



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI LAJU KOROSI PADA SAMPEL PIPA BAJA API 5L X-52  
DENGAN PENGARUH VARIASI KECEPATAN PUTARAN DAN GAS  
CO<sub>2</sub> PADA PH 6 DALAM LARUTAN NaCl 3.5%**

**SKRIPSI**

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

**TEZAR PRIMA NURHAMZAH**

**0806319255**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

**DESEMBER 2011**

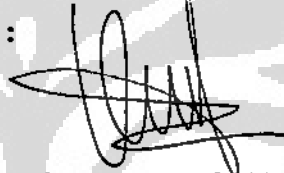
## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Tezar Prima Nurhamzah**

**NPM : 0806319255**

**Tanda Tangan :**



**Tanggal : 29 Desember 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Tezar Prima Nurhamzah  
NPM : 0806319255  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi laju korosi pada sampel pipa baja API 5L X-52 dengan pengaruh variasi kecepatan putaran pada pH 6 dalam larutan NaCl 3.5%

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.

( *Andi Rustandi* )

Penguji 1 : Ir. Bambang Priyono M.T

( *Bambang Priyono* )

Penguji 2 : Mochamad Chalid S.Si., M.Sc.Eng

( *Mochamad Chalid* )

Ditetapkan : Depok, Desember 2011

## 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 saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno, selaku Kepala Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
3. Dr. Badrul Munir S.T., M.Eng. S.C., selaku Pembimbing Akademis.
4. Dr. Ir. Ahmad Herman Yuwono, M.Phil-Eng, selaku Koordinator Mata Kuliah Spesial Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
5. Semua dosen yang ada di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan selama 4 tahun masa perkuliahan.
6. Orang tua penulis, ayahanda Ir. Zamhari Hamid M.M dan ibunda Netty Herawati, serta adik Jasmine Ariesta Dwi Pratiwi yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan materil hingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini.
7. Nur Aziz Oktaviawan, Nitiyoga Adhika, dan Mas Alfin Alhakim sebagai rekan seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir.
8. Teman-teman seangkatan Metalurgi dan Material 2008 yang telah memberikan rasa kekeluargaan dan kenyamanan selama masa kuliah.
9. Sahabat terbaik saya Reza Muhammad Alfaiz dan Arya Pinandita atas support dan doanya selama ini.

10. Teman-teman kosan Bukit Pisang, Heri, Noval, Didi, Suprayogi, Andre, Dede, Bang Kevin, Bang Dudit, Bram, dan Dimas yang telah 3 tahun bersama berbagi pengalaman baik susah maupun senang di kosan selama masa kuliah. Sukses untuk kita semua bro!
11. Girls Generation dan Runningman sebagai teman penghilang rasa penat Tugas Akhir.
12. Serta senior dan junior yang banyak memberikan semangat.
13. Seluruh pihak yang ikut membantu dalam penyelesaian Skripsi ini.

Akhir kata, saya hanya bisa mengucapkan terima kasih sebesar – besarnya kepada semua pihak, baik yang telah disebut maupun tidak, Semoga skripsi dapat menjadi pembelajaran bagi pihak penulis maupun pihak pembaca dan dapat berguna bagi bangsa Indonesia dihari yang akan datang.

Depok, Desember 2011

Penulis

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

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

nama : Tezar Prima Nurhamzah  
NPM : 0806319255  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Kelas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

Untuk 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 LAJU KOROSI PADA SAMPEL PIPA BAJA API 5L X-52 DENGAN  
PERNGARUH VARIASI KECEPATAN PUTARAN DAN GAS CO<sub>2</sub> PADA PH 6  
DALAM LARUTAN NaCl 3.5%**

serta 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 tanpa mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Dengan demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada Tanggal : 29 Desember 2011

Yang menyatakan



(Tezar Prima Nurhamzah)

## ABSTRAK

Nama : Tezar Prima Nurhamzah  
NPM : 0806319255  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Laju Korosi Pada Sampel Pipa Baja API 5L X-52 Dengan Pengaruh Variasi Kecepatan Putaran Dan Gas CO<sub>2</sub> Pada pH 6 Dalam Larutan NaCl 3.5%

Proses produksi Gas Alam yang umum dipakai sebagai pipa penyalur, baik *flowline* maupun *pipeline* biasanya menggunakan material baja karbon. Ada 3 faktor masalah besar dalam penggunaan material tersebut yang berkaitan dengan korosi yang biasanya terjadi pada proses tersebut. 3 faktor tersebut antara lain terjadinya kebocoran akibat pengaruh adanya gas CO<sub>2</sub> yang terlarut dalam media air, adanya laju aliran fluida dalam pipa dan lingkungan bersifat korosif (asam). Dalam upaya mengatasi masalah tersebut di atas, perlu diketahui besaran laju korosi material baja akibat pengaruh gas CO<sub>2</sub> terlarut.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi laju korosi material baja yang digunakan pada proses produksi gas alam yang mengandung CO<sub>2</sub> dalam berbagai kondisi yang mewakili kondisi sesungguhnya di dalam aplikasi seperti pengaruh tekanan parsial CO<sub>2</sub>, komposisi larutan, dan temperatur. Penelitian dilakukan dengan metoda uji polarisasi. Hasil dari penelitian ini akan merefleksikan besaran laju korosi yang terjadi pada pipa penyalur gas alam akibat pengaruh CO<sub>2</sub> terlarut, variasi kecepatan putaran, dan pengaruh perubahan pH.

Pada pH 5, laju korosi baja karbon pada lingkungan yang mengandung CO<sub>2</sub> akan naik seiring dengan kenaikan laju aliran, tetapi begitu pH dinaikkan menjadi 6 laju korosi cenderung turun, suasana yang lebih basa dapat menurunkan laju korosi. Laju korosi yang tinggi ini akan membahayakan *pipeline* dan *flowline* penyalur gas alam. Hasil dari penelitian ini merupakan tahap awal, sebagai bahan simulasi yang terjadi pada pipa baja karbon pada proses produksi gas alam dan agar di kemudian hari dapat dicari upaya penanggulangannya dalam melawan 3faktor masalah besar tersebut sehingga dapat digunakan sesuai dengan umur pakai (*life time*) yang telah dirancang.

Kata kunci: Baja karbon, gas CO<sub>2</sub>, laju korosi, laju aliran, pH 6

## ABSTRACT

Name : Tezar Prima Nurhamzah  
NPM : 0806319255  
Major : Metallurgy and Material Engineering  
Title : Study of Corrosion Rate of Carbon Steel pipe sample API 5L X-52 influenced by varied of rotation rate and CO<sub>2</sub>, pH 6 on 3.5% NaCl

Carbon steel is commonly used as flowline and pipeline in natural gas production process. There are 3 big causes on using that material which related to corrosion problem. The 3 factors such as leakage due to effect of dissolved CO<sub>2</sub> in water that causes corrosive environment (acid), fluid's flow rate inside the pipeline, and acid environment. In order to overcome this problem, further study must be carried out about corrosion rate model of this steel in dissolved CO<sub>2</sub> condition.

The aim of this research is to study corrosion rate of steel as flowline and pipeline in natural gas production process with CO<sub>2</sub> content and variety of conditions that represent the actual conditions in practice such as CO<sub>2</sub> partial pressure, solution composition, and temperature. Research conducted by polarization test. The result of this study will illustrate the level of corrosion rate occurred in natural gas pipelines due to the effect of dissolved CO<sub>2</sub>, variation of rotation rate, and effect of pH.

On PH 5, Corrosion rate of carbon steel in environments containing CO<sub>2</sub> will increase along with the increase of flow rate, but when pH is increasing to 6, flow rate suddenly decrease, alkali(base) environment decreasing flow rate. The high corrosion rate observed would damage natural gas transmission pipeline and flowline. The result of this study is the first step, as a simulation things that happen in actual carbon steel, and hope in the future there are good protection method which can fight with these 3 big causes, so it can appropriate with the lifetime that has been designed.

Keywords: Carbon steel, CO<sub>2</sub>, corrosion rate, flow rate, pH 6



## DAFTAR ISI

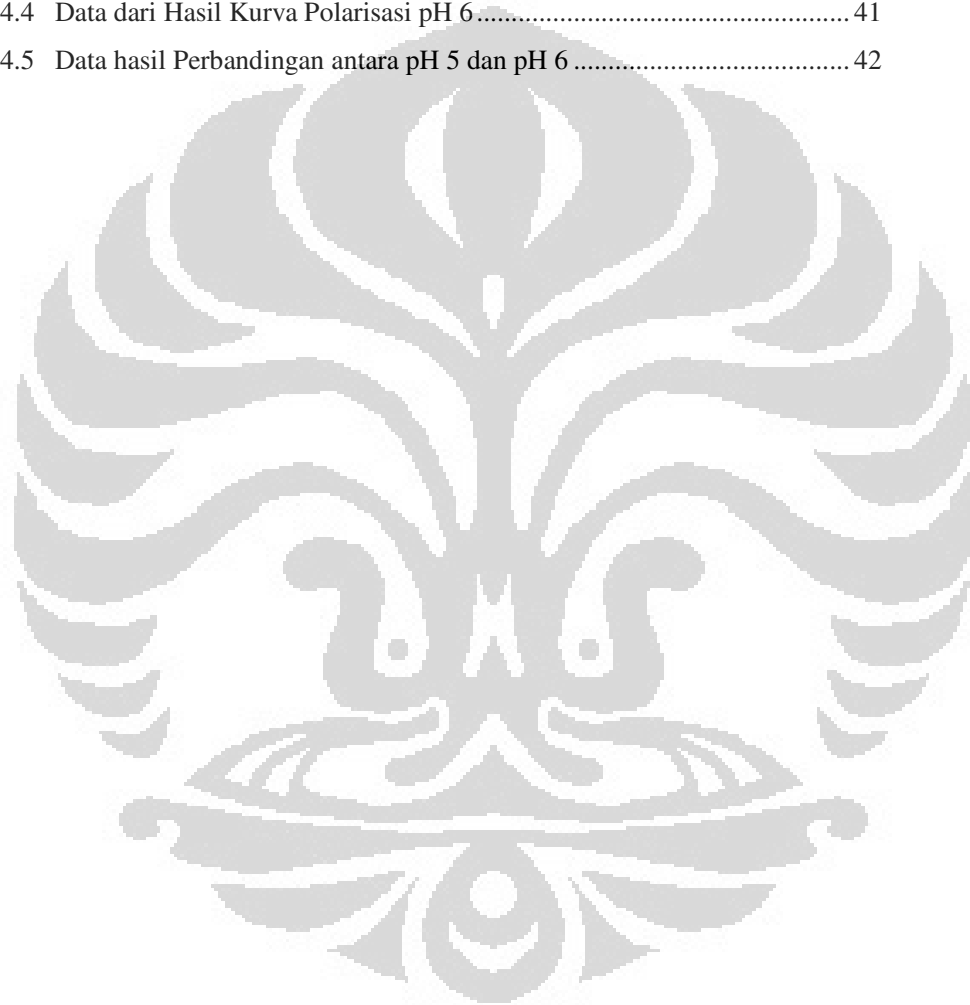
|   |          |
|---|----------|
| HALAMAN JUDUL .....                                     | i        |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS .....                   | ii       |
| HALAMAN PENGESAHAN.....                                 | iii      |
| KATA PENGANTAR .....                                    | iv       |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....           | vi       |
| ABSTRAK.....  | vii      |
| ABSTRACT.....   | viii     |
| DAFTAR ISI.....   | ix       |
| DAFTAR TABEL.....                                       | xii      |
| DAFTAR GAMBAR.....                                      | xiii     |
| DAFTAR LAMPIRAN.....                                    | xiv      |
| <b>1 PENDAHULUAN .....</b>                              | <b>1</b> |
| 1.1 Latar Belakang.....                                 | 1        |
| 1.2 Perumusan Masalah .....                             | 2        |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....                             | 4        |
| 1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....                       | 4        |
| 1.4.1 Material Uji .....                                | 4        |
| 1.4.2 Lingkungan.....                                   | 4        |
| 1.4.3 Variabel Pengujian.....                           | 4        |
| 1.5 Sistematika Penulisan .....                         | 4        |
| <b>2 LANDASAN TEORI.....</b>                            | <b>2</b> |
| 2.1 Pengertian Korosi .....                             | 2        |
| 2.2 Jenis-Jenis Korosi.....                             | 7        |
| 2.2.1 Korosi Uniform.....                               | 8        |
| 2.2.2 Korosi Sumuran ( <i>Pitting Corrosion</i> ) ..... | 8        |
| 2.2.3 Korosi Erosi.....                                 | 9        |
| 2.2.4 Korosi Galvanik.....                              | 10       |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.3    | Termodinamika Korosi.....  | 11 |
| 2.4    | Laju Korosi.....   | 12 |
| 2.5    | Pengaruh Konsentrasi NaCl terhadap Laju Korosi.....                | 13 |
| 2.6    | Korosi Pada Baja .....   | 14 |
| 2.7    | Korosi Baja pada Lingkungan Air .....                              | 14 |
| 2.8    | Komposisi Air.....   | 15 |
| 2.8.1  | pH.....  | 16 |
| 2.8.2  | Gas yang Terlarut ( <i>Dissolve Gas</i> ).....                     | 16 |
| 2.8.3  | Hardness.....  | 17 |
| 2.9    | Pengenalan Gas Alam .....  | 17 |
| 2.9.1  | Gambaran Umum.....   | 17 |
| 2.9.2  | Komposisi Gas Alam .....   | 18 |
| 2.9.3  | Macam-macam Gas Alam.....  | 18 |
| 2.9.4  | Sifat-sifat Fisik Gas Alam.....                                    | 19 |
| 2.9.5  | Pengolahan Gas Alam ( <i>Gas Treating/Processing</i> ).....        | 20 |
| 2.9.6  | Transmisi Gas Alam ( <i>Gas Transmision</i> ).....                 | 20 |
| 2.10   | Korosi CO <sub>2</sub> .....                                       | 20 |
| 2.10.1 | Mekanisme Korosi CO <sub>2</sub> : .....                           | 21 |
| 2.10.2 | Faktor-faktor yang mempengaruhi korosi CO <sub>2</sub> .....       | 23 |
| 2.11   | Pengaruh Lapisan Korosi terhadap Laju Korosi CO <sub>2</sub> ..... | 27 |
| 3      | METODOLOGI PENELITIAN .....  | 31 |
| 3.1    | Diagram Alir Penelitian .....                                      | 31 |
| 3.2    | Peralatan dan Bahan.....   | 31 |
| 3.2.1  | Peralatan.....   | 31 |
| 3.2.2  | Bahan .....  | 31 |
| 3.3    | Prosedur Penelitian .....  | 32 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.3.1 | Preparasi Sampel .....   | 32 |
| 3.3.2 | Pembuatan Larutan Uji .....                                      | 32 |
| 3.3.3 | Pengujian Komposisi Sampel.....                                  | 32 |
| 3.3.4 | Pengujian pH larutan.....  | 32 |
| 3.3.5 | Pengujian Laju Korosi .....                                      | 33 |
| 3.3.6 | Analisis Laju Korosi.....  | 35 |
| 4     | DATA DAN PEMBAHASAN.....   | 36 |
| 4.1   | Komposisi Sampel.....  | 36 |
| 4.2   | Karakterisasi Larutan.....                                       | 36 |
| 4.2.1 | Pengukuran pH.....   | 36 |
| 4.3   | Kurva Polarisasi dan Analisa.....                                | 39 |
| 4.3.1 | Kurva Polarisasi pada kondisi pH 5.....                          | 39 |
| 4.3.2 | Kurva Polarisasi pada pH 6.....                                  | 41 |
| 4.4   | Perbandingan antara kurva polarisasi pH 5 dan pH 6.....          | 43 |
| 4.4.1 | Perbedaan dilihat dari besar nilai CR (corrosion rate) nya ..... | 44 |
| 4.4.2 | Perbedaan dilihat dari bentuk kurva .....                        | 45 |
| 5     | KESIMPULAN.....  | 46 |
|       | DAFTAR PUSTAKA.....  | 48 |
|       | LAMPIRAN.....  | 51 |

## DAFTAR TABEL

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tabel 2.1 | Tabel hubungan laju korosi dan ketahanan korosi.....                 | 12 |
| Tabel 2.2 | Perbandingan daya larut gas CO <sub>2</sub> dan O <sub>2</sub> ..... | 21 |
| Tabel 4.1 | Komposisi sampel baja API 5L X-52 .....                              | 35 |
| Tabel 4.2 | Pengujian Kadar pH setelah dipurging CO <sub>2</sub> .....           | 36 |
| Tabel 4.3 | Data Hasil dari Kurva Polarisasi pH 5 .....                          | 39 |
| Tabel 4.4 | Data dari Hasil Kurva Polarisasi pH 6.....                           | 41 |
| Tabel 4.5 | Data hasil Perbandingan antara pH 5 dan pH 6 .....                   | 42 |



## DAFTAR GAMBAR

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.1  | Contoh Korosi Uniform .....  | 8  |
| Gambar 2.2  | Korosi sumuran dan bentuk-bentuknya .....                                  | 9  |
| Gambar 2.3  | Skema korosi erosi .....   | 9  |
| Gambar 2.4  | Korosi Cavitasi .....  | 10 |
| Gambar 2.5  | Skema Fretting .....   | 10 |
| Gambar 2.6  | Korosi Galvanik .....  | 10 |
| Gambar 2.7  | Diagram Pourbaix Fe pada 25 C .....  | 12 |
| Gambar 2.8  | Pengaruh konsentrasi NaCl terhadap laju korosi baja karbon .....           | 13 |
| Gambar 2.9  | Grafik Pengaruh tekanan parsial CO <sub>2</sub> terhadap laju korosi ..... | 24 |
| Gambar 2.10 | Grafik hubungan laju aliran dengan laju korosi .....                       | 26 |
| Gambar 2.11 | Grafik hubungan temperatur dengan laju korosi .....                        | 29 |
| Gambar 2.12 | Grafik pengaruh pH terhadap laju korosi CO <sub>2</sub> .....              | 30 |
| Gambar 3.1  | Rotating Cylinder .....  | 32 |
| Gambar 3.2  | Serbuk NaHCO <sub>3</sub> .....  | 34 |
| Gambar 3.3  | Rangkaian Alat .....   | 35 |
| Gambar 3.4  | Pembacaan nilai pH 6 pada pH meter .....                                   | 35 |
| Gambar 3.5  | Rangkaian Sel Polarisasi .....   | 36 |
| Gambar 3.6  | Panduan pemasangan jepit untuk software Gamry .....                        | 36 |
| Gambar 4.1  | pH meter yang menunjukkan nilai pH 7 .....                                 | 38 |
| Gambar 4.2  | Pengukuran pH dengan menggunakan pH meter .....                            | 39 |
| Gambar 4.3  | pH meter menunjukkan nilai pH 6 setelah ditambah NaHCO <sub>3</sub> .....  | 40 |
| Gambar 4.4  | Kurva Polarisasi pada pH 5 .....   | 41 |
| Gambar 4.5  | Kurva Polarisasi pada pH 6 .....   | 43 |

## DAFTAR LAMPIRAN

### PH 6

- Kurva Polarisasi 0 RPM.....51
- Kurva Polarisasi 375 RPM.....51
- Kurva Polarisasi 750 RPM.....51
- Kurva Polarisasi 1500 RPM.....52
- Kurva Polarisasi 3000 RPM.....52
- Plot titik berdasarkan Kurva Polarisasi (excel) 0, 375, 750, 1500, dan 3000 RPM..52

### PH 5

- Kurva Polarisasi 0RPM.....63
- Kurva Polarisasi 375RPM.....63
- Kurva Polarisasi 750RPM.....63
- Kurva Polarisasi 1500RPM.....64
- Kurva Polarisasi 3000RPM.....64
- Plot titik berdasarkan Kurva Polarisasi (excel) 0, 375, 750, 1500, dan 3000RPM...64

## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Gas alam merupakan salah satu energi alternatif yang sangat potensial. Gas alam dapat menjadi energi alternatif untuk menggantikan bahan bakar minyak yang cadangannya semakin menipis. Cadangan gas alam di Indonesia sendiri masih sangat besar. Cadangan ini baru pada sumur-sumur yang telah tereksplorasi, dan masih banyak lagi sumur-sumur yang belum tereksplorasi<sup>[7]</sup>.

Dalam pemanfaatan sumber daya gas alam yang ada di Indonesia, tentunya dibutuhkan suatu proses eksplorasi dan produksi yang sangat aman dan ramah lingkungan. Ada banyak masalah yang terdapat dalam pengolahan gas alam, diantaranya dari segi peralatan dan maintenance dari peralatan tersebut. Salah satu dari masalah yang akan timbul dalam pengolahan gas alam adalah terjadinya degradasi pada material akibat reaksi elektrokimia lingkungan atau biasa disebut sebagai korosi.

Material baja merupakan material yang sangat umum digunakan pada industri perminyakan sebagai pipa penyalur gas alam. Material baja digunakan sebagai material penyusun *pipeline* dan *flowline* untuk mengalirkan gas alam untuk diproses lebih lanjut. *Hal ini karena sifatnya yang mudah di-machining* dan memiliki keuletan yang tinggi. Disamping itu, harganya relatif lebih murah, tetapi memiliki sifat-sifat yang baik untuk berbagai aplikasi di dunia industri. Namun, material baja memiliki beberapa kelemahan, antara lain kekerasannya rendah dan tidak tahan aus. Selain itu, baja karbon memiliki ketahanan terhadap korosi yang tidak begitu baik pada berbagai lingkungan. Salah satu kelemahan baja karbon dalam industri pengeksplorasi gas alam adalah sangat rentan terkorosi pada lingkungan yang mengandung karbon dioksida (*CO<sub>2</sub> environment*).

Pada umumnya proses korosi tidak dapat dihentikan sama sekali karena merupakan suatu proses alami yang akan terjadi saat suatu logam kontak dengan lingkungannya. Hal ini tentunya akan mengakibatkan berkurangnya nilai logam secara teknis dan penurunan kualitas logam yang dapat menyebabkan berkurangnya umur pakai (*lifetime*) dari logam. Salah satu contohnya adalah pada material baja yang banyak digunakan pada industri migas sebagai pipa penyalur.

Pada industri pengolahan gas alam, gas CO<sub>2</sub> merupakan gas yang paling banyak terkandung di dalamnya, baik itu berasal dari sumur produksi maupun dari hasil pengolahan. Pada dasarnya kandungan gas CO<sub>2</sub> dalam gas alam tidak terlalu berbahaya terhadap material penyalur. Namun, adanya interaksi antara gas CO<sub>2</sub> dengan fasa liquid akan menyebabkan korosi internal pada material yang dikenal sebagai korosi CO<sub>2</sub> (*CO<sub>2</sub> corrosion*). Korosi CO<sub>2</sub> ini merupakan masalah utama yang banyak dijumpai pada industri pengolahan gas alam terutama pada proses eksplorasi dan penyaluran gas alam.

Banyak cara untuk mencegah korosi pada banyak perusahaan oil and gas, seperti penggunaan Anoda Korban atau biasa disebut *sacrificial Anode*, penggunaan *Impressed Current*, *Coating* dan *Painting*, serta penggunaan *Inhibitor*.

Penggunaan *inhibitor* adalah langkah proteksi korosi yang paling efektif untuk memproteksi korosi internal dari baja karbon yang digunakan untuk material *pipeline* dan *flowline* gas alam.

Penggunaan *inhibitor* dewasa ini banyak digunakan sebagai proteksi korosi pada fasilitas industri gas alam di seluruh dunia karena relatif hemat biaya dan fleksibel penggunaannya.

Salah satu latar belakang dari penulisan ini adalah melanjutkan penelitian dari Ir. Andi Rustandi M.T dan Dito Iandiano S.T yang bertemakan “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 %” dan penelitian dari Nur Aziz Oktoviawan yang bertemakan “Studi Pengaruh Laju Alir Fluida Terhadap Laju Korosi Baja API 5L X-52 Menggunakan Metode Polarisation Pada Lingkungan NaCl 0.5% Yang Mengandung Gas CO<sub>2</sub>”<sup>[7,14]</sup>.

## 1.2 Perumusan Masalah

Karakter gas alam Indonesia dengan kandungan CO<sub>2</sub> yang tinggi sering memicu kegagalan material akibat korosi CO<sub>2</sub> pada sistem *flowline* eksplorasi sumur gas alam dan sistem *pipeline* distribusi dari sumur gas alam ke pembangkit listrik. Kegagalan yang ditimbulkan oleh korosi CO<sub>2</sub> akan bersifat dini, jika dibandingkan dengan umur desain material.

Penggunaan material baja pada proses tersebut seringkali menghadapi masalah yang berkaitan dengan korosi yaitu terjadinya kebocoran akibat pengaruh adanya gas CO<sub>2</sub> yang



terlarut dalam media air dan bersifat korosif (asam). Pada internal pipeline seringkali terjadi masalah *top of line corrosion* karena adanya air yang terkondensasi. Sedangkan pada internal flowline terdapat media air formasi (mengandung ion klorida) dan gas CO<sub>2</sub> yang terlarut dapat menyebabkan terjadinya korosi merata. Dalam upaya mengatasi masalah tersebut di atas, perlu diketahui besaran laju korosi material baja akibat pengaruh gas CO<sub>2</sub> terlarut.

Media air laut yang ada pada penyaluran gas alam merupakan penyebab utama terjadinya korosi akibat gas CO<sub>2</sub>. Gas CO<sub>2</sub> menjadi sangat korosif apabila mengalami kontak dengan air laut, dimana akan menyebabkan timbulnya *sweet environment*. *Sweet environment* merupakan lingkungan yang sangat korosif, bersifat asam, dan tentunya akan memicu terjadinya korosi CO<sub>2</sub>. Media air laut ini sendiri tentunya juga memiliki kandungan garam terlarut dan tingkat salinitas yang berbeda-beda.

Berbagai macam metode untuk meminimalisir terjadinya korosi terutama korosi CO<sub>2</sub> pada material *pipeline* telah digunakan, salah satunya adalah penggunaan inhibitor sebagai salah satu metode proteksi korosi baja karbon sebagai material untuk *pipeline* dan *flowline*.

