



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH PENAMBAHAN 0,1,2,3,3.5 DAN 4 %
BERAT NaCl DENGAN LAJU ALIR 0 DAN 50 cm/detik
TERHADAP LAJU KOROSI BAJA UNS G10180 DENGAN
METODE TAFEL ANALISIS PADA SEL RCE (*ROTATING
CYLINDER ELECTRODE*)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**BANGUN WIJAYANTO
0606074634**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
PROGRAM STUDI KOROSI DAN PROTEKSI
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

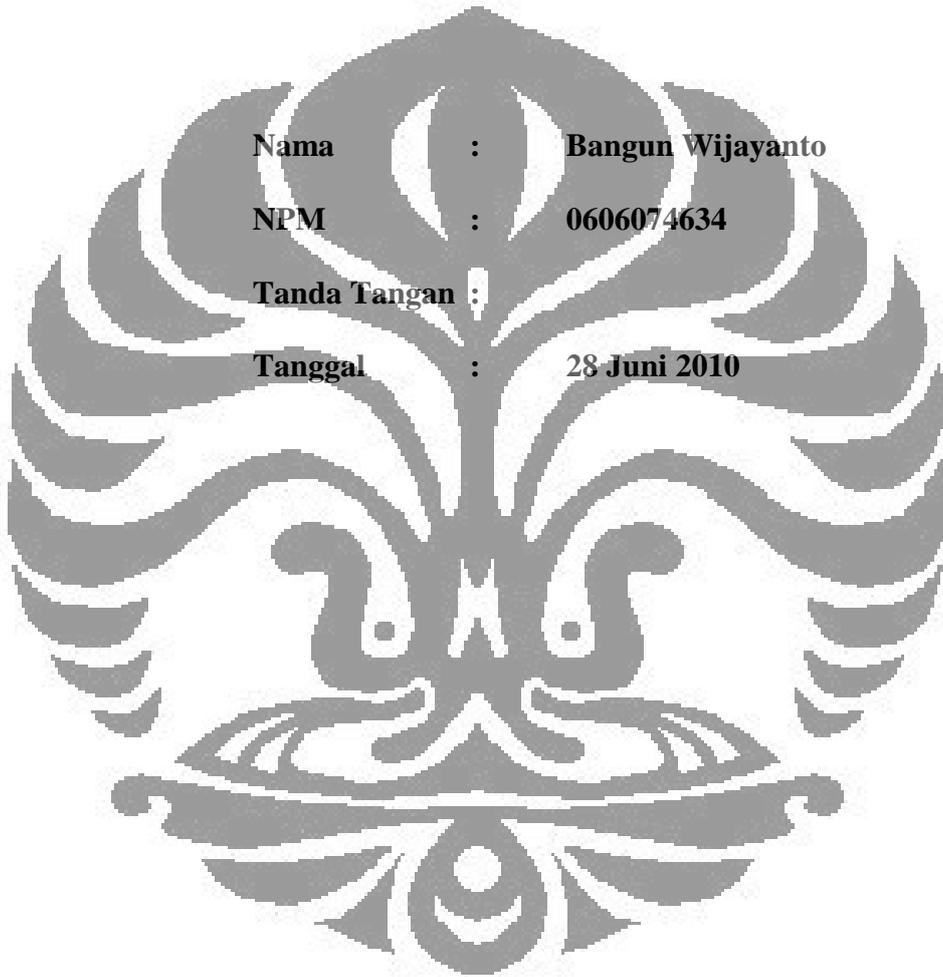
Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Bangun Wijayanto

NPM : 0606074634

Tanda Tangan :

Tanggal : 28 Juni 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Bangun Wijayanto
NPM : 0606074634
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi :

STUDI PENGARUH PENAMBAHAN 0,1,2,3,3.5 DAN 4 % BERAT NaCl
DENGAN LAJU ALIR 0 DAN 50 cm/detik TERHADAP LAJU KOROSI BAJA
UNS G10180 DENGAN METODE *TAFEL* ANALISIS PADA SEL RCE (
ROTATING CYLINDER ELECTRODE)

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof.Dr.Ir.Johny Wahyuadi M.S., DEA. (.....)

Pembimbing : Ir.Andi Rustandi, MT. (.....)

Penguji : Deni Ferdian, ST.MSc. (.....)

Ditetapkan di : Universitas Indonesia, Depok

Tanggal : 28 Juni 2010

Universitas Indonesia

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana 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 skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi M, DEA, selaku ketua tim Hibah Riset Mahasiswa Jenjang S1-S3 Tahun 2010, dan Ir. Andi Rustani, MT sebagai dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Tim Hibah Riset Mahasiswa Jenjang S1-S3 Tahun 2009 (Syarif Husein, Yudha Prathesa, Bang Rizki) yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan ;
3. Orang tua tercinta saya mamah Sri Sulistyowati dan papa Sudyanto (alm) kakak tercantik saya dr Indri Yulianthi serta saudara laki – laki saya Indra Ariyanto, SH dan Abi Yoso Rachmat yang telah memberikan bantuan dukungan dan pengertian untuk menyelesaikan studi saya;
4. Nike Lestari yang selalu mendukung dan memberikan bantuan serta pengertiannya dalam segala hal untuk menyelesaikan studi saya dan selalu mengisi hari – hari saya dengan baik.
5. 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 skripsi ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu korosi.

Depok, 9 Juli 2010

Penulis

Universitas Indonesia

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Bangun Wijayanto
NPM : 0606074634.
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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 PENGARUH PENAMBAHAN 0,1,2,3,3.5 DAN 4 % BERAT NaCl
DENGAN LAJU ALIR 0 DAN 50 cm/detik TERHADAP LAJU KOROSI BAJA
UNS G10I80 DENGAN METODE TAFEL ANALISIS PADA SEL RCE
(*ROTATING CYLINDER ELECTRODE*)

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Universitas Indonesia, Depok

Pada tanggal : 28 Juni 2010

Yang menyatakan

(Bangun Wijayanto)

Universitas Indonesia

ABSTRAK

Bangun Wijayanto

Dosen Pembimbing

NPM 0606074634

Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi M,
DEA

Departemen Metalurgi Material

STUDI PENGARUH PENAMBAHAN 0,1,2,3,3.5 DAN 4 % BERAT NaCl
DENGAN LAJU ALIR 0 DAN 50 cm/detik TERHADAP LAJU KOROSI
BAJA UNS G10180 DENGAN METODE TAFEL ANALISIS PADA SEL
RCE (*ROTATING CYLINDER ELECTRODE*)

Abstrak

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.

Evaluasi laju korosi material G10180 dilakukan dengan menggunakan metode analisa *Tafel* untuk lingkungan air tawar, NaCl 1, 2, 3, 3.5 dan 4 % berat, dan membandingkan laju korosi tanpa laju alir fluida dan dengan laju alir 50 cm/detik dengan menggunakan alat sel RCE (*Rotating Cylinder Electrode*).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa dalam lingkungan NaCl pada sistem tertutup dengan temperatur 25°C dan tekanan 1 atm, proses korosi baja G10180 lebih dipengaruhi aktivitas reaksi anodik daripada reaksi katodiknya. Laju korosi pada aliran fluida 50 cm/detik mengalami peningkatan yang sangat signifikan hingga 400 %.

Kata kunci: oksigen, baja G10180, laju korosi, larutan NaCl, RCE

ABSTRACT

Bangun Wijayanto

NPM 0606074634

Departemen Metalurgi Material

Conselor:

Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi M,
DEA

Abstract

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

G10180 corrosion rate evaluation done by using *Tafel* analysis method in tap water, 1%, 2%, 3%, 3.5% and 4%wt with fluid flow 50 cm/s and without it, the analysis using *RCE* (*Rotating Cylinder Electrode Sel* .

The results showed that in closed sistem NaCl solution with 1 atm and 27°C, G10180 corrosion process determined by its anodic reaction activity compared to its cathodic reaction. If compared corrosion rate with velocity 50 cm /s more highly than static condition becaused two factor mass transport coeficient and wallshear stress.

Keywords: oxygen, G10180 steel, corrosion rate, NaCl *RCE*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Ruang Lingkup	3
1.4.1 Material.....	3
1.4.2 Parameter	3
1.4.3 Tempat.....	3
1.4.4 Manfaat Penelitian.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Korosi	4
2.2 Pengaruh Kadar NaCL Terhadap Laju Korosi	6
2.3 Pengaruh Kadar Oksigen Terhadap Laju Korosi	7
2.4 Pengaruh Kecepatan Fluida Terhadap Laju Korosi	11
2.5 Pengukuran Laju korosi dengan Metoda Polarisation dengan bantuan analisa Tafel.....	16

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Diagram Alir Penelitian	21
Gambar 3.1 Flowchart proses penelitian.....	21
3.2 Bahan dan Peralatan	22
3.2.1 Bahan	22
3.2.2 Peralatan	22
3.3 Prosedur Penelitian.....	23
3.3.1 Persiapan Alat.....	23
3.3.2 Preparasi Sampel.....	30
3.3.3 Pembuatan Larutan Uji.....	31
3.3.4 Pengujian.....	31
BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 Pengujian Larutan	36
4.1.1 Pengujian Kadar O ₂	36
4.1.2 Pengujian Resistivitas dan Konduktivitas Larutan.....	39
4.1.3 Pengujian PH	41
4.2 Pengujian <i>Tafel</i> dengan CMS (<i>Corrosion Measurement Sistem</i>) menggunakan RCE (<i>Rotating Cylinder Electrode</i>).....	42
4.2.1 Pengujian saat keadaan kecepatan alir fluida 0 cm/detik	42
4.2.2 Pengujian CMS pada laju alir fluida 50 cm/detik.....	47
4.2.3 Perbandingan Laju Korosi Pada Laju Alir Fluida 0 dan 50 cm/detik..	49
BAB 5 KESIMPULAN	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN.....	56

DAFTAR TABEL

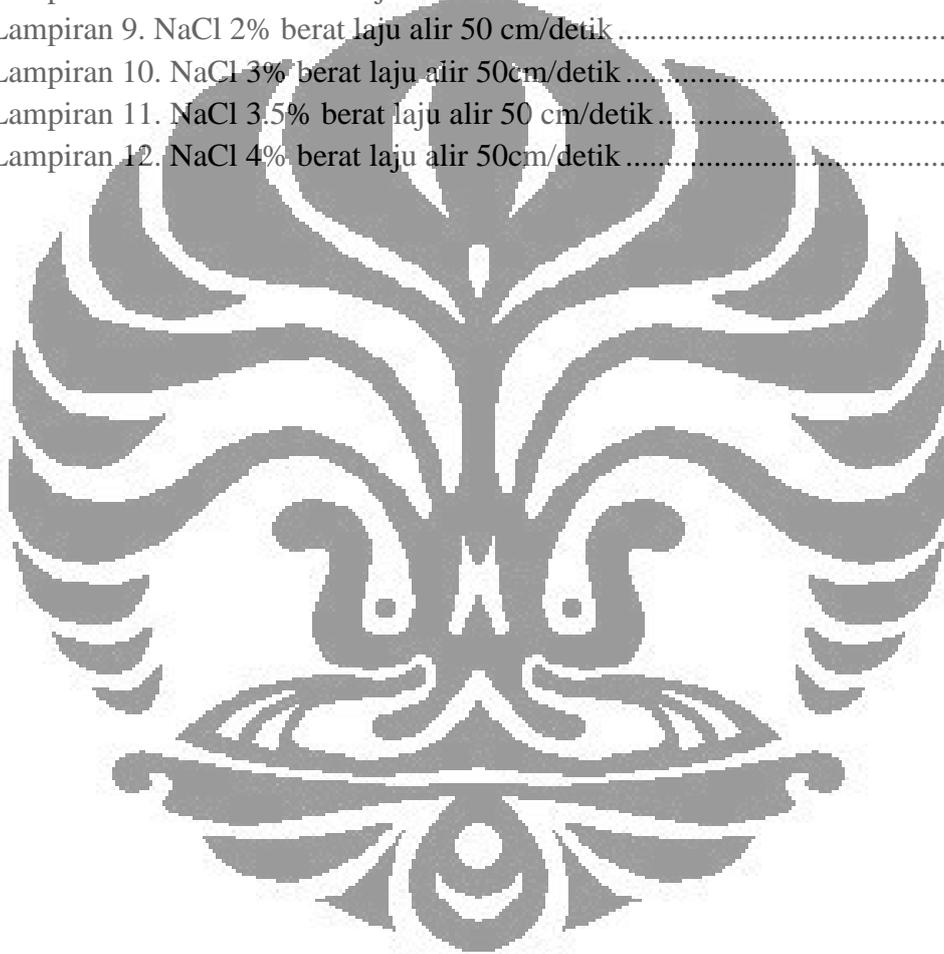
Tabel 2.1. Kelarutan oksigen dalam air laut	11
Tabel 4.1. Pengujian Kadar Oksigen pada larutan 0,1, 2, 3, 3.5 dan 4 % berat NaCl.....	36
Tabel 4.2. Nilai kandungan oksigen dalam larutan dengan kadar berbagi % berat NaCl literatur	37
Tabel 4.3. Resistivitas Larutan 0,1, 2, 3, 3.5 dan 4 %berat NaCl	39
Tabel 4.4. Nilai konduktivitas larutan aquadest dan 1, 2, 3, 3.5 dan 4 % berat NaCl.....	40
Tabel 4.5. Nilai konduktivitas dan resistansi larutan konsentrasi 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl	40
Tabel 4.6. Nilai pH di larutan 0, 1, 2, 3, 3.5 dan 4 % berat NaCl.....	41
Tabel 4.7. Nilai laju korosi tanpa laju alir terhadap larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl.....	43
Tabel 4.8. Nilai laju korosi dengan laju alir 50 cm/detik terhadap larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl.....	47
Tabel 4.9. Nilai laju korosi dengan laju alir 0 dan 50 cm/detik terhadap larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl.....	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Skematik sel korosi dalam suatu sistem sederhana ^[4]	4
Gambar 2.2. Pengaruh kadar ion Cl^- terhadap laju korosi ^[5]	7
Gambar 2.3. Kurva kecepatan korosi terhadap kelarutan gas pada temperatur ruang ^[9]	8
Gambar 2.4. Pengaruh temperatur terhadap kelarutan oksigen dalam air ^[10]	8
Gambar 2.5. Oksigen sebagai <i>depolarizer</i> ^[12]	9
Gambar 2.6. Pembentukan $Fe(OH)_3$ yang sukar larut ^[12]	9
Gambar 2.7. Pengaruh kelarutan oksigen terhadap laju korosi baja karbon rendah dalam air kran ^[5]	10
Gambar 2.8. Grafik <i>dynamic viscosity vs NaCl</i> ^[15]	13
Gambar 2.9. Grafik pengaruh kecepatan angular terhadap (a) potensial dan <i>current</i> dan (b) <i>current density</i> ^[14]	15
Gambar 2.10. Kurva <i>Tafel</i> praktis yang diidealkan ^[19]	18
Gambar 2.11. Kurva aplikasi <i>mixed potencial</i> dengan hubungan arus-potensial dan transport massa terkontrol pada rekasi katodik ^[17]	20
Gambar 3.1. Poros <i>stainless steel</i> 316 L	25
Gambar 3.2. Rangkaian Sel RCE (<i>rotating cylinder electrode</i>) dan Alat uji CMS 100	29
Gambar 3.3. Alat <i>dissolved oxygen-meter</i>	32
Gambar 4.1. Dissolve Oxygen Meter	36
Gambar 4.2. Kurva kadar oksigen di larutan 0,1, 2, 3, 3.5 dan 4 % berat NaCl dibandingkan dengan literatur	37
Gambar 4.3. Muatan pada permukaan air-gas dan struktur ikatan air dengan <i>ionchaotropic</i> ^[3]	38
Gambar 4.4. Pengujian Resistivity	39
Gambar 4.5. Kurva nilai konduktivitas larutan 0, 1, 2, 3, 3.5 dan 4 % berat NaCl	40
Gambar 4.6. Grafik polarisasi laju alir 0 cm/detik pada berbagai konsentrasi larutan NaCl	43
Gambar 4.7. Kurva nilai laju korosi baja UNS G10180 tanpa laju alir terhadap larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl	44
Gambar 4.8. Skema korosi <i>crevice</i> (kiri) dan <i>pitting</i> (kanan) ^[4]	46
Gambar 4.9. Kurva Polarisasi dengan larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl kecepatan 50 cm/detik	48
Gambar 4.10. Kurva nilai laju korosi dengan laju alir terhadap larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl	49
Gambar 4.11. Kurva nilai laju korosi dengan laju alir 0 dan 50 cm/detik terhadap larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl	50

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. NaCl 0% berat tanpa laju alir	56
Lampiran 2. NaCl 1% berat tanpa laju alir	58
Lampiran 3. NaCl 2% berat tanpa laju alir	60
Lampiran 4. NaCl 3% berat tanpa laju alir	62
Lampiran 5. NaCl 3.5 % berat tanpa laju alir	64
Lampiran 6. NaCl 4% berat berat tanpa laju alir	65
Lampiran 7. NaCl 0% berat laju alir 50 cm/detik	66
Lampiran 8. NaCl 1% berat laju alir 50 cm /detik	67
Lampiran 9. NaCl 2% berat laju alir 50 cm/detik	68
Lampiran 10. NaCl 3% berat laju alir 50cm/detik	69
Lampiran 11. NaCl 3.5% berat laju alir 50 cm/detik	70
Lampiran 12. NaCl 4% berat laju alir 50cm/detik	71



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Kebutuhan energi yang terus menerus untuk kehidupan manusia sangat penting, oleh karena itu banyak bidang dikembangkan untuk menunjang hal itu, dari bidang pembaharuan sumber daya hingga efisiensi dari penggunaan dari energy. Energi yang saat ini digunakan kebanyakan dari pengeboran yang ada di dalam perut bumi oleh karena itu diperlukan teknologi yang memadai agar tercapainya efisiensi dan efektivitas pengeboran minyak bumi. Dalam proses pengambilan proses 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.

Selanjutnya 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]. Korosi yang terjadi dapat berupa korosi merata (*general*) ataupun terlokalisir (sumuran, celah, erosi, dan sebagainya), tergantung dari kecepatan aliran fluida dan komposisi fluida itu sendiri.

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 sintesis (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].

Sumur-sumur produksi lepas pantai menggunakan air laut sebagai fluida injeksi, yang diproses terlebih dahulu untuk menurunkan kandungan oksigen terlarutnya hingga di bawah 40 *ppb*. Metode yang digunakan dapat secara mekanika atau kimia, namun metode kimia merupakan pilihan yang paling murah.

Metode ini menggunakan bahan kimia yang dicampurkan ke dalam fluida injeksi sehingga reaksi yang terjadi akan mengikat oksigen terlarut yang terdapat dalam fluida. Bahan kimia ini disebut sebagai *oxygen scavenger* dan yang umum digunakan antara lain hidrazin, ammonium sulfit, atau natrium sulfit.

Apabila suatu sumur injeksi terletak pada air laut kecenderungannya laju korosinya semakin meningkat hal ini dipengaruhi berbagai faktor, salah satunya adalah kadar garamnya oleh karena itu penelitian ini mempelajari pengaruh kadar NaCl pada larutan dan kecepatan alir fluida terhadap laju korosi baja UNS G 10180.

1.2 Perumusan Masalah

Laju korosi dalam larutan dipengaruhi beberapa faktor yaitu PH, Kandungan gas – gas terlarut dan kandungan unsur yang ada didalam larutan itu serta laju alir dari fluida. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pengujian simulasi laju korosi pada rentang 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl dan variabel kecepatan fluida. Untuk itu diperlukan sebuah sel RCE (*rotating cylinder electrode*) yang merupakan alat yang terdiri dari sebuah motor sebagai penggerak alat uji dalam rangka member simulasi kecepatan fluida. Motor penggerak akan dirangkai dengan poros tembaga dan disambungkan ke sampel uji, sehingga sampel uji bisa mendapatkan berbagai variabel kecepatan fluida dalam pengujian, dan pada akhirnya dapat dianalisa lebih lanjut pengaruhnya terhadap laju korosinya. Untuk mewujudkan hal itu penelitian kali ini juga akan membuat suatu alat uji simulasi *rotating cylinder electrode* tersebut demi tercapainya tujuan penelitian

1.3 Tujuan Penelitian

- a) Mempelajari pengaruh kadar 0, 1,2,3 dan 4 % NaCl dalam fluida terhadap laju korosi pada baja karbon medium G10180 dengan variasi kecepatan 0 dan 0.5 m/detik.
- b) Mempelajari mekanisme korosi yang terjadi pada baja G10180.

1.4 Ruang Lingkup

1.4.1 Material

- a) Material baja (UNS G10180).
- b) Larutan NaCl.

1.4.2 Parameter

- a) Variabel komposisi larutan tanpa penambahan dan komposisi larutan dengan kadar 1,2,3 dan 4 % NaCl.
- b) Temperatur ruang.
- c) Tekanan total sistem (1 atm).
- d) Kecepatan RPM (0, dan 50) cm/detik.

