCL 1 M**

A. Peralatan dan Bahan

1. HCl pekat 30%
2. Labu takar 1000 ml
3. Pipette volume
4. Beaker glass 1000 ml
5. Aquades
6. Botol 1000 ml
7. Bola hisap

B. Prosedur pembuatan larutan

1. Lakukan perhitungan untuk mendapatkan 1000 ml HCl 1M dari HCl dengan konsentrasi 30% (lihat Lampiran 2).
2. Siapkan labu takar yang bersih dan kering.
3. Siapkan 895 ml aquades (yang didapat sesuai perhitungan) dalam beaker glass.
4. Tuang sebagian air kedalam labu takar
5. Ambil 100 ml dari HCl 30% dan tuangkan kedalam labu takar yang telah diisi aquades kemudian diaduk perlahan.
6. Tuangkan sekali lagi 5 ml dari HCl 30% kedalam labu takar.
7. Tuangkan sisa aquades kedalam labu takar hingga ke garis batas sehingga didapat 1M HCl sebanyak 1000 ml.
8. Diaduk kembali larutan campuran tersebut supaya homogen dan kemudian tuangkan kedalam botol 1000ml dan ditutup.



Gambar 3-5. Bahan dan alat untuk pembuatan HCl 1M

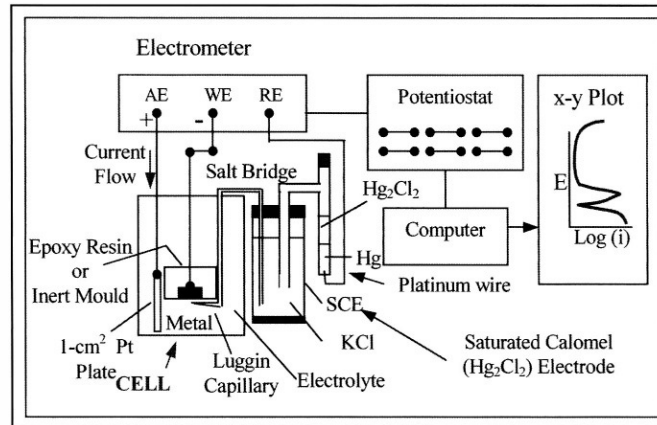
3.3 PENGUJIAN POLARISASI

3.3.1 Persiapan Alat dan Bahan

Peralatan pengujian yang dilakukan dilaboratorium kimia ITB adalah potensiostat Voltalab PGZ301 produksi Radiometer. Potensiostat tersebut dihubungkan pada sel elektrokimia yang terbuat dari tabung kaca yang terdiri dari 2 tabung dalam dan luar. Tabung dalam memuat 100 ml larutan dimana proses polarisasi terjadi didalamnya. Sel tersebut terdiri dari elektroda kerja, elektroda kalomel (SCE) sebagai elektroda acuan dan platina (Pt) sebagai elektroda bantu. Sebuah kabel disolderkan pada bagian atas elektroda kerja untuk dihubungkan ke potensiostat dan kemudian dibungkus dengan resin epoksi sehingga hanya permukaan bagian bawah yang terbuka yang merupakan daerah kontak sedangkan sisi dan bagian atas akan kedap terhadap larutan elektrolit. Posisi elektroda kerja dan elektroda platina dibuat berhadapan untuk memastikan arus yang melewati elektroda bantu hanya terpusat pada elektroda kerja. Magnetic stirrer seperti yang terlihat pada Gambar 3-6 yang berbentuk kapsul terbuat dari logam yang dibungkus dengan resin epoksi berfungsi mengaduk elektrolit selama proses polarisasi berlangsung. Instrumentasi ini secara skematik seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3-7.



Gambar 3-6. Sel elektrokimia untuk pengujian polarisasi



Gambar 3-7. Skematik instrumentasi untuk pengujian polarisasi^[21]

3.3.2 Prosedur Pengujian

Elektroda kalomel dan platina dibersihkan menggunakan Teepol CH53 dan dibilas dengan air bidestilat. Elektroda kerja dipoles terlebih dahulu dengan mesin pemoles lalu dibilas dengan air bidestilat dan aseton, kemudian dikeringkan.

Tuangkan HCl 1M kedalam tabung gelas alat uji sebanyak 100ml sesuai dengan kapasitas maksimum tabung tersebut. Jumlah ekstrak inhibitor yang ditambahkan selama pengujian berlangsung harus disesuaikan terlebih dahulu dengan 100ml HCl yang ada didalam tabung. Berikut ini adalah tabel konversi untuk jumlah ppm ekstrak yang ditambahkan kedalam 100ml HCl 1M.

Tabel 3-1. Konversi ekstrak untuk 100ml HCl.

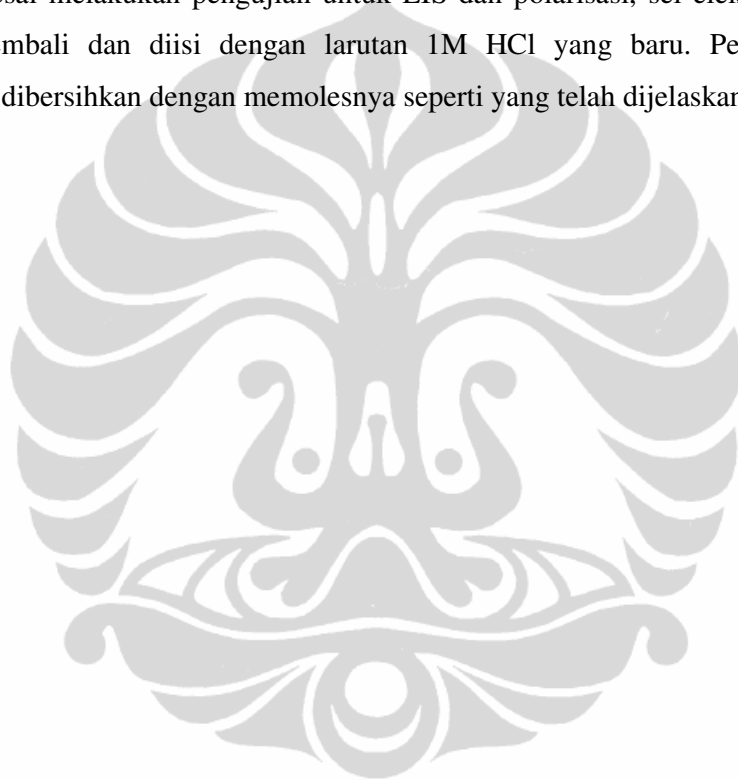
Jumlah HCl 1M	Jumlah Ekstrak (ppm)			
1000 ml	500	1000	2000	4000
	Jumlah Ekstrak (µL)			
100 ml	50	100	200	400

Kemudian setting dilakukan pada program Voltmaster 4 yang digunakan sebagai program pengolah data untuk potensiostat Voltalab PGZ301. Parameter-parameter elektroda kerja diisi secara manual, kemudian dipilih *Calomel* sebagai elektroda referensi dalam menu pilihannya. Metoda pengujian dipilih didalam menu *sequence*.

Sebelum proses pengukuran dimulai, sel elektrokimia dibiarkan selama 60 detik diatas meja *magnetic* untuk mengaktifkan *magnetic stirrer* agar interaksi antarmuka antara elektroda kerja dan larutan mencapai keadaan mantap. Tercapainya keadaan ini akan ditunjukkan oleh nilai OCP (*open circuit potential*) yang relatif stabil.

Proses pengukuran dilakukan dengan menghidupkan potensiostat dan mengaktifkan *run* pada Voltmaster4. Proses pengukuran memakan waktu kurang lebih 15 menit untuk sekali pengukuran.

Setiap selesai melakukan pengujian untuk EIS dan polarisasi, sel elektrokimia dibersihkan kembali dan diisi dengan larutan 1M HCl yang baru. Permukaan elektroda kerja dibersihkan dengan memolesnya seperti yang telah dijelaskan diatas.



BAB IV

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 KARAKTERISASI BAHAN-BAHAN UJI

4.1.1 Bahan Uji Logam

Hasil dari uji spektroskopi pada logam uji yang digunakan untuk elektroda kerja ditunjukkan pada Tabel 4-1.

Tabel 4-1. Hasil uji spectroscopy

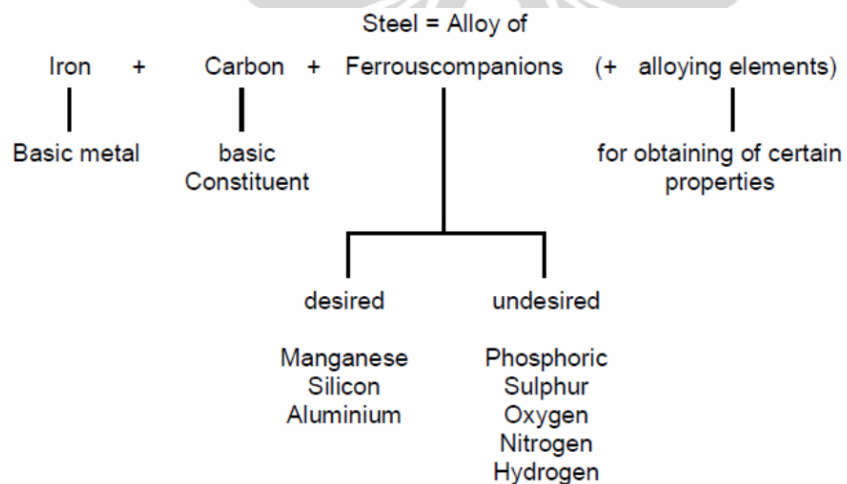
C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
0.057	0.012	<0.003**	<0.003**	0.218	<0.005**	0.014
Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
<0.005**	<0.002**	0.008	<0.002**	<0.002**	0.035	bal.

catatan :

* ketidakpastian bentangan dengan tingkat kepercayaan 95% dengan factor cakupan K=2

** (<) menunjukkan nilai berada di bawah *quantification limit* dari alat uji

Dari komposisi kimianya, sebuah logam dapat dikatakan sebagai baja jika kandungan kimianya sesuai dengan diagram yang ditunjukkan pada Gambar 4-1.



Gambar 4-1. Persyaratan umum untuk Baja^[24]

Carbon steel atau Baja karbon^[25] dikategorikan sebagai *low carbon steel* jika kandungan karbonnya <0,2%, atau *medium carbon steel* jika kandungan karbonnya berkisar antara 0,2 sampai 0,5%, dan terakhir jika kandungan karbonnya diatas 0,5% dapat disebut sebagai *high carbon steel*.

