



UNIVERSITAS INDONESIA

**EVALUASI LAJU KOROSI BAJA KARBON G10180
TERHADAP BAJA API 5L GRADE-B AKIBAT PENGARUH
KONSENTRASI NATRIUM KLORIDA PADA TEMPERATUR
DAN TEKANAN RUANG DENGAN METODE ANALISA
TAFEL**

TESIS

**FADI SETIAWAN
0706173824**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
PROGRAM STUDI KOROSI DAN PROTEKSI
DEPOK
JULI 2009**





UNIVERSITAS INDONESIA

**EVALUASI LAJU KOROSI BAJA KARBON G10180
TERHADAP BAJA API 5L GRADE-B AKIBAT PENGARUH
KONSENTRASI NATRIUM KLORIDA PADA TEMPERATUR
DAN TEKANAN RUANG DENGAN METODE ANALISA
TAFEL**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik (MT.)**

**FADI SETIAWAN
0706173824**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
PROGRAM STUDI KOROSI DAN PROTEKSI
DEPOK
JULI 2009**

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis dengan judul:

**EVALUASI LAJU KOROSI BAJA KARBON G10180
TERHADAP BAJA API 5L GRADE-B AKIBAT PENGARUH
KONSENTRASI NATRIUM KLORIDA PADA
TEMPERATUR DAN TEKANAN RUANG DENGAN
METODE ANALISA TAFEL**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Program Studi Korosi dan Proteksi Departemen Metalurgi Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 9 Juli 2009



Fadi Setiawan

NPM 0706173824

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Fadi Setiawan
NPM : 0706173824
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Tesis : **Evaluasi Laju Korosi Baja Karbon G10180 Terhadap Baja API 5L Grade-B Akibat Pengaruh Konsentrasi Natrium Klorida Pada Temperatur Dan Tekanan Ruang Dengan Metode Analisa Tafel**

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi, DEA

Pembimbing 2 : Ir. Andi Rustandi, MT

Penguji 1 : Dr. Ir. Donanta Daneswara, Msi

Penguji 2 : Badrul Munir, ST, MSc., PhD

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini pada waktunya. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada Departemen Metalurgi Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi M, DEA, selaku ketua tim Hibah Riset Mahasiswa Jenjang S2-S3 Tahun 2009 sekaligus dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. tim Hibah Riset Mahasiswa Jenjang S2-S3 Tahun 2009 (Andi Rustandi, Yekti Ikhtiarie, dan Gita Dimarsandy) yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
3. orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan dan pengertian untuk menyelesaikan studi saya; dan
4. semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah membantu dan menemani saya selama menjalankan studi di Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu, serta agar tesis ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu korosi.

Depok, 9 Juli 2009

Penulis

LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

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

Nama : Fadi Setiawan
NPM : 0706173824
Program Studi : Korosi dan Proteksi
Departemen : Teknik Metalurgi Material
Fakultas : Teknik Universitas Indonesia
Jenis karya : Tesis

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

EVALUASI LAJU KOROSI BAJA KARBON G10180 TERHADAP BAJA API SL GRADE-B AKIBAT PENGARUH KONSENTRASI NATRIUM KLORIDA PADA TEMPERATUR DAN TEKANAN RUANG DENGAN METODE ANALISA TAFEL

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan 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 : Depok
Pada tanggal : 9 Juli 2009

Yang menyatakan



Fadi Setiawan

ABSTRAK

Fadi Setiawan NPM 0706173824 Departemen Metalurgi Material	Dosen Pembimbing Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi M, DEA
EVALUASI LAJU KOROSI BAJA KARBON G10180 TERHADAP BAJA API 5L GRADE-B AKIBAT PENGARUH KONSENTRASI NATRIUM KLOORIDA PADA TEMPERATUR DAN TEKANAN RUANG DENGAN METODE ANALISA TAFEL	
Abstrak	
<p>Material baja G10180 umum digunakan sebagai sampel kupon untuk memonitor proses korosi baja karbon. Pada berbagai literatur menyebutkan bahwa laju korosi baja karbon dalam larutan natrium klorida akan mencapai nilai maksimum pada konsentrasi NaCl sekitar 3,5% berat.</p>	
<p>Evaluasi laju korosi material G10180 dilakukan dengan menggunakan metode analisa Tafel untuk lingkungan air tawar, NaCl 1%, 2%, 3%, 3,5% dan 4% berat, serta laju korosi yang didapat akan dibandingkan dengan laju korosi baja API 5L Grade-B.</p>	
<p>Hasil pengujian menunjukkan bahwa dalam lingkungan NaCl pada sistem terbuka dengan temperatur 27°C dan tekanan 1 atm, proses korosi baja G10180 lebih dipengaruhi aktivitas reaksi anodik daripada reaksi katodiknya. Jika dibandingkan dengan baja API 5L Grade-B, laju korosi baja G10180 yang didapatkan dari pengujian ini hampir sebesar 2,5 kali dari nilai laju korosi baja API 5L Grade-B.</p>	
Kata kunci: oksigen, baja G10180, laju korosi, larutan NaCl	

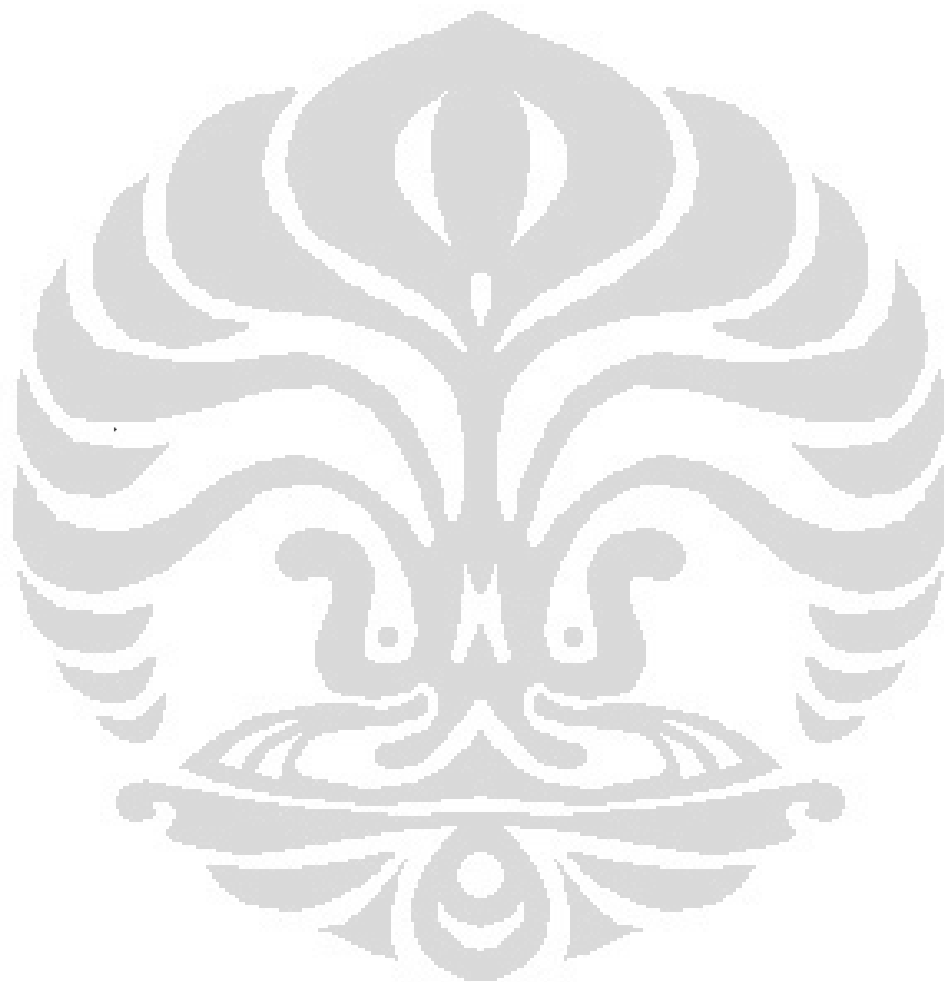
ABSTRACT

<p>Fadi Setiawan NPM 0706173824 Departemen Metalurgi Material</p>	<p>Conselor: Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi M, DEA</p>
<p>CORROSION RATE EVALUATION OF G10180 CARBON STEEL TOWARDS API 5L GRADE-B STEEL UNDER SODIUM CHLORIDE CONCENTRATION INFLUENCE AT ROOM TEMPERATURE AND PRESSURE USING TAFEL ANALYSIS METHOD</p>	
<p>Abstract</p> <p>G10180 steels commonly used as corrosion coupon for carbon steel monitoring process. In many literature stated that carbon steel corrosion rate in sodium chloride solution will reach maximum value around 3%wt NaCl</p> <p>G10180 corrosion rate evaluation done by using Tafel analysis method in tap water, 1%, 2%, 3%, 3.5% and 4%wt. NaCl solution, and also will be compared with API 5L Grade-B corrosion rate.</p> <p>The results showed that in open system NaCl solution with 1 atm and 27°C, G10180 corrosion process determined by its anodic reaction activity compared to its cathodic reaction. If compared with the API 5L Grade-B steel, the G10180 corrosion rate almost 2.5 times larger than API 5L.</p>	
<p>Keywords: oxygen, G10180 steel, corrosion rate, NaCl</p>	

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	2
1.3. Variabel Pengujian	2
1.4. Jenis Pengujian.....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1. Korosi Air.....	3
2.2. Korosi Merata.....	4
2.3. Polaritasi	5
2.4. Pasivasi.....	9
2.5. Pengaruh Gas O ₂ Terhadap Proses Korosi	10
2.6. Pengaruh Garam Terhadap Proses Korosi	15
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1. Peralatan, Material dan Bahan	17
3.2. Larutan Uji	17
3.3. Prosedur Penelitian.....	18
3.4. Metode Analisa Data Pengujian.....	22
3.5. Diagram Alir Penelitian	23
BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN	24
4.1. Pengujian Komposisi Kimia Material	24
4.2. Pengujian Kelarutan Oksigen.....	24
4.3. Pengujian Konduktifitas Larutan	26
4.4. Pengujian Analisa Tafel	27
4.5. Faktor Koreksi Laju Korosi.....	32
BAB 5 KESIMPULAN	35
DAFTAR PUSTAKA	36

LAMPIRAN A – KURVA TAFEL	38
LAMPIRAN B – PERHITUNGAN DATA PENGUJIAN.....	44



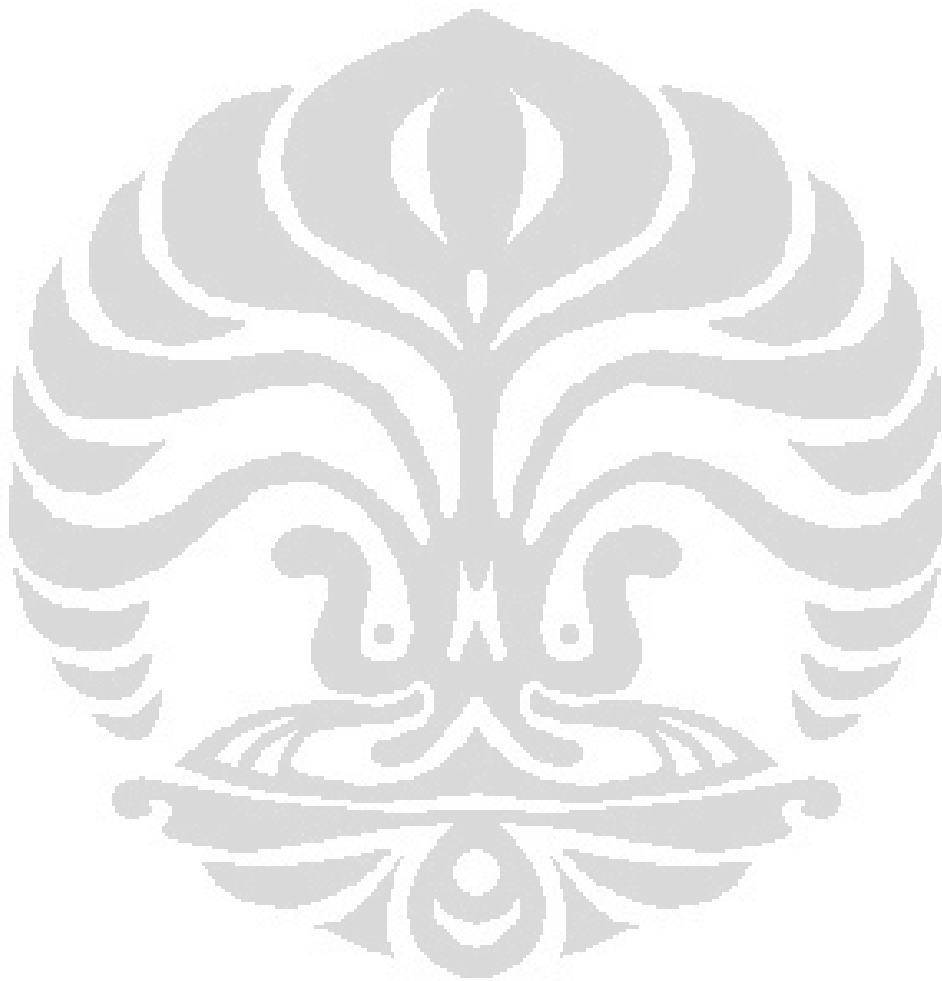
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Kelarutan oksigen dalam air laut. ^[13]	14
Tabel 4.1. Komposisi kimia material	24
Tabel 4.2. Kandungan oksigen terlarut pada berbagai konsentrasi NaCl.	25
Tabel 4.3. Konduktifitas larutan pada berbagai konsentrasi NaCl.....	27
Tabel 4.4. Perbandingan potensial korosi (E_c) dan laju korosi (CR) baja G10180 pada konsentrasi larutan NaCl.....	29
Tabel 4.5. Laju korosi baja G10180 dan Grade-B pada konsentrasi larutan NaCl.	33

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 . Korosi merata pada permukaan pipa	5
Gambar 2.2. Proses korosi merata pada permukaan logam Fe.	5
Gambar 2.3. Kurva Tafel praktis yang diidealkan. ^[9]	7
Gambar 2.4. Kurva disolusi anodik dari logam aktif-pasif ^[4]	9
Gambar 2.5. Kurva kecepatan korosi terhadap kelarutan gas pada temperatur ruang. ^[12]	11
Gambar 2.6. Pengaruh temperatur terhadap kelarutan oksigen dalam air. ^[13]	11
Gambar 2.7. Oksigen sebagai <i>depolarizer</i> . ^[15]	12
Gambar 2.8. Pembentukan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang sukar larut. ^[15]	12
Gambar 2.9. Pengaruh kelarutan oksigen terhadap laju korosi baja karbon rendah dalam air keran. ^[17]	14
Gambar 2.10. Pengaruh kadar ion Cl^- terhadap laju korosi. ^[17]	15
Gambar 3.1. Skema pengujian polarisasi Potensiodinamik. ^[4]	18
Gambar 3.2. Alat <i>Dissolved Oxygen-meter</i>	19
Gambar 3.3. <i>Soil Resistivity Box</i> . ^[21]	19
Gambar 3.4. <i>Resistance Meter</i>	20
Gambar 3.5. Labu polarisasi standar. ^[6]	21
Gambar 3.6. Diagram alir penelitian	23
Gambar 4.1. Kurva hubungan kelarutan oksigen dengan konsentrasi NaCl.....	25
Gambar 4.2. Muatan pada permukaan air-gas dan struktur ikatan air dengan <i>ionchaotropic</i> . ^[5]	26
Gambar 4.3. Kurva Tafel baja G10180 pada beberapa konsentrasi NaCl.	29
Gambar 4.4. Skema korosi <i>crevice</i> (kiri) dan <i>pitting</i> (kanan) ^[4]	31

Gambar 4.5. Hubungan laju korosi baja karbon terhadap konsentrasi NaCl. 33





"Don't judge a book by its cover!"