1.4.3 Tempat

- a) Preparasi alat dilakukan di Politeknik Negeri Jakarta dan Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- b) Pengujian CMS, *salinity*, konduktifitas, kadar oksigen, dan komposisi kimia dari material G10180 dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

1.4.4 Manfaat Penelitian

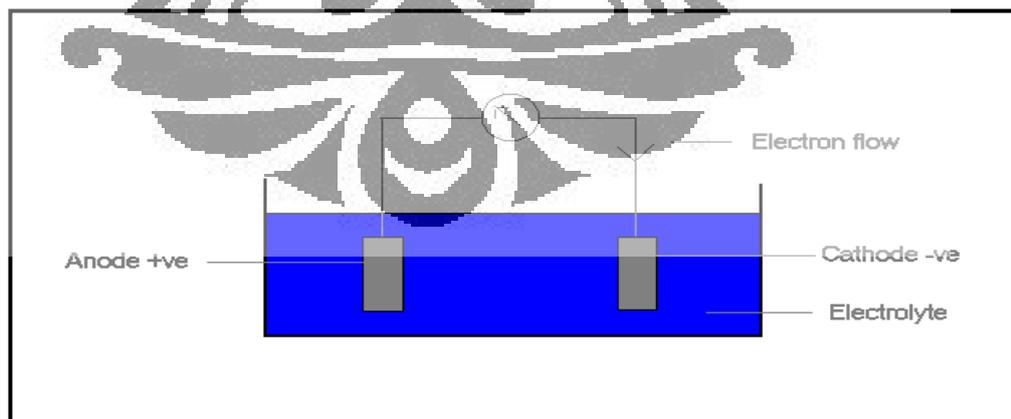
Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan tentang laju korosi pada baja UNS G10180 sehingga dapat digunakan sebagai referensi dalam pengambilan keputusan untuk meminimalkan terjadinya kegagalan akibat adanya korosi. Selain itu, penelitian ini diharapkan menjadi tambahan studi literatur bagi pihak lain yang ingin mengetahui pengaruh kadar oksigen dengan laju korosi pada pipa UNS G10180 dalam sumur injeksi di perminyakan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Korosi

Secara umum korosi merupakan proses penurunan mutu material (degradasi material) baik terhadap sifat-sifat fisik dan mekanik yang disebabkan oleh interaksi material dengan lingkungan sekitarnya. Proses korosi terjadi berdasarkan prinsip elektrokimia. Hal ini dapat dijelaskan melalui sistem lingkungan korosi yang terbentuk, yaitu aliran listrik pada permukaan tertentu logam, yang diketahui sebagai anoda dan katoda melalui suatu larutan yang dapat menghantarkan arus listrik yaitu elektrolit. Katoda terbentuk karena adanya inhomogenitas pada permukaan logam atau adanya dua macam logam yang berhubungan. Pada elektrolit terdapat ion-ion, baik itu atom-atom bermuatan positif atau negatif. Dalam suatu kesetimbangan muatan positif dan negatif memiliki jumlah yang sama. Arus listrik mengalir melalui larutan berdasarkan pergerakan dari ion-ion. Larutan alkali dan asam merupakan elektrolit yang baik karena lebih mudah terionisasi daripada air. Elektrolit merupakan faktor utama yang mendukung terjadi dan terus berlangsungnya proses korosi, yang dapat saja berupa air garam, asam, ataupun kondensasi zat yang ada di udara. Gambar skematik suatu sel korosi sederhana dapat dilihat pada Gambar 2.1.



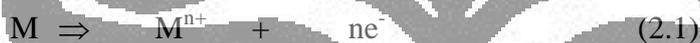
Gambar 2.1. Skematik sel korosi dalam suatu sistem sederhana^[4].

Proses korosi dimulai saat atom-atom dari anoda terurai menjadi ion sehingga hal ini menyebabkan anoda menjadi negatif dari lingkungan sekitarnya. Elektron yang dihasilkan mengalir menuju katoda melalui penghantar elektrolit, dimana pada katoda terdapat ion positif. Proses korosi akan terus berkelanjutan apabila reaksi pada anoda dan katoda terus berlangsung, dan dalam suatu elektrolit.

Secara umum reaksi kimia yang terjadi pada anoda yang mengalami reaksi oksidasi dan katoda yang mengalami reaksi reduksi adalah sebagai berikut ^[3] :

- Reaksi oksidasi (anoda) ;

Pelepasan ion-ion logam



- Reaksi reduksi (katoda) ;

Pelepasan gas hidrogen



Reduksi oksigen (larutan asam)



Reduksi oksigen (larutan netral/basa)



Reduksi ion logam



Pengendapan logam



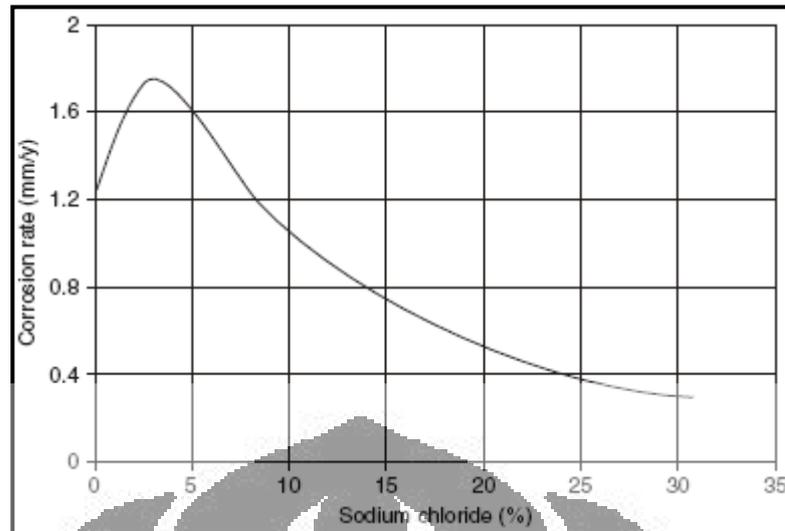
Proses korosi yang terjadi menghasilkan suatu penurunan kualitas material. Berdasarkan bentuk kerusakan yang dihasilkan, penyebab korosi, lingkungan tempat terjadinya korosi, maupun jenis material yang diserang, korosi dapat dibagi menjadi beberapa macam, diantaranya adalah korosi merata (*uniform corrosion*), korosi galvanik (*galvanic corrosion*), korosi celah (*crevice corrosion*), korosi sumuran (*pitting corrosion*), korosi batas butir (*intergranular corrosion*), korosi erosi (*erosion corrosion*), *dealloying*, *hydrogen damaged* dan *environmentally induced cracking*^[4].

2.2 Pengaruh Kadar NaCl Terhadap Laju 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^[5]. 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^[6], 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 2.2 dimana suatu percobaan membuktikan bahwa laju korosi optimum baja karbon berada pada konsentrasi NaCl sebesar 3 – 3.5% berat.



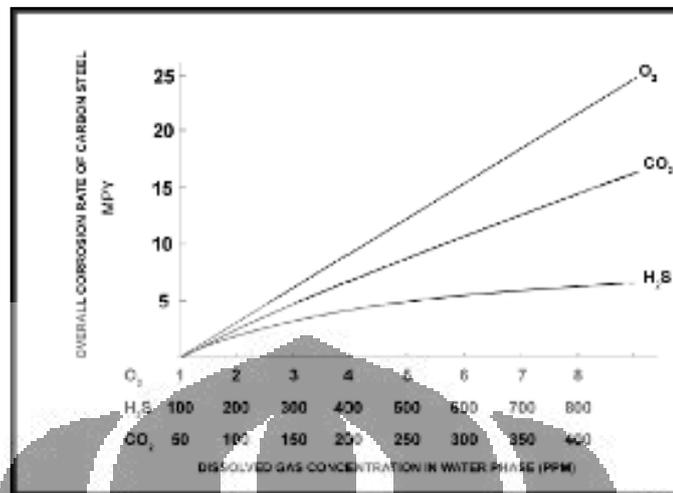
Gambar 2.2. Pengaruh kadar ion Cl^- terhadap laju korosi^[5].

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 ^[7].

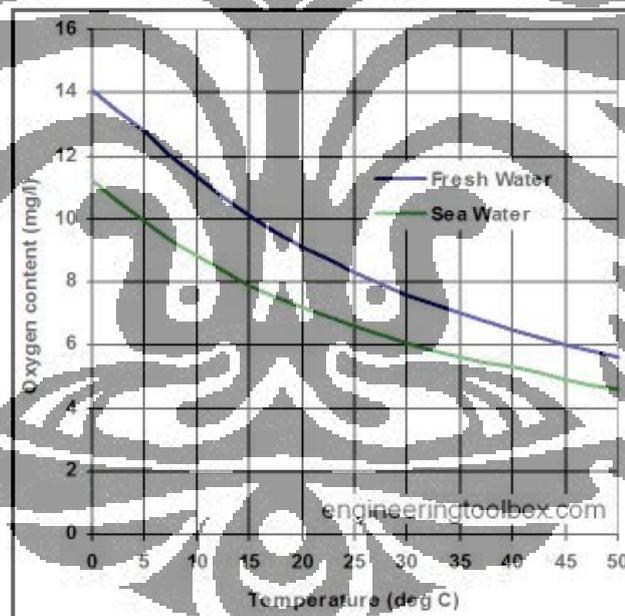
2.3 Pengaruh Kadar Oksigen Terhadap Laju Korosi

Oksigen merupakan elemen paling banyak di bumi, baik sebagai O_2 dan O_3 (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^[8].

Gambar 2.3 menunjukkan pengaruh kelarutan gas pada temperatur ruang terhadap kecepatan korosi^[9]. Pengaruh gas O_2 terhadap kecepatan korosi berbeda antara sistem tertutup dengan sistem terbuka. Pada sistem terbuka, kecepatan korosi akan semakin meningkat seiring peningkatan temperatur namun di atas 80°C akan semakin menurun karena air melepaskan gas O_2 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 CO_2 atau H_2S ^[9]. Gambar 2.4 menunjukkan pengaruh temperatur terhadap kelarutan oksigen dalam air^[10].



Gambar 2.3. Kurva kecepatan korosi terhadap kelarutan gas pada temperatur ruang^[9].

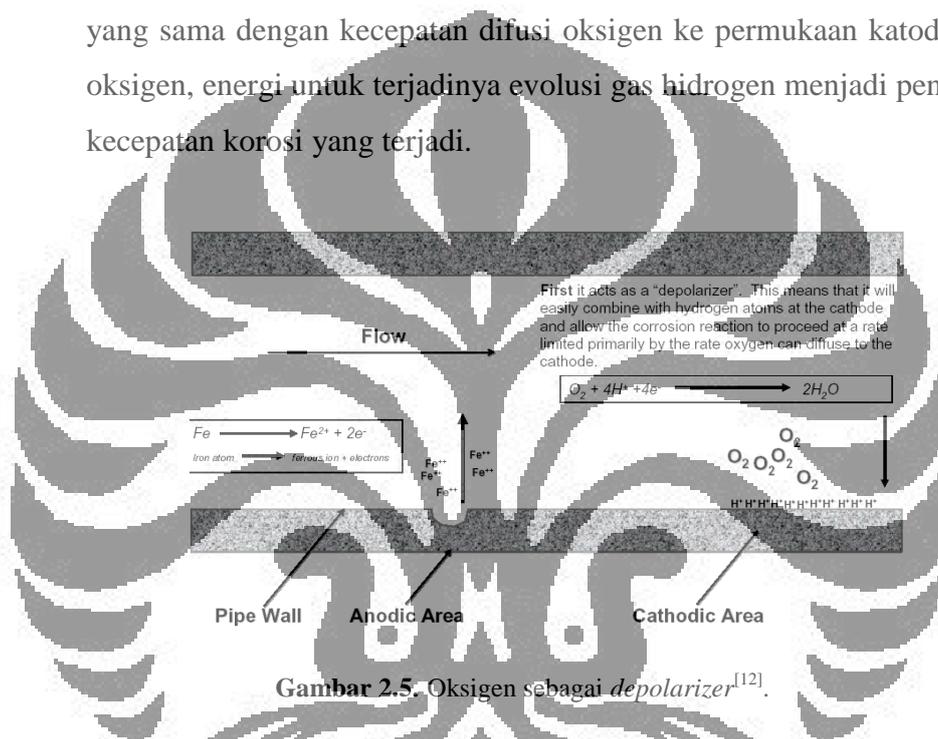


Gambar 2.4. Pengaruh temperatur terhadap kelarutan oksigen dalam air^[10].

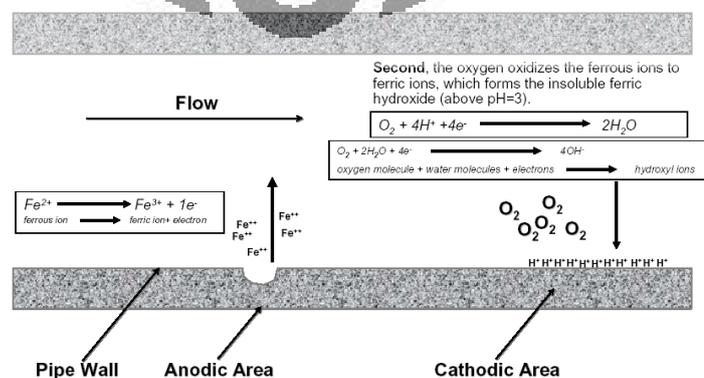
Oksigen terlarut merujuk kepada banyaknya volume oksigen yang terkandung dalam air. Oksigen masuk ke dalam air oleh proses fotosintesis biota akuatik dan difusi pada permukaan air. Banyaknya oksigen yang dapat ditampung air tergantung pada temperatur air, salinitas, dan tekanan udara^[11].

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 oksigen bertindak sebagai *depolarizer* seperti diperlihatkan Gambar 2.5. Artinya oksigen 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.



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

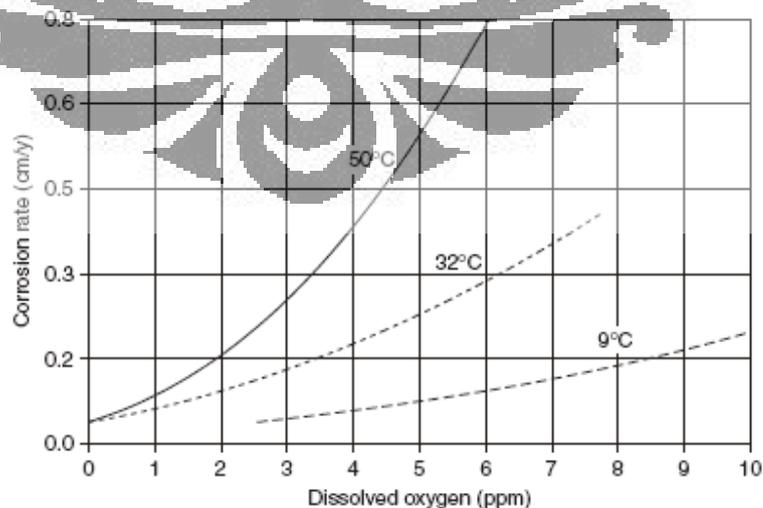


Pada suatu sistem yang memiliki perbedaan oksigen terlarut di permukaannya, proses korosi (oksidasi) akan meningkat di daerah yang memiliki kelarutan oksigen terendah. Sehingga padatan, kerak, atau produk sampingan korosi yang dapat menurunkan konsentrasi oksigen menyebabkan korosi terlokalisir. Oksigen 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 sulfid, seperti: sodium sulfid dan sodium metabisulfid, di mana dalam kuantitas cukup kecil dapat bereaksi dengan oksigen. Reaksi yang terjadi pada sodium metabisulfid dengan oksigen terlarut adalah^[16]:



Laju korosi dapat meningkat dengan kenaikan kelarutan oksigen seperti terlihat pada Gambar 2.7. Pada gambar tersebut menunjukkan peningkatan temperatur akan meningkatkan laju korosi baja karbon akibat kinetika reaksi yang lebih cepat^[5]. Terlihat jelas walaupun pada kelarutan oksigen yang sama, perbedaan temperatur menghasilkan laju korosi yang berbeda.



Gambar 2.7. Pengaruh kelarutan oksigen terhadap laju korosi baja karbon rendah dalam air kran^[5].

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 abs	<i>mm Hg</i>	760		
	<i>Psi</i>	14,7		
Temperature °C	<i>Bar</i>	1		
	<i>Pa</i>	101.1		
		<i>μMol</i>	<i>mg/l</i>	<i>ml/l</i>
0	32	349	11.2	7.8
5	41	308	9.9	7
10	50	275	8.8	6.4
15	59	248	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

2.4 Pengaruh Kecepatan Fluida Terhadap Laju Korosi

Korosi berlangsung dan dipercepat secara signifikan pada kondisi lingkungan yang ekstrem seperti temperatur tinggi, tekanan tinggi, dan aliran fluida yang turbulen. Ketika terjadi analisa terhadap korosi dengan berbagai lingkungan diatas, didapati kendala untuk simulasi aliran fluida. Permasalahan ini dapat dipecahkan dengan mengganti aliran fluida dengan putaran sampel yang mempresentasikan aliran air fluida. Alat uji simulasi yang paling umum digunakan dalam hal ini adalah *rotating cylinder electrode*. RDE sesuai untuk menganalisa korosi dengan pengaruh kecepatan alir fluida pada kecepatan rendah dan juga turbulen^[14].

Pada kecepatan putaran yang amat rendah, larutan dekat dengan aliran RCE akan mengalir dengan lembut dan atau laminar. Semakin tinggi kecepatan

putaran yang digunakan, aliran fluida semakin kompleks. Saat layer dari larutan pada keadaan kontak langsung dengan silinder yang terus menerus menempel ke permukaan, *shear stress* antara layer dalam dan layer lain dari silinder mulai berputar dalam pusaran. Pada keadaan ini, aliran fluida merupakan aliran transisi dari aliran laminar ke turbulen. Ketika kecepatan putaran ditambahkan lagi, maka pusaran yang ada akan menghasilkan pusaran lebih lanjut.

Transisi dari laminar ke turbulen ini umumnya dikarakterisasi menggunakan perhitungan *Reynold's number* untuk mengetahui rasio antara gaya inersia dan gaya viscos pada larutan.

Untuk RCE dengan diameter luar (cm), maka perhitungannya^[14]

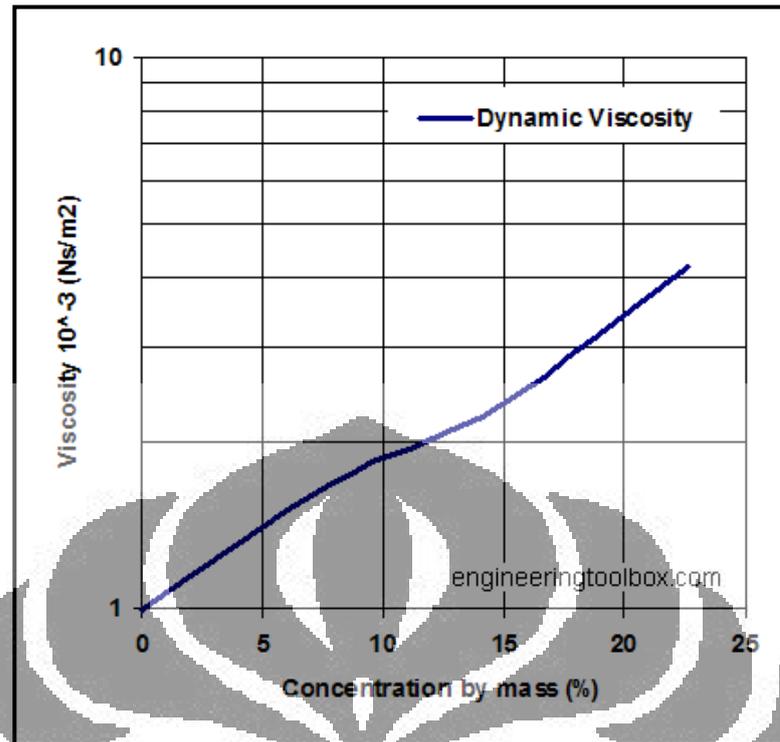
$$RE = U_{cyl} d_{cyl} \rho / \mu \quad (2.9)$$

dimana ρ adalah berat jenis larutan (g cm^{-3}) dan μ adalah viscositas absolut (dinamik, $\text{g cm}^{-1} \text{ detik}^{-1}$). Kecepatan linear (cm detik^{-1}) pada permukaan luar silinder dapat dihitung dengan persamaan

$$U_{cyl} = \omega r_{cyl} = \pi d_{cyl} F / 60 \quad (2.10)$$

dimana laju dapat diekspresikan dengan ω (rad detik^{-1}), atau dengan F (RPM).

Umumnya, untuk RCE, ketika *Reynold's number* lebih besar dari 200, maka kecepatan menjadi turbulen. Gambar 2.8 menunjukkan nilai absolute viscosity NaCl adalah $1.3 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$.



Gambar 2.8. Grafik *dynamic viscosity* vs NaCl^[15].

2.4.1 Transport Massa

Aliran Turbulen RCE dapat membawa material dari larutan menuju permukaan silinder, dan juga dari permukaan silinder ke larutan. Dalam ruang lingkup ilmu korosi, laju dari transport massa ini menentukan laju korosi. Contoh dari prinsip ini adalah proses korosi dimana seberapa cepat oksigen dapat ditransfer dari larutan ke permukaan logam.

Untuk koefisien transfer massa ini dapat digunakan persamaan yang dirumuskan Eisenberg KM (cm s^{-1}) untuk RCE;

$$\begin{aligned}
 KM &= (D / dcyl) SH & (2.11) \\
 &= (D / dcyl) (0.0791 RE^{0.7} SC^{0.356})
 \end{aligned}$$

dimana D ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$), adalah koefisien difusi untuk molekul atau ion yang berlangsung pada transport massa, dan SH dan RE merupakan *Sherwood* dan *Reynold's number*. Adapun SC adalah *Schmidt number* yang didapat dari ;

$$SC = \mu / (\rho D), \quad (2.12)$$

Dengan mengkombinasikan secara substitusi dan eliminasi persamaan 2.11 dan persamaan 2.12, maka didapatkan perumusan koefisien transfer massa sebagai berikut ;

$$\begin{aligned} KM &= 0.0791 d_{cyl}^{-0.3} (\mu / \rho)^{-0.344} D^{+0.644} U_{cyl}^{+0.7} \quad (2.13) \\ &= 0.0487 d_{cyl}^{+0.4} (\mu / \rho)^{-0.344} D^{+0.644} \omega^{+0.7} \\ &= 0.0051 d_{cyl}^{+0.4} (\mu / \rho)^{-0.344} D^{+0.644} F^{+0.7} \end{aligned}$$

Baik persamaan 2.11, 2.12 dan 2.13 dapat digunakan sesuai dengan pemilihan satuan yang diinginkan.