Sejauh ini, inhibitor surfaktan organik terutama nitrogen-berbasis, seperti amina, imidazoline dan garam merupakan metode yang paling efektif untuk memecahkan masalah ini. Namun demikian, evaluasi inhibitor umumnya hanya didasarkan pada hasil pengujian pada kondisi stagnan. Terdapat sejumlah studi tentang pengaruh kecepatan aliran terhadap kinerja inhibitor. Banyak yang berpendapat bahwa semakin cepat kecepatan aliran semakin mudah terbentuk film inhibitor tetapi dalam waktu tertentu film itu semakin menipis karena laju putaran yang tinggi<sup>[3]</sup>.

Pada dasarnya banyak hal yang mempengaruhi laju korosi pada pipa baja karbon yang sering digunakan pada industri tersebut. Diantaranya kandungan CO<sub>2</sub> pada lingkungan, kondisi laju aliran fluida didalam pipa, dan yang menjadi titik berat dalam tulisan ini yaitu kondisi pH lingkungan.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mengetahui corrosion rate pada sampel pipa baja API 5L dengan kondisi pH 6 dan diberi kecepatan aliran.
2. Mengetahui kondisi pH yang baik saat operasi dengan cara perbandingan kondisi pH yang berbeda (pH 5 dan pH 6).

### 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

#### 1.4.1 Material Uji

Material uji yang digunakan adalah baja karbon API 5L X-52. Material ini banyak digunakan sebagai *flowline* dan *pipeline* penyalur gas alam.

#### 1.4.2 Lingkungan

Lingkungan korosif yang digunakan adalah larutan NaCl teraerasi dan larutan NaCl yang mengandung CO<sub>2</sub> dengan konsentrasi NaCl 3,5 %. Lingkungan NaCl digunakan untuk mensimulasikan air laut yang digunakan sebagai medium penyaluran gas alam.

#### 1.4.3 Variabel Pengujian

Variabel pengujiannya dikelompokan sebagai berikut :

1. Parameter tetap :
  - a. Material API 5L X-52
  - b. Temperatur Lingkungan
2. Parameter tidak tetap :
  - a. Kecepatan putaran  
Kecepatan putaran yang digunakan pada penelitian ini menggunakan kecepatan 0, 375, 750, 1500, dan 3000 rpm.
  - b. Kondisi Lingkungan  
Kondisi lingkungan yang digunakan pada pengujian ini adalah Kondisi larutan NaCl 0.5% dengan kandungan CO<sub>2</sub> 1 bar dan memiliki nilai pH 6.

### 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 lingkup 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 CO<sub>2</sub>, mekanisme korosi CO<sub>2</sub> dan faktor-faktor yang mempengaruhi korosi CO<sub>2</sub>.

**c) Bab 3 Metodologi Penelitian**

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

**d) Bab 4 Data 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 didefinisikan sebagai degradasi dari material yang diakibatkan oleh reaksi kimia dengan material lain dan lingkungan<sup>[5]</sup>. Akibat adanya reaksi korosi, suatu material akan mengalami perubahan sifat ke arah yang lebih rendah atau dapat dikatakan kemampuan dari material tersebut akan berkurang. Dalam bidang metalurgi, peristiwa korosi dapat dipandang sebagai suatu peristiwa atau reaksi senyawa kembali ke bentuk asalnya atau bisa disebut sebagai kebalikan dari proses metalurgi ekstraksi.

Peristiwa korosi terjadi akibat adanya reaksi kimia dan elektrokimia. Namun, untuk terjadinya peristiwa korosi terdapat beberapa elemen utama yang harus dipenuhi agar reaksi tersebut dapat berlangsung. Elemen-elemen utama tersebut adalah sebagai berikut<sup>[6]</sup>:

##### a. Material

Dalam suatu peristiwa korosi, suatu material akan bersifat sebagai anoda. Anoda adalah suatu bagian dari suatu reaksi yang akan mengalami oksidasi. Akibat reaksi oksidasi, suatu logam akan kehilangan elektron, dan senyawa logam tersebut ion berubah menjadi ion-ion bebas.

##### b. Lingkungan

Dalam suatu peristiwa korosi, suatu lingkungan akan bersifat sebagai katoda. Katoda adalah suatu bagian dari reaksi yang akan mengalami reduksi. Akibat reaksi reduksi, lingkungan yang bersifat katoda akan membutuhkan elektron yang akan diambil dari anoda. Beberapa lingkungan yang dapat bersifat katoda adalah Lingkungan air, atmosfer, gas, mineral *acid*, tanah, dan minyak.

##### c. Reaksi antara material dan lingkungan

Adanya reaksi antara suatu material dengan lingkungannya merupakan suatu persyaratan yang sangat penting dalam terjadinya suatu peristiwa korosi. Reaksi korosi hanya akan terjadi jika terdapat hubungan atau kontak langsung antara material dan lingkungan. Akibat adanya hubungan tersebut, akan terjadi reaksi reduksi dan oksidasi yang berlangsung secara spontan

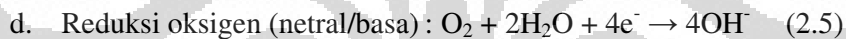
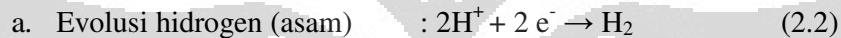
#### d. Elektrolit

Untuk mendukung suatu reaksi reduksi dan oksidasi dan melengkapi sirkuit elektrik, antara anoda dan katoda harus dilengkapi dengan elektrolit. Elektrolit menghantarkan listrik karena mengandung ion-ion yang mampu menghantarkan *elektroequivalen force* sehingga reaksi dapat berlangsung.

Reaksi korosi logam melibatkan dua reaksi setengah sel, yaitu reaksi oksidasi pada anoda dan reaksi reduksi pada katoda. Reaksi katoda dan anoda yang terjadi dalam proses korosi adalah sebagai berikut<sup>[5]</sup>.



Katoda :



Berdasarkan bentuk kerusakan yang dihasilkan, penyebab korosi, lingkungan tempat terjadinya korosi, maupun jenis material yang diserang, korosi teragi menjadi beberapa macam, diantaranya adalah korosi merata (*uniform corrosion*), korosi galvanic (*galvanic corrosion*), korosi celah (*crevice corrosion*), korosi sumuran (*pitting corrosion*), korosi batas butir (*intergranular corrosion*), korosi erosi (*erosion corrosion*), *fretting*, *dealloying*, *hydrogen damaged* dan *environmentally induced corrosion*<sup>[5]</sup>.

## 2.2 Jenis-Jenis Korosi

Jenis-jenis korosi yang terjadi pada suatu material dapat dipengaruhi oleh keadaan lingkungan sekitar. Jenis korosi yang umum terjadi, antara lain<sup>[4]</sup>:

### 2.2.1 Korosi Uniform

Korosi uniform merupakan jenis korosi yang diharapkan terjadi pada logam. Pada korosi uniform, kita dapat memprediksi umur pakai dari suatu peralatan. Pada korosi jenis ini, lingkungan korosif harus memiliki akses yang sama terhadap seluruh permukaan logam. Karakteristik utama dari korosi uniform adalah jenis reaksi kimia atau elektrokimia yang terjadi pada permukaan logam berjalan secara seragam pada semua permukaan yang terekspose pada lingkungan.



**Gambar 2.1.** Korosi uniform<sup>[4]</sup>

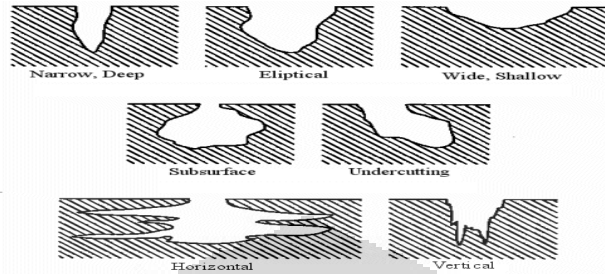
### 2.2.2 Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*)

Pada korosi sumuran, area anoda pada permukaan logam terlokalisasi pada suatu tempat sehingga korosi yang terjadi hanya pada daerah tersebut. Seluruh gaya pendorong (*driving force*) korosi terkonsentrasi pada daerah anoda sehingga laju korosi terjadi lebih cepat dibandingkan dengan laju korosi permukaan logam secara keseluruhan.

Korosi sumuran merupakan korosi yang paling sering menyerang logam dengan keadaan permukaan:

1. Mengalami kerusakan lapisan protektif (lapisan pasif) akibat perlakuan mekanik maupun kimia.
2. Memiliki cacat bentuk yang diakibatkan oleh dislokasi atau slip akibat tegangan tarik.
3. Memiliki komposisi kimia yang heterogen.

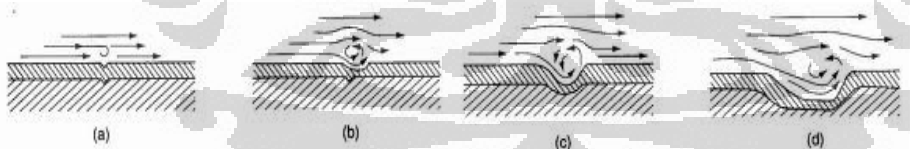
4. Adanya inklusi, segregasi, atau presipitasi.



**Gambar 2.2.** Korosi sumuran dan bentuk-bentuknya<sup>[4]</sup>

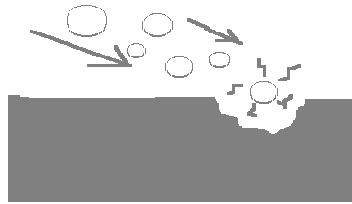
### 2.2.3 Korosi Erosi

Korosi erosi yang terjadi akibat pergerakan relatif antara fluida korosif dengan permukaan logam. Pada umumnya, pergerakan yang terjadi cukup cepat, sehingga terjadi efek keausan mekanis atau abrasi. Pergerakan yang cepat dari fluida korosif mengerosi secara fisik dan menghilangkan lapisan pasif. Pasir dan padatan lumpur mempercepat korosi erosi.



**Gambar 2.3.** Skema korosi erosi<sup>[4]</sup>

Cavitasi merupakan salah satu jenis korosi erosi. Cavitasi disebabkan oleh pecahnya gelembung udara yang dihasilkan karena perubahan tekanan disepanjang permukaan yang terekspose fluida dengan kecepatan tinggi. Ledakan menghasilkan ledakan bertekanan yang sangat tinggi yang mengganggu lapisan film dan bisa mengeluarkan partikel dari logamnya.



**Gambar 2.4.** Korosi kavitas<sup>[4]</sup>

*Fretting* juga merupakan salah satu jenis dari korosi erosi. Erosi disebabkan oleh pergerakan yang berulang, bisa juga dari getaran, antara logam dan padatan yang lainnya.



**Gambar 2.5.** Skema *fretting*<sup>[4]</sup>

#### 2.2.4 Korosi Galvanik

Korosi galvanik adalah korosi yang terjadi apabila dua logam yang berbeda potensialnya saling terhubung secara elektrik, atau terhubung dalam suatu elektrolit. Logam yang memiliki potensial lebih mulia (lebih positif dalam deret galvanik) akan menjadi katoda, sedangkan logam yang kurang mulia (lebih negatif dalam deret galvanik) menjadi anoda. Pada akhirnya korosi pada anoda terjadi lebih cepat, dan korosi di katoda akan terhambat atau bahkan berhenti (laju korosi mendekati nol).





**Gambar 2.6.** Korosi galvanic<sup>[4]</sup>

### 2.3 Termodinamika Korosi

Termodinamika adalah suatu ilmu yang mempelajari perubahan energi dalam suatu sistem. Dalam suatu sistem korosi, termodinamika dapat dipakai untuk mengetahui apakah logam dapat bereaksi secara spontan dengan lingkungannya. Apabila logam tersebut bereaksi, dapat diketahui bagaimana reaksi yang terjadi, kemana arah reaksi tersebut serta berapa besar gaya dorongnya<sup>[7]</sup>.

Diagram yang dapat menunjukkan suatu reaksi korosi dapat terjadi secara termodinamika adalah diagram kesetimbangan E-pH atau biasa dikenal dengan *pourbaix diagram*. Contoh dari diagram pourbaix dapat dilihat pada gambar 2.1. Diagram ini disusun berdasarkan kesetimbangan termodinamika antara logam dengan air dan dapat menunjukkan kestabilan dari beberapa fasa secara termodinamika.. Diagram ini sangat berguna untuk memprediksi reaksi dan produk korosi dari suatu material pada lingkungan dengan derajat keasaman tertentu. Namun, diagram ini tidak dapat menyajikan informasi untuk laju korosi dari material tersebut. Dalam suatu diagram pourbaix, keadaan suatu logam terbagi 3, yaitu

#### 1. *Imun*

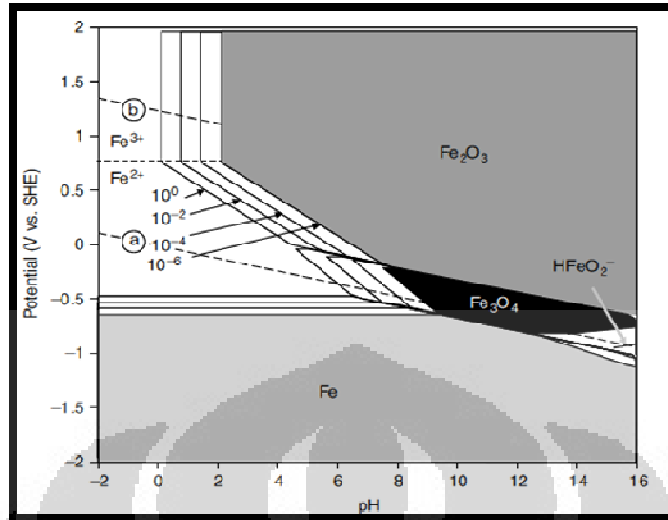
Adalah daerah dimana logam dalam berada dalam keadaan aman dan terlindung dari peristiwa korosi.

#### 2. *Passive*

Adalah daerah dimana logam akan membentuk suatu lapisan pasif pada permukaannya dan terlindung dari peristiwa korosi.

#### 3. *Corrosion*

Adalah daerah dimana logam akan mengalami peristiwa korosi



Gambar 2.7. Diagram pourbaix Fe pada 25 °C [7].

## 2.4 Laju Korosi

Laju korosi didefinisikan sebagai banyaknya logam yang dilepas tiap satuan waktu pada permukaan tertentu. Laju korosi umumnya dinyatakan dengan satuan *mils per year* (mpy). Satu *mils* adalah setara dengan 0,001 inci. Laju korosi dapat ditentukan dengan berbagai cara, diantaranya dengan ekstrapolasi kurva tafel. Pada tabel 2.1 berikut dapat dilihat hubungan laju korosi dengan ketahanan korosinya (relatif).

Tabel 2.1 Tabel hubungan laju korosi dan ketahanan korosi [5,6]

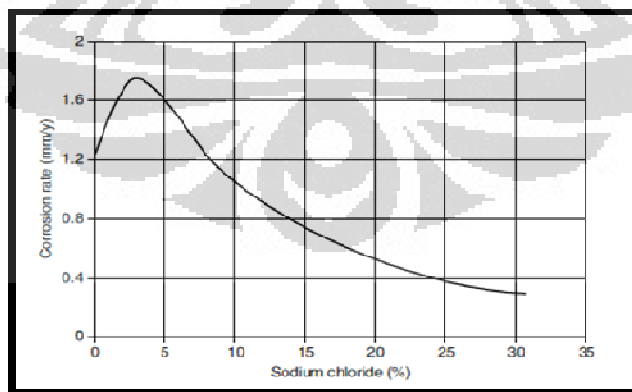
| Ketahanan Korosi<br>Relatif | Laju Korosi |            |             |           |          |
|-----------------------------|-------------|------------|-------------|-----------|----------|
|                             | mpy         | mm/yr      | µm/yr       | nm/hr     | pm/s     |
| Sangat baik                 | < 1         | < 0,02     | < 25        | < 2       | < 1      |
| Baik                        | 1 – 5       | 0,02 – 0,1 | 25 - 100    | 2 – 10    | 1 -5     |
| Cukup                       | 5 -20       | 0,1 – 0,5  | 100 - 500   | 10 – 50   | 20 - 50  |
| Kurang                      | 20 – 50     | 0,5 – 1    | 500 - 1000  | 50 – 150  | 20 - 50  |
| Buruk                       | 50 – 200    | 1 -5       | 1000 - 5000 | 150 – 500 | 50 - 200 |

## 2.5 Pengaruh Konsentrasi NaCl terhadap Laju Korosi

Dalam larutan, garam akan terurai menjadi anion dan kation pembentuknya. Ion-ion tersebut akan menjadikan larutan mampu menghantarkan muatan listrik yang mengalir dalam larutan tersebut. Hal ini mengakibatkan nilai konduktifitas dari larutan garam akan sebanding dengan konsentrasi garam terlarut dalam larutan tersebut<sup>[7]</sup>.

Proses korosi merupakan suatu reaksi elektrokimia antara logam sebagai anoda dengan lingkungan yang bertindak sebagai katoda<sup>[6]</sup>. Akibatnya, kecepatan berlangsungnya reaksi akan sangat ditentukan oleh konduktifitas dari larutan elektrolit yang menghubungkan antara anoda dan katoda. Larutan dengan konduktifitas yang baik akan mengakibatkan reaksi korosi berlangsung dengan cepat sehingga akan meningkatkan laju korosi<sup>[5]</sup>.

Namun, adanya ion-ion terlarut dalam larutan garam akan menurunkan agen pereduksi yang ada pada larutan tersebut. Salah satu contohnya, semakin besar konsentrasi NaCl dalam larutan teraerasi akan menurunkan kelarutan oksigen dalam larutan tersebut. Pada beberapa literatur disebutkan bahwa kelarutan optimum oksigen dalam larutan NaCl teraerasi terjadi pada konsentrasi NaCl 3 – 3,5 %. Kondisi tersebut ditunjukkan pada gambar 2.2, dimana suatu percobaan membuktikan bahwa laju korosi optimum baja karbon berada pada konsentrasi NaCl 3 – 3,5 %<sup>[5]</sup>.



**Gambar 2.8** Pengaruh konsentrasi NaCl terhadap laju korosi baja karbon

dalam larutan teraerasi<sup>[5]</sup>.

Pengaruh konsentrasi NaCl dalam larutan akan sangat berpengaruh terhadap laju korosi baja karbon dalam larutan tersebut. Peningkatan konsentrasi NaCl dalam larutan akan meningkatkan konduktivitas larutan sehingga meningkatkan laju korosi. Namun sebaliknya, peningkatan konsentrasi NaCl akan mengurangi kelarutan agen pereduksi dalam larutan sehingga akan menurunkan laju korosi baja karbon dalam larutan tersebut. Oleh karena itu, konsentrasi NaCl dapat meningkatkan dan menurunkan laju korosi baja karbon dalam larutan tersebut tergantung pada pengaruh yang dominan yang ditimbulkan oleh konsentrasi NaCl tersebut.

**2.6 Korosi Pada Baja**

Korosi pada baja timbul dari adanya ketidakstabilan termodinamika<sup>[4]</sup>. Baja ketika diproses dari besi, yang dibuat didalam blast furnace dengan mereduksi bijih besi seperti hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dengan karbon dalam bentuk kokas. Ini dapat diilustrasikan dengan persamaan kimia sederhana:



Reaksi ini terjadi pada temperatur tinggi. Produk akhir, baik besi maupun baja, tidaklah stabil karena energi yang diberikan pada proses ini sangatlah besar. Akibatnya, saat baja terekspose ke uap air, oksigen, atau air, maka baja ini cenderung kembali ke bentuk awalnya, dengan persamaan kimia:

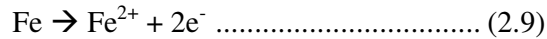


Karat (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.H<sub>2</sub>O) adalah oksida hidrat, yang serupa dengan hematit. Ini menjelaskan mengapa baja cenderung untuk berkarat pada kebanyakan situasi.

**2.7 Korosi Baja pada Lingkungan Air**

Pada kehidupan kita, air digunakan untuk berbagai macam tujuan sebagai pendukung kehidupan, mulai dari kehidupan sehari-hari sampai dalam industrial. Baja dan paduannya merupakan material yang paling banyak diaplikasikan untuk lingkungan air.

Reaksi korosi yang terjadi pada baja di lingkungan air adalah:



Karena air mengalami kontak dengan atmosfer sehingga mengandung oksigen yang terlarut. Air biasanya bersifat netral, sehingga reaksi katodik yang terjadi adalah reduksi oksigen.

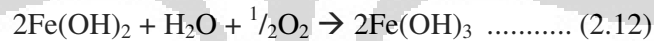


Secara keseluruhan, reaksi yang terjadi adalah:

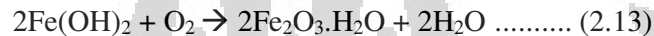


$\text{Fe}(\text{OH})_2$  atau *iron (II) hydroxide* mengendap dan tidak stabil. Dengan adanya oksigen di air,  $2\text{Fe}(\text{OH})_2$  teroksidasi kembali membentuk  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  atau *hydrated iron (III) oxide*.

Reaksi yang terjadi sebagai berikut:



Ferrous hidroksida ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) diubah menjadi *hydrat ferric oxide* atau biasa disebut karat, dengan oksigen:



$\text{Fe}(\text{OH})_2$  merupakan endapan berwarna hijau atau hijau kehitaman, sedangkan  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  merupakan endapan berwarna coklat kemerahan<sup>[4]</sup>.

## 2.8 Komposisi Air

Air mempunyai beberapa sifat unik, salah satunya adalah kemampuan untuk melarutkan beberapa derajat dari setiap zat yang ada di kulit bumi dan di atmosfer. Karena sifat ini, air mengandung berbagai macam padatan terlarut, gas terlarut dan pengotor lainnya, yang semuanya dapat mempengaruhi sifat korosif dari air yang kontak dengan logam<sup>[4]</sup>. Air yang mengandung garam dan asam lebih agresif terhadap baja karbon, sehingga komposisi air sangat penting dalam menentukan laju korosi pada baja.

### 2.8.1 pH

Reaksi anodik pada persamaan 2.11 berlaku pada semua rentang pH, tetapi laju korosi bervariasi terhadap perubahan reaksi reduksi di katoda. Pada rentang pH 4 sampai 10, terjadi pengendapan ferit oksida di permukaan. Pada rentang pH ini, oksigen tereduksi di katoda seperti pada persamaan 2.12.

Pada larutan yang lebih asam, pH dibawah 4, oksida terlarut dan laju korosi meningkat terhadap tersedianya  $H^+$ .



Ketiadaan endapan di permukaan juga mempertinggi akses dari oksigen terlarut, yang meningkatkan laju korosi. Oksigen terlarut tereduksi di katoda dengan reaksi pada persamaan 2.3.

Pada pH diatas 10, laju korosi lambat terhadap susunan dari lapisan pasif  $Fe_2O_3$  karena adanya oksigen terlarut. Pada pH sekitar 14, tanpa adanya oksigen terlarut, laju korosi meningkat kembali ketika terbentuk ion  $HFeO_2^-$ .

### 2.8.2 Gas yang Terlarut (*Dissolve Gas*)

Oksigen dan karbon dioksida merupakan gas terlarut yang paling penting di air. Oksigen merupakan penerima elektron yang dihasilkan oleh logam untuk terjadinya reaksi korosi logam pada air, sehingga jika jumlah oksigen yang terlarut terbatas maka laju korosi terbatas. Laju oksigen mencapai permukaan logam mengontrol laju korosi. Untuk korosi logam pada air biasanya oksigen terlarut sekita 25-45 ppm, tetapi dengan konsentrasi oksigen yang lebih tinggi dapat melambatkan laju korosi karena terjadi pasifasi pada logam oleh oksigen. Kelarutan oksigen menurun dengan peningkatan temperatur dan peningkatan tekanan.

Karbon dioksida mempengaruhi tingkat keasaman air dan mempengaruhi pembentukan endapan karbonat yang bersifat protektif. Asam karbonat, terbentuk dari  $CO_2$  terlarut, sedikit korosif, tetapi produk korosi,  $FeCO_3$ , membentuk lapisan permukaan dan bersifat protektif.

### 2.8.3 Hardness

Hardness merupakan salah satu sifat air yang menunjukkan kemampuan air untuk membentuk endapan atau *scale* yang protektif pada permukaan. Hardness dipengaruhi oleh jumlah karbon dioksida dan adanya garam seperti kalsium karbonat dan bikarbonat <sup>[4]</sup>

Air dengan tingkat hardness yang tinggi, disebut hard water, mengandung kation kalsium dan kation magnesium yang dapat membentuk lapisan karbonat yang protektif pada permukaan logam. Adanya karbon dioksida yang terlarut di air membentuk asam karbonat,  $H_2CO_3$ , dan menurunkan pH dengan menguraikan asam karbonat menjadi ion  $H^+$  dan ion bikarbonat,  $HCO_3^-$  :



Ion bikarbonat membentuk lapisan kalsium karbonat yang tidak larut pada permukaan logam dalam larutan basa <sup>[4]</sup>.

## 2.9 Pengenalan Gas Alam

### 2.9.1 Gambaran Umum

Gas alam (*natural gas*) adalah suatu fluida homogen yang memiliki densitas dan viskositas yang rendah. Gas alam juga dinyatakan sebagai suatu campuran kompleks dari gas-gas hidrokarbon yang mudah terbakar dan non-hidrokarbon yang sering disebut dengan pengotor (*impurities*). Gas alam juga merupakan campuran gas-gas hidrokarbon yang terbentuk secara alami dengan komposisi yang bervariasi menurut tempat dan karakteristik sumbernya dimana ia diproduksi. <sup>[18]</sup>

Biasanya gas alam sendiri berada bersama dengan minyak didalam sebuah reservoir meskipun dalam jumlah yang relatif kecil. Keberadaan gas alam yang bersama-sama dengan minyak dapat dalam keadaan terpisah (*nonassociated gas*) ataupun dapat terlarut dalam minyak (*associated gas*). Gas dan minyak akan berada dalam bentuk larutan selama temperaturnya rendah dan tekanannya yang tinggi. Apabila minyak diproduksi ke permukaan dan dilewatkan ke sebuah separator yang tekanannya rendah, maka gas akan terpisah dari bentuk larutannya. Kemudian, apabila gas berada dalam kondisi bebas dalam *reservoir* dengan tekanan yang cukup tinggi, maka untuk mengalirkannya ke permukaan cukup dengan menggunakan tekanannya sendiri.