Dari hasil uji spektroskopi pada elektroda kerja, komposisi kimia utamanya adalah ; Carbon = 0,057%, Manganese = 0,218%, Silicon = 0,012%, Aluminium = 0,035%.

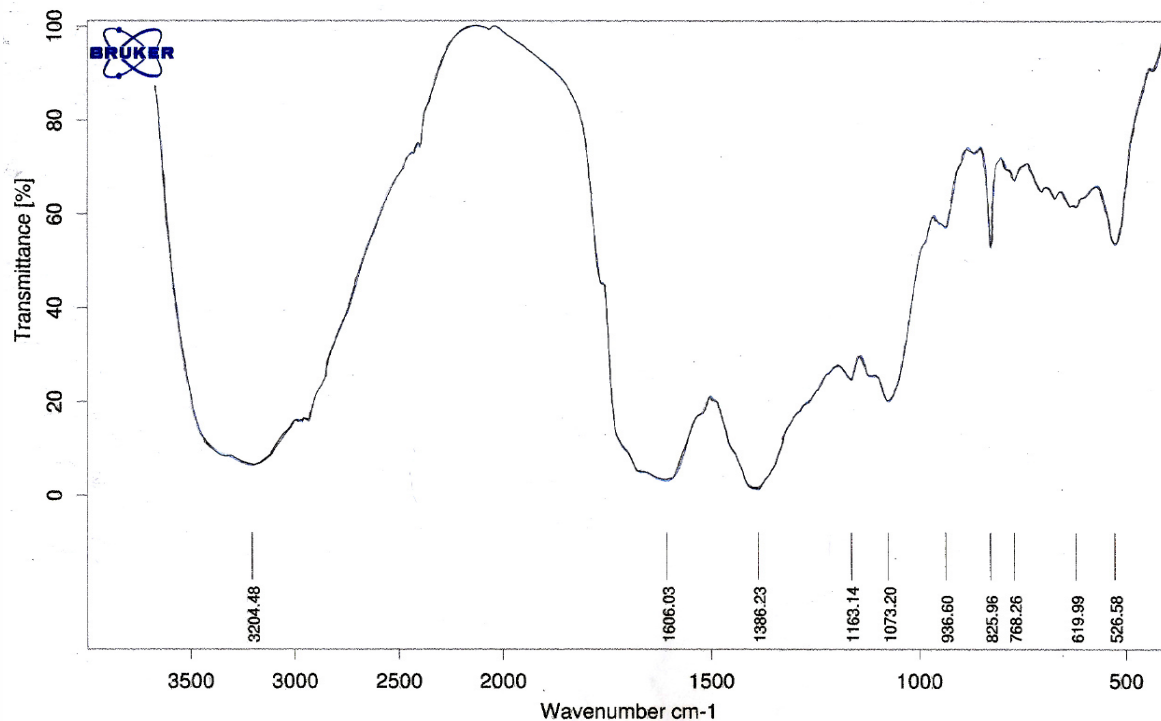
Dari Hasil diatas dan merujuk kepada referensi-referensi mengenai klasifikasi baja, elektroda kerja yang diuji dapat dikatakan sebagai baja karbon rendah. Unsur-unsur seperti *Phosphor* dan *Sulphur* kandungannya sangat kecil dan umum terdapat pada logam baja.

4.1.2 Karakterisasi Ekstrak Daun Bayam Merah

Karakterisasi ekstrak daun bayam merah dengan uji FTIR ditunjukkan pada Gambar 4-2. Dari hasil interpretasi yang didapat dari pengujian FTIR, terdapat 10 puncak bilangan gelombang yang teridentifikasi sebagai spektrum serapan, seperti yang diperlihatkan pada Tabel 4-2.

Tabel 4-2. Spektrum serapan ekstrak daun bayam merah

BILANGAN GELOMBANG	GUGUS FUNGSI
3204.48	O-H
1606.03	C=C
1386.23	CH ₃
1163.14	C-OH
1073.20	C-OH
936.60	C=C
825.96	C-H
768.26	CH ₂
619.99	C-Br
526.58	C-Br



Gambar 4-2. FTIR ekstrak daun bayam merah

Spektrum serapan dengan intensitas yang kuat pada ekstrak bayam merah ini terdapat pada bilangan gelombang, seperti bilangan gelombang $3204,48 \text{ cm}^{-1}$ kemungkinan sebagai serapan dari gugus fungsi fenol OH, bilangan gelombang $1606,03$ sebagai serapan dari gugus fungsi karbonil CO, dan bilangan gelombang $1386,23 \text{ cm}^{-1}$ sebagai serapan dari gugus fungsi alkana CH.

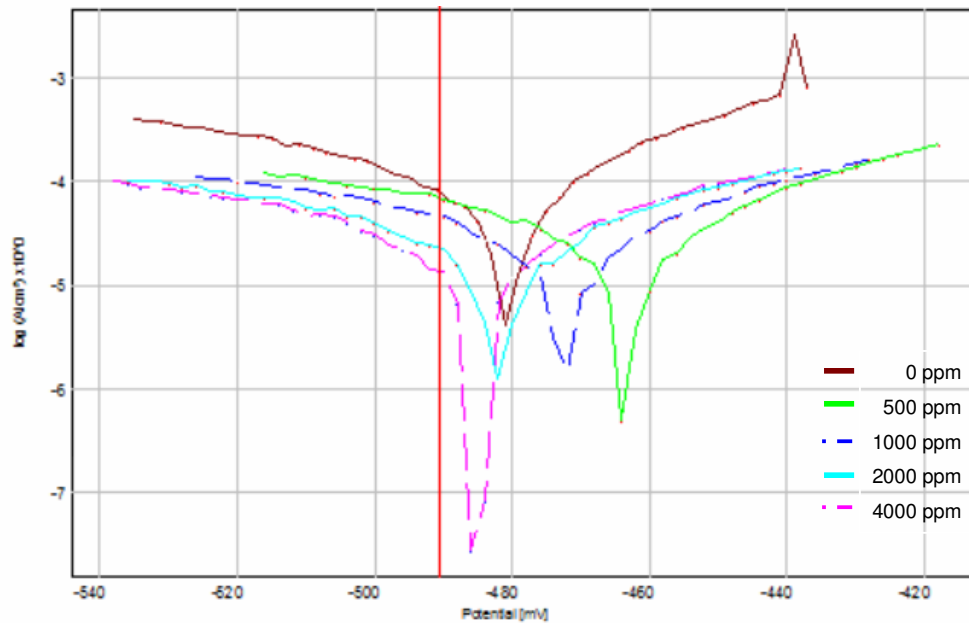
Sebagian besar senyawa organik bahan alam adalah senyawa-senyawa aromatik. Senyawa ini mengandung cincin karboaromatik yang hanya terdiri dari atom karbon. Cincin karboaromatik ini biasanya tersubstitusi oleh satu atau lebih gugus hidroksil atau gugus lainnya. Oleh karena itu sering disebut senyawa-senyawa fenol.

Dalam laporan Telaah Kandungan Kimia Daun *Amaranthus tricolor* L^[11], karakterisasi isolat-isolat dengan spektrofotometri UV-Vis, IR, spektrometri massa, diketahui bahwa isolat-isolat tersebut mempunyai gugus karbonil yang terikat dengan gugus NH amida dan terdapat juga gugus OH yang memiliki ikatan rangkap terkonjugasi.

Adanya spektrum serapan phenol, alkana dan karbonil yang dibuktikan dengan uji FTIR pada ekstrak daun bayam merah, mengindikasikan adanya senyawa *flavonoid*.

Dari hasil FTIR, ekstrak daun bayam merah mengandung gugus fungsi yang dan merupakan senyawa aromatik dimana sesuai dengan kriteria bahan-bahan aktif yang membentuk inhibitor organik^[22].

4.2 PENGUKURAN POLARISASI & EIS



Gambar 4-3. Tafel plot dengan variasi ekstrak

Tabel 4-3. Parameter-parameter pengukuran polarisasi dengan variasi ekstrak

Konsentrasi [ppm]	1 M HCl					Efisiensi Inhibisi Ei [%]
	E_{corr} [mV]	I_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	b_a [mV]	b_c [mV]	C_R [$\mu\text{m}/\text{Y}$]	
0	-484,4	95,60	40,0	-82,3	1117	-
500	-466,7	32,48	52,7	-87,7	379,9	66,00
1000	-475,8	28,52	58,2	-83,2	333,5	70,14
2000	-485,0	26,12	60,5	-83,6	305,5	72,65
4000	-490,5	25,52	63,0	-83,0	298,4	73,30

Untuk mengetahui pengaruh inhibisi dari ekstrak daun bayam merah, maka pengukuran polarisasi dilakukan pada baja karbon rendah yang direndam didalam 1 M HCl dengan variasi konsentrasi ekstrak. Hasil pengukuran diplotkan dalam bentuk kurva Tafel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-3. Parameter-parameter kinetik yang didapat dari pengukuran seperti corrosion current density I_{CORR} , corrosion potential E_{CORR} , Tafel slope, efisiensi inhibitor EI% dan laju korosi ditampilkan pada Tabel 4-3.

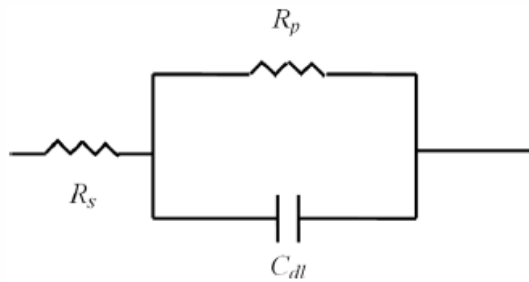
Hasil pengukuran polarisasi seperti ditunjukkan diatas menunjukkan bahwa ada pengaruh inhibisiasi oleh ekstrak daun bayam merah pada korosi baja karbon rendah pada lingkungan 1M HCl. Perubahan signifikan pada kurva polarisasi terlihat pada konsentrasi ekstrak 0 ppm ke 500 ppm dimana ditunjukkan dengan nilai current density yang terjun dari 95,6 ke 32,48 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Hal ini diperlihatkan pada perubahan laju korosi pada baja ini yang turun dari 1117 ke 379,9 $\mu\text{m}/\text{Y}$, Potensial korosi baja yang bergeser dari 484,4 ke 466,7 mV. Dari table terlihat bahwa setelah penambahan konsentrasi ekstrak hingga 2000 ppm, Tafel slope b_c beranjak naik ke nilai yang stabil dan nilai Tafel slope b_a naik. Hal ini menunjukkan bahwa ekstrak daun bayam pada konsentrasi rendah lebih mempengaruhi proses katodik dan pada konsentrasi yang lebih tinggi mempengaruhi kedua proses anodik dan katodik^[26]. Inhibitor dapat dikategorikan sebagai tipe anodik atau katodik jika potensial korosi bergeser lebih dari 85 mV terhadap potensial korosi tanpa inhibitor^[27]. Oleh karena itu ekstrak daun bayam bersifat *mixed-type corrosion inhibitor*.

