



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH LAJU ALIR FLUIDA TERHADAP LAJU  
KOROSI BAJA API 5L X-52 MENGGUNAKAN METODE  
POLARISASI PADA LINGKUNGAN NaCl 3.5% YANG  
MENGANDUNG GAS CO<sub>2</sub>**

**SKRIPSI**

**NUR AZIZ OCTOVIAWAN**

**0806331866**

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

**DEPOK**

**JANUARI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH LAJU ALIR FLUIDA TERHADAP LAJU  
KOROSI BAJA API 5L X-52 MENGGUNAKAN METODE  
POLARISASI PADA LINGKUNGAN NaCl 3.5% YANG  
MENGANDUNG GAS CO<sub>2</sub>**

**SKRIPSI**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik**

**NUR AZIZ OCTOVIAWAN**

**0806331866**

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

**DEPOK**

**JANUARI 2012**

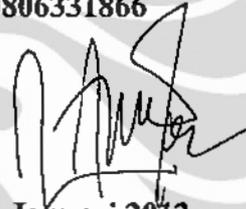
## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Nur Aziz Octoviawan**

**NPM : 0806331866**

**Tanda Tangan :**



**Tanggal : 6 Januari 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Nur Aziz Octoviawan  
NPM : 0806331866  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Laju Alir Fluida Terhadap Laju Korosi Baja API 5L X-52 Menggunakan Metode Polarisasi Pada Lingkungan NaCl 3.5% Yang Mengandung Gas CO<sub>2</sub>

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Andi Rustandi, MT. (  )  
Penguji 1 : Ir. Bambang Priyono, MT. (  )  
Penguji 2 : Mochamad Chalid S.Si., M.Sc.Eng. (  )

Ditetapkan : Depok, Januari 2012

## KATA PENGANTAR

Pertama-tama, penulis haturkan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena berkat restu, nikmat dan bimbingan-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik tanpa adanya hambatan yang cukup berarti dalam pengujian sampai akhirnya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka untuk memenuhi salah satu syarat untuk menggapai gelar Sarjana Teknik (ST) jurusan Metalurgi dan Material di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan masa perkuliahan dan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Andi Rustandi, MT, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu dan pikiran untuk mengarahkan Penulis dalam penyusunan skripsi ini.
2. Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno, selaku Kepala Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
3. Dr. Ir. Ahmad Herman Yuwono, M.Phil-Eng, selaku Pembimbing Akademis Penulis selama menempuh studi di Teknik Metalurgi dan Material.
4. Semua dosen beserta karyawan yang ada di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
5. Orang tua Penulis, Irwan R. Osman SE, MM. dan Evi Mariani beserta adik-adik penulis Nur Arief M. dan Nur Khairunnisa yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan materil hingga Penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
6. Uci Nurliana, seluruh Om dan Tante saya, serta para sepupu yang selalu memberi semangat moral untuk Penulis.
7. Teman-teman seperjuangan Yoga, Tezar, dan Mas Alfin yang sangat membantu selama proses pengerjaan Skripsi. Serta Dito dan Andika yang banyak membantu Penulis saat penggunaan alat-alat laboratorium.

8. Mizan, Ari, Untsa, Nia, Ilham, Ashrie, dan Bewe yang selalu memberi support dan doa.
9. SNSD (Seohyun, Taeyeon, YoonA, Yuri, Jessica, Sunny, Hyoyeon, Tiffany dan Sooyoung) serta Running Man (Jongkook, Jaesuk, Gary, Jihyo, Kwangsoo, Sukjin, Haha dan Joongki) yang membuat semangat dan sering menjadi pelepas penat Penulis dalam mengerjakan Skripsi.
10. Teman-teman Metalurgi 2008, yang memberikan pengalaman indah selama masa perkuliahan. Semoga Sukses semua!!
11. Seluruh Senior dan junior Metalurgi yang banyak membantu selama perkuliahan.
12. Seluruh Pihak yang membantu dalam proses pengerjaan Skripsi ini.

Akhir kata, Penulis ingin menghaturkan ucapan termakasih sebesar-besarnya pada seluruh pihak, baik yang telah disebut maupun tidak. Harapannya dengan adanya skripsi ini dapat memicu semangat baik untuk diri penulis maupun untuk semua pihak dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Januari 2012

Penulis

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

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

Nama : Nur Aziz Octoviawan  
NPM : 0806331866  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**Studi Pengaruh Laju Alir Fluida Terhadap Laju Korosi Baja API 5L X-52  
Menggunakan Metode Polarisation Pada Lingkungan NaCl 3.5% Yang  
Mengandung Gas CO<sub>2</sub>**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada Tanggal : 6 Januari 2012

Yang menyatakan



( Nur Aziz Octoviawan )

## ABSTRAK

Nama : Nur Aziz Octoviawan  
NPM : 0806331866  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Laju Alir Fluida Terhadap Laju Korosi Baja API 5L X-52 Menggunakan Metode Polarisasi Pada Lingkungan NaCl 3.5% Yang Mengandung Gas CO<sub>2</sub>

Pengaruh laju aliran pada laju korosi baja API 5L X-52 pada kondisi lingkungan NaCl 3.5% yang mengandung gas CO<sub>2</sub> telah diteliti dengan variasi putaran 0-3000 RPM menggunakan metode polarisasi. Dari hasil penelitian didapatkan laju korosi baja API 5L X-52 berkisar pada 60 s/d 240 mpy. Hasil tersebut dibandingkan dengan kondisi teraerasi dan didapatkan bahwa laju aliran tidak terlalu signifikan dalam menaikkan laju korosi dari baja API 5L X-52 pada kondisi adanya gas CO<sub>2</sub> terlarut akibat adanya lapisan protektif berupa FeCO<sub>3</sub> yang menghambat proses korosi sehingga hal ini juga membuat transport massa tidak terlalu punya pengaruh signifikan terhadap proses.

Kata kunci: Baja karbon, gas CO<sub>2</sub>, laju alir fluida, laju korosi

## ABSTRACT

Name : Nur Aziz Octoviawan  
NPM : 0806331866  
Major : Metallurgy and Material Engineering  
Title : Study Effect of Flow Rate for Corrosion Rate Steel  
API 5L X-52 with Polarization Method On NaCl  
3.5% containing CO<sub>2</sub>

Effect of flow rate for corrosion rate API 5L X-52 steel in NaCl 3.5% which containing CO<sub>2</sub> gas has been studied with rotating speed 0-3000 RPM using polarization method. The result found corrosion rate API 5L X-52 steel is 60 - 240 mpy. This result compare with environment with aeration and found that flow rate insensitive for corrosion rate API 5L X-52 steel in environment with dissolve CO<sub>2</sub> gas because of existence protective film FeCO<sub>3</sub> which inhibit corrosion process. This protective film also contributes for mass transport has not significant effect for corrosion process.

Keywords: Carbon steel, CO<sub>2</sub> corrosion, corrosion rate, fluid flow rate

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB 2 LANDASAN TEORI.....</b>	<b>6</b>
2.1 Pengertian Korosi.....	6
2.2 Jenis-jenis Korosi.....	6
2.3 Pengukuran Laju Korosi.....	8
2.4 Pengaruh Persentase NaCl terhadap Laju Korosi.....	9
2.5 Korosi CO <sub>2</sub> .....	10
2.5.1 Mekanisme Korosi CO <sub>2</sub> .....	11
2.5.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Korosi CO <sub>2</sub> .....	12
2.6 Bilangan Reynold.....	17
2.7 Koefisien Transport Massa.....	18
2.8 <i>Wall Shear Stress</i> .....	19

2.9 Pengukuran Elektrokimia.....	19
2.10 Analisis Laju Korosi .....	20
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>22</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	22
3.2 Alat dan Bahan .....	23
3.2.1 Peralatan .....	23
3.2.2 Bahan.....	23
3.3 Prosedur Kerja.....	23
3.3.1 Preparasi Sampel.....	23
3.3.2 Pembuatan Larutan Elektrolit.....	24
3.3.3 Pengujian Kadar Oksigen Terlarut.....	25
3.3.4 Penginjeksian Gas CO <sub>2</sub> Kedalam Larutan Elektrolit.....	25
3.3.5 Pengujian Komposisi Material .....	25
3.3.6 Pengujian pH Larutan Elektrolit.....	25
3.3.7 Pengujian Laju Korosi Dengan Metode Polarisasi .....	26
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>29</b>
4.1 Pengujian Komposisi Sampel.....	29
4.2 Pengujian pH.....	29
4.3 Pengujian Oksigen Terlarut.....	30
4.4 Bilangan Reynold, Koefisien Transport Massa dan <i>Wall Shear Stress</i> .....	31
4.4.1 Perhitungan Bilangan Reynold .....	31
4.4.2 Perhitungan Koefisien Transport Massa .....	33
4.4.3 Perhitungan <i>Wall Shear Stress</i> .....	33
4.5 Pengujian Laju Korosi dengan Menggunakan Metode Polarisasi....	35
4.5.1 Pengujian Laju Korosi Pada Larutan NaCl yang Teraerasi..	35
4.5.2 Pengujian Laju Korosi Pada Larutan NaCl Mengandung Gas CO <sub>2</sub> .....	37
4.6 Pengujian Transport Massa Menggunakan Plot Logaritmik.....	41

<b>BAB 5 KESIMPULAN.....</b>	<b>45</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>46</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>48</b>



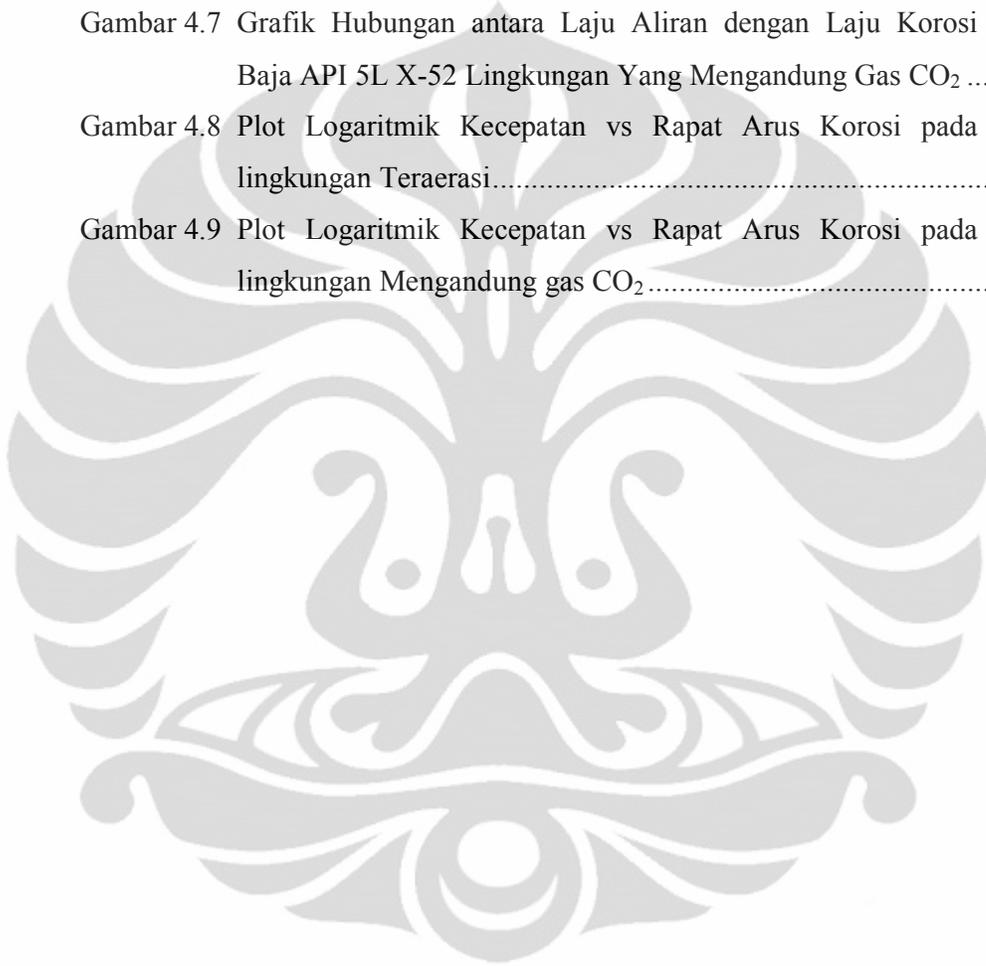
## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel hubungan laju korosi dan ketahanan korosi.....	9
Tabel 4.1 Komposisi Kimia baja API 5L X-52.....	29
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran pH dari Larutan Uji.....	30
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kadar Oksigen Terlarut.....	30
Tabel 4.4 Bilangan Reynold Pada Tiap Kecepatan Aliran .....	31
Tabel 4.5 Nilai Koefisien Transport Massa Pada Tiap Kecepatan di Lingkungan NaCl yang Mengandung Gas CO <sub>2</sub> .....	32
Tabel 4.6 Nilai <i>Wall shear stress</i> Pada Pengujian dengan Variasi Putaran 0-3000 RPM.....	34
Tabel 4.7 Laju Korosi Baja API 5L X-52 Pada Lingkungan NaCl 3.5% Teraerasi .....	36
Tabel 4.8 Laju Korosi Baja API 5L X-52 Pada Lingkungan NaCl 3.5% yang Mengandung Gas CO <sub>2</sub> .....	38

## DAFTAR GAMBAR

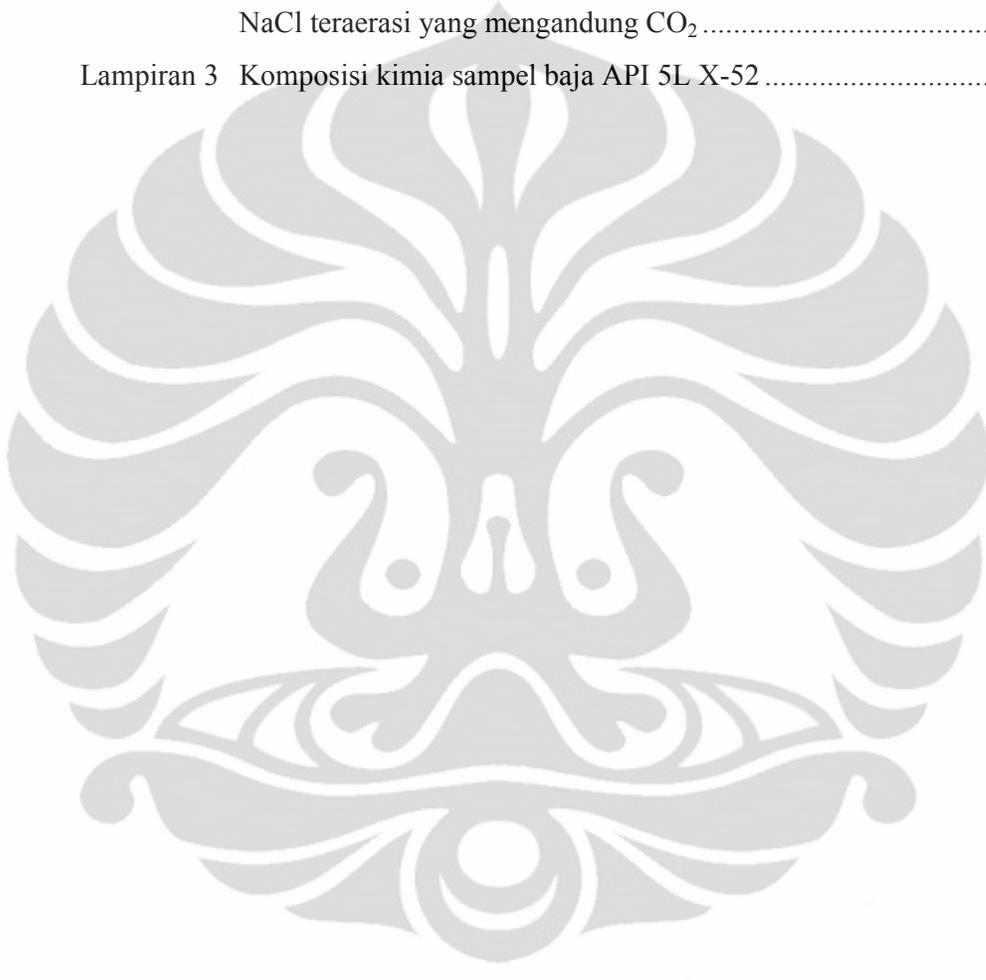
Gambar 2.1 Pengaruh konsentrasi NaCl terhadap laju korosi baja karbon dalam larutan teraerasi .....	10
Gambar 2.2 Grafik pengaruh pH terhadap laju korosi CO <sub>2</sub> .....	13
Gambar 2.3 Efek Derajat Keasaman (pH) terhadap Laju korosi, Laju Pengendapan dan <i>Scaling Tendency</i> .....	13
Gambar 2.4 Grafik Pengaruh Tekanan Parsial Gas CO <sub>2</sub> terhadap Laju Korosi Baja karbon .....	14
Gambar 2.5 Efek Temperatur Terhadap Laju Korosi dan Pengendapan Lapisan Protektif .....	15
Gambar 2.6 Efek Konsentrasi ion Fe <sup>2+</sup> pada Laju Korosi Lingkungan gas CO <sub>2</sub> .....	16
Gambar 2.7 Grafik hubungan laju aliran dengan laju korosi CO <sub>2</sub> .....	17
Gambar 2.8 (a) Contoh Pengujian Linear Polarization Resistance pada variasi Kecepatan Putaran. (b) Plot Grafik Logaritmik Korosi yang dibatasi Transport Massa .....	20
Gambar 2.9 Contoh Hasil Kurva Polarisasi .....	21
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	22
Gambar 3.2 Bentuk Ujung dari Shaft RCE dan Sampel RCE .....	24
Gambar 3.3 Pengujian pH pada Larutan NaCl Teraerasi .....	26
Gambar 3.4 Sel Pengujian Polarisasi Lingkungan Korosi Gas CO <sub>2</sub> .....	27
Gambar 3.5 Mesin <i>Electrode Rotator</i> .....	28
Gambar 4.1 Hubungan antara Kecepatan Putar dengan Bilangan Reynold ...	31
Gambar 4.2 Hubungan Antara Kecepatan Putaran dengan Koefisien Transport Massa .....	33
Gambar 4.3 Hubungan antara Kecepatan Putaran dengan Nilai <i>Wall shear stress</i> .....	34
Gambar 4.4 Kurva Polarisasi Baja API 5L X-52 Pada Lingkungan NaCl 3.5% Teraerasi dengan Variasi Kecepatan Putaran 0-3000 RPM .....	35

Gambar 4.5 Grafik Hubungan antara Laju Aliran dengan Laju Korosi Baja API 5L X-52 Lingkungan Teraerasi.....	36
Gambar 4.6 Kurva Polarisasi Baja API 5L X-52 Pada Lingkungan NaCl 3.5% yang Mengandung Gas CO <sub>2</sub> dengan Variasi Kecepatan Putaran 0-3000 RPM.....	38
Gambar 4.7 Grafik Hubungan antara Laju Aliran dengan Laju Korosi Baja API 5L X-52 Lingkungan Yang Mengandung Gas CO <sub>2</sub> ....	39
Gambar 4.8 Plot Logaritmik Kecepatan vs Rapat Arus Korosi pada lingkungan Teraerasi.....	42
Gambar 4.9 Plot Logaritmik Kecepatan vs Rapat Arus Korosi pada lingkungan Mengandung gas CO <sub>2</sub> .....	43



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Grafik hasil pengujian polarisasi baja karbon dalam larutan NaCl teraerasi .....	49
Lampiran 2	Grafik hasil pengujian polarisasi baja karbon dalam larutan NaCl teraerasi yang mengandung CO <sub>2</sub> .....	52
Lampiran 3	Komposisi kimia sampel baja API 5L X-52 .....	55



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, sumber energi selain minyak bumi mulai coba untuk dieksplorasi. Hal ini terkait dengan menipisnya cadangan minyak bumi. Salah satu sumber yang mulai banyak digunakan sebagai alternatif adalah gas alam. Eksplorasi gas alam saat ini memiliki beberapa hal yang cukup baik, diantaranya energi yang dihasilkan gas alam lebih efisien dan biaya investasi pembangkit listrik menjadi lebih ekonomis.