A simple phrase, words of virtue, none takes seriously.

"Always judge a book by its cover!"

A simple phrase, words of ignorance, everyone doing so.

"There is no wealth like knowledge, no poverty like ignorance."

(Ali bin Abu Thalib)

For all promising scholars...

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sumur injeksi umum digunakan dalam produksi minyak dan gas bumi, dimana suatu fluida dipompa ke dalam reservoir untuk menaikkan tekanan di dalamnya sehingga fluida hidrokarbon yang ada akan mudah keluar melalui sumur produksi. Fluida yang mengalir melalui saluran injeksi jika tidak diproses terlebih dahulu dapat mengancam umur pakai pipa baja karbon yang kerap digunakan. Fluida yang biasanya berasal dari sumber air atas tanah (sungai, danau, atau laut) mengandung sejumlah oksigen terlarut yang dapat menyebabkan korosi pada baja karbon.^[1]

Air laut mengandung sekitar 3,5% garam yang sebagian besar terbentuk dari NaCl, CaCl₂, dan MgCl₂, serta sejumlah kecil jenis garam lainnya. Larutan 3,5% NaCl biasa digunakan sebagai air laut sintetis (buatan) pada beberapa pengujian korosi di laboratorium, namun laju korosi baja karbon dalam NaCl 3,5% hampir 4 kali lebih cepat dibandingkan dalam air laut alami.^[2]

Pada umumnya, air laut lebih korosif dibandingkan air tawar dikarenakan konduktifitas yang tinggi dan kekuatan ion klorida untuk menembus lapisan pasif pada permukaan logam. Laju korosi tersebut tergantung kepada kandungan klorida, ketersediaan oksigen, dan temperatur.^[3]

Banyak literatur menyebutkan bahwa laju korosi baja karbon paling tinggi pada konsentrasi natrium klorida 3,5%, di mana pada konsentrasi tersebut kombinasi konduktifitas larutan dan kelarutan oksigen mencapai titik maksimal pada konsentrasi tersebut.

Material baja karbon G10180 banyak digunakan sebagai sampel kupon yang dianggap mampu mewakili proses korosi jenis-jenis baja karbon lainnya pada

struktur pemipaan. Namun dalam bidang korosi tidak mungkin ada laju dan bentuk korosi yang sama antara dua jenis material yang berbeda walaupun berada dalam suatu kondisi yang sama, sehingga diperlukan suatu evaluasi atas laju korosi baja karbon G10180 terhadap material baja karbon lainnya.

1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi laju korosi baja karbon G10180 akibat pengaruh konsentrasi natrium klorida, sehingga didapatkan kurva hubungan konsentrasi NaCl dengan laju korosi baja G10180, serta suatu koefisien koreksi antara material tersebut dengan material baja karbon lainnya.

1.3. Variabel Pengujian

Pada penelitian ini beberapa variabel digunakan sebagai data pembanding dalam menentukan pengaruh faktor-faktor tersebut di atas, dengan pengelompokan sebagai berikut:

1.3.1. Material Uji

- a) G10180
- b) API 5L Grade-B

1.3.2. Media (larutan) Uji

- a) Aquades.
- b) Larutan NaCl dengan konsentrasi: 1%, 2%, 3%, 3,5%, dan 4% berat.

1.4. Jenis Pengujian

- a) Komposisi kimia material.
- b) Kelarutan oksigen.
- c) Konduktifitas larutan.
- d) Analisa Tafel.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Korosi Air

Proses korosi sangat tergantung pada ada atau tidaknya elektrolit sebagai media penghantar arus dan pertukaran ion antara daerah anodik dengan katodik.^[4] Air dapat menjadi media elektrolit yang kuat/agresif, jika mengandung ion-ion reduktan dan oksidan, namun dapat pula menjadi media elektrolit yang tidak agresif. Sifat air sebagai pelarut universal menjadikan material ini mudah untuk menjadi korosif jika terdapat partikel ionik ataupun gas yang terlarut di dalamnya.

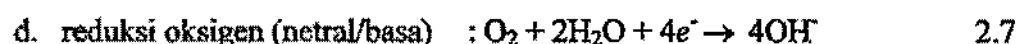
Air murni (*fresh water*) merupakan elektrolit lemah, di mana air terionisasi menjadi hidroksil (OH^-) dan hidrogen (H^+), seperti yang ditunjukkan persamaan 2.1 atau terkadang ion minor *oxonium* (H_3O^+), yang terbentuk dari ikatan kovalen akibat awan elektron di sekitar atom O^{2-} (persamaan 2.2)^[5].



Jika melihat dalam berbagai sudut pandang dari keseluruhan proses oksidasi dan reduksi, peristiwa korosi dapat digolongkan menjadi beberapa reaksi umum seperti di bawah ini^[6]:



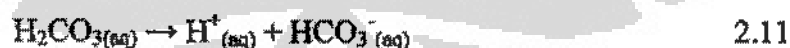
Katoda :



- e. reduksi ion logam : $M^{3+} + e^- \rightarrow M^{2+}$ 2.8
 f. deposisi logam : $M^+ + e^- \rightarrow M$ 2.9

Korosi dalam air sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, yang utama di antaranya: temperatur, kadar dan jenis garam, tekanan (mempengaruhi kelarutan gas-gas dalam air), kelarutan oksigen atau gas-gas reaktif, pergerakan/kecepatan aliran, dan pH. Beberapa komponen tersebut ada yang saling menguatkan dan ada pula yang saling melemahkan.

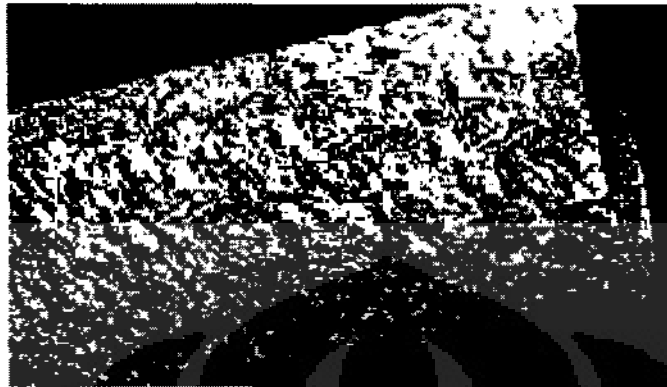
Pada tekanan atmosfer, seiring peningkatan temperatur atau peningkatan kelarutan gas-gas dalam air, maka kecepatan reaksi korosi akan semakin meningkat^[4], akan tetapi jika dua hal tersebut terjadi bersamaan, maka semakin tinggi temperatur kelarutan gas dalam air akan semakin rendah, akan tetapi beda halnya pada tekanan tinggi. Sebagai contoh, kadar dan jenis garam pada lingkungan air yang kaya akan CO₂ dapat mempengaruhi kecepatan proses korosi yang terjadi, dimana pada 3,5%-berat NaCl kecepatan korosi meningkat, namun campuran 3%-berat NaCl dan 1,5%-berat CaCl₂ dapat menurunkan kecepatan korosi akibat terbentuknya deposit CaCO₃ pada permukaan logam^{[7][8]}, seperti yang ditunjukkan rangkaian reaksi berikut:



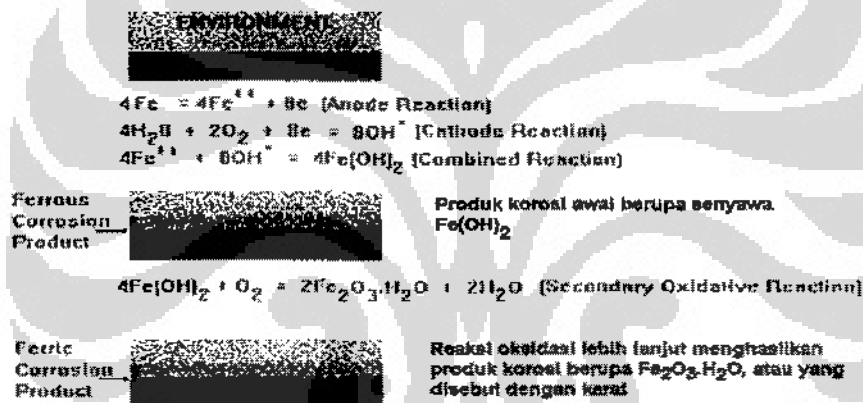
2.2. Korosi Merata

Korosi jenis ini tergantung pada faktor kecepatan reaksi oksidasi (persamaan 2.3) pada permukaan logam, di mana kecepatan oksidasi yang terjadi relatif sama pada seluruh permukaan yang terserang sehingga terjadi kehilangan logam secara progresif. Produk korosi yang terjadi akan mempengaruhi laju korosi selanjutnya.

Lapisan produk korosi yang protektif akan melindungi logam dasar sehingga laju korosi akan menurun.



Gambar 2.1 . Korosi merata pada permukaan pipa.



Gambar 2.2. Proses korosi merata pada permukaan logam Fe.

2.3. Polarisasi

Logam dalam larutan akan mencapai potensial kesetimbangan yang tergantung pada pertukaran elektron oleh reaksi anodik dan katodik. Suatu logam tidak berada dalam kesetimbangan dengan larutan yang mengandung ion-ionnya, sehingga potensial elektroda akan berbeda dari potensial korosinya, dan selisih keduanya disebut overpotensial (η) atau polarisasi.^[4]

Polarisasi aktivasi terjadi saat aliran elektron dipengaruhi oleh suatu tahapan dalam reaksi tersebut. Evolusi hidrogen pada permukaan logam misalnya, terdiri dari 3 tahapan utama. Pertama, H^+ bereaksi dengan sebuah elektron dari dalam logam,



untuk membentuk sebuah atom hidrogen teradsorpsi (H_{ads}) pada permukaan. Kedua, dua buah atom ini harus bereaksi membentuk molekul hidrogen^[4],



Kemudian tahap ketiga membutuhkan sejumlah molekul untuk menyatu lalu bermuklesi membentuk gelembung H_2 pada permukaan logam. Hubungan antara polarisasi/overpotensial dengan laju reaksi yang diwakilkan oleh rapat arus, i_a atau i_c , adalah :

$$\eta_a = \beta_a \log \frac{i_a}{i_0} \quad 2.15$$

untuk polarisasi anodik, dan polarisasi katodiknya adalah :

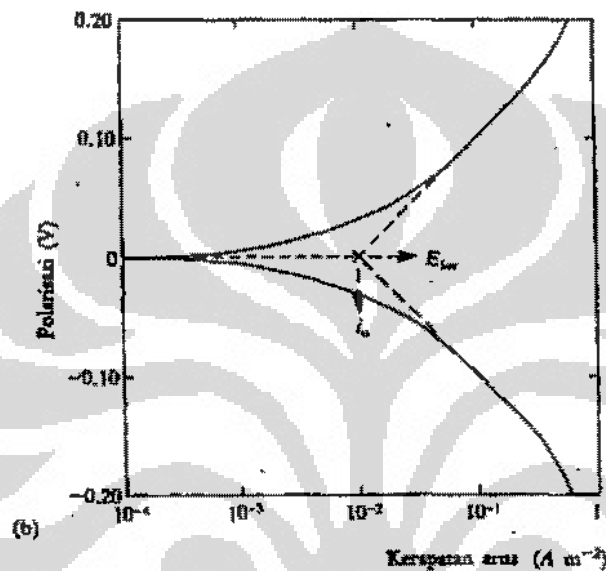
$$\eta_c = \beta_c \log \frac{i_c}{i_0} \quad (2.16)$$

dengan i_0 adalah *exchange current density*, β_a dan β_c sebagai tetapan anoda dan katoda Tafel. Persamaan 2.15 dan 2.16 dapat diplot ke dalam kurva polarisasi terhadap rapat arus secara teoritis, namun tidak akan sama dengan kurva hasil pengujian. Oleh karena itu kurva hasil pengujian harus diekstrapolasikan pada bagian linier sehingga dapat mendekati kurva Tafel teoritis^[4].

Pada gambar 2.3 kecepatan korosi material dapat dikalkulasi dalam bentuk *mpy* (mils per year; 1 mil = 0,001 inci = 0,0254 mm), dengan rumusan sebagai berikut^[4]:

$$mpy = 0,129 \frac{i_{cor} M}{D} \quad 2.17$$

di mana :
 D = berat jenis (g/cm^3)
 i_{cor} = rapat arus korosi ($\mu A/cm^2$)
 M = berat ekuivalen ($g/mol.equ$)



Gambar 2.3. Kurva Tafel praktis yang diidealkan.^[9]

Polarisasi konsentrasi terjadi akibat ketergantungan reaksi terhadap koefisien difusi ion terlarut (D_2) dan konsentrasinya pada larutan (C_B). Hal ini berakibat semakin cepat reaksi yang melibatkan ion tersebut pada permukaan, konsentrasi ion akan semakin menipis sehingga terjadi pembatasan kecepatan reaksi itu sendiri. Hubungan yang terjadi antara koefisien difusi, konsentrasi larutan dengan kecepatan reaksi yang diwakilkan oleh rapat arus batas (i_L) adalah^[6]:

$$i_L = \frac{D_2 n F C_B}{\delta} \quad 2.18$$

dengan δ adalah ketebalan gradien konsentrasi dalam larutan. Besaran i_L meningkat dengan peningkatan konsentrasi, temperatur, dan pergerakan larutan yang lebih cepat.

Jika diasumsikan sebuah elektroda tidak mengalami polarisasi aktivasi, maka persamaan untuk polarisasi konsentrasi dapat ditunjukkan sebagai persamaan berikut:

$$\eta_K = 2,3 \frac{RT}{nF} \log \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad 2.19$$

di mana : R : konstanta gas (8,314 J/mol.K)
 T : temperatur absolut (273 K)

Polarisasi konsentrasi terutama terjadi pada reaksi katodik dalam korosi, karena pada reaksi anodik terdapat suplai atom logam yang tak terbatas pada permukaannya^[4].