Dari tabel diatas, pengaruh inhibisi ekstrak daun bayam pada baja yang cukup signifikan terbatas pada konsentrasi antara 500 sampai 1000 ppm dimana laju korosi dapat dikurangi sampai dengan 0,8 mm per tahun.

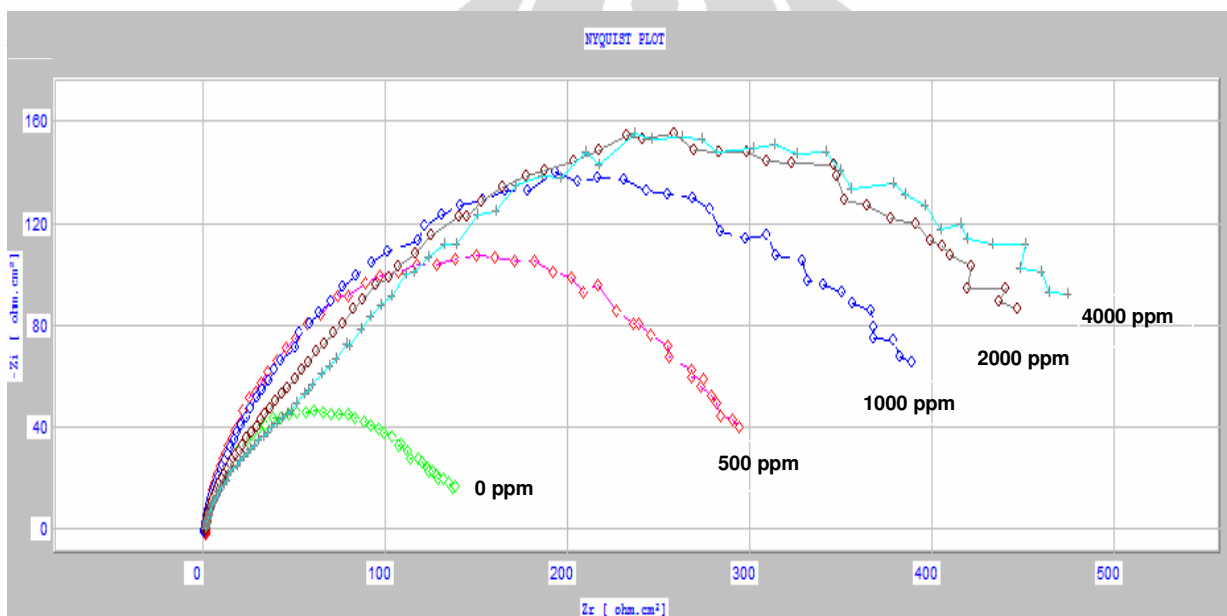
Pengujian EIS yang dilakukan untuk melihat sifat inhibisi ekstrak daun bayam merah terhadap acid corrosion baja karbon rendah didalam lingkungan 1 M HCl dan ditampilkan dalam bentuk Nyquist plot berdasarkan model sirkuit kapasitor dan resistor yang paralel (Gambar 4-4) yang diperlihatkan pada Gambar 4-5 dibawah ini.

Parameter impedansi serta *polarization resistance* R_p , *double layer capacitance* C_{dl} dan efisiensi inhibisi EI% ditunjukkan pada Tabel 4-4. Efisiensi inhibisi didapatkan dari persamaan dibawah ini :

$$EI\% = [R_p(\text{dengan ekstrak}) - R_p(\text{blanko}) / R_p(\text{dengan ekstrak})] \times 100$$



Gambar 4-4. Model sirkuit pengujian EIS



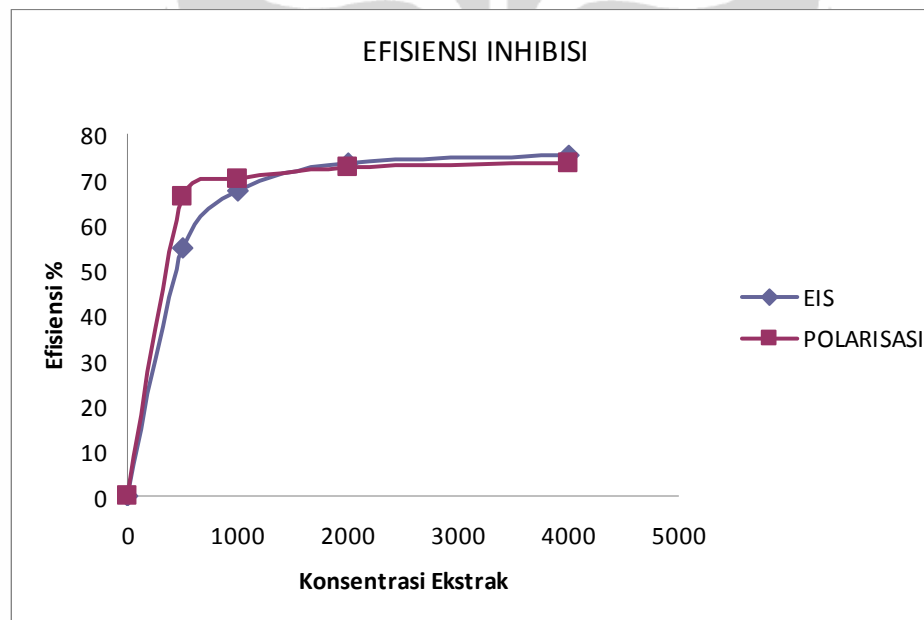
Gambar 4-5. Nyquist dengan variasi ekstrak

Tabel 4-4. Parameter impedansi dengan variasi ekstrak

Konsentrasi [ppm]	1M HCl		
	R_p [ohm.cm ²]	C_{dl} [μF/cm ²]	Effisiensi Inhibisi EI% [%]
0	138,1	51,62	-
500	305,9	26	54,85
1000	424,8	20,97	67,49
2000	519,5	19,36	73,42
4000	561,3	22,68	75,40

Dari Gambar 4-5 terlihat bahwa diameter Nyquist plot meningkat dengan bertambahnya konsentrasi ekstrak daun bayam merah. Hal ini menandakan bahwa pemberian ekstrak daun bayam dapat menghambat laju korosi pada baja karbon rendah didalam lingkungan 1 M HCl. Nilai efisiensi inhibisi yang ditunjukkan pada Tabel 4-4 memperlihatkan hasil yang sesuai.

Dari Gambar 4-6 dibawah ini, Efisiensi inhibisi ekstrak daun bayam merah antara pengujian polarisasi dan EIS memperlihatkan kecenderungan yang sama, yaitu konsentrasi ekstrak pada 500 hingga 1000 ppm dapat menghambat laju korosi cukup signifikan dan dengan angka efisiensi yang berdekatan. Hasil yang mirip diperlihatkan untuk penambahan konsentrasi ekstrak diatas 1000 ppm, bahwa kenaikan efisiensi inhibisi menjadi rendah.



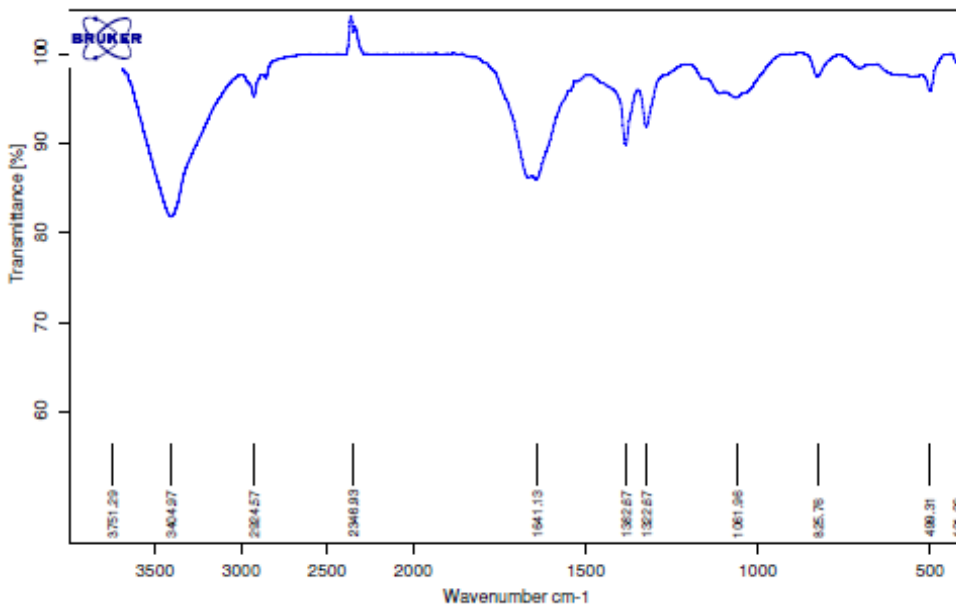
Gambar 4-6. Perbandingan efisiensi inhibisi dari pengukuran polarisasi dan EIS

4.3 MEKANISME INHIBISI

Berdasarkan pengukuran yang dilakukan dengan polarisasi dan EIS, diketahui bahwa ekstrak dengan sejumlah konsentrasi dapat menghambat laju korosi pada baja karbon rendah didalam lingkungan 1 M HCl. Dari pengukuran dengan EIS, terlihat bahwa nilai double layer capacitance C_{dl} turun seiring bertambahnya konsentrasi ekstrak daun bayam. Turunnya nilai C_{dl} karena adanya penggantian molekul-molekul air oleh molekul-molekul inhibitor pada interface atau bidang pemisah dari electrical double layer yang menandakan bahwa adsorpsi ekstrak daun bayam membuat lapisan pada permukaan baja karbon rendah didalam larutan asam^[28].

Penelitian yang dilakukan oleh S.A. Umoren et. Al^[29] terhadap ekstrak *Sida acuta* melalui UV-Vis dan FTIR menunjukkan bahwa senyawa pada ekstrak *Sida acuta* membentuk lapisan inhibisi dengan cara bereaksi dengan ion besi yang berada pada permukaan baja.

Melalui analisa FTIR, dapat diketahui jenis-jenis ikatan yang terdapat pada suatu senyawa organik. Karena ekstrak daun bayam mengandung senyawa organik yang terserap pada permukaan logam dan membentuk lapisan yang dapat menghambat laju korosi, oleh karena itu analisa FTIR juga berguna untuk memperkirakan adanya ekstrak yang terserap atau tidak pada permukaan logam^[30].