Gas alam adalah salah satu sumber energi yang komponen utamanya berupa campuran hidrokarbon dengan beberapa pengotor-pengotornya. Pasir dan air adalah pengotor dengan fasa yang berbeda yang tidak disukai dan harus dipisahkan di dalam sebuah separator yang dipasang di dekat kepala sumur (*wellhead*). Gas alam yang masih bersama pengotor-pengotor akan dialirkan pada *central plant*. Di dalam *central plant* pengotor-pengotor akan dihilangkan sebelum gas didistribusikan.<sup>[7,18]</sup>

### 2.9.2 Komposisi Gas Alam

Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya bahwa gas alam adalah gas yang dihasilkan dari perut bumi yang terdiri dari senyawa hidrokarbon dan non-hidrokarbon. Jenis hidrokarbon yang terdapat di dalam gas alam pada umumnya adalah senyawa **alkana**, yaitu senyawa hidrokarbon yang ikatan antar atom karbonnya jenuh dan lurus atau bercabang (bukan bentuk ikatan melingkar). Senyawa hidrokarbon yang dimaksud ini memiliki rumus molekul  $C_nH_{2n+2}$ , dimana C adalah atom karbon, H adalah atom hidrogen, dan n adalah jumlah atom karbon (C). Senyawa hidrokarbon merupakan senyawa yang dominan dengan komponen utamanya adalah metana ( $CH_4$ ), dan senyawa hidrokarbon lainnya seperti etana ( $C_2H_6$ ), propane ( $C_3H_8$ ), butana ( $C_4H_{10}$ ), pentana ( $C_5H_{12}$ ) yang pada umumnya berupa kondensat, dan lain sebagainya.<sup>[18]</sup>

Kemudian, senyawa-senyawa lain yang bersifat sebagai *impurities* yang tidak disukai karena sifatnya yang dapat mengganggu proses pengolahan antara lain adalah nitrogen ( $N_2$ ), hidrogen sulfida ( $H_2S$ ), karbondioksida ( $CO_2$ ), uap air ( $H_2O$ ), dan lain sebagainya. Komposisi gas alam sangat bervariasi dan tergantung dari sumbernya.<sup>[18]</sup>

### 2.9.3 Macam-macam Gas Alam

Secara umum gas alam dapat dibedakan berdasarkan keberadaan bersama pengotor-pengotornya, yakni sebagai berikut<sup>[18]</sup>:

#### 1. *Wet gas*

*Wet gas* (gas basah) adalah gas yang di dalam reservoir banyak mengandung molekul-molekul hydrocarbon berat dan uap air. Jika gas tersebut mencapai permukaan, maka beberapa hidrokarbon dan uap air membentuk cairan dengan kondisi tekanan dan temperatur tertentu.

#### 2. *Dry gas*



*Dry gas* (gas kering) adalah gas yang tidak banyak menandung hidrokarbon berat dan uap air, sehingga tidak banyak membentuk cairan ketika mencapai permukaan.

3. *Sour gas*

*Sour gas* adalah gas yang banyak mengandung senyawa-senyawa sulfur dan seperti hidrogen sulfida ( $H_2S$ ). senyawa ini dapat merusak instalasi-instalasi operasi karena serangan korosi.

4. *Sweet gas*

*Sweet gas* adalah gas yang relatif tidak banyak mengandung senyawa-senyawa sulfur. Biasanya memiliki banyak kandungan  $CO_2$ .

#### **2.9.4 Sifat-sifat Fisik Gas Alam**

Untuk keperluan perancangan maupun pengendalian operasi, maka mutlak diperlukan informasi ataupun data untuk mengetahui sifat-sifat gas alam yang berkaitan dengan sifat termodinamika dan fluiditas gas alam. Karena komposisi yang sangat bervariasi, maka sifat-sifat fisik gas alam juga bervariasi sesuai dengan variasi komposisinya.

Cara yang terbaik untuk mengetahui sifat-sifat fisik gas alam adalah dengan cara menganalisa contoh gas. Setelah komposisi gas diketahui, kemudian sifat-sifat fisik dari masing-masing komponen murni dapat diketahui dari informasi data seperti literatur, laporan, dan sebagainya. Beberapa sifat-sifat fisik gas alam yang mempunyai peranan penting dalam *natural gas processing* diantaranya adalah sebagai berikut<sup>[7,18]</sup>:

1. Kerapatan (*density*)
2. *Specific gravity*
3. Teperatur kritis
4. Tekanan uap
5. *Dew point*
6. Berat molekul
7. Kalor jenis
8. Viskositas
9. Konduktifitas termal, dan lain sebagainya.

### 2.9.5 Pengolahan Gas Alam (*Gas Treating/Processing*)

Gas alam yang baru keluar dari sumur harus diproses sebelum disalurkan dan didistribusikan kepada pihak-pihak terkait. Gas harus dilewatkan pada unit separator ataupun *processing plant* untuk memisahkan cairan hidrokarbon (kondensat) dan menghilangkan senyawa-senyawa pengotor yang terikut didalamnya. Beberapa unit separator atau *processing plant* yang sering digunakan untuk keperluan tersebut diantaranya adalah<sup>[7]</sup>:

#### 1. Separator

Separator adalah salah satu unit yang berfungsi untuk memisahkan kondensat atau *crude oil* dan *natural gasoline* yang terbawa oleh gas alam.

#### 2. *Cycling plant*

*Cycling plant* merupakan sekumpulan peralatan yang berfungsi untuk mengekstraksi *natural gasoline*.

#### 3. *Sweetening plant*

*Sweetening plant* adalah unit yang digunakan untuk menghilangkan pengotor-pengotor seperti hidrogen sulfida ( $H_2S$ ), karbon dioksida ( $CO_2$ ), hidrat, dan lain sebagainya.

### 2.9.6 Transmisi Gas Alam (*Gas Transmision*)

Untuk transportasi dan distribusi gas alam ke *plant* atau ke konsumen, pada umumnya banyak menggunakan sistem transmisi yang terdiri dari sistem perpipaan (*pipeline*) dan stasiun-stasiun kompresor. Disamping sarana tersebut, yang tidak kalah pentingnya adalah *metering system* yang digunakan untuk melakukan pencatatan jumlah gas yang didistribusikan kepada konsumen.

### 2.10 Korosi $CO_2$

Korosi  $CO_2$  merupakan korosi yang diakibatkan oleh  $CO_2$  yang terlarut di dalam air yang akan menimbulkan lingkungan yang bersifat asam (*sweet environment*)<sup>[7,8]</sup>. Gas  $CO_2$  ini tidak bersifat korosif jika berada dalam keadaan kering dan tidak terlarut dalam air.  $CO_2$  yang terlarut di dalam air akan membentuk asam karbonat ( $H_2CO_3$ ) yang merupakan senyawa asam lemah yang sangat mudah terurai. Penguraian senyawa asam karbonat ini akan memicu terjadinya reaksi oksidasi pada material yang berada pada lingkungan tersebut. Korosi  $CO_2$  ini sangat banyak ditemukan pada material material yang digunakan pada proses produksi dan eksplorasi minyak bumi dan gas alam.

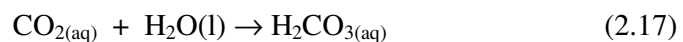
Dalam produksi gas dan minyak, CO<sub>2</sub> selain H<sub>2</sub>S merupakan salah satu faktor utama penyebab korosi internal. Karbon dioksida lebih dapat larut dibandingkan oksigen di air murni dan menjadi asam karbonat yang mempunyai pH di bawah 6 dimana serangan asam menjadi dominan. Lingkungan asam yang ditimbulkan dari korosi CO<sub>2</sub> ini mengakibatkan laju korosi material yang berada pada lingkungan ini lebih besar dari pada lingkungan yang mengandung O<sub>2</sub>. Selain itu, kelarutan gas CO<sub>2</sub> dalam air juga lebih tinggi dari pada kelarutan gas O<sub>2</sub>. Hal ini juga mengakibatkan laju korosi material pada lingkungan yang mengandung CO<sub>2</sub> lebih besar dibandingkan lingkungan yang mengandung O<sub>2</sub>. Perbandingan kelarutan CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> dapat dilihat pada tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Perbandingan daya larut gas CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub>

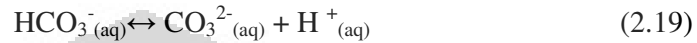
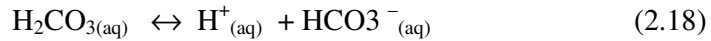
| Temperature<br>(C°) | CO <sub>2</sub><br>(g/L) | O <sub>2</sub><br>(g/L) |
|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0                   | 3.36                     | 0.070                   |
| 10                  | 2.35                     | 0.054                   |
| 20                  | 1.72                     | 0.044                   |
| 30                  | 1.31                     | 0.037                   |
| 40                  | 1.04                     | 0.033                   |
| 50                  | 0.86                     | 0.030                   |
| 60                  | 0.71                     | 0.028                   |
| 70                  |                          | 0.026                   |
| 80                  |                          | 0.025                   |

### 2.10.1 Mekanisme Korosi CO<sub>2</sub>:

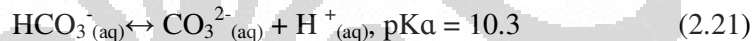
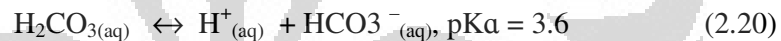
Secara umum, CO<sub>2</sub> yang terlarut dalam air akan terhidrasi dan pada tahapan selanjutnya akan membentuk senyawa asam karbonat dengan reaksi sebagai berikut <sup>[7]</sup>:



Asam karbonat terbentuk akan terdisosiasi menjadi *bicarbonate* dan ion karbonat melalui 2 tahap, dimana setiap tahapan akan menghasilkan ion hidrogen dengan persamaan reaksi sebagai 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. Asam karbonat ini sendiri merupakan asam lemah, dimana pada perubahan temperatur kamar kurang dari 0,1 % saja asam karbonat ini akan terdisosiasi dengan reaksi 2.11 dan 2.12.



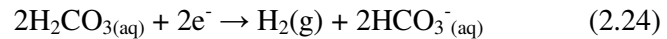
Jika korosi CO<sub>2</sub> dapat dikategorikan sebagai korosi yang diakibatkan oleh asam lemah, dimana baja terkorosi akibat reduksi dari H<sup>+</sup> dan oksidasi dari Fe, seharusnya dari reaksi di atas tingkat korosif dari CO<sub>2</sub> sangat lemah, hal ini dikarenakan tingkat disosiasi yang rendah. 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>.

Secara umum persamaan reaksi yang terjadi pada korosi yang diakibatkan oleh gas CO<sub>2</sub> yang terlarut dalam air adalah sebagai berikut<sup>[7]</sup>.

Anoda :



Katoda:



Kedua reaksi katoda di atas merupakan reaksi yang mempengaruhi total arus katodik pada korosi CO<sub>2</sub>. Reaksi yang terjadi tergantung dari lingkungan korosif yang ada pada permukaan logam. Pada pH rendah (<4), reduksi hidrogen adalah reaksi katodik yang dominan. Sedangkan pada pH yang lebih tinggi (>4) reaksi reduksi langsung asam karbonat menjadi lebih dominan<sup>[2]</sup>. Dari reaksi korosi yang terjadi, akan dihasilkan FeCO<sub>3</sub> sebagai produk korosi<sup>[2,14]</sup>.

FeCO<sub>3</sub> merupakan bentuk lapisan pelindung dalam beberapa kondisi yang bergantung pada beberapa faktor, antara lain adalah tekanan parsial CO<sub>2</sub>, temperatur, rasio air dan minyak (*water cut*), jenis aliran, sifat material, profil pipa, dan sifat kimia air<sup>[14]</sup>. Korosi CO<sub>2</sub> dipengaruhi oleh sejumlah parameter seperti parameter lingkungan, parameter fisik dan variabel metalurgi. Beberapa aspek yang perlu diperhatikan seperti sifat-sifat fluida, temperatur, bentuk permukaan material, sifat kimia material, dan komposisi CO<sub>2</sub>.

## 2.10.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi korosi CO<sub>2</sub>

### 2.10.2.1 Parameter Lingkungan

#### 1. *Supersaturation* (Lewat Jenuh)

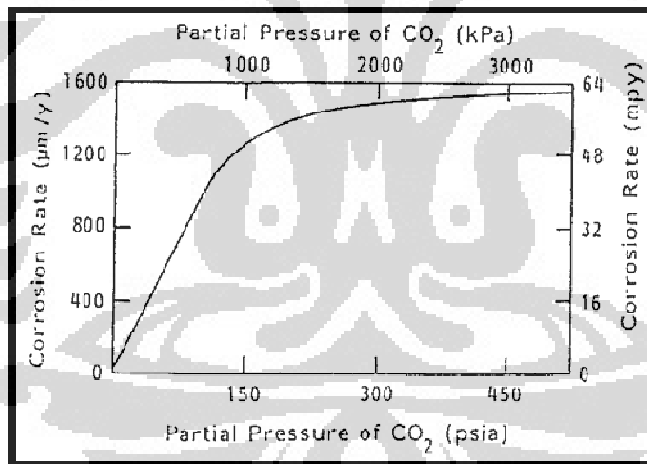
Nilai *supersaturation* memegang peranan penting dalam pembentukan dan stabilitas dari lapisan protektif. *Supersaturation* didefinisikan sebagai “ $\log \frac{[\text{A}^+][\text{B}^-]}{K_{\text{sp}}}$ ”, pada sistem garam AB yang *insoluble* dengan reaksi  $\text{AB} = [\text{A}^+] + [\text{B}^-]$ , dimana  $[\text{A}^+]$  dan  $[\text{B}^-]$  dalam bentuk ion dan  $K_{\text{sp}}$  sebagai tetapan kelarutan. Nilai *supersaturation* dari ion A<sup>+</sup> dan B<sup>-</sup> yang tinggi akan mendorong terjadinya pengendapan dan pembentukan lapisan pada permukaan material yang nantinya akan menurunkan laju korosi<sup>[7]</sup>. Penurunan laju korosi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu:

- Pembentukan *diffusion barrier* antara permukaan material dengan media korosi yang ada.
- Pembentukan *low porosity protective layer*, yang akan mengakibatkan jumlah permukaan material yang terekspos ke lingkungan semakin kecil sehingga area yang terkorosi semakin sedikit.

Kelarutan  $\text{FeCO}_3$  untuk mencapai batas kejenuhan tergantung pada temperatur, batas kejenuhan dicapai pada konsentrasi  $\text{Fe}^{2+}$  yang rendah pada perubahan temperatur yang kecil sehingga akan memfasilitasi terbentuknya  $\text{FeCO}_3$ .

## 2. Tekanan Parsial $\text{CO}_2$

Tekanan parsial  $\text{CO}_2$  sebanding dengan jumlah mol  $\text{CO}_2$  yang dapat terlarut dalam air. Pada saat tidak ada lapisan korosi yang terbentuk pada permukaan material, peningkatan tekanan parsial  $\text{CO}_2$  akan mengakibatkan laju korosi menjadi meningkat<sup>[7]</sup>. Peningkatan tekanan parsial  $\text{CO}_2$ , mengakibatkan reaksi reduksi asam karbonat menjadi meningkat akibat peningkatan konsentrasi asam karbonat yang terbentuk pada lingkungan. Pada pembentukan lapisan  $\text{FeCO}_3$ , peningkatan tekanan parsial  $\text{CO}_2$  akan membantu proses pembentukan. Peningkatan tekanan parsial  $\text{CO}_2$  akan meningkatkan konsentrasi  $\text{CO}_3^{2-}$  dan kejenuhan  $\text{FeCO}_3$  sehingga mempercepat terbentuknya lapisan  $\text{FeCO}_3$ . Grafik pengaruh tekanan parsial  $\text{CO}_2$  terhadap laju korosi dari  $\text{CO}_2$  dapat dilihat pada gambar 2.3<sup>[7]</sup>



**Gambar 2.9** Grafik pengaruh tekanan parsial  $\text{CO}_2$  terhadap laju korosi baja karbon.

Secara umum korosi  $\text{CO}_2$  dapat diperkirakan dengan aturan sebagai berikut<sup>[7]</sup> :

- Tekanan parsial  $\text{CO}_2$  30 psi, laju korosinya kecil dari 0.1 mm/yr.
- Tekanan parsial  $\text{CO}_2$  7-30 psi, laju korosinya berkisar antara 0.1 mm/yr – 1 mm/yr .
- Tekanan parsial  $\text{CO}_2$  7 psi, laju korosinya besar dari 1 mm/yr.

Dimana tekanan parsial didapatkan dari perkalian fraksi mol CO<sub>2</sub> dengan tekanan total dari sistem lingkungan, dengan persamaan rumus berikut :

$$CO_2 \text{ PP} = \text{(Total pressure x } CO_2 \text{ in mol \%)} \quad [2.1]$$

100

### 3. Pengaruh H<sub>2</sub>S

H<sub>2</sub>S dapat meningkatkan laju korosi CO<sub>2</sub> dengan berperan sebagai pembentuk lapisan yang non-protektif pada permukaan logam. Dari beberapa penelitian diperoleh bahwa pada kadar H<sub>2</sub>S di bawah 30 ppm dalam lingkungan CO<sub>2</sub> jenuh laju korosi akan meningkat. Hal ini akibat FeS yang terbentuk mengganggu pembentukan lapisan FeCO<sub>3</sub>, membentuk cacat pada lapisan, menyebabkan korosi yang terlokalisir. Begitupun pada kadar H<sub>2</sub>S yang ditingkatkan dan pada temperatur di atas 60°C, terbentuk lapisan protektif dan menurunkan laju korosi<sup>[7]</sup>.

### 4. pH Lingkungan

pH lingkungan merupakan derajat keasaman dari lingkungan yang mengindikasikan konsentrasi H<sup>+</sup> dalam lingkungan tersebut. Perubahan pH lingkungan akan berpengaruh kepada laju korosi baja dalam lingkungan. Semakin rendah nilai pH, maka laju korosi akan semakin tinggi. Pada korosi CO<sub>2</sub>, pH akan menentukan reaksi dominan yang terjadi. Pada pH rendah (<4), reaksi reduksi hidrogen merupakan reaksi yang dominan. Sedangkan pada pH tinggi (>4), reaksi yang dominan adalah reduksi langsung dari asam karbonat<sup>[1]</sup>.

Dalam korosi CO<sub>2</sub>, pH lingkungan juga mempengaruhi pembentukan lapisan produk korosi (FeCO<sub>3</sub>)<sup>[1]</sup>. Lapisan korosi akan sangat mudah terbentuk pada pH tinggi. Pada pH tinggi kelarutan dari FeCO<sub>3</sub> akan menurun sehingga akan mengakibatkan peningkatan laju pengendapan dari lapisan FeCO<sub>3</sub>. Pembentukan lapisan FeCO<sub>3</sub> yang cepat akan berpengaruh terhadap laju korosi baja karbon dalam lingkungan CO<sub>2</sub>.

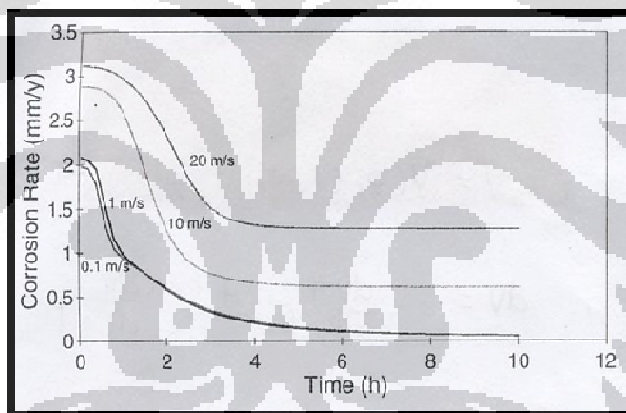
#### 2.10.2.2 Parameter fisik

##### 1. Laju Aliran Fluida

Laju aliran menjadi faktor penting dalam korosi CO<sub>2</sub>. Laju aliran akan mempengaruhi transfer massa dan muatan yang sehingga akan berpengaruh pada kinetika proses

korosi dalam lingkungan tersebut<sup>[9]</sup>. Laju aliran juga akan mempengaruhi terhadap pembentukan lapisan pelindung dan laju korosi baja. Pertama, laju aliran dapat mencegah pembentukan lapisan pelindung karena dapat menurunkan kejenuhan lingkungan. Kedua, laju aliran dapat menimbulkan kerusakan lapisan korosi sehingga memungkinkan terjadinya kontak antara permukaan baja dengan lingkungan yang korosif<sup>[15]</sup>.

Pada laju aliran yang cukup tinggi, lapisan proteksi yang terbentuk pada permukaan logam akan semakin sedikit. Pada lingkungan dengan laju aliran yang sangat tinggi, akan terjadi kerusakan dan terlepasnya lapisan proteksi<sup>[15]</sup>. Hal ini dapat meningkatkan laju korosi baja pada lingkungan tersebut. Selain itu, jika kerusakan lapisan pelindung ini terjadi dapat menimbulkan korosi setempat (*localized corrosion*), seperti korosi sumuran (*pitting corrosion*) pada permukaan baja. Pengaruh laju aliran terhadap laju korosi CO<sub>2</sub> dapat dilihat pada gambar 2.4.



**Gambar 2.10** Grafik hubungan laju aliran dengan laju korosi CO<sub>2</sub><sup>[7]</sup>

## 2. *Water Wetting / Water Cut*

*Water wetting* atau *Water Cut* adalah rasio antara jumlah kandungan air dalam fluida. Korosi CO<sub>2</sub> terjadi pada saat adanya air dalam lingkungan CO<sub>2</sub> yang mengakibatkan CO<sub>2</sub> menjadi terhidrasi. Intensitas dari korosi CO<sub>2</sub> tergantung dari lamanya waktu kontak antara air dengan permukaan baja. Semakin tinggi nilai *water wetting*, maka korosi CO<sub>2</sub> yang terjadi akan semakin meningkat akibat peningkatan jumlah konsentrasi asam karbonat yang dihasilkan.



### 3. Karakteristik Lapisan Korosi

Korosi CO<sub>2</sub> pada baja karbon sangat tergantung dari lapisan korosi yang terbentuk pada permukaan logam. Lapisan korosi yang terbentuk dapat berfungsi sebagai lapisan proteksi bagi logam sehingga akan menurunkan laju korosi logam pada lingkungan CO<sub>2</sub>. Keefektifan lapisan proteksi yang dihasilkan tidak tergantung pada ketebalan lapisan tetapi tergantung pada struktur dan morfologi dari lapisan tersebut. Lapisan FeCO<sub>3</sub> merupakan lapisan proteksi yang sangat efektif bagi baja pada lingkungan yang mengandung CO<sub>2</sub>.<sup>[7,15]</sup>

#### 2.10.2.3 Parameter Metalurgi

Komposisi kimia, perlakuan panas, dan mikrostruktur merupakan faktor penting yang mempengaruhi korosi dari baja karbon pada lingkungan yang mengandung CO<sub>2</sub>. Penambahan beberapa elemen paduan pada baja karbon akan meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Penambahan Cr dan Mo akan meningkatkan ketahanan korosi, penambahan Cu, Ni, Cr, dan Mo akan meningkatkan potensial korosi baja karbon, serta penambahan Cu juga dapat meningkatkan efisiensi dari inhibitor yang diberikan kepada baja karbon sebagai metode proteksi. Penambahan elemen-elemen paduan seperti V, Ti, Mo, Cu, dan Cr merupakan perlindungan secara metalurgi yang paling efektif terhadap baja karbon yang digunakan pada *downhole* dan *transportation facilities*.<sup>[7]</sup>

#### 2.11 Pengaruh Lapisan Korosi terhadap Laju Korosi CO<sub>2</sub>

Laju korosi dapat dihubungkan dengan laju pembentukan dan kestabilan lapisan film pada permukaan logam. Produk hasil korosi (*corrosion scale*), bila terbentuk dalam kondisi tertentu dapat memberikan perlindungan yang superior terhadap material. Perlindungan yang diberikan tidak bergantung pada ketebalan lapisan yang dihasilkan karena perlindungan diakibatkan oleh struktur dan morfologi dari produk korosi tersebut<sup>[7]</sup>.