Aliran turbulen RCE menyebabkan dinding *shear stress* pada permukaan silinder. Berdasarkan pengamatan *Eisenberg*, dapat dihitung persamaan *wall stress* τ_{cyl} ($\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-2}$);

$$\tau_{cyl} = 0.0791 \rho Re^{-0.3} U_{cyl}^2 \quad (2.14)$$

2.4.2 Pengukuran Elektrokimia

Ketika *rotating cylinder* digunakan sebagai *working electrode* pada konfigurasi 3 sel elektroda konvensional, sifat korosi dapat ditinjau dengan mengukur arus elektrik pada silinder. Koneksi elektrik kepada logam silinder dapat tercapai asalkan ada sentuhan ringan dengan poros RCE. Untuk pengukuran dibutuhkan minimal dua elektroda lagi yakni elektroda referensi dan *counter* elektroda. Umumnya transport massa membatasi *limited current density* j_{LIM} (A cm^{-2}), dianalisis pada pengujian elektrokimia berkorelasi sebanding dengan persamaan^[14];

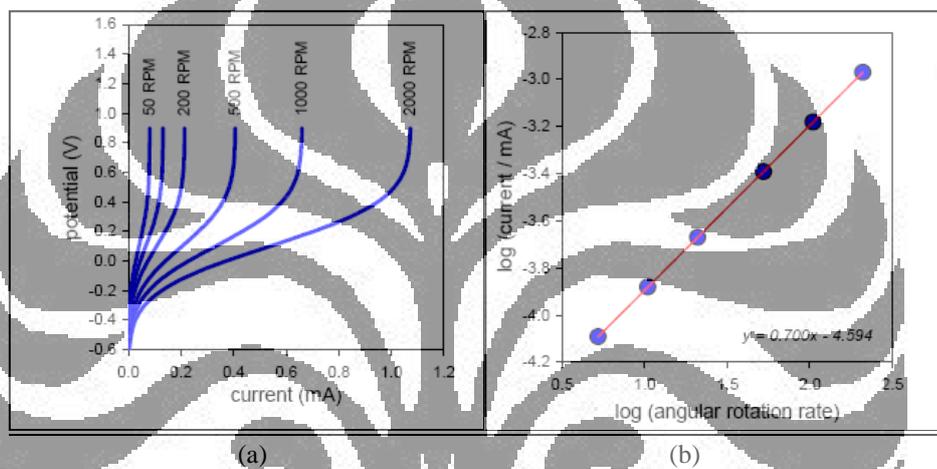
$$j_{LIM} = i_{LIM} / A = z F C K M \quad (2.15)$$

dimana F adalah konstanta *Faraday* (96484.6 C / mol), i_{LIM} (A) adalah *limiting current*, dan A (cm^2) adalah luas area elektroda. Untuk penggunaan persamaan ini kita harus mengetahui jumlah electron yang ditukar, z , dan konsentrasi ruah larutan, C . Dengan mengkombinasikan persamaan diatas, maka dapatkan ;

$$j_{LIM} = 0.0791 z F C d c_{yl}^{-0.3} (\mu/\rho)^{-0.344} D^{0.644} U c_{yl}^{0.7} \quad (2.16)$$

$$= 0.0487 z F C d c_{yl}^{+0.4} (\mu/\rho)^{-0.344} D^{0.644} \omega^{0.7}$$

Karenanya, apabila proses korosi dibatasi dengan transport massa, diharapkan *limiting current density* akan bervariasi secara linear dengan peningkatan kecepatan putaran ($\omega^{0.7}$). Sebagai tambahan, sebenarnya analisis ini dapat diprediksi tanpa mengetahui z dan C asalkan tersedia data pengukuran pada beberapa perbedaan kecepatan putaran. Contoh dari hipotesa ini dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Grafik pengaruh kecepatan angular terhadap (a) potensial dan *current* dan (b) *current density*^[14]

Gambar 2.9 menunjukkan percobaan *linear polarization resistant* pada interval kecepatan putaran tertentu. Dengan penambahan kecepatan putaran begitu juga dengan arus yang didapat. Log/log plot dari *limiting current* atau *limiting current density* vs kecepatan putaran tetap akan terungkap tanpa mempertimbangkan apakah arus yang diobservasi terbatas oleh transport massa. Apabila garis kemiringan pada plot ini mendekati 0.7, maka dapat menjadi bukti yang bisa diajukan sebagai dasar bahwa proses korosi dibatasi oleh transport massa.

Pengaruh kecepatan alir air sangat mempengaruhi pembentukan kerak siderite (FeCO_3) pada permukaan baja karbon, jika pada sistem tersebut mengandung konsentrasi ion CO_3^{2-} yang cukup. Hara dan Asahi menunjukkan bahwa kecepatan kritis aliran air untuk baja karbon pada lingkungan CO_2 berada

di antara 4 – 5 m/detik^[3], sehingga pada kecepatan alir di atas itu kerak tidak dapat mengendap pada permukaan baja karbon.

Kecepatan aliran air dapat menyebabkan korosi erosi jika melewati kecepatan kritisnya. Nominal batas kecepatan kritis dapat dihitung berdasarkan persamaan dalam standar API RP-14E (Persamaan 2.17) atau persamaan *Craig* (Persamaan 2.18) ^[16].

$$V_c = \frac{C}{\sqrt{\rho}} \quad (2.17)$$

$$V_c = \frac{C}{\rho^{3/4}} \quad (2.18)$$

dengan: V_c = kecepatan kritis (ft/s)

ρ = berat jenis fluida (lb/ft³)

C = konstanta lingkungan

2.5 Pengukuran Laju korosi dengan Metoda Polarisasi dengan bantuan analisa *Tafel*.

2.5.1 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 bernukleasi 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 :

$$\eta_a = \beta_a \log \frac{i_a}{i_0} \quad (2.21)$$

untuk polarisasi anodik, dan polarisasi katodiknya adalah :

$$\eta_c = \beta_c \log \frac{i_c}{i_0} \quad (2.22)$$

dengan i_0 adalah *exchange current density*, β_a dan β_c sebagai tetapan anoda dan katoda *Tafel*. Persamaan 2.12 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].

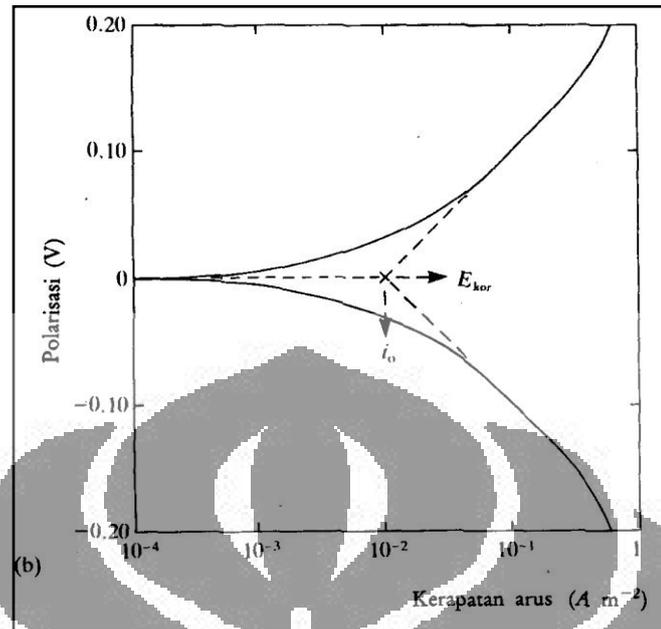
Pada Gambar 2.3 kecepatan korosi material dapat dikalkulasi dalam bentuk *mpy* (mils per year; 1 mil = 0,001 inci = 0,0254 mm), dengan rumusan sebagai berikut^[4]:

$$\text{mpy} = 0,129 \frac{i_{\text{cor}} M}{D} \quad (2.23)$$

di mana : D = berat jenis (g/cm^3)

i_{cor} = rapat arus korosi ($\mu\text{A/cm}^2$)

M = berat ekuivalen (g/mol.equ)



Gambar 2.10. Kurva *Tafel* praktis yang diidealkan^[19].

Gambar 2.10 menunjukkan grafik *Tafel* praktis yang diidealkan. Polarisasi konsentrasi terjadi akibat ketergantungan reaksi terhadap koefisien difusi ion terlarut (D_z) 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^[20]:

$$i_L = \frac{D_z n F C_B}{\delta} \quad (2.24)$$

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 2.25.

$$\eta_k = 2,3 \frac{RT}{nF} \log \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (2.25)$$

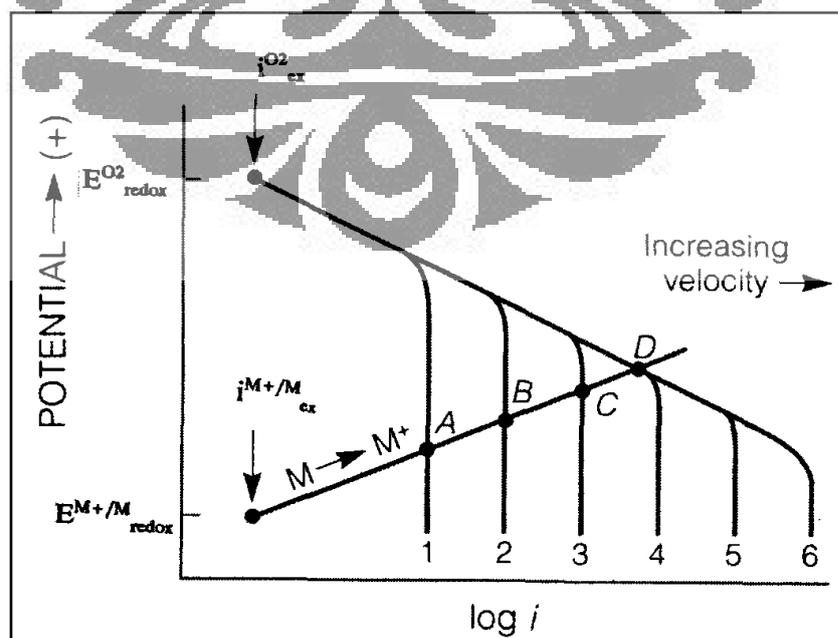
di mana : R : konstanta gas (8,314 J/mol.K)

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]. Adapun secara lebih lanjut dan khusus, i_L pada alat uji *rotating cylinder electrode* adalah sebagai berikut;

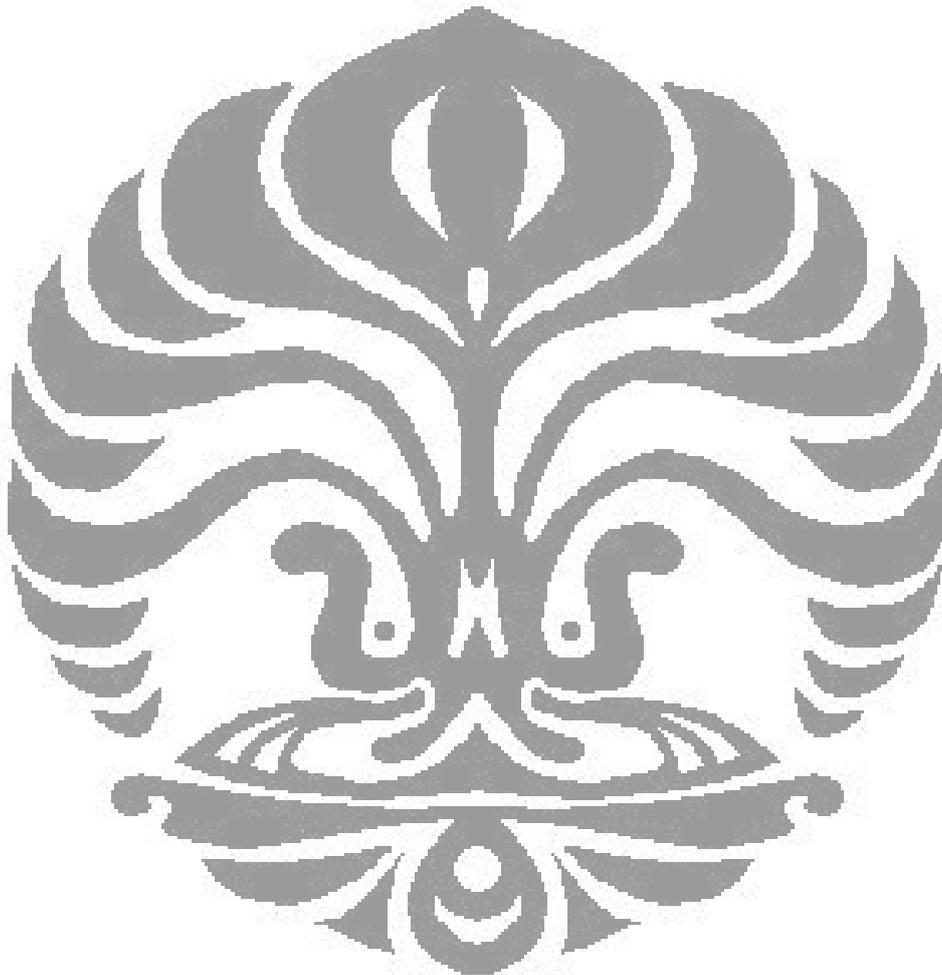
$$i_L = 0.079 n F C_b D^{0.64} v^{-0.34} \Omega^{0.7} r^{0.4} \quad (2.26)$$

Dimana D adalah koefisien difusi untuk pereaksi (cm^2/detik), v adalah *viskositas kinematic* larutan (cm^2/detik), dan r adalah jari-jari silinder (cm) serta Ω adalah kecepatan putaran (rad/detik).



Gambar 2.11. Kurva aplikasi *mixed potencial* dengan hubungan arus-potensial dan transport massa terkontrol pada rekasi katodik^[17].

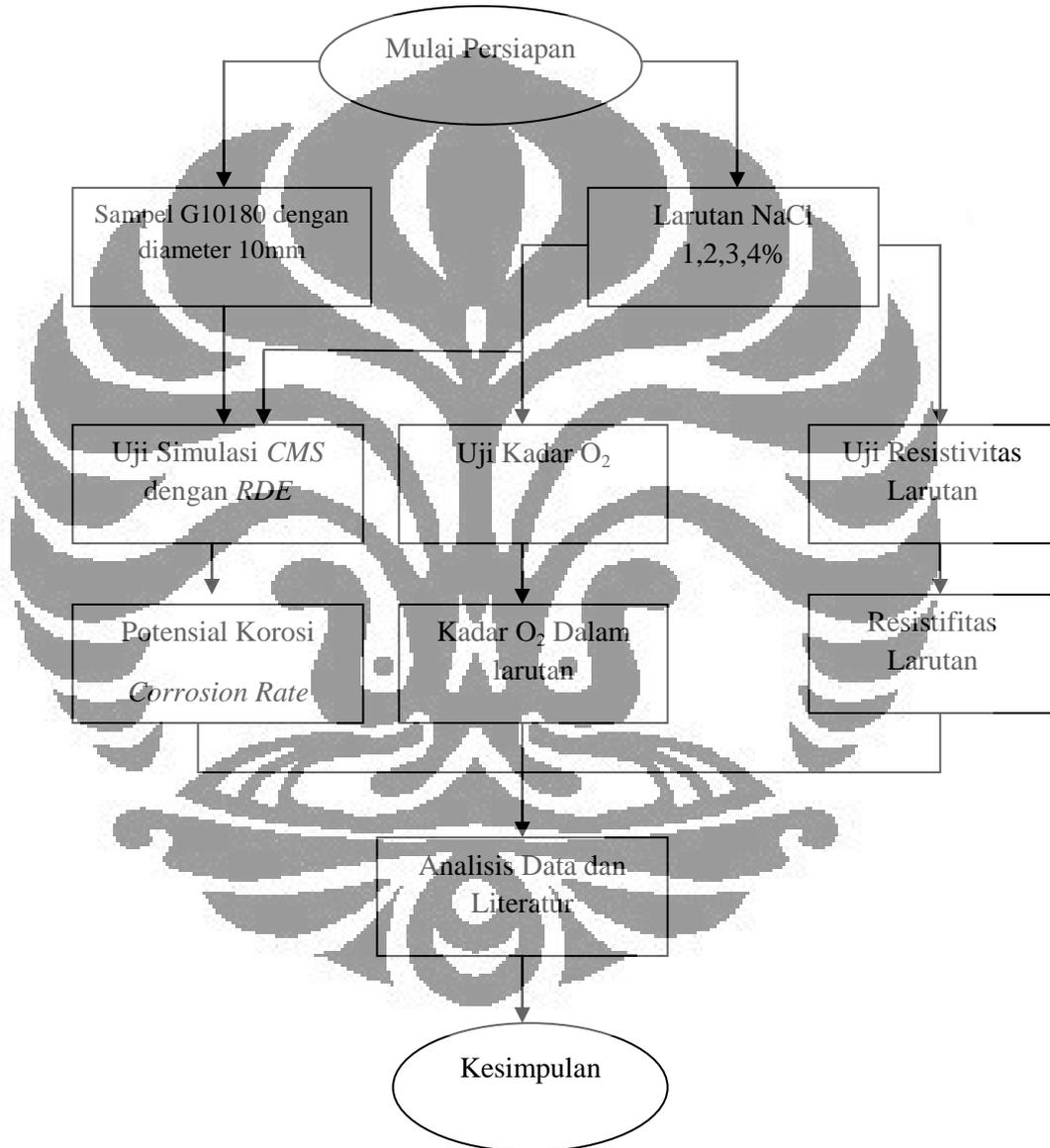
Dapat dilihat dari Gambar 2.11 bahwa dengan peningkatan kecepatan dari satu sampai 4, laju korosi meningkat dari A sampai D. secara umum digunakan alat uji simulasi *rotating cylinder electrode* untuk mensimulasikan aliran turbulen pada sistem perpipaan, karena pola aliran sangat mudah tercapai, berbeda dengan *rotating disc electrode* yang masih dapat memiliki bentuk pola alir laminar walau pada kecepatan putaran yang tinggi.



BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Flowchart proses penelitian

3.2 Bahan dan Peralatan

3.2.1 Bahan

- a) Sampel Ø 10 mm UNS G10180
- b) Kabel Ø1.5-mm
- c) Pipa PVC (Ø 2" dan ½")
- d) Resin, pasta silikon (*sealant*), dan lem PVC
- e) Aquades, NaCl, MgCl₂, CaCl₂, KCl, NaHCO₃, KBr, Na₂SO₄, HCl, NaOH, alkohol 90%, dan surfaktan,
- f) Larutan uji

Larutan elektrolit yang akan digunakan berupa larutan air laut sintesis sesuai dengan standar ASTM D1141. Pembersih sampel terdiri dari dua jenis larutan, yaitu: larutan *pickling* dengan mencampurkan 15 ml HCl dan 3 ml Surfaktan ke dalam 982 ml aquades, serta larutan *degreasing* 0,1M NaOH.

3.2.2 Peralatan

Tabel 3.1 Peralatan pembuatan sel RCE (*rotating cylinder electrode*)

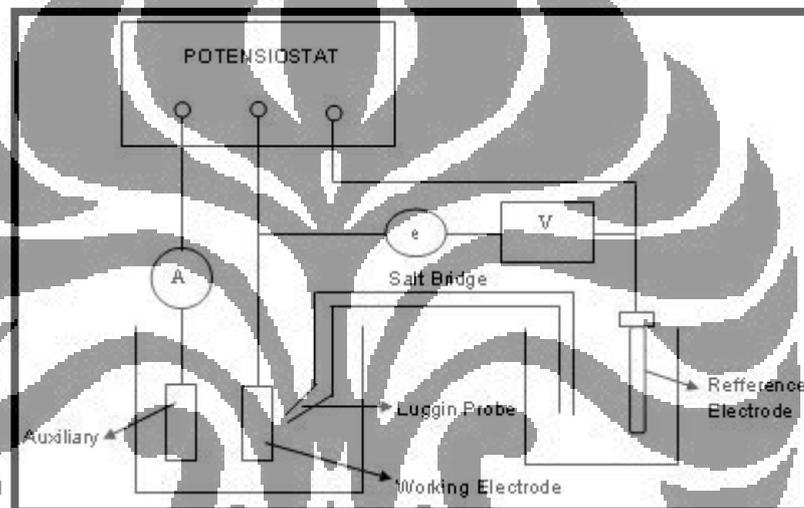
Nomor	Nama Alat	Jumlah (satuan)	Keterangan
1	Motor AC 220v	1	beli
2	SS 304 diameter 1,2cm x 30cm	1	beli
3	Seal o-ring 1 cm	2	beli
4	Seal o-ring 12 cm	2	beli
5	Aquarium acrylic tebal 1cm (25cm x 20cm)	2	beli
6	Teflon diameter 2,5cm 15 cm pnjang	1	beli
7	Carbon penghubung 1cm 2 buah	2	beli
8	Termometer	1	ada
9	DO-meter	1	ada
10	pH-meter	1	beli
11	Elektroda standar Ag/AgCl	1	ada
12	Tahometer	1	beli
13	Baut plastik 3mm 4 buah	4	beli
14	Timbangan digital	1	ada
15	Regulator Matsunaga max 250 V	1	ada

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Persiapan Alat

3.3.1.1 CMS 100

Perangkat lunak CMS (*Corrosion Measurement Sistem*) versi 100 yang terangkai bersama 1 set computer dengan rangkaian seperti terlihat pada Gambar 3.2.