Polarisasi resistansi anodik akan mempengaruhi potensial permukaan yang mengalami pasivasi akibat oksida ataupun materi lainnya.^[10] Lapisan pada permukaan logam dapat dianggap memiliki nilai tahanan listrik tersendiri, lapisan oksida walaupun sangat tipis dapat menggambarkan kondisi ini. Saat arus (i , rapat arus) melalui lapisan tersebut, akan terjadi *ohmic drop* atau polarisasi resistansi yang diekspresikan dengan persamaan berikut:

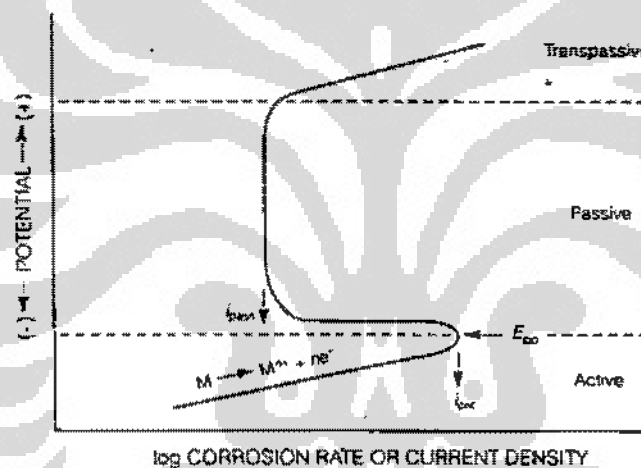
$$\eta_R = I \cdot R = i \cdot r \quad 2.20$$

di mana: R = tahanan (ohm)
 r = resistansi lapisan permukaan (ohm-cm²)

2.4. Pasivasi

Pasivasi dihasilkan saat logam atau paduan tertentu membentuk lapisan pelindung yang tipis pada permukaannya dalam larutan korosif. Pasivasi dapat didefinisikan sebagai sebuah bentuk ketahanan korosi akibat pembentukan lapisan pelindung di bawah kondisi teroksidasi dengan polarisasi anodik yang tinggi^[4]

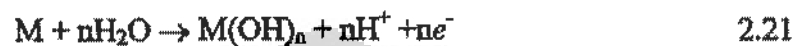
Persamaan 2.18 berlaku hanya jika pada permukaan logam tidak terdapat deposit yang dapat menghambat laju difusi komponen reaktan. Pada kondisi yang aktual, lapisan pada permukaan logam berupa lapisan oksida, garam, atau zat lainnya yang kurang konduktif umum terjadi. Lapisan ini akan memberi tahanan tambahan atas tahanan difusi yang ada di lapisan pembatas.



Gambar 2.4. Kurva disolusi anodik dari logam aktif-pasif^[4]

Kurva pada gambar 2.4 mengilustrasikan perilaku dari sebuah logam aktif-pasif. Awalnya logam tersebut menunjukkan perilaku umum dari logam nonpasivasi, di mana saat potensial makin positif laju disolusi logam meningkat secara eksponensial, menyerupai perilaku Tafel. Lalu pada potensial yang lebih tinggi (E_{pp}), laju disolusi menurun sampai nilai yang sangat kecil dan bertahan tidak terpengaruh oleh kenaikan potensial, saat inilah logam dikatakan mengalami pasivasi. Akhirnya pada potensial yang lebih tinggi (E_{pit}), laju disolusi meningkat kembali seiring peningkatan potensial^[4].

Reaksi yang terjadi pada logam aktif-pasif berubah dengan pertambahan potensial. Pada lingkungan netral dengan kandungan oksigen terlarut yang cukup, di bawah potensial korosi (E_o) evolusi hidrogen merupakan reaksi dominan yang terjadi. Lalu setelah memasuki daerah aktif, terjadi disosiasi logam seperti pada persamaan 2.3 hingga potensial pasivasi primer (E_{pp}). Dalam daerah pasivasi terjadi reaksi antara ion logam terdisosiasi dengan ion hidroksida hasil reduksi air:

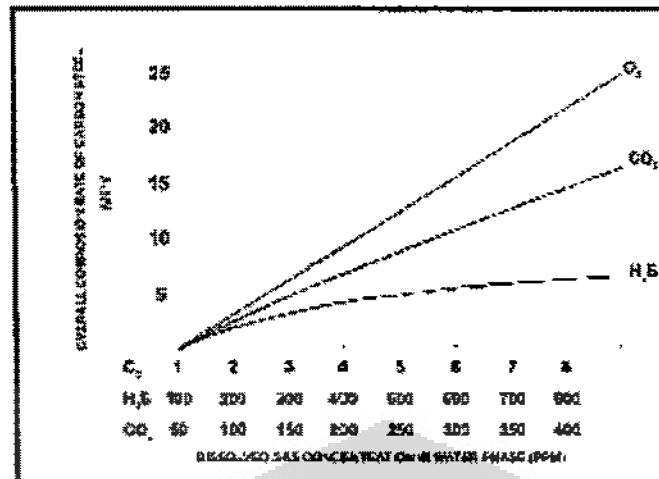


yang membentuk lapisan pasif hingga mencapai potensial pitting (E_{pu}), setelah itu logam akan terdisosiasi kembali dengan cepat. Kadangkala terjadi evolusi oksigen pada daerah ini^[4].

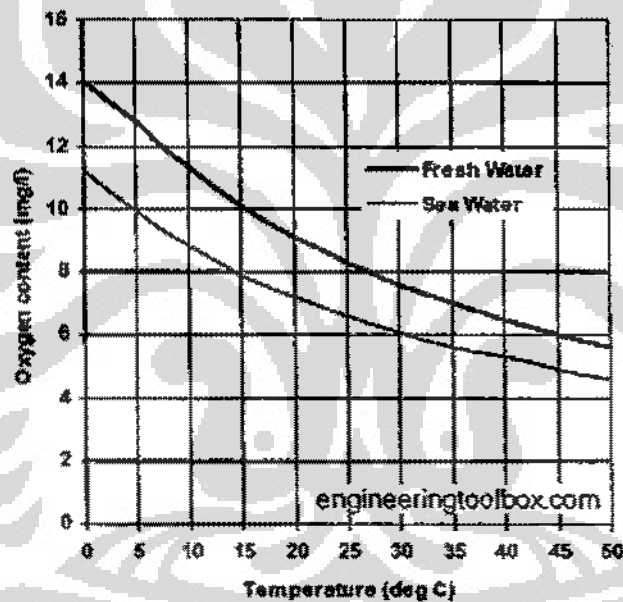
2.5. Pengaruh Gas O₂ Terhadap Proses Korosi

Oksigen merupakan elemen paling banyak di bumi, baik sebagai O₂ dan O₃ (ozon) serta beberapa senyawa termasuk molekul air. Gas oksigen dapat ditemukan dalam air akibat proses difusi dari udara di permukaan air, aerasi, ataupun proses fotosintesa^[11].

Pengaruh gas O₂ terhadap kecepatan korosi berbeda antara sistem tertutup dengan system terbuka. Pada sistem terbuka, kecepatan korosi akan semakin meningkat seiring peningkatan temperatur namun di atas 80°C akan semakin menurun karena air melepaskan gas O₂ ke udara. Sedangkan pada sistem tertutup, kecepatan korosi semakin meningkat seiring peningkatan temperatur, karena oksigen tidak dapat bebas dari sistem dan meningkatkan kelarutannya dalam uap air. Oksigen merupakan gas terlarut yang paling agresif dibandingkan CO₂ atau H₂S^[12].



Gambar 2.5. Kurva kecepatan korosi terhadap kelarutan gas pada temperatur ruang.^[12]

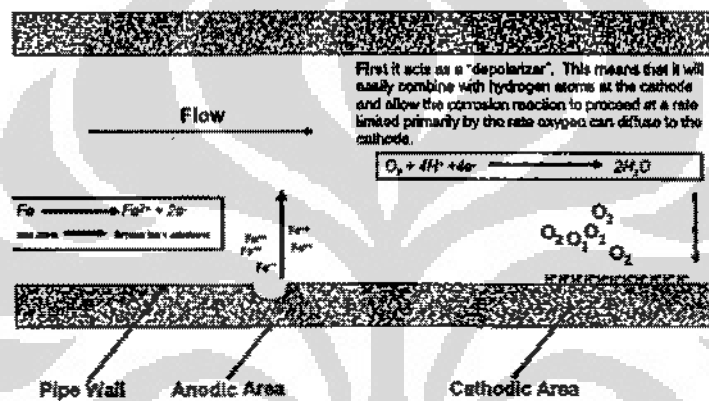


Gambar 2.6. Pengaruh temperatur terhadap kelarutan oksigen dalam air.^[13]

Oksigen terlarut merujuk kepada banyaknya volume oksigen yang terkandung dalam air. Oksigen masuk ke dalam air oleh proses fotosintesis biota akuatik dan difusi pada permukaan air. Banyaknya oksigen yang dapat ditampung air tergantung pada temperatur air, salinitas, dan tekanan udara.^[14]

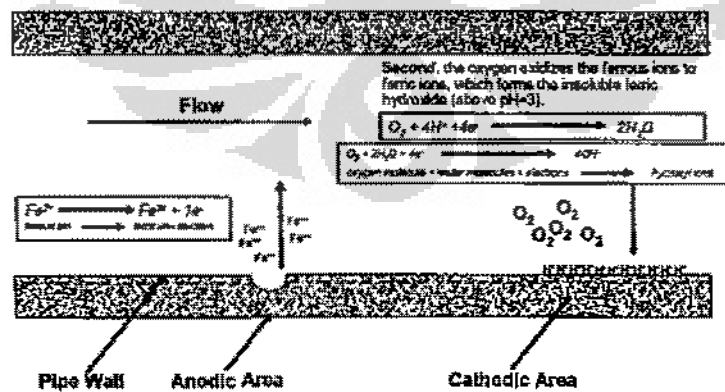
Oksigen terlarut dapat merusak lapisan protektif hidrogen yang terbentuk pada permukaan kebanyakan logam, dan mengoksidasi ion-ion terlarut ke bentuk yang sukar larut. Oksigen dapat meningkatkan kecepatan korosi dengan 2 cara, yaitu:

- a) Pertama dia bertindak sebagai *depolarizer*. Artinya dia dengan mudah berikatan dengan atom hidrogen pada katoda sehingga reaksi korosi terjadi dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan difusi oksigen ke permukaan katoda. Tanpa oksigen, energi untuk terjadinya evolusi gas hidrogen menjadi penghambat kecepatan korosi yang terjadi.



Gambar 2.7. Oksigen sebagai *depolarizer*.^[15]

- b) Kedua, oksigen mengoksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} sehingga membentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang sukar larut (pada pH = 3).



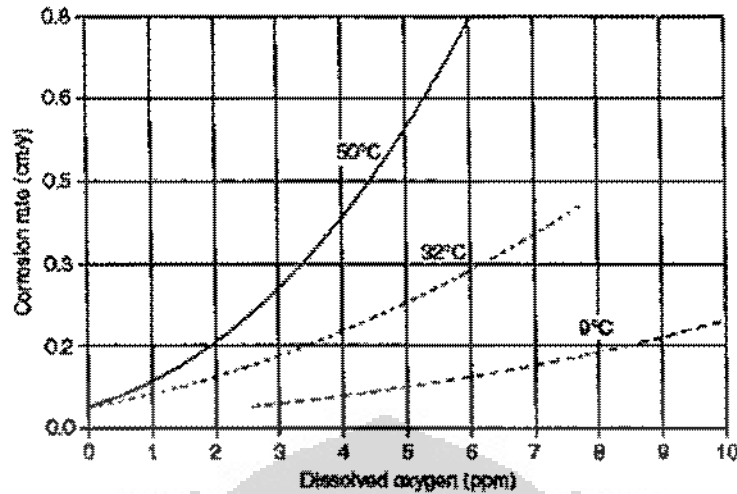
Gambar 2.8. Pembentukan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang sukar larut.^[15]

Pada suatu sistem yang memiliki perbedaan oksigen terlarut di permukaannya, proses korosi (oksidasi) akan meningkat di daerah yang memiliki kelarutan oksigen terendah. Sehingga padatan, kerak, atau produk sampingan korosi yang dapat menurunkan konsentrasi oksigen menyebabkan korosi terlokalisir. Oksigen terlarut dapat menyebabkan korosi yang cukup parah hanya pada konsentrasi 40 ppb, sehingga pada umumnya pemakaian kelarutan oksigen dibatasi hingga 20 – 30 ppb.^[15]

Oksigen terlarut dalam air dapat dikontrol dengan penambahan inhibitor senyawa sulfit, seperti: natrium sulfit dan natrium metabisulfit, di mana dalam kuantitas cukup kecil dapat bereaksi dengan oksigen. Reaksi yang terjadi pada natrium metabisulfit dengan oksigen terlarut adalah^[16]:



Laju korosi dapat meningkat dengan kenaikan kelarutan oksigen seperti terlihat pada gambar 2.9. Pada gambar tersebut menunjukkan temperatur yang meningkat akan meningkatkan laju korosi baja karbon akibat kinetika reaksi yang lebih cepat^[17]. Terlihat jelas walaupun pada kelarutan oksigen yang sama, perbedaan temperatur menghasilkan laju korosi yang berbeda.



Gambar 2.9. Pengaruh kelarutan oksigen terhadap laju korosi baja karbon rendah dalam air keran.^[17]

Sebagaimana disebutkan sebelumnya, kelarutan oksigen dalam air utamanya tergantung pada temperatur, lalu faktor salinitas juga ikut berpengaruh dalam lingkungan air laut. Tabel 2.1 menunjukkan besar kelarutan oksigen dalam air laut pada tekanan 1 atmosfer dan beberapa variabel temperatur. Upaya penanggulangan korosi akibat pengaruh oksigen terlarut dalam air dapat dilakukan secara mekanik dan kimia.

Tabel 2.1. Kelarutan oksigen dalam air laut.^[13]

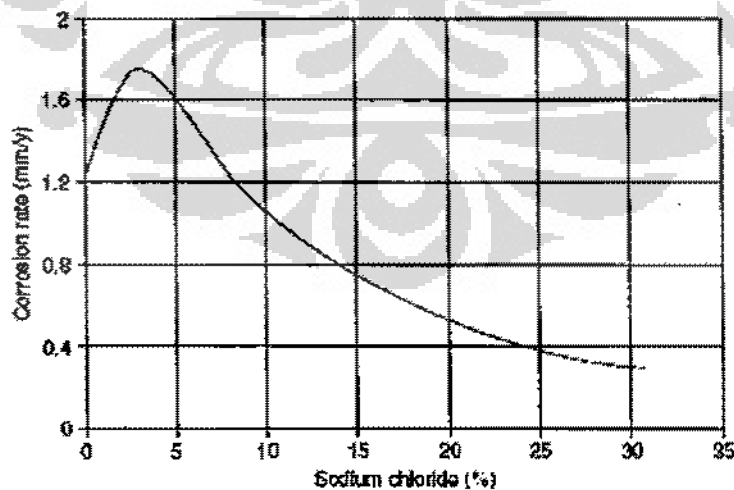
Pressure		mm Hg		
		760		
		14.7		
		1		
		101.1		
Temperatura				
°C	°F	mg/l	cm ³ /l	cm ³ /m ³
0	32	349	11.2	7.6
5	41	308	9.9	7
10	50	275	8.8	6.4
15	59	246	7.9	5.9
20	68	225	7.2	5.4
25	77	206	6.6	5
30	86	190	6.1	4.7
35	95	176	5.6	4.5
40	104	165	5.3	4.2
45	113	154	4.9	4
50	122	146	4.6	3.8

2.6. Pengaruh Garam Terhadap Proses Korosi

Garam dalam larutan akan terurai menjadi anion dan kation pembentuknya, sehingga dalam larutan tersebut akan terbentuk ion-ion yang kekurangan dan kelebihan elektron. Ion-ion tersebut yang menjadikan larutan menjadi mudah untuk menghantarkan arus listrik^[18]. Oleh karena itu, nilai konduktifitas suatu larutan akan berbanding lurus dengan nilai konsentrasi garam yang terlarut.