Melihat cadangan gas alam di Indonesia, yang hingga tahun 2008 jumlahnya sebesar 170 TSCF dan produksi per tahun mencapai 2,87 TSCF, maka dengan rasio produksi terhadap cadangan yang masih sangat kecil ini gas alam masih sangat potensial untuk memenuhi kebutuhan akan energi dalam jangka waktu yang masih cukup panjang. Beberapa penelitian mengungkapkan bahwa cadangan tersebut masih dapat bertahan hingga 59 tahun lagi. Angka tersebut masih mungkin akan mengalami peningkatan apabila ditemukan sumur-sumur gas alam yang baru<sup>[16]</sup>.

Proses eksplorasi gas alam ini tentunya juga mengalami berbagai masalah-masalah dalam prosesnya. Salah satu yang cukup memiliki efek besar adalah korosi yang terjadi pada material yang digunakan untuk proses eksplorasi. Hal ini tak bisa dihindari karena tentunya suatu material yang kontak dengan lingkungan umumnya akan mengalami korosi. Pada lingkungan eksplorasi gas alam, lingkungan akan sangat korosif karena didalam gas alam terkandung gas-gas, diantaranya gas H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub>, yang kehadirannya akan mempercepat korosi pada logam terjadi.

Gas CO<sub>2</sub> sebagai salah satu gas yang paling banyak terkandung didalam gas alam tentunya akan mendorong terjadinya korosi yang disebabkan CO<sub>2</sub>. Gas CO<sub>2</sub> akan menjadi sangat korosif ketika gas ini berinteraksi dengan fasa liquid ataupun air sehingga gas tersebut akan terlarut didalamnya. dengan terlarutnya gas CO<sub>2</sub> didalam air, maka akan terbentuk suatu lingkungan korosif yang disebut *sweet environment*<sup>[8]</sup>. Dengan lingkungan tersebut, maka material akan mengalami proses korosi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> *Corrosion*). Korosi CO<sub>2</sub> ini akan menghasilkan produk berupa FeCO<sub>3</sub> yang dapat

mengendap di permukaan material. Dengan terendapnya produk korosi tersebut, maka laju korosi akan menurun karena kontak material dengan lingkungan terhambat.

Pada pengolahan gas alam yang berada pada daerah lepas pantai (*offshore*), air laut merupakan suatu larutan yang tidak bisa dihindari. Pada proses penyaluran gas alam, air laut merupakan media penyaluran gas alam hasil produksi dari sumur-sumur yang ada. Oleh karena itu, air laut sebagai media pada penyaluran gas alam harus benar-benar diperhatikan dalam pengendalian korosi akibat gas CO<sub>2</sub>.

Pada saat proses transportasi, gas alam dipompa sehingga mengalir melalui pipa-pipa transmisi. Pada saat proses tersebut, aliran akan memiliki kecepatan tertentu. Kecepatan dari fluida ini juga memiliki pengaruh terhadap proses korosi yang terjadi pada pipa-pipa transmisi tersebut<sup>[7]</sup>. Oleh karena itulah, kecepatan aliran fluida perlu diperhatikan untuk dapat mengendalikan proses korosi pada material pipa *flow line* dan *pipeline*. Penelitian mengenai pada lingkungan yang mengandung gas CO<sub>2</sub> ini merupakan lanjutan dari rangkaian penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya oleh Bapak Ir. Andi Rustandi MT. dan Dito Iandono ST. yaitu mengenai pengaruh salinitas terhadap laju korosi pada korosi CO<sub>2</sub><sup>[8]</sup>.

## 1.2 Perumusan Masalah

Pada pengolahan gas alam, korosi pada alat-alat proses menjadi salah satu kendala yang dihadapi saat ini. Dengan terkandungnya gas CO<sub>2</sub> didalamnya, maka proses korosi akan semakin cepat dibandingkan dengan desain umur pakai dari material tersebut.

Saat ini, baja karbon rendah merupakan material yang paling umum digunakan sebagai material pipa penyalur gas untuk gas alam. Untuk digunakan sebagai material pipa, maka baja tersebut harus mengikuti standar yang ditetapkan yaitu Standar API 5L *Specification for Line Pipe*. Penggunaan baja karbon pada lingkungan gas alam sangat rentan mengalami korosi, dimana pipa akan mengalami kebocoran akibat pengaruh adanya gas CO<sub>2</sub> yang terlarut dalam air dan akan menyebabkan lingkungan bersifat korosif. Pada *internal pipeline* seringkali terjadi masalah *top of line corrosion* karena adanya air yang terkondensasi.

Kecepatan alir suatu fluida dapat memberikan efek terhadap kecepatan korosi suatu logam. Aliran dapat memberikan efek korosi secara mekanis dan juga elektrokimia. Secara mekanis, aliran dapat mengakibatkan tergerusnya material. Selain itu, dengan adanya perputaran akan membuat CO<sub>2</sub> akan semakin mudah untuk sampai ke permukaan material sehingga akan mempercepat laju korosi dari material tersebut<sup>[6]</sup>.

Pada penelitian ini, faktor-faktor diatas akan dikombinasikan dan diharapkan akan memberikan simulasi terhadap laju korosi dari baja karbon rendah yang berada pada lingkungan CO<sub>2</sub> dengan adanya laju aliran fluida. Lingkungan akan dibuat dengan menginjeksikan gas CO<sub>2</sub> pada larutan elektrolit, sedangkan untuk laju alir fluida akan disimulasikan dengan menggunakan alat berupa pemutar sampel *Rotating Cylinder Electrode* (RCE) dengan rentang kecepatan putaran 0 s/d 3000 RPM. Harapannya, penelitian ini dapat memberikan pengetahuan mengenai laju korosi dari material terhadap kombinasi ketiga faktor tersebut.

### 1.3 Tujuan Percobaan

Tujuan dari penelitian ini adalah :

- a. Mengetahui dan menganalisa hubungan antara kecepatan putaran yang dikonversi menjadi laju alir fluida terhadap kecepatan korosi baja karbon rendah API 5L X-52.
- b. Mengetahui dan menganalisa perilaku dan ketahanan produk korosi berupa lapisan FeCO<sub>3</sub> terhadap laju alir fluida.

### 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Pada penelitian ini, material yang digunakan berupa baja karbon rendah API 5L X-52 yang berbentuk silinder. Larutan elektrolit yang digunakan adalah larutan NaCl dengan kadar 3.5% dan diinjeksikan gas CO<sub>2</sub> dengan tekanan 1 atm selama 1 jam. Simulasi kecepatan putaran dilakukan dengan menggunakan *Rotating Cylinder Electrode* (RCE). Untuk pengujian laju korosi dan kurva polarisasi menggunakan *software* Gamry Framework 5.06.

Pada penelitian ini digunakan beberapa variabel, baik tetap maupun tidak tetap, dengan tujuan untuk menjadikan faktor pembanding dari hasil dan dapat digunakan untuk melihat pengaruh dari faktor-faktor diatas terhadap laju korosi. Adapun variabelnya adalah sebagai berikut :

- a. Variabel tetap
  1. Material yang digunakan ( baja karbon rendah API 5L X-52)
  2. Larutan elektrolit ( larutan NaCl 3.5%)
  3. Temperatur larutan ( $\pm 25^{\circ}\text{C}$ )
  4. pH larutan = 5
- b. Variabel tidak tetap
  1. Kecepatan putaran silinder ( 0 RPM , 375 RPM, 750 RPM, 1500 RPM dan 3000 RPM)

### **1.5 Sistematika Penulisan**

Dalam penulisan ini, sistematika penulisan disusun agar konsep dalam penulisan skripsi menjadi berurutan sehingga akan didapat kerangka alur pemikiran yang mudah dan praktis. Sistematika tersebut dapat diartikan dalam bentuk bab-bab yang saling berkaitan. Bab-bab tersebut diantaranya :

#### **a) Bab 1 Pendahuluan**

Membahas mengenai latar belakang penulisan, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkung penelitian, dan sistematika penulisan.

#### **b) Bab 2 Landasan Teori**

Membahas mengenai teori korosi secara umum baik pengertian, maupun termodinamika, serta laju korosi, pengenalan gas alam, korosi  $\text{CO}_2$ , mekanisme korosi  $\text{CO}_2$  dan faktor-faktor yang mempengaruhi korosi  $\text{CO}_2$ .

#### **c) Bab 3 Metodologi Penelitian**

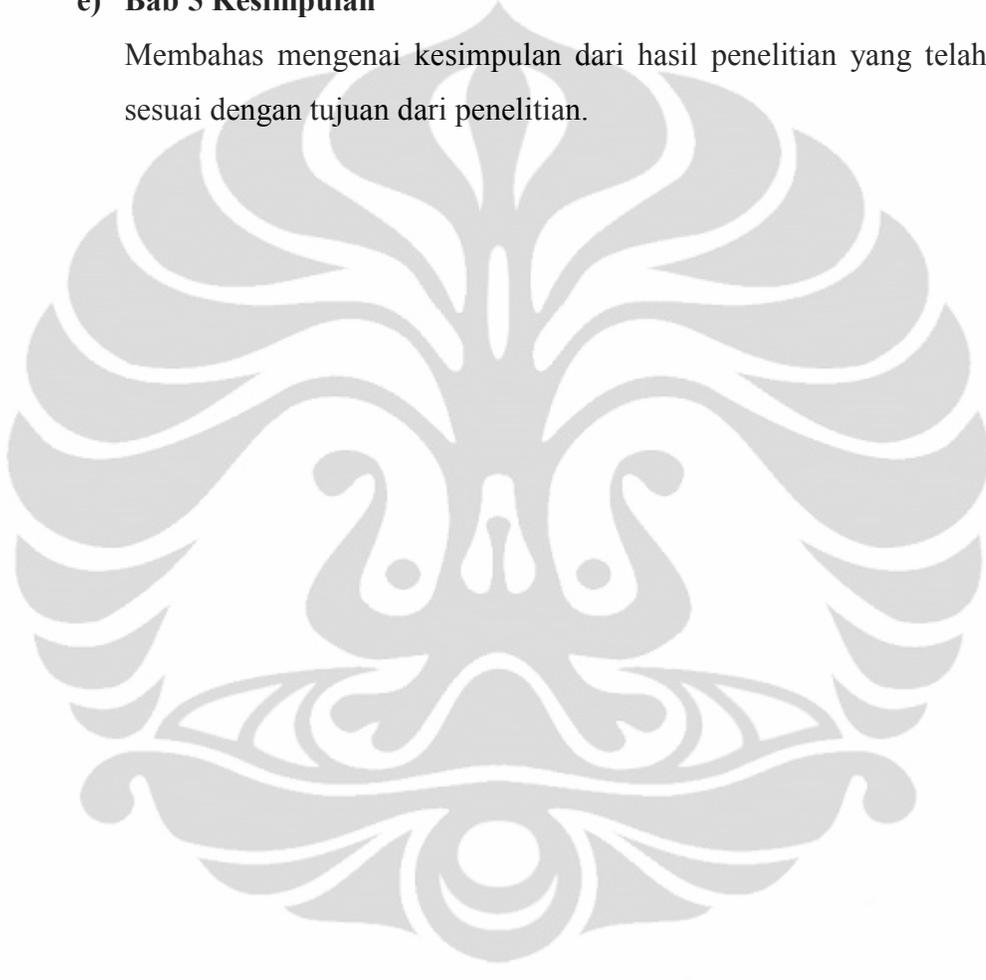
Membahas mengenai diagram alir penelitian, alat dan bahan yang diperlukan untuk penelitian, dan prosedur penelitian.

**d) Bab 4 Hasil dan Pembahasan**

Membahas mengenai pengolahan data yang didapat dari penelitian serta menganalisa hasil penelitian baik berupa angka, gambar, dan grafik, serta membandingkan dengan teori dan literatur.

**e) Bab 5 Kesimpulan**

Membahas mengenai kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan sesuai dengan tujuan dari penelitian.



## BAB 2 LANDASAN TEORI

### 2.1 Pengertian Korosi

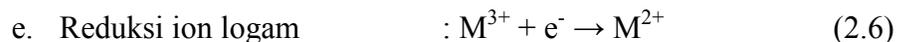
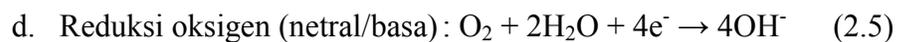
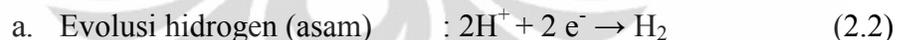
Korosi merupakan proses penurunan kemampuan suatu material (degradasi material) yang diakibatkan oleh reaksi kimia dengan material lain dan lingkungan.<sup>[2]</sup> Ada beberapa elemen yang harus ada dalam sebuah mekanisme korosi, hal-hal tersebut adalah sebagai berikut<sup>[10]</sup> :

1. Terdapat anoda sebagai tempat terjadinya oksidasi, yang merupakan proses korosi terjadi
2. Terdapatnya katoda sebagai daerah dimana terjadi reaksi reduksi dengan menerima elektron hasil proses oksidasi
3. Terdapatnya elektrolit sebagai tempat elektron bergerak, yang menghubungkan antara katoda dan anoda.
4. Terdapatnya arus

Proses korosi terjadi berdasarkan prinsip elektrokimia, mekanisme elektrokimia yaitu terjadi reaksi oksidasi (anodik) dan reduksi (katodik). Adapun reaksi yang terjadi pada katoda dan anoda adalah sebagai berikut<sup>[2]</sup> :



Katoda :



### 2.2 Jenis-Jenis Korosi

Korosi memiliki beberapa jenis yang terjadi di kehidupan sehari-hari. Jenis-jenis ini dipengaruhi oleh berbagai faktor yang menyebabkan berbeda – beda bentuk korosi baik dari segi proses, mekanisme, kondisi, lingkungan sekitar, dan berbagai

faktor lainnya. Adapun jenis korosi dimaksud adalah sebagai berikut<sup>[2]</sup> :

1. Korosi Merata

Jenis korosi ini adalah korosi yang terjadi merata dipermukaan. Jenis ini merupakan yang paling umum ditemui di sehari-hari. Korosi ini mudah diprediksi karena kecepatan atau laju korosi di setiap permukaan adalah sama.

2. Korosi Galvanik

Jenis ini diakibatkan oleh adanya dua logam atau lebih yang memiliki potensial reduksi berbeda yang terhubung secara elektrik. Dari kasus tersebut, maka korosi akan menyerang logam yang memiliki potensial reduksi yang lebih kecil.

3. Korosi Celah (*Crevice*)

Korosi ini terjadi karena terdapat celah antara 2 logam sejenis yang digabungkan. Akibat adanya perbedaan konsentrasi oksigen maka akan menyebabkan terjadinya korosi.

4. Korosi Sumuran (*Pitting*)

Korosi yang terjadi akibat rusaknya lapisan pasif di satu titik karena pengaruh dari lingkungan korosif. Contoh lingkungan korosif tersebut seperti pada air laut. Air laut yang mengandung Ion  $Cl^-$  akan menyerang lapisan pasif dari logam. Ketika terjadi permulaan *pitting* pada satu titik di permukaan lapisan pasif, maka ion  $Cl^-$  akan terkonsentrasi menyerang pada permukaan lapisan pasif yang terjadi *pitting* terlebih dahulu sehingga *pitting* akan menjadi dalam. Pecahnya lapisan pasif mengakibatkan gas hidrogen dan oksigen mudah masuk dan mengakibatkan korosi pada material tersebut.

5. Korosi Retak Tegang (*Stress Corrosion Cracking*)

Korosi terjadi karena adanya tegangan beban tarik pada suatu material di lingkungan korosif. Ketika material mengalami korosi, maka kemampuan dari material tersebut akan berkurang, sehingga ketika bagian terkorosi tersebut diberi beban akan mengalami retak, retak tersebut akan menjalar dan menyebabkan terjadinya kegagalan pada material. Ciri-ciri dari SCC adalah retaknya yang membentuk seperti serabut.

#### 6. Korosi Erosi

Korosi yang terjadi karena adanya fluida korosif yang mengalir pada permukaan material. Fluida tersebut dapat berupa fluida liquid maupun gas dengan kecepatan tinggi. Karena kecepatan tinggi dari fluida korosif yang mengalir, terjadi efek keausan mekanis atau abrasi. Lapisan pasif atau pun *coating* pada permukaan material akan terkikis, sehingga kemungkinan terjadinya korosi semakin besar.