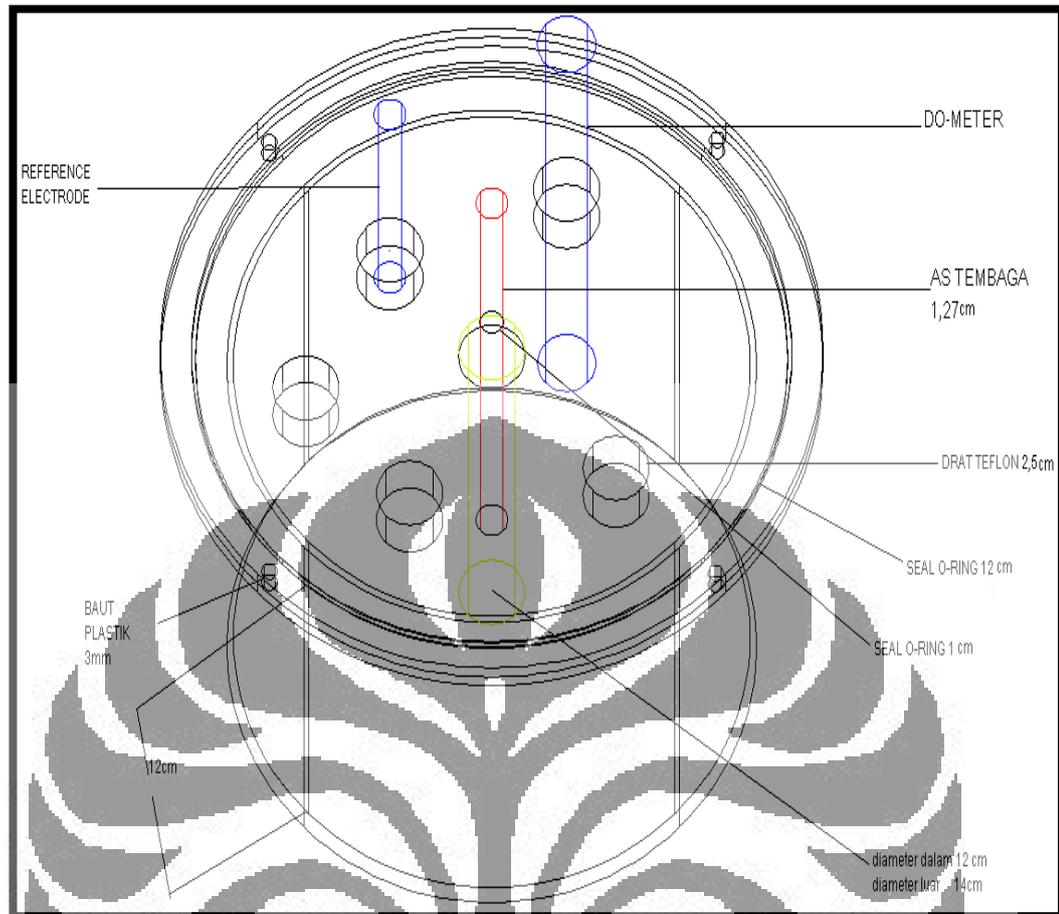


Gambar 3.2. Skema pengujian polarisasi.

Alat CMS ini berfungsi mengukur laju korosi dari material uji dengan menyambungkan kabel – kabel yang ada pada computer ke sel RCE (*rotating cylinder electrode*).

3.3.1.2 Sel Rotating Cylinder Electrode

Alat uji yang perlu dipersiapkan adalah tabung sel *Rotating Cylinder Electrode*. Sel tabung tertutup dengan ukuran diameter 10-cm tinggi 12,5-cm dan tebal 5-mm terbuat dari *acrylic*



Gambar 3.3. Sel RCE (*rotating cylinder electrode*).



Gambar 3.4. Tabung Sel RCE (*rotating cylinder electrode*).

Gambar 3.3. merupakan sel RCE (*rotating cylinder electrode*) yang digunakan dalam penggunaan analisa Tafel. Sedangkan Gambar 3.4

memperlihatkan tabung sel RCE. Adapun langkah persiapan alat uji diawali dengan pemasangan alat pengujian yang diperlukan kedalam tabung uji simulasi *rotating cylinder electrode*.

Gambar 3.5 memperlihatkan dinamo putar *singer*. Sebagai alat penggerak diperlukan sebuah dinamo AC dengan daya kecepatan hingga 6000 *rpm* dan tegangan maksimal di 220 V. Sehingga pengukuran laju alir fluida dapat ditentukan melalui kecepatan putaran yang diberikan oleh mesin dinamo.



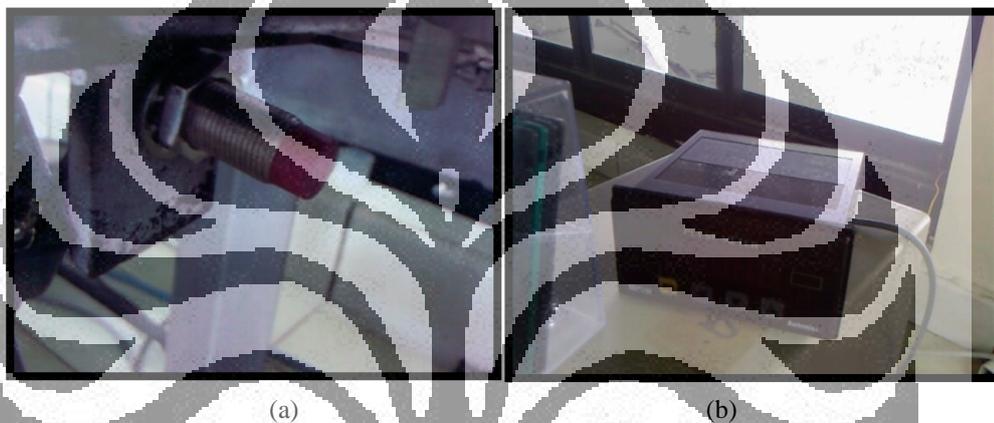
Gambar 3.5. Dinamo putar *singer*.

Selanjutnya penggunaan poros *stainless steel 316* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6. Sebagai poros yang berukuran diameter 1 cm dengan panjang 10 cm. Hal ini dikarenakan SS 316 L merupakan material yang tahan korosi dan geometri dibuat kecil agar torsi yang di tanggung terhadap dinamo semakin kecil. Poros ini berfungsi penerus gaya kecepatan putaran yang diberikan oleh dinamo kepada sampel uji sehingga pada akhirnya sampel uji akan berputar dengan kecepatan tertentu.



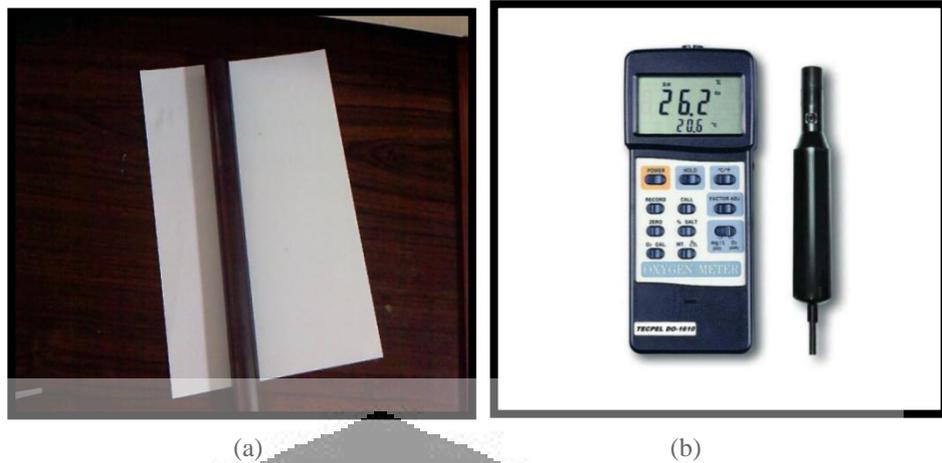
Gambar 3.1. Poros *stainless steel 316 L*.

Proximity merupakan sensor pengukuran *rpm* pada putaran suatu mesin. Dengan meletakkan alat ini pada material yang berputar dengan jarak ± 1 cm sehingga sensor mengirimkan putaran ke dalam tachometer. Tachometer merupakan alat yang berfungsi menghitung putaran dalam mesin sel *RCE* (*rotating cylinder electrode*). Dalam hal ini *proximity* yang mengirimkan data ke tachometer diubah ke dalam satuan *rpm* dan ditunjukkan pada tampilan dari alat tachometer. Sehingga memberikan data kecepatan secara aktual alat uji yang sedang berlangsung. Gambar 3.7 menunjukkan morfologi *proximity* dan tachometer digital.



Gambar 3.7. Alat pengukur kecepatan angular (a) Proximity dan (b) Tachometer Digital

Alat DO-meter yang ditunjukkan pada Gambar 3.8 berfungsi mengukur kandungan oksigen dalam larutan uji selama pengujian. Hal ini dimaksudkan agar tidak ada oksigen dari luar yang masuk dari luar sehingga merubah kandungan oksigen terlarut dalam larutan uji. Selanjutnya pemasangan *standard calomel electrode* yang merupakan elektroda referensi yang berfungsi sebagai standard dan pembanding dalam menentukan potensial sampel logam uji UNS G10180 pada saat penggunaan alat CMS. Kemudian ada batang carbon, bertindak sebagai anoda dan *counter electrode* dalam pengujian polarisasi.



Gambar 3.8. (a) Carbon grafit dan (b) DO meter

Gambar 3.9 menunjukkan Trafo Matsunaga yaitu alat yang berfungsi mengatur tegangan yang diberikan untuk motor dinamo. Dengan tujuan memudahkan pengontrolan kecepatan alir, serta menghindari terjadinya lonjakan nilai kecepatan karena kealpaan dinamo, sehingga kecepatan yang berlangsung stabil.



Gambar 3.9. Trafo Matsunaga

Flexible coupling merupakan alat penghubung antara as stainless steel dengan dinamo. Penggunaan *flexible coupling* ini ditunjukkan untuk meminimalisir pemebebanan torsi pada dinamo sehingga dinamo dapat memutar poros *stainless steel* lebih leluasa dan memperbaiki arah dan kondisi dinamo dengan poros tidak

lurus, sehingga kecepatan fluida tidak tersendat dan menjadi lebih stabil karena adanya toleransi kemiringan *flexible* yang diberikan oleh Gambar 3.10 memperlihatkan morfologi *flexible coupling*.



Gambar 3.10. Flexible Coupling

Alternator seperti ditunjukkan Gambar 3.11, berupa batangan karbon yang dikoneksikan dengan poros *stainless steel*, berfungsi sebagai perpanjangan tangan sampel kepada sebuah kabel yang nantinya berfungsi untuk disambungkan dengan kabel *working electrode* dari hardware *corrosion measurement system-100*.



Gambar 3.11. Alternator

Baut penutup berfungsi untuk menghubungkan tutup wadah dengan wadah *acrylic*, selanjutnya agar suasana dalam sel menjadi kedap digunakan penutup karet, dan tutup wadah ini berbahan dasar PVC dengan beberapa lubang, dimana masing-masing lubang sebagai celah masuknya alat.



Gambar 3.12. Leher angsa

Leher angsa seperti yang diperlihatkan Gambar 3.12 merupakan kaca yang dibentuk sebagai penghubung antara elektroda standar dengan larutan pengujian, dibuat bengkok dengan tujuan untuk mendekatkan antara elektroda standar dengan material uji. Sehingga pembacaan potensial dan arus semakin jelas dan sebaiknya jarak leher angsa dengan material uji kurang dari 10 mm.

3.3.1.3 Rangkaian CMS dan Sel RCE (*Rotating Cylinder Electrode*)



Gambar 3.2. Rangkaian Sel RCE (*rotating cylinder electrode*) dan Alat uji CMS 100

Gambar 3.13 menunjukkan rangkaian sel RCE dan alat uji CMS 100. Perangkaian *hardware* CMS 100 menyambungkan WE dan WS dengan kabel alternator, kabel CE dengan karbon, REF dengan SCE, bertujuan untuk

menyambungkan alat uji dengan software CMS 100 pada computer dalam ke RCE (*rotating cylinder electrode*) pada pelaksanaan pengujian polarisasi. selanjutnya semua celah pada atap kontainer ditutup dengan pasta silikon. Setelah memastikan kontainer pengujian tertutup rapat, dilakukan pengkondisian selama 15 menit, lalu penyesuaian konsentrasi oksigen dilakukan dengan pengaturan kecepatan 0 rpm, dengan larutan uji 0 % berat NaCl lalu dijalankan pengujian polarisasi sampai didapatkan data dari alat CMS 100, selanjutnya berulang untuk kecepatan 1000 rpm dan larutan uji 1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl .

3.3.2 Preparasi Sampel

Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah sampel yang berbentuk Cylinder yang diambil dari pipa UNS G10180 dengan diameter 6 inch. Untuk menghindari adanya perbedaan kecepatan ditengah sampel, sampel ini memiliki diameter 1cm dan tinggi 8 mm dan luas area yang dipakai adalah luas permukaan tabung tanpa tutup sehingga luas material uji sebesar 2.512 mm². adapun preparasi sampel yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Pipa dipotong dengan menggunakan *cutting welding* hingga berukuran 5 cm x 5 cm kemudian untuk mencegah material ini mengalami perubahan fasa maka pemotongan 1 x 1 cm menggunakan gergaji.
2. Selanjutnya material dibubut hingga membentuk *cylinder* dengan diameter 1 cm, tinggi 0,8
3. Kemudian dilakukan *annealing* sebesar 200° C selama 10 menit agar material ini tidak memiliki perbedaan fasa dan kekerasan dengan material yang sesungguhnya.
4. Selanjutnya sampel *cylinder* diampas dengan ampas dengan Grid 100 dan 500 hingga lapisan oksida hilang.
5. Sampel kemudian disambungkan dengan ulir penyambung ke batang *stainless steel*.



Gambar 3.14. Bentuk sampel yang telah dipreparasi

3.3.3 Pembuatan Larutan Uji

Pada percobaan kali ini, larutan uji yang digunakan adalah larutan aquades dan larutan kadar 1, 2, 3, 3.5 dan 4 wt % NaCl. Cara pembuatan larutan uji ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat larutan % berat NaCl dengan jumlah 3000ml dengan melakukan penimbangan serbuk garam NaCl menggunakan timbangan digital sebanyak 120 gram.
2. Kemudian *aquades* dimasukan wadah yang telah diukur sebanyak 3000ml yang telah dicampurkan dengan 120 gram NaCl
3. Setelah itu untuk mendapatkan larutan 1, 2, 3, dan 3.5 % berat NaCl dengan cara mengambil larutan yang telah dibuat dan langsung dilakukan pengenceran masing – masing sebanyak 1000ml.
4. Larutan tadi kemudian di taruh diatas *magnetic stirrer* untuk mendapatkan larutan yang homogen dan seluruh garam larut

3.3.4 Pengujian

3.3.4.1 Pengujian Larutan

Pengujian Kadar O₂

Pengujian kelarutan oksigen dilakukan dengan mencelupkan *probe dissolved oxygen-meter* pada larutan yang akan diuji, kemudian hasil pengukuran akan langsung didapatkan oleh alat. Gambar 3.15 memperlihatkan alat *dissolved oxygen-meter*.



Gambar 3.3. Alat *dissolved oxygen-meter*.

Pengujian Resistivitas dan Konduktivitas Larutan

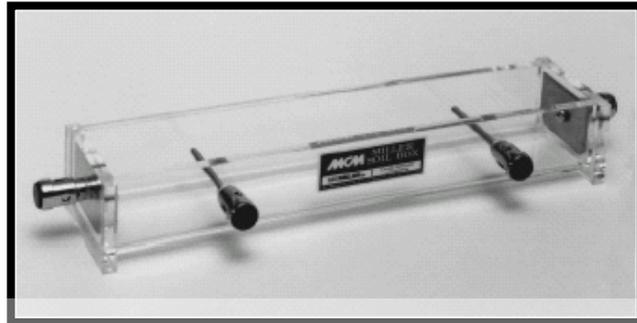
Pengujian konduktivitas larutan dengan melakukan pengujian resistivitas larutan di mana nilai konduktivitas berbanding terbalik dengan resistivitasnya sebagai persamaan berikut:

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

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

R = resistivitas listrik (ohm/cm)

Kemudian larutan uji yang telah dibuat diambil sebanyak ± 400 ml untuk dimuat pada kotak uji seperti pada Gambar 3.16. untuk selanjutnya diketahui konduktivitas larutan uji. Pengukuran Resistivitas larutan dilakukan dengan menggunakan alat bantu uji pengukuran AEMC *Resistance Tester*. Pengujian dilakukan berulang pada konsentrasi 1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl. Rangkaian pengujian diperlihatkan pada Gambar 3.17.



Gambar 3.16. Soil Resistivity Box^[18].



Gambar 3.17. Resistance Meter.

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

$$R = \frac{\rho \times L}{W \times D} \quad (3.2)$$

di mana W, L, dan D merupakan dimensi-dimensi pada *soil test box* (Gambar 3.3) dalam satuan cm, dan ρ adalah nilai resistivitas.

Pengujian Nilai pH



Gambar 3.18. PH Meter

Pengujian nilai PH dilakukan dengan menggunakan PH meter seperti yang ditunjukkan Gambar 3.18. Caranya adalah setelah larutan dibuat pada masing variabel PH meter dicelupkan hingga mendapatkan angka yang stabil.

3.3.4.2 Pengujian Laju Korosi CMS (*Corrosion Measurement Sistem*)

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 2.1.

Langkah – langkah yang dilakukan dalam pengujian *Tafel* :

1. Menyiapkan larutan –larutan aquades dan larutan 1, 2, 3, 3.5, dan 4 % NaCl berat 1000 ml tiap – tiap kadar nya.
2. Pemasangan sampel pada *specimen holder* pada sel RCE (*rotating cylinder electrode*).

3. Sel RCE (*rotating cylinder electrode*) disusun sesuai dengan standar pemasangan polarisasi yaitu : *specimen holder*, *electrode standar*, *auxiliary electrode* dan *working electrode* pada instrumen pengukur polarisasi.
4. Larutan *aquades* dimasukkan ke dalam sel RCE sampai seluruh permukaan sampel tercelup.
5. Menyiapkan komputer dengan program CMS – 100 (*corrosion measurement sistem*) dan dipilih folder eksperimen dengan program *tafel*.
6. Memasukkan data-data pengujian pada instrumen (*setting*), dengan jangkauan potensial (-)300 – (+)300 mV terhadap *open potential* (*Eoc*).
7. Setelah selesai, program *scanning* dapat dijalankan dan disimpan untuk kemudian dilakukan perhitungan laju korosi oleh program.
8. Kurva I-V hasil *scanning* kemudian diolah dengan program *Tafel Analysis* untuk mendapatkan laju korosinya.
9. Mengulangi langkah-langkah diatas untuk larutan NaCl 1, 2, 3, 3.5 dan 4 % berat NaCl .

3.3.4.3 Metode Analisis Data Pengujian

Dari data hasil pengujian karakterisasi larutan seperti kandungan oksigen terlarut dalam larutan uji dan konduktifitas larutan serta besarnya PH larutan akan disajikan dalam tabel hubungan konsentrasi 1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl, 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 grafik terpadu dari setiap pengujian pada konsentrasi 1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl tersebut, 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.

BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Larutan

4.1.1 Pengujian Kadar O₂

Tujuan dari pengujian ini untuk mengetahui kadar oksigen dalam larutan uji dan membandingkan dengan literatur. Untuk setiap larutan dilakukan pengujian 3 kali. Tabel 4.1. memperlihatkan data kadar oksigen larutan uji yang digunakan.