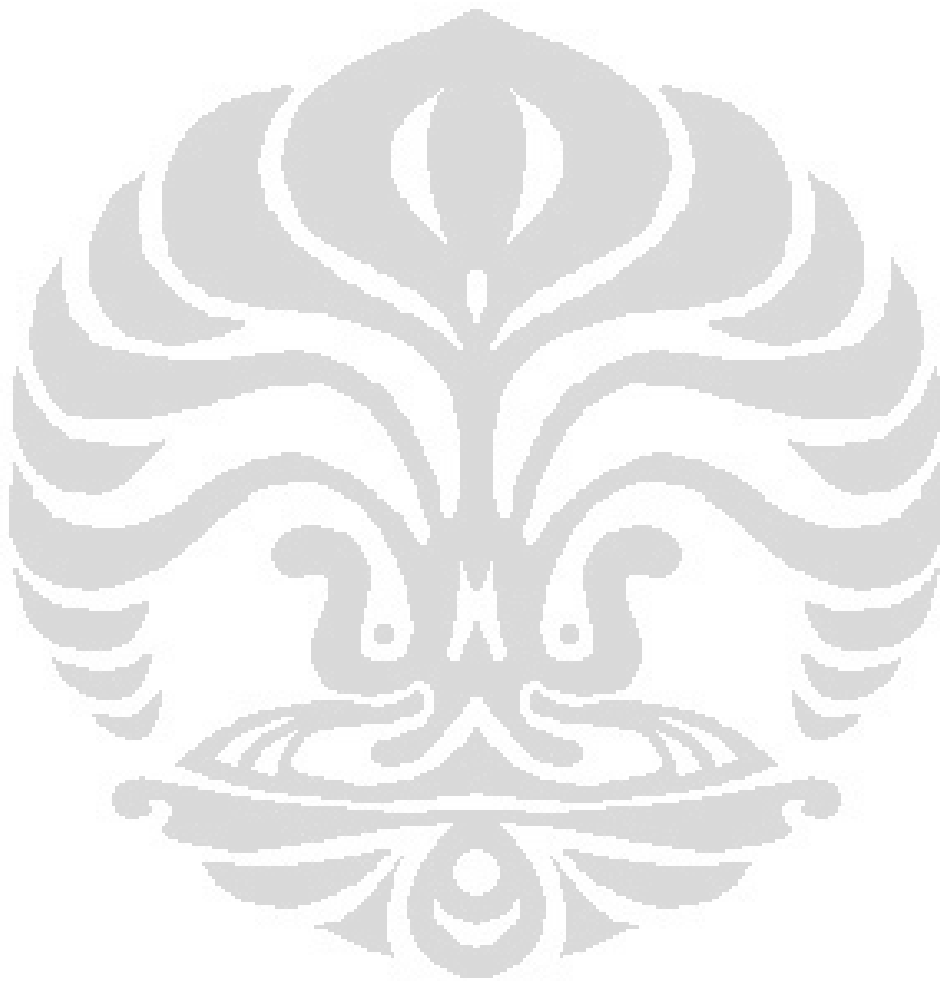
Proses korosi dalam satu sisi merupakan proses elektrokimia yang bergantung kepada konduktifitas dari elektrolit tempat dia terjadi. Air demineral memiliki konduktifitas larutan yang lebih rendah dibandingkan air laut^[19], sehingga pada umumnya laju korosi logam dalam air laut lebih tinggi daripada air demineral.

Sebagaimana disebutkan sebelumnya kelarutan oksigen dalam air mempengaruhi proses korosi logam, namun dengan adanya ion-ion terlarut lainnya dalam air tersebut, kelarutan oksigen akan semakin berkurang. Sebagai contoh, semakin tinggi ion Cl^- akan semakin rendah kelarutan oksigen dalam fluida tersebut. Pada beberapa literatur disebutkan bahwa kelarutan optimum oksigen dalam air untuk terjadinya proses korosi berada pada konsentrasi ion Cl^- 3%. Kondisi tersebut ditunjukkan pada gambar 2.10 di mana suatu percobaan membuktikan bahwa laju korosi optimum baja karbon berada pada konsentrasi NaCl sebesar 3 – 3,5% berat.



Gambar 2.10. Pengaruh kadar ion Cl^- terhadap laju korosi.^[17]

Pada beberapa jenis logam yang mengalami pembentukan lapisan pasif oksida, ion Cl^- dapat menyebabkan proses korosi lokal, seperti korosi sumuran (*pitting*). Ion klorida dapat menyebabkan pitting pada baja karbon di atas pH 10 dan 25°C .^[20]



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Peralatan, Material dan Bahan

3.1.1. Peralatan

- a) Gelas kimia 500 cc.
- b) Labu polarisasi
- c) *Soil Box*
- d) *Resistivity-meter*
- e) *Aerator*
- f) Termometer
- g) pH-meter
- h) Elektroda grafit
- i) Elektroda standar Hg//HgCl₂
- j) *Dissolved Oxygen-meter*
- k) Perangkat Lunak CMS 100

3.1.2. Material dan Bahan

- a) Sampel polarisasi G10180 (0.14-0.2C, 0.6-0.9Mn)
- b) Sampel polarisasi Grade-B (0.27C, 1.15Mn)
- c) Natrium klorida (NaCl)
- d) Kertas SiC (#800)

3.2. Larutan Uji

- a) Aquades
- b) NaCl 1% (10 gpl NaCl dalam 1 L aquades)
- c) NaCl 2% (20 gpl NaCl dalam 1 L aquades)
- d) NaCl 3% (30 gpl NaCl dalam 1 L aquades)
- e) NaCl 3.5% (35 gpl NaCl dalam 1 L aquades)
- f) NaCl 4% (40 gpl NaCl dalam 1 L aquades)

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Preparasi Sampel dan Alat Uji

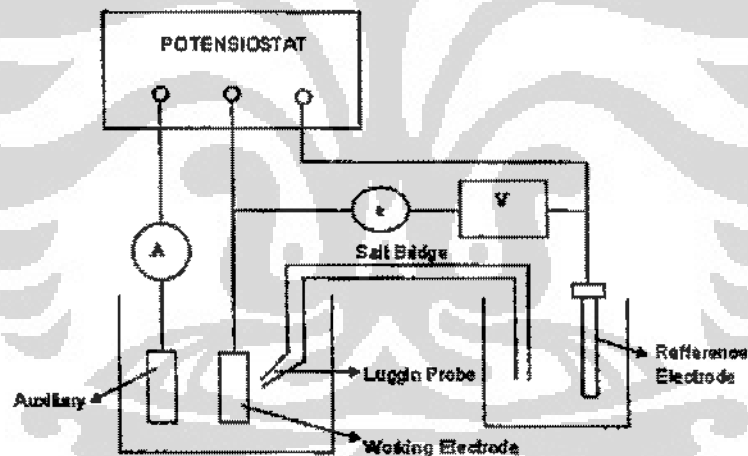
3.3.1.1. Sampel

Sampel uji yang digunakan terdiri dari:

- a) 500 cc dari masing-masing jenis larutan (aquades, NaCl 1%, NaCl 2%, NaCl 3%, NaCl 3,5%, dan NaCl 4%), dan
- b) Satu set sampel polarisasi dari masing-masing jenis material (G10180 dan Grade-B).

3.3.1.2. Alat uji

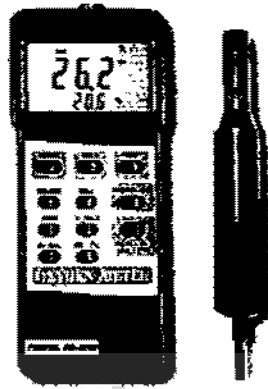
Alat uji yang perlu dipersiapkan adalah labu polarisasi berikut perangkat lunak CMS (*Corrosion Measurement System*) versi 100 yang terangkai bersama 1 set computer dengan rangkaian sebagai berikut:



Gambar 3.1. Skema pengujian polarisasi Potensiodinamik.^[4]

3.3.2. Uji Kelarutan Oksigen

Pengujian kelarutan oksigen dilakukan dengan mencelupkan *probe Dissolved oxygen-meter* pada larutan yang akan diuji, kemudian hasil pengukuran akan langsung didapatkan oleh alat.



Gambar 3.2. Alat *Dissolved Oxygen-meter*.

3.3.3. Uji Konduktifitas Larutan

Konduktifitas larutan diketahui melalui pengujian resistivitas larutan di mana nilai konduktifitas berbanding terbalik dengan resistivitasnya sebagai persamaan berikut:

$$G = \frac{1}{R} \quad 3.1$$

di mana: G = konduktifitas listrik (Siemens/cm)

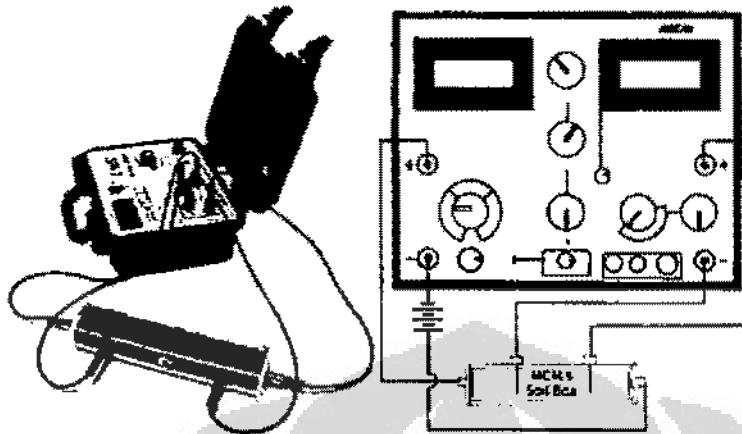
R = resistivitas listrik (ohm/cm)

Sedangkan pengujian resistivitas larutan sendiri dilakukan dalam kotak uji sebagai berikut:



Gambar 3.3. *Soil Resistivity Box*.^[21]

dengan rangkaian pengujian seperti terlihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.4. *Resistance Meter*.

Nilai tahanan yang terbaca pada alat *Resistance Meter* kemudian dikonversi menjadi nilai tahanan listrik sampel dengan rumus berikut:

$$R = \frac{\rho \times L}{W \times D}$$

3.2

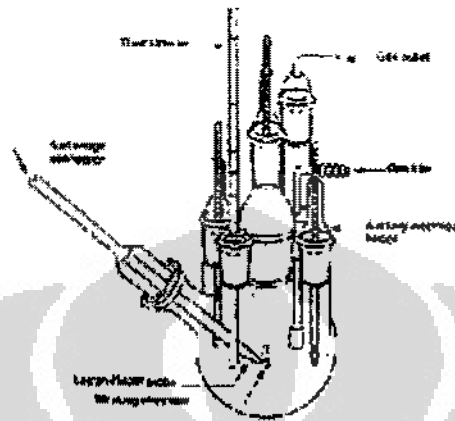
di mana W , L , dan D merupakan dimensi-dimensi pada *Soil Test Box* (gambar 3.3) dalam satuan cm, dan ρ adalah nilai resistivitas.

3.3.4. Uji Analisa Tafel

Pengujian untuk mendapatkan kurva Tafel dilakukan dengan memasukkan terlebih dahulu kondisi pengujian dan spesifikasi sampel. Setelah langkah tersebut dilakukan, pengujian polarisasi Tafel dapat dimulai. Setelah selesai, data yang didapat diolah pada folder analisis untuk mendapatkan grafik E (potensial) vs $\log i$ (rapat arus).

Pengujian analisa Tafel dapat langsung diketahui laju korosi dari sampel yang diuji melalui komputasi secara otomatis dari perangkat lunak yang ada. Namun, perhitungan manual juga dilakukan guna memastikan hasil

perhitungan secara otomatis, dengan membuat perpotongan antara garis linear antara kurva anodik dan kurva katodik yang kemudian dimasukkan ke dalam persamaan 2.17.



Gambar 3.5. Labu polarisasi standar.^[6]

Langkah – langkah yang dilakukan dalam pengujian Tafel :

1. Menyiapkan larutan –larutan NaCl yang telah di-aerasi.
2. Pemasangan sampel pada *specimen holder* dengan satu sisi mengkilap yang siap kontak dengan larutan dan sisi lainnya harus ditutup.
3. Sel polarisasi disusun sesuai dengan standar pemasangan *specimen holder*, *electrode standar*, *electrode pembantu* dan kabel-kabel lain pada instrumen pengukur polarisasi.
4. Larutan NaCl dimasukkan ke dalam sel sampai seluruh permukaan sampel tercelup.
5. Sebagian larutan NaCl yang sama dimasukkan ke dalam bagian pemegang *electroda standar (luggin probe)*, yaitu *electroda kalomel*. Kemudian dimasukkan ke dalam sel dan diatur jarak dari ujung mulut *electroda* ke permukaan sampel sedekat mungkin tanpa bersentuhan.
6. Menyiapkan computer dengan program CMS – 100 (Corrosion Measurement System) dan dipilih folder eksperimen dengan program TAFEL.

7. Memasukkan data-data pengujian pada instrumen (setting), dengan jangkauan potensial (-)300 – (+)300 mV terhadap *open potential* (*Eoc*).
8. Setelah selesai, program *scanning* dapat dijalankan dan disimpan untuk kemudian dilakukan perhitungan laju korosi oleh program.
9. Kurva I-V hasil *scanning* kemudian diolah dengan program Tafel Analysis untuk mendapatkan laju korosinya.
10. Mengulangi langkah-langkah diatas untuk larutan NaCl yang diuji dimasukan sesuai urutan dari konsentrasi terendah ke tinggi.

Prosedur Kalkulasi Laju Korosi diadaptasi sesuai *Standard Operating Procedure Gamry CMS 100* dan *ASTM G102-89 Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*.