#### 7. *Hydrogen Induced Cracking* (HIC)

Korosi terjadi karena adanya tegangan internal pada suatu material karena adanya molekul-molekul gas hidrogen yang berdifusi ke dalam struktur atom logam. Hidrogen dapat terbentuk akibat reduksi  $H_2O$  ataupun dari asam. Penetrasi hidrogen ini akan menyebabkan korosi pada material, dan kemudian terjadi perpatahan getas.

#### 8. Korosi batas butir (*intergranular*)

Umumnya terjadi karena adanya pengaruh sensitasi, dimana pada batas butir paduan kromium akan tertarik membentuk kromium karbida. Dengan berkurangnya kandungan krom disekitar batas butir akan mengakibatkan bagian tersebut menjadi lebih rentan terhadap korosi dan terjadilah korosi disepanjang batas butir.

### 2.3 Pengukuran Laju Korosi

Laju korosi merupakan ukuran dari banyaknya logam yang dilepas tiap satuan waktu pada permukaan tertentu. Dengan mengetahui laju korosi dari suatu material, maka diharapkan dapat digunakan untuk memprediksi umur pakai dari material tersebut. Laju korosi memiliki beberapa jenis satuan, umumnya dinyatakan dengan satuan *mils per year* (mpy). Laju korosi dapat ditentukan dengan berbagai cara, diantaranya dengan metode *weight loss* dan ekstrapolasi kurva tafel.

Semakin besar nilai laju korosi maka semakin cepat proses korosi pada material tersebut terjadi. Pada tabel 2.1 berikut dapat dilihat hubungan laju korosi dengan ketahanan korosinya (relatif).

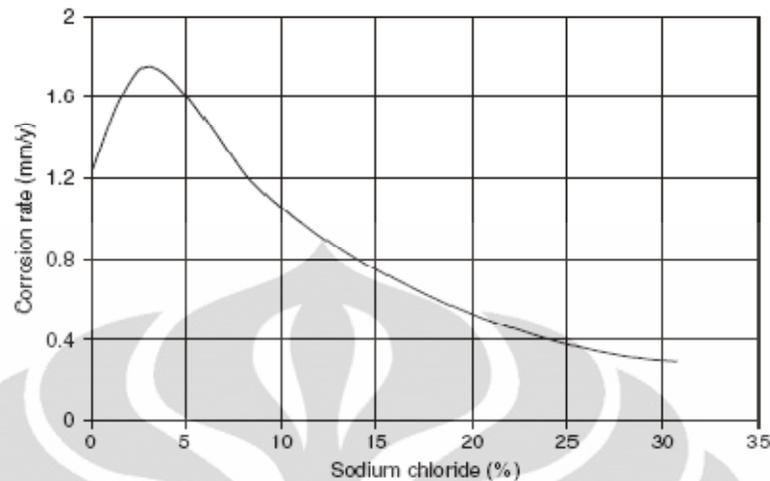
**Tabel 2.1** Tabel hubungan laju korosi dan ketahanan korosi <sup>[2]</sup>

Relative Corrosion Resistance <sup>a</sup>	mpy	mm/yr	µm/yr	nm/h	µm/s
Outstanding	< 1	< 0.02	< 25	< 2	< 1
Excellent	1-5	0.02-0.1	25-100	2-10	1-5
Good	5-20	0.1-0.5	100-500	10-50	20-50
Fair	20-50	0.5-1	500-1000	50-150	20-50
Poor	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200
Unacceptable	200+	5+	5000+	500+	200+

#### 2.4 Pengaruh Persentase NaCl terhadap Laju Korosi Logam

Pada suatu larutan yang mengandung garam NaCl, maka garam tersebut akan menjadi anion dan kation. Ion-ion tersebut membuat larutan akan memiliki sifat konduktifitas dan berdampak pada laju korosi yang semakin tinggi akibat semakin mudahnya lingkungan menghantarkan elektron.

Selain itu, kadar dari NaCl didalam larutan juga berdampak pada kelarutan gas oksigen didalam larutan tersebut. Dimana semakin tingginya kadar NaCl akan membuat kelarutan oksigen akan semakin sedikit. Hal ini berdampak pada laju korosi pada larutan NaCl teraerasi, dimana pada kadar 3-3.5% NaCl merupakan batas optimal dari laju korosi pada lingkungan yang mengandung NaCl. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.1



**Gambar 2.1** Pengaruh konsentrasi NaCl terhadap laju korosi baja karbon dalam larutan teraerasi<sup>[2]</sup>

## 2.5 Korosi CO<sub>2</sub>

Gas CO<sub>2</sub> yang terlarut didalam media air maupun larutan akan membentuk suatu lingkungan korosif, yang dikenal dengan *sweet environment*. Karakteristik dari lingkungan ini adalah memiliki sifat asam sehingga akan membuat laju korosi dari suatu material akan semakin cepat.

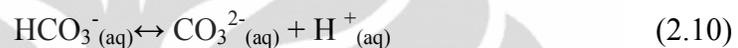
Pada kondisi kering, gas ini tidak bersifat korosif. Akan tetapi ketika gas tersebut terlarut di media air, maka gas tersebut akan membentuk asam karbonat (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) yang mudah terurai<sup>[12]</sup>. Dengan mudahnya senyawa tersebut terurai akan membuat reaksi oksidasi pada lingkungan tersebut menjadi sangat besar yang menyebabkan laju korosi pada material di lingkungan tersebut menjadi sangat mudah terkorosi. Pada kasus di lapangan, korosi CO<sub>2</sub> ini sangat banyak ditemukan pada industri pengolahan gas alam, karena pada umumnya gas alam memiliki kandungan CO<sub>2</sub> yang tinggi. Dari sudut pandang ekonomi, kerusakan pada industri minyak dan gas disebabkan oleh kasus korosi gas CO<sub>2</sub> yang mana umumnya terjadi pada material baja karbon dan paduan rendah<sup>[9]</sup>.

### 2.5.1 Mekanisme Korosi CO<sub>2</sub>

Mekanisme korosi CO<sub>2</sub> yang terlarut dalam air akan terhidrasi lalu membentuk senyawa asam karbonat. Adapun reaksi kimia dari proses tersebut dapat dilihat pada persamaan dibawah ini<sup>[9]</sup>:



Asam karbonat yang terbentuk akan terdisosiasi seperti pada reaksi berikut



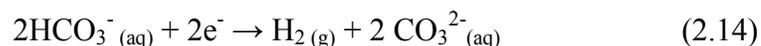
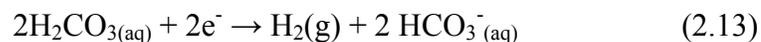
Korosi CO<sub>2</sub> pada intinya merupakan masalah korosi yang disebabkan oleh asam karbonat. CO<sub>2</sub> menjadi bersifat korosif akibat adanya air sehingga akan membentuk asam karbonat.

Jika korosi CO<sub>2</sub> dapat dikategorikan sebagai korosi yang diakibatkan oleh asam lemah, dimana baja terkorosi akibat reduksi dari H<sup>+</sup> dan oksidasi dari Fe, seharusnya dari reaksi di atas tingkat korosif dari CO<sub>2</sub> sangat lemah, hal ini dikarenakan tingkat disosiasi yang rendah. Namun nyatanya, tingkat korosif dari asam karbonat adalah lebih tinggi dari nilai dari reaksi diatas. Pada pH tertentu, korosi yang terjadi pada baja lebih banyak disebabkan oleh larutan cair yang mengandung CO<sub>2</sub> dibandingkan dengan HCl. Dari hasil eksperimen diketahui bahwa ion hidrogen merupakan unsur korosif utama dalam korosi CO<sub>2</sub><sup>[8]</sup>.

Secara umum reaksi yang terjadi pada lingkungan gas CO<sub>2</sub> adalah sebagai berikut<sup>[6]</sup>:



Katoda:



Pada lingkungan gas CO<sub>2</sub>, pH mempunyai peranan penting dalam menentukan reaksi katodik yang dominan. Terlihat pada mekanisme diatas, katoda memiliki 2 macam reaksi. Reaksi tersebut ditentukan oleh pH dari lingkungan. Pada pH dibawah

4, reaksi katodik yang dominan adalah reaksi reduksi dari hidrogen. Sedangkan untuk pH diatas 4, yang terjadi adalah reaksi reduksi dari asam karbonat akan jadi lebih dominan.

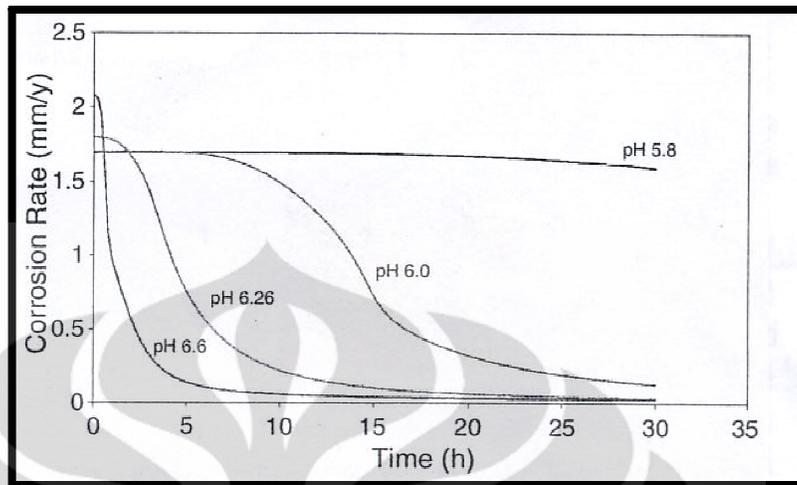
Pada korosi  $\text{CO}_2$ , reaksi korosi yang terjadi akan menghasilkan  $\text{FeCO}_3$  sebagai produk korosi<sup>[1]</sup>. Produk ini akan mengendap pada permukaan material sehingga akan mencegah terjadinya korosi lanjutan karena material akan dihalangi oleh lapisan tersebut untuk kontak dengan lingkungan. Dengan semakin meningkatnya pH akan membuat tingkat kelarutan dari  $\text{FeCO}_3$  semakin menurun sehingga akan mengakibatkan laju pengendapan yang tinggi<sup>[3]</sup>.

### **2.5.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pada Korosi $\text{CO}_2$**

Pada korosi yang melibatkan gas  $\text{CO}_2$  yang terlarut didalam air, ada beberapa hal yang mempengaruhi besaran dari laju korosi. Hal tersebut adalah pH, temperatur, tekanan parsial gas  $\text{CO}_2$ , konsentrasi ion  $\text{Fe}^{2+}$  dan kecepatan aliran fluida<sup>[6]</sup>. Faktor-faktor tersebut mempengaruhi dari segi kinetika reaksi dan efek pembentukan lapisan protektif yang membuat laju korosi pada  $\text{CO}_2$  menjadi sulit untuk diprediksi secara pasti.

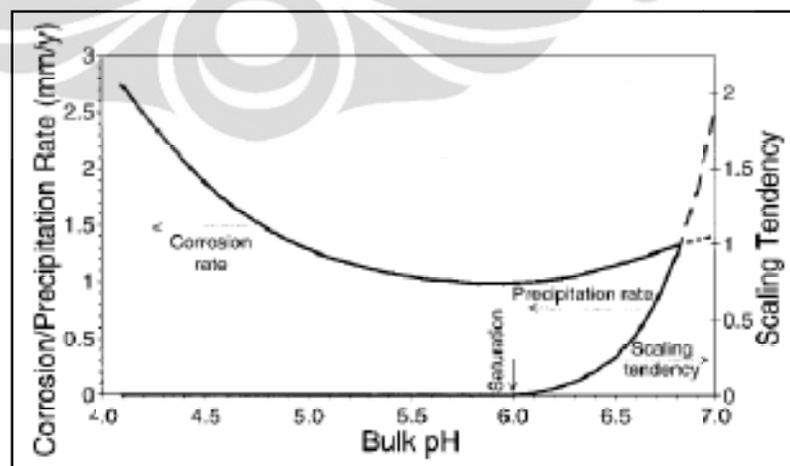
#### **1. Efek pH**

Pada umumnya, semakin tingginya nilai pH akan memperkecil nilai laju korosi. Nilai pH mempengaruhi korosi disebabkan oleh menurunnya nilai konsentrasi dari ion  $\text{H}^+$ . Secara umum, pengaruh pH terhadap laju korosi dapat dilihat pada gambar 2.2



**Gambar 2.2** Grafik pengaruh pH terhadap laju korosi  $\text{CO}_2$ <sup>[11]</sup>

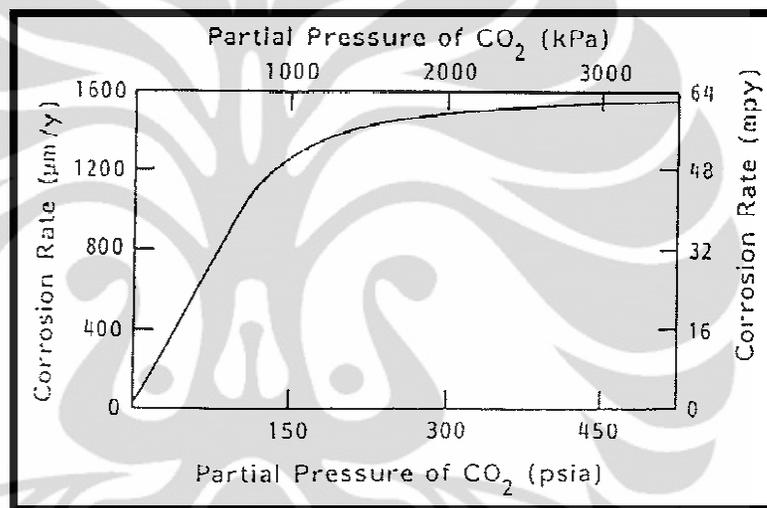
Selain itu faktor pH memegang peranan penting dalam pembentukan endapan  $\text{FeCO}_3$ . Semakin tingginya nilai pH dari larutan akan menurunkan kelarutan dari  $\text{FeCO}_3$  sehingga kemungkinan terjadinya pengendapan yang bersifat protektif tersebut akan semakin besar. Dengan semakin tingginya jumlah lapisan  $\text{FeCO}_3$  akan menurunkan laju korosi material dalam lingkungan yang mengandung  $\text{CO}_2$ . Pada Gambar 2.3 dapat dilihat efek dari pH terhadap pengendapan  $\text{FeCO}_3$  yang berdampak pada laju korosi dari material.



**Gambar 2.3** Efek Derajat Keasaman (pH) terhadap Laju korosi, Laju Pengendapan dan *Scaling Tendency*<sup>[11]</sup>

## 2. Efek Tekanan Parsial Gas CO<sub>2</sub>

Pada kasus dimana tidak ada pengendapan lapisan protektif FeCO<sub>3</sub>, maka tekanan parsial dari gas CO<sub>2</sub> dapat meningkatkan laju korosi dari material di lingkungan yang mengandung gas CO<sub>2</sub>. Dengan semakin tingginya nilai tekanan parsial dari gas CO<sub>2</sub> akan meningkatkan nilai konsentrasi dari ion CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> yang dapat terproduksi<sup>[6]</sup>. Secara umum, pengaruh dari tekanan parsial gas CO<sub>2</sub> terhadap laju korosi dapat dilihat pada gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Grafik pengaruh tekanan parsial CO<sub>2</sub> terhadap laju korosi baja karbon<sup>[11]</sup>.

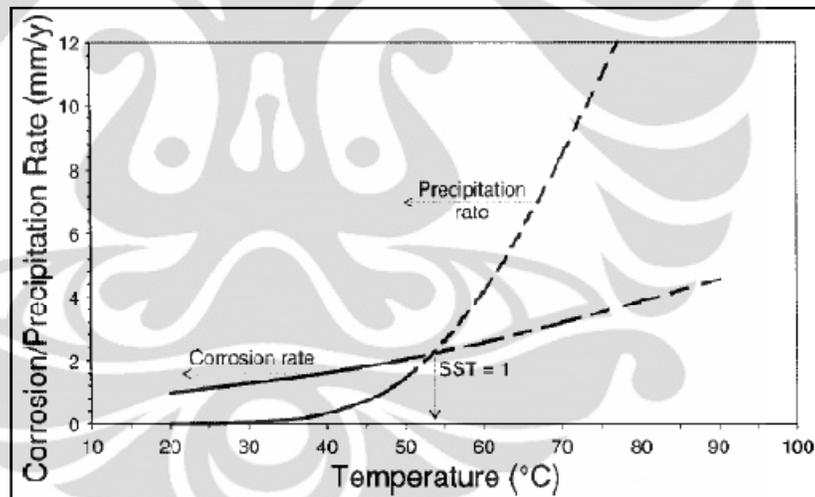
## 3. Efek Temperatur

Temperatur memiliki pengaruh terhadap kondisi dari pembentukan lapisan protektif berupa besi karbonat. Pada temperature rendah, umumnya evolusi hidrogen merupakan reaksi dominan dan endapan FeCO<sub>3</sub> tidak terbentuk dengan baik. Pengaruh temperatur terhadap pembentukan lapisan endapan FeCO<sub>3</sub> adalah sebagai berikut :

1. Pada kondisi temperatur dibawah 75°C, laju pembentukan lapisan FeCO<sub>3</sub> berlangsung lambat dan memiliki keefektifan proteksi yang rendah.

2. Pada temperatur antara 75°C sampai 100°C, reaksi pengendapan mulai mempengaruhi reaksi korosi. Akibat dari reaksi pembentukan ini, beberapa penelitian menyimpulkan bahwa laju korosi maksimum baja karbon pada lingkungan yang mengandung CO<sub>2</sub> terjadi pada temperatur 60 °C- 70 °C.
3. Pada temperatur tinggi, >100°C, pengendapan berlangsung dengan sangat cepat. Ion-ion Fe yang dilepas oleh reaksi korosi dengan cepat terendapkan kembali pada permukaan baja karbon membentuk lapisan protektif.

Pada gambar 2.5 dapat dilihat hubungan antara temperatur dengan laju pengendapan lapisan yang berdampak pada laju korosi di lingkungan gas CO<sub>2</sub>.