Tabel 4.1. Pengujian Kadar Oksigen pada larutan 0,1, 2, 3, 3.5 dan 4% berat NaCl

Kadar NaCl (wt %)	Pengujian (Ppm)			Rata - Rata
	1	2	3	
0	8	8.1	8	8.0
1	7.7	7.6	7.8	7.7
2	7	6.9	6.9	6.9
3	6.4	6.5	6.5	6.5
3.5	6.3	6.3	6.3	6.3
4	5.9	5.8	6	5.9

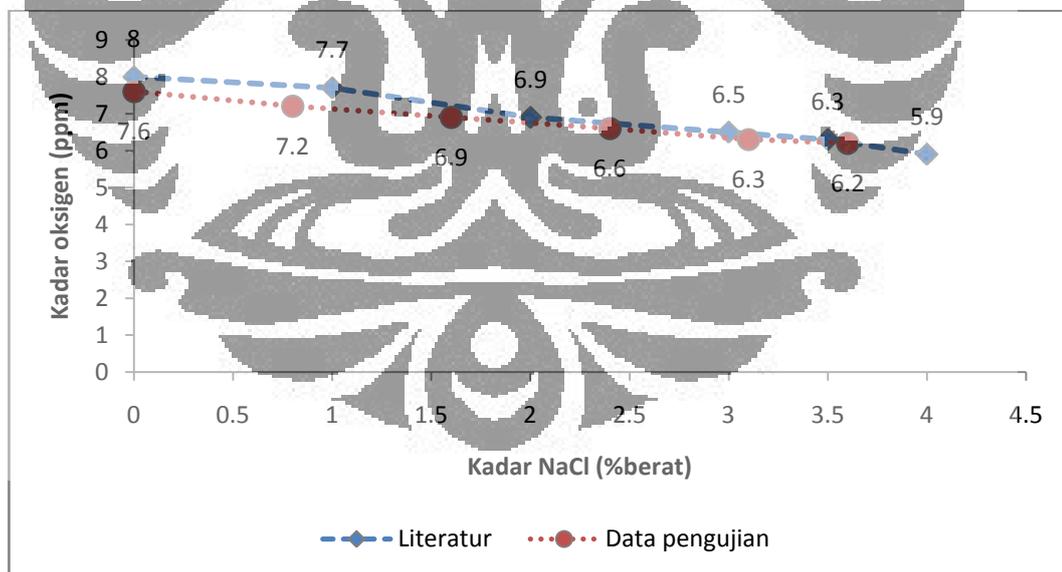


Gambar 4.1. Dissolve Oxygen Meter

Dari Tabel 4.1 terlihat pada larutan uji dengan kadar 0 % berat NaCl mempunyai nilai rata-rata 8.0 Ppm dan semakin tinggi nilai % berat NaCl maka semakin rendah kandungan dalam larutan uji tersebut dapat dilihat pada data 4 % berat NaCl mempunyai nilai rata-rata kandungan oksigen sebesar 5.9. Hal ini terjadi akibat pendesakan partikel dari NaCl di dalam larutan sehingga kandungan oksigen dalam larutan berkurang seiring bertambahnya dengan jumlah % berat NaCl.

Tabel 4.2. Nilai kandungan oksigen dalam larutan dengan kadar berbagai % berat NaCl literatur

Temperatur (°C)	Oxygen Solubility (ppm) at indicated salinity (wt.%)					
	0	0.8	1.6	2.4	3.1	3.6
0	14.6	13.9	13.1	12.4	11.8	11.4
5	12.5	11.9	11.3	10.7	10.2	9.9
10	10.9	10.4	9.8	9.4	8.9	8.7
15	9.5	9.1	8.7	8.2	7.9	7.7
20	8.5	8.1	7.7	7.3	7	6.8
25	7.6	7.2	6.9	6.6	6.3	6.2
30	6.8	6.5	6.2	6	5.7	5.6

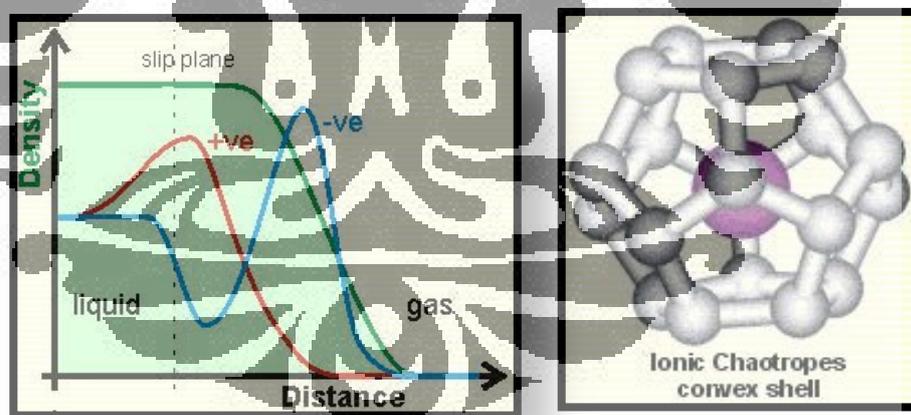


Gambar 4.2. Kurva kadar oksigen di larutan 0,1, 2, 3, 3.5 dan 4 % berat NaCl dibandingkan dengan literatur.

Dari Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengujian pada larutan uji memiliki keserupaan sifat dengan larutan NaCl pada literatur, di mana kelarutan

oksigen dalam larutan NaCl akan semakin rendah jika konsentrasi NaCl semakin tinggi. Sebenarnya penambahan NaCl dalam air selain meningkatkan viskositas, densitas, dan tegangan permukaan larutan^[15], juga akan meningkatkan jumlah ion bermuatan yang terlarut. Hal ini disebabkan adanya 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 4.3)^[3].

Selanjutnya besarnya 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 4.3 menunjukkan muatan pada permukaan air-gas dan struktur ikatan air dengan ion *chaotropic*.



Gambar 4.3. Muatan pada permukaan air-gas dan struktur ikatan air dengan ion *chaotropic*.^[3]

4.1.2 Pengujian Resistivitas dan Konduktivitas Larutan



Gambar 4.4. Pengujian Resistivity

Tujuan dari pengujian ini adalah mengetahui nilai konduktivitas dari larutan uji serta membandingkan antar larutan uji. Untuk setiap larutan dilakukan 3 kali pengujian. berikut ini data konduktivitas dan resistivitas larutan 0, 1, 2, 3, 3.5, dan 4 %berat NaCl. Gambar 4.4 memperlihatkan tampilan alat saat pengujian dilakukan.

Tabel 4.3. Resistivitas Larutan 0,1, 2, 3, 3.5 dan 4 %berat NaCl

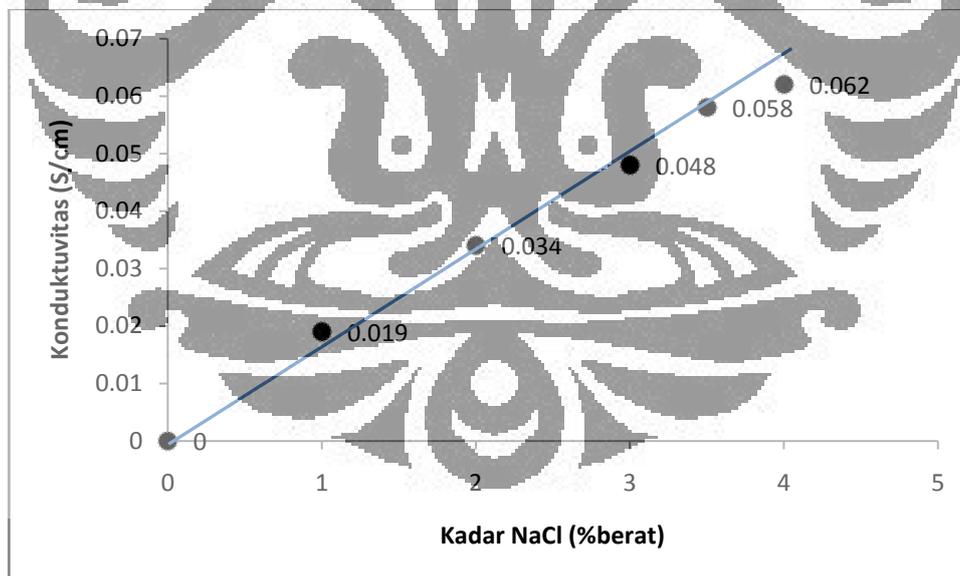
<i>Salinity</i>	Resistivity 1	Resistivity 2	Resistivity 3	Average Resistivity
0%	∞	∞	∞	∞
1%	54	54.4	54.6	54.33
2%	29.5	29.5	29.5	29.5
3%	20.9	20.9	20.9	20.9
3.50%	17.19	17.18	17.18	17.18
4%	16.26	16.26	16.25	16.26

Tabel 4.4. Nilai konduktivitas larutan aquadest dan 1, 2, 3, 3.5 dan 4 % berat NaCl

Salinity (% berat)	Konduktivitas1	Konduktivitas 2	Konduktivitas 3	Average Konduktivitas
0	0	0	0	0
1	0.019	0.019	0.018	0.019
2	0.034	0.034	0.034	0.034
3	0.048	0.048	0.048	0.048
3.5	0.058	0.058	0.058	0.058
4	0.062	0.062	0.062	0.062

Tabel 4.5. Nilai konduktivitas dan resistansi larutan konsentrasi 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl

Salinity	0	1	2	3	3.5	4
Resistivitas		54.6	29.5	20.5	17.18	16.25
Konduktivitas	0	0.019	0.034	0.048	0.058	0.062

**Gambar 4.5.** Kurva nilai konduktivitas larutan 0, 1, 2, 3, 3.5 dan 4 % berat NaCl.

Pada gambar 4.5. terlihat bahwa kenaikan harga konduktivitas seiring peningkatan kadar NaCl hal ini dikarenakan adanya garam NaCl yang terlarut dalam air akan terionisasi jika terlarut sempurna membentuk 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.^[21]

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.^[22]

4.1.3 Pengujian PH

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui besarnya PH larutan uji sehingga dapat menentukan pengaruh yang terjadi akibat penambahan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl terhadap laju korosi. Pengujian ini dilakukan sebanyak 3 kali untuk masing – masing larutan. Hasil dari pengujian terdapat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Nilai pH di larutan 0, 1, 2, 3, 3.5 dan 4 % berat NaCl

Salinity (%berat)	pH 1	pH 2	pH 3	Rata – Rata
0	7.2	7.1	7.1	7.1
1	6.9	7	7	7
2	7	7	7	7
3	7	6.9	7	7
3.5	7	6.9	7	7
4	7	6.8	7	6.9

Pada dasarnya NaCl merupakan garam yang cenderung bersifat netral, sehingga berapapun kadar yang ditambahkan pada larutan uji akan membuat PH

pada larutan mempunyai rata – rata 7 seperti pada Tabel 4.5. Hal ini berarti sudah sesuai dengan literature dimana pH pada larutan garam NaCl netral

4.2 Pengujian Tafel dengan CMS (Corrosion Measurement Sistem) menggunakan RCE (Rotating Cylinder Electrode)

Pengujian Tafel analisis merupakan pengujian dengan tujuan mencari laju korosi dari material uji. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *corrosion measurement sistem* (CMS) dimana kecepatan membaca dari titik satu ke yang lainnya (*scanrate*) 5 mV/detik dan rentang potensial pengujian -150 mV hingga +150 mV terhadap potensial korosi (E_{oc}). Standard Electroda yang digunakan adalah Saturated Calomel Electrode yang memiliki satuan konversi +0.24mv dengan *saturated hydrogen electrode*. *Counter electrode* yang digunakan adalah karbon / grafit. 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:

$$mpy = 0,129 \frac{i_{cor} M}{D} \quad (4.1)$$

di mana :

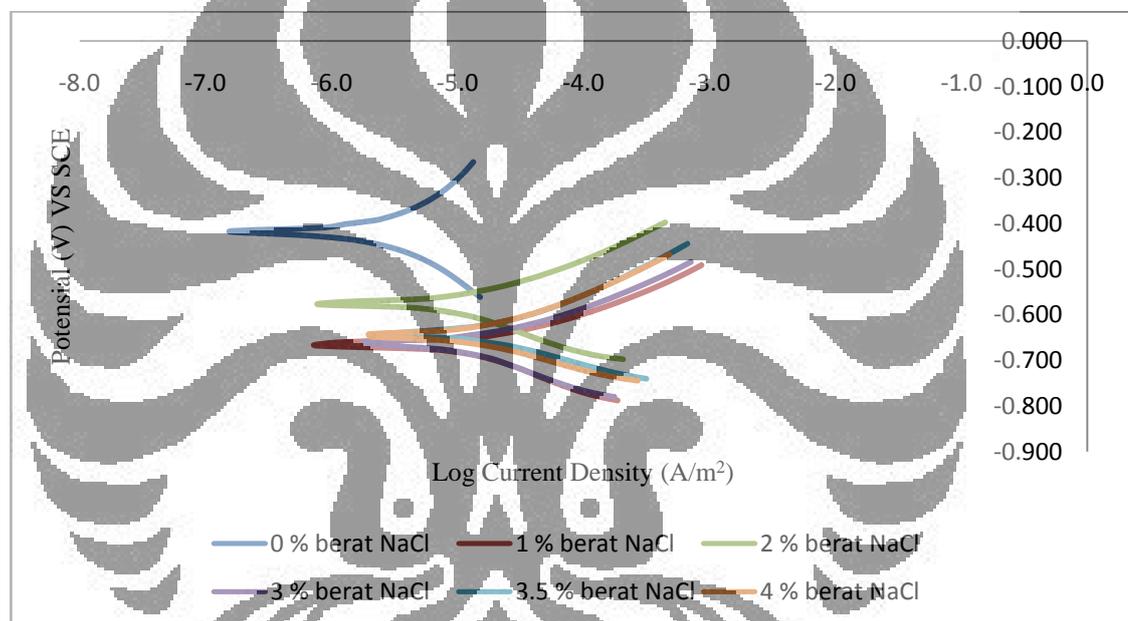
- D = berat jenis (g/cm^3)
- i_{cor} = rapat arus korosi ($\mu A/cm^2$)
- M = berat ekuivalen ($g/mol.eq$)

4.2.1 Pengujian saat keadaan kecepatan alir fluida 0 cm/detik

Tujuan dari pengujian adalah untuk mengetahui besarnya nilai laju korosi pada sistem tertutup pada tekanan 1 atm dan suhu 25° C serta laju alir fluida 0 m/detik dengan variabel konsentrasi larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl. Masing – masing pengujian dilakukan 3 kali pada masing – masing variabel larutan. Adapun hasil dari pengujian disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Nilai laju korosi tanpa laju alir terhadap larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl

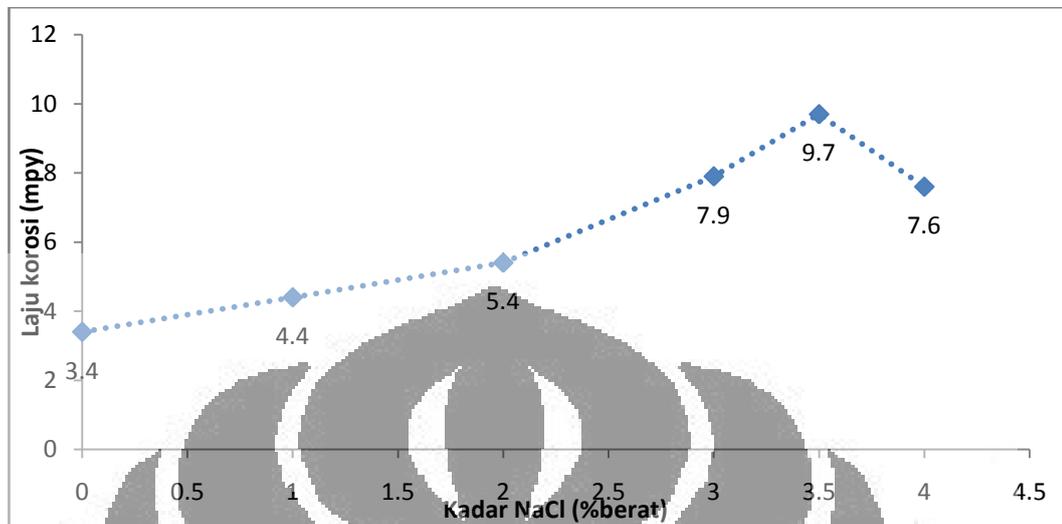
Kadar NaCl	<i>E Corr</i>	<i>I Corr</i>	Laju Korosi
0%	-419	7.431×10^{-5}	3.4
1%	-665.3	9.643×10^{-5}	4.4
2%	-575.7	1.161×10^{-5}	5.4
3%	-663.3	1.719×10^{-5}	7.9
3.5%	-642	2.133×10^{-5}	9.7
4%	-645.6	1.656×10^{-5}	7.6

**Gambar 4.6.** Grafik polarisasi laju alir 0 cm/detik pada berbagai konsentrasi larutan NaCl.

Gambar 4.6. memperlihatkan kurva laju korosi pada 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.

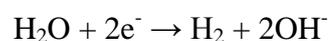
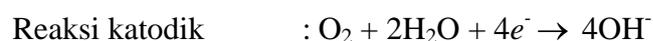
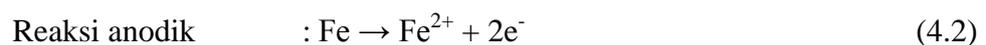


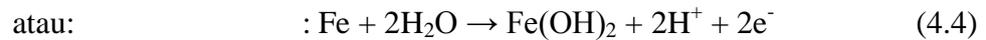
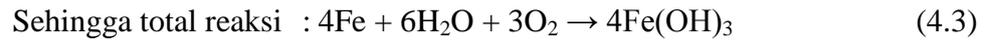
Gambar 4.7. Kurva nilai laju korosi baja UNS G10180 tanpa laju alir terhadap larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl.

Pada Gambar 4.7, terlihat laju korosi baja karbon G10180 dalam lingkungan NaCl sesuai dengan beberapa pernyataan pada berbagai literatur, di mana laju korosi maksimum dicapai pada konsentrasi 3.5% berat NaCl.

Penurunan laju korosi yang dialami baja karbon pada sistem tertutup setelah melewati konsentrasi 3.5% berat NaCl dapat disebabkan oleh 2 hal, yaitu:

1. 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.





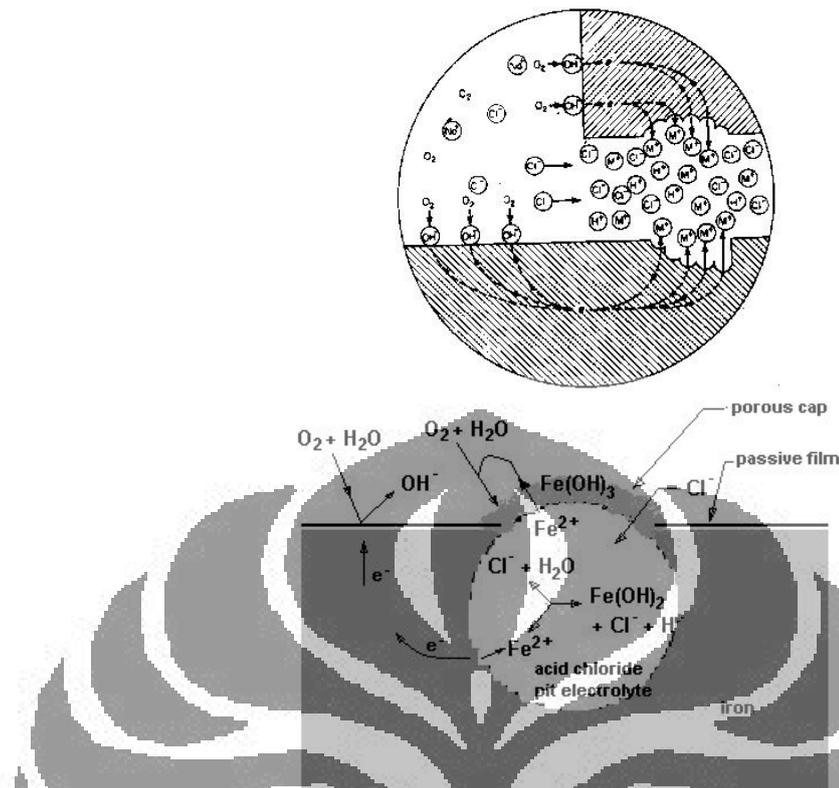
Dari reaksi di atas dapat disimpulkan bahwa dalam lingkungan netral reduksi oksigen dapat menjadi penghambat laju reaksi korosi yang terjadi. Pada konsentrasi klorida di atas 3.5% laju kerusakan baja karbon menurun, namun laju korosi tetap cukup tinggi walaupun jumlah oksigen terlarut menurun seiring peningkatan konsentrasi garam^[23].

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^[23].



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 4.8 merupakan ilustrasi 2 bentuk korosi lokal yang mungkin terjadi.

Pada kedua bentuk korosi pada Gambar 4.8. 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.



Gambar 4.8. Skema korosi *crevice* (kiri) dan *pitting* (kanan)^[4].

- 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:

- Pada konsentrasi NaCl 0% berat, laju disolusi logam pada daerah anodik seimbang dengan laju difusi oksigen untuk reaksi reduksi oksigen pada permukaan daerah katodik;

2. 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;
3. 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
4. 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).