Gambar 4-7. FTIR sampel baja yang direndam selama 24 jam didalam ekstrak daun bayam merah

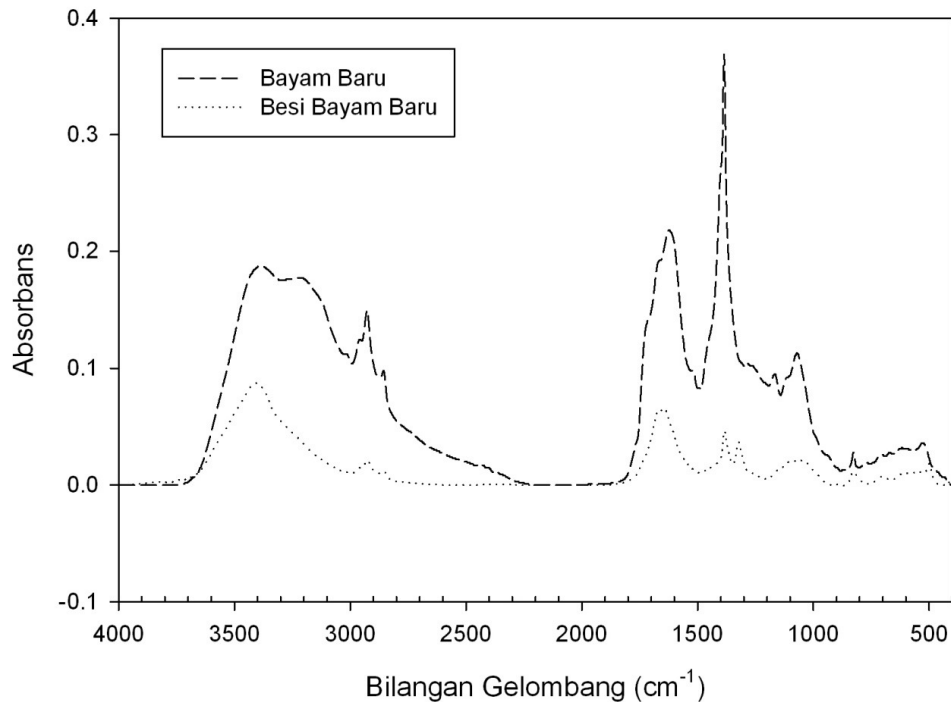
Tabel 4-5. Spektrum serapan sampel baja yang direndam didalam ekstrak daun bayam merah

BILANGAN GELOMBANG	GUGUS FUNGSI
3404.97	O-H
2924.57	CH ₂
1641.13	C=C
1382.67	CH ₃
1322.67	OH
1061.96	C-OH
825.96	C-H
499.31	C-Br

Berdasarkan referensi diatas, uji FTIR dilakukan pada sampel baja yang sudah berupa butiran dimana sebelumnya telah direndam didalam ekstrak daun bayam selama 24 jam. Kurva FTIR dan interpretasinya ditunjukkan pada Gambar 4-7 dan Tabel 4-5.

Dari Tabel 4-5, terlihat bahwa ada kesamaan serapan antara sampel baja yang direndam didalam ekstrak daun bayam merah dan ekstrak daun bayam merah sendiri. Kesamaan serapan berada pada daerah 3000-3400 cm⁻¹ yang kemungkinan sebagai serapan phenol OH, 3000-2800 dan 1480-1340 cm⁻¹ sebagai serapan alkana, dan daerah sekitar 1600-1700 cm⁻¹ sebagai serapan karbonil CO. Hal ini menunjukkan kemungkinan adanya ekstrak daun bayam merah yang membentuk lapisan pada partikel Fe tersebut.

Dari overlay dengan menggunakan UV-Vis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-8, fitur spektrum sampel baja yang telah direndam didalam ekstrak daun bayam merah memiliki kesamaan dengan fitur spektrum ekstrak daun bayam merah. Hal ini menunjukkan kemungkinan adanya ekstrak daun bayam merah yang membentuk lapisan inhibisi pada partikel Fe tersebut. Terlihat bahwa spektrum serapan pada sampel baja lebih rendah dibanding ekstrak daun bayam merah, diduga bahwa berpengaruh terhadap lapisan inhibisi yang terbentuk pada permukaan sampel baja. Hal ini dapat dihubungkan dengan efisiensi inhibisi yang didapat dari pengujian polarisasi dan EIS.



Gambar 4-8. Perbandingan spektrum serapan partikel besi dan ekstrak daun bayam merah

Dari studi AFM dan ESCA yang dilakukan untuk melihat pengaruh ekstrak tanaman *Justicia gendarusa*^[3] pada baja C38 didalam lingkungan 1M HCl menunjukkan bahwa formasi lapisan inhibitor mengandung molekul-molekul ekstrak, klorida dan oksida besi. Dari referensi diatas, diusulkan bahwa mekanisme pembentukan lapisan inhibisi pada permukaan baja dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Pembentukan FeOH^+ dan $[\text{FeClOH}]^-$.
2. Konversi FeOH^+ dan $[\text{FeClOH}]^-$ menjadi $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dan $\gamma\text{-FeOOH}$ dan membentuk oxide layer.
3. Pada pori-pori oxide layer, molekul-molekul inhibitor bereaksi dengan $[\text{FeClOH}]^-$ dan membentuk lapisan yang lebih stabil $[\text{Fe}(\text{inhibitor})_p(\text{OH})_m(\text{Cl})_n]^{2-m-n}$ dan melindungi logam.

4.4 KESIMPULAN

Pengujian-pengujian yang telah dilakukan pada ekstrak daun bayam hasilnya dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Dari hasil FTIR diketahui bahwa ekstrak daun bayam merah mengandung senyawa flavonoid, gugus-gugus fungsi didalam senyawa ekstrak mengandung bahan-bahan aktif yang membentuk inhibitor organik.
2. Berdasarkan pengujian polarisasi, ekstrak daun bayam merah bersifat sebagai *mixed-type corrosion inhibitor*.
3. Kemampuan inhibisi ekstrak daun bayam merah dalam menurunkan laju korosi pada baja karbon rendah didalam lingkungan 1 M HCl memperlihatkan hasil yang cukup signifikan pada konsentrasi 500 hingga 1000 ppm.
4. Dari pengujian dengan FTIR dan UV-Vis terhadap sampel baja yang direndam didalam ekstrak daun bayam, diketahui bahwa lapisan inhibisi terbentuk pada permukaan sampel baja.
5. Pengujian lebih lanjut dengan variasi rendaman dan temperature perlu dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Pierre R. Roberge, " *Handbook of Corrosion Engineering*", McGraw Hill, New York, 2000.
2. Pandian Bothi Raja, Mathur Gopalakrishnan Sethuraman, " *Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media-A review* ", ScienceDirect materials letters 62 (2008), 113-116.
3. A.K. Satapathy et al, " *Corrosion inhibition by Justicia gendarussa plant extract in hydrochloric acid solution* ", Corrosion Science 51(2009) 2848-2856.
4. A. Ostovari et al, " *Corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl solution by Henna extract* ", Corrosion Science 51(2009) 1935-1949.
5. M. Lebrini et al, " *Corrosion inhibition of C38 steel in 1 M hydrochloric acid medium by alkaloids extract from Oxandra asbeckii plant* ", Corrosion Science 53 (2011) 687-695.
6. Emeka E. Oguzie, " *Evaluation of the inhibitive effect of some plant extracts on the acid corrosion of mild steel* ", Corrosion Science 50 (2008) 2993-2998.
7. A.M. Abdel-Gaber et al, " *The role of acid anion on the inhibition of the acidic corrosion by Lupine extract* ", Corrosion Science 51 (2009) 1038-1042.
8. M.A. Quraishi et al, " *Green approach to corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid and sulphuric acid solutions by the extract of Murraya koenigii leaves* ", Material Chemistry and Physics 122 (2010) 114-122.
9. A.Y, El-Etre, " *Inhibition of acid corrosion of carbon steel using aqueous extract of Olive leaves* ", Journal of Colloid and Interface Science 314 (2007) 578-583.
10. M. Sangeetha et al, " *Green corrosion inhibitors-An overview* ", Zastita Materijala 52 (2011) broj 1.
11. Yesi Desmiaty, Kosasih P, Asep Gana S, " *Telaah Kandungan Kimia Daun Amaranthus tricolor L* " Sekolah Farmasi ITB, 2002.
12. Sovia Lenny, " *Senyawa Flavonoida, Fenilpropanoida dan Alkaloida* " FMIPA USU, 2006.

13. K. Mruthunjaya, V.I. Hukkeri, “ *Antioxidant and free radical scavenging potential of justicia gendarussa Burm. Leaves in vitro*”, *Natural Product Sciences* 13(3) : 199-206 (2007).
14. Haddad Khodaparust et al, “ *Phenolic compounds and antioxidant activity of henna leaves extracts (lawsonia inermis)* ”, *World Journal of Dairy & Food Sciences* 2(1) : 38-41, 2007.
15. Painsri Widyawati, “ *Potensi daun kemangi sebagai penangkap radikal bebas DPPH* ”, *Agritech* Vol. 25 No.3 halaman 137-142.
16. Dina Setya Budi Usman, “ *Karakteristik dan aktivitas antioksidan bunga rosela kering* ”, Program Studi Teknologi Pangan Fakultas Teknologi Industri Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur Surabaya, 2010.
17. Siswono Handoko Jati, “ *Efek antioksidan ekstrak etanol 70% daun salam pada hati tikus putih jantan galur wistar yang diinduksi karbon tetraklorida* ”, Fakultas Farmasi Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2008.
18. Alain Thibodeau et al, “ *The antioxidant activity of olive leaf extract and its anti inflammatory effect* ”, *Cosmetic Science Technology*, 2008.
19. D.W. Shoesmith, “ *Kinetics of Aqueous Corrosion*”, *ASM Handbook*, Vol. 13, American Society for Metals, Ninth edition, (1987).
20. A.J. Bard and L.R. Faulkner, “ *Electrochemical Methods*”, John Wiley & Sons, New York, (1980) 316.
21. Nestor Perez, “ *Electrochemistry and Corrosion Science*”, Kluwer Academic Publishers, 2004.
22. S. Papavinasam, “ *Uhlig’s Corrosion Handbook*”, John Wiley & Son’s , Inc., USA, 2000.
23. Alec Groysman, “ *Corrosion for Everyone*”, Springer+Business Media B.V, 2010.
24. IIW, “ *The Welding Engineer’s Current Knowledge*”, SLV Duisburg, (2003).
25. ASM Volume I, “ *Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys*”, ASM International, USA, (1990-1991) 330.
26. Yan Li, Peng Zhao, Qiang Liang, Baorong Hou, “ *Barberine as a natural source inhibitor for mild steel in 1 M H₂SO₄*”, *Applied Surface Science* 252 (2005) 1245-1253.