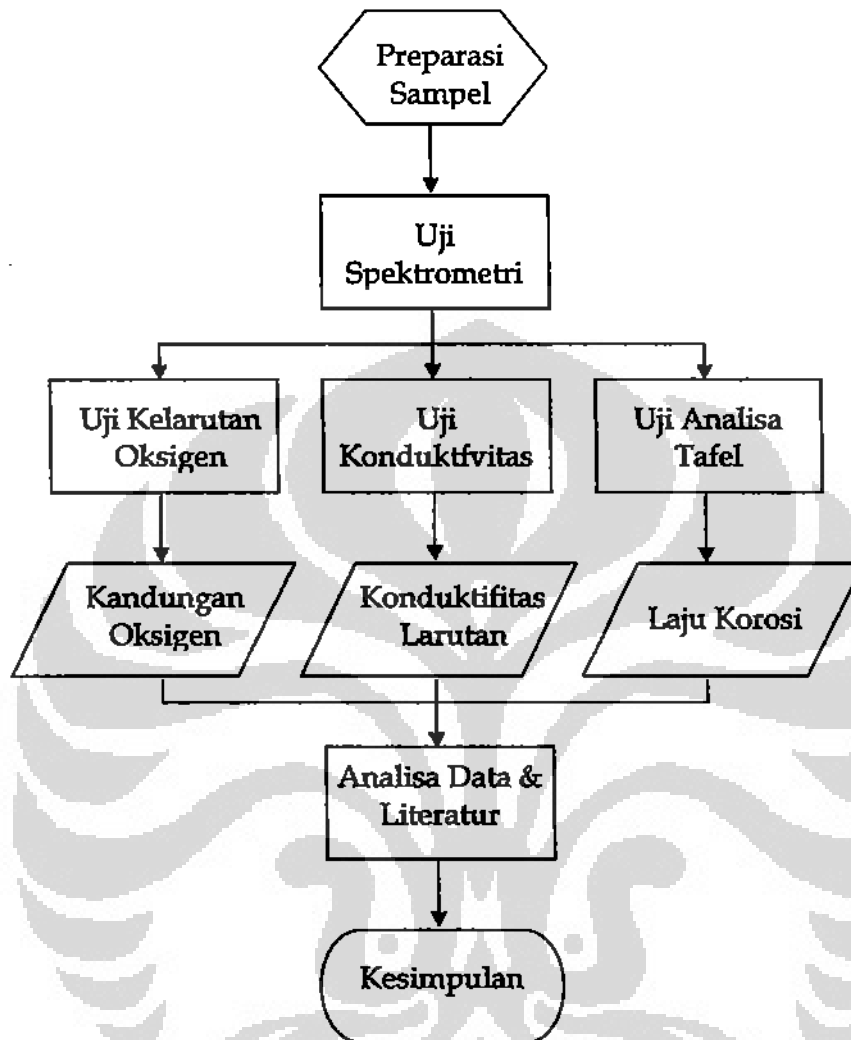
3.4. Metode Analisa Data Pengujian

Hasil pengujian kelarutan oksigen dalam air dan konduktifitas larutan akan disajikan dalam table hubungan konsentrasi NaCl dengan nilai tersebut, sehingga dapat diketahui hubungan antara parameter-parameter tersebut. Faktor korelasi hasil pengukuran oleh alat bantu juga akan ditampilkan untuk mengetahui koefisien korelasi antara nilai-nilai tersebut.

Hasil pengujian analisa Tafel akan disajikan dalam bentuk kurva terpadu dari masing-masing pengujian pada konsentrasi NaCl tertentu, sehingga dapat diketahui perubahan bentuk kurva dan pergeseran kurva seiring peningkatan konsentrasi NaCl.

Laju korosi hasil analisa Tafel akan ditampilkan dalam bentuk tabel dan kurva hubungan konsentrasi NaCl dengan laju korosi, sehingga dapat dibandingkan dengan literatur yang ada.

3.5. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.6. Diagram alir penelitian

BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Komposisi Kimia Material

Kedua sampel material yang digunakan diuji komposisi kimianya dengan alat spektrometri. Tabel berikut merupakan hasil dari pengujian komposisi kimia material baja G10180 dan baja API 5L Grade-B yang akan digunakan:

Tabel 4.1. Komposisi kimia material

Material	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
G10180	0,208	0,232	0,021	0,061	0,829	0,039	0,079
API 5L Gr.B	0,198	0,212	0,022	0,059	0,786	0,029	0,021

Material	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
G10180	0,012	0,002	0,021	<0,002	<0,002	0,017	97,975
API 5L Gr.B	0,009	0,003	0,050	<0,002	0,004	0,023	98,085

4.2. Pengujian Kelarutan Oksigen

Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan kelarutan oksigen dalam larutan uji dengan yang disebutkan oleh berbagai literatur, di mana semakin tinggi konsentrasi garam dalam suatu larutan maka kandungan oksigen terlarut dalam larutan tersebut akan semakin rendah.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa larutan uji memiliki keserupaan sifat dengan larutan NaCl pada berbagai literatur, di mana kelarutan oksigen dalam larutan NaCl akan semakin rendah jika konsentrasi NaCl semakin tinggi. Pengujian tersebut dilakukan pada temperatur 27°C dan tekanan ruang (1 atm) dengan 2 kondisi, di mana pada kondisi I pengukuran dilakukan sesaat setelah larutan di-*purging* dengan udara oleh aerator (aerasi), dan kondisi II pengukuran dilakukan 3 menit setelah aerasi dihentikan. Tabel berikut adalah hasil pengujian dari 5 larutan uji yang telah dipersiapkan:

Tabel 4.2. Kandungan oksigen terlarut pada berbagai konsentrasi NaCl.

Oksigen Terlarut (mg/L)	Konsentrasi NaCl (%wt.)					
	0	1,0	2,0	3,0	3,5	4,0
I	7,0	6,7	5,6	5,5	5,5	5,2
II	5,2	5,2	4,7	4,7	4,4	4,1
Rata-rata	6,10	5,95	5,15	5,10	4,95	4,65
Empiris ¹	5,56	5,26	4,97	4,70	4,57	4,44

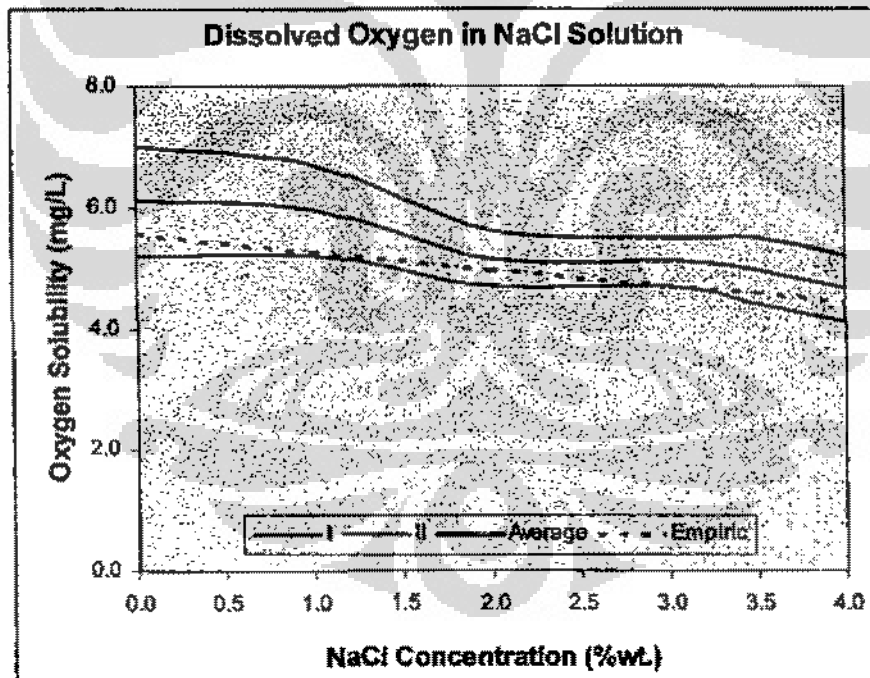
$$[O_2] = 1,3719 e^C - 1,4504$$

$$C = A_1 + A_2 \left(\frac{100}{T} \right) + A_3 \ln \left(\frac{T}{100} \right) + A_4 \left(\frac{T}{100} \right) + S \left(B_1 + B_2 \left(\frac{T}{100} \right) + B_3 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \right)$$

$$A_1 = -173,4292; A_2 = 249,6339; A_3 = 143,3483; A_4 = -21,8492$$

$$B_1 = -0,033096; B_2 = 0,014259; B_3 = -0,0017$$

$$S = \text{salinitas (gpl); } T = \text{temperatur (K)}^{[1]}$$

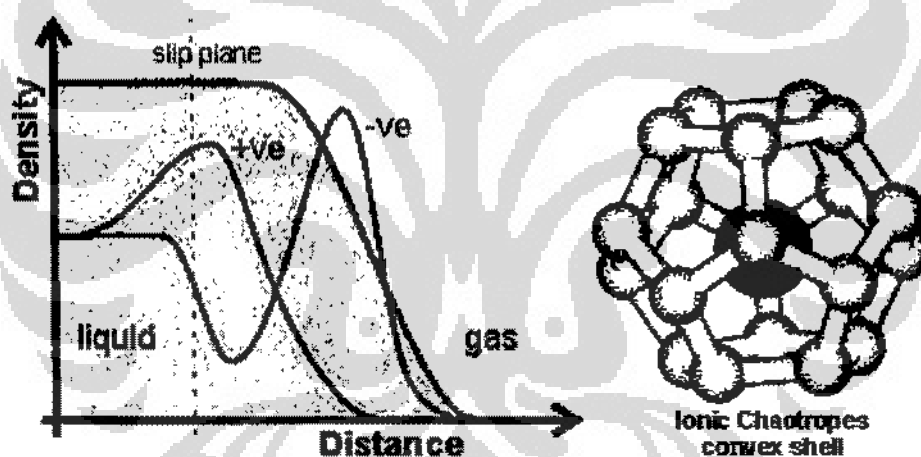


Gambar 4.1. Kurva hubungan kelarutan oksigen dengan konsentrasi NaCl

Penambahan NaCl dalam air selain meningkatkan viskositas, densitas, dan tegangan permukaan larutan^[15], juga akan meningkatkan jumlah ion bermuatan yang

terlarut. Ion bermuatan yang memiliki mobilitas tinggi dapat mempengaruhi kesetimbangan ikatan intermolekular antara air dengan gas-gas terlarut di dalamnya ataupun pelarutan gas dari udara. Penambahan ion *chaotropic* yang memiliki densitas muatan permukaan dan/atau polaritas yang tinggi (Cl^- , Br^- , I^-) akan cenderung mengubah kesetimbangan muatan pada antarmuka gas-larutan (akibat pergerakan ion H_3O^+ dan OH^-) menjadi lebih negatif serta menjadikan struktur susunan rantai H_2O yang bulat (*convex-dodecahedral*) karena mengelilingi anion, sehingga ikatan air dengan molekul nonpolar seperti O_2 akan semakin lemah dan gas O_2 dapat lepas dari air (gambar 4.2)^[5].

Densitas larutan yang semakin rapat juga akan membatasi jumlah materi yang mampu ditampungnya, sehingga gas O_2 mencapai titik jenuh kelarutan dalam air yang mengandung ion-ion Na^+ dan Cl^- .



Gambar 4.2. Muatan pada permukaan air-gas dan struktur ikatan air dengan ion-*chaotropic*.^[5]

4.3. Pengujian Konduktifitas Larutan

Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan konduktifitas larutan uji dengan yang disebutkan oleh berbagai literatur, di mana semakin tinggi konsentrasi garam dalam suatu larutan maka konduktifitas listrik larutan tersebut akan semakin tinggi. Berikut adalah hasil pengujian dari 5 larutan uji yang telah dipersiapkan:

Tabel 4.3. Konduktifitas larutan pada berbagai konsentrasi NaCl.

Konduktifitas (siemens/cm)	Konsentrasi NaCl (%wt.)					
	0	1,0	2,0	3,0	3,5	4,0
Pengujian	0,001	0,013	0,029	0,042	0,047	0,054
Empiris ¹	0,001	0,017	0,033	0,050	0,058	0,066

¹Lampiran B

Garam NaCl jika dilarutkan dalam air akan terlarut sempurna (terionisasi) menjadi ion-ion Na^+ dan Cl^- , di mana kedua ion tersebut dapat menerima (Cl^-) dan melepaskan elektron (Na^+) agar muatannya menjadi netral. Oleh karena itu jika sepasang elektroda dicelupkan ke dalam larutan NaCl, proses redoks dapat berlangsung dengan baik akibat tersedianya akseptor dan donor elektron dalam larutan tersebut, sehingga arus listrik dapat mengalir, dan semakin banyak ketersediaan anion-kation yang dapat bergerak bebas dalam larutan maka semakin konduktif larutan tersebut.^[22]

Konduktifitas suatu material akan mempengaruhi kecepatan transfer listrik (elektron) pada material tersebut, sehingga semakin tinggi konduktifitasnya maka material tersebut akan memiliki sifat konduktor (penghantar listrik) yang baik. Oleh karena korosi merupakan proses elektrokimia, maka aliran arus listrik melalui elektrolit sangat penting, di mana aliran tersebut dipengaruhi jumlah ion yang tersedia untuk transfer muatan dan kemampuan mereka untuk bergerak cepat di dalam larutan. Namun ion memiliki dimensi dan muatan, sehingga pergerakan mereka dapat dibatasi oleh persinggungan mereka dengan ion sejenis atau partikel lainnya dalam larutan.^[23]

4.4. Pengujian Analisa Tafel

Pengujian Tafel dilakukan terhadap 2 material yang akan diperbandingkan, G10180 dan Grade-B. Khusus material G10180, dikenakan pengujian Tafel selain untuk diperbandingkan dengan material Grade-B nilai laju korosinya, juga untuk

dibandingkan dengan literatur mengenai laju korosi baja karbon pada lingkungan NaCl, di mana laju korosi tertinggi dicapai pada konsentrasi 3,5% berat NaCl.