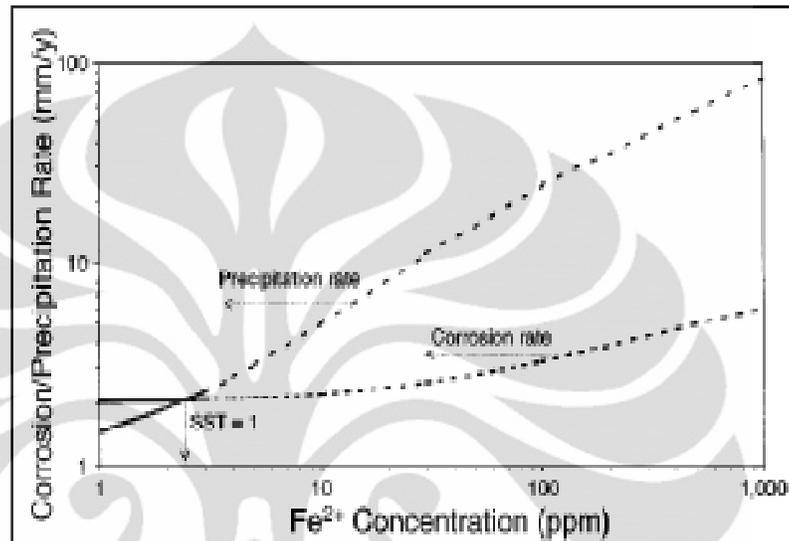


**Gambar 2.5** Efek Temperatur Terhadap Laju Korosi dan Pengendapan Lapisan Protektif<sup>[11]</sup>

#### 4. Efek Konsentrasi Ion Fe<sup>2+</sup>

Efek dari konsentrasi ion Fe<sup>2+</sup> adalah mempengaruhi terhadap kemampuan pembentukan lapisan besi karbonat. Lapisan padat besi karbonat dapat terbentuk pada permukaan logam baja apabila konsentrasi dari ion Fe<sup>2+</sup> dan CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> pada larutan yang mengandung CO<sub>2</sub> melebihi batas kelarutan. Pada

Gambar 2.6 dibawah ini dapat dilihat pengaruh dari konsentrasi ion Fe dimana secara lebih signifikan akan meningkatkan laju presipitasi yang akan berdampak pada menurunnya laju korosi akibat terbentuknya lapisan pasif di permukaan logam.



**Gambar 2.6** Efek Konsentrasi ion Fe<sup>2+</sup> pada Laju Korosi Lingkungan gas CO<sub>2</sub><sup>[11]</sup>

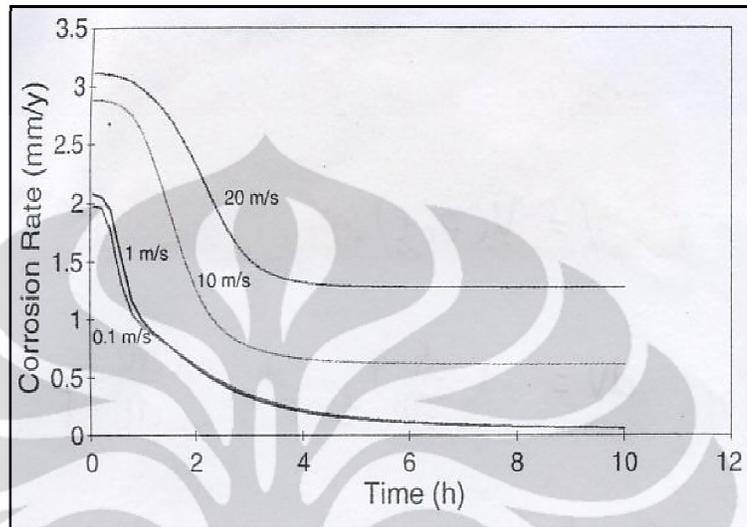
### 5. Efek Laju Aliran Fluida

Pada korosi CO<sub>2</sub>, aliran mempengaruhi proses korosi merupakan kombinasi antara efek mekanis dan elektrokimia. Aliran akan menghasilkan lapisan yang lebih tipis karena akan mengurangi tingkat kejenuhan sehingga akan mempermudah gas karbon dioksida yang terlarut untuk membuat material terkorosi<sup>[6]</sup>.

Selain itu proses dari transport massa dan muatan yang yang sehingga akan berpengaruh pada kinetika proses korosi dalam lingkungan tersebut lebih cepat dengan adanya putaran akan membuat laju korosi semakin tinggi.

Disamping itu, ada pengaruh dari gaya mekanis berupa adanya *wall shear stress* pada antarmuka elektrolit dengan permukaan material yang memicu

terjadinya korosi lokal dan kerusakan pada permukaan material. Pada gambar 2.7 dibawah dapat dilihat pengaruh kecepatan terhadap laju korosi.



Gambar 2.7 Grafik hubungan laju aliran dengan laju korosi CO<sub>2</sub><sup>[11]</sup>

## 2.6 Bilangan Reynold

Pada korosi CO<sub>2</sub>, salah satu faktor yang punya pengaruh terhadap laju korosi adalah laju aliran fluida. Laju aliran ini akan berkaitan erat dengan profil aliran, dimana dapat dikarakterisasi dengan menggunakan bilangan Reynold (*Reynold's Number*). Dengan laju aliran yang rendah akan menghasilkan profil aliran yang laminar, sedangkan untuk kecepatan tinggi profil aliran akan bersifat turbulen. Secara matematis, bilangan Reynold didefinisikan sebagai berikut<sup>[4]</sup> :

$$Re = U_{cyl} d_{cyl} \rho / \mu \quad (2.15)$$

Dimana  $\rho$  adalah berat jenis larutan ( $g\ cm^{-3}$ ) dan  $\mu$  adalah viskositas absolut (dinamik,  $g/cm\ s$ ). sedangkan untuk  $U_{cyl}$  adalah kecepatan linier dari permukaan luar. Kecepatan linear ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$U_{cyl} = \omega r_{cyl} = \pi d_{cyl} F / 60 \quad (2.16)$$

Dimana laju alir dapat diekspresikan dengan  $\omega$  (rad /s), atau dengan  $F$  (RPM) dan  $d_{cyl}$  merupakan diameter luar dari sampel.

Pada sampel berbentuk silinder, umumnya dengan bilangan Reynold dibawah 200, profil aliran akan bersifat laminar sedangkan untuk diatas 200 maka akan terbentuk turbulen<sup>[7]</sup>.

## 2.7 Koefisien Transport Massa

Terkait kecepatan putaran, hal lain yang memiliki pengaruh pada proses korosi adalah koefisien transport massa. Pada ilmu korosi transport massa mempunyai peranan penting dalam hal menentukan laju korosi. Pada korosi CO<sub>2</sub>, hal ini berkaitan dengan bagaimana aliran dari fluida dapat membawa material sampai ke permukaan logam dan sebaliknya. Secara matematis, koefisien transport massa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Eisenberg, sebagai berikut<sup>[4]</sup> :

$$\begin{aligned} K_m &= (D / d_{cyl}) Sh & (2.17) \\ &= (D / d_{cyl}) (0.0791 Re^{0.7} Sc^{0.356}) \end{aligned}$$

Dimana  $D$  (cm<sup>2</sup>/s), adalah koefisien difusi untuk molekul atau ion yang berlangsung pada transport massa, dan  $Sh$  dan  $Re$  merupakan *Sherwood Number* dan *Reynold's Number*. Adapun  $Sc$  adalah *Schmidt Number* yang didapat dari;

$$SC = \mu / (\rho D) \quad (2.18)$$

Dengan mengkombinasikan secara substitusi dan eliminasi persamaan diatas, maka bisa didapatkan persamaan perumusan koefisien tranport massa sebagai berikut<sup>[4]</sup>:

$$K_m = 0.0791 d_{cyl}^{-0.3} (\mu / \rho)^{-0.344} D^{+0.644} U_{cyl}^{+0.7} \quad (2.19)$$

$$K_m = 0.0487 d_{cyl}^{+0.4} (\mu / \rho)^{-0.344} D^{+0.644} \omega^{+0.7} \quad (2.20)$$

$$K_m = 0.0051 d_{cyl}^{+0.4} (\mu / \rho)^{-0.344} D^{+0.644} F^{+0.7} \quad (2.21)$$

Ketiga persamaan ini dapat digunakan sesuai dengan satuan kecepatan yang digunakan. Dengan demikian dapat diketahui besar dari koefisien transport massa pada proses korosi yang melibatkan laju aliran.

## 2.8 Wall Shear Stress

Terbentuknya aliran, maka antara permukaan silinder sampel dan aliran turbulen RCE menyebabkan *wall shear stress* pada permukaan silinder. Berdasarkan pengamatan Eisenberg, dapat dihitung besar *wall shear stress* dengan persamaan ini ;

$$\tau_{cyl} = 0.0791 \rho Re^{-0.3} U_{cyl}^2 \quad (2.22)$$

Semakin besar nilai *wall shear stress* ini akan memperbesar gerusan dari lapisan FeCO<sub>3</sub> dan akan memperbesar laju korosi dari material.

## 2.9 Pengukuran Elektrokimia

Pada pengujian polarisasi menggunakan RCE, maka laju korosi dihitung dengan cara mengukur arus elektrik pada silinder. Untuk itu, dibutuhkan kontak antara *shaft* pada RCE dengan silinder sampel yang akan diukur sehingga akan terjadi kontak elektrik dan dapat dilakukan pengukuran arus elektrik pada silinder.

Pada umumnya, transport massa akan membatasi rapat arus, seperti yang dikemukakan pada persamaan dibawah ini<sup>[4]</sup>:

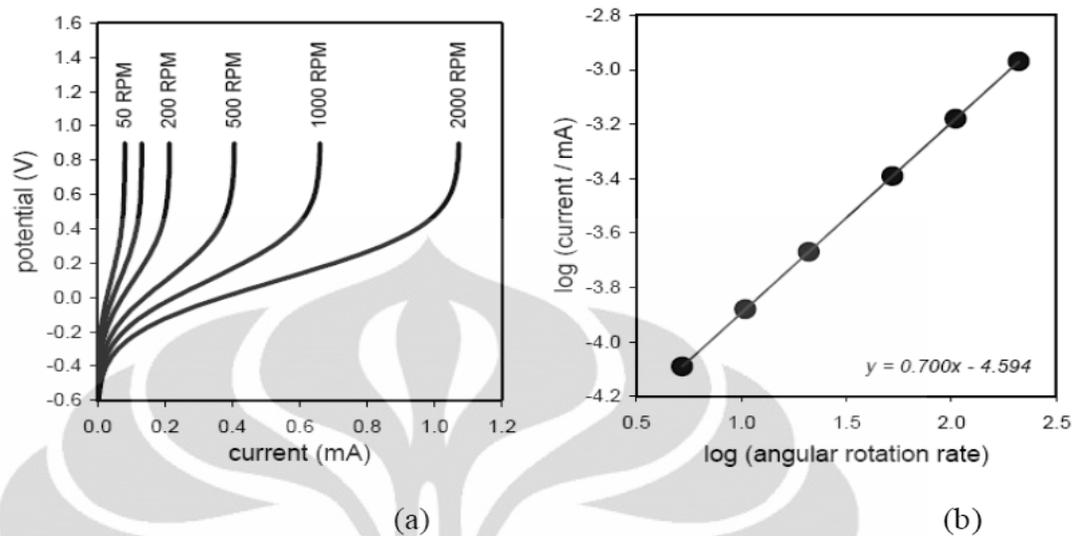
$$j_{lim} = i_{lim} / A = z F C K_m \quad (2.23)$$

Dimana  $F$  adalah konstanta Faraday (96484.6 C / mol),  $i_{LIM}$  (A) adalah *limiting current*, dan  $A$  (cm<sup>2</sup>) adalah luas area elektroda. Pada persamaan diatas perlu mengetahui jumlah elektron yang ditukar,  $z$ , dan konsentrasi,  $C$ .

Dengan mengkombinasikan persamaan (2.23) dengan persamaan (2.19) dan (2.20), maka didapatkan ;

$$j_{lim} = 0.0791 z F C d_{cyl}^{-0.3} (\mu/\rho)^{-0.344} D^{0.644} U_{cyl}^{0.7} \quad (2.24)$$

$$j_{lim} = 0.0487 z F C d_{cyl}^{+0.4} (\mu/\rho)^{-0.344} D^{0.644} \omega^{0.7} \quad (2.25)$$



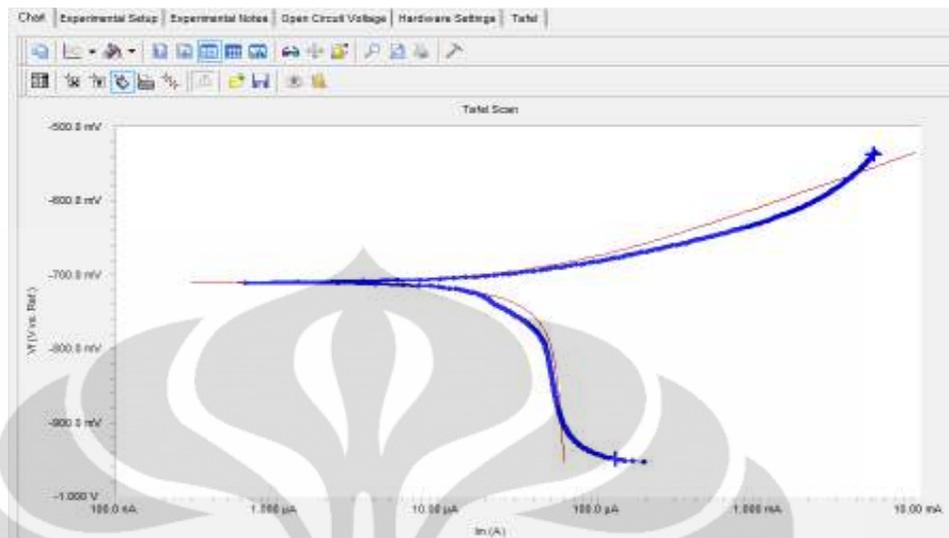
**Gambar 2.8** (a) Contoh Pengujian *Linear Polarization Resistance* Pada Variasi Kecepatan Putaran. (b) Plot Grafik Logaritmik Korosi yang dibatasi transport massa

Dengan melihat persamaan diatas, apabila proses korosi dibatas dengan transport massa, diharapkan *limiting current density* akan bervariasi secara linear dengan peningkatan kecepatan putaran ( $\omega^{0.7}$ ).

Selain itu, dengan melakukan percobaan dengan cara melakukan variasi kecepatan, maka dapat melakukan sebuah prediksi terhadap sifat dari korosi tersebut apakah dipengaruhi rapat arus terbatas, tanpa mengetahui  $z$  dan  $C$ . Dengan melakukan plot data dari  $\log$  *limited current density* dari tiap kecepatan putaran vs  $\log$  kecepatan putaran. Apabila pada grafik tersebut memiliki kemiringan mendekati 0.7, maka proses korosi dibatasi oleh transport massa<sup>[4]</sup>.

## 2.10 Analisis Laju Korosi

Analisa laju korosi ditujukan untuk mengetahui besarnya laju korosi yang telah diuji menggunakan metode polarisasi tafel. Dari metode polarisasi, didapatkan hasil berupa kurva polarisasi dan dari kurva tersebut dapat diukur nilai laju korosi. Laju korosi dapat dihitung dengan dua cara, yaitu secara otomatis dan manual.



**Gambar 2.9** Contoh Hasil Kurva Polarisasi

Secara otomatis, laju korosi dihitung dengan menggunakan *software* analisis dan langsung akan keluar nilai laju korosi. Sedangkan metode manual dihitung dengan membuat garis linear pada kurva katodik dan anodik dan melihat perpotongan antara keduanya sehingga didapatkan  $i_{CORR}$  dan nilai tersebut dimasukkan ke rumus laju korosi seperti yang tertera dibawah ini<sup>[2]</sup> :

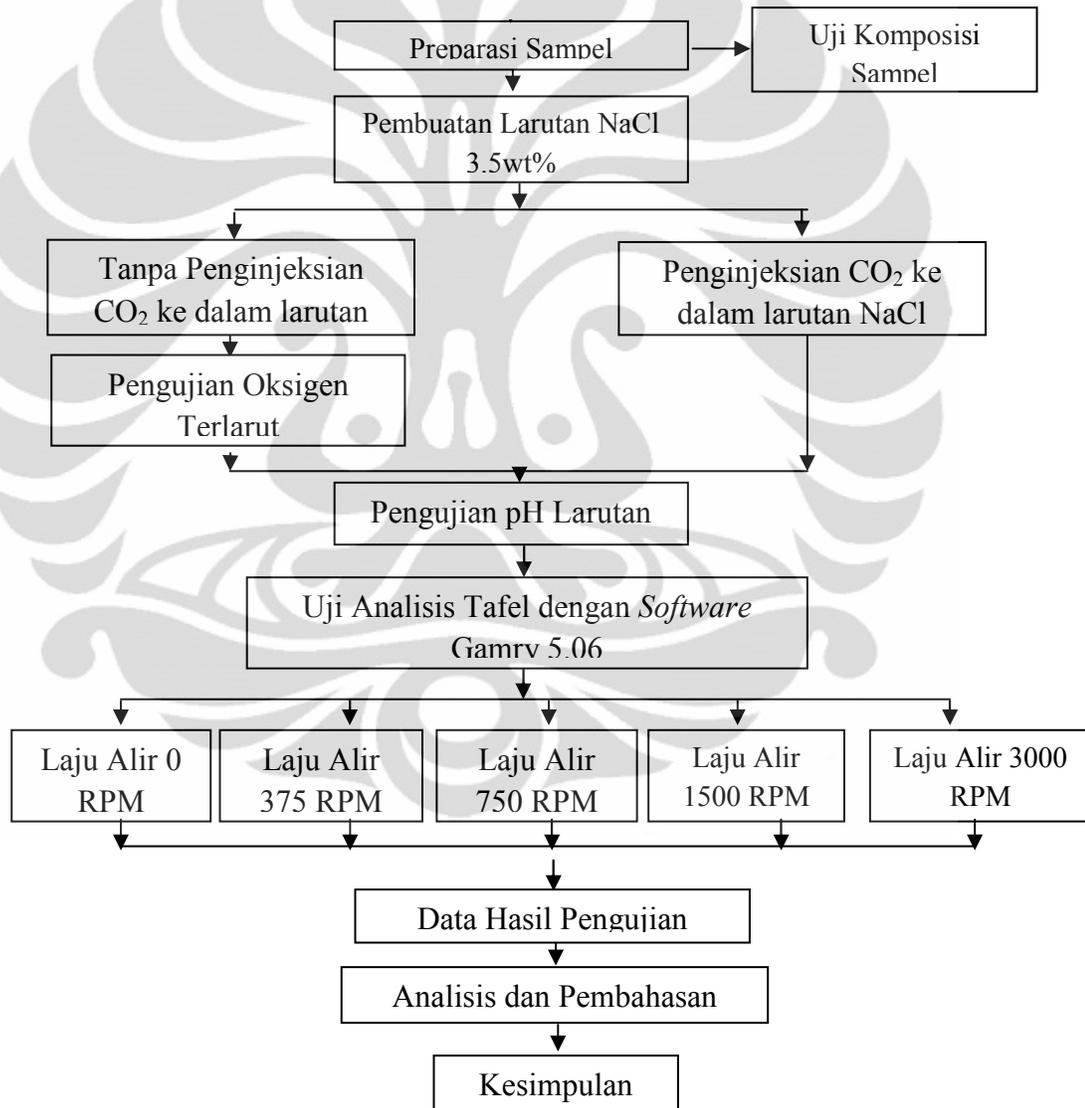
$$mpy = \frac{0.129 i_{corr} E}{D}$$

Dimana D adalah berat jenis material, I adalah rapat arus korosi dan E adalah berat ekuivalen material yang mengalami proses korosi. Kedua metode tersebut akan dibandingkan sehingga dapat memastikan nilai laju korosi yang diperoleh.