27. Y. Yan, W. Li, L. Cai, B. Hou, "*Electrochemical and quantum chemical study of purines as corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl solution*", *Electrochem. Acta* 53 (2008) 5953.
28. E. Mc Caferty, N. Hackerman, "*Double layer capacitance of iron & corrosion inhibition with polymethylene*", *Electrochem. SoC*, 119 (1972) 146.
29. S.A. Umeron, U.M. Eduok, M.M. Solomon, A.P. Udoh, "*Corrosion Inhibition by leaves and stem extracts of Sida acuta for mild steel in 1M H2SO4 solutions investigated by chemical and spectroscopic techniques*", *Arabian Journal of Chemistry* (2011).
30. Singh, A. Singh, V.K. Quraishi, "*Aqueous extract of Kalmegh leaves as green inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution*", *Int. J. Corros.* , 10.115 (2010) 275983.
31. Dr. Ramazan Kahraman, "*Collection of Corrosion Lessons*", Chemical Engineering Department King Fahd University Petroleum & Minerals Dhahran, Saudi Arabia.

LAMPIRAN 1



Konsentrasi HCl
 = 30 %
 HCl density = 1.1493 g/mL
 Molar mass = 36.46 g/mol

Perhitungan

$$[(\% \text{Konsentrasi HCl}/100) (\text{HCL density g/mL}) (1000)] / \text{Molar mass g/mol} = \dots \text{ M HCl}$$

$$[(30\% \text{ HCl}/100) (1.493) (1000)] / 36.46 = 9.5 \text{ M HCl}$$

Jika konsentrasi HCl = 9.5M, maka untuk mendapatkan larutan HCl 1M
 :

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

$$(9.5\text{M}) \times V_1 = (1\text{M}) 1 \text{ L}$$

$$V_1 = 1 (1) / 9.5$$

$$= 0.105 \text{ mL}$$

$$= \text{mL air}$$

$$= 105 \text{ mL / L}$$

$$= \text{air}$$

LAMPIRAN 2





FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
 Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax: 021 – 78888111 E-mail: jurm@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA
COMPOSITION TEST REPORT

Page 1 of 1

No Laporan <i>Report Nr</i>	412	Bahan <i>Material</i>	Steeel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	OKI DARMAWAN	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	Code : OKI
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi dan Material , Kampus Baru UI Depok 16424	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	29 Juli 2011
No Kontrak <i>Contract Nr</i>	0830/PT.02/FT04/P/2011	Standar <i>Standard</i>	ASTM A751 ASTM E415
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	29 Juli 2011	Metode Uji <i>Testing Machine</i>	Optical Emission Spectrometer*

Kode Sampel Sample Code	C (%)	SI (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	NI (%)	Cr (%)
OKI	0.057	0.012	<0.003**	<0.003**	0.218	<0.005**	0.014
	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
	<0.005**	<0.002**	0.008	<0.002**	<0.002**	0.035	bal

catatan :

* ketidakpastian bertangan dengan tingkat kepercayaan 95% dengan factor cakupan K=2

** (<) menunjukkan nilai berada di bawah kemampuan limit dari alat uji

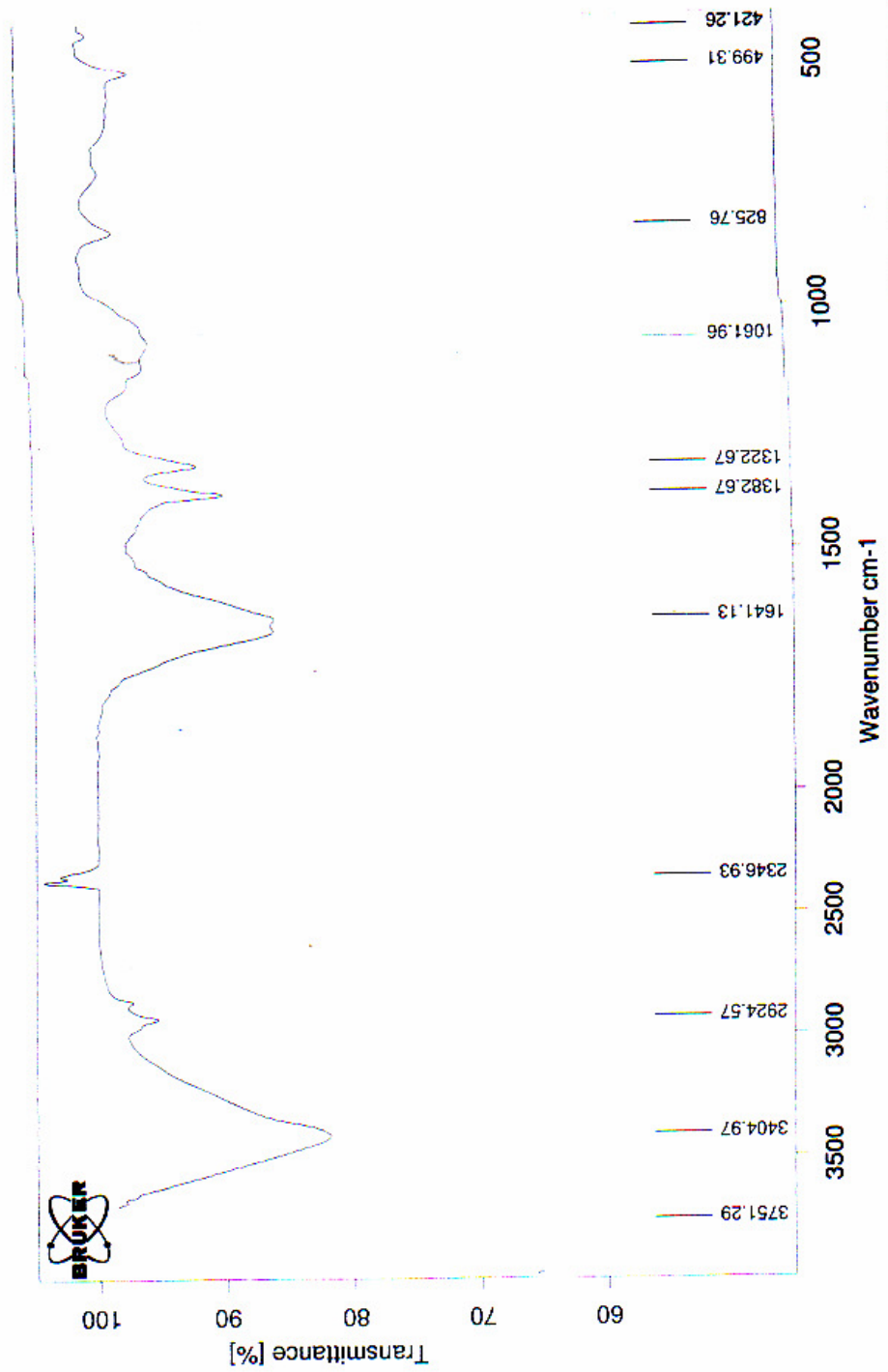
Depok, 1 Agustus 2011
 Manajer Teknis
 Laboratorium Uji
 Departemen Teknik Metalurgi Dan Material



(Ahmad Ivan Karayan, ST.,M.Eng)

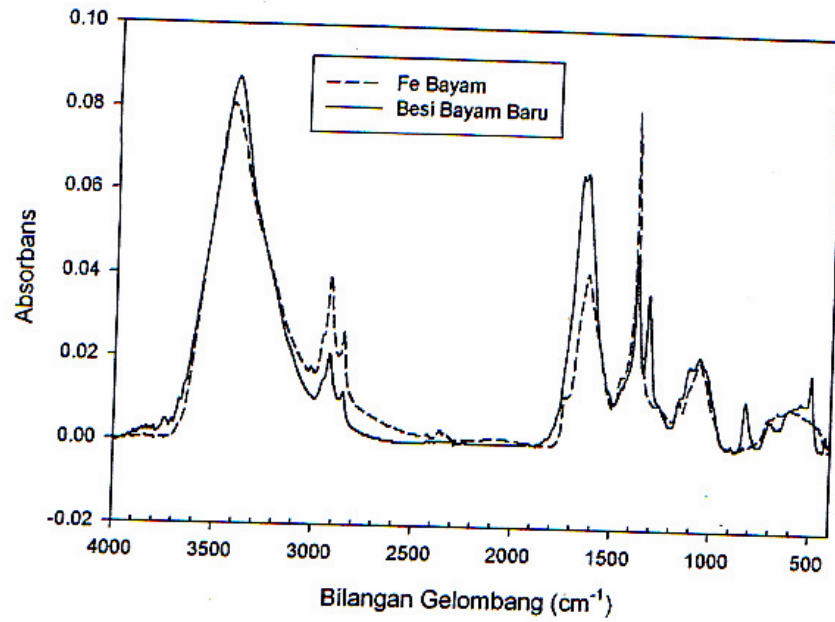
FF-25/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sampel yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan di luar dari atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM

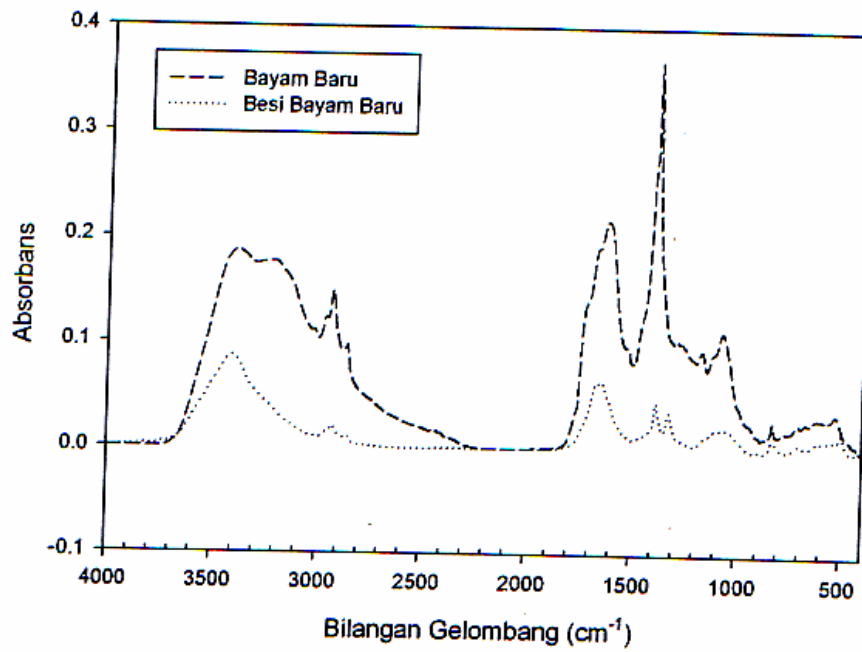


C:\OPUS\DATA\CUSTOMER\2012\13 V 12.0 13 V 12 PADATAN

Gambar 1. Perbandingan spektrum serapan partikel bayam baru dengan partikel Fe-Bayam



Gambar 2. Perbandingan spektrum serapan partikel besi bayam baru dan ekstrak bayam baru



Interpretasi Spektrum IR sampel No. 13

Tujuan : untuk membandingkan sampel partikel besi bayam baru dengan sampel terdahulu (9 dan 1).