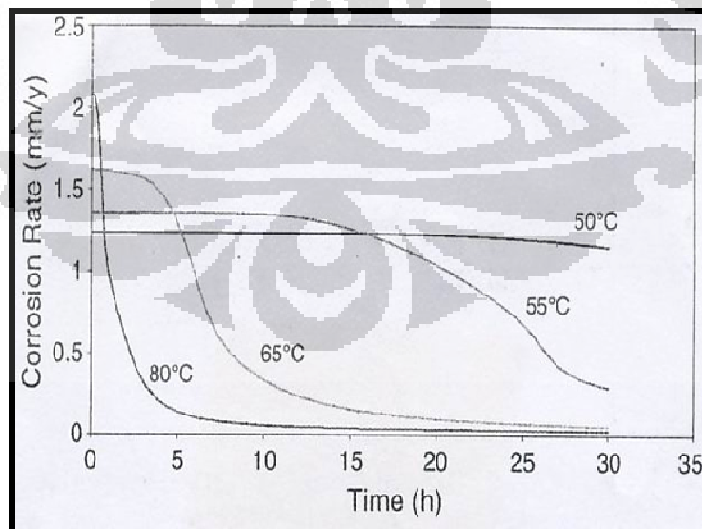
Lapisan FeCO<sub>3</sub> merupakan lapisan yang paling umum terbentuk pada korosi CO<sub>2</sub>. Lapisan ini merupakan yang terpenting dalam mekanisme penghambatan laju korosi pada korosi CO<sub>2</sub>. Pembentukan lapisan protektif menghambat transport produk reaksi dari permukaan. Lapisan ini juga menghambat reaksi difusi yang terjadi pada sel elektrokimia yang terbentuk. Kekuatan ikatan serta ketebalan lapisan bergantung dari mikrostruktur logam. Beberapa faktor yang mempengaruhi pembentukan lapisan FeCO<sub>3</sub> antara lain :

##### 1. Temperatur

Meningkatnya temperatur akan meningkatkan rekatifitas dari sistem sehingga akan meningkatkan laju korosi. Selain itu, temperatur juga dapat mempengaruhi pembentukan lapisan  $\text{FeCO}_3$ . Kinetika pembentukan lapisan  $\text{FeCO}_3$  dipengaruhi oleh temperatur. Pengaruh temperatur terhadap pembentukan lapisan  $\text{FeCO}_3$  dan laju korosi adalah sebagai berikut<sup>[7]</sup>.

- a. Pada kondisi temperatur rendah ( $<75^\circ\text{C}$ ), laju pembentukan lambat, dan keefektifan lapisan rendah. Pada temperature rendah dibawa  $75^\circ\text{C}$  proteksi yang diberikan  $\text{FeCO}_3$  akan sangat rendah.
- b. Pada temperatur antara  $75^\circ\text{C}$  sampai  $100^\circ\text{C}$ , reaksi pengendapan mulai mempengaruhi reaksi korosi. Akibat dari reaksi pembentukan ini, beberapa penelitian menyimpulkan bahwa laju korosi maksimum baja karbon pada lingkungan yang mengandung  $\text{CO}_2$  terjadi pada temperatur  $60^\circ\text{C}$ -  $70^\circ\text{C}$ .
- c. Pada temperatur tinggi,  $>100^\circ\text{C}$ , pengendapan berlangsung dengan sangat cepat. Ion-ion Fe yang dilepas oleh reaksi korosi dengan cepat terendapkan kembali pada permukaan baja karbon membentuk lapisan protektif.

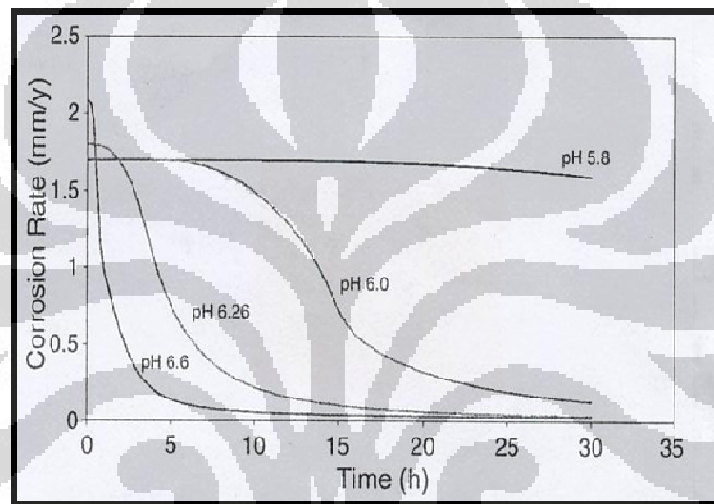
Pengaruh temperatur terhadap laju korosi pada lingkungan  $\text{CO}_2$  dapat dilihat pada gambar 2.5.



**Gambar 2.11** Grafik hubungan temperatur dengan laju korosi  $\text{CO}_2$ <sup>[2,7]</sup>

## 2. pH

pH merupakan faktor yang sangat penting dalam pembentukan endapan  $\text{FeCO}_3$ . pH dari larutan akan mempengaruhi kelarutan dari  $\text{FeCO}_3$ . Peningkatan nilai pH akan menurunkan kelarutan  $\text{FeCO}_3$  yang akan mendorong terjadinya pengendapan. Lapisan  $\text{FeCO}_3$  akan bersifat sangat protektif pada lingkungan dengan pH di atas 5,5<sup>[1]</sup>. Oleh karena itu, dengan kenaikan nilai pH akan menurunkan laju korosi material dalam lingkungan yang mengandung  $\text{CO}_2$ . Pengaruh pH terhadap laju korosi dapat dilihat pada gambar 2.6.



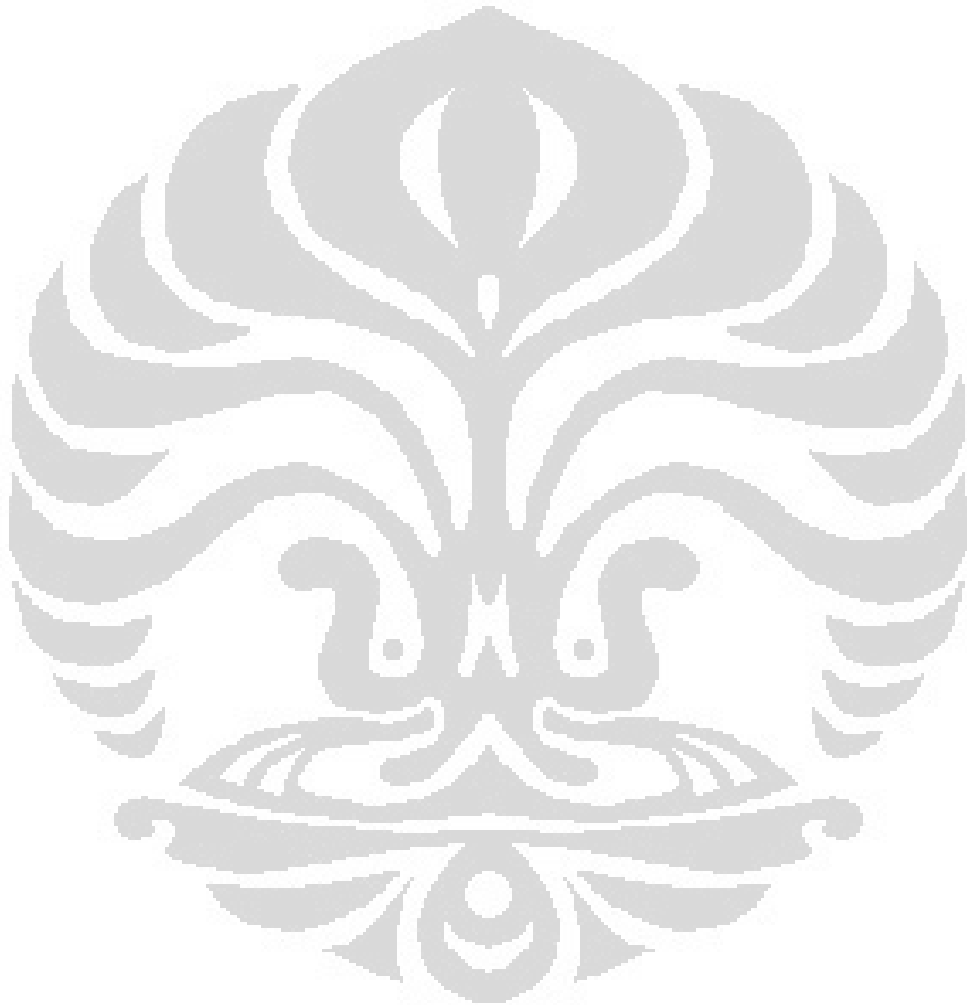
Gambar 2.12 Grafik pengaruh pH terhadap laju korosi  $\text{CO}_2$ <sup>[2,7]</sup>

## 3. Konsentrasi $\text{Fe}^{2+}$

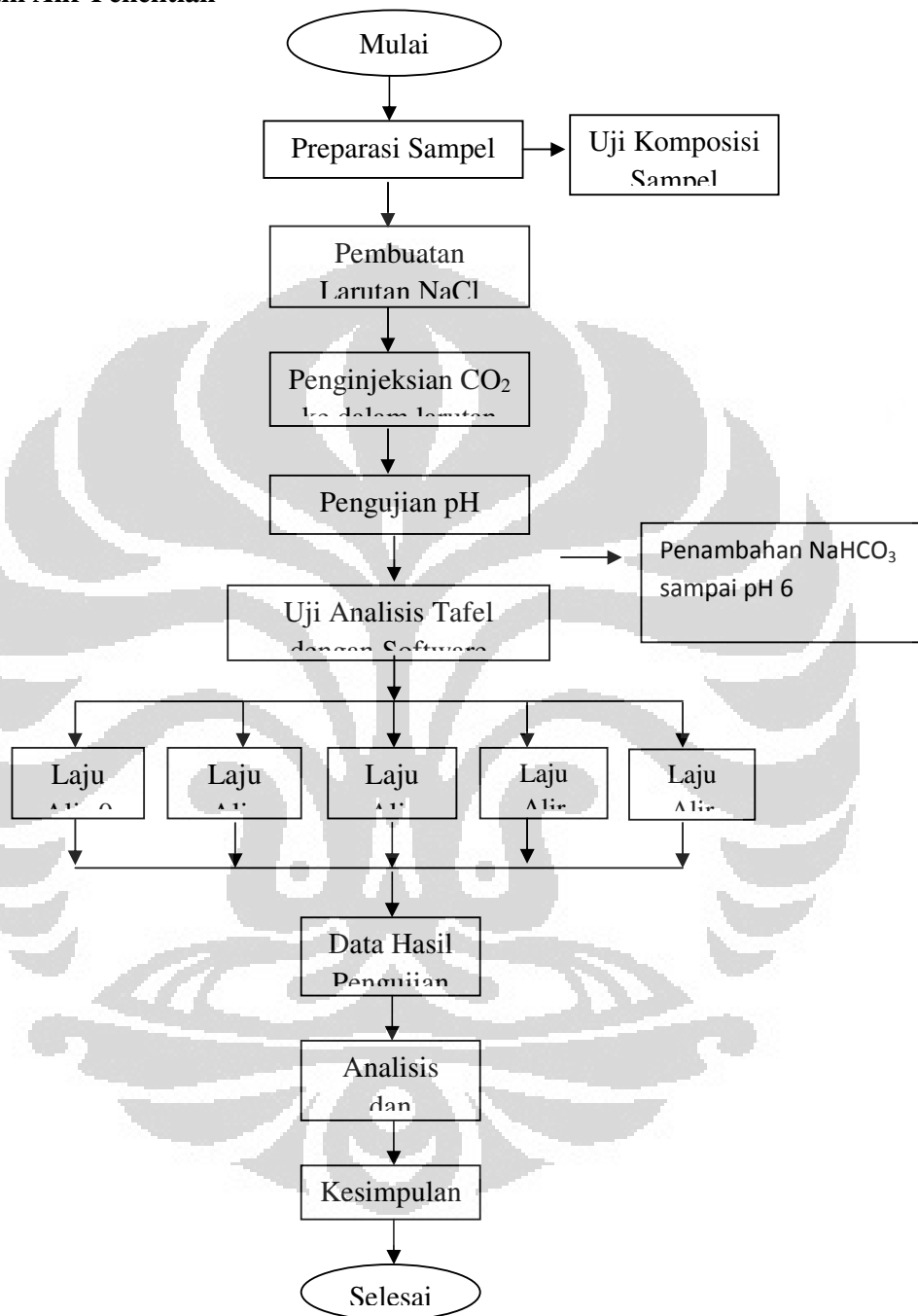
Pembentukan  $\text{FeCO}_3$  terjadi pada kondisi dimana konsentrasi ion  $\text{Fe}^{2+}$  dalam fasa aqueous melewati batas kelarutan  $\text{FeCO}_3$ . Apabila konsentrasi dari ion  $\text{Fe}^{2+}$  yang berada di bawah kelarutan  $\text{FeCO}_3$ , maka tidak akan terbentuk lapisan proteksi dari  $\text{FeCO}_3$  dipermukaan logam<sup>[1]</sup>. Perubahan 30 ppm  $\text{Fe}^{2+}$  akan mengakibatkan perubahan laju korosi pada level yang sama sesuai dengan perubahan konsentrasi 2 bar  $\text{CO}_2$  pada temperatur 90 °C. Oleh karena itu, konsentrasi dari  $\text{Fe}^{2+}$  dalam larutan akan berpengaruh terhadap pembentukan lapisan proteksi  $\text{FeCO}_3$  dan laju korosi baja pada lingkungan yang mengandung  $\text{CO}_2$ .

### **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**



### 3.1 Diagram Alir Penelitian



## 3.2 Peralatan dan Bahan

### 3.2.1 Peralatan

1. *Software Gamry 5.06*
2. *Software Gamry Echem Analysis*
3. *Rotating Cylinder Electrode*
4. *Spectroscopy*
5. pH meter
6. pH universal
7. Sel polarisasi
8. Elektroda standar Hg/HgCl<sub>2</sub>
9. Anoda grafit
10. Regulator gas
11. Termometer
12. Timbangan digital
13. *Magnetic stirrer*
14. Beaker Glass 500 dan 1000 ml
15. Pipet tetes
16. Cawan petri
17. Kertas amplas 1000#, 1200#, dan 1500#
18. Kamera digital



Gambar 3.1 Rotating Cylinder Electrode<sup>[9]</sup>

### 3.2.2 Bahan

1. Sampel Baja Karbon API 5L X-52
2. Gas CO<sub>2</sub>
3. Garam NaCl
4. Aquades
5. Serbuk NaHCO<sub>3</sub>

### 3.3 Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Preparasi Sampel

Sampel yang digunakan dalam pengujian ini adalah baja API 5L X-52, dimana material ini sering digunakan sebagai material pipa untuk *pipeline* ataupun *flowline*. Berikut adalah langkah preparasi sampel yang dilakukan:

1. Potong material penampang menjadi berbentuk silindris dengan luas area uji sebesar  $1 \text{ cm}^2$ .
2. Amplas permukaan sampel menggunakan kertas amplas grade 1000#, 1200#, dan 1500#. Proses pengamplasan bertujuan untuk menghilangkan oksida yang menempel pada permukaan sampel.

#### 3.3.2 Pembuatan Larutan Uji

Larutan uji yang digunakan pada pengujian ini adalah larutan garam dengan kadar 3.5wt% NaCl. Berikut adalah langkah pembuatan larutan garam 3.5wt% NaCl:

1. Penimbangan 5 gram serbuk garam NaCl menggunakan timbangan digital untuk membuat larutan 3.5wt% NaCl.
2. Setelah didapatkan berat yang sesuai, larutan serbuk NaCl dengan aquades sebanyak 1000ml.
3. Letakan beaker glass berisi larutan di atas *magnetic stirrer*, aduk hingga larutan garam menjadi homogen.
4. Setelah selesai larutan 3.5wt% NaCl dapat digunakan untuk pengujian.

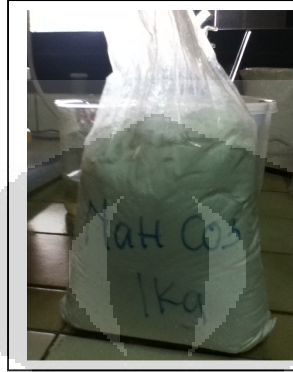
#### 3.3.3 Pengujian Komposisi Sampel

Pengujian komposisi sampel baja API 5L X-52 yang digunakan pada pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *spectroscopy* yang akan bertujuan untuk mendapatkan komposisi. Pengujian ini dilakukan di CMPFA Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

#### 3.3.4 Pengujian pH larutan

Pengujian pH larutan ini dilakukan dengan menggunakan pH indikator dan pH meter, dimana pengujian dilakukan terhadap larutan sebelum dan setelah dilakukan *purgig*  $\text{CO}_2$ . Pengujian menggunakan pH indikator dilakukan dengan cara mencelupkan kertas pH kedalam larutan selama beberapa detik dan pembacaan pH dapat dilakukan dengan

membandingkan warna kertas pH dengan warna standard. Sedangkan pengujian menggunakan pH meter dilakukan dengan diawali proses kalibrasi menggunakan pH buffer kemudian mencelupkan pH meter ke dalam larutan hingga ditunjukkan nilai pH 6 pada layar pH meter. Peningkatan nilai pH dilakukan dengan cara memberi serbuk  $\text{NaHCO}_3$ .



**Gambar 3.2** serbuk  $\text{NaHCO}_3$

### 3.3.5 Pengujian Laju Korosi

Pengujian laju korosi dilakukan dengan menggunakan software GAMRY 5.06 dimana pengujian diawali dengan menyusun rangkaian sel polarisasi, kemudian pengujian menggunakan software GAMRY 5.06 dilakukan dengan mengukur corrosion potensial yang dilakukan selama 200 detik. Setelah itu digunakan pengujian polarisasi tafel untuk mendapatkan grafik E (potensial) vs log I (rapat arus).



**Gambar 3.3** Rangkaian alat



### 3.3.5.1 Pengujian laju korosi pada larutan NaCl 3.5% pada lingkungan CO<sub>2</sub> jenuh dengan pengaruh laju alir.

Langkah – langkah yang dilakukan dalam pengujian *Tafel* :

1. Menyiapkan larutan garam 3.5% NaCl.
2. Melakukan injeksi CO<sub>2</sub> ke dalam larutan NaCl yang telah disiapkan sampai jenuh, dengan tekanan 1 bar.
3. Melakukan pengukuran pH larutan NaCl yang telah mengandung CO<sub>2</sub> jenuh, memiliki tekanan 1 bar.
4. Menambahkan serbuk NaHCO<sub>3</sub> ke dalam 3.5wt% NaCl yang telah mengandung CO<sub>2</sub> jenuh sampai terbaca pH 6 pada pH meter.



**Gambar 3.4** Pembacaan nilai pH 6 pada pH meter

5. Menyalakan alat RCE dengan kecepatan 0, 375, 750, 1500, dan 3000 rpm.
6. Menyusun Sel Polarisasi



**Gambar 3.5** (a) Rangkaian Sel Polarisasi; **Gambar 3.6** (b) Panduan pemasangan jepit untuk pembacaan kurva polarisasi pada software Gamry.

7. Menyiapkan komputer dengan program GAMRY 5.06 (*corrosion measurement system*) dengan program eksperimen *corrosion potential*.
8. Menyiapkan komputer dengan program GAMRY 5.06 (*corrosion measurement system*) dengan program eksperimen *tafel*.
9. Memasukkan data-data pengujian pada instrumen (*setting*), dengan jangkauan potensial (-)250– (+)250 mV terhadap *open potential*(*Eoc*).
10. Setelah selesai, program *scanning* dapat dijalankan dan disimpan untuk kemudian dilakukan perhitungan laju korosi oleh program.
11. Kurva I-V hasil *scanning* kemudian diolah dengan program *Tafel Analysis* untuk mendapatkan laju korosinya.

### 3.3.6 Analisis Laju Korosi

Analisis laju korosi ini bertujuan untuk mendapatkan corrosion rate setelah hasil pengujian polarisasi menggunakan metode tafel. Analisis ini dapat menggunakan 2 metode yakni dengan menggunakan *Software Gamry Echem Analysis* ataupun dengan

menggunakan metode manual yakni dengan membuat perpotongan antara kurva anodik dan katodik yang kemudian dimasukkan ke dalam persamaan untuk menghitung laju korosi.

## BAB 4

### DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Komposisi Sampel

Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah baja karbon API 5L X-52. Pengujian komposisi baja dilakukan dengan pengujian *spectroscopy* di CMPFA (*Center for Material Processing and Failure Analysis*), Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Hasil pengujian komposisi baja API 5L X-52 yang dapat dilihat pada tabel 4.1.

|              |              |              |              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <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       |

**Tabel 4.1** Komposisi sampel baja API 5L X-52

Baja API 5L X-52 merupakan baja karbon yang digunakan sebagai material pipa, baik *flowline* maupun *pipeline*. Baja ini distandarkan dalam Standar API 5L, *Specification for Line pipe*. Baja Api 5L X-52 ini sangat luas aplikasinya pada dunia minyak dan gas alam, salah satunya sebagai *pipeline* dan *flowline* penyalur fluida hasil eksplorasi dan gas alam. Selain itu, baja API X-52 juga banyak digunakan pada bidang konstruksi dan pembangkit listrik.

#### 4.2 Karakterisasi Larutan

Karakterisasi larutan yang digunakan pada pengujian kali ini melalui pH larutan.

##### 4.2.1 Pengukuran pH

##### 4.2.1.1 Pengukuran pH sebelum di purging CO<sub>2</sub>

Pengukuran pH pada larutan NaCl 3.5% sebelum di purging CO<sub>2</sub>. NaCl merupakan garam yang cenderung netral. Nilai pH yang didapat yaitu berkisar antara 6.7-7 yang berarti bernilai pH netral dan dapat dikatakan bahwa larutan yang digunakan sesuai dengan kondisi NaCl secara umum, yakni netral.



**Gambar 4.1** pH meter yang menunjukkan nilai pH 7

#### 4.2.1.2 Pengukuran pH setelah di purging CO<sub>2</sub>

| Pengujian Kadar pH |     |     |     |         |
|--------------------|-----|-----|-----|---------|
| Kadar NaCl         | 1   | 2   | 3   | Average |
| 3.5%               | 4.8 | 5.1 | 5.1 | 5       |

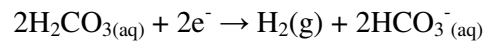
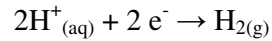
**Tabel 4.2** Pengujian Kadar pH setelah di purging CO<sub>2</sub>

Pengukuran pH larutan NaCl 3.5% setelah di purging CO<sub>2</sub> didapatkan nilai pH berkisar antara 4,8-5,1 jadi dapat kita ambil rata-rata nilai pH 5. Hal tersebut sesuai dengan referensi yang menyebutkan bahwa CO<sub>2</sub> menyebabkan korosi pada pipa baja karbon API 5L karena sifat dari CO<sub>2</sub> ini cenderung membuat lingkungan atau dalam hal ini larutan NaCl 3.5% menjadi asam sehingga dapat meningkatkan corrosion rate. Tetapi sisi lain dari purging CO<sub>2</sub> adalah dengan terlarutnya ion CO<sub>2</sub> dalam larutan NaCl 3.5%, hal tersebut berarti menambah proteksi pada sampel pipa baja karbon API 5L tersebut karena terbentuk lapisan FeCO<sub>3</sub> pada permukaan sampel baja, dan hal tersebut berarti juga corrosion rate pipa tersebut memiliki kemungkinan untuk berkurang seiring terbentuknya lapisan karbonat tersebut.

Anoda :



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. pH diatas 5, yang terjadi adalah reaksi reduksi dari asam karbonat akan jadi lebih dominan.



Gambar 4.2 Pengukuran pH dengan menggunakan pH meter

#### 4.2.1.3 Pengukuran pH setelah di purging CO<sub>2</sub> dan ditambah serbuk NaHCO<sub>3</sub> (sodium bicarbonate)

Pengukuran pH larutan NaCl 3.5% setelah di purging CO<sub>2</sub> dan diberi NaHCO<sub>3</sub> sedikit demi sedikit sampai mendapatkan nilai pH 6. Nilai pH 6 akan turun karena tetap mendapatkan purging dari CO<sub>2</sub>, karena itu larutan NaCl ini harus tetap dikontrol agar mendapatkan nilai pH 6 yang konstan dengan menambahkan NaHCO<sub>3</sub>.

Pengaruh penambahan  $\text{NaHCO}_3$  ini selain membuat suasana lingkungan menjadi basa selain itu jika dilihat dari senyawanya  $\text{NaHCO}_3$  memiliki ion  $\text{Na}^+$  yang akan bergabung dengan  $\text{NaCl}$ , kemudian  $\text{H}^+$  menyebabkan korosi yang sangat kecil tetapi disamping itu  $\text{NaHCO}_3$  memiliki ion  $\text{CO}_3^{2-}$  yang akan membuat lapisan karbonat yang terbentuk menjadi semakin banyak dan tebal, sehingga diharapkan nilai corrosion rate dari sampel baja ini semakin turun.

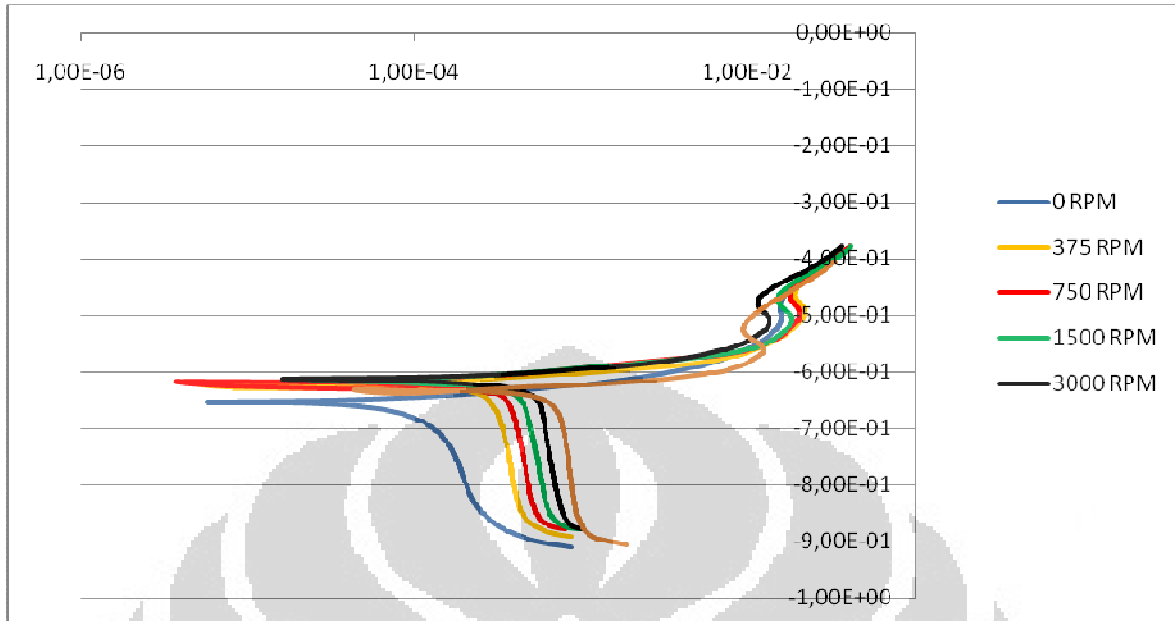


**Gambar 4.3** pH meter menunjukkan nilai pH 6 setelah ditambah  $\text{NaHCO}_3$

### 4.3 Kurva Polarisasi dan Analisa

#### 4.3.1 Kurva Polarisasi pada kondisi pH 5

Polarisasi ini dilakukan pada kondisi larutan  $\text{NaCl}$  3.5% setelah dipurgung dan dikondisikan dengan laju alir yang berbeda selama 1 jam. Tiap pergantian laju alir dilakukan pengamplasan grade #1000 pada sampel pipa baja agar dipastikan tidak ada lapisan karbonat atau korosi yang menempel pada sampel pipa baja. Selain itu dilakukan juga pergantian larutan  $\text{NaCl}$  3.5% yang baru agar larutan tersebut menjadi fresh kembali, sehingga penelitian dapat berjalan baik. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil kurva polarisasi sebagai berikut.