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan pada penelitian ini akan dibuat dalam bentuk diagram alir Berikut dibawah ini merupakan diagram alir dari penelitian yang akan dilakukan.



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

### 3.2 Alat dan Bahan

#### 3.2.1 Peralatan

- a. *Software* Gamry 5.06
- b. *Software* Gamry Echem Analysis
- c. *Rotating Cylinder Electrode* (RCE)
- d. pH meter
- e. Sel polarisasi
- f. Elektroda standar Hg/HgCl<sub>2</sub>
- g. Anoda grafit
- h. Timbangan digital
- i. *Magnetic stirrer*
- j. *Beaker glass* 500 dan 1000 ml
- k. Aerator
- l. Cawan petri
- m. Spatula
- n. Kertas amplas 100#, 240#, 400#, 600#, 800# dan 1000#
- o. Kamera digital

#### 3.2.2 Bahan

- a. Sampel Ø 12 mm API X-52
- b. Gas CO<sub>2</sub>
- c. Garam NaCl
- d. Aquades

### 3.3 Prosedur Kerja

#### 3.3.1 Preparasi Sampel

Sampel yang digunakan adalah baja karbon rendah dengan spesifikasi API 5L X-52. Sampel dibentuk menjadi sebuah silinder yang berlubang, dimana diameter luar dari sampel adalah sebesar 1.2 cm. Setelah sampel dibentuk, maka hal yang perlu dilakukan pada sampel adalah melakukan pengampelasan dengan menggunakan

kertas ampelas dengan grid yang bertingkat, yaitu 100#, 240#, 400#, 600#, 800# dan 1000#. Tujuan dari pengampelasan ini adalah untuk menghilangkan oksida dari permukaan sampel agar tidak mengganggu saat proses pengukuran laju korosi. Setelah itu, pasang sampel pada ujung dari *Rotating Cylinder Electrode* (RCE) dan tutup bagian ujung dari RCE selain sampel dengan menggunakan material Teflon untuk menghindari kontak dengan larutan elektrolit.



**Gambar 3.2** Bentuk Ujung dari Shaft RCE dan Sampel RCE<sup>[4]</sup>

### 3.3.2 Pembuatan Larutan Elektrolit

Pada penelitian ini, elektrolit yang digunakan adalah larutan NaCl 3.5% sebanyak 1 liter. Langkah pembuatan larutan elektrolit adalah sebagai berikut :

1. Timbang garam NaCl sebanyak 35 gram dengan menggunakan timbangan digital.
2. Isi *beaker glass* volume 1000 ml dengan aquades hingga penuh.
3. Larutkan garam NaCl yang sudah ditimbang sebelumnya kedalam *beaker glass* yang sudah terisi aquades.
4. Taruh *beaker glass* yang berisi larutan diatas *magnetic stirrer* agar didapatkan larutan yang homogen dan garam NaCl dapat terlarut sempurna.
5. Setelah dirasa telah homogen, matikan *magnetic stirrer* dan angkat larutan elektrolit. Larutan elektrolit siap digunakan

### 3.3.3 Pengujian Kadar Oksigen Terlarut

Larutan elektrolit berupa NaCl 3.5% dipersiapkan sebanyak 1 liter dan dilakukan pengujian dengan menggunakan alat pengukur kadar oksigen dengan cara mencelupkan kedalam larutan dan dilihat hasil pengukuran pada *display*.

### 3.3.4 Penginjeksian Gas CO<sub>2</sub> kedalam Larutan Elektrolit

Untuk memperoleh lingkungan dengan kandungan gas CO<sub>2</sub>, maka pada larutan elektrolit akan dilakukan proses injeksi gas CO<sub>2</sub>. Proses injeksi gas CO<sub>2</sub> dilakukan dari dalam tabung gas CO<sub>2</sub> dengan media selang. Tahapan prosesnya adalah :

1. Pasangkan inlet dan outlet gas pada sel polarisasi
2. Pasang selang dari tabung gas CO<sub>2</sub> pada inlet gas
3. Buka keran penutup tabung gas sehingga keluar.
4. Atur tekanan gas yang keluar pada tabung gas hingga tekanan 1 atm
5. Lakukan injeksi selama 1 jam hingga larutan elektrolit mengandung CO<sub>2</sub> jenuh.

### 3.3.5 Pengujian Komposisi Material

Pengujian komposisi sampel berupa baja karbon API 5L X-52. Pengujian ini ditujukan untuk mengetahui komposisi dari sampel yang digunakan pada pengujian ini. Pengujian komposisi ini dilakukan dengan alat spektroskopi yang dilakukan di CMPFA Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

### 3.3.6 Pengujian pH Larutan Elektrolit

Pengujian pH ditujukan untuk mengetahui derajat keasaman pada larutan elektrolit. Pengujian ini merupakan salah satu hal yang penting dalam pengujian laju korosi CO<sub>2</sub>. Hal ini karena pH memiliki efek terhadap penentuan reaksi dominan yang terjadi pada katoda.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan kertas pH yang dilakukan dengan mencelupkan kertas pH ke dalam larutan dan pembacaan dilakukan dengan mencocokkan warna yang dihasilkan dengan warna standar masing-masing pH.



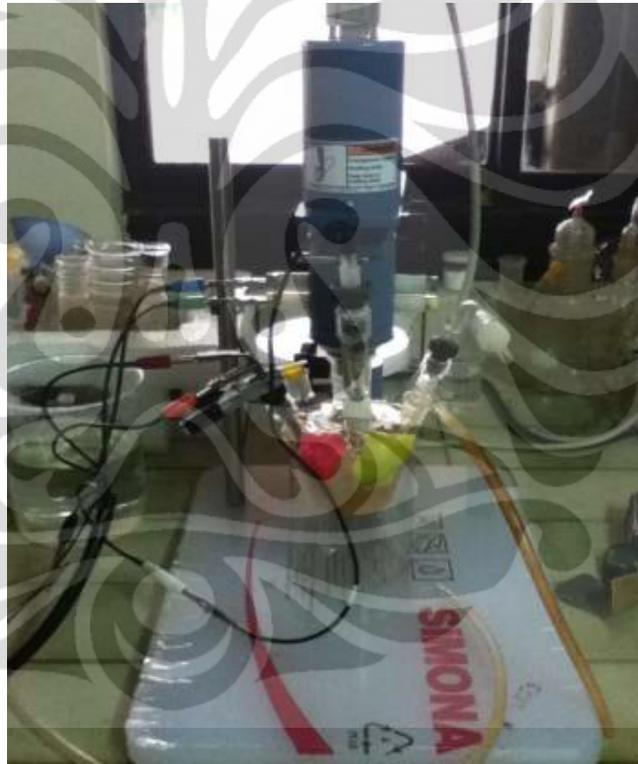
**Gambar 3.3** Pengujian pH pada Larutan NaCl Teraerasi

### 3.3.7 Pengujian Laju korosi dengan Metode Polarisasi

Pada penelitian ini, pengujian laju korosi material menggunakan *software* Gamry Framework 5.06 dengan menggunakan *Rotating Cylinder Electrode* (RCE). Langkah-langkah pengujian laju korosinya adalah sebagai berikut :

1. Siapkan larutan elektrolit NaCl 3.5% dan masukkan ke dalam sel polarisasi
2. Pasang sampel baja karbon rendah API 5L X-52 diujung RCE dan tutup bagian lainnya dengan menggunakan teflon.
3. Pada pengujian kondisi teraerasi pasang aerator, sedangkan pada pengujian kondisi gas CO<sub>2</sub> terlarut injeksikan gas CO<sub>2</sub> dengan tekanan 1 atm selama ±1 jam

4. Ukur pH larutan NaCl 3.5% yang sudah diinjeksikan gas CO<sub>2</sub> didalamnya dengan menggunakan kertas pH.
5. Pasang *Standard electrode* Hg/HgCl<sub>2</sub> dan *Counter electrode* Grafit pada sel polarisasi
6. Hidupkan RCE dengan melakukan setting kecepatan putaran 0 RPM
7. Susun rangkaian sesuai dengan standar pemasangan polarisasi yaitu : *specimen holder*, *electrode standar*, *auxiliary electrode* dan *working electrode* pada instrumen pengukur polarisasi.



**Gambar 3.4** Sel Pengujian Polarisasi Lingkungan Korosi Gas CO<sub>2</sub>

8. Siapkan *software* Gamry Framework 5.06 dan masuk ke *tab* “experiment” pada menu bar. Lalu pilih “Tafel”
9. Masukkan nama file beserta variabel-variabel pengujian, seperti luas area, densitas dan *scan rate*. Lalu lakukan atur jangkauan potensial sebesar

(-250 – (+)250 mV terhadap *open potential* (*Eoc*). Jangkauan ini dianggap cukup representatif terhadap pengujian korosi.

10. Setelah semua setting dimasukkan, klik “Ok” dan tunggu beberapa saat untuk melakukan proses pengukuran
11. Setelah selesai, simpan kurva polarisasi dan dapat digunakan untuk analisa laju korosi
12. Ulangi percobaan diatas dengan mengubah kecepatan putaran RCE 375 RPM, 750 RPM, 1500 RPM dan 3000 RPM.



**Gambar 3.5** Mesin *Electrode Rotator*

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Komposisi Material Sampel

Pada penelitian kali ini, material yang digunakan berupa baja API 5L X-52. Pengujian komposisi kimia dari material sampel dilakukan dengan menggunakan metode spektroskopi yang dilakukan di Laboratorium Uji Material *Central for Material Processing and Failure Analysis* (CMPFA) Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI. Adapun komposisi kimia pada material sampel adalah seperti tertera pada Tabel 4.1

**Tabel 4.1** Komposisi Kimia Baja API 5L X-52

<b>Fe(%)</b>	<b>C(%)</b>	<b>Si(%)</b>	<b>Mn(%)</b>	<b>Cr(%)</b>	<b>Al(%)</b>
99.07	0.14	0.011	0.662	0.0207	0.047
<b>Ni(%)</b>	<b>Co(%)</b>	<b>Ti(%)</b>	<b>Cu(%)</b>	<b>Nb(%)</b>	<b>V(%)</b>
<0.005	<0.033	0.0186	0.087	<0.002	<0.002

Baja API 5L X-52 merupakan salah satu material yang umum digunakan dalam aplikasi pipa-pipa penyalur minyak dan gas alam. Baja ini distandarkan dalam Standar API 5L, *Specification for Line pipe*. Pada penggunaannya, baja ini masih dianggap rentan terhadap korosi, terutama pada korosi yang melibatkan gas CO<sub>2</sub>. Selain sebagai pipa penyalur, aplikasi lain dari material ini adalah sebagai material konstruksi dan pembangkit listrik.

### 4.2 Pengujian pH

Pengujian pH yang dilakukan adalah dengan menggunakan indikator universal dan pH meter. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui pH dari elektrolit sebelum dan sesudah dilakukan injeksi dari gas CO<sub>2</sub>. Pada korosi CO<sub>2</sub>, pH memiliki peranan penting dalam menentukan laju korosi dan pembentukan lapisan

FeCO<sub>3</sub> pada permukaan sampel. Adapun data dari pH larutan dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut ini.

**Tabel 4.2** Hasil Pengukuran pH dari Larutan Uji

Pengukuran	NaCl	NaCl dengan
ke-	Teraerasi	injeksi CO <sub>2</sub>
1	6.8	4.8
2	6.9	5.1
3	6.9	5.1
<b>Rata-rata</b>	<b>6.87</b>	<b>5</b>

Dari tabel diatas dapat terlihat bahwa pada pengujian dengan menggunakan larutan teraerasi, maka pH mendekati netral. Sedangkan pada larutan yang mengandung gas karbon dioksida, maka larutan akan cenderung lebih asam akibat gas karbon dioksida yang terlarut didalam air akan mengalami pembentukan asam karbonat.

### 4.3 Pengujian Oksigen Terlarut

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kadar dari oksigen yang terlarut pada larutan NaCl 3.5% yang teraerasi. Kadar oksigen diukur dengan menggunakan peralatan DO-Hanna Instrument. *Probe* dari instrument pengukur dicelupkan kedalam larutan yang akan diuji. Adapun hasil dari pengukuran adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.3** Hasil Pengujian Kadar Oksigen Terlarut

Pengukuran Ke-	1	2	3	Rata-rata
<b>Oksigen Terlarut</b>	6.7	6.9	6.8	<b>6.8</b>

Kadar oksigen memegang peranan penting dalam kondisi lingkungan yang teraerasi, karena dengan semakin banyak oksigen yang tereduksi akan membuat semakin banyak terjadi reaksi oksidasi pada anoda dalam hal ini yaitu berupa reaksi

korosi logam. Pada pengujian ini, kondisi oksigen terlarut mendekati kondisi umum kadar oksigen pada NaCl 3.5 % yaitu diantara angka 7.2 – 7.6<sup>[7]</sup>.

#### 4.4 Bilangan Reynold, Koefisien Transport Massa dan *Wall shear stress*

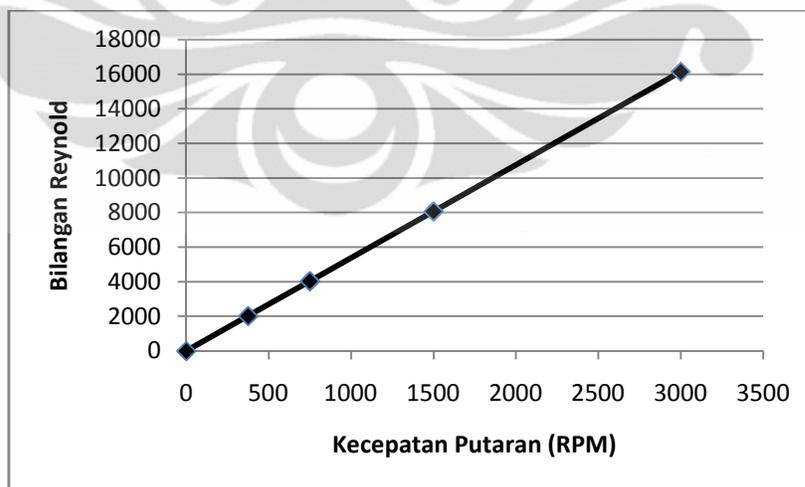
##### 4.4.1 Penghitungan Bilangan Reynold

Bilangan Reynold ini ditunjukan agar mengetahui profil dari aliran yang terbentuk pada saat pengujian. Pengujian ini menggunakan kecepatan RPM sebesar 0, 375, 750, 1500 dan 3000 RPM. Dengan memasukkan data berupa kecepatan putaran maka dapat diketahui besaran dari bilangan Reynold yang dapat dilihat pada tabel 4.3 berikut ini

**Tabel 4.4** Bilangan Reynold Pada Tiap Kecepatan Aliran

Kecepatan RCE (RPM)	0	375	750	1500	3000
Kecepatan Linear (cm/s)	0	23.6	47.1	94.2	188.5
Bilangan Reynold	0	2232	4463	8926	17852

Seperti pada tabel diatas, maka hubungan antara kecepatan aliran yang didapat dari RCE terhadap bilangan Reynold dapat dilihat pada gambar 4.2



**Gambar 4.1** Hubungan antara Kecepatan Putaran dengan Bilangan Reynold

Seperti yang sudah dikemukakan pada bab sebelumnya bahwa pada bentuk silinder, bentuk aliran turbulen akan terjadi pada bilangan Reynold yang melebihi angka 200. Pada pengujian ini, aliran yang terbentuk sebagian besar merupakan aliran turbulen dan hanya pada angka 0 RPM yang berbentuk profil laminar.

#### 4.4.2 Penghitungan Koefisien Transport Massa

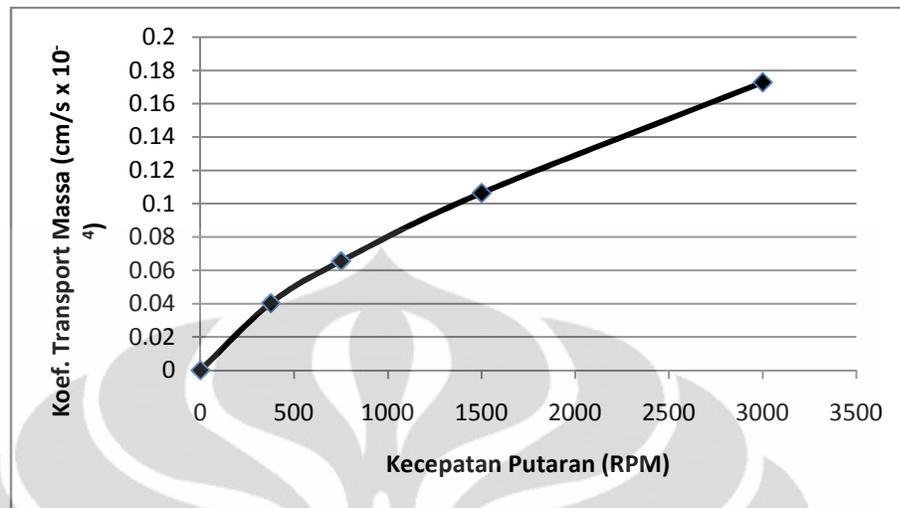
Pada sebuah proses korosi, transport massa bisa memiliki peran yang signifikan dalam menentukan laju korosi. Pada percobaan ini akan coba dihitung berapa koefisien transport massa pada larutan yang mengandung CO<sub>2</sub> dengan menggunakan persamaan pada bab sebelumnya.