Cara:

1. Melakukan evaluasi manual dengan melakukan *overlay* spektrum
2. Membandingkan spektrum dengan database specinfo® wiley interscience

Hasil

1. Fitur spektrum serapan Sampel 13 memiliki kesamaan dengan spektrum serapan sampel 9 (Fe-Bayam) dan spektrum sampel bayam baru (sampel 1) (Gambar 1 & 2). Kesamaan serapan berada pada daerah $3000-3400\text{ cm}^{-1}$ kemungkinan sebagai serapan OH, $3000-2800$ dan $1480-1340\text{ cm}^{-1}$ sebagai serapan alkana, dan daerah sekitar $1600-1700\text{ cm}^{-1}$ sebagai serapan karbonil CO. Hal ini menunjukkan kemungkinan adanya ekstrak bayam yang menempel pada partikel besi.
2. Pendugaan database specinfo terhadap Sampel 13 (Gambar 3) yang memberikan beberapa prediksi yang sama dengan analisis sebelumnya.



Gambar 3. Hasil pendugaan Specinfo terhadap spektrum Sampel No 13

SpecSurf Hitlist Report Page

<http://specinfo.wiley.com/specsurf/HitlistPage?ticket=1337600626560X...>

SpecSurf Hitlist

Rank	Quality	Folder ID	Property
1/20	928	2:FO0000011319	beta.-D-threo-2,5-Hexodiulo-2,6-pyranosonic acid, 5-hydrate, calcium salt (2:1) 2,5-Diketo-gluconic acid, calcium salt
2/20	927	7:FO0000000047	NA-SALT OF POLY(4-METHOXYTETRAMETHYLENE-1,2-DICARBOXYLIC ACID); CP 2 35%
3/20	925	3:FO0000001641	poly(maleic acid-co-methyl vinyl ether), poly(4-methoxybutylene-1,2-dicarboxyl acid)
4/20	921	3:FO0000001865	poly(9-vinyladenine)
5/20	912	4:FO0000001669	natural polypeptide (catgut)
6/20	912	3:FO0000002575	SUTUPAK CATGUT, NATURAL POLYPEPTIDE
7/20	906	7:FO0000000019	NA-ALGINATE; ALGINIC ACID, NA SALT; TEXAMID 528
8/20	898	3:FO0000000726	poly(methacrylamide)
9/20	891	3:FO0000000433	poly(ethylene-alt-N-carboxymethyl-3,4-pyrrolidinediyl)
10/20	891	2:FO0000001157	*1:1-Chromkomplex 2-Amino-4-chlorphenol->schaeffersalz/1:1-cr-komplex
11/20	889	2:FO0000001412	Carbonsaeureamid V. dimethylamino-dihydroxy-diphenazoniumchlorid Phenoxazin-5-ium, 1-(aminocarbonyl)-7-(dimethylamino)-3,4-dihydroxy-, chloride
12/20	886	4:FO0000001671	wool keratin
13/20	881	4:FO0000000645	polypeptide
14/20	881	2:FO0000007528	Pyruvic acid, potassium salt
15/20	880	3:FO0000000679	poly(methacryloyl hydrazide), 82% conversion
16/20	879	3:FO0000001712	poly(ketone-2-co-vinyl alcohol), acid-washed, basic form
17/20	877	7:FO0000000046	POLY(NA-KA-HYDROXYACRYLATE); POLY(KA-HYDROXYACRYLIC ACID), NA-SALT, PHAS 83%
18/20	875	3:FO0000001655	poly(acrylic acid-co-maleic acid), poly(1,3,4-tricarboxybutylene)
19/20	875	2:FO0000013643	Guanidine, monohydrochloride
20/20	873	2:FO0000000782	*Stellung von cl ist unbestimmt

Operator : Oki

Date : 26 Juli 2011

Specification of the test : EIS

Working Electrode : carbon steel

Reference Electrode : Calomel

Auxiliary Electrode : Pt

Comments : Blanko HCl 1M, 25 deg C

Circular regression

Point1 : 0

Point2 : 90

Center, X : 69.88 ohm.cm²

Center, Y : -25.87 ohm.cm²

Diameter : 147.5 ohm.cm²

Coefficient : 0.967

Depletion angle : -10.1 °

X min. : 0.8223 ohm.cm²

X max. : 138.9 ohm.cm²

R1 : 822.3 mohm.cm²

R2 : 138.1 ohm.cm²

C : 51.62 μF/cm²

Operator : Oki

Date : 26 Juli 2011

Specification of the test : EIS

Working Electrode : carbon steel

Reference Electrode : Calomel

Auxiliary Electrode : Pt

Comments : 500ppm ekstrak HCl 1M, 25 deg C

Circular regression

Point1 : 0
Point2 : 90
Center, X : 153.3 ohm.cm²
Center, Y : -53.43 ohm.cm²
Diameter : 324.1 ohm.cm²
Coefficient : 0.993
Depletion angle : -9.49 °
X min. : 0.3465 ohm.cm²
X max. : 306.3 ohm.cm²
R1 : 346.5 mohm.cm²
R2 : 305.9 ohm.cm²
C : 26.00 μF/cm²

Operator : Oki

Date : 26 Juli 2011

Specification of the test : EIS

Working Electrode : carbon steel

Reference Electrode : Calomel

Auxiliary Electrode : Pt

Comments : 1000ppm ekstrak HCl 1M, 25 deg C

Circular regression

Point1 : 0
Point2 : 89
Center, X : 212.3 ohm.cm²

Center, Y : -96.41 ohm.cm²
Diameter : 466.6 ohm.cm²
Coefficient : 0.996
Depletion angle : -11.9 °
X min. : -0.1111 ohm.cm²
X max. : 424.8 ohm.cm²
R1 : -111. mohm.cm²
R2 : 424.8 ohm.cm²
C : 20.97 μF/cm²

Operator : Oki
Date : 26 Juli 2011

Specification of the test : EIS
Working Electrode : carbon steel
Reference Electrode : Calomel
Auxiliary Electrode : Pt

Comments : 2000ppm ekstrak HCl 1M, 25 deg C

Circular regression

Point1 : 0
Point2 : 89
Center, X : 260.8 ohm.cm²
Center, Y : -152.7 ohm.cm²
Diameter : 602.7 ohm.cm²
Coefficient : 0.996
Depletion angle : -14.7 °
X min. : 0.996 ohm.cm²
X max. : 520.5 ohm.cm²
R1 : 996.0 mohm.cm²

R2 : 519.5 ohm.cm²
C : 19.36 μF/cm²

Operator : Oki

Date : 26 Juli 2011

Specification of the test : EIS

Working Electrode : carbon steel

Reference Electrode : Calomel

Auxiliary Electrode : Pt

Comments : 4000ppm ekstrak HCl 1M, 25 deg C

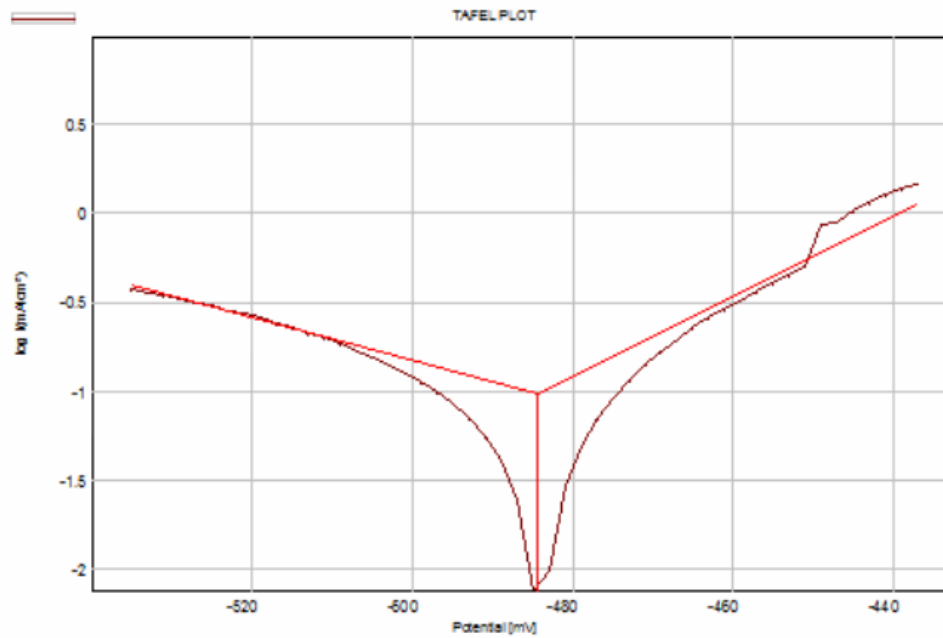
Circular regression

Point1 : 0
Point2 : 90
Center, X : 283.3 ohm.cm²
Center, Y : -191.5 ohm.cm²
Diameter : 679.5 ohm.cm²
Coefficient : 0.991
Depletion angle : -16.4 °
X min. : 2.59 ohm.cm²
X max. : 564 ohm.cm²
R1 : 2.590 ohm.cm²
R2 : 561.3 ohm.cm²
C : 22.68 μF/cm²