**Gambar 4.4** Kurva Polarisasi pada pH 5

| RPM  | I <sub>corr</sub> | CR    |
|------|-------------------|-------|
| 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 |

**Tabel 4.3** Data Hasil dari Kurva Polarisasi pH 5

Kurva yang didapat akan dianalisa pergeseran kurva, potensial korosi, dan laju korosinya dengan menggunakan software Gamry Echem Analysis. Selain dengan analisis menggunakan software, laju korosi juga dihitung dengan secara manual dengan menggunakan persamaan berikut ini:

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

dimana :  $i_{corr}$  : Rapat arus korosi ( $\mu A/cm^2$ )

E : Berat ekuivalen (gr/mol.eq)

D : Berat jenis (gr/cm<sup>3</sup>)

Berdasarkan kurva dapat dilihat bahwa semakin tinggi laju aliran semakin tinggi juga nilai corrosion rate. Hal ini dikarenakan  $\text{CO}_2$  yang larut dalam  $\text{NaCl}$  3.5% membuat larutan menjadi ber-pH asam dan bersifat korosif, tetapi sisi lain dari  $\text{CO}_2$  ini yaitu membentuk lapisan karbonat ( $\text{FeCO}_3$ ) pada permukaan sampel pipa baja yang berguna untuk memproteksi sampel pipa baja dari korosi. Sehingga yang paling berperan dalam hal ini yaitu laju aliran yaitu dalam kasus ini adalah kecepatan putaran dari mesin Rotating Cylinder Electrode.

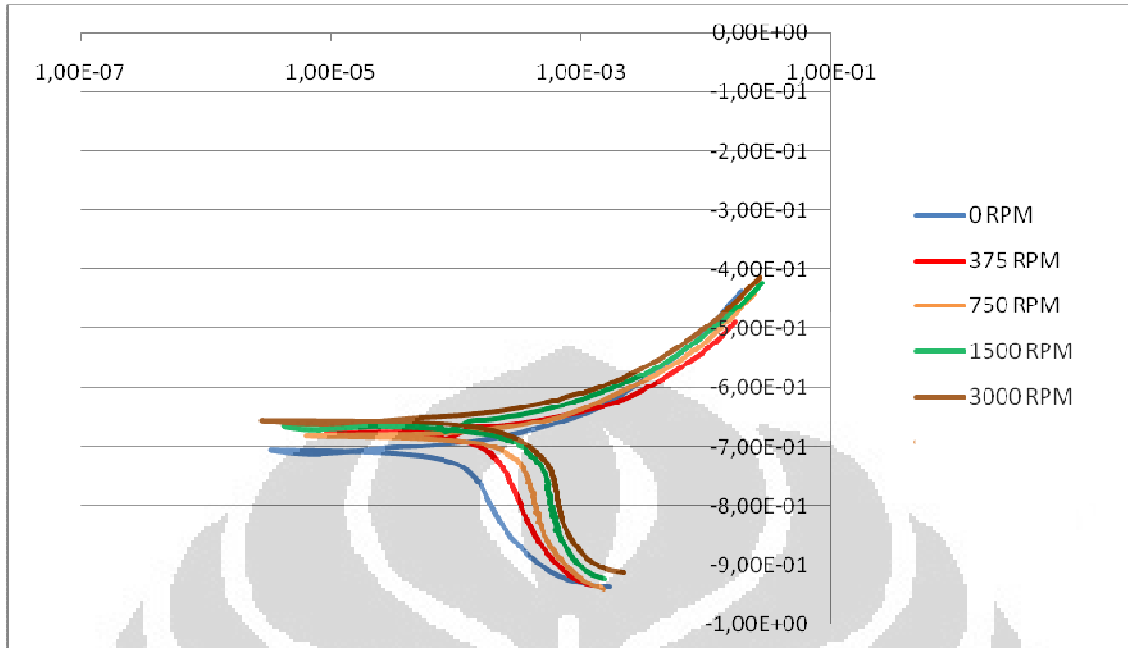
Kecepatan putaran mengakibatkan lapisan karbonat yang sebelumnya terbentuk pada permukaan sampel pipa baja semakin terkikis, dan hal tersebut membuat sampel pipa baja semakin mudah terkena korosi. Maka semakin besar RPM atau semakin besar kecepatan putaran maka semakin besar pula nilai corrosion rate yang didapat.

#### **4.3.2 Kurva Polarisasi pada pH 6**

Polarisasi ini dilakukan dengan cara yang tidak terlalu berbeda dengan polarisasi yang ber-pH 5. Penelitian ini dilakukan dengan cara mengamplas sampel pipa baja dengan grade #1000 dan mengganti larutan  $\text{NaCl}$  3.5% pada tiap perubahan kecepatan putarannya. Namun perbedaan terletak pada cara membuat pH larutan menjadi 6. Cara membuat pH semakin meningkat hingga 6 adalah dengan cara memberikan serbuk  $\text{NaHCO}_3$ . Karena  $\text{NaHCO}_3$  berbentuk serbuk sehingga penelitian menggunakan stirrer sebagai mesin pengaduk agar  $\text{NaHCO}_3$  dapat terlarut dengan baik dalam larutan  $\text{NaCl}$  3.5%.

Efek dari  $\text{NaHCO}_3$  ini selain membuat suasana larutan menjadi basa,  $\text{NaHCO}_3$  juga dapat membentuk lapisan karbonat yang berasal dari ion  $\text{CO}_3^{2-}$  (pada  $\text{pH} > 5$  proses pembentukan asam karbonat lebih cenderung terbentuk<sup>[1]</sup>). Karena pengaruh  $\text{NaHCO}_3$  tersebut juga semakin meningkatkan lapisan karbonat pada sampel pipa baja yang sebelumnya juga terbentuk akibat purging  $\text{CO}_2$ . Sehingga hasil yang diharapkan dari suasana basa tersebut adalah nilai corrosion rate nya semakin menurun. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil sebagai berikut.





**Gambar 4.5** Kurva Polarisasi pH 6

| RPM  | I <sub>corr</sub> | CR    |
|------|-------------------|-------|
| 0    | 101,9             | 46,53 |
| 375  | 184,8             | 84,46 |
| 750  | 312,6             | 142,8 |
| 1500 | 430,3             | 196,6 |
| 3000 | 474,4             | 216,8 |

**Tabel 4.4** Data dari hasil Kurva Polarisasi pH 6

Kurva yang didapat akan dianalisa pergeseran kurva, potensial korosi, dan laju korosinya dengan menggunakan software Gamry Echem Analysis. Selain dengan analisis menggunakan software, laju korosi juga dihitung dengan secara manual dengan menggunakan persamaan berikut ini:

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

dimana :  $i_{corr}$  : Rapat arus korosi ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

E : Berat ekuivalen ( $\text{gr}/\text{mol}\cdot\text{eq}$ )

D : Berat jenis ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

Hal yang serupa juga tampak pada kurva polarisasi sampel pipa baja pada larutan NaCl 3.5% ber-pH 6. Berdasarkan kurva dapat dilihat bahwa semakin tinggi laju aliran semakin tinggi juga nilai corrosion rate. Hal ini dikarenakan CO<sub>2</sub> yang larut dalam NaCl 3.5% membuat larutan menjadi ber-pH asam dan bersifat korosif, tetapi sisi lain dari CO<sub>2</sub> ini yaitu membentuk lapisan karbonat (FeCO<sub>3</sub>) pada permukaan sampel pipa baja yang berguna untuk memproteksi sampel pipa baja dari korosi. Sehingga yang paling berperan dalam hal ini yaitu laju aliran yaitu dalam kasus ini adalah kecepatan putaran dari mesin Rotating Cylinder Electrode.

Kecepatan putaran mengakibatkan lapisan karbonat yang sebelumnya terbentuk pada permukaan sampel pipa baja semakin terkikis, dan hal tersebut membuat sampel pipa baja semakin mudah terkena korosi. Maka semakin besar RPM atau semakin besar kecepatan putaran maka semakin besar pula nilai corrosion rate yang didapat.

Tetapi efek dari NaHCO<sub>3</sub> atau biasa disebut Sodium Bicarbonat ini terlihat pada kurva polarisasi tersebut. NaHCO<sub>3</sub> cenderung membuat larutan NaCl 3.5% bersuasana basa sehingga karbonat (HCO<sub>3</sub>) cenderung terbentuk. Kemudian efek lain dari NaHCO<sub>3</sub> yaitu ion CO<sub>3</sub>= yang berasal dari Sodium Bicarbonat ini cenderung memiliki kemampuan menambah lapisan karbonat pada sampel pipa baja (FeCO<sub>3</sub>). Sehingga efek yang terlihat pada kurva tersebut yaitu nilai corrosion rate yang didapat lebih kecil dibandingkan dengan kurva polarisasi pada pH 5.

#### 4.4 Perbandingan antara kurva polarisasi pH 5 dan pH 6

| RPM  | pH 5  |       | pH 6  |       |
|------|-------|-------|-------|-------|
|      | Icorr | CR    | Icorr | CR    |
| 0    | 127,7 | 58,37 | 101,9 | 46,53 |
| 375  | 304,5 | 139,1 | 184,8 | 84,46 |
| 750  | 364,2 | 166,4 | 312,6 | 142,8 |
| 1500 | 438,1 | 200,2 | 430,3 | 196,6 |
| 3000 | 528,2 | 241,4 | 474,4 | 216,8 |

**Tabel 4.5** Data hasil perbandingan antara pH 5 dan pH 6

#### 4.4.1 Perbedaan dilihat dari besar nilai CR (corrosion rate) nya

Perbedaan besar nilai corrosion rate terlihat pada kurva polarisasi yang ber-pH 5 dan 6. Pada pH 5 dengan kondisi 0RPM corrosion rate yang didapat yaitu sebesar 58,37, sedangkan pada pH 6 dengan kondisi kecepatan putaran yang sama menghasilkan nilai corrosion rate 46,53.

Hal ini membuktikan bahwa pada pH yang lebih tinggi atau lebih basa nilai corrosion rate akan lebih kecil karena lapisan karbonat yang terbentuk dari  $\text{NaHCO}_3$  pada pH 6 akan lebih menghalangi sampel pipa baja untuk terkena korosi, sehingga akan mendapatkan hasil nilai corrosion rate semakin kecil. Demikian pula yang akan terjadi jika pH ditingkatkan menjadi lebih tinggi lagi atau menjadi lebih basa, corrosion rate nya akan terus turun seiring dengan semakin banyak nya terbentuknya lapisan karbonat pada sampel pipa baja.

Pada pH 5 dengan kondisi 375 RPM nilai corrosion rate yang didapat adalah 139,1 sedangkan pada pH 6 dengan kondisi kecepatan putaran yang sama didapatkan nilai corrosion rate 84,46.

Hal ini sesuai dengan teori yang mengatakan bahwa jika pH semakin basa, kecenderungan yang terbentuk adalah  $\text{HCO}_3$  sehingga corrosion rate otomatis akan turun juga. Apalagi pada percobaan pH 6 menggunakan  $\text{NaHCO}_3$  yang semakin menguatkan lapisan karbonat pada permukaan sampel pipa baja, walaupun diberi kecepatan putaran. Kecepatan putaran 375 RPM tergolong kecepatan putaran yang ringan sehingga lapisan karbonat tidak terlalu banyak yang rusak sehingga sampel pipa baja memiliki nilai corrosion rate yang kecil.

Hal yang sama terjadi pada kondisi kecepatan putaran 750 RPM. PH 6 menunjukkan nilai corrosion rate yang lebih kecil dibandingkan pH 5. Tetapi pada kondisi kecepatan putaran 1500 RPM dan 3000 RPM perbedaan nilai corrosion rate antara pH 5 dan pH 6 tidak terlalu menunjukkan perbedaan nilai yang signifikan. Tetapi pH 5 tetap memiliki corrosion rate yang lebih kecil dibandingkan pH 6. Hal tersebut diakibatkan karena kondisi kecepatan aliran yang terlalu tinggi sehingga lapisan karbonat pada masing-masing pH lebih mudah robek sehingga korosi lebih mudah terjadi.

#### 4.4.2 Perbedaan dilihat dari bentuk kurva

Jika dilihat dengan kasat mata dapat terlihat jika kurva polarisasi pada pH 5 dan kurva polarisasi pada pH 6 jelas berbeda. Perbedaan kurva terlihat jelas pada kurva polarisasi pH 5 bentuk semua kurva terlihat lebih tegak, sedangkan pada kurva polarisasi pH 6 bentuk semua kurva terlihat lebih landai. Pada kurva polarisasi pH 5 lebih tegak, Hal ini disebabkan oleh pergerakan difusi  $H^+$  sedikit sekali terhalangi oleh karbonat yang dihasilkan oleh purging  $CO_2$  bahkan mungkin tidak ada yang menghalangi karena karbonat yang sebelumnya menempel di permukaan sampel tergerus oleh kecepatan putaran yang tinggi, sehingga  $H^+$  yang berdifusi pada sampel lebih mudah dan lebih cepat terbaca pada kurva polarisasi.

Sedangkan pada pH 6 kurva polarisasi terlihat sedikit lebih landai. Hal ini dikarenakan  $H^+$  yang ingin berdifusi pada sampel pipa baja agak sedikit terhalangi oleh lapisan karbonat yang cukup tebal karena berasal dari purging  $CO_2$  dan serbuk  $NaHCO_3$  yang larut dalam  $NaCl$  3.5% tersebut. Sehingga hasil yang terbaca pada software sedikit lebih landai karena pengaruh  $H^+$  yang sedikit terlambat untuk berdifusi pada sampel pipa baja.

## BAB 5

### KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan pada sampel pipa baja dengan kondisi dipengaruhi oleh variasi kecepatan putaran dan variasi pH dalam larutan NaCl 3.5% didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

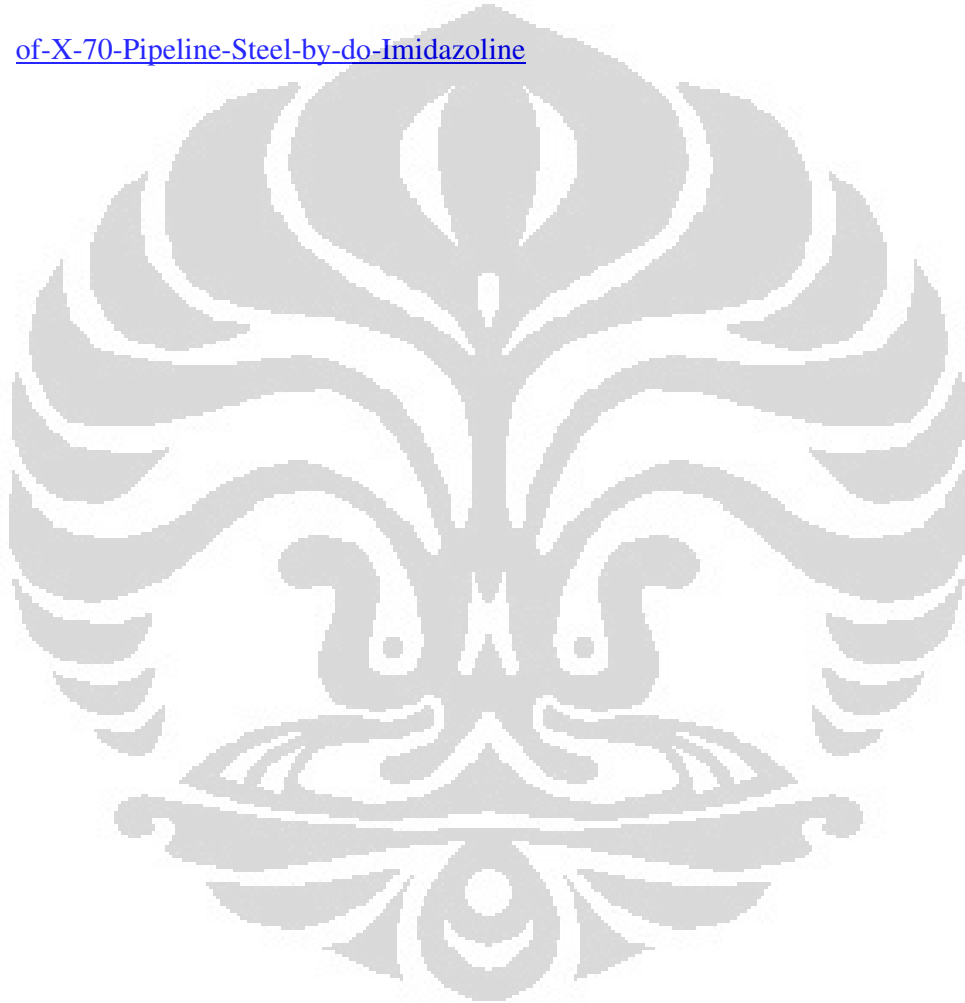
1. Besar Corrosion Rate dipengaruhi oleh Kecepatan putaran atau laju alir dan pH
2. Pengaruh penambahan  $\text{NaHCO}_3$  adalah menaikkan nilai pH, dan peningkatan pH berpengaruh pada pembentukan karbonat pada permukaan sampel, pembentukan karbonat berpengaruh pada corrosion rate.
3. Laju aliran yang tinggi dapat memperbesar laju korosi, dan laju korosi yang tinggi akan membahayakan pipeline dan flowline penyalur gas alam sehingga dibutuhkan suatu metode proteksi untuk mencegah terjadinya kegagalan akibat proses korosi yang terjadi
4. Produk korosi yang dihasilkan adalah senyawa  $\text{FeCO}_3$
5. Pada pH 5 :
  - a. 0 RPM didapatkan nilai CR 58,37
  - b. 375 RPM didapatkan nilai CR 139,1
  - c. 750 RPM didapatkan nilai CR 166,4
  - d. 1500 RPM didapatkan nilai CR 200,2
  - e. 3000 RPM didapatkan nilai CR 241,4
6. Pada pH 6:
  - a. 0 RPM didapatkan nilai CR 46,53
  - b. 375 RPM didapatkan nilai CR 84,46
  - c. 750 RPM didapatkan nilai CR 142,8
  - d. 1500 RPM didapatkan nilai CR 196,6
  - e. 3000 RPM didapatkan nilai CR 216,8
7. Penambahan  $\text{NaHCO}_3$  baik dalam meningkatkan pH tetapi belum cukup baik untuk menggantikan peran inhibitor dalam memproteksi pipeline dan flowline dari korosi pada industri gas alam.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Johnsen, Prof. Roy, "Corrosion of Carbon Steel in Hydrocarbon Environments". Inst. For Produktutvikling og Materialer, Journal. 2004.
2. S.Nesic; J. Postlethwaite; and S.Olsen, "An Electrochemical Model for Prediction Corrosion of Mild Steel in Aqueous Carbon Dioxide Solutions" Journal.
3. D.M Ortega-Toledo; J.G Gonzalez- Rodriguez; M. Casales; A. Caseres, and L.Martinez, "Hydrodynamic Effects on the CO<sub>2</sub> Corrosion Inhibition of X-120 Pipeline Steel by Carboxyethyl-Imidazoline", Journal. March. 2011.
4. Mario, Marcelleus, "Studi Penambahan beras ketan hitam sebagai Inhibitor Organik dengan konsentrasi 500 GPL pada baja SPCC pada lingkungan Air Tanah" Skripsi, Universitas Indonesia. Depok. 2010.
5. Jones. Denny A, *Principles and Prevention of Corrosion*, Maxwell Macmillan, Singapura, 1992
6. Fontana. Mars. G, *Corrosion Engineering, 3rd Edition*. Houston : McGraw-Hill, 1986
7. Rustandi, Andi ; Iandiano, Dito, "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, 3.5 %" Skripsi, Universitas Indonesia, Depok. 2011.
8. Wahyuadi, Johnny; Husein, Syarif, "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" Skripsi, Universitas Indonesia, Depok. 2010.
9. "Study of Mass-Transport Limited Corrosion Using Pine Rotating Cylinder Electrodes". PINE Research Instrumentation, 2007.

10. William D. Callister, Jr., *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 6th ed., John Wiley & Son, Inc., 2003.
11. Riastuti, Rini & Andi Rustandi. 2008. *Diktat Mata Kuliah Korosi Dan Proteksi Logam*. Depok
12. ASM Handbook Volume 13A, Corrosion : Fundamentals, Testing, and Protection. USA : ASM International, 2003
13. ASM Handbook Volume 13B, Corrosion : Materials (USA : ASM International, 2005)
14. Rustandi. Andi; Nur Aziz Octoviawan, "Studi Pengaruh Laju Alir Fluida Terhadap Laju Korosi Baja API 5L X-52 Menggunakan Metode Polarisasi Pada Lingkungan NaCl 3.5% yang Menandung Gas CO<sub>2</sub>" Skripsi, Universitas Indonesia. Depok. 2011.
15. H.Castaneda; G.Zambrano, C. Angeles, and J.Genesca, "Film Stability for API 5L X-52 Line Pipe Steel in CO<sub>2</sub> (aq) and Cl<sup>-</sup> (aq) Solutions in Presence of Amine Based Inhibitor Under Hydrodynamic Conditions". Mexico. 2004
16. ASTM Internasional. (2004). ASTM G31-72 : Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. United State
17. M. B. Kermani, J. C. Gonzales, G. L. Turconi, T. Perez, dan C. Morales, *Material Optimisation in Hydrocarbon Production*, Corrosion paper 2005 No. 05111, NACE International, 2005
18. Utoyo, Widartono. 2000. *Gas Production Operation*. In House Training Gulf Indonesia Resources

19. NACE International. (2005). *NACE Standard RP0775-2005 Item No. 21017 Standard Recommended Practice Preparation, Installation, Analysis, And Interpretation Corrosion Coupons In Oilfield Operations*. Texas:
20. D.M Ortega-Sotelo, J.G Gonzalez Rodriguez, “CO2 Corrosion of X-70 Pipeline Steel by do Imidazoline”. <http://www.scribd.com/doc/54300631/CO2-Corrosion-Inhibition-of-X-70-Pipeline-Steel-by-do-Imidazoline>