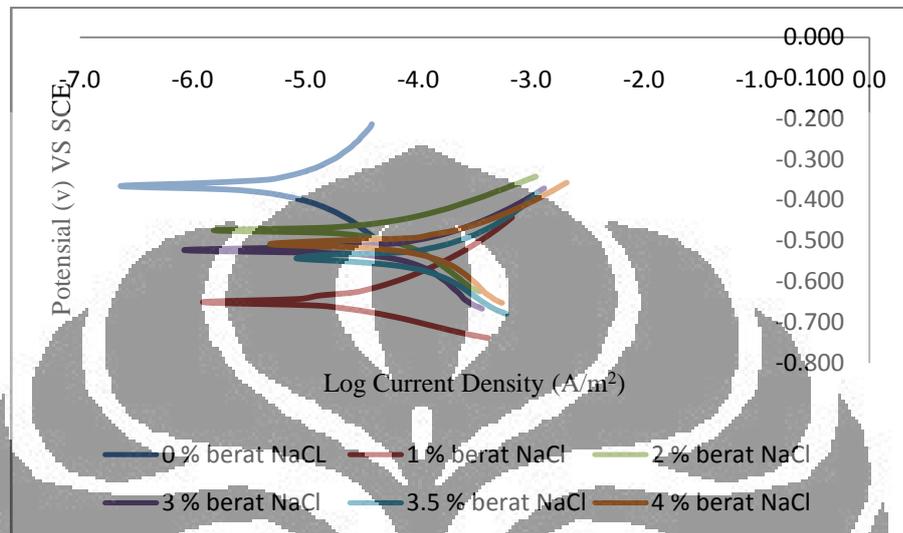
4.2.2 Pengujian CMS pada laju alir fluida 50 cm/detik

Tujuan dari pengujian adalah untuk mengetahui besarnya nilai laju korosi pada sistem tertutup pada tekanan 1 atm dan suhu 25° C serta laju alir fluida 0.5 m/detik dengan variabel konsentrasi larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl. Masing – masing pengujian dilakukan 3 kali pada masing – masing variabel larutan. Adapun hasil dari pengujian disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Nilai laju korosi dengan laju alir 50 cm/detik terhadap larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl

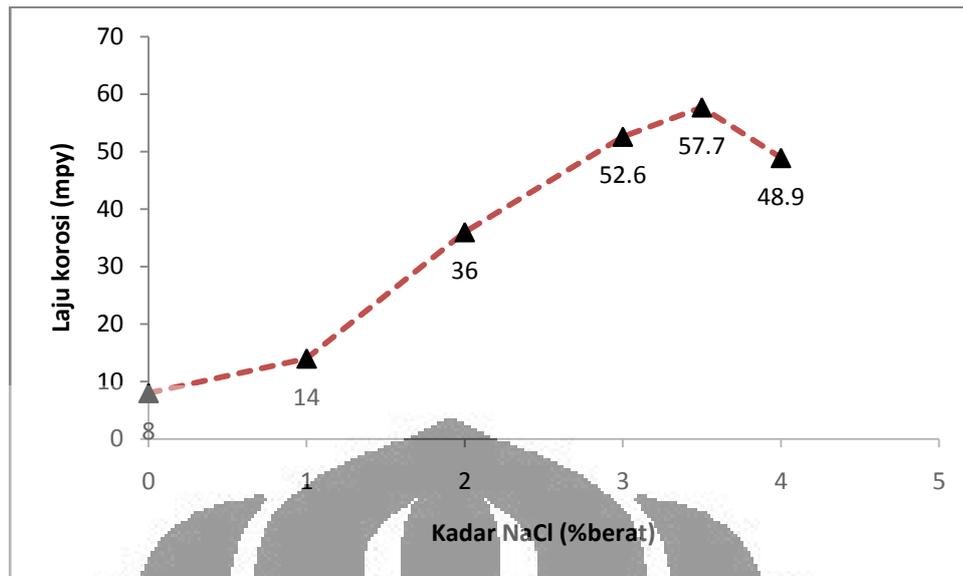
Kadar NaCl (%berat)	E_{corr}	I_{Corr}	Laju Korosi
0	-366.5	1.754×10^{-5}	8.0
1	-650.0	3.072×10^{-5}	14.0
2	-473.8	7.899×10^{-5}	36.0
3	-523.5	1.151×10^{-4}	52.6
3.5	-544.1	1.263×10^{-4}	57.7
4	-509.6	1.070×10^{-4}	48.9

Pada Gambar 4.9 menunjukkan kurva laju korosi terlihat bahwa semakin tinggi konsentrasi NaCl dalam larutan hingga 3.5% berat, maka kurva akan bergeser ke kanan bawah atau dengan kata lain terjadi peningkatan arus korosi.



Gambar 4.9. Kurva Polarisasi dengan larutan 0,1,2,3,3.5 dn 4 % berat NaCl kecepatan 50 cm/detik.

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.



Gambar 4.10. Kurva nilai laju korosi dengan laju alir terhadap larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl.

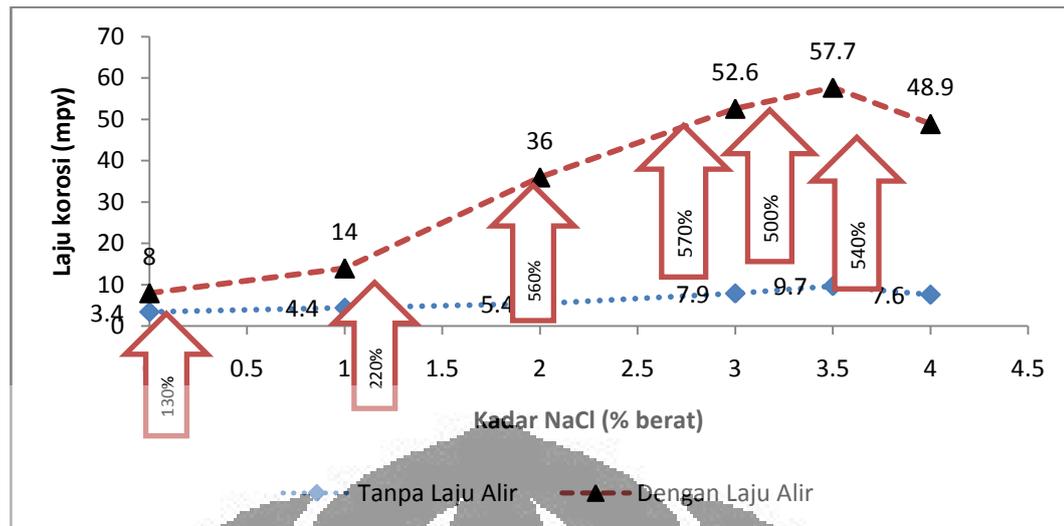
Pada Gambar 4.10 terlihat laju korosi bertambah seiring dengan adanya penambahan konsentrasi NaCl. Tetapi tidak pada kondisi 4 % berat NaCl, hal ini sama penyebabnya dengan kondisi sebelumnya.

4.2.3 Perbandingan Laju Korosi Pada Laju Alir Fluida 0 dan 50 cm/detik

Pembahasan ini untuk memperlihatkan perbandingan antara laju korosi pada kondisi laju alir fluida 0 m/detik dan 5 m/detik adapun data dari perbandingan laju korosinya dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.9. Nilai laju korosi dengan laju alir 0 dan 50 cm/detik terhadap larutan 0,1,2,3,3.5 dan 4 % berat NaCl

Kadar NaCl	0%	1%	2%	3%	3.50%	4%
Laju Korosi 0 cm/s	3.4	4.4	5.3	7.9	9.7	7.6
Laju Korosi 50 cm/s	8.0	14.0	36.1	52.6	57.7	48.9



Gambar 4.11. Kurva nilai laju korosi dengan laju alir 0 dan 50 cm/detik terhadap larutan 0,1,2,3,3,5 dan 4 % berat NaCl.

Pada Gambar 4.11 Pada kedua kurva menunjukkan trend yang sama dimana dengan meningkatnya konsentrasi NaCl maka akan meningkat pula laju korosinya dan maksimum pada 3.5 % NaCl dan akan turun kembali pada konsentrasi 4 % berat NaCl, Penjelasan akan hal ini sudah dijelaskan pada penjelasan sebelumnya. Kemudian terlihat perbedaan antara nilai kurva pada saat pengujian dengan kecepatan alir fluida 0 dan 0.5 m/detik, dimana nilai laju korosi pada kurva dengan kecepatan alir fluida 0.5 m/detik menjadi 4 kali dibandingkan dengan kondisi diam hal ini dikarenakan ada 2 faktor yaitu :

- 1) Besarnya nilai laju alir fluida, menyebabkan peningkatan koefisien transport massa. Hal ini akan menyebabkan suplai oksigen dari larutan ke permukaan logam secara terus menerus konstan dan semakin besar, sehingga akan mempengaruhi nilai polarisasi konsentrasi.

Polarisasi konsentrasi terjadi akibat adanya kondisi peyimpangan dengan arus korosi terbatas. Hal ini terjadi akibat adanya konsentrasi masa oksigen yang besar pada permukaan logam, sehingga menyebabkan faktor koefisien transport massa menjadi factor penting dalam fenomena polarisasi. Dimana transport massa dominan berlangsung di area katodik, dan agen pereaksi yang dominan adalah reduksi oksigen. Adapun besaran transport massa ini sebanding dan dipengaruhi oleh kecepatan putaran

dimana semakin besar kecepatan putaran maka koefisien transport massa juga akan menjadi lebih besar. Hal ini dapat dibuktikan dengan penghitungan koefisien transfer massa menggunakan persamaan Eisenberg KM (cm/s) untuk RCE;

$$\begin{aligned} KM &= 0.0791 d_{cyl}^{-0.3} (\mu / \rho)^{-0.344} D^{+0.644} U_{cyl}^{+0.7} \\ &= 0.0487 d_{cyl}^{+0.4} (\mu / \rho)^{-0.344} D^{+0.644} \omega^{+0.7} \\ &= 0.0051 d_{cyl}^{+0.4} (\mu / \rho)^{-0.344} D^{+0.644} F^{+0.7} \end{aligned} \quad (4.6)$$

- 2) Ketika pengujian dengan variabel laju alir maka fluida mengalir dengan kecepatan linier hal ini akan mempengaruhi nilai *wall shear stress*. *Wall shear stress* adalah aksi mekanik yang terbentuk pada permukaan material oleh media yang mengalir dan berhubungan dengan rusak atau hilangnya produk korosi normal yang protektif dan atau lapisan inhibitor. Oleh karenanya semakin besar *wall shear stress* yang dimiliki maka, akan semakin kecil kemungkinan material yang dimiliki terproteksi oleh lapisan oksida produk korosi baik yang dibentuk secara natural, maupun rekayasa dari penambahan suatu inhibitor^[14].

Besar nilai *wall shear stress* dapat diketahui setelah mengetahui bilangan *Reynold*. Adapun persamaan untuk bilangan *reynold* dapat dilihat pada persamaan 4.9 dan untuk menghitung nilai *wall shear stress* dapat menggunakan persamaan (4.10)

$$RE = U_{cyl} d_{cyl} \rho / \mu \quad (4.7)$$

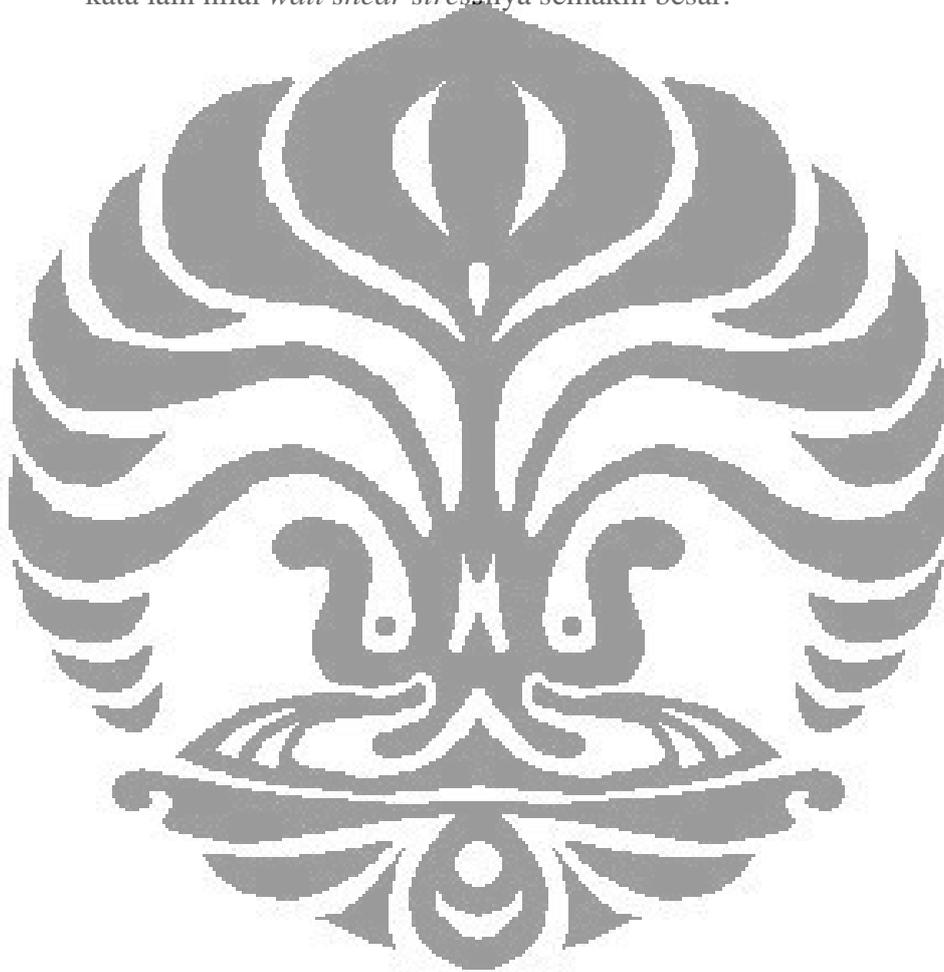
ρ adalah berat jenis larutan (g cm^{-3}) dan μ adalah *viscositas absolute* dinamik, ($\text{g cm}^{-1}\text{s}^{-1}$). *RE* adalah bilangan *renold* dan d_{cyl} adalah diameter silinder.

Wall Shear Stress

$$\tau_{cyl} = 0.0791 \rho Re^{-0.3} U_{cy}^2 \quad (4.8)$$

U_{cy} adalah kecepatan linear.

Pada persamaan laju alir fluida berbanding lurus kuadrat dengan *wall shear stress*, yang berarti semakin besar laju alir fluida maka nilai *wall shear stress* akan semakin besar, kondisi ini akan menyebabkan pembentukan lapisan protektif baik oksida produk korosi yang terbentuk secara normal, maupun lapisan protektif yang terbentuk karena adanya penambahan suatu inhibitor semakin sulit dan rendah. Karena adanya gaya pengikisan yang diakibatkan gesekan oleh material itu sendiri atau dengan kata lain nilai *wall shear stress*nya semakin besar.



BAB 5

KESIMPULAN

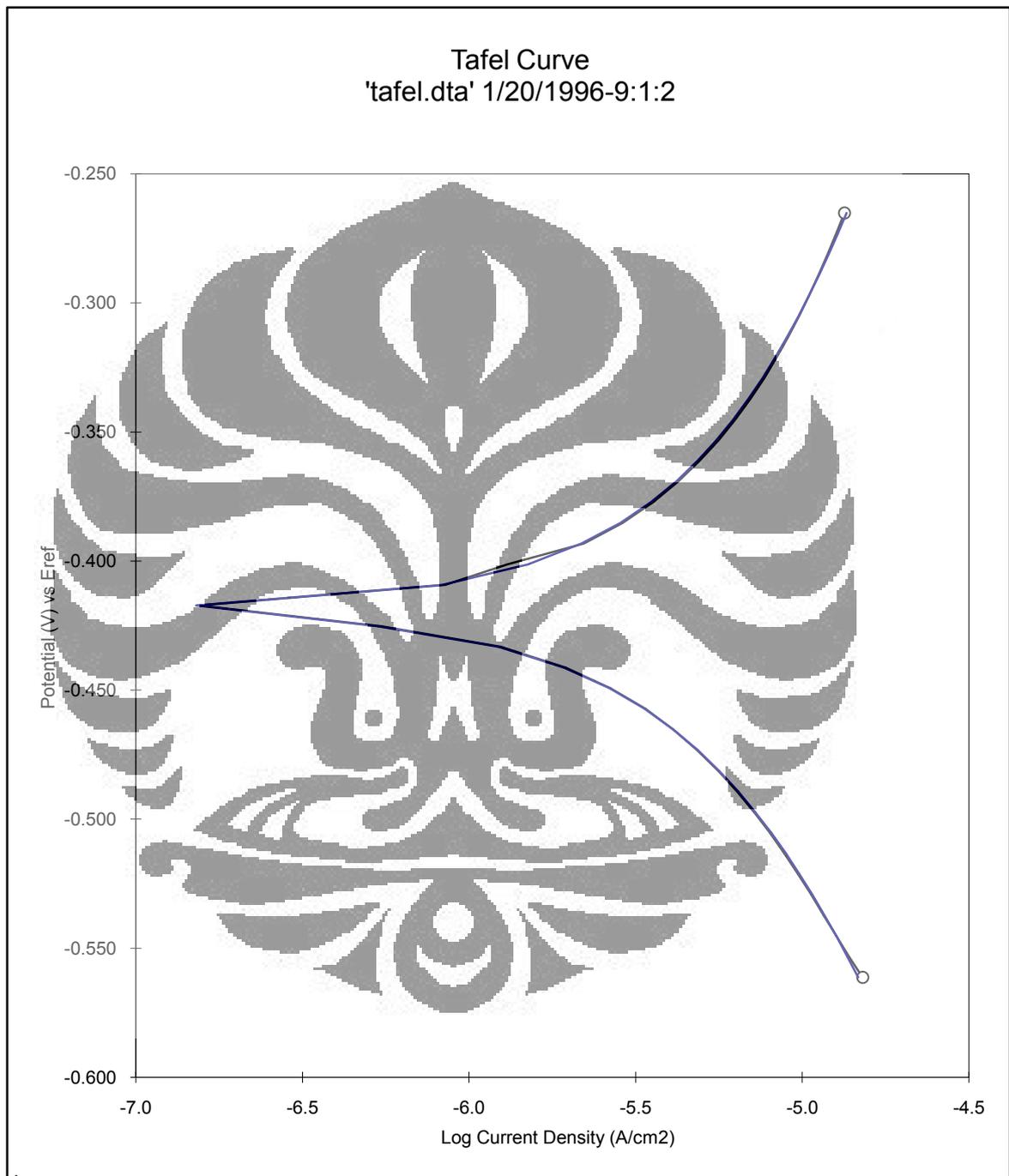
Penelitian pengaruh penambahan konsentrasi NaCl sebesar 0,1, 2, 3, 3.5, dan 4 wt% NaCl dengan menggunakan metode *Tafel* pada alat sel *RCE* (*rotating cylinder electrode*) pada kondisi diam dan laju alir fluida sebagai berikut

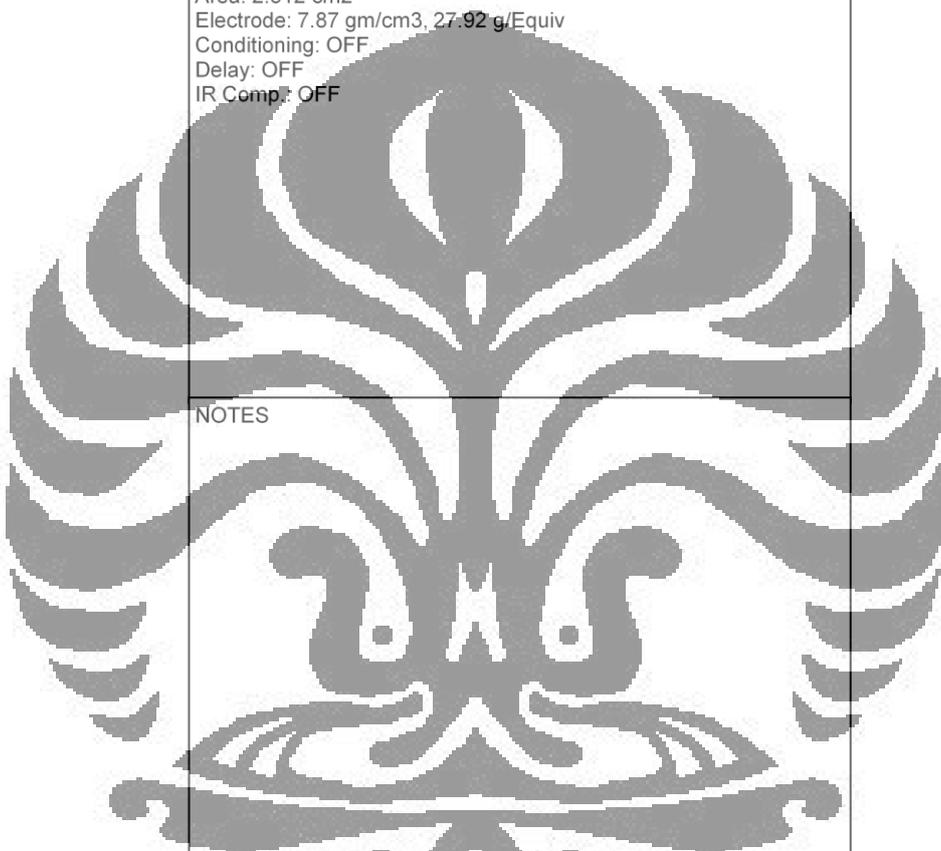
1. Dengan meningkatnya kadar NaCl menyebabkan penurunan kandungan oksigen terlarut dalam larutan pada 8.0 s/d 5.9 ppm. Konsentrasi oksigen berperan penting dalam difusi oksigen yang transportasi massa ke permukaan besi sehingga menghasilkan *limiting current density* (*i_L*).
2. Dengan meningkatnya kadar NaCl menyebabkan peningkatan konduktifitas listrik larutan pada 0.018s/d 0.061 S. Akibat NaCl terurai ion Na⁺ dan ion Cl⁻ yang merupakan elektrolit-elektrolit yang berkurangnya jarak antara kation dan anion ikut meningkatkan nilai *i_L*.
3. Dengan meningkatnya kadar NaCl menyebabkan peningkatan laju korosi hingga kadar 3.5 % berat NaCl dan turun kembali pada 4 % kondisi diam dan memiliki laju alir fluida. Hal ini terjadi akibat penurunan kadar oksigen dalam larutan dan keadaan ion *chloride* yang semakin jenuh pada kadar 4 % berat NaCl.
- 4 Laju korosi dengan keadaan fluida bergerak mengalami peningkatan hingga mencapai 500 % dibandingkan dengan keadaan diam. Hal ini dikarenakan oleh 2 faktor yaitu nilai transport massa dan nilai *wall shear stress* yang keduanya dipengaruhi oleh kecepatan linear dari fluida.