LAMPIRAN 3

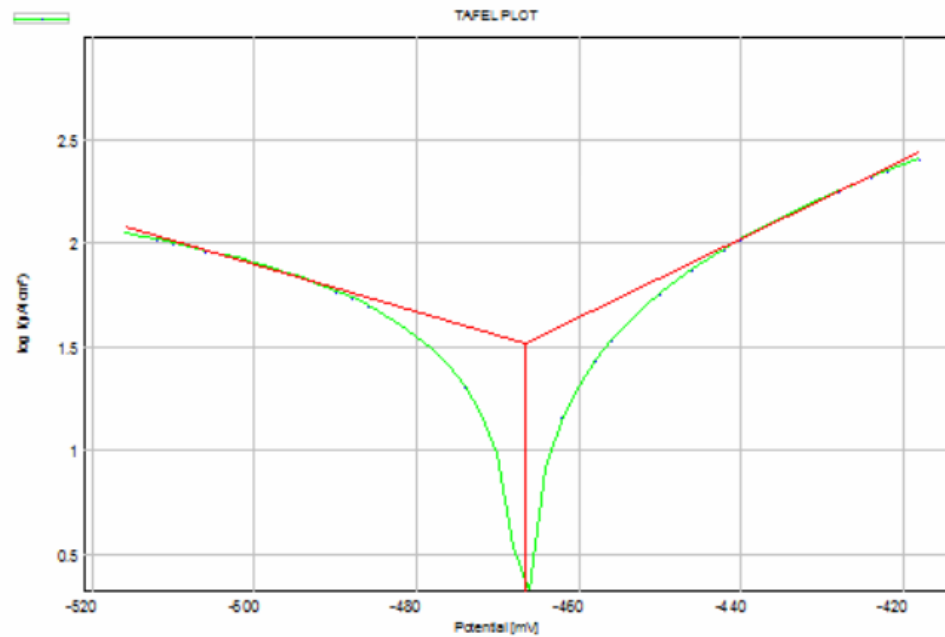
Tafel 0 ppm ekstrak 1M HCl, 25 degC_5.CR.V



• RESULTS

E(i=0)	-484.4 mV
i corrosion	0.0956 mA/cm ²
Rp	113.58 ohm.cm ²
Beta a	40.0 mV
Beta c	-82.3 mV
Coefficient	0.9918
Corrosion	1.117 mm/Y

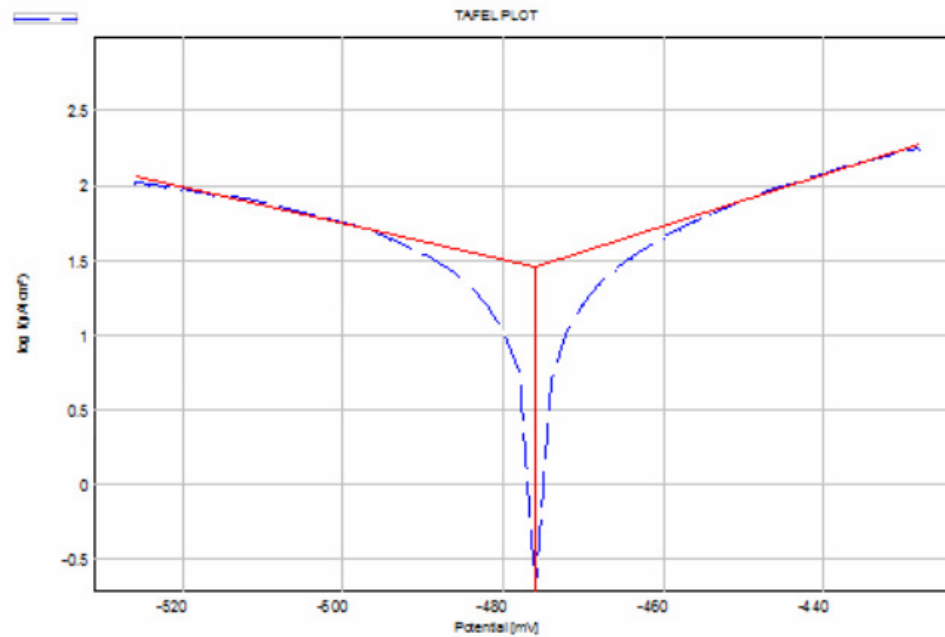
Tafel 500ppm ekstrak 1M HCl, 25 degC_5.CRV



• RESULTS

E(i=0)	-466.7 mV
i corrosion	32.4824 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Rp	343.99 $\text{ohm}\cdot\text{cm}^2$
Beta a	52.7 mV
Beta c	-87.7 mV
Coefficient	0.9961
Corrosion	379.9 $\mu\text{m}/\text{Y}$

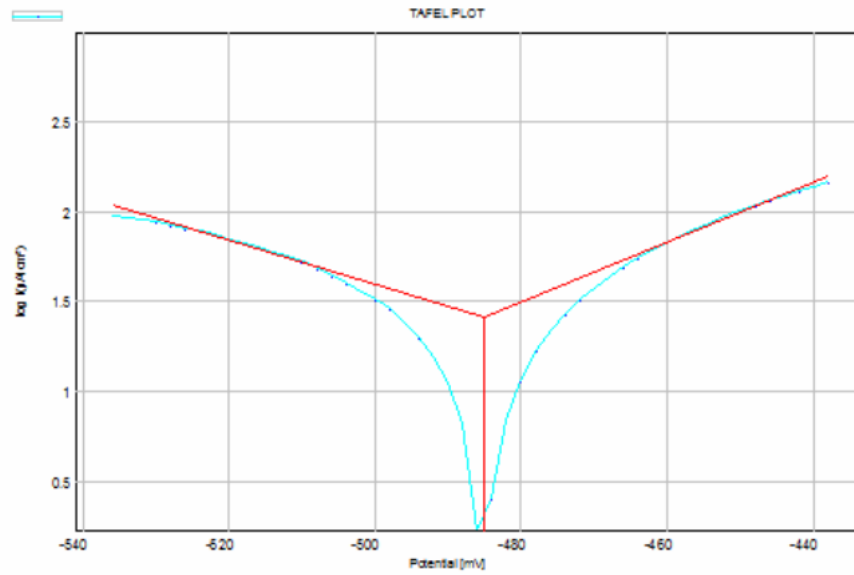
Tafel 1000ppm ekstrak 1M HCl, 25 degC_5.CRV



• RESULTS

E(i=0)	-475.8 mV
i corrosion	28.5166 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Rp	381.36 $\text{ohm}\cdot\text{cm}^2$
Beta a	58.2 mV
Beta c	-83.2 mV
Coefficient	0.9936
Corrosion	333.5 $\mu\text{m}/\text{Y}$

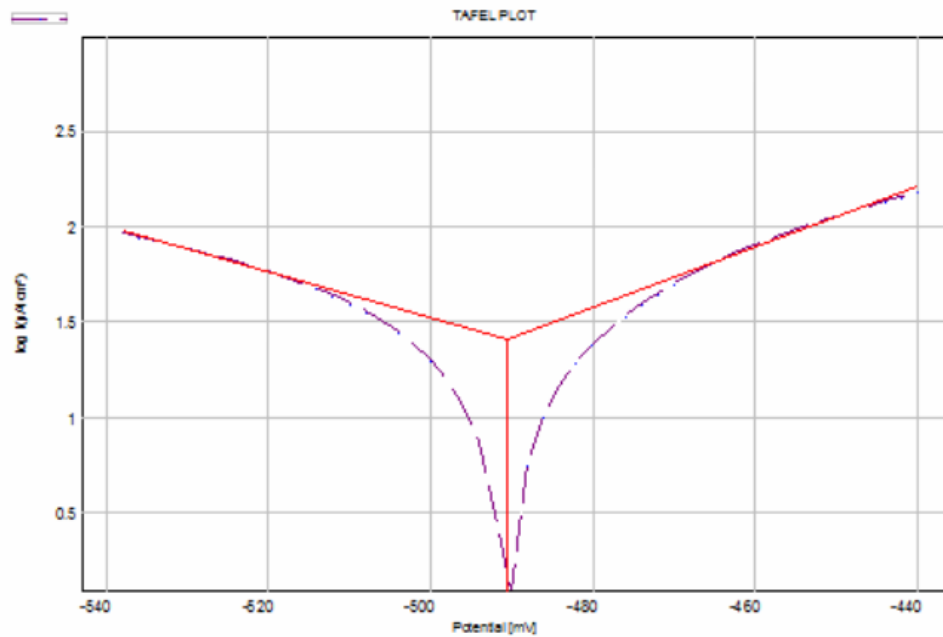
Tafel 2000ppm ekstrak 1M HCl, 25 degC_5.CRV



• RESULTS

E(i=0)	-485.0 mV
i corrosion	26.1200 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Rp	431.79 $\text{ohm}\cdot\text{cm}^2$
Beta a	60.5 mV
Beta c	-83.6 mV
Coefficient	0.9922
Corrosion	305.5 $\mu\text{m}/\text{Y}$

Tafel 4000ppm ekstrak, 1M HCl, 25 degC_5.CRV



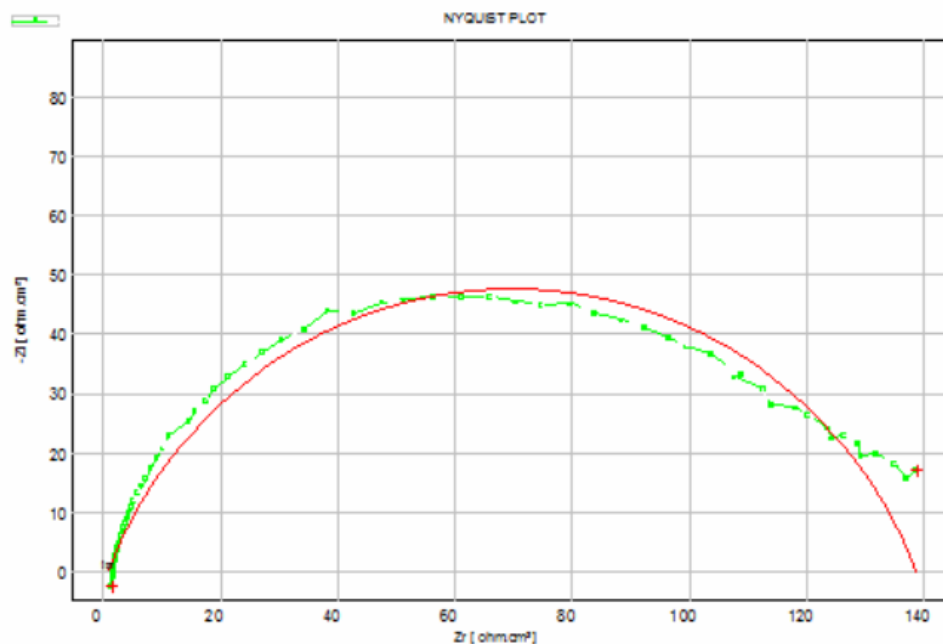
• RESULTS

E(i=0)	-490.5 mV
i corrosion	25.5173 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Rp	454.91 ohm.cm ²
Beta a	63.0 mV
Beta c	-83.0 mV
Coefficient	0.9944
Corrosion	298.4 $\mu\text{m}/\text{Y}$