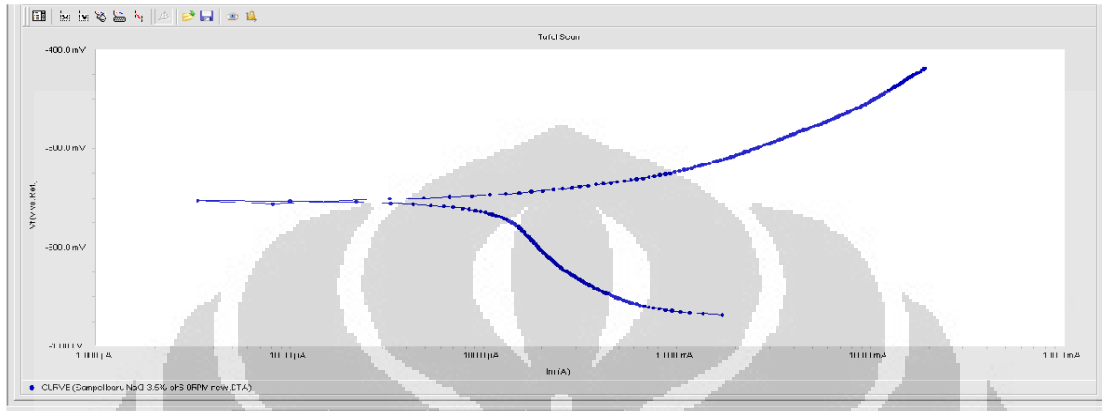




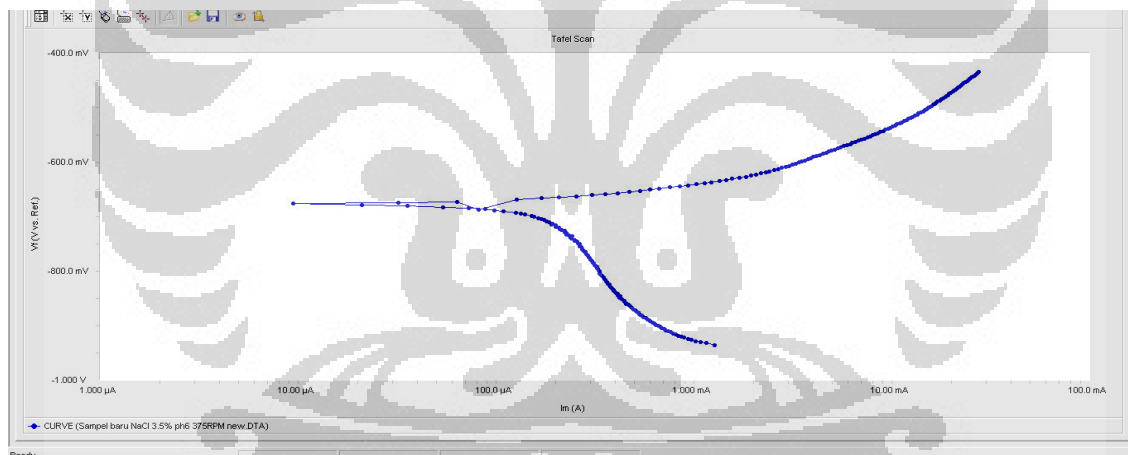
## LAMPIRAN

### PH 6

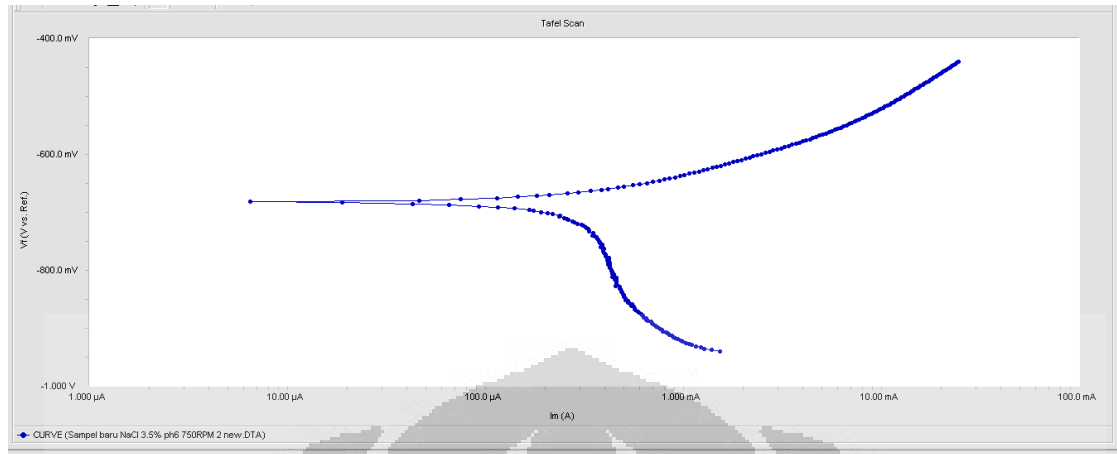
- Kurva Polarisasi 0RPM



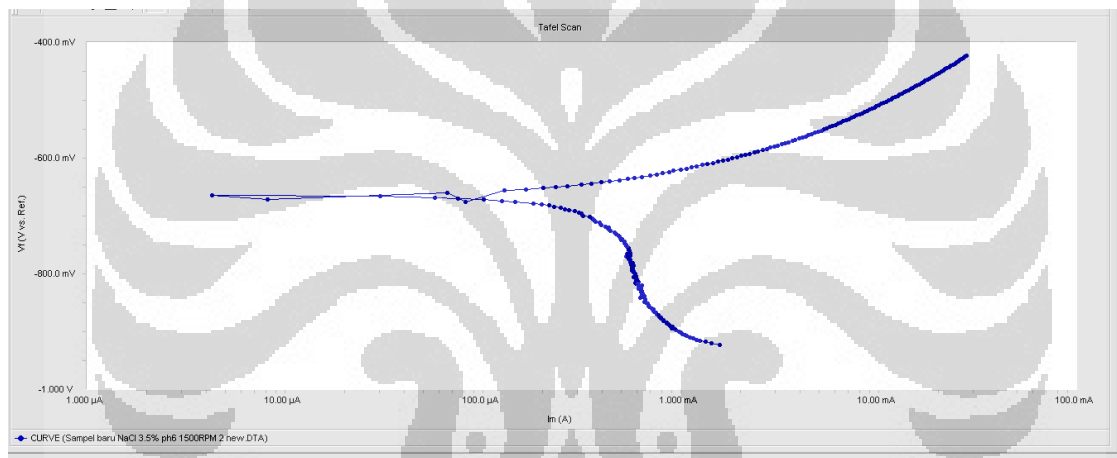
- Kurva Polarisasi 375 RPM



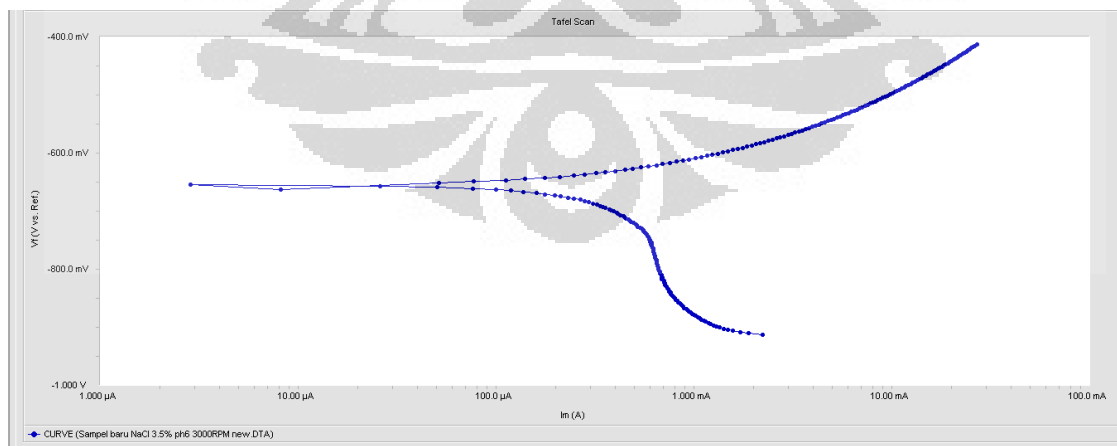
- Kurva Polarisasi 750 RPM



- Kurva Polarisasi 1500 RPM



- Kurva Polarisasi 3000 RPM



- Plot titik berdasarkan Kurva Polarisasi (excel) 0, 375, 750, 1500, dan 3000 RPM

| 0 PRM    | 375 RPM   | 750 RPM  | 1500 RPM  | 3000 RPM |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1,71E-03 | -9,38E-01 | 1,27E-03 | -9,36E-01 | 1,53E-03 | -9,41E-01 | 1,57E-03 | -9,23E-01 | 2,23E-03 | -9,14E-01 |
| 1,37E-03 | -9,35E-01 | 1,15E-03 | -9,32E-01 | 1,38E-03 | -9,37E-01 | 1,43E-03 | -9,20E-01 | 1,89E-03 | -9,10E-01 |
| 1,17E-03 | -9,33E-01 | 1,08E-03 | -9,30E-01 | 1,28E-03 | -9,35E-01 | 1,33E-03 | -9,18E-01 | 1,71E-03 | -9,08E-01 |
| 1,04E-03 | -9,31E-01 | 1,02E-03 | -9,28E-01 | 1,22E-03 | -9,33E-01 | 1,25E-03 | -9,16E-01 | 1,58E-03 | -9,06E-01 |
| 9,43E-04 | -9,29E-01 | 9,76E-04 | -9,26E-01 | 1,16E-03 | -9,31E-01 | 1,20E-03 | -9,14E-01 | 1,48E-03 | -9,04E-01 |
| 8,67E-04 | -9,27E-01 | 9,35E-04 | -9,24E-01 | 1,11E-03 | -9,29E-01 | 1,16E-03 | -9,12E-01 | 1,41E-03 | -9,02E-01 |
| 8,07E-04 | -9,25E-01 | 8,95E-04 | -9,22E-01 | 1,07E-03 | -9,27E-01 | 1,12E-03 | -9,10E-01 | 1,35E-03 | -9,01E-01 |
| 7,56E-04 | -9,23E-01 | 8,64E-04 | -9,20E-01 | 1,03E-03 | -9,25E-01 | 1,08E-03 | -9,08E-01 | 1,30E-03 | -8,99E-01 |
| 7,13E-04 | -9,21E-01 | 8,34E-04 | -9,18E-01 | 9,90E-04 | -9,23E-01 | 1,05E-03 | -9,06E-01 | 1,26E-03 | -8,97E-01 |
| 6,77E-04 | -9,19E-01 | 8,11E-04 | -9,16E-01 | 9,71E-04 | -9,21E-01 | 1,02E-03 | -9,04E-01 | 1,22E-03 | -8,94E-01 |
| 6,44E-04 | -9,17E-01 | 7,86E-04 | -9,14E-01 | 9,38E-04 | -9,19E-01 | 9,97E-04 | -9,02E-01 | 1,18E-03 | -8,93E-01 |
| 6,16E-04 | -9,15E-01 | 7,65E-04 | -9,12E-01 | 9,11E-04 | -9,17E-01 | 9,77E-04 | -9,00E-01 | 1,15E-03 | -8,91E-01 |
| 5,91E-04 | -9,13E-01 | 7,42E-04 | -9,10E-01 | 8,91E-04 | -9,15E-01 | 9,45E-04 | -8,98E-01 | 1,12E-03 | -8,89E-01 |
| 5,67E-04 | -9,11E-01 | 7,23E-04 | -9,08E-01 | 8,70E-04 | -9,13E-01 | 9,39E-04 | -8,96E-01 | 1,09E-03 | -8,87E-01 |
| 5,47E-04 | -9,09E-01 | 7,06E-04 | -9,06E-01 | 8,51E-04 | -9,11E-01 | 9,03E-04 | -8,94E-01 | 1,07E-03 | -8,85E-01 |
| 5,28E-04 | -9,07E-01 | 6,87E-04 | -9,04E-01 | 8,33E-04 | -9,09E-01 | 9,06E-04 | -8,92E-01 | 1,05E-03 | -8,83E-01 |
| 5,11E-04 | -9,05E-01 | 6,72E-04 | -9,02E-01 | 8,18E-04 | -9,07E-01 | 8,85E-04 | -8,90E-01 | 1,02E-03 | -8,81E-01 |
| 4,95E-04 | -9,03E-01 | 6,58E-04 | -9,00E-01 | 7,88E-04 | -9,05E-01 | 8,63E-04 | -8,88E-01 | 1,00E-03 | -8,79E-01 |
| 4,80E-04 | -9,01E-01 | 6,44E-04 | -8,98E-01 | 7,79E-04 | -9,03E-01 | 8,53E-04 | -8,86E-01 | 9,81E-04 | -8,77E-01 |
| 4,66E-04 | -8,99E-01 | 6,29E-04 | -8,96E-01 | 7,65E-04 | -9,01E-01 | 8,46E-04 | -8,84E-01 | 9,65E-04 | -8,75E-01 |
| 4,53E-04 | -8,97E-01 | 6,20E-04 | -8,94E-01 | 7,38E-04 | -8,99E-01 | 8,21E-04 | -8,82E-01 | 9,47E-04 | -8,73E-01 |
| 4,41E-04 | -8,95E-01 | 6,02E-04 | -8,92E-01 | 7,30E-04 | -8,97E-01 | 8,20E-04 | -8,80E-01 | 9,28E-04 | -8,71E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 4,29E-04 | -8,93E-01 | 5,92E-04 | -8,90E-01 | 7,19E-04 | -8,95E-01 | 7,96E-04 | -8,78E-01 | 9,16E-04 | -8,69E-01 |
| 4,18E-04 | -8,91E-01 | 5,83E-04 | -8,88E-01 | 7,02E-04 | -8,93E-01 | 7,94E-04 | -8,76E-01 | 8,95E-04 | -8,67E-01 |
| 4,08E-04 | -8,89E-01 | 5,73E-04 | -8,86E-01 | 6,94E-04 | -8,91E-01 | 7,80E-04 | -8,74E-01 | 8,83E-04 | -8,65E-01 |
| 3,98E-04 | -8,87E-01 | 5,58E-04 | -8,84E-01 | 6,87E-04 | -8,89E-01 | 7,70E-04 | -8,72E-01 | 8,71E-04 | -8,63E-01 |
| 3,89E-04 | -8,85E-01 | 5,45E-04 | -8,82E-01 | 6,58E-04 | -8,87E-01 | 7,54E-04 | -8,70E-01 | 8,60E-04 | -8,61E-01 |
| 3,80E-04 | -8,83E-01 | 5,37E-04 | -8,80E-01 | 6,50E-04 | -8,85E-01 | 7,49E-04 | -8,68E-01 | 8,51E-04 | -8,59E-01 |
| 3,71E-04 | -8,81E-01 | 5,32E-04 | -8,78E-01 | 6,46E-04 | -8,83E-01 | 7,35E-04 | -8,66E-01 | 8,35E-04 | -8,57E-01 |
| 3,63E-04 | -8,79E-01 | 5,23E-04 | -8,76E-01 | 6,29E-04 | -8,81E-01 | 7,27E-04 | -8,64E-01 | 8,22E-04 | -8,55E-01 |
| 3,55E-04 | -8,77E-01 | 5,13E-04 | -8,74E-01 | 6,25E-04 | -8,79E-01 | 7,30E-04 | -8,62E-01 | 8,13E-04 | -8,53E-01 |
| 3,47E-04 | -8,75E-01 | 5,05E-04 | -8,72E-01 | 6,21E-04 | -8,77E-01 | 7,14E-04 | -8,60E-01 | 8,02E-04 | -8,51E-01 |
| 3,40E-04 | -8,73E-01 | 4,94E-04 | -8,70E-01 | 6,09E-04 | -8,75E-01 | 6,92E-04 | -8,58E-01 | 7,94E-04 | -8,49E-01 |
| 3,33E-04 | -8,71E-01 | 4,88E-04 | -8,68E-01 | 5,97E-04 | -8,73E-01 | 6,86E-04 | -8,56E-01 | 7,85E-04 | -8,47E-01 |
| 3,26E-04 | -8,69E-01 | 4,80E-04 | -8,66E-01 | 5,90E-04 | -8,71E-01 | 6,85E-04 | -8,54E-01 | 7,74E-04 | -8,45E-01 |
| 3,19E-04 | -8,67E-01 | 4,74E-04 | -8,64E-01 | 5,72E-04 | -8,69E-01 | 6,79E-04 | -8,52E-01 | 7,66E-04 | -8,43E-01 |
| 3,13E-04 | -8,65E-01 | 4,65E-04 | -8,62E-01 | 5,65E-04 | -8,67E-01 | 6,66E-04 | -8,50E-01 | 7,60E-04 | -8,41E-01 |
| 3,07E-04 | -8,63E-01 | 4,56E-04 | -8,60E-01 | 5,67E-04 | -8,65E-01 | 6,56E-04 | -8,48E-01 | 7,49E-04 | -8,39E-01 |
| 3,01E-04 | -8,61E-01 | 4,55E-04 | -8,58E-01 | 5,59E-04 | -8,63E-01 | 6,60E-04 | -8,46E-01 | 7,48E-04 | -8,37E-01 |
| 2,95E-04 | -8,59E-01 | 4,46E-04 | -8,56E-01 | 5,46E-04 | -8,61E-01 | 6,58E-04 | -8,44E-01 | 7,39E-04 | -8,35E-01 |
| 2,90E-04 | -8,57E-01 | 4,46E-04 | -8,54E-01 | 5,49E-04 | -8,59E-01 | 6,23E-04 | -8,42E-01 | 7,31E-04 | -8,33E-01 |
| 2,84E-04 | -8,55E-01 | 4,34E-04 | -8,52E-01 | 5,33E-04 | -8,57E-01 | 6,37E-04 | -8,40E-01 | 7,27E-04 | -8,31E-01 |
| 2,79E-04 | -8,53E-01 | 4,29E-04 | -8,50E-01 | 5,26E-04 | -8,55E-01 | 6,54E-04 | -8,38E-01 | 7,23E-04 | -8,29E-01 |
| 2,74E-04 | -8,51E-01 | 4,21E-04 | -8,48E-01 | 5,26E-04 | -8,53E-01 | 6,36E-04 | -8,36E-01 | 7,15E-04 | -8,27E-01 |
| 2,69E-04 | -8,49E-01 | 4,24E-04 | -8,46E-01 | 5,09E-04 | -8,51E-01 | 6,43E-04 | -8,34E-01 | 7,15E-04 | -8,25E-01 |
| 2,65E-04 | -8,47E-01 | 4,13E-04 | -8,44E-01 | 5,08E-04 | -8,49E-01 | 6,32E-04 | -8,32E-01 | 7,09E-04 | -8,23E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2,60E-04 | -8,45E-01 | 4,12E-04 | -8,42E-01 | 5,04E-04 | -8,47E-01 | 6,37E-04 | -8,30E-01 | 7,06E-04 | -8,21E-01 |
| 2,56E-04 | -8,43E-01 | 4,03E-04 | -8,40E-01 | 5,02E-04 | -8,45E-01 | 6,27E-04 | -8,28E-01 | 6,98E-04 | -8,19E-01 |
| 2,52E-04 | -8,41E-01 | 4,01E-04 | -8,38E-01 | 4,99E-04 | -8,43E-01 | 6,09E-04 | -8,26E-01 | 6,90E-04 | -8,17E-01 |
| 2,48E-04 | -8,39E-01 | 3,94E-04 | -8,36E-01 | 4,95E-04 | -8,41E-01 | 6,30E-04 | -8,24E-01 | 6,92E-04 | -8,15E-01 |
| 2,44E-04 | -8,37E-01 | 3,93E-04 | -8,34E-01 | 4,88E-04 | -8,39E-01 | 6,12E-04 | -8,22E-01 | 6,87E-04 | -8,13E-01 |
| 2,40E-04 | -8,35E-01 | 3,86E-04 | -8,32E-01 | 4,87E-04 | -8,37E-01 | 6,34E-04 | -8,20E-01 | 6,84E-04 | -8,11E-01 |
| 2,37E-04 | -8,33E-01 | 3,82E-04 | -8,30E-01 | 4,84E-04 | -8,35E-01 | 5,94E-04 | -8,18E-01 | 6,78E-04 | -8,09E-01 |
| 2,33E-04 | -8,31E-01 | 3,79E-04 | -8,28E-01 | 4,80E-04 | -8,33E-01 | 5,92E-04 | -8,16E-01 | 6,71E-04 | -8,07E-01 |
| 2,30E-04 | -8,29E-01 | 3,75E-04 | -8,26E-01 | 4,76E-04 | -8,31E-01 | 6,13E-04 | -8,14E-01 | 6,74E-04 | -8,05E-01 |
| 2,27E-04 | -8,27E-01 | 3,74E-04 | -8,24E-01 | 4,75E-04 | -8,29E-01 | 5,94E-04 | -8,12E-01 | 6,69E-04 | -8,03E-01 |
| 2,24E-04 | -8,25E-01 | 3,67E-04 | -8,22E-01 | 4,55E-04 | -8,27E-01 | 5,99E-04 | -8,10E-01 | 6,61E-04 | -8,01E-01 |
| 2,21E-04 | -8,23E-01 | 3,64E-04 | -8,20E-01 | 4,64E-04 | -8,25E-01 | 5,97E-04 | -8,08E-01 | 6,58E-04 | -7,99E-01 |
| 2,18E-04 | -8,21E-01 | 3,59E-04 | -8,18E-01 | 4,60E-04 | -8,23E-01 | 5,80E-04 | -8,06E-01 | 6,58E-04 | -7,97E-01 |
| 2,15E-04 | -8,19E-01 | 3,58E-04 | -8,16E-01 | 4,60E-04 | -8,21E-01 | 5,94E-04 | -8,04E-01 | 6,55E-04 | -7,95E-01 |
| 2,12E-04 | -8,17E-01 | 3,55E-04 | -8,14E-01 | 4,57E-04 | -8,19E-01 | 5,89E-04 | -8,02E-01 | 6,54E-04 | -7,93E-01 |
| 2,10E-04 | -8,15E-01 | 3,49E-04 | -8,12E-01 | 4,60E-04 | -8,17E-01 | 5,89E-04 | -8,00E-01 | 6,51E-04 | -7,91E-01 |
| 2,07E-04 | -8,13E-01 | 3,48E-04 | -8,10E-01 | 4,48E-04 | -8,15E-01 | 5,76E-04 | -7,98E-01 | 6,47E-04 | -7,89E-01 |
| 2,05E-04 | -8,11E-01 | 3,42E-04 | -8,08E-01 | 4,56E-04 | -8,13E-01 | 5,78E-04 | -7,96E-01 | 6,46E-04 | -7,87E-01 |
| 2,02E-04 | -8,09E-01 | 3,37E-04 | -8,06E-01 | 4,35E-04 | -8,11E-01 | 5,68E-04 | -7,94E-01 | 6,46E-04 | -7,85E-01 |
| 2,00E-04 | -8,07E-01 | 3,35E-04 | -8,04E-01 | 4,42E-04 | -8,09E-01 | 5,69E-04 | -7,92E-01 | 6,42E-04 | -7,83E-01 |
| 1,98E-04 | -8,05E-01 | 3,34E-04 | -8,02E-01 | 4,43E-04 | -8,07E-01 | 5,65E-04 | -7,90E-01 | 6,36E-04 | -7,81E-01 |
| 1,95E-04 | -8,03E-01 | 3,33E-04 | -8,00E-01 | 4,37E-04 | -8,05E-01 | 5,72E-04 | -7,88E-01 | 6,38E-04 | -7,79E-01 |
| 1,93E-04 | -8,01E-01 | 3,31E-04 | -7,98E-01 | 4,37E-04 | -8,03E-01 | 5,75E-04 | -7,86E-01 | 6,37E-04 | -7,77E-01 |
| 1,91E-04 | -7,99E-01 | 3,28E-04 | -7,96E-01 | 4,32E-04 | -8,01E-01 | 5,60E-04 | -7,84E-01 | 6,31E-04 | -7,75E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1,89E-04 | -7,97E-01 | 3,23E-04 | -7,94E-01 | 4,31E-04 | -7,99E-01 | 5,70E-04 | -7,82E-01 | 6,30E-04 | -7,73E-01 |
| 1,87E-04 | -7,95E-01 | 3,23E-04 | -7,92E-01 | 4,29E-04 | -7,97E-01 | 5,53E-04 | -7,80E-01 | 6,25E-04 | -7,71E-01 |
| 1,85E-04 | -7,93E-01 | 3,17E-04 | -7,90E-01 | 4,25E-04 | -7,95E-01 | 5,57E-04 | -7,78E-01 | 6,23E-04 | -7,69E-01 |
| 1,83E-04 | -7,91E-01 | 3,16E-04 | -7,88E-01 | 4,24E-04 | -7,93E-01 | 5,55E-04 | -7,76E-01 | 6,21E-04 | -7,67E-01 |
| 1,81E-04 | -7,89E-01 | 3,11E-04 | -7,86E-01 | 4,23E-04 | -7,91E-01 | 5,46E-04 | -7,74E-01 | 6,23E-04 | -7,65E-01 |
| 1,79E-04 | -7,87E-01 | 3,09E-04 | -7,84E-01 | 4,17E-04 | -7,89E-01 | 5,48E-04 | -7,72E-01 | 6,18E-04 | -7,63E-01 |
| 1,77E-04 | -7,85E-01 | 3,07E-04 | -7,82E-01 | 4,23E-04 | -7,87E-01 | 5,31E-04 | -7,70E-01 | 6,14E-04 | -7,61E-01 |
| 1,75E-04 | -7,83E-01 | 3,04E-04 | -7,80E-01 | 4,15E-04 | -7,85E-01 | 5,54E-04 | -7,68E-01 | 6,12E-04 | -7,59E-01 |
| 1,73E-04 | -7,81E-01 | 3,00E-04 | -7,78E-01 | 4,12E-04 | -7,83E-01 | 5,33E-04 | -7,66E-01 | 6,08E-04 | -7,57E-01 |
| 1,71E-04 | -7,79E-01 | 2,98E-04 | -7,76E-01 | 4,21E-04 | -7,81E-01 | 5,55E-04 | -7,64E-01 | 6,09E-04 | -7,55E-01 |
| 1,69E-04 | -7,77E-01 | 2,94E-04 | -7,74E-01 | 4,20E-04 | -7,79E-01 | 5,52E-04 | -7,62E-01 | 5,99E-04 | -7,53E-01 |
| 1,67E-04 | -7,75E-01 | 2,90E-04 | -7,72E-01 | 4,10E-04 | -7,77E-01 | 5,48E-04 | -7,60E-01 | 6,01E-04 | -7,50E-01 |
| 1,66E-04 | -7,73E-01 | 2,89E-04 | -7,70E-01 | 4,05E-04 | -7,75E-01 | 5,44E-04 | -7,58E-01 | 5,92E-04 | -7,49E-01 |
| 1,64E-04 | -7,71E-01 | 2,85E-04 | -7,68E-01 | 4,06E-04 | -7,73E-01 | 5,44E-04 | -7,56E-01 | 5,94E-04 | -7,47E-01 |
| 1,62E-04 | -7,69E-01 | 2,82E-04 | -7,66E-01 | 3,99E-04 | -7,71E-01 | 5,38E-04 | -7,54E-01 | 5,87E-04 | -7,44E-01 |
| 1,60E-04 | -7,67E-01 | 2,82E-04 | -7,64E-01 | 3,96E-04 | -7,69E-01 | 5,27E-04 | -7,52E-01 | 5,82E-04 | -7,43E-01 |
| 1,58E-04 | -7,65E-01 | 2,76E-04 | -7,62E-01 | 3,92E-04 | -7,67E-01 | 5,29E-04 | -7,50E-01 | 5,78E-04 | -7,41E-01 |
| 1,56E-04 | -7,63E-01 | 2,73E-04 | -7,60E-01 | 3,91E-04 | -7,65E-01 | 5,19E-04 | -7,48E-01 | 5,73E-04 | -7,39E-01 |
| 1,54E-04 | -7,61E-01 | 2,71E-04 | -7,58E-01 | 3,97E-04 | -7,63E-01 | 5,21E-04 | -7,46E-01 | 5,66E-04 | -7,37E-01 |
| 1,52E-04 | -7,59E-01 | 2,69E-04 | -7,56E-01 | 3,91E-04 | -7,61E-01 | 5,19E-04 | -7,44E-01 | 5,56E-04 | -7,35E-01 |
| 1,49E-04 | -7,57E-01 | 2,66E-04 | -7,54E-01 | 3,82E-04 | -7,59E-01 | 5,01E-04 | -7,42E-01 | 5,54E-04 | -7,33E-01 |
| 1,47E-04 | -7,55E-01 | 2,64E-04 | -7,52E-01 | 3,88E-04 | -7,57E-01 | 5,03E-04 | -7,40E-01 | 5,45E-04 | -7,31E-01 |
| 1,45E-04 | -7,53E-01 | 2,66E-04 | -7,50E-01 | 3,88E-04 | -7,55E-01 | 4,96E-04 | -7,38E-01 | 5,33E-04 | -7,29E-01 |
| 1,42E-04 | -7,51E-01 | 2,59E-04 | -7,48E-01 | 3,79E-04 | -7,53E-01 | 4,92E-04 | -7,36E-01 | 5,22E-04 | -7,27E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1,39E-04 | -7,49E-01 | 2,58E-04 | -7,46E-01 | 3,79E-04 | -7,51E-01 | 4,85E-04 | -7,34E-01 | 5,15E-04 | -7,25E-01 |
| 1,37E-04 | -7,47E-01 | 2,51E-04 | -7,44E-01 | 3,75E-04 | -7,49E-01 | 4,72E-04 | -7,32E-01 | 5,10E-04 | -7,23E-01 |
| 1,34E-04 | -7,45E-01 | 2,50E-04 | -7,42E-01 | 3,72E-04 | -7,47E-01 | 4,67E-04 | -7,30E-01 | 4,95E-04 | -7,21E-01 |
| 1,30E-04 | -7,43E-01 | 2,41E-04 | -7,40E-01 | 3,67E-04 | -7,45E-01 | 4,61E-04 | -7,28E-01 | 4,82E-04 | -7,19E-01 |
| 1,27E-04 | -7,41E-01 | 2,37E-04 | -7,38E-01 | 3,63E-04 | -7,43E-01 | 4,40E-04 | -7,26E-01 | 4,78E-04 | -7,17E-01 |
| 1,24E-04 | -7,39E-01 | 2,42E-04 | -7,36E-01 | 3,56E-04 | -7,41E-01 | 4,39E-04 | -7,24E-01 | 4,66E-04 | -7,15E-01 |
| 1,20E-04 | -7,37E-01 | 2,33E-04 | -7,34E-01 | 3,47E-04 | -7,39E-01 | 4,30E-04 | -7,22E-01 | 4,55E-04 | -7,13E-01 |
| 1,16E-04 | -7,35E-01 | 2,28E-04 | -7,32E-01 | 3,51E-04 | -7,37E-01 | 4,31E-04 | -7,20E-01 | 4,44E-04 | -7,11E-01 |
| 1,11E-04 | -7,33E-01 | 2,27E-04 | -7,30E-01 | 3,50E-04 | -7,35E-01 | 4,16E-04 | -7,18E-01 | 4,39E-04 | -7,09E-01 |
| 1,07E-04 | -7,31E-01 | 2,22E-04 | -7,28E-01 | 3,34E-04 | -7,33E-01 | 3,97E-04 | -7,16E-01 | 4,26E-04 | -7,07E-01 |
| 1,02E-04 | -7,29E-01 | 2,23E-04 | -7,26E-01 | 3,33E-04 | -7,31E-01 | 3,93E-04 | -7,14E-01 | 4,13E-04 | -7,05E-01 |
| 9,65E-05 | -7,27E-01 | 2,13E-04 | -7,24E-01 | 3,29E-04 | -7,29E-01 | 3,88E-04 | -7,12E-01 | 4,07E-04 | -7,03E-01 |
| 9,05E-05 | -7,25E-01 | 2,10E-04 | -7,22E-01 | 3,24E-04 | -7,27E-01 | 3,70E-04 | -7,10E-01 | 3,94E-04 | -7,01E-01 |
| 8,43E-05 | -7,23E-01 | 2,08E-04 | -7,20E-01 | 3,20E-04 | -7,25E-01 | 3,68E-04 | -7,08E-01 | 3,82E-04 | -6,99E-01 |
| 7,77E-05 | -7,21E-01 | 2,00E-04 | -7,18E-01 | 3,12E-04 | -7,23E-01 | 3,62E-04 | -7,06E-01 | 3,76E-04 | -6,97E-01 |
| 7,01E-05 | -7,19E-01 | 2,01E-04 | -7,16E-01 | 3,07E-04 | -7,21E-01 | 3,57E-04 | -7,04E-01 | 3,58E-04 | -6,95E-01 |
| 6,23E-05 | -7,17E-01 | 1,91E-04 | -7,14E-01 | 2,90E-04 | -7,19E-01 | 3,48E-04 | -7,02E-01 | 3,48E-04 | -6,93E-01 |
| 5,34E-05 | -7,15E-01 | 1,93E-04 | -7,12E-01 | 2,81E-04 | -7,17E-01 | 3,20E-04 | -7,00E-01 | 3,36E-04 | -6,91E-01 |
| 4,33E-05 | -7,13E-01 | 1,86E-04 | -7,10E-01 | 2,76E-04 | -7,15E-01 | 3,19E-04 | -6,98E-01 | 3,23E-04 | -6,89E-01 |
| 3,30E-05 | -7,11E-01 | 1,81E-04 | -7,08E-01 | 2,62E-04 | -7,13E-01 | 3,15E-04 | -6,96E-01 | 3,10E-04 | -6,87E-01 |
| 2,19E-05 | -7,09E-01 | 1,75E-04 | -7,06E-01 | 2,58E-04 | -7,11E-01 | 3,07E-04 | -6,94E-01 | 2,93E-04 | -6,85E-01 |
| 9,98E-06 | -7,07E-01 | 1,70E-04 | -7,04E-01 | 2,50E-04 | -7,09E-01 | 2,90E-04 | -6,92E-01 | 2,80E-04 | -6,83E-01 |
| 3,34E-06 | -7,05E-01 | 1,63E-04 | -7,02E-01 | 2,35E-04 | -7,07E-01 | 2,73E-04 | -6,90E-01 | 2,67E-04 | -6,81E-01 |
| 8,19E-06 | -7,12E-01 | 1,57E-04 | -7,00E-01 | 2,37E-04 | -7,05E-01 | 2,60E-04 | -6,88E-01 | 2,48E-04 | -6,79E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 3,26E-05 | -7,01E-01 | 1,51E-04 | -6,98E-01 | 2,18E-04 | -7,03E-01 | 2,47E-04 | -6,86E-01 | 2,32E-04 | -6,77E-01 |
| 4,91E-05 | -6,99E-01 | 1,40E-04 | -6,96E-01 | 2,06E-04 | -7,01E-01 | 2,29E-04 | -6,84E-01 | 2,12E-04 | -6,75E-01 |
| 6,65E-05 | -6,97E-01 | 1,34E-04 | -6,94E-01 | 1,91E-04 | -6,99E-01 | 2,15E-04 | -6,82E-01 | 1,99E-04 | -6,73E-01 |
| 8,72E-05 | -6,95E-01 | 1,26E-04 | -6,92E-01 | 1,75E-04 | -6,97E-01 | 1,97E-04 | -6,80E-01 | 1,76E-04 | -6,71E-01 |
| 1,08E-04 | -6,93E-01 | 1,09E-04 | -6,90E-01 | 1,66E-04 | -6,95E-01 | 1,79E-04 | -6,78E-01 | 1,60E-04 | -6,69E-01 |
| 1,29E-04 | -6,91E-01 | 9,78E-05 | -6,88E-01 | 1,40E-04 | -6,93E-01 | 1,46E-04 | -6,76E-01 | 1,38E-04 | -6,67E-01 |
| 1,53E-04 | -6,89E-01 | 8,86E-05 | -6,86E-01 | 1,16E-04 | -6,91E-01 | 1,25E-04 | -6,74E-01 | 1,19E-04 | -6,65E-01 |
| 1,77E-04 | -6,87E-01 | 7,24E-05 | -6,84E-01 | 9,21E-05 | -6,89E-01 | 1,01E-04 | -6,72E-01 | 9,99E-05 | -6,63E-01 |
| 2,02E-04 | -6,85E-01 | 5,40E-05 | -6,82E-01 | 6,55E-05 | -6,87E-01 | 7,49E-05 | -6,70E-01 | 7,65E-05 | -6,61E-01 |
| 2,29E-04 | -6,83E-01 | 3,57E-05 | -6,80E-01 | 4,26E-05 | -6,85E-01 | 5,72E-05 | -6,68E-01 | 5,02E-05 | -6,59E-01 |
| 2,56E-04 | -6,81E-01 | 2,11E-05 | -6,78E-01 | 1,89E-05 | -6,83E-01 | 3,02E-05 | -6,66E-01 | 2,60E-05 | -6,57E-01 |
| 2,86E-04 | -6,79E-01 | 9,43E-06 | -6,76E-01 | 6,50E-06 | -6,82E-01 | 4,28E-06 | -6,64E-01 | 2,85E-06 | -6,55E-01 |
| 3,16E-04 | -6,77E-01 | 3,22E-05 | -6,74E-01 | 4,61E-05 | -6,80E-01 | 8,19E-06 | -6,72E-01 | 8,19E-06 | -6,62E-01 |
| 3,48E-04 | -6,75E-01 | 6,37E-05 | -6,72E-01 | 7,52E-05 | -6,77E-01 | 6,60E-05 | -6,60E-01 | 5,12E-05 | -6,51E-01 |
| 3,82E-04 | -6,73E-01 | 8,19E-05 | -6,87E-01 | 1,14E-04 | -6,75E-01 | 8,19E-05 | -6,75E-01 | 7,68E-05 | -6,49E-01 |
| 4,17E-04 | -6,71E-01 | 1,28E-04 | -6,68E-01 | 1,46E-04 | -6,74E-01 | 1,28E-04 | -6,56E-01 | 1,12E-04 | -6,47E-01 |
| 4,54E-04 | -6,69E-01 | 1,70E-04 | -6,66E-01 | 1,81E-04 | -6,72E-01 | 1,66E-04 | -6,54E-01 | 1,41E-04 | -6,45E-01 |
| 4,92E-04 | -6,67E-01 | 2,09E-04 | -6,64E-01 | 2,10E-04 | -6,69E-01 | 2,01E-04 | -6,52E-01 | 1,76E-04 | -6,43E-01 |
| 5,33E-04 | -6,65E-01 | 2,55E-04 | -6,62E-01 | 2,59E-04 | -6,67E-01 | 2,33E-04 | -6,50E-01 | 2,11E-04 | -6,41E-01 |
| 5,76E-04 | -6,63E-01 | 3,05E-04 | -6,60E-01 | 2,95E-04 | -6,66E-01 | 2,68E-04 | -6,48E-01 | 2,46E-04 | -6,39E-01 |
| 6,21E-04 | -6,61E-01 | 3,57E-04 | -6,58E-01 | 3,39E-04 | -6,64E-01 | 3,15E-04 | -6,46E-01 | 2,81E-04 | -6,37E-01 |
| 6,67E-04 | -6,59E-01 | 4,13E-04 | -6,57E-01 | 3,86E-04 | -6,61E-01 | 3,52E-04 | -6,44E-01 | 3,21E-04 | -6,35E-01 |
| 7,17E-04 | -6,57E-01 | 4,72E-04 | -6,55E-01 | 4,16E-04 | -6,60E-01 | 3,98E-04 | -6,42E-01 | 3,57E-04 | -6,33E-01 |
| 7,67E-04 | -6,55E-01 | 5,34E-04 | -6,53E-01 | 4,66E-04 | -6,58E-01 | 4,37E-04 | -6,40E-01 | 4,02E-04 | -6,31E-01 |