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] Martin Chaplin, *Water Structure and Science*, www.lsbu.ac.uk (01/09/2009)
- [4] Jones, Denny A, *Principles and Prevention of Corrosion*, New York : Macmillian Publishing Comp, 1997.
- [5] Pierre R. Roberge, *Corrosion Engineering – Principles and Practice*, The McGraw-Hill Companies Inc., USA, 2008.
- [6] Charles W. Keenan, Donald C. Kleinfelter, dan Jesse H. Wood, *Ilmu Kimia untuk Universitas*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1996.
- [7] 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.
- [8] *Dissolved Oxygen and Water Quality*, <http://kywater.org> (03/03/2010)
- [9] Loyd W. Jones, *Corrosion and Water Technology for Petroleum Producers*, OGC Publications, 1988.
- [10] Einar Bardal, *Corrosion and Protection*, Springer-Verlag London Limited, 2004 *Corrosion Basic*. NACE, 1984.
- [11] *Dissolved Oxygen*, <http://omp.gso.uri.edu>.. (03/11/2009)
- [12] CONRAD, *Corrosion Control in Pipelines Using Oxygen Stripping*, Oilsand Water Usage Workshop, Camphion Technologies, February 2004.
- [13] *Oxyge Solubility in Fresh and Sea Water*, www.EngineeringToolBox.com. (04/01/2010)
- [14] Pine Instrumentation, *Study of Mass-Transport Limited Corrosion Using Pine Rotating Cylinder Electrodes*, 2006.

- [15] http://www.engineeringtoolbox.com/sodium-chloride-water-d_1187.html.(28/02/2010)
- [16] API Standard RP-14E, *Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Sistem* , 5th Edition, Oktober 1991.
- [17] Baboian, Robert, ASTM International, “*Corrosion Tests and Standards*” , 2nd edition, Baltimore, 2005.
- [18] A.W. Peabody, *Control of Pipeline Corrosion*, NACE International 2nd Edition, Houston, 2001.
- [19] J. Chamberlain dan K.R. Trethewey, *Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1991.
- [20] Mars G. Fontana, “*Corrosion Engineering*” , 3rd eds., McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
- [21] *Ions in Water, and Conductivity*, www.horiba.com.(27/03/2010)
- [22] D.L. Piron, *The Electrochemistry of Corrosion*, NACE, Houston, 1991.
- [23] Harvey M. Herro and Robert D. Port, *The NALCO Guide to Cooling Water Sistem s Failure Analysis*, McGraw-Hill Inc., 1991.

LAMPIRAN**Lampiran 1. NaCl 0% berat tanpa laju alir**

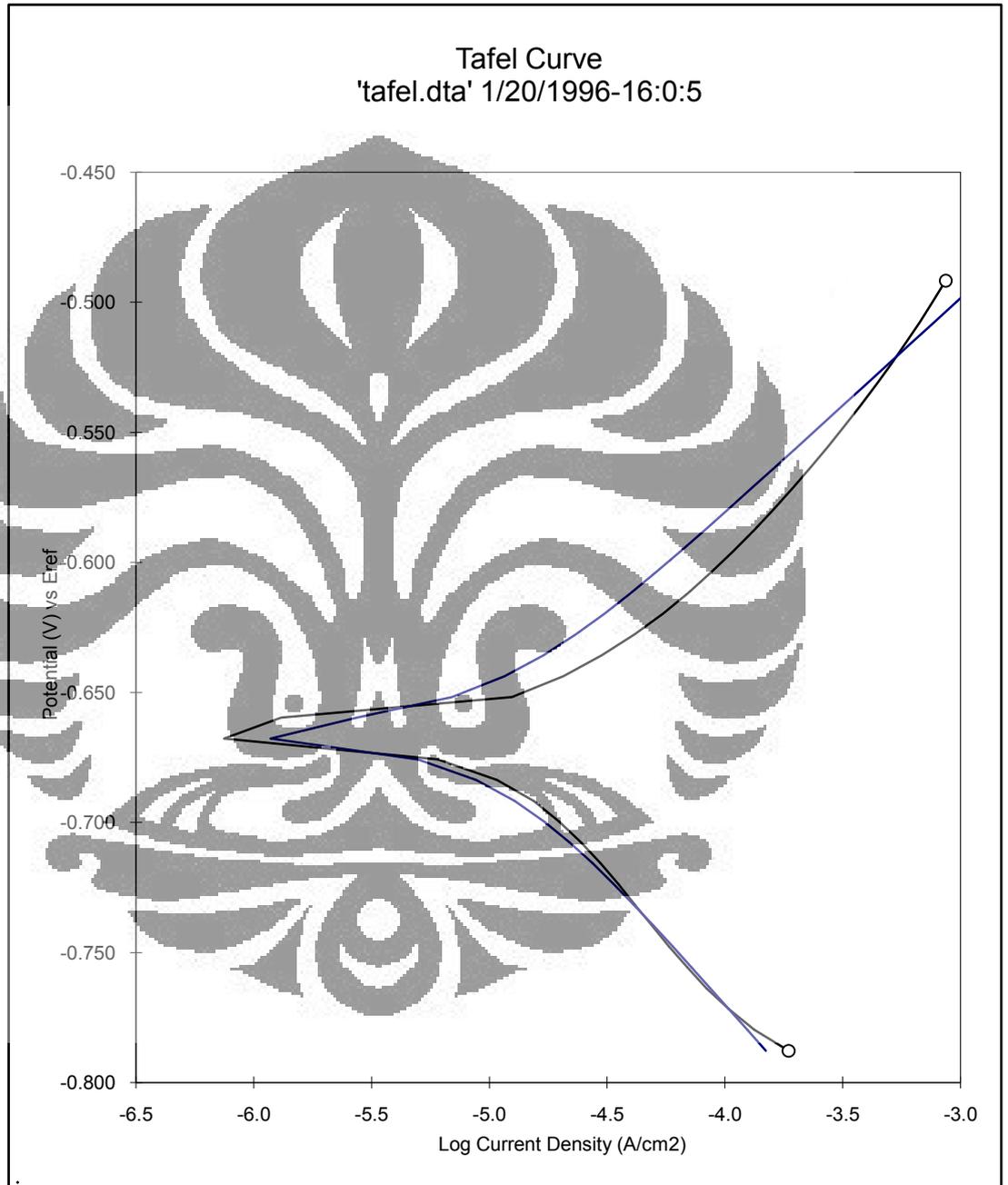


Pstat #1
EOC: -0.411283 V
Area: 2.512 cm²
Electrode: 7.87 gm/cm³, 27.92 g/Equiv
Conditioning: OFF
Delay: OFF
IR Comp: OFF

NOTES

TAFEL RESULTS
Region = -564.3 mV to -265.3 mV
Ecorr = -419.0 mV
Icorr = 7.431E-06 A/cm²
BetaC = 363.4 mV/Decade
BetaA = 447.6 mV/Decade
Rp = 1.172E+04 Ohm cm²
CorrRate = 3.396 mpy

Lampiran 2. NaCl 1% berat tanpa laju alir

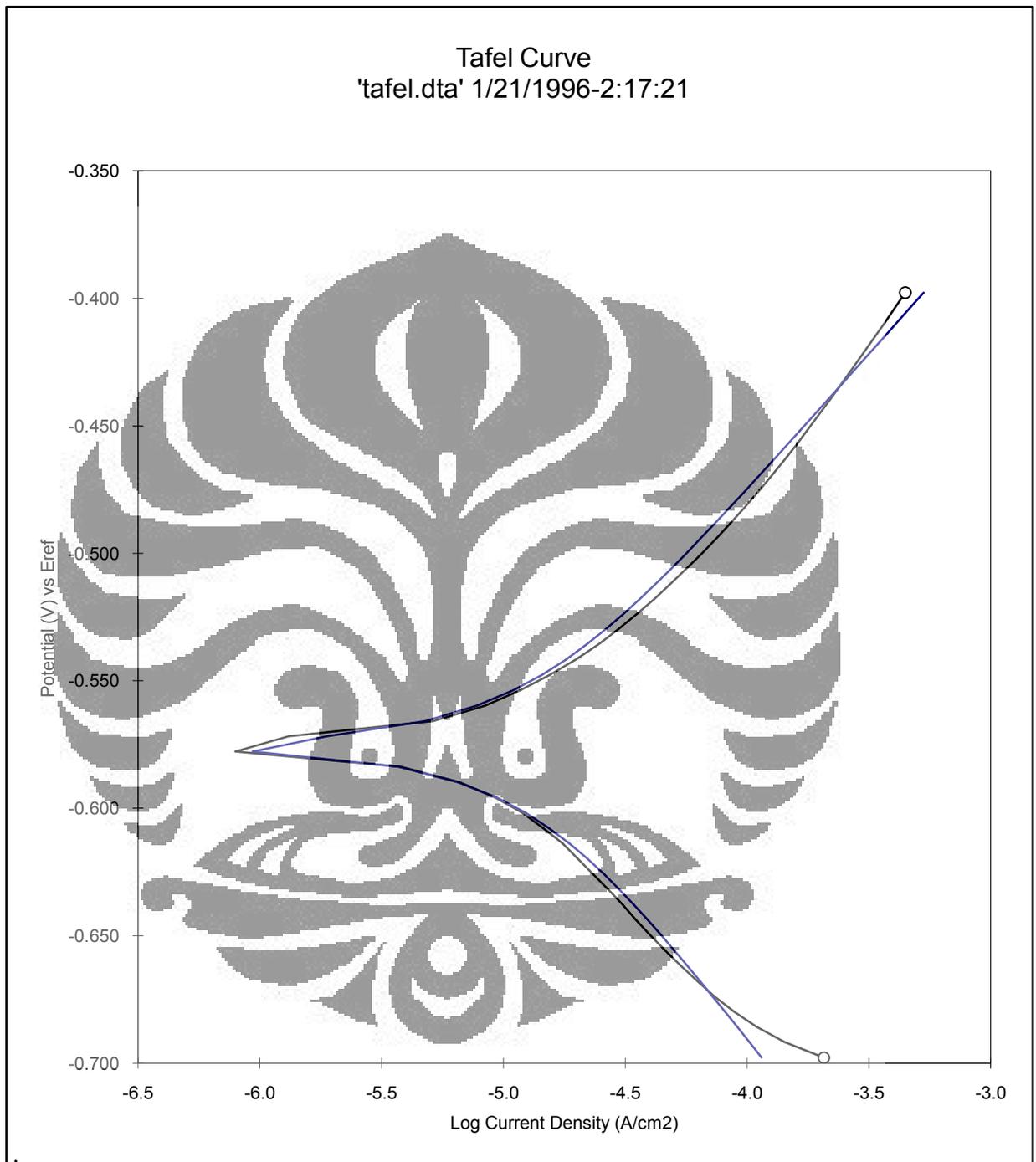


Pstat #1
EOC: -0.637644 V
Area: 2.51 cm²
Electrode: 7.87 gm/cm³, 27.92 g/Equiv
Conditioning: OFF
Delay: OFF
IR Comp.: OFF

NOTES

TAFEL RESULTS
Region = -787.8 mV to -491.8 mV
E_{corr} = -665.3 mV
I_{corr} = 9.643E-06 A/cm²
BetaC = 103.0 mV/Decade
BetaA = 82.8 mV/Decade
R_p = 2.067E+03 Ohm cm²
CorrRate = 4.406 mpy

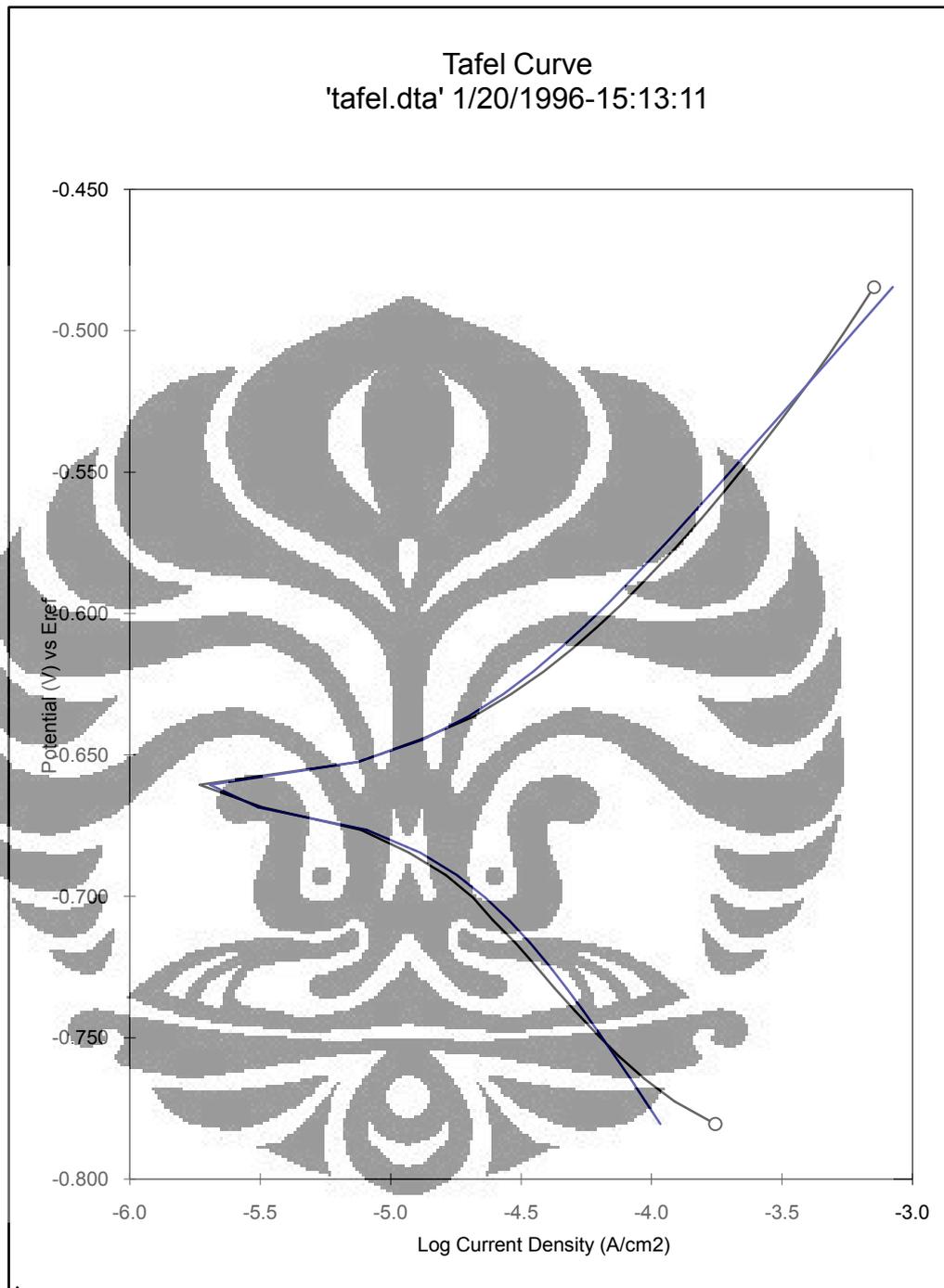
Lampiran 3. NaCl 2% berat tanpa laju alir



Pstat #1
EOC: -0.547812 V
Area: 2.5 cm²
Electrode: 7.87 gm/cm³, 27.92 g/Equiv
Conditioning: OFF
Delay: OFF
IR Comp.: OFF

NOTES

TAFEL RESULTS
Region = -697.8 mV to -397.8 mV
E_{corr} = -575.7 mV
I_{corr} = 1.161E-05 A/cm²
BetaC = 122.2 mV/Decade
BetaA = 107.2 mV/Decade
R_p = 2.135E+03 Ohm cm²
CorrRate = 5.306 mpy

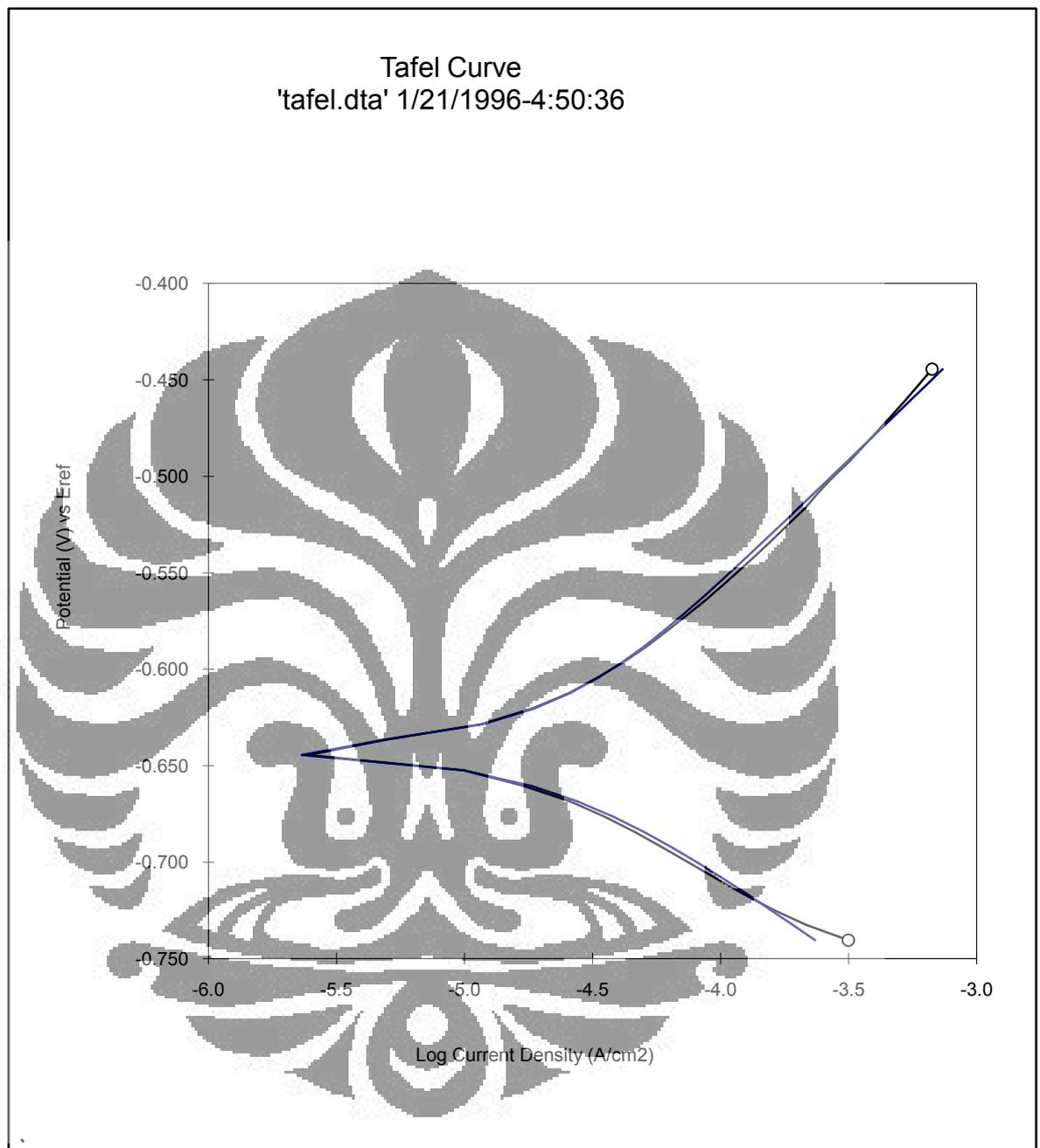
Lampiran 4. NaCl 3% berat tanpa laju alir

Pstat #1
EOC: -0.630401 V
Area: 2.512 cm²
Electrode: 7.87 gm/cm³, 27.92 g/Equiv
Conditioning: OFF
Delay: OFF
IR Comp.: OFF