Dari hasil perhitungan, maka didapatkan nilai koefisien transport massa pada tiap-tiap variasi kecepatan putaran. Hasil dari besarnya nilai koefisien transport massa dapat dilihat pada tabel 4.4 berikut ini.

**Tabel 4.5** Nilai Koefisien Transport Massa Pada Tiap Kecepatan di Lingkungan NaCl yang Mengandung Gas CO<sub>2</sub>.

Kecepatan RCE (RPM)	Bilangan Reynold	Koefisien Transport Massa (cm/s x 10 <sup>-4</sup> )
0	0	0
375	2232	0.0402
750	4463	0.0654
1500	8926	0.1063
3000	17852	0.1727

Selanjutnya, dari data koefisien transport massa dan kecepatan putaran dibuat grafik hubungan antara keduanya. Grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3



**Gambar 4.2** Hubungan Antara Kecepatan Putaran dengan Koefisien Transport Massa

Dengan melihat gambar diatas, maka diketahui bahwa meningkatnya nilai kecepatan dari putaran akan membuat koefisien transport massa akan semakin membesar. Hal ini berpengaruh pada proses korosi dimana dengan meningkatkan kecepatan akan membuat transport dari gas CO<sub>2</sub> akan semakin cepat sampai ke permukaan logam. Dengan demikian proses korosi akan menjadi lebih cepat apabila proses tersebut dikontrol oleh transport massa.

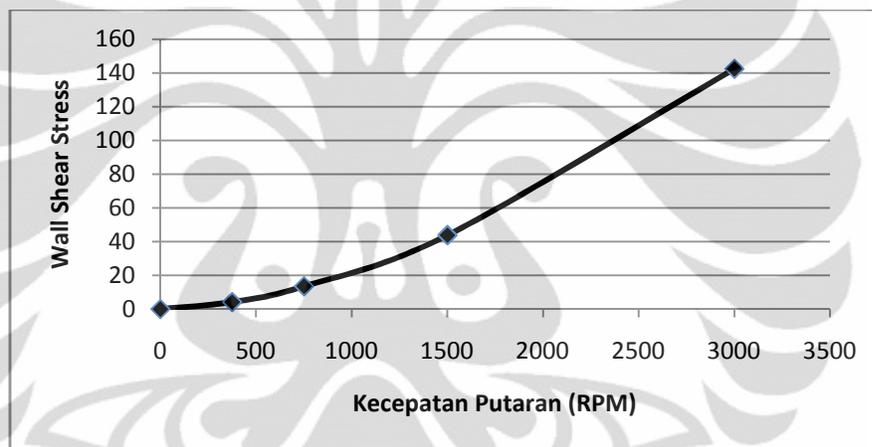
#### 4.4.3 Penghitungan *Wall shear stress*

Pada proses korosi yang melibatkan aliran, tentunya ada faktor gaya yang terbentuk pada antarmuka material dengan larutan yang dikenal dengan *wall shear stress*. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya penggerusan pada material yang tentunya memiliki dampak pada proses korosi dari material tersebut. Pada bagian ini, hal tersebut akan dibahas mengenai besaran dari *wall shear stress* pada penelitian ini dan hubungannya dengan kecepatan aliran.

**Tabel 4.6** Nilai *Wall shear stress* Pada Pengujian dengan Variasi Putaran 0-3000 RPM

Kecepatan RCE (RPM)	0	375	750	1500	3000
Bilangan Reynold	0	2232	4463	8926	17852
<i>Wall shear stress</i>	0	4.5	14.5	47.1	152.9

Dengan mengetahui besaran nilai *wall shear stress* dari masing-masing kecepatan, maka dengan membuat grafik antara kecepatan dan besaran nilai *Wall shear stress* didapatkan hasil sebagai berikut



**Gambar 4.3** Hubungan antara Kecepatan Putaran dengan Nilai *Wall shear stress*

Dengan melihat gambaran hubungan kecepatan putaran dengan nilai *wall shear stress*, maka dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya kecepatan akan memperbesar nilai dari *wall shear stress*. Dengan meningkatnya nilai dari *wall shear stress* ini tentu akan berdampak pada laju korosi dari material, dimana dengan begitu akan semakin besar proses penggerusan dari permukaan, yang dalam hal ini merupakan lapisan protektif  $\text{FeCO}_3$ . Hal ini tentunya akan membuat material terekspos langsung ke lingkungan, akibatnya laju korosi akan semakin besar.

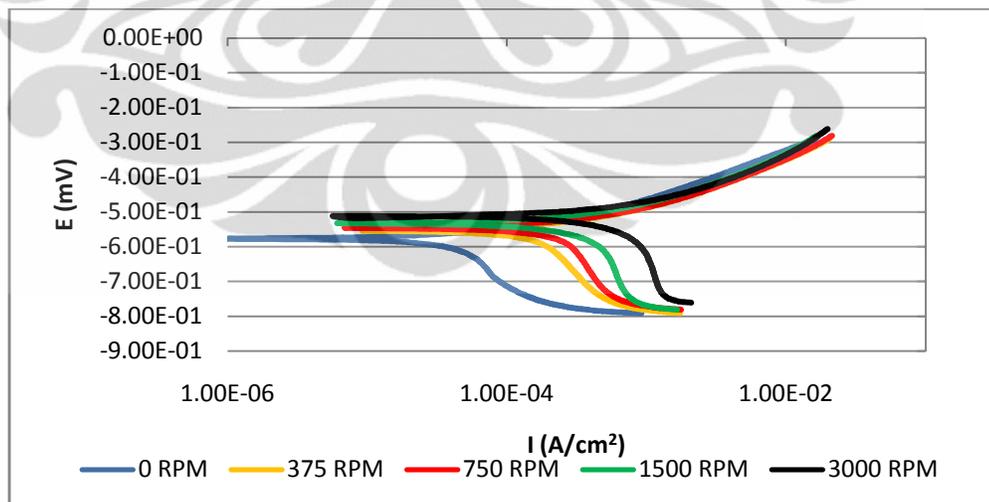
## 4.5 Pengujian Laju Korosi Menggunakan Metode Polarisasi

### 4.5.1 Pengujian Laju Korosi Pada Larutan NaCl yang Teraerasi

Pada pengujian ini, material dikondisikan pada kondisi lingkungan NaCl yang teraerasi sekitar 1 jam. kondisi ini merupakan lingkungan umum apabila material terekspos didalam air laut. Dengan melakukan simulasi variasi kecepatan aliran yang terbentuk saat kondisi aktual untuk mengetahui respon dari material yang berdampak pada laju korosi material tersebut.

Pada pengujian ini dilakukan variasi kecepatan putaran sebesar 0, 375, 750, 1500 dan 3000 RPM yang dimana kecepatan tersebut didapat dari alat berupa *Rotating Cylinder Electrode* (RCE). RCE akan memutar sampel sehingga pada larutan nantinya akan terbentuk profil aliran yang dapat dikarakterisasi sesuai dengan bilangan Reynold. Pada percobaan ini, hanya 0 RPM yang memiliki profil aliran laminar, sedangkan untuk kecepatan lainnya merupakan aliran turbulen.

Pengujian laju korosi yang menggunakan metode polarisasi dilakukan dengan menggunakan *software* Gamry 5.06 dan menghasilkan data berupa kurva polarisasi yang hasilnya dapat dilihat pada gambar 4.5 berikut ini.



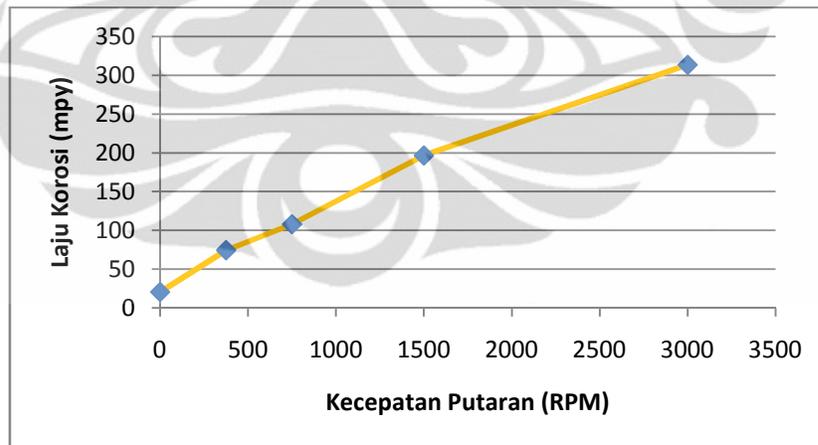
**Gambar 4.4** Kurva Polarisasi Baja API 5L X-52 Pada Lingkungan NaCl 3.5% Teraerasi dengan Variasi Kecepatan Putaran 0-3000 RPM

Adapun dari hasil diatas, didapat pula hasil berupa rapat arus korosi yang hasilnya didapatkan dari perpotongan antara kurva katodik dengan anodik dari kurva polarisasi diatas. Dengan mengetahui besaran rapat arus korosi dari pengujian tersebut, maka didapatkan data berupa laju korosi yang hasilnya dirangkum pada tabel 4.6 dibawah ini.

**Tabel 4.7** Laju Korosi Baja API 5L X-52 Pada Lingkungan NaCl 3.5%  
Teraerasi

Kecepatan Aliran (RPM)	Rapat Arus Korosi/ Icorr ( $I/cm^2$ )	Laju Korosi (mpy)
0	45.53	20.81
375	162	74.6
750	238	108
1500	430	196.53
3000	685.9	313.3

Dengan menggunakan data diatas, maka dapat dilihat pengaruh dari kecepatan putaran terhadap laju korosi dengan melakukan plot grafik kecepatan putaran vs laju korosi. Hasilnya dapat dilihat pada gambar 4.6 berikut



**Gambar 4.5** Grafik Hubungan antara Laju Aliran dengan Laju Korosi Baja API 5L X-52 Lingkungan Teraerasi

Dengan melihat hasil diatas dapat dilihat bahwa adanya pengaruh signifikan yang terjadi pada laju korosi baja API 5L X-52 pada lingkungan yang teraerasi.

Dimana pada peningkatan kecepatan putaran akan membuat kurva polarisasi bergeser kearah kanan. Pergeseran tersebut juga diikuti dengan makin tegaknya kurva katodik yang mengindikasikan terjadinya rapat arus terbatas. Hal ini membuktikan bahwa laju korosi pada lingkungan teraerasi dipengaruhi oleh besar kecepatan aliran. Hal ini juga dapat dilihat bahwa hubungan antara laju korosi dengan peningkatan kecepatan putaran memiliki hubungan yang linear.

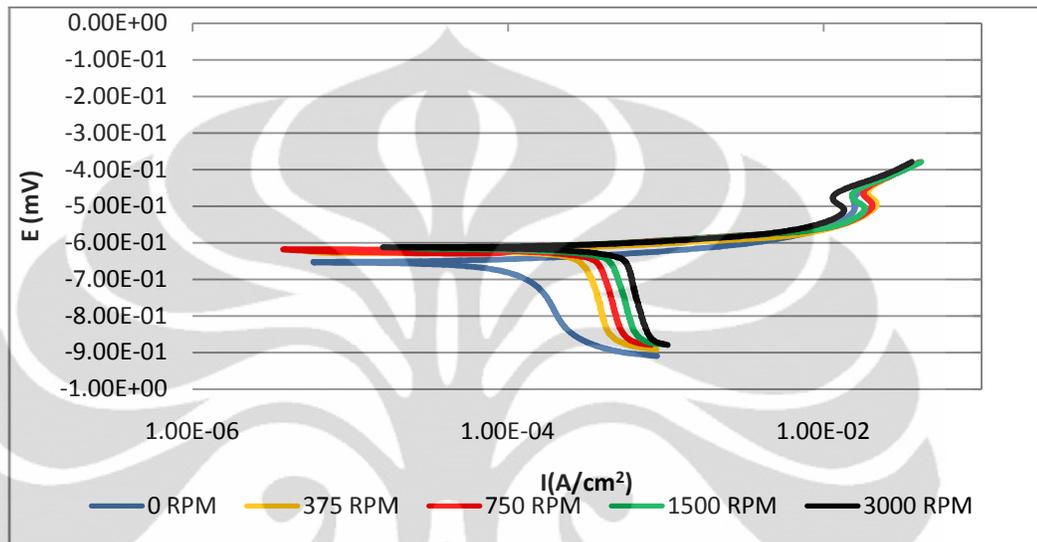
Terjadinya peningkatan laju korosi pada lingkungan teraerasi ini diakibatkan oleh semakin tingginya koefisien transport massa yang akan berdampak pada suplai oksigen pada permukaan logam. Dengan semakin kontinu suplai oksigen ke permukaan logam akan membuat proses korosi menjadi lebih cepat yang akan terbaca sebagai meningkatnya laju korosi. Selain faktor tersebut, hubungan linear antara nilai *wall shear stress* dengan kecepatan putaran juga menjadi salah satu faktor yang membuat meningkatnya laju korosi. Dengan nilai *wall shear stress* yang semakin tinggi akan membuat lapisan oksida, yang dapat menghambat proses korosi sehingga apabila lapisan ini bertahan di permukaan dapat membuat laju korosi menurun, akan tergerus. Akibatnya, material akan langsung terekspos pada lingkungan dan membuat laju korosi akan meningkat.

#### **4.5.2 Pengujian Laju Korosi Pada Larutan NaCl yang Mengandung Gas CO<sub>2</sub>**

Pada pengujian ini, hasil ditujukan untuk melihat pengaruh dari kecepatan aliran pada korosi yang melibatkan gas CO<sub>2</sub> yang terlarut didalam media air. Gas yang dialirkan sekitar 1 jam sebelum proses pengukuran laju korosi dilakukan dengan menggunakan metode polarisasi. Pada percobaan ini, dengan melakukan variasi terhadap kecepatan yaitu 0, 375, 750, 1500 dan 3000 RPM maka diharapkan dapat memberikan gambaran efek kecepatan terhadap proses korosi pada lingkungan gas CO<sub>2</sub> tersebut. Kecepatan mempunyai peranan penting dalam laju korosi, dimana pada kondisi aktual kecepatan ini terbentuk pada saat proses transportasi gas yang melalui pipa.

Kecepatan aliran yang dihasilkan didapat dengan menggunakan *Rotating Cylinder Electrode* (RCE) dan diharapkan dengan penggunaan alat ini dapat

memberikan simulasi kondisi yang aktual pada saat material tersebut digunakan sebagai pipa untuk mengalirkan gas alam. Hasil pengujian dengan menggunakan metode polarisasi menghasilkan data berupa kurva polarisasi yang disajikan pada gambar 4.7.



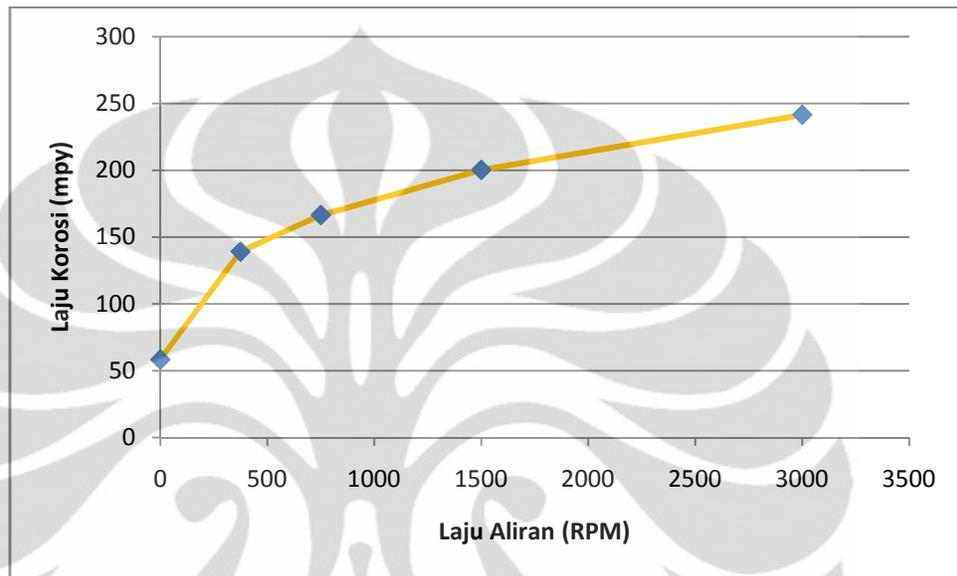
**Gambar 4.6** Kurva Polarisasi Baja API 5L X-52 Pada Lingkungan NaCl 3.5% yang Mengandung Gas CO<sub>2</sub> dengan Variasi Kecepatan Putaran 0-3000 RPM

Adapun dari kurva polarisasi tersebut dapat dihitung besaran dari laju korosi dengan mencari titik potong antara kurva katodik dengan anodik sehingga didapatkan besaran rapat arus korosi. Untuk hasil penghitungan laju korosi pada pengujian ini sudah dirangkum pada tabel 4.7 dibawah ini

**Tabel 4.8** Laju Korosi Baja API 5L X-52 Pada Lingkungan NaCl 3.5% yang Mengandung Gas CO<sub>2</sub>

Kecepatan Aliran (RPM)	Rapat Arus Korosi/ I <sub>corr</sub> (I/cm <sup>2</sup> )	Laju Korosi (mpy)
0	127.7	58.37
375	304.5	139.1
750	364.2	166.4
1500	438.1	200.2
3000	528.2	241.4

Secara grafik, maka laju korosi yang didapatkan pada kondisi lingkungan yang mengandung gas karbon dioksida dapat dilihat pada gambar 4.8 dibawah ini. Dimana terlihat pada grafik kecepatan putaran RCE akan meningkatkan nilai laju korosi.



**Gambar 4.7** Grafik Hubungan antara Laju Aliran dengan Laju Korosi Baja API 5L X-52 Lingkungan Yang Mengandung Gas CO<sub>2</sub>.