|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 8,18E-04 | -6,53E-01 | 6,00E-04 | -6,51E-01 | 5,00E-04 | -6,56E-01 | 4,90E-04 | -6,38E-01 | 4,48E-04 | -6,29E-01 |
| 8,70E-04 | -6,51E-01 | 6,69E-04 | -6,49E-01 | 5,54E-04 | -6,54E-01 | 5,40E-04 | -6,36E-01 | 4,91E-04 | -6,27E-01 |
| 9,22E-04 | -6,49E-01 | 7,53E-04 | -6,46E-01 | 5,98E-04 | -6,52E-01 | 5,82E-04 | -6,34E-01 | 5,39E-04 | -6,25E-01 |
| 9,74E-04 | -6,47E-01 | 8,45E-04 | -6,44E-01 | 6,52E-04 | -6,50E-01 | 6,35E-04 | -6,32E-01 | 5,89E-04 | -6,23E-01 |
| 1,03E-03 | -6,45E-01 | 9,39E-04 | -6,42E-01 | 7,03E-04 | -6,48E-01 | 6,97E-04 | -6,30E-01 | 6,46E-04 | -6,21E-01 |
| 1,08E-03 | -6,43E-01 | 1,03E-03 | -6,40E-01 | 7,57E-04 | -6,45E-01 | 7,54E-04 | -6,28E-01 | 6,97E-04 | -6,19E-01 |
| 1,13E-03 | -6,41E-01 | 1,13E-03 | -6,38E-01 | 7,99E-04 | -6,43E-01 | 8,13E-04 | -6,26E-01 | 7,57E-04 | -6,17E-01 |
| 1,19E-03 | -6,39E-01 | 1,22E-03 | -6,36E-01 | 8,53E-04 | -6,42E-01 | 8,71E-04 | -6,24E-01 | 8,19E-04 | -6,15E-01 |
| 1,24E-03 | -6,37E-01 | 1,35E-03 | -6,34E-01 | 9,04E-04 | -6,39E-01 | 9,21E-04 | -6,22E-01 | 8,79E-04 | -6,13E-01 |
| 1,30E-03 | -6,35E-01 | 1,45E-03 | -6,32E-01 | 9,65E-04 | -6,37E-01 | 1,00E-03 | -6,20E-01 | 9,48E-04 | -6,11E-01 |
| 1,35E-03 | -6,33E-01 | 1,56E-03 | -6,30E-01 | 1,01E-03 | -6,36E-01 | 1,07E-03 | -6,18E-01 | 1,02E-03 | -6,09E-01 |
| 1,41E-03 | -6,31E-01 | 1,69E-03 | -6,28E-01 | 1,07E-03 | -6,34E-01 | 1,14E-03 | -6,16E-01 | 1,09E-03 | -6,07E-01 |
| 1,47E-03 | -6,29E-01 | 1,83E-03 | -6,27E-01 | 1,13E-03 | -6,32E-01 | 1,21E-03 | -6,14E-01 | 1,16E-03 | -6,05E-01 |
| 1,54E-03 | -6,27E-01 | 1,94E-03 | -6,25E-01 | 1,20E-03 | -6,29E-01 | 1,28E-03 | -6,12E-01 | 1,24E-03 | -6,03E-01 |
| 1,60E-03 | -6,25E-01 | 2,06E-03 | -6,23E-01 | 1,25E-03 | -6,28E-01 | 1,36E-03 | -6,10E-01 | 1,32E-03 | -6,01E-01 |
| 1,67E-03 | -6,23E-01 | 2,18E-03 | -6,21E-01 | 1,33E-03 | -6,26E-01 | 1,45E-03 | -6,08E-01 | 1,40E-03 | -5,99E-01 |
| 1,74E-03 | -6,21E-01 | 2,31E-03 | -6,19E-01 | 1,40E-03 | -6,24E-01 | 1,54E-03 | -6,06E-01 | 1,49E-03 | -5,97E-01 |
| 1,81E-03 | -6,19E-01 | 2,41E-03 | -6,17E-01 | 1,46E-03 | -6,22E-01 | 1,64E-03 | -6,04E-01 | 1,58E-03 | -5,95E-01 |
| 1,88E-03 | -6,17E-01 | 2,54E-03 | -6,15E-01 | 1,54E-03 | -6,20E-01 | 1,73E-03 | -6,02E-01 | 1,67E-03 | -5,93E-01 |
| 1,95E-03 | -6,15E-01 | 2,66E-03 | -6,12E-01 | 1,62E-03 | -6,18E-01 | 1,82E-03 | -6,00E-01 | 1,76E-03 | -5,91E-01 |
| 2,03E-03 | -6,13E-01 | 2,78E-03 | -6,11E-01 | 1,69E-03 | -6,16E-01 | 1,92E-03 | -5,98E-01 | 1,86E-03 | -5,89E-01 |
| 2,10E-03 | -6,11E-01 | 2,90E-03 | -6,09E-01 | 1,78E-03 | -6,13E-01 | 2,02E-03 | -5,96E-01 | 1,96E-03 | -5,87E-01 |
| 2,18E-03 | -6,09E-01 | 3,04E-03 | -6,06E-01 | 1,87E-03 | -6,12E-01 | 2,12E-03 | -5,94E-01 | 2,06E-03 | -5,85E-01 |
| 2,25E-03 | -6,07E-01 | 3,14E-03 | -6,04E-01 | 1,97E-03 | -6,10E-01 | 2,23E-03 | -5,92E-01 | 2,17E-03 | -5,83E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2,33E-03 | -6,05E-01 | 3,26E-03 | -6,03E-01 | 2,05E-03 | -6,08E-01 | 2,35E-03 | -5,90E-01 | 2,27E-03 | -5,81E-01 |
| 2,41E-03 | -6,03E-01 | 3,40E-03 | -6,01E-01 | 2,16E-03 | -6,05E-01 | 2,46E-03 | -5,88E-01 | 2,39E-03 | -5,79E-01 |
| 2,49E-03 | -6,01E-01 | 3,50E-03 | -5,99E-01 | 2,26E-03 | -6,04E-01 | 2,59E-03 | -5,86E-01 | 2,50E-03 | -5,77E-01 |
| 2,57E-03 | -5,99E-01 | 3,63E-03 | -5,97E-01 | 2,36E-03 | -6,02E-01 | 2,71E-03 | -5,84E-01 | 2,61E-03 | -5,75E-01 |
| 2,65E-03 | -5,97E-01 | 3,77E-03 | -5,95E-01 | 2,48E-03 | -6,00E-01 | 2,84E-03 | -5,82E-01 | 2,73E-03 | -5,73E-01 |
| 2,73E-03 | -5,95E-01 | 3,89E-03 | -5,93E-01 | 2,59E-03 | -5,98E-01 | 2,96E-03 | -5,80E-01 | 2,86E-03 | -5,71E-01 |
| 2,82E-03 | -5,93E-01 | 4,02E-03 | -5,91E-01 | 2,72E-03 | -5,96E-01 | 3,09E-03 | -5,78E-01 | 2,99E-03 | -5,69E-01 |
| 2,91E-03 | -5,91E-01 | 4,17E-03 | -5,89E-01 | 2,84E-03 | -5,94E-01 | 3,23E-03 | -5,76E-01 | 3,12E-03 | -5,67E-01 |
| 3,00E-03 | -5,89E-01 | 4,33E-03 | -5,87E-01 | 2,97E-03 | -5,92E-01 | 3,37E-03 | -5,74E-01 | 3,25E-03 | -5,65E-01 |
| 3,09E-03 | -5,87E-01 | 4,49E-03 | -5,85E-01 | 3,12E-03 | -5,90E-01 | 3,51E-03 | -5,72E-01 | 3,39E-03 | -5,63E-01 |
| 3,19E-03 | -5,86E-01 | 4,66E-03 | -5,83E-01 | 3,24E-03 | -5,88E-01 | 3,66E-03 | -5,70E-01 | 3,52E-03 | -5,61E-01 |
| 3,29E-03 | -5,83E-01 | 4,81E-03 | -5,80E-01 | 3,39E-03 | -5,86E-01 | 3,80E-03 | -5,68E-01 | 3,67E-03 | -5,59E-01 |
| 3,39E-03 | -5,81E-01 | 4,95E-03 | -5,79E-01 | 3,54E-03 | -5,84E-01 | 3,95E-03 | -5,66E-01 | 3,81E-03 | -5,57E-01 |
| 3,50E-03 | -5,79E-01 | 5,16E-03 | -5,77E-01 | 3,69E-03 | -5,82E-01 | 4,11E-03 | -5,64E-01 | 3,96E-03 | -5,55E-01 |
| 3,61E-03 | -5,77E-01 | 5,35E-03 | -5,75E-01 | 3,84E-03 | -5,80E-01 | 4,27E-03 | -5,62E-01 | 4,12E-03 | -5,53E-01 |
| 3,72E-03 | -5,75E-01 | 5,52E-03 | -5,73E-01 | 4,01E-03 | -5,78E-01 | 4,43E-03 | -5,60E-01 | 4,27E-03 | -5,51E-01 |
| 3,84E-03 | -5,73E-01 | 5,73E-03 | -5,71E-01 | 4,17E-03 | -5,76E-01 | 4,59E-03 | -5,58E-01 | 4,43E-03 | -5,49E-01 |
| 3,96E-03 | -5,71E-01 | 5,93E-03 | -5,69E-01 | 4,35E-03 | -5,74E-01 | 4,76E-03 | -5,56E-01 | 4,60E-03 | -5,47E-01 |
| 4,08E-03 | -5,70E-01 | 6,15E-03 | -5,67E-01 | 4,51E-03 | -5,72E-01 | 4,93E-03 | -5,54E-01 | 4,76E-03 | -5,45E-01 |
| 4,21E-03 | -5,67E-01 | 6,33E-03 | -5,65E-01 | 4,67E-03 | -5,70E-01 | 5,12E-03 | -5,52E-01 | 4,93E-03 | -5,43E-01 |
| 4,35E-03 | -5,65E-01 | 6,55E-03 | -5,63E-01 | 4,86E-03 | -5,68E-01 | 5,28E-03 | -5,50E-01 | 5,11E-03 | -5,41E-01 |
| 4,48E-03 | -5,63E-01 | 6,79E-03 | -5,61E-01 | 5,06E-03 | -5,66E-01 | 5,47E-03 | -5,48E-01 | 5,29E-03 | -5,39E-01 |
| 4,62E-03 | -5,62E-01 | 7,00E-03 | -5,59E-01 | 5,25E-03 | -5,64E-01 | 5,64E-03 | -5,46E-01 | 5,48E-03 | -5,37E-01 |
| 4,77E-03 | -5,59E-01 | 7,24E-03 | -5,57E-01 | 5,44E-03 | -5,62E-01 | 5,83E-03 | -5,44E-01 | 5,66E-03 | -5,35E-01 |