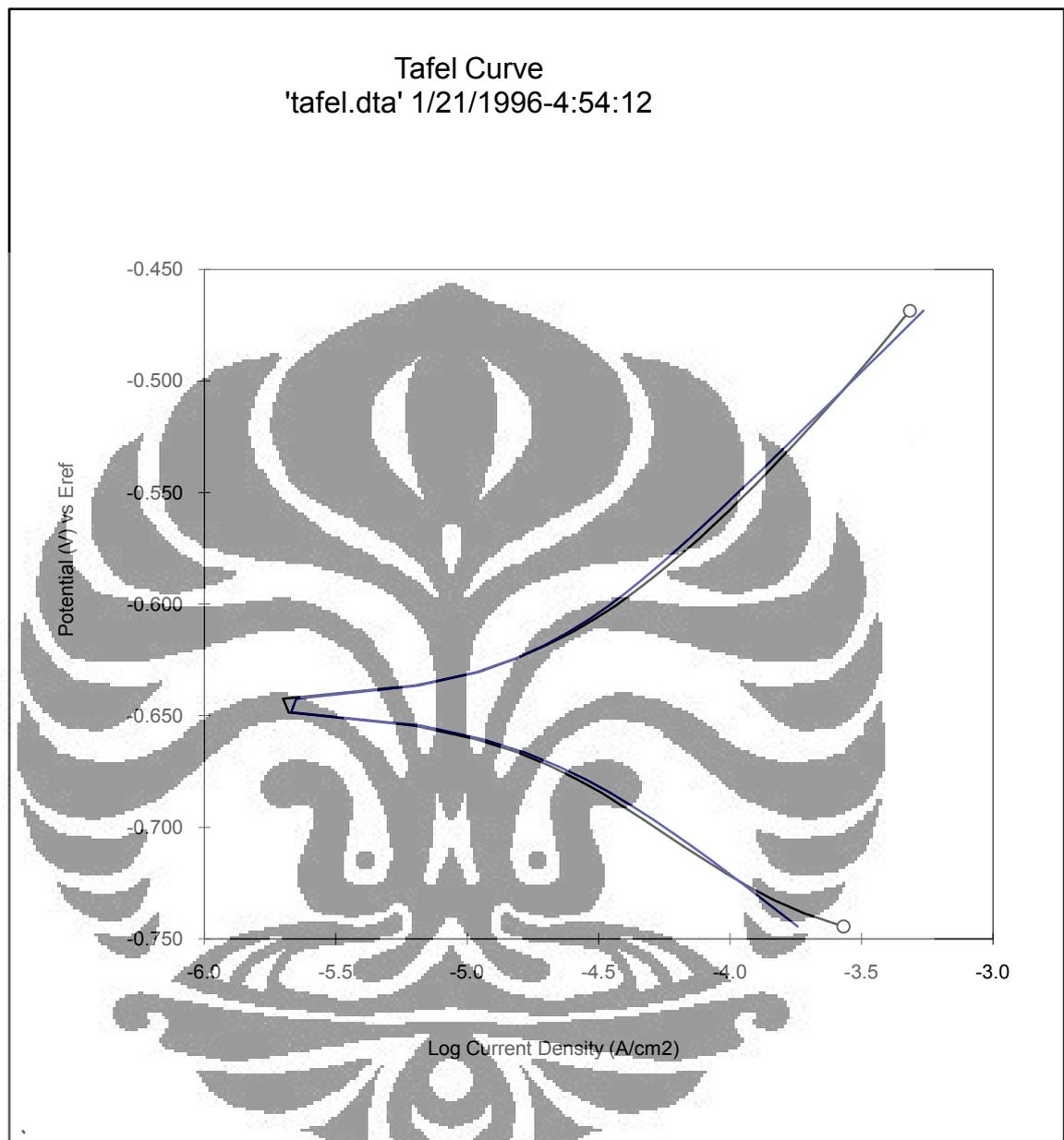
NOTES

TAFEL RESULTS
Region = -780.5 mV to -484.5 mV
Ecorr = -663.6 mV
Icorr = 1.719E-05 A/cm²
BetaC = 145.4 mV/Decade
BetaA = 106.0 mV/Decade
Rp = 1.548E+03 Ohm cm²
CorrRate = 7.856 mpy

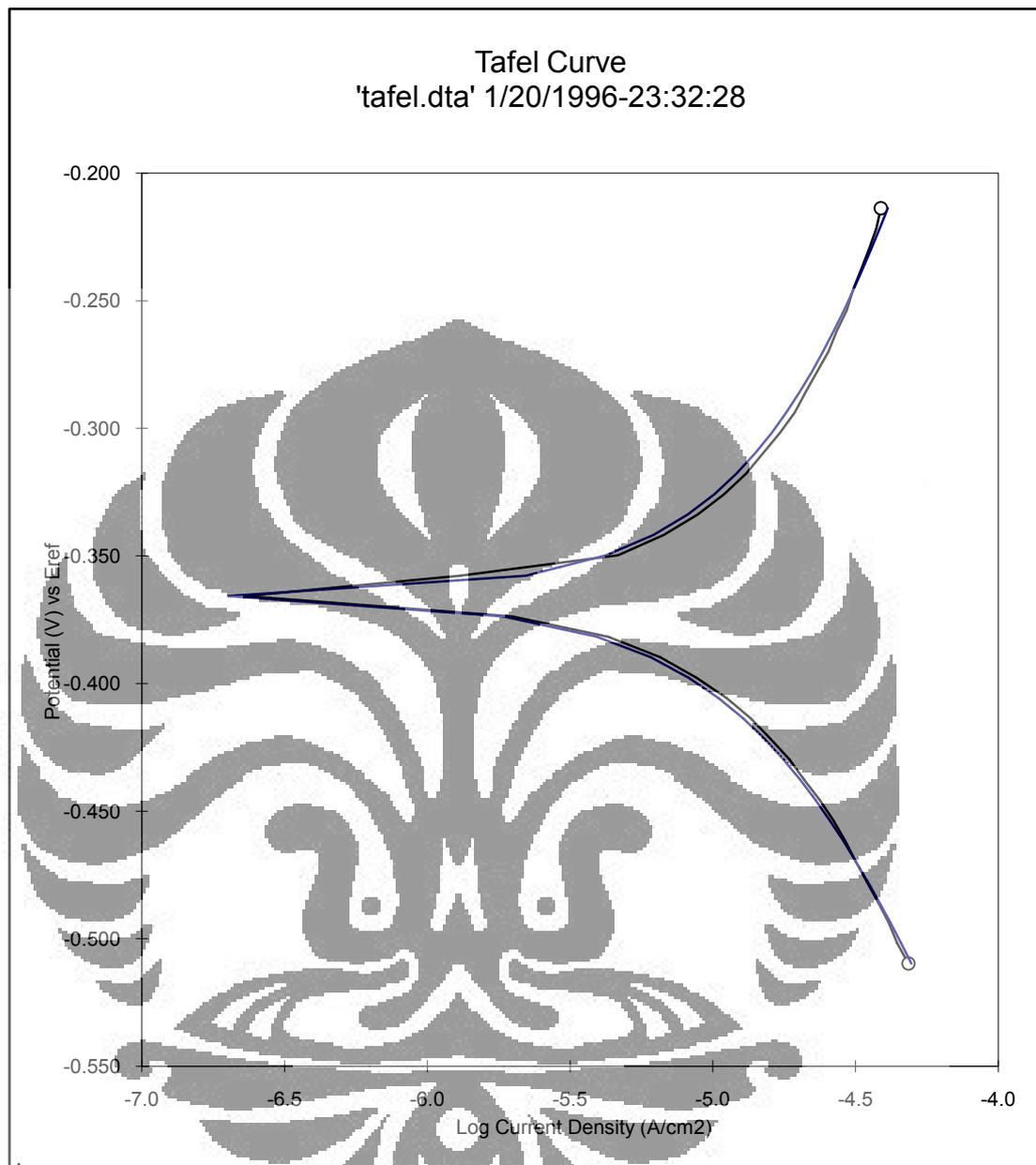
Lampiran 5. NaCl 3.5 % berat tanpa laju alir



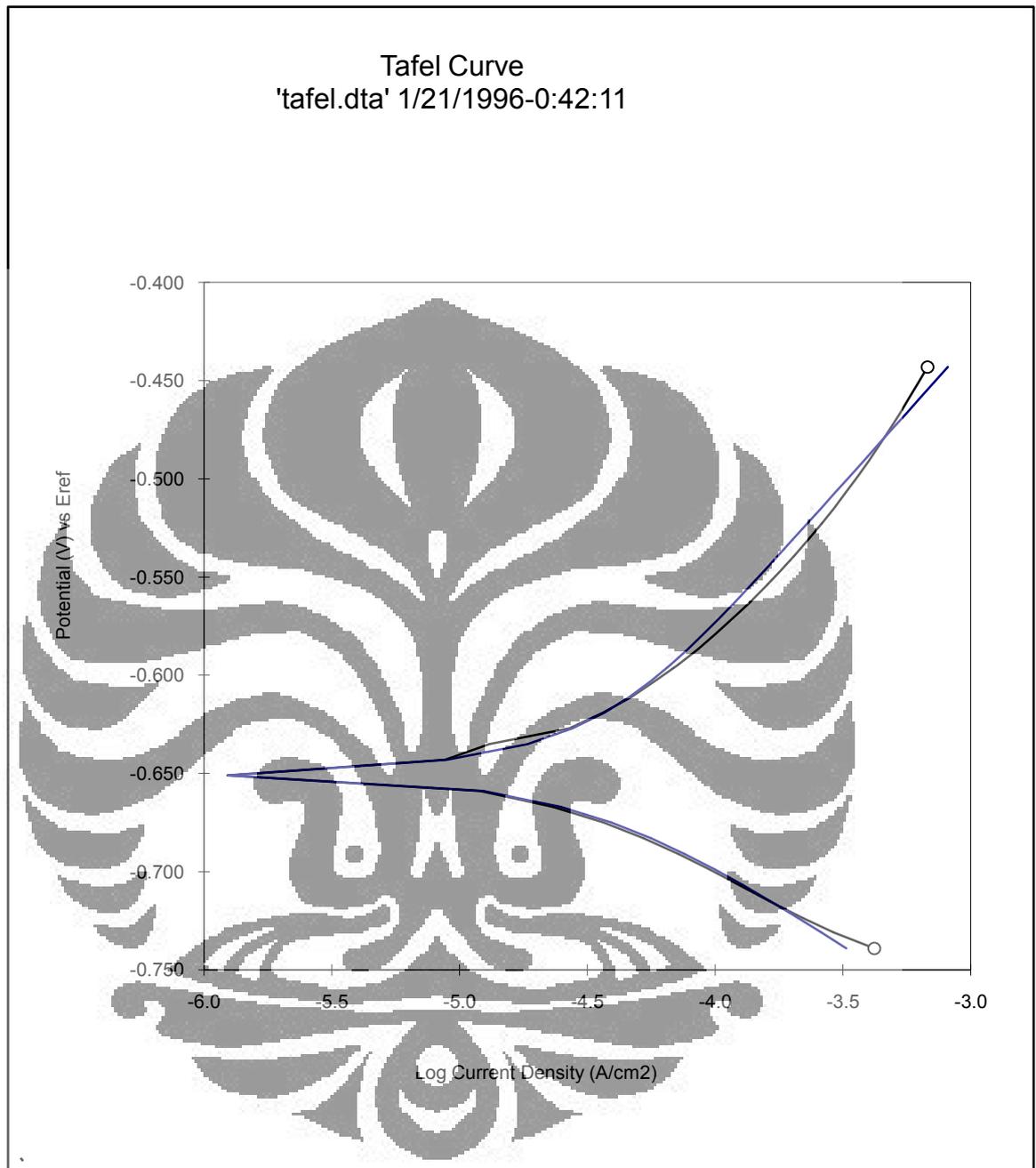
Lampiran 6. NaCl 4% berat berat tanpa laju alir



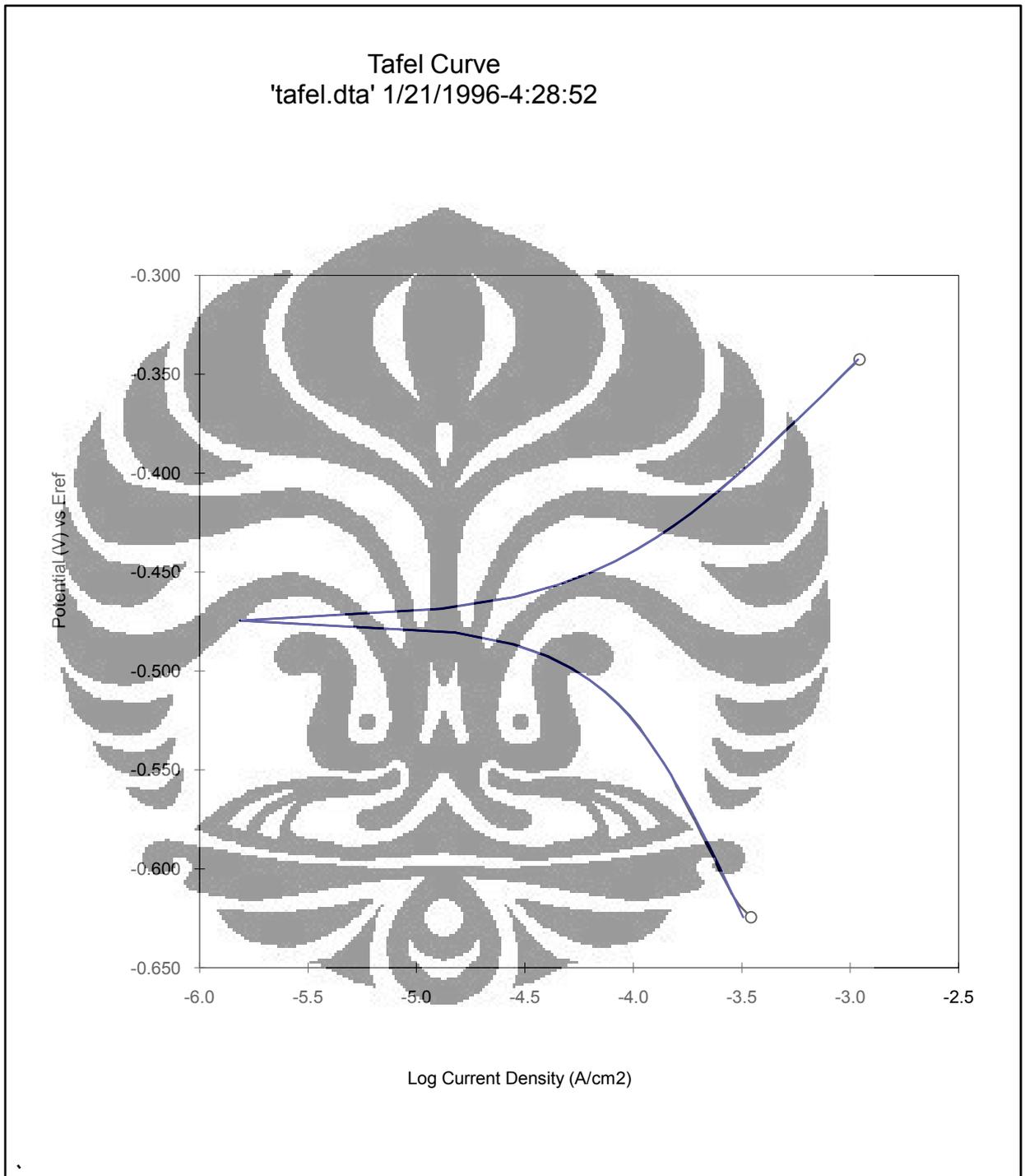
Lampiran 7. NaCl 0% berat laju alir 50 cm/detik

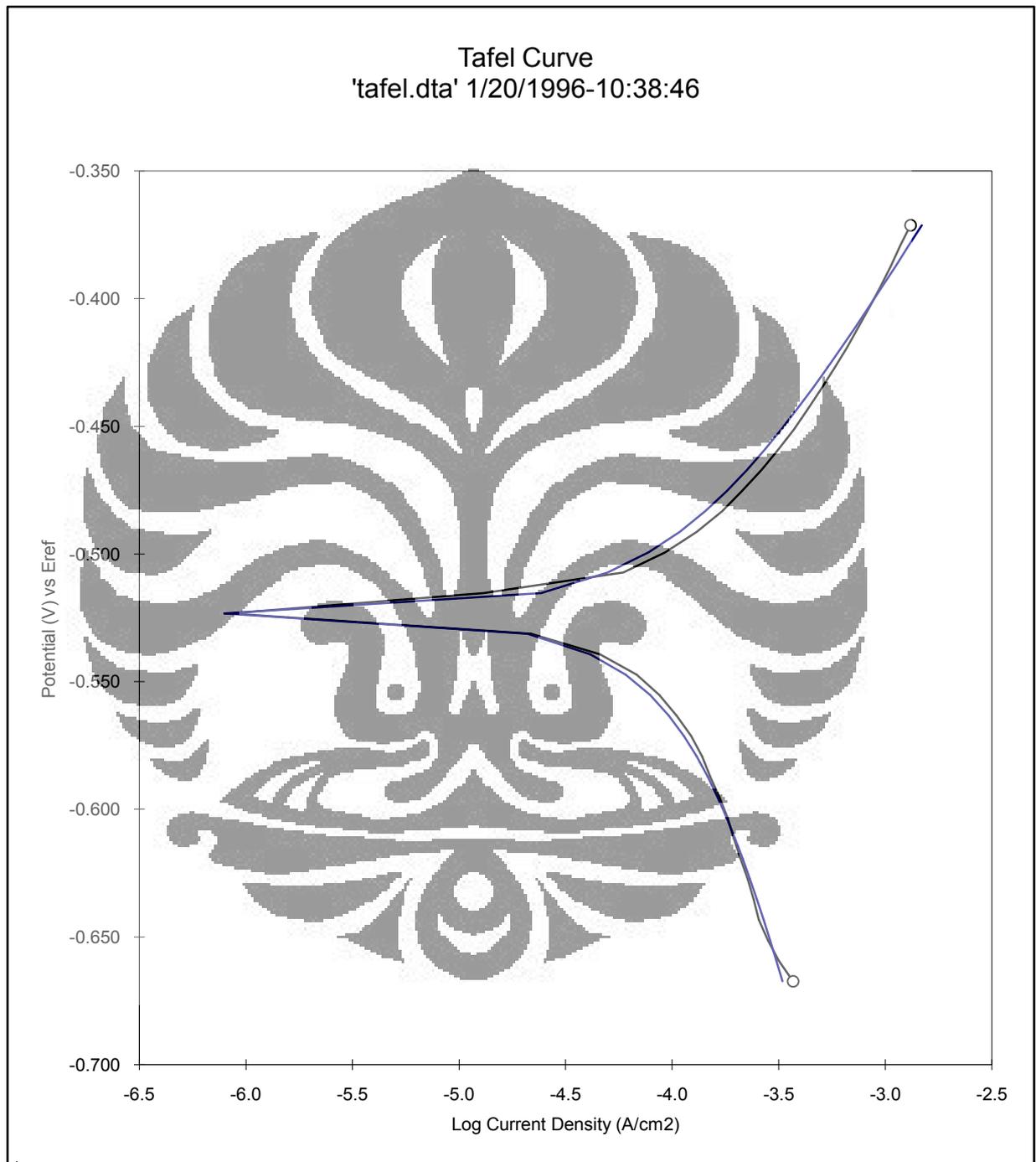


Lampiran 8. NaCl 1% berat laju alir 50 cm /detik

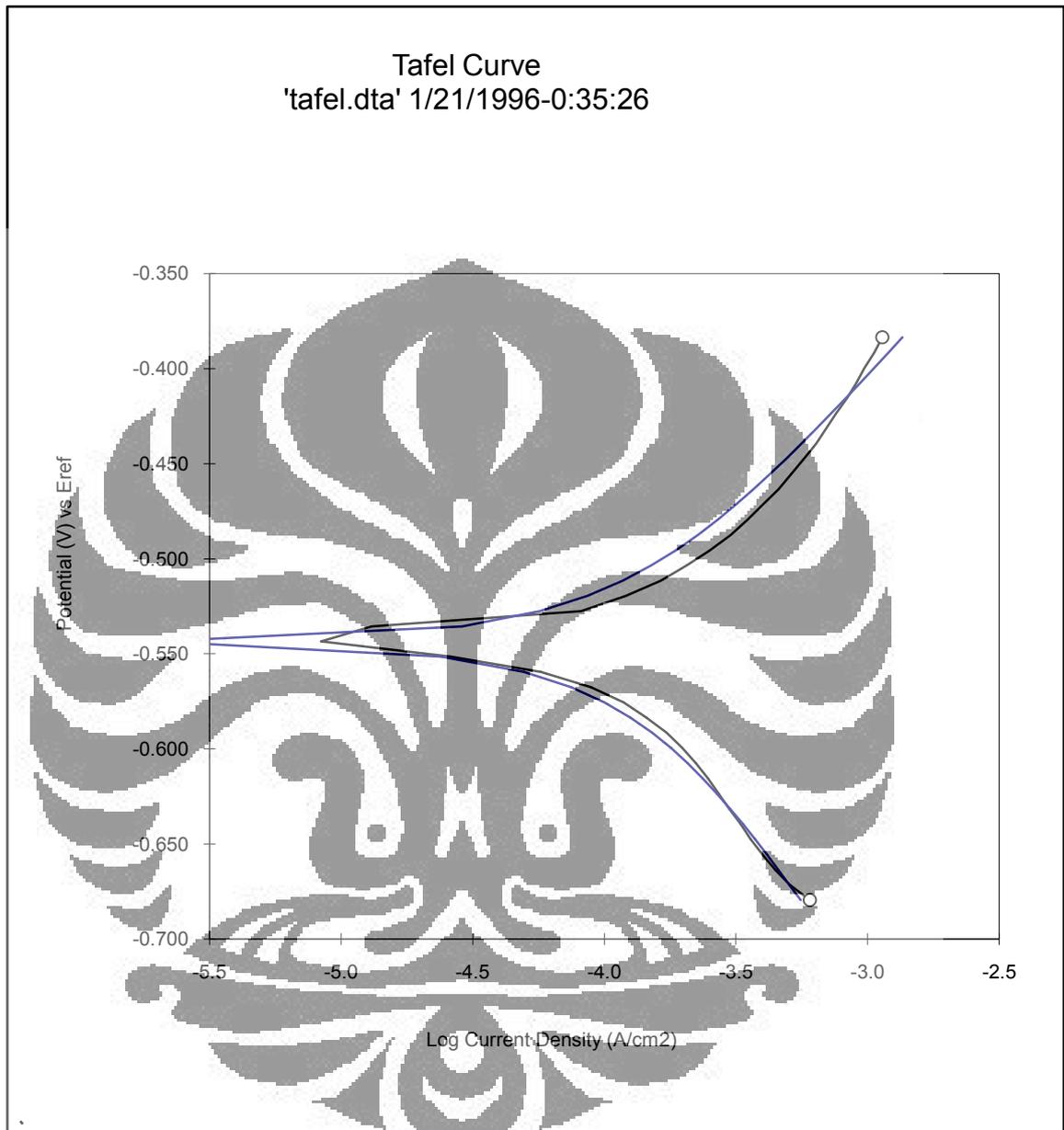


Lampiran 9. NaCl 2% berat laju alir 50 cm/detik



Lampiran 10. NaCl 3% berat laju alir 50cm/detik

Lampiran 11. NaCl 3.5% berat laju alir 50 cm/detik



Lampiran 12. NaCl 4% berat laju alir 50cm/detik