LAMPIRAN 4

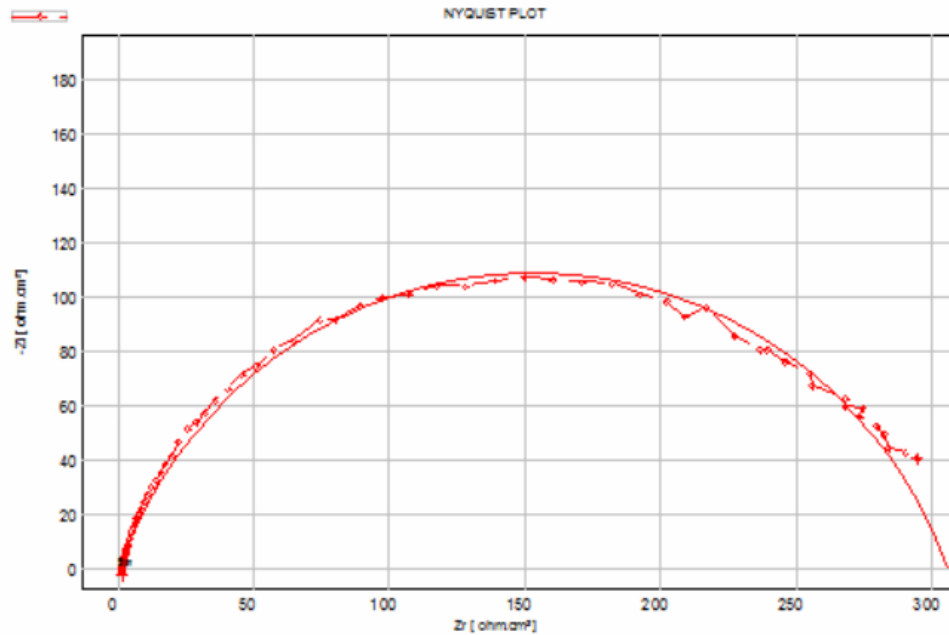
EIS 0 ppm 1M HCl 25 degC_Z.CRV



• RESULTS

Point1	0
Point2	90
Center, X	69.88 ohm.cm ²
Center, Y	-25.87 ohm.cm ²
Diameter	147.5 ohm.cm ²
Coefficient	0.967
Depletion angle	-10.1 °
X min.	0.8223 ohm.cm ²
X max.	138.9 ohm.cm ²
R1	822.3 mohm.cm ²
R2	138.1 ohm.cm ²
C	51.62 μF/cm ²

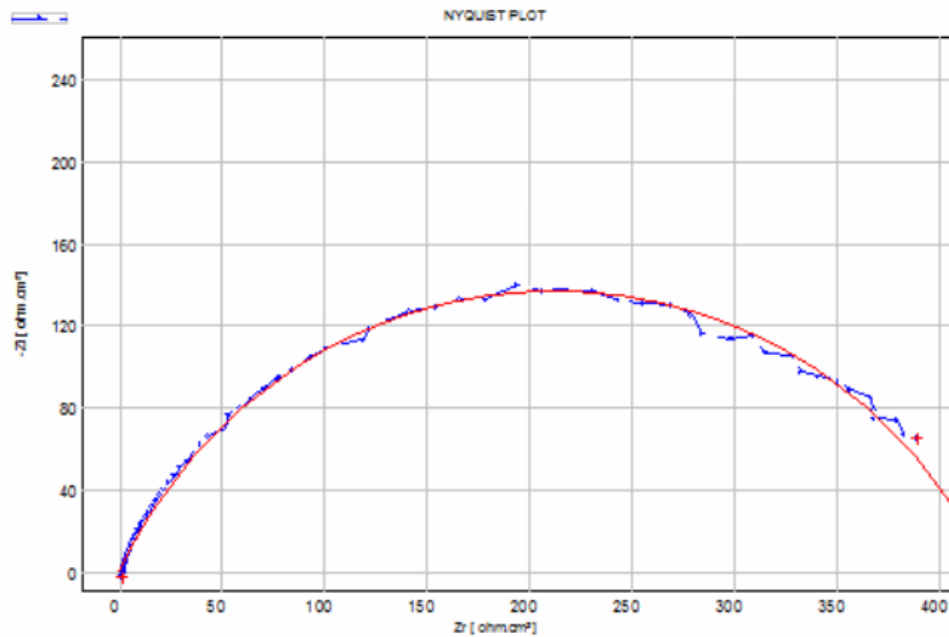
EIS 500ppm ekstrak 1M HCl, 25 degC_ZCRV



• RESULTS

Point1	0
Point2	90
Center, X	153.3 ohm.cm ²
Center, Y	-53.43 ohm.cm ²
Diameter	324.1 ohm.cm ²
Coefficient	0.993
Depletion angle	-9.49 °
X min.	0.3465 ohm.cm ²
X max.	306.3 ohm.cm ²
R1	346.5 mohm.cm ²
R2	305.9 ohm.cm ²
C	26.00 μF/cm ²

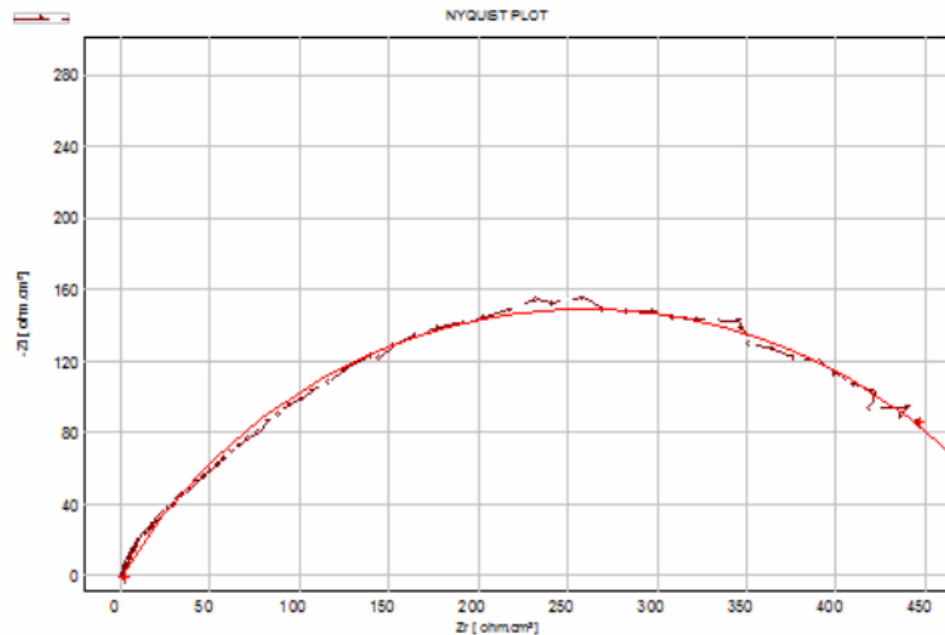
EIS 1000ppm ekstrak 1M HCl, 25 degC_Z.CRV



• RESULTS

Point1	0
Point2	89
Center, X	212.3 ohm.cm ²
Center, Y	-96.41 ohm.cm ²
Diameter	466.6 ohm.cm ²
Coefficient	0.996
Depletion angle	-11.9 °
X min.	-0.1111 ohm.cm ²
X max.	424.8 ohm.cm ²
R1	-111. mohm.cm ²
R2	424.8 ohm.cm ²
C	20.97 μF/cm ²

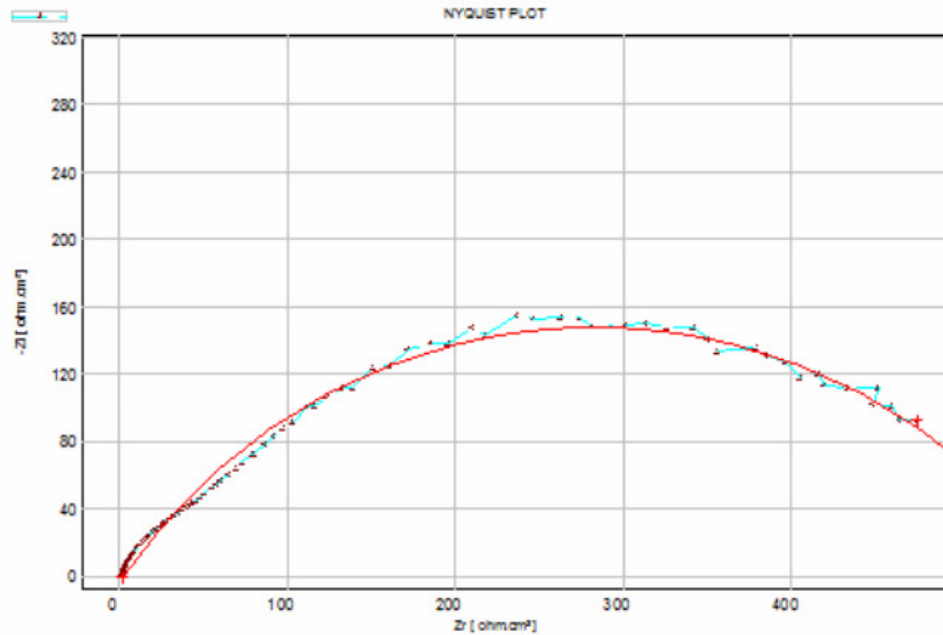
EIS 2000ppm ekstrak IM HCl, 25 degC_Z.CRV



• RESULTS

Point1	0
Point2	89
Center, X	260.8 ohm.cm ²
Center, Y	-152.7 ohm.cm ²
Diameter	602.7 ohm.cm ²
Coefficient	0.996
Depletion angle	-14.7 °
X min.	0.996 ohm.cm ²
X max.	520.5 ohm.cm ²
R1	996.0 mohm.cm ²
R2	519.5 ohm.cm ²
C	19.36 μF/cm ²

EIS 4000ppm ekstrak IM HCl, 25 degC_Z.CRV



• RESULTS

Point1	0
Point2	90
Center, X	283.3 ohm.cm ²
Center, Y	-191.5 ohm.cm ²
Diameter	679.5 ohm.cm ²
Coefficient	0.991
Depletion angle	-16.4 °
X min.	2.59 ohm.cm ²
X max.	564 ohm.cm ²
R1	2.590 ohm.cm ²
R2	561.3 ohm.cm ²
C	22.68 μF/cm ²