Berdasarkan hasil diatas, dapat dilihat bahwa dengan adanya penambahan kecepatan putaran dapat memperbesar laju korosi dari baja API 5L X-52 pada kondisi lingkungan yang mengandung gas karbon dioksida. Pada kurva polarisasi diatas, terlihat bahwa semakin tinggi kecepatan putaran dari RCE yang digunakan akan mendorong kurva polarisasi yang dihasilkan semakin ke kanan. Itu artinya dengan melakukan plot garis lurus pada kurva katodik dan anodik akan menghasilkan perpotongan berupa titik rapat arus korosi yang semakin besar. Hal ini dapat terjadi akibat beberapa faktor, diantaranya laju aliran yang semakin tinggi akan membuat gerusan pada permukaan akan semakin besar dan kecenderungan untuk pembentukan endapan protektif yang semakin kecil seiring dengan bertambahnya laju aliran. Pada grafik hubungan laju aliran terhadap peningkatan laju korosi juga dilihat bahwa

hubungannya polinomial dimana pada hubungan ini tidak seperti kondisi teraerasi yang hubungannya adalah linear.

Pertama, kecepatan yang akan membuat gerusan di permukaan semakin besar. Ini terjadi akibat adanya *wall shear stress* yang semakin besar ketika diaplikasikan kecepatan aliran yang semakin besar. Seperti yang sudah dikemukakan pada subbab sebelumnya, yaitu perhitungan dan pengaruh kecepatan terhadap besar *wall shear stress*. Akibatnya, permukaan yang sudah terdapat lapisan protektif tergerus sehingga menyebabkan laju korosi akan semakin membesar.

Hal kedua yang menjadi faktor penyebab semakin tingginya laju korosi adalah dari segi pembentukan lapisan protektif  $\text{FeCO}_3$  sendiri. Sebagaimana diketahui, bahwa lapisan ini akan membuat laju korosi pada material akan menurun akibat adanya pembatas antara material dengan lingkungan sehingga material tidak langsung terekspos pada lingkungan. Laju pembentukan lapisan ini menurun seiring dengan bertambahnya kecepatan aliran pada lingkungan. Hal ini disebabkan oleh ion Fe yang terbentuk pada permukaan logam yang terkorosi terlepas ke lingkungan lebih mudah dengan semakin tingginya kecepatan aliran. Padahal, apabila ion Fe berada pada permukaan maka dapat membentuk lapisan protektif berupa besi karbonat. Dengan sedikitnya lapisan yang terbentuk, maka laju korosi dari logam akan cenderung mengalami peningkatan.

Selain dua hal diatas, transport massa yang semakin besar juga menjadi salah satu hal yang memungkinkan terjadinya laju korosi yang semakin besar dengan meningkatnya kecepatan. Hal ini bisa dilihat pada bentuk dari kurva polarisasi yang memperlihatkan bentuk kurva katodik yang tegak, hal ini mengindikasikan terjadinya adanya rapat arus terbatas. Pada umumnya, kurva katodik yang normal akan berbentuk landai, dengan adanya pengaruh transport massa kurva tersebut akan cenderung berbentuk tegak. Akan tetapi, pada korosi lingkungan yang mengandung gas karbon dioksida hal ini menjadi kurang berpengaruh akibat adanya lapisan protektif. Lapisan protektif tersebut menyebabkan terjadinya resistansi terhadap reaksi korosi, sehingga laju korosi akan melambat.

Jika dibandingkan dengan kurva polarisasi untuk kondisi yang teraerasi, maka kurva kondisi lingkungan yang mengandung gas karbon dioksida cenderung lebih rapat dan bisa dianggap tidak terlalu sensitif terhadap perubahan putaran yang terjadi. Hal ini bisa terjadi diakibatkan oleh adanya lapisan dari hasil korosi di lingkungan CO<sub>2</sub> berupa endapan besi karbonat yang cenderung dapat menahan laju korosi dari material. Pada hasil kurva polarisasi pengujian ini, terlihat pula pada kurva anodik terjadi lapisan pasif. Hal ini membuktikan bahwa ada endapan yang terbentuk pada permukaan sampel. Sehingga ketika pada pengujian ditambahkan kecepatan aliran maka endapan tersebut akan menghalangi proses korosi.

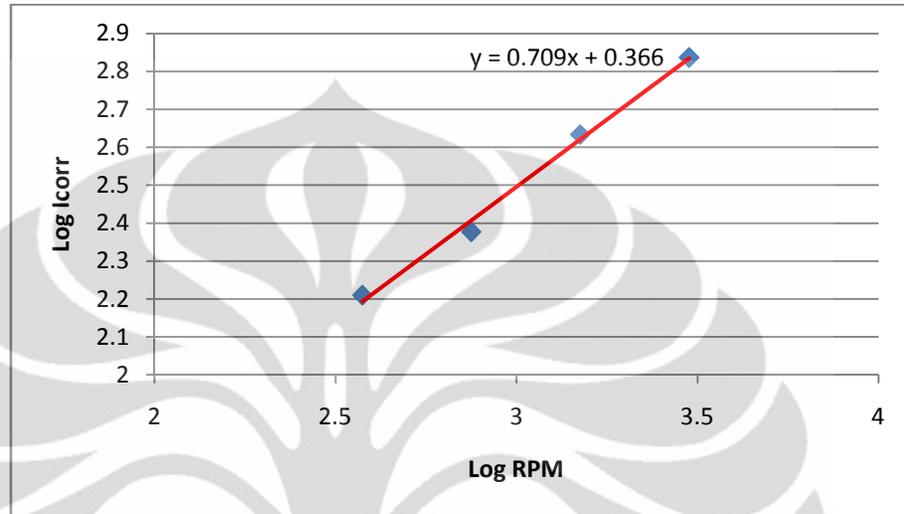
#### **4.6 Pengujian Transport Massa Menggunakan Plot Logaritmik**

Transport massa pada proses korosi mempunyai faktor penting, dimana dengan transport massa yang semakin besar akan membuat suplai dari ion atau molekul yang mengkorosi dapat lebih cepat bergerak dari lingkungan ke permukaan material. Dengan semakin mudahnya ion atau molekul tersebut berdifusi ke permukaan akan membuat laju reaksi korosi akan semakin besar yang berdampak pada semakin tingginya laju korosi suatu material.

Pada pengujian kali ini, berdasarkan pada penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa proses korosi yang dikontrol oleh transport massa dapat dilihat dengan melakukan pembuktian berupa membuat plot logaritmik antara besar kecepatan putaran dan rapat arus terbatas. Dari grafik tersebut maka dilihat kemiringan garis yang terbentuk, apabila besar kemiringan mendekati 0.7 maka proses korosi tersebut dikontrol oleh transport massa<sup>[4]</sup>. Berdasarkan teori tersebut, maka pada pengujian ini akan dilakukan pembuktian pada proses korosi lingkungan NaCl 3.5% yang teraerasi dan lingkungan NaCl 3.5 % yang mengandung gas karbon dioksida.

Pertama, pada lingkungan yang teraerasi. Berdasarkan data yang diperoleh pada pengujian laju korosi pada subbab sebelumnya, maka data berupa kecepatan putaran dan rapat arus korosi dihitung secara logaritmik. Pada pengujian ini,

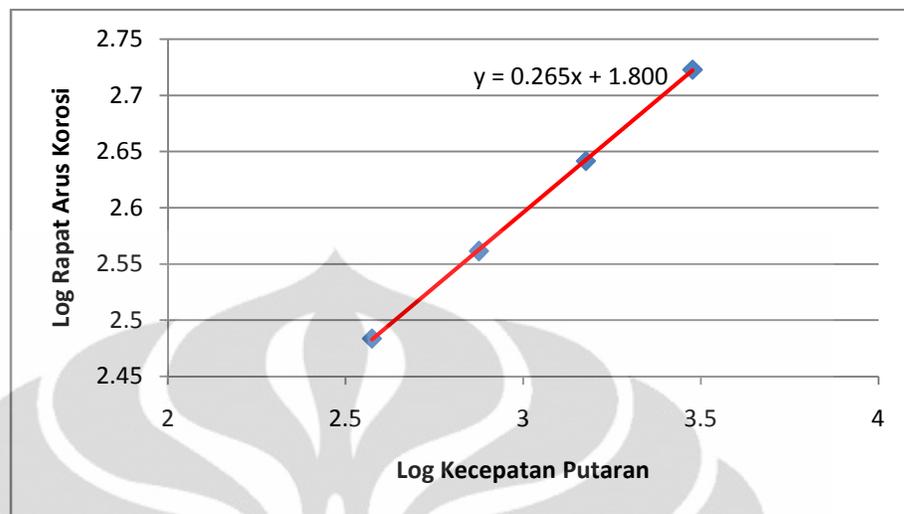
diasumsikan rapat arus korosi sudah merepresentasikan rapat arus terbatas pada proses korosi. Adapun hasil grafiknya dapat dilihat pada gambar 4.9 sebagai berikut.



**Gambar 4.8** Plot Logaritmik Kecepatan vs Rapat Arus Korosi pada lingkungan Teraerasi

Dari grafik diatas menunjukkan bahwa kemiringan pada garis adalah sebesar 0.709. hal ini membuktikan bahwa korosi pada lingkungan NaCl yang teraerasi dikontrol oleh transport massa. Pada subbab sebelumnya, juga terlihat bahwa korosi pada kondisi NaCl yang teraerasi memiliki hubungan yang signifikan antara kecepatan aliran dengan laju korosi. Dari pembuktian diatas, maka korosi pada lingkungan teraerasi dengan variabel putaran memicu suplai oksigen yang lebih kontinu, sehingga laju korosi pada material akan semakin cepat dengan penambahan kecepatan aliran.

Selanjutnya, pada kondisi lingkungan NaCl yang mengandung gas karbon dioksida, dilakukan pula plot logaritmik dari kecepatan putaran terhadap rapat arus korosi. Dimana dapat dilihat pada gambar 4.10 berikut ini.



**Gambar 4.9** Plot Logaritmik Kecepatan vs Rapat Arus Korosi pada lingkungan Mengandung gas CO<sub>2</sub>

Hasil plot diatas menunjukkan bahwa kemiringan garis adalah sebesar 0.265, maka dapat dikatakan bahwa proses korosi CO<sub>2</sub> ini dianggap tidak dikontrol oleh transport massa. Hal ini dapat diungkapkan karena menurut studi sebelumnya mengatakan bahwa apabila kemiringan mendekati 0.7 maka proses korosi dikontrol oleh transport massa. Meskipun demikian transport massa masih punya pengaruh, terlihat dari kurva polarisasi yang menunjukkan terbentuknya rapat arus terbatas.

Pada proses korosi CO<sub>2</sub> yang menyebabkan proses tidak dikontrol oleh transport massa adalah adanya lapisan FeCO<sub>3</sub> pada lapisan permukaan. Lapisan ini membuat laju korosi pada baja akan menurun dan mengakibatkan tidak sensitifnya proses tersebut terhadap kenaikan kecepatan.

Lapisan FeCO<sub>3</sub> membuat adanya resistansi yang mana akan menghambat reaksi pada permukaan material, yang akibatnya akan menurunkan nilai laju korosi. Pada proses korosi yang melibatkan CO<sub>2</sub>, akan terjadi kompetisi antara pembentukan lapisan FeCO<sub>3</sub> dengan penggerusan dari lapisan.

Ketika pada permukaan logam terdapat lapisan protektif berupa endapan FeCO<sub>3</sub>, maka laju korosi akan terhambat meskipun dari segi transport massa akan

berlangsung lebih cepat. Akibatnya terlihat pada plot logaritmik diatas bahwa kecepatan menjadi tidak terlalu signifikan dalam proses korosi CO<sub>2</sub>.

Pada kaitan naiknya laju korosi terhadap kecepatan, seperti yang sudah diungkap pada subbab sebelumnya, bahwa kecepatan akan meningkatkan nilai *wall shear stress*. Hal ini akan berdampak pada proses penggerusan dari lapisan sehingga laju korosi bertambah.

Selain itu, kecepatan aliran dalam hal ini membuat proses pembentukan FeCO<sub>3</sub> terhambat karena saat proses terbentuknya diganggu oleh aliran fluida. Laju alir akan membuat ion Fe yang ada di permukaan akan terlepas ke larutan sebelum dapat terbentuk menjadi lapisan protektif. Dengan begitu akibatnya semakin tingginya kecepatan aliran akan menyebabkan lapisan FeCO<sub>3</sub> yang terbentuk akan semakin sedikit sehingga laju korosi akan meningkat pada kecepatan putaran yang tinggi.

## BAB 5

### KESIMPULAN

Pada bab ini merupakan kesimpulan yang berdasarkan hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan terhadap data yang diperoleh dari hasil pengujian yang dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan dari penelitian ini, yaitu :

1. Peningkatan laju aliran fluida memperbesar nilai bilangan Reynold, koefisien transport massa dan *wall shear stress*
2. Peningkatan laju aliran akan membuat laju korosi baja API 5L X-52 akan mengalami peningkatan pada kondisi teraerasi maupun mengandung gas CO<sub>2</sub>. Dimana pada lingkungan teraerasi hubungan peningkatannya adalah linear dan yang mengandung gas CO<sub>2</sub> hubungan peningkatannya adalah polinomial.
3. Laju korosi baja API 5L X-52 pada kondisi lingkungan teraerasi dengan variasi putaran 0 s/d 3000 RPM akan meningkat dari 20-313 mpy.
4. Peningkatan laju korosi lingkungan teraerasi terhadap kecepatan diakibatkan oleh semakin besarnya transport massa yang membuat suplai oksigen menjadi lebih kontinu dan membesarnya nilai *wall shear stress* yang membuat lapisan oksida tergerus.
5. Laju korosi baja API 5L X-52 pada kondisi lingkungan teraerasi dengan variasi putaran 0 s/d 3000 RPM akan meningkat dari 60 s/d 240 mpy dimana laju korosi tidak terlalu sensitif terhadap peningkatan laju aliran.
6. Peningkatan laju korosi lingkungan yang mengandung CO<sub>2</sub> terhadap kecepatan disebabkan oleh menurunnya laju pengendapan FeCO<sub>3</sub> akibat terlepasnya ion Fe ke larutan dan membesarnya nilai *wall shear stress* yang membuat lapisan protektif tergerus.
7. Pada proses korosi lingkungan teraerasi, proses korosi dikontrol oleh transport massa. Sedangkan pada korosi yang mengandung gas CO<sub>2</sub> proses transport massa namun tidak terlalu signifikan efeknya akibat adanya lapisan protektif yang menghambat laju korosi.

### Daftar Pustaka

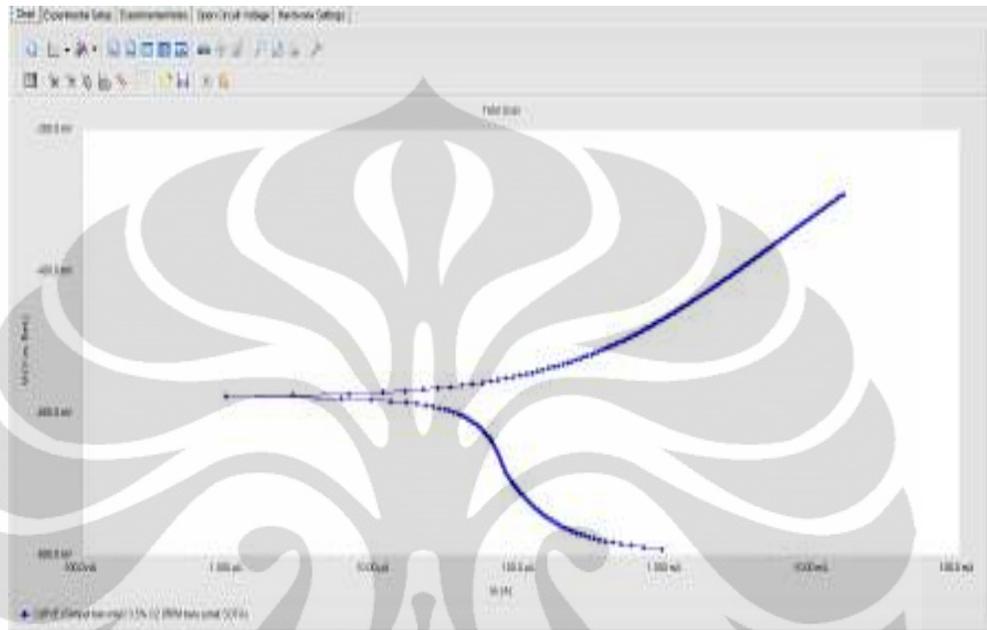
1. Das, G.S., & Khanna, A.S.(2004). Corrosion Behaviour of Pipeline Steel in CO<sub>2</sub> Environment. *Indian Institute of Technology*.
2. Jones, Denny A. (1992). *Principles and Prevention of Corrosion*. Singapura: Maxwell Macmillan.
3. Netic, S., Postlethwaite, J., & Olsen, S. (1996). An Electrochemical Model for Prediction of Corrosion of Mild Steel in Aqueous Carbon Dioxide Solutions. *Corrosion Science*.
4. PINE Research Instrumentation. (2006). Study of Mass-Transport Limited Corrosion Using Pine Rotating Cylinder Electrodes.
5. Zhang, Z., Hinkson, D., Singer, M., Wang, H., & Netic, S. (2007). Mechanistic Model of Top-of-line Corrosion. *Ohio University, Institute for Corrosion and Multiphase Technology. Corrosion-Vol. 63, No.11. NACE International*.
6. Yuli, P. A., Mokhtar, C. I., (2010). Application of Response Surface Design to Characterize CO<sub>2</sub> Corrosion Mechanistically. *Petromine Pipeliner*.
7. Soedarsono, Johny W., Rustandi, Andi., & Husein, Syarif. (2010) Studi Pengaruh Laju Alir Fluida Terhadap Laju Korosi Material UNS G10180 Pada Lingkungan NaCl 3,5 % Menggunakan Alat Uji *Rotating Cylinder Electrode* dengan Metode Polarisasi. *Fakultas Teknik Universitas Indonesia*.
8. Rustandi, Andi., & Iandono, Dito. (2011). Studi Laju Korosi Baja Karbon untuk Pipa Penyalur Proses Produksi Gas Alam yang Mengandung Gas CO<sub>2</sub> pada Lingkungan NaCl 0.5, 1.5, 2.5 dan 3.5 %. *Fakultas Teknik Universitas Indonesia*.
9. Nazari, M., Honarvar, Allahkaram & S.R., Kermani, M.B. The effects of temperature and pH on the characteristics of corrosion product in CO<sub>2</sub> corrosion of grade X70 steel.
10. Roberge, Pierre R. (1999). *Handbook of Corrosion Engineering*. New York : Mc Graw-Hill Book Company.