Pengujian Tafel dilakukan dengan *scanrate* 5 mV/detik dan rentang potensial pengujian -300 mV hingga +300 mV terhadap potensial korosi (E_{oc}). Kurva yang didapat kemudian dibandingkan pergeseran kurva, potensial korosi, dan laju korosinya. Laju korosi dari masing-masing pengujian didapatkan selain oleh hasil perhitungan perangkat lunak CMS 100, juga melalui perhitungan manual yang dilakukan dengan persamaan berikut:

$$mpy = 0,129 \frac{i_{cor} M}{D}$$

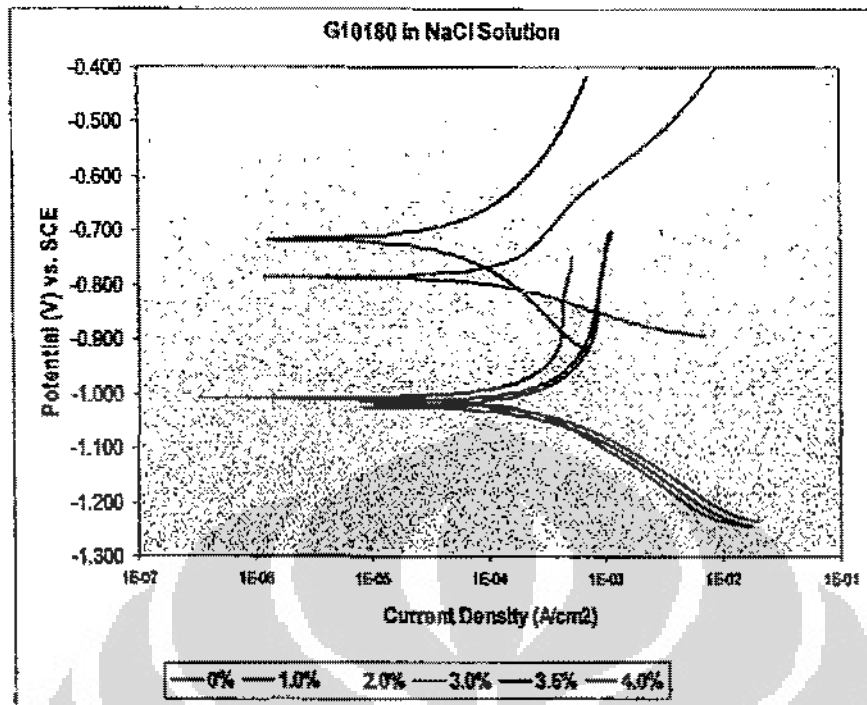
di mana :

- D = berat jenis (g/cm^3)
- i_{cor} = rapat arus korosi ($\mu A/cm^2$)
- M = berat ekuivalen ($g/mol.eq$)

Pada gambar 4.3 terlihat bahwa semakin tinggi konsentrasi NaCl dalam larutan hingga 3,5% berat, maka kurva akan bergeser ke kanan bawah atau dengan kata lain terjadi penurunan potensial korosi (semakin negatif) dan peningkatan arus korosi.

Kurva katodik tidak mengalami perubahan bentuk yang signifikan dengan semakin meningkatnya konsentrasi NaCl sebagaimana yang diharapkan. Namun, perubahan terjadi pada kurva anodik di mana seiring peningkatan konsentrasi NaCl, laju rapat arus mengalami penurunan. Hal ini dapat diakibatkan adanya pembentukan oksida Fe pada permukaan logam yang mengkompensasi keterbatasan oksigen, sehingga laju reduksi tidak mengalami perubahan.

Berikut hasil pengujian Tafel material G10180 dalam larutan dengan beberapa konsentrasi NaCl:



Gambar 4.3. Kurva Tafel baja G10180 pada beberapa konsentrasi NaCl.

Pada tabel 4.3 terlihat perubahan nilai potensial korosi G10180 dan laju korosinya seiring peningkatan konsentrasi NaCl dalam larutan, di mana semakin tinggi konsentrasi NaCl, potensial korosi akan semakin negatif, kecuali pada konsentrasi 4% berat NaCl, begitu pula dengan laju korosi yang mencapai nilai tertinggi pada konsentrasi 3,5% berat NaCl.

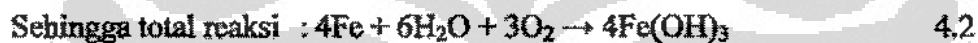
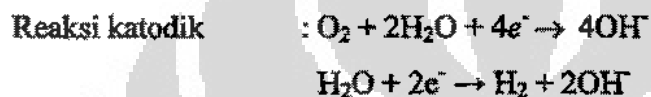
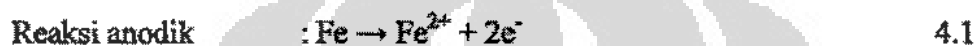
Tabel 4.4. Perbandingan potensial korosi (E_c) dan laju korosi (CR) baja G10180 pada konsentrasi larutan NaCl.

Parameter	Konsentrasi NaCl (%wt.)					
	0	1.0	2.0	3.0	3.5	4.0
E_c (volt)	-0.715	-0.785	-0.863	-1.015	-1.024	-1.007
CR (mpy)	16.29	31.77	46.30	75.00	77.04	56.64

Secara umum sifat korosi baja karbon G10180 dalam lingkungan NaCl sesuai dengan beberapa pernyataan pada berbagai literatur, di mana laju korosi maksimum dicapai pada konsentrasi NaCl 3,5% berat.

Penurunan laju korosi yang dialami baja karbon pada sistem terbuka setelah melewati konsentrasi 3,5% berat NaCl dapat disebabkan oleh 2 hal, yaitu:

- a) Keterbatasan konsentrasi agen pereduksi, oksigen, dalam larutan akibat meningkatnya konsentrasi ion klorida yang membatasi kelarutan oksigen dalam air sehingga laju reaksi katodik pada permukaan logam menjadi terbatas.

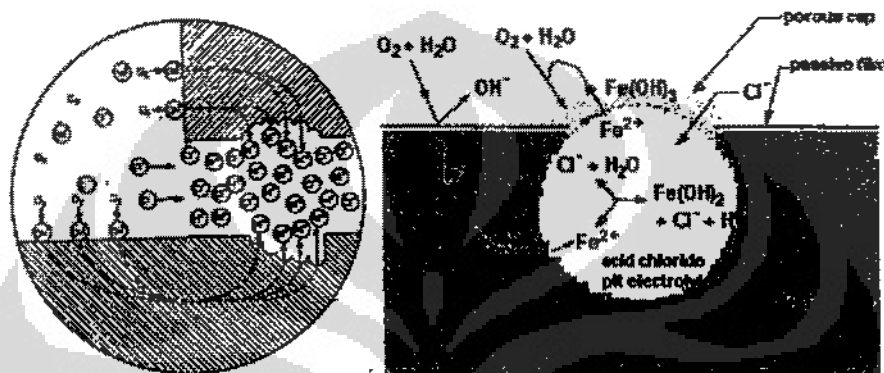


Dari reaksi di atas dapat disimpulkan bahwa dalam lingkungan netral reduksi oksigen dapat menjadi penghambat laju reaksi korosi yang terjadi. Pada konsentrasi klorida di atas 3,5% laju kerusakan baja karbon menurun, namun laju korosi tetap cukup tinggi walaupun jumlah oksigen terlarut menurun seiring peningkatan konsentrasi garam.^[24]

Reaksi reduksi air, persamaan 4.2, terjadi apabila kandungan oksigen terlarut dalam elektrolit rendah, sehingga proses reduksi akan menghasilkan gas hidrogen yang dapat berdifusi ke dalam lapisan oksida (pada area anodik) dan meningkatkan pada daerah tersebut jika berikatan dengan ion negatif yang tertarik ke bawah lapisan tersebut akibat adanya peningkatan muatan positif hasil dari pelarutan logam.^[24]



Jika laju difusi oksigen ke dalam larutan lebih lambat daripada laju reaksi oksidasi yang terjadi, maka beberapa bentuk korosi lokal dapat terjadi, seperti *crevice* atau bahkan *pitting*. Sedangkan pada proses pembentukan korosi lokal keterbatasan volume oksigen terlarut yang dibutuhkan dapat diantisipasi melalui pembentukan regim-regim yang terpusat/terlokalisir, di mana pada area tersebut kebutuhan oksigen menjadi berkurang. Gambar berikut merupakan ilustrasi 2 bentuk korosi lokal yang mungkin terjadi.



Gambar 4.4. Skema korosi *crevice* (kiri) dan *pitting* (kanan)^[4].

Pada kedua bentuk korosi di atas dapat terlihat penggunaan oksigen terpusat pada area-area sekitar proses korosi berlangsung, bahkan pada korosi *pitting* lingkungan di dalam *pit* cukup asam untuk terjadinya proses evolusi hidrogen.

- b) Jumlah ion klorida yang mulai jenuh dalam larutan, di mana salah satu sifat alami dari ion ini adalah mobilitasnya yang tinggi dan tidak mudah berikatan dengan suatu bentuk molekul lain. Oleh karena sifatnya tersebut ion klorida cenderung untuk melarutkan sejumlah produk hidroksida pada permukaan logam dan memicu reaksi korosi lebih lanjut pada permukaan logam yang terekspos ke larutan. Namun pada konsentrasi sekitar 3,5% NaCl, penambahan jumlah ion klorida mulai membatasi mobilitas dari ion tersebut.

Jadi, jika dilihat dari bentuk kurva tafel yang dihasilkan dari pengujian, secara elektrokimia pengaruh konsentrasi NaCl terhadap baja karbon G10180 dapat dirangkum sebagai berikut:

- a) pada konsentrasi NaCl 0% berat, laju disolusi logam pada daerah anodik seimbang dengan laju difusi oksigen untuk reaksi reduksi oksigen pada permukaan daerah katodik;
- b) pada konsentrasi NaCl 1% berat, laju disolusi logam pada daerah anodik lebih tinggi daripada reaksi reduksi oksigen pada daerah katodik akibat peningkatan konduktivitas larutan, sehingga laju pembentukan oksida logam pada area anodik lebih cepat dan meningkatkan resistivitas permukaan anodik;
- c) pada konsentrasi NaCl 2 – 3,5% berat, laju pembentukan oksida logam semakin meningkat, dan laju reduksi oksigen tidak mengalami perubahan yang signifikan, walaupun kelarutan oksigen semakin rendah, namun difusi dari udara tetap terjaga; dan
- d) pada konsentrasi NaCl 4% berat, laju pembentukan oksida logam mulai mempengaruhi proses korosi yang terjadi, namun sifat porous oksida Fe, maka reaksi anodik tetap berjalan walaupun tidak secepat kondisi sebelumnya (konsentrasi 0 – 3,5% berat NaCl).

4.5. Faktor Koreksi Laju Korosi

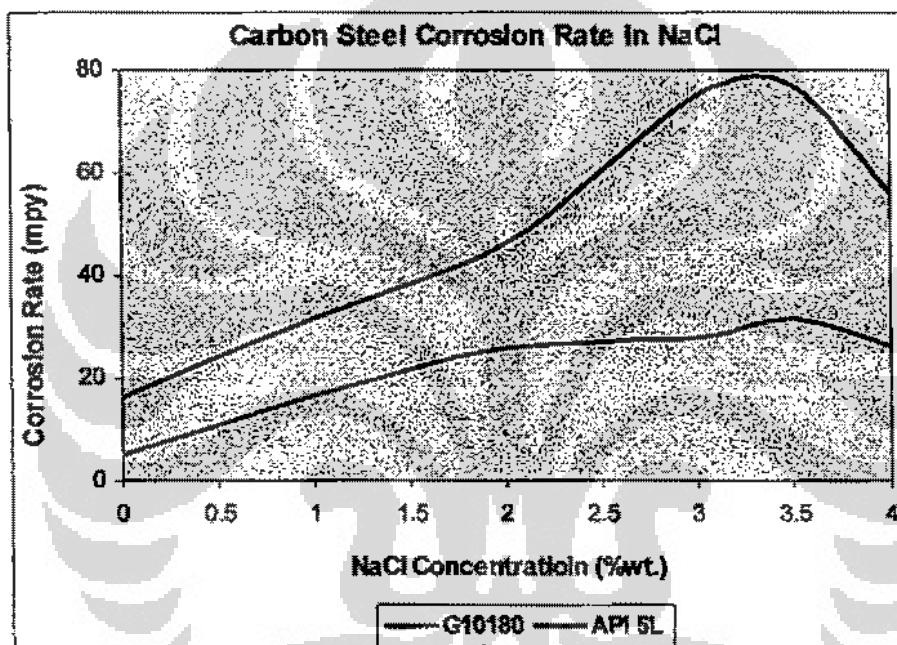
Perbedaan yang tampak adalah besar laju korosi yang dimiliki baja G10180 lebih besar rata-rata hampir 2 kali lipat dibandingkan apa yang tertera pada literatur, sedangkan Grade-B lebih rendah dibandingkan literatur. Perbedaan ini tentunya terkait dengan komposisi paduan yang berbeda antara baja API 5L Grade-B dengan baja G10180.

Menurut pengujian yang dilakukan Baorong Hou, dkk., dalam lingkungan air laut, paduan ringan seperti tembaga (Cu), fosfor (P), krom (Cr), molibdenum (Mo), dan aluminium (Al) sangat berpengaruh terhadap ketahanan korosi baja

karbon^[25]. Sedangkan sebagaimana kita ketahui, proses manufaktur juga akan mempengaruhi ketahanan korosi material.

Tabel 4.5. Laju korosi baja G10180 dan Grade-B pada konsentrasi larutan NaCl.

Material	Laju Korosi (mpy) pada Konsentrasi NaCl (%wt.)					
	0	1.0	2.0	3.0	3.5	4.0
G10180	16.29	31.77	46.30	75.00	77.04	56.64
Grade-B	5.04	16.76	25.75	27.92	31.58	26.37

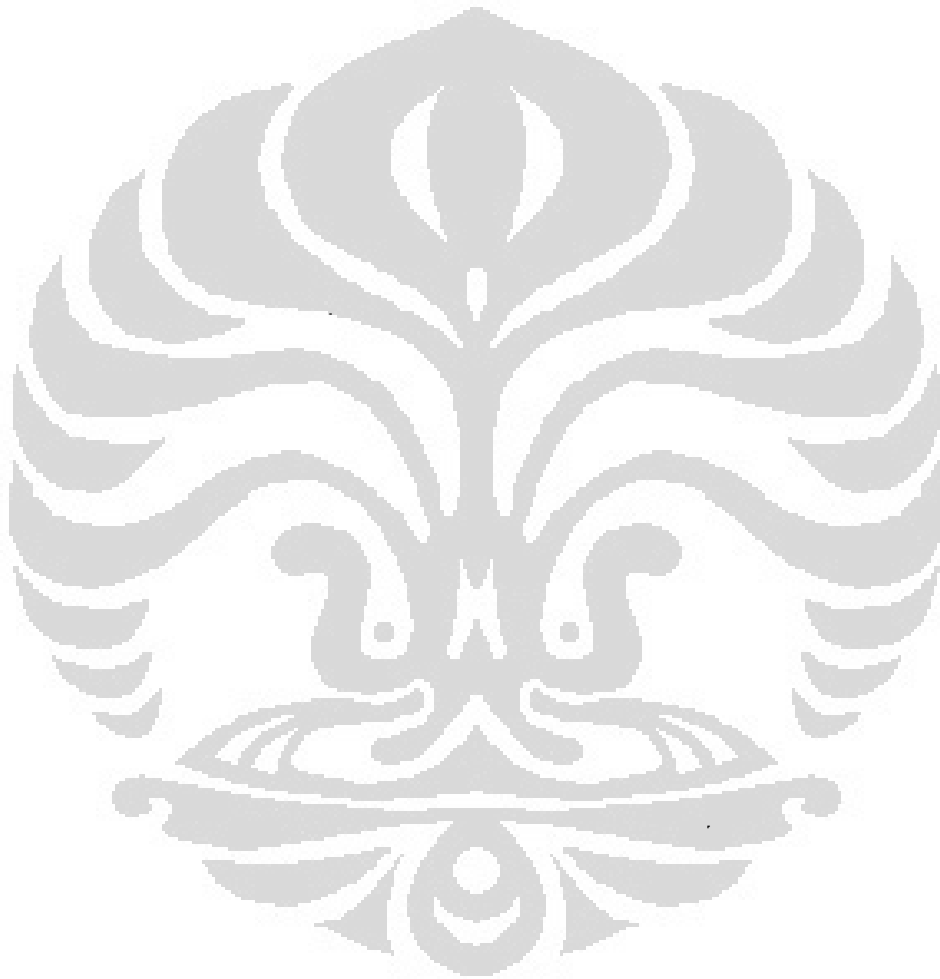


Gambar 4.5. Hubungan laju korosi baja karbon terhadap konsentrasi NaCl.