11. Netic. S. K., & Lee, L. J. (2003). A Mechanistic Model for Carbon Dioxide Corrosion of Mild Steel in the Presence of Protective Iron Carbonate – Part 1, 2, 3. 7. *Columbus : NACE, 2003, Vol. CORROSION JOURNAL VOL. 59.*
12. Netic, S., & Pots, B.F.M., Postlethwaite, J., & Thevenot, N. (2007). Superposition of diffusion and Chemical Reaction Controlled Limiting Currents – Application to CO<sub>2</sub> Corrosion. *Institute for Energy Technology (IFE).*
13. Fang, Haitao. (2006). Low Temperature And High Salt Concentration Effect on General CO<sub>2</sub> Corrosion for Carbon Steel. *The Russ College of Engineering and Technology of Ohio University.*
14. Ortega-Toledo, D.M., Gonzalez-Rodriguez, J.G., Casales, M., Caceres, A., & Martinez, L. (2011). Hydrodynamic Effects on the CO<sub>2</sub> Corrosion Inhibition of X-120 Pipeline Steel by Carboxyethyl-imidazoline. *International Journal of Electronic Science.*
15. Castaneda, H., Zambrano, G., Angeles, C., & Genesca, J. (2004). Film Stability for API 5L X-52 Line Pipe Steel In CO<sub>2</sub> (aq) and Cl<sup>-</sup>(aq) Solution In Presence of Amine Based Inhibitor Under Hydrodynamic Condition. *NACE International.*
16. <http://www.esdm.go.id/berita/migas/40-migas/3190-cadangan-produksi-gas-bumi-indonesia-mencapai-59-tahun.html>, diakses pada 11 November 2011 pukul 16.30

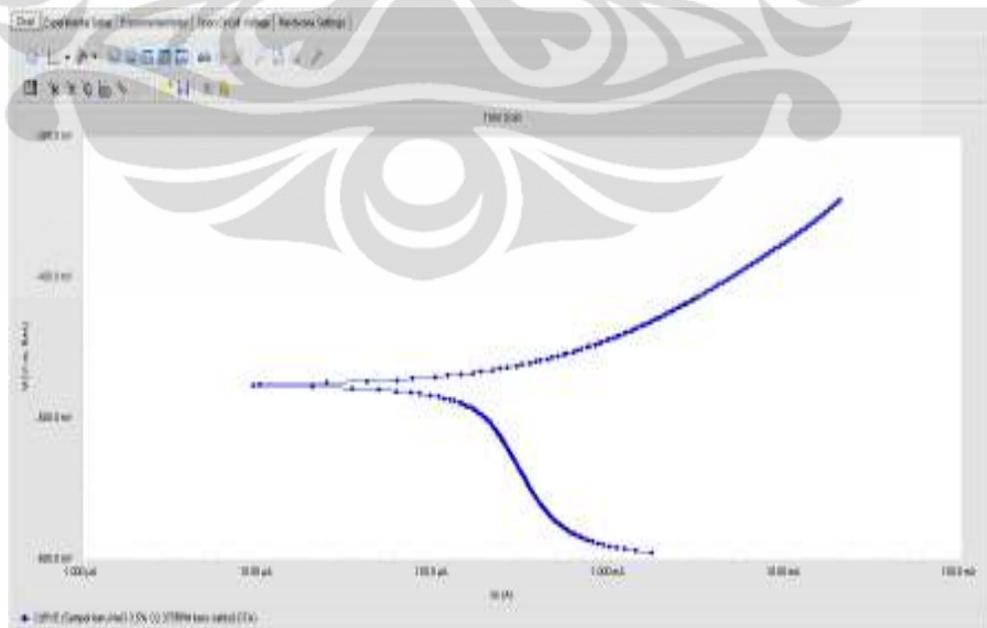


**Lampiran 1.** Hasil pengujian polarisasi dalam larutan NaCl teraerasi

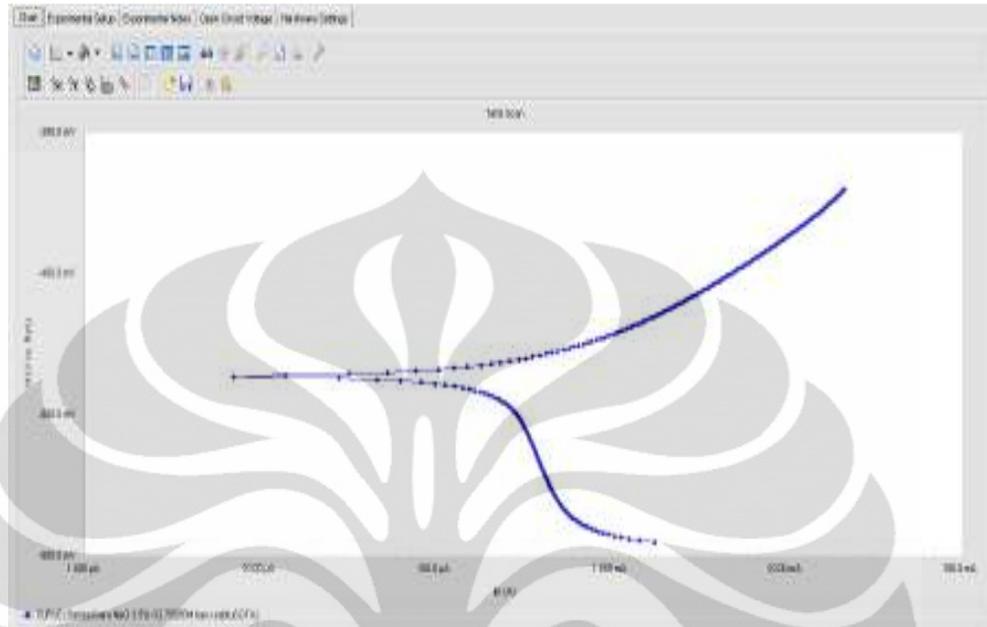
**1. Tafel analisis baja API 5L X-52 pada Kecepatan 0 RPM**



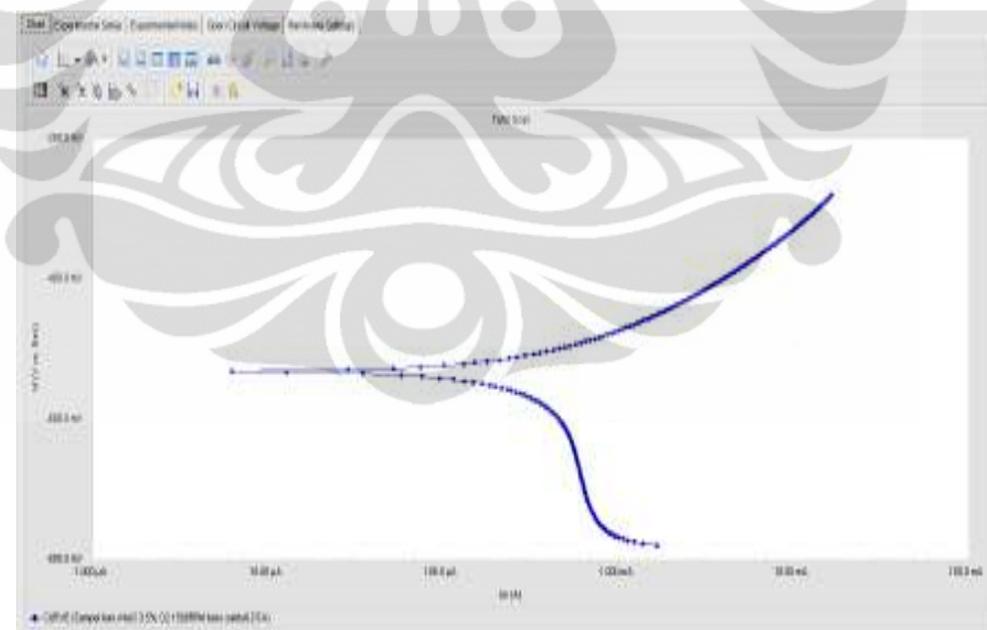
**2. Tafel analisis baja API 5L X-52 pada Kecepatan 375 RPM**



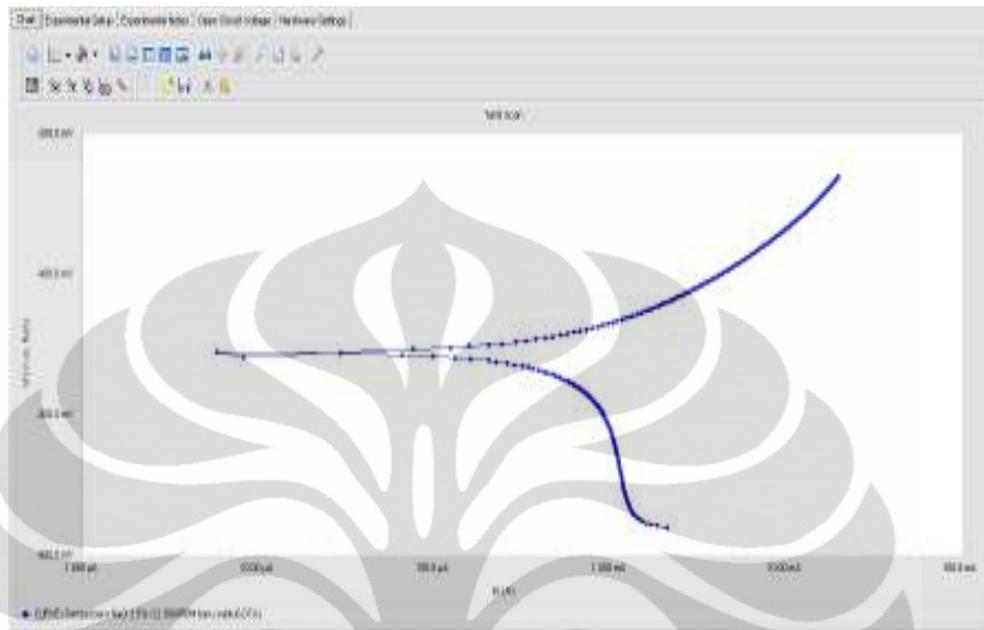
### 3. Tafel analisis baja API 5L X-52 pada Kecepatan 750 RPM



### 4. Tafel analisis baja API 5L X-52 pada Kecepatan 1500 RPM

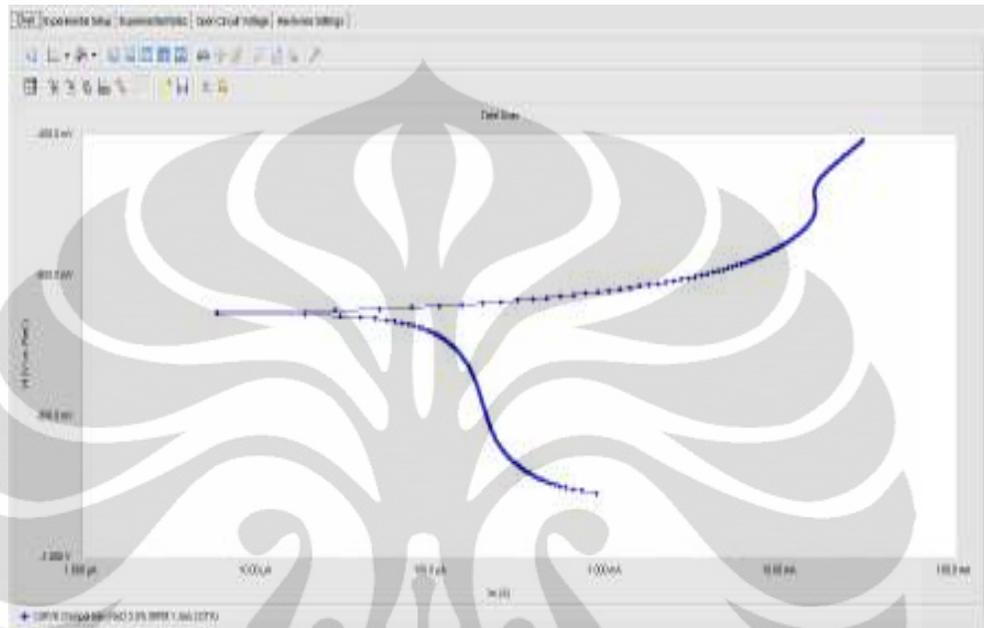


### 5. *Tafel analisis* baja API 5L X-52 pada Kecepatan 3000 RPM

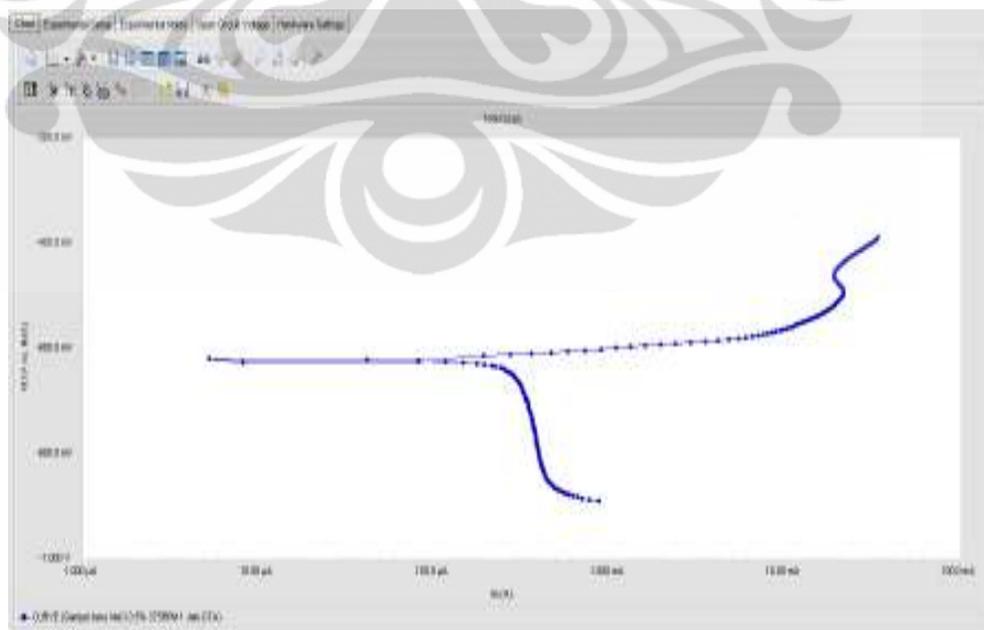


**Lampiran 2.** Hasil pengujian polarisasi dalam larutan NaCl mengandung CO<sub>2</sub>

**1. Tafel analisis baja API 5L X-52 pada Kecepatan 0 RPM**

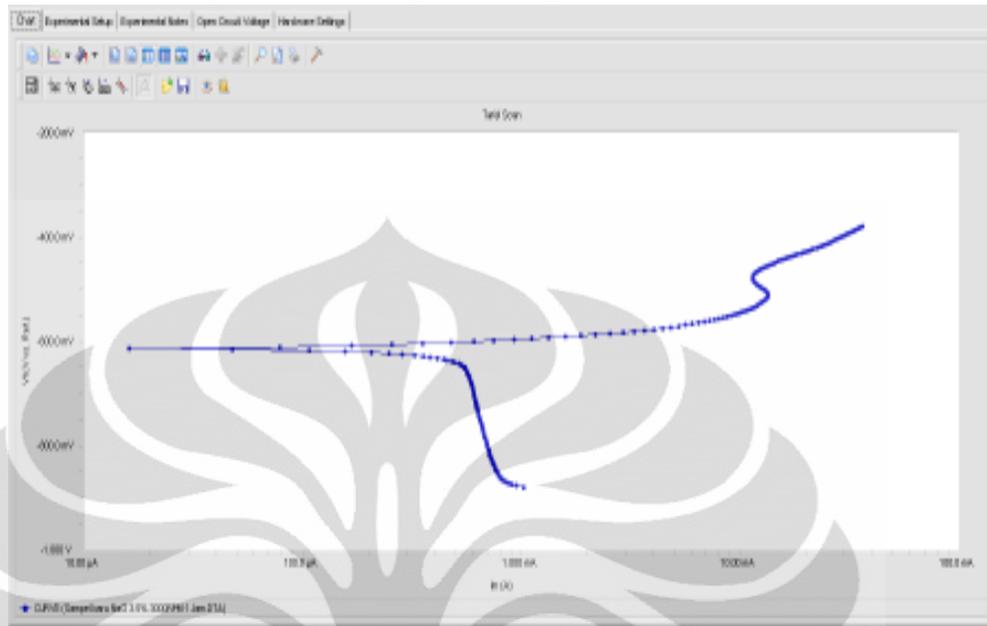


**2. Tafel analisis baja API 5L X-52 pada Kecepatan 375 RPM**





### 5. Tafel analisis baja API 5L X-52 pada Kecepatan 3000 RPM





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

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA  
 Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888 111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

**LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA**  
**COMPOSITION TEST REPORT**

Page 1 of 1

No Laporan <i>Report No</i>	279	Bahan <i>Material</i>	Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Dito Landiano	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	Code : X52
Alamat <i>Address</i>	DTMM-FTUI	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	12 Mei 2011
No Kontrak <i>Contract No</i>	0557/PT.02/FT04/P/2011	Standar <i>Standard</i>	ASTM A751 ASTM E415
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	19 Mei 2011	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Optical Emission Spectrometer <sup>1</sup>

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
X52	0.140	0.011	<0.003 <sup>2</sup>	<0.003 <sup>2</sup>	0.662	<0.005 <sup>2</sup>	0.021
	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
	<0.005 <sup>2</sup>	0.019	0.009	<0.002 <sup>2</sup>	<0.002 <sup>2</sup>	0.043	bal.

**CATATAN:**

1. Akurabilitas bertangan dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan K=2
2. (<) menandakan nilai berada di bawah quantifikasi limit dari nilai uji

Depok, 20 Mei 2011  
 Manajer Teknis  
 Laboratorium Uji  
 Departemen Teknik Metalurgi Dan Material



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

FF-25/ LU-DTMM Rev 2

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