Pengujian terhadap baja G10180 menunjukkan diperlukannya faktor koreksi untuk mengkonversi laju korosi sampel kupon ke kondisi yang aktual, sehingga dapat digunakan sebagai pendekatan interpretasi data kupon korosi terhadap kondisi / laju korosi aktual material Grade-B di lingkungan NaCl. Persamaan 4.5 merupakan hubungan besaran laju korosi G10180 terhadap baja API 5L Grade-B.

$$CR_B = 0,4045 \cdot CR_C \quad 4.5$$

di mana: CR_B = laju korosi baja API 5L Grade-B (pipa)
 CR_C = laju korosi baja G10180 (kupon korosi)



BAB 5 KESIMPULAN

Hasil dari pengujian proses korosi di lingkungan NaCl dapat disimpulkan sebagai berikut:

- a) Semakin tinggi konsentrasi NaCl (0 – 4% berat) maka kandungan oksigen terlarut dalam larutan tersebut semakin menurun (5,2 – 4,1 mg/L).
- b) Semakin tinggi konsentrasi NaCl (0 – 4% berat) maka konduktifitas listrik larutan akan semakin meningkat (0,001 – 0,066 S/cm).
- c) Laju korosi baja G10180 dalam lingkungan NaCl pada tekanan 1 atm, temperatur 27°C, dan sistem terbuka, sangat dipengaruhi oleh laju reaksi oksidasi yang menghasilkan oksida pada permukaan logam.
- d) Faktor koreksi laju korosi baja G10180 terhadap API 5L Grade-B sebagai pendekatan kondisi aktual sebagai berikut:

$$CR_B = 0,4045 \cdot CR_C$$

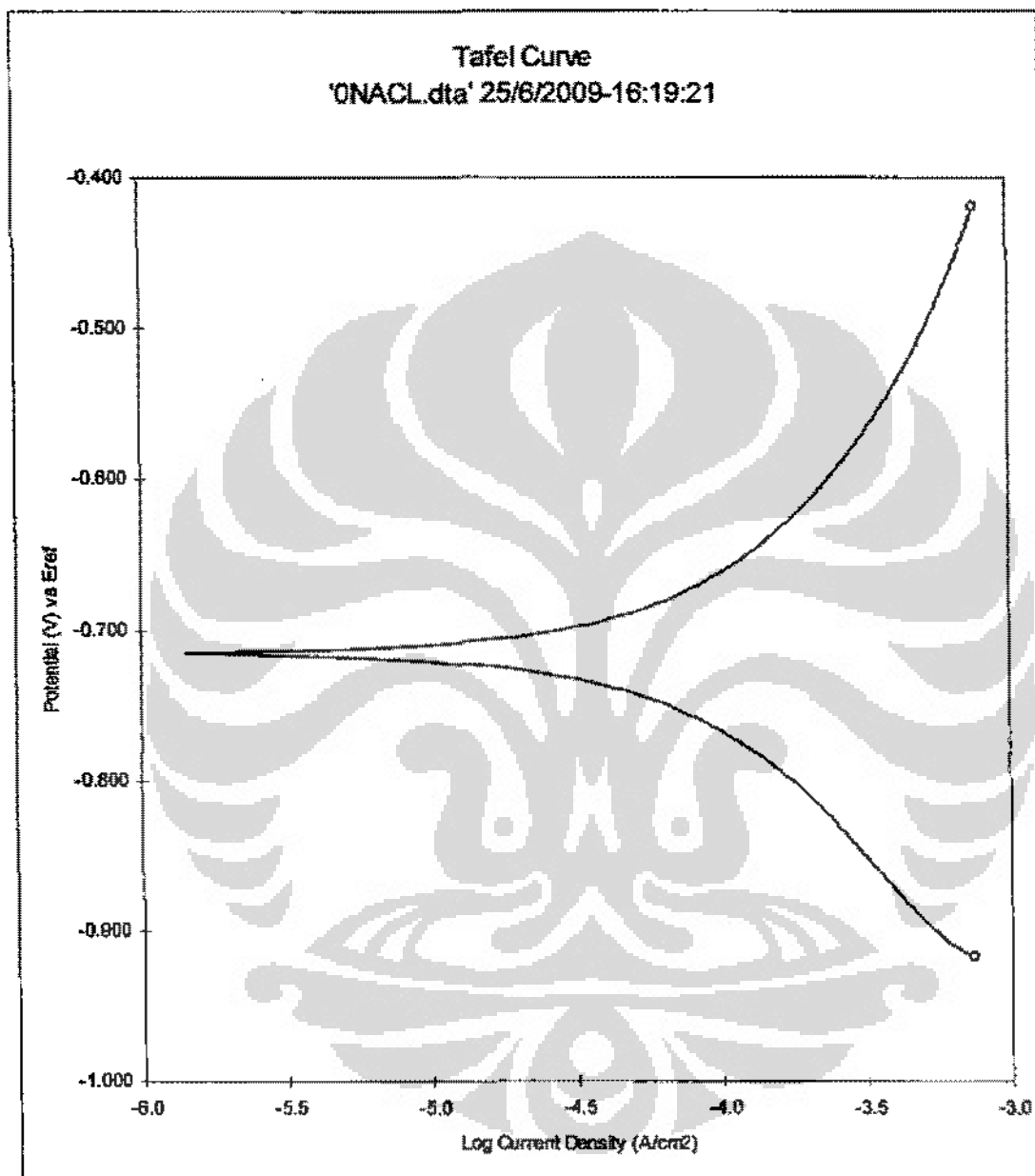
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Frank Jahn, Mark Cook, Mark Graham, *Hydrocarbon Exploration and Production*, 2nd Edition, Elsevier, 2008.
- [2] H. Möller, et al, *The Corrosion Behavior of A Low Carbon Steel in Natural and Synthetic Seawater*, The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol.106, August 2006
- [3] *Corrosion Basic*, NACE, 1984
- [4] D.A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, 2nd Edition, Singapore, Prentice Hall, 1997.
- [5] Martin Chaplin, *Water Structure and Science*, www.lsbu.ac.uk
- [6] Mars G. Fontana, "*Corrosion Engineering*", 3rd eds., McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
- [7] Jiang, X, Zheng, YG, Qu, DR, dan Ke, W, *Effect of Calcium Ions on Pitting Corrosion and Inhibition Performance in CO₂ Corrosion of N80 Steel*, Corrosion Science No.48, 2006.
- [8] J.R. Rossum, *Fundamentals of Metallic Corrosion in Fresh Water*, Roscoe Moss Company Article, 2000.
- [9] J. Chamberlain dan K.R. Trethewey, *Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1991.
- [10] Einar Bardal, *Corrosion and Protection*, Springer-Verlag London Limited, 2004.
- [11] *Dissolved Oxygen and Water Quality*, <http://kywater.org>
- [12] Loyd W. Jones, *Corrosion and Water Technology for Petroleum Producers*, OGCI Publications, 1988.
- [13] *Oxygen Solubility in Fresh and Sea Water*, www.EngineeringToolBox.com
- [14] *Dissolved Oxygen*, <http://omp.gso.uri.edu>
- [15] CONRAD, *Corrosion Control in Pipelines Using Oxygen Stripping*, Oilsand Water Usage Workshop, Camphion Technologies, February 2004.
- [16] A.V. Kastur dan S.G. Wadodkar, *Pharmacuetical Chemistry-1*, Pragati Books Pvt.Ltd., 2008.

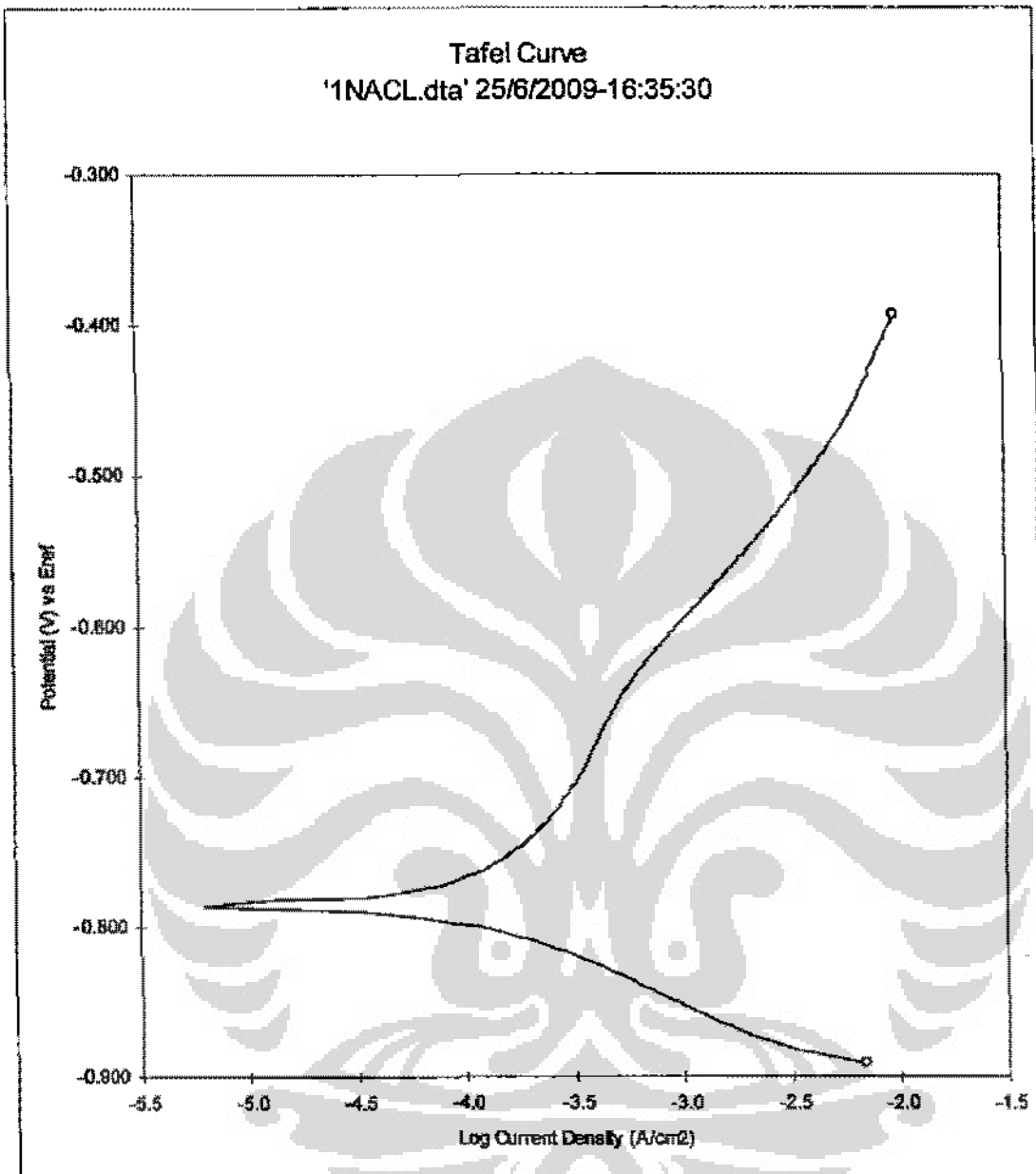
- [17] Pierre R. Roberge, *Corrosion Engineering – Principles and Practice*, The McGraw-Hill Companies Inc., USA, 2008.
- [18] Charles W. Keenan, Donald C. Kleinfelter, dan Jesse H. Wood, *Ilmu Kimia untuk Universitas*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1996.
- [19] Pierre R. Roberge, *Handbook of Corrosion Engineering*, The McGraw-Hill Companies Inc., USA, 2000.
- [20] J. Liu, Y. Lin, X. Yong, dan X. Li, *Study of Cavitation Corrosion Behaviors and Mechanism of Carbon Steel in Neutral Sodium Chloride Aqueous Solution*, NACE CORROSION Vol. 61, Paper No.11, 2005.
- [21] A.W. Peabody, *Control of Pipeline Corrosion*, NACE International 2nd Edition, Houston, 2001.
- [22] *Ions in Water, and Conductivity*, www.horiba.com
- [23] D.L. Piron, *The Electrochemistry of Corrosion*, NACE, Houston, 1991.
- [24] Harvey M. Herro and Robert D. Port, *The NALCO Guide to Cooling Water Systems Failure Analysis*, McGraw-Hill Inc., 1991.
- [25] Baorong Hou, Yantao Li, Yanxu Li, dan Jinglei Zhang, *Effect of Alloy Elements on The Anti-Corrosion Properties of Low Alloy Steel*, Bull. Material Science, Indian Academy of Science, 2000.

LAMPIRAN A – KURVA TAFEL

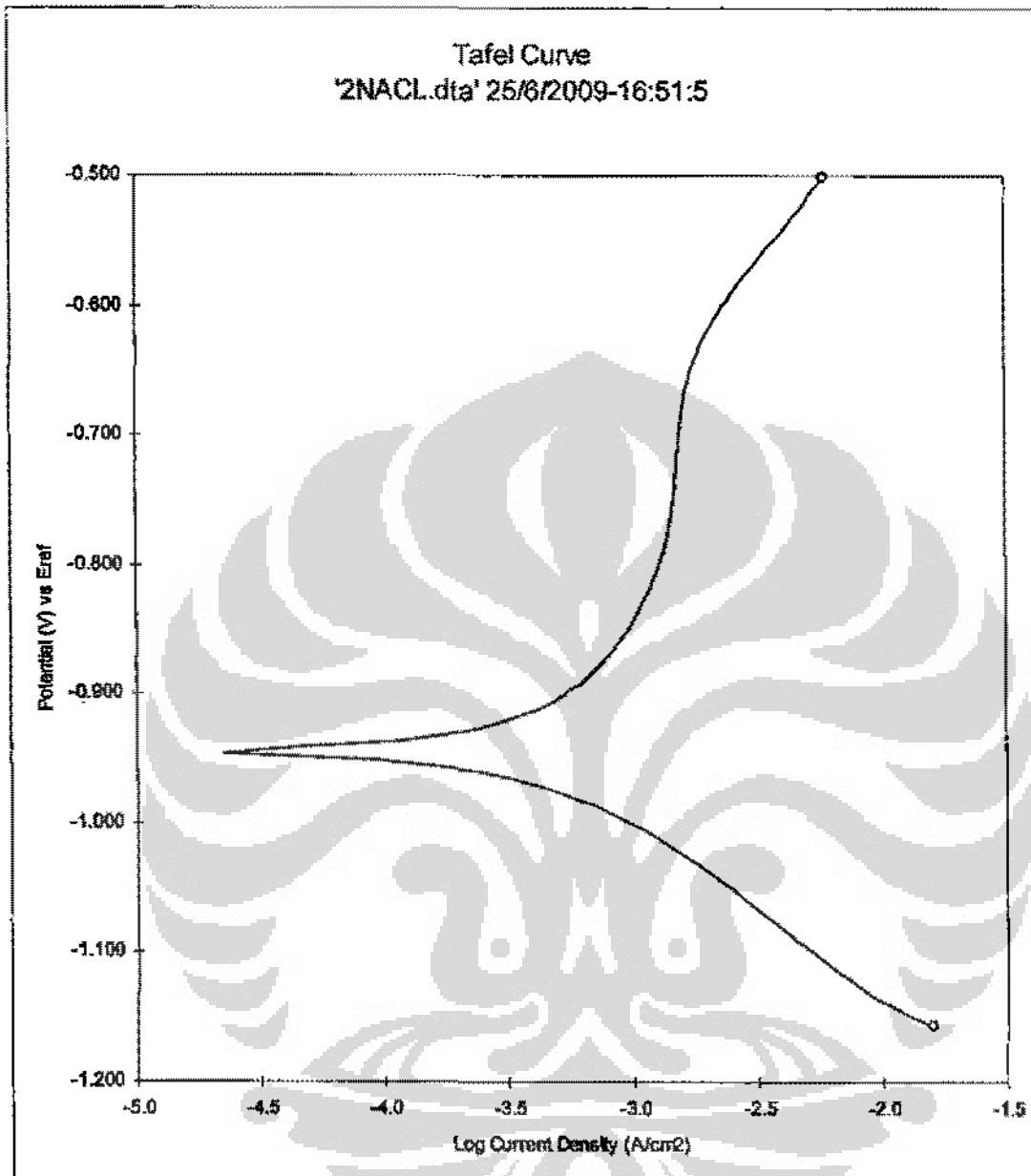
A.1. Air Tawar



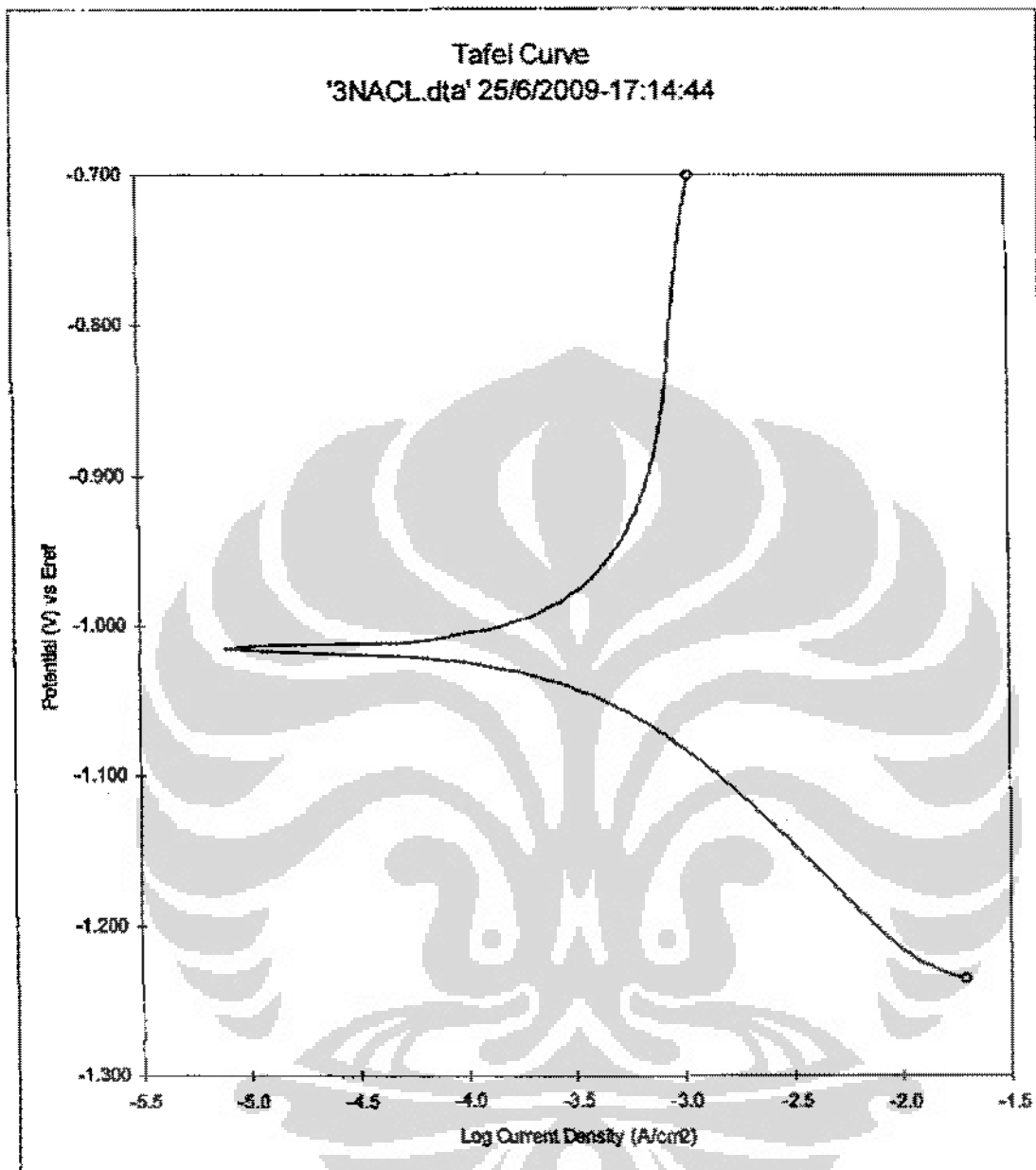
A.2. Larutan NaCl 1%

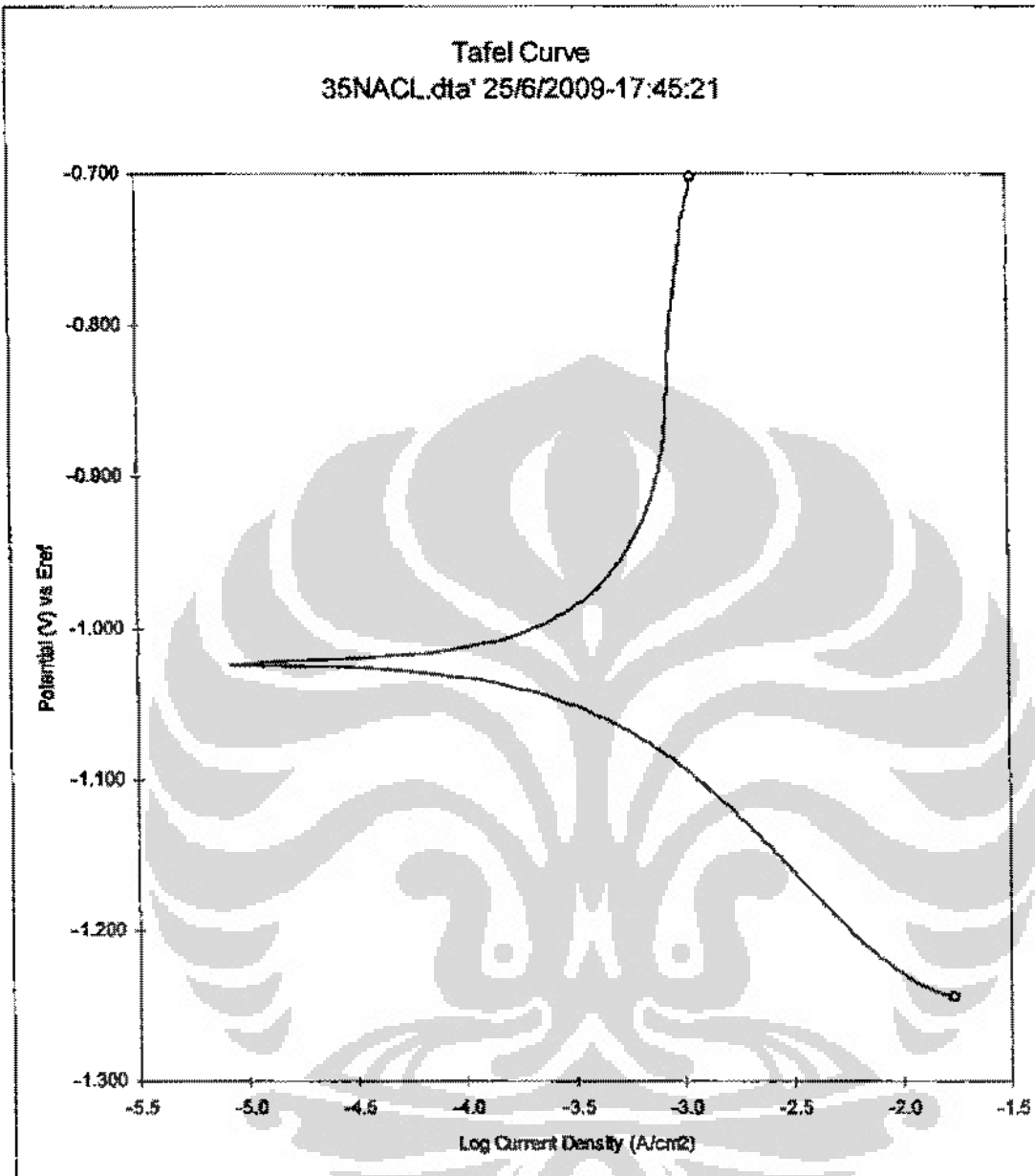


A.3. Larutan NaCl 2%

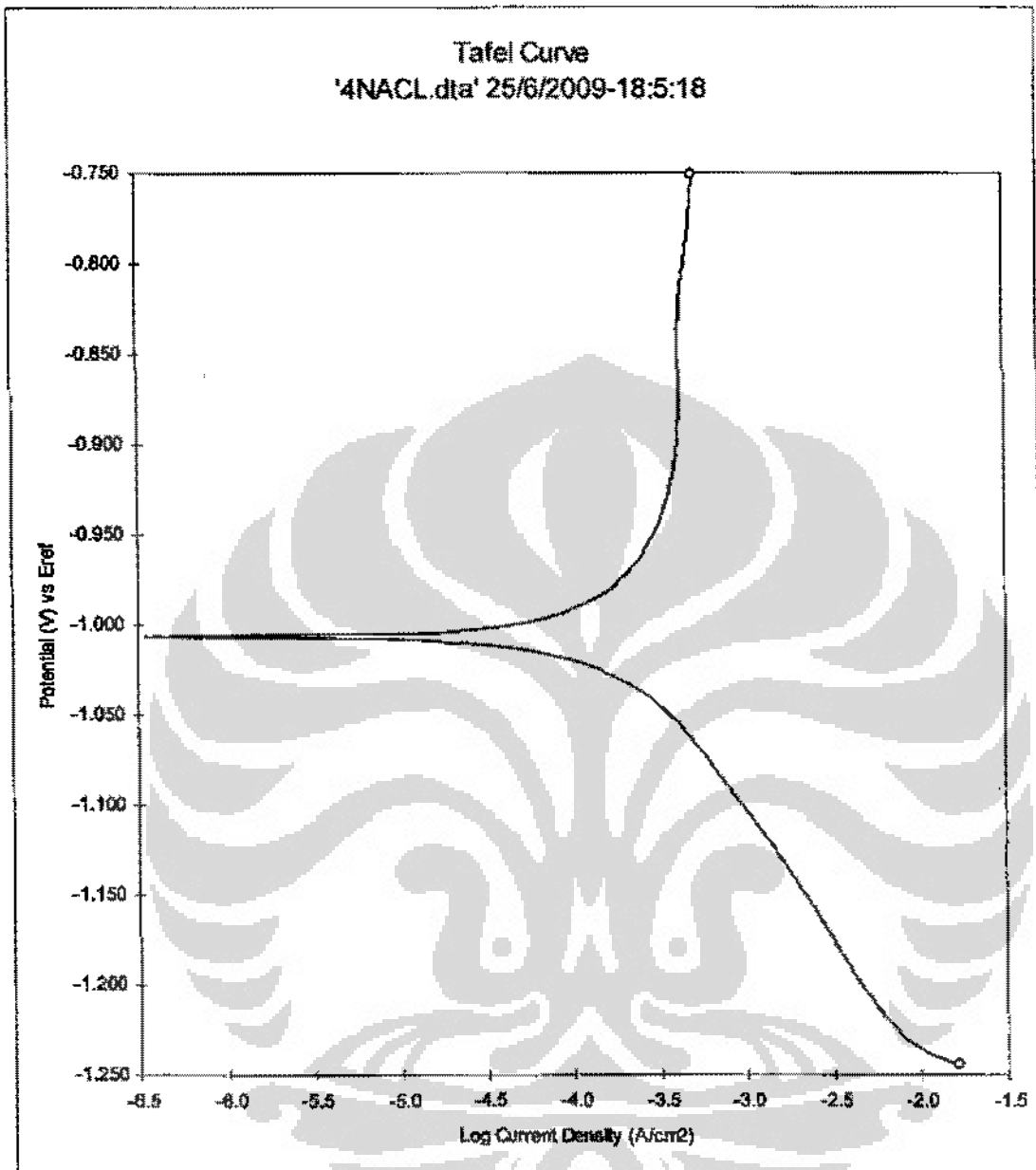


A.4. Larutan NaCl 3%



A.5. Larutan NaCl 3,5%

A.6. Larutan NaCl 4%



LAMPIRAN B – PERHITUNGAN DATA PENGUJIAN

B.1. Konduktifitas Larutan

Salinity (density of salt in salt water) and conductivity
Liquid temperature 25°C

NaCl density (W / V) %	Conductivity (mS / cm)	NaCl density (W / V) %	Conductivity (mS / cm)
0.1	2.0	1.1	19.2
0.2	3.9	1.2	20.8
0.3	5.7	1.3	22.4
0.4	7.5	1.4	24.0
0.5	9.2	1.5	25.6
0.6	10.9	1.6	27.1
0.7	12.6	1.7	28.6
0.8	14.3	1.8	30.1
0.9	16.0	1.9	31.6
1.0	17.6	2.0	33.0

$N = 20;$

$\Sigma Y = 21$

$\Sigma X = 362,21$

$$Y = aX + b \text{ (mS/cm)}$$

$a = 16,2835$ $b = 1,0074$