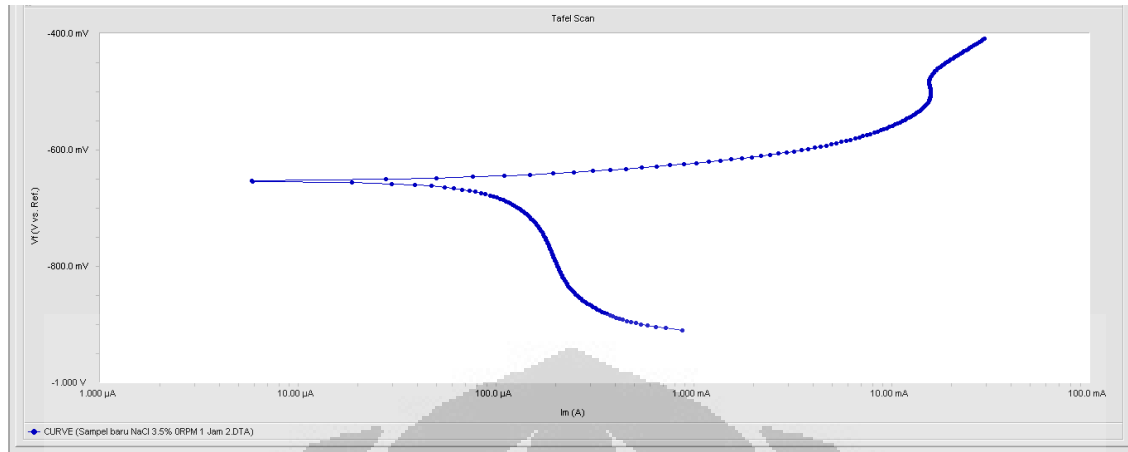
|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 4,92E-03 | -5,57E-01 | 7,53E-03 | -5,55E-01 | 5,61E-03 | -5,60E-01 | 6,03E-03 | -5,42E-01 | 5,86E-03 | -5,33E-01 |
| 5,07E-03 | -5,55E-01 | 7,76E-03 | -5,53E-01 | 5,82E-03 | -5,58E-01 | 6,22E-03 | -5,40E-01 | 6,05E-03 | -5,31E-01 |
| 5,22E-03 | -5,54E-01 | 8,00E-03 | -5,51E-01 | 6,03E-03 | -5,56E-01 | 6,43E-03 | -5,38E-01 | 6,26E-03 | -5,29E-01 |
| 5,38E-03 | -5,52E-01 | 8,23E-03 | -5,49E-01 | 6,24E-03 | -5,54E-01 | 6,64E-03 | -5,36E-01 | 6,46E-03 | -5,27E-01 |
| 5,54E-03 | -5,49E-01 | 8,52E-03 | -5,47E-01 | 6,44E-03 | -5,52E-01 | 6,85E-03 | -5,34E-01 | 6,66E-03 | -5,25E-01 |
| 5,71E-03 | -5,48E-01 | 8,77E-03 | -5,45E-01 | 6,66E-03 | -5,50E-01 | 7,07E-03 | -5,32E-01 | 6,88E-03 | -5,23E-01 |
| 5,88E-03 | -5,46E-01 | 9,08E-03 | -5,43E-01 | 6,86E-03 | -5,48E-01 | 7,29E-03 | -5,30E-01 | 7,10E-03 | -5,21E-01 |
| 6,05E-03 | -5,44E-01 | 9,28E-03 | -5,41E-01 | 7,06E-03 | -5,46E-01 | 7,51E-03 | -5,28E-01 | 7,32E-03 | -5,19E-01 |
| 6,23E-03 | -5,41E-01 | 9,59E-03 | -5,39E-01 | 7,32E-03 | -5,44E-01 | 7,74E-03 | -5,26E-01 | 7,55E-03 | -5,17E-01 |
| 6,41E-03 | -5,40E-01 | 9,78E-03 | -5,37E-01 | 7,52E-03 | -5,42E-01 | 7,98E-03 | -5,24E-01 | 7,78E-03 | -5,15E-01 |
| 6,60E-03 | -5,38E-01 | 1,01E-02 | -5,35E-01 | 7,73E-03 | -5,40E-01 | 8,21E-03 | -5,22E-01 | 8,02E-03 | -5,13E-01 |
| 6,78E-03 | -5,36E-01 | 1,04E-02 | -5,33E-01 | 8,01E-03 | -5,38E-01 | 8,46E-03 | -5,20E-01 | 8,26E-03 | -5,11E-01 |
| 6,97E-03 | -5,33E-01 | 1,06E-02 | -5,31E-01 | 8,22E-03 | -5,36E-01 | 8,70E-03 | -5,18E-01 | 8,50E-03 | -5,09E-01 |
| 7,15E-03 | -5,31E-01 | 1,10E-02 | -5,29E-01 | 8,45E-03 | -5,34E-01 | 8,98E-03 | -5,16E-01 | 8,75E-03 | -5,07E-01 |
| 7,35E-03 | -5,30E-01 | 1,12E-02 | -5,27E-01 | 8,67E-03 | -5,32E-01 | 9,22E-03 | -5,14E-01 | 9,01E-03 | -5,05E-01 |
| 7,55E-03 | -5,28E-01 | 1,16E-02 | -5,25E-01 | 8,94E-03 | -5,30E-01 | 9,49E-03 | -5,12E-01 | 9,26E-03 | -5,03E-01 |
| 7,75E-03 | -5,25E-01 | 1,19E-02 | -5,23E-01 | 9,15E-03 | -5,28E-01 | 9,74E-03 | -5,10E-01 | 9,53E-03 | -5,01E-01 |
| 7,96E-03 | -5,24E-01 | 1,22E-02 | -5,21E-01 | 9,43E-03 | -5,26E-01 | 1,00E-02 | -5,08E-01 | 9,80E-03 | -4,99E-01 |
| 8,17E-03 | -5,22E-01 | 1,25E-02 | -5,19E-01 | 9,69E-03 | -5,24E-01 | 1,03E-02 | -5,06E-01 | 1,01E-02 | -4,97E-01 |
| 8,38E-03 | -5,20E-01 | 1,27E-02 | -5,17E-01 | 9,92E-03 | -5,22E-01 | 1,06E-02 | -5,04E-01 | 1,04E-02 | -4,95E-01 |
| 8,59E-03 | -5,18E-01 | 1,30E-02 | -5,15E-01 | 1,02E-02 | -5,20E-01 | 1,09E-02 | -5,02E-01 | 1,06E-02 | -4,93E-01 |
| 8,80E-03 | -5,16E-01 | 1,34E-02 | -5,13E-01 | 1,04E-02 | -5,18E-01 | 1,12E-02 | -5,00E-01 | 1,09E-02 | -4,91E-01 |
| 9,02E-03 | -5,14E-01 | 1,36E-02 | -5,11E-01 | 1,07E-02 | -5,16E-01 | 1,15E-02 | -4,98E-01 | 1,12E-02 | -4,89E-01 |
| 9,23E-03 | -5,12E-01 | 1,40E-02 | -5,09E-01 | 1,10E-02 | -5,14E-01 | 1,18E-02 | -4,96E-01 | 1,15E-02 | -4,87E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 9,45E-03 | -5,09E-01 | 1,44E-02 | -5,07E-01 | 1,12E-02 | -5,12E-01 | 1,21E-02 | -4,94E-01 | 1,18E-02 | -4,85E-01 |
| 9,67E-03 | -5,08E-01 | 1,47E-02 | -5,05E-01 | 1,15E-02 | -5,10E-01 | 1,25E-02 | -4,92E-01 | 1,21E-02 | -4,83E-01 |
| 9,89E-03 | -5,06E-01 | 1,49E-02 | -5,03E-01 | 1,18E-02 | -5,08E-01 | 1,28E-02 | -4,90E-01 | 1,25E-02 | -4,81E-01 |
| 1,01E-02 | -5,04E-01 | 1,53E-02 | -5,01E-01 | 1,20E-02 | -5,06E-01 | 1,31E-02 | -4,88E-01 | 1,28E-02 | -4,79E-01 |
| 1,03E-02 | -5,02E-01 | 1,56E-02 | -4,99E-01 | 1,23E-02 | -5,04E-01 | 1,35E-02 | -4,86E-01 | 1,31E-02 | -4,77E-01 |
| 1,05E-02 | -5,00E-01 | 1,59E-02 | -4,97E-01 | 1,26E-02 | -5,02E-01 | 1,38E-02 | -4,84E-01 | 1,35E-02 | -4,75E-01 |
| 1,08E-02 | -4,98E-01 | 1,62E-02 | -4,95E-01 | 1,29E-02 | -5,00E-01 | 1,41E-02 | -4,82E-01 | 1,38E-02 | -4,73E-01 |
| 1,10E-02 | -4,96E-01 | 1,65E-02 | -4,93E-01 | 1,32E-02 | -4,98E-01 | 1,45E-02 | -4,80E-01 | 1,41E-02 | -4,71E-01 |
| 1,12E-02 | -4,94E-01 | 1,68E-02 | -4,91E-01 | 1,35E-02 | -4,96E-01 | 1,49E-02 | -4,78E-01 | 1,45E-02 | -4,69E-01 |
| 1,14E-02 | -4,92E-01 | 1,71E-02 | -4,89E-01 | 1,38E-02 | -4,94E-01 | 1,53E-02 | -4,76E-01 | 1,48E-02 | -4,67E-01 |
| 1,16E-02 | -4,90E-01 | 1,76E-02 | -4,87E-01 | 1,41E-02 | -4,92E-01 | 1,56E-02 | -4,74E-01 | 1,52E-02 | -4,65E-01 |
| 1,19E-02 | -4,88E-01 | 1,79E-02 | -4,85E-01 | 1,45E-02 | -4,90E-01 | 1,60E-02 | -4,72E-01 | 1,56E-02 | -4,63E-01 |
| 1,21E-02 | -4,86E-01 | 1,82E-02 | -4,83E-01 | 1,48E-02 | -4,88E-01 | 1,64E-02 | -4,70E-01 | 1,59E-02 | -4,61E-01 |
| 1,23E-02 | -4,84E-01 | 1,87E-02 | -4,81E-01 | 1,51E-02 | -4,86E-01 | 1,68E-02 | -4,68E-01 | 1,63E-02 | -4,59E-01 |
| 1,25E-02 | -4,82E-01 | 1,89E-02 | -4,79E-01 | 1,55E-02 | -4,84E-01 | 1,72E-02 | -4,66E-01 | 1,67E-02 | -4,57E-01 |
| 1,28E-02 | -4,80E-01 | 1,92E-02 | -4,77E-01 | 1,58E-02 | -4,82E-01 | 1,77E-02 | -4,64E-01 | 1,71E-02 | -4,55E-01 |
| 1,30E-02 | -4,78E-01 | 1,95E-02 | -4,75E-01 | 1,62E-02 | -4,80E-01 | 1,81E-02 | -4,62E-01 | 1,75E-02 | -4,53E-01 |
| 1,33E-02 | -4,76E-01 | 1,98E-02 | -4,73E-01 | 1,65E-02 | -4,78E-01 | 1,85E-02 | -4,60E-01 | 1,79E-02 | -4,51E-01 |
| 1,35E-02 | -4,74E-01 | 2,03E-02 | -4,71E-01 | 1,69E-02 | -4,76E-01 | 1,89E-02 | -4,58E-01 | 1,84E-02 | -4,49E-01 |
| 1,38E-02 | -4,72E-01 | 2,06E-02 | -4,69E-01 | 1,73E-02 | -4,74E-01 | 1,94E-02 | -4,56E-01 | 1,88E-02 | -4,47E-01 |
| 1,40E-02 | -4,70E-01 | 2,10E-02 | -4,67E-01 | 1,76E-02 | -4,72E-01 | 1,98E-02 | -4,54E-01 | 1,92E-02 | -4,45E-01 |
| 1,43E-02 | -4,68E-01 | 2,14E-02 | -4,65E-01 | 1,80E-02 | -4,70E-01 | 2,02E-02 | -4,52E-01 | 1,96E-02 | -4,43E-01 |
| 1,46E-02 | -4,66E-01 | 2,17E-02 | -4,63E-01 | 1,84E-02 | -4,68E-01 | 2,07E-02 | -4,50E-01 | 2,01E-02 | -4,41E-01 |
| 1,49E-02 | -4,64E-01 | 2,21E-02 | -4,61E-01 | 1,88E-02 | -4,66E-01 | 2,12E-02 | -4,48E-01 | 2,05E-02 | -4,39E-01 |

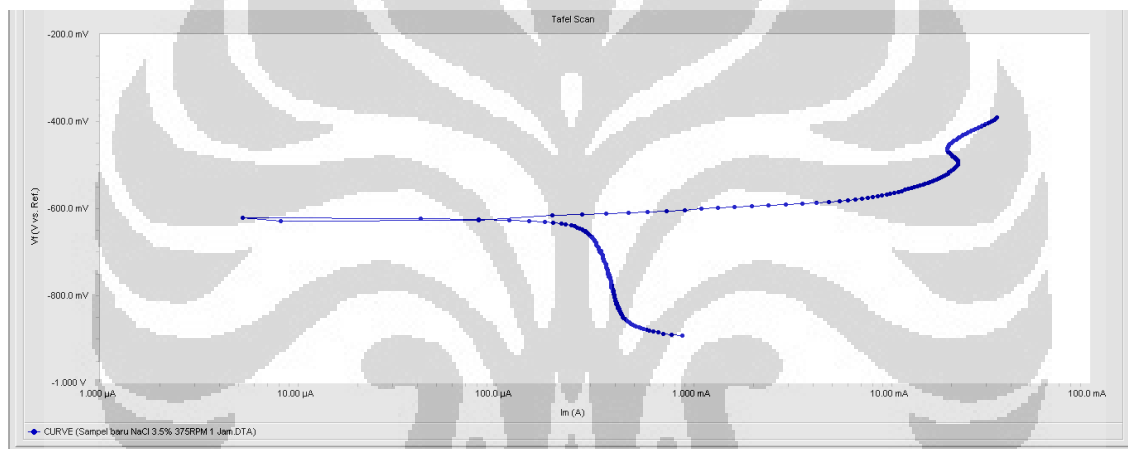
|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1,51E-02 | -4,62E-01 | 2,25E-02 | -4,59E-01 | 1,92E-02 | -4,64E-01 | 2,17E-02 | -4,46E-01 | 2,10E-02 | -4,37E-01 |
| 1,54E-02 | -4,60E-01 | 2,28E-02 | -4,57E-01 | 1,96E-02 | -4,62E-01 | 2,21E-02 | -4,44E-01 | 2,14E-02 | -4,35E-01 |
| 1,57E-02 | -4,58E-01 | 2,32E-02 | -4,55E-01 | 2,00E-02 | -4,60E-01 | 2,27E-02 | -4,42E-01 | 2,19E-02 | -4,33E-01 |
| 1,61E-02 | -4,56E-01 | 2,36E-02 | -4,53E-01 | 2,05E-02 | -4,58E-01 | 2,31E-02 | -4,40E-01 | 2,23E-02 | -4,31E-01 |
| 1,64E-02 | -4,54E-01 | 2,40E-02 | -4,51E-01 | 2,09E-02 | -4,56E-01 | 2,37E-02 | -4,38E-01 | 2,28E-02 | -4,29E-01 |
| 1,67E-02 | -4,52E-01 | 2,44E-02 | -4,49E-01 | 2,13E-02 | -4,54E-01 | 2,42E-02 | -4,36E-01 | 2,33E-02 | -4,27E-01 |
| 1,70E-02 | -4,50E-01 | 2,48E-02 | -4,47E-01 | 2,18E-02 | -4,52E-01 | 2,47E-02 | -4,34E-01 | 2,38E-02 | -4,25E-01 |
| 1,74E-02 | -4,48E-01 | 2,53E-02 | -4,45E-01 | 2,22E-02 | -4,50E-01 | 2,52E-02 | -4,32E-01 | 2,43E-02 | -4,23E-01 |
| 1,77E-02 | -4,46E-01 | 2,57E-02 | -4,43E-01 | 2,27E-02 | -4,48E-01 | 2,57E-02 | -4,30E-01 | 2,48E-02 | -4,21E-01 |
| 1,81E-02 | -4,44E-01 | 2,61E-02 | -4,41E-01 | 2,31E-02 | -4,46E-01 | 2,62E-02 | -4,28E-01 | 2,53E-02 | -4,19E-01 |
| 1,84E-02 | -4,42E-01 | 2,66E-02 | -4,39E-01 | 2,36E-02 | -4,44E-01 | 2,68E-02 | -4,26E-01 | 2,58E-02 | -4,17E-01 |
| 1,88E-02 | -4,40E-01 | 2,71E-02 | -4,37E-01 | 2,41E-02 | -4,42E-01 | 2,73E-02 | -4,24E-01 | 2,63E-02 | -4,15E-01 |
| 1,91E-02 | -4,38E-01 | 2,76E-02 | -4,35E-01 | 2,46E-02 | -4,40E-01 | 2,79E-02 | -4,22E-01 | 2,69E-02 | -4,13E-01 |

## PH 5

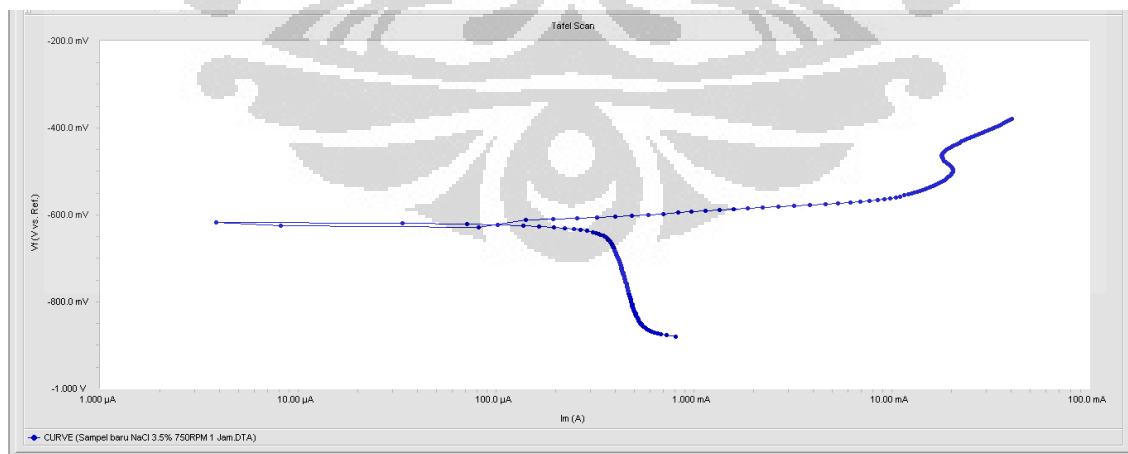
- Kurva Polarisasi ORPM



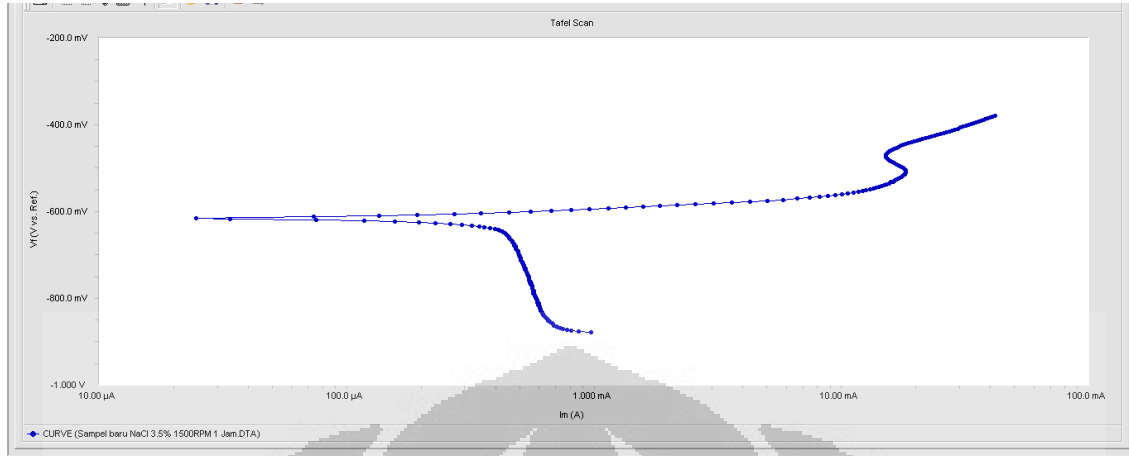
- Kurva Polarisasi 375 RPM



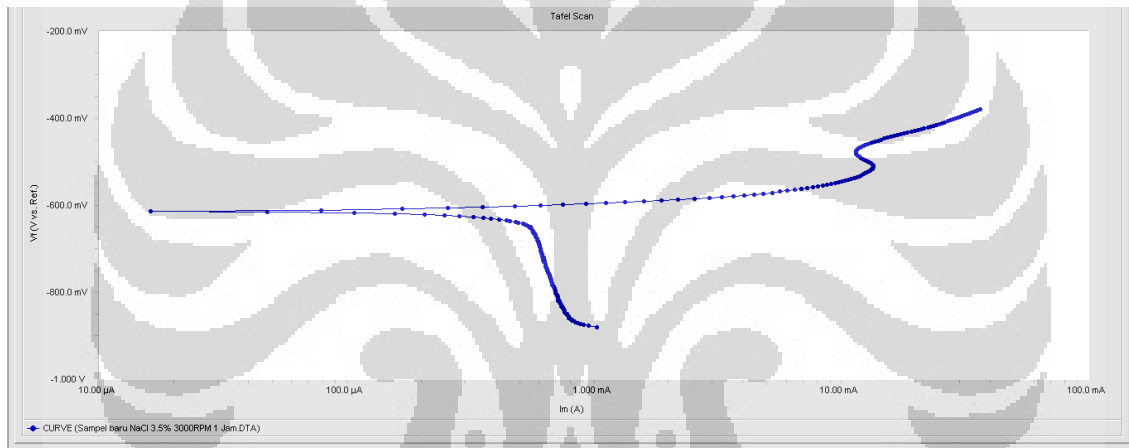
- Kurva Polarisasi 750RPM



- Kurva Polarisasi 1500RPM



• Kurva Polarisasi 3000RPM



• Plot titik berdasarkan Kurva Polarisasi (excel) 0, 375, 750, 1500, dan 3000RPM

| 0 RPM     | 375 RPM   | 750 RPM   | 1500 RPM  | 3000 RPM  |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 8,78E-04  | 8,70E-04  | 8,05E-04  | 9,70E-04  | 1,03E-03  |
| -9,10E-01 | -8,92E-01 | -8,80E-01 | -8,79E-01 | -8,80E-01 |
| 7,24E-04  | 7,69E-04  | 7,27E-04  | 8,65E-04  | 9,50E-04  |
| -9,06E-01 | -8,89E-01 | -8,77E-01 | -8,76E-01 | -8,76E-01 |
| 6,40E-04  | 7,02E-04  | 6,81E-04  | 8,12E-04  | 9,07E-04  |
| -9,04E-01 | -8,87E-01 | -8,75E-01 | -8,74E-01 | -8,74E-01 |
| 5,83E-04  | 6,59E-04  | 6,53E-04  | 7,77E-04  | 8,79E-04  |
| -9,02E-01 | -8,85E-01 | -8,73E-01 | -8,72E-01 | -8,72E-01 |
| 5,41E-04  | 6,23E-04  | 6,30E-04  | 7,49E-04  | 8,59E-04  |
| -9,00E-01 | -8,83E-01 | -8,71E-01 | -8,70E-01 | -8,70E-01 |
| 5,08E-04  | 5,96E-04  | 6,14E-04  | 7,32E-04  | 8,43E-04  |
| -8,98E-01 | -8,81E-01 | -8,69E-01 | -8,68E-01 | -8,68E-01 |
| 4,80E-04  | 5,75E-04  | 5,99E-04  | 7,17E-04  | 8,34E-04  |
| -8,96E-01 | -8,79E-01 | -8,67E-01 | -8,66E-01 | -8,66E-01 |
| 4,57E-04  | 5,55E-04  | 5,91E-04  | 7,04E-04  | 8,16E-04  |
| -8,94E-01 | -8,77E-01 | -8,65E-01 | -8,64E-01 | -8,64E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 4,37E-04 | -8,92E-01 | 5,40E-04 | -8,75E-01 | 5,80E-04 | -8,63E-01 | 6,91E-04 | -8,62E-01 | 8,15E-04 | -8,62E-01 |
| 4,19E-04 | -8,90E-01 | 5,27E-04 | -8,73E-01 | 5,71E-04 | -8,61E-01 | 6,81E-04 | -8,60E-01 | 8,04E-04 | -8,60E-01 |
| 4,03E-04 | -8,88E-01 | 5,12E-04 | -8,71E-01 | 5,64E-04 | -8,59E-01 | 6,77E-04 | -8,58E-01 | 7,92E-04 | -8,58E-01 |
| 3,89E-04 | -8,86E-01 | 5,01E-04 | -8,69E-01 | 5,58E-04 | -8,57E-01 | 6,69E-04 | -8,56E-01 | 7,92E-04 | -8,56E-01 |
| 3,76E-04 | -8,84E-01 | 4,91E-04 | -8,67E-01 | 5,52E-04 | -8,55E-01 | 6,63E-04 | -8,54E-01 | 7,84E-04 | -8,54E-01 |
| 3,65E-04 | -8,82E-01 | 4,82E-04 | -8,65E-01 | 5,46E-04 | -8,53E-01 | 6,54E-04 | -8,52E-01 | 7,80E-04 | -8,52E-01 |
| 3,53E-04 | -8,80E-01 | 4,76E-04 | -8,63E-01 | 5,43E-04 | -8,51E-01 | 6,50E-04 | -8,50E-01 | 7,77E-04 | -8,50E-01 |
| 3,43E-04 | -8,78E-01 | 4,70E-04 | -8,61E-01 | 5,37E-04 | -8,49E-01 | 6,47E-04 | -8,48E-01 | 7,68E-04 | -8,48E-01 |
| 3,34E-04 | -8,76E-01 | 4,64E-04 | -8,59E-01 | 5,32E-04 | -8,47E-01 | 6,41E-04 | -8,46E-01 | 7,63E-04 | -8,46E-01 |
| 3,25E-04 | -8,74E-01 | 4,60E-04 | -8,57E-01 | 5,31E-04 | -8,45E-01 | 6,36E-04 | -8,44E-01 | 7,62E-04 | -8,44E-01 |
| 3,17E-04 | -8,72E-01 | 4,54E-04 | -8,55E-01 | 5,26E-04 | -8,43E-01 | 6,31E-04 | -8,42E-01 | 7,60E-04 | -8,42E-01 |
| 3,10E-04 | -8,70E-01 | 4,50E-04 | -8,53E-01 | 5,23E-04 | -8,41E-01 | 6,27E-04 | -8,40E-01 | 7,54E-04 | -8,40E-01 |
| 3,03E-04 | -8,68E-01 | 4,42E-04 | -8,51E-01 | 5,21E-04 | -8,39E-01 | 6,22E-04 | -8,38E-01 | 7,55E-04 | -8,38E-01 |
| 2,96E-04 | -8,66E-01 | 4,38E-04 | -8,49E-01 | 5,17E-04 | -8,37E-01 | 6,25E-04 | -8,36E-01 | 7,47E-04 | -8,36E-01 |
| 2,90E-04 | -8,64E-01 | 4,36E-04 | -8,47E-01 | 5,14E-04 | -8,35E-01 | 6,18E-04 | -8,34E-01 | 7,47E-04 | -8,34E-01 |
| 2,84E-04 | -8,62E-01 | 4,33E-04 | -8,45E-01 | 5,12E-04 | -8,33E-01 | 6,16E-04 | -8,32E-01 | 7,38E-04 | -8,32E-01 |
| 2,78E-04 | -8,60E-01 | 4,30E-04 | -8,43E-01 | 5,09E-04 | -8,31E-01 | 6,13E-04 | -8,30E-01 | 7,40E-04 | -8,30E-01 |
| 2,73E-04 | -8,58E-01 | 4,29E-04 | -8,41E-01 | 5,06E-04 | -8,29E-01 | 6,10E-04 | -8,28E-01 | 7,40E-04 | -8,28E-01 |
| 2,69E-04 | -8,56E-01 | 4,23E-04 | -8,39E-01 | 5,08E-04 | -8,27E-01 | 6,06E-04 | -8,26E-01 | 7,33E-04 | -8,26E-01 |
| 2,64E-04 | -8,54E-01 | 4,22E-04 | -8,37E-01 | 5,04E-04 | -8,25E-01 | 6,06E-04 | -8,24E-01 | 7,31E-04 | -8,24E-01 |
| 2,60E-04 | -8,52E-01 | 4,22E-04 | -8,35E-01 | 5,02E-04 | -8,23E-01 | 6,03E-04 | -8,22E-01 | 7,26E-04 | -8,22E-01 |
| 2,57E-04 | -8,50E-01 | 4,20E-04 | -8,33E-01 | 4,98E-04 | -8,21E-01 | 6,06E-04 | -8,20E-01 | 7,25E-04 | -8,20E-01 |
| 2,53E-04 | -8,48E-01 | 4,19E-04 | -8,31E-01 | 4,97E-04 | -8,19E-01 | 6,01E-04 | -8,18E-01 | 7,18E-04 | -8,18E-01 |
| 2,50E-04 | -8,46E-01 | 4,13E-04 | -8,29E-01 | 4,96E-04 | -8,17E-01 | 5,96E-04 | -8,16E-01 | 7,19E-04 | -8,16E-01 |
| 2,46E-04 | -8,44E-01 | 4,14E-04 | -8,27E-01 | 4,94E-04 | -8,15E-01 | 5,97E-04 | -8,14E-01 | 7,15E-04 | -8,14E-01 |
| 2,43E-04 | -8,42E-01 | 4,12E-04 | -8,25E-01 | 4,91E-04 | -8,13E-01 | 5,97E-04 | -8,12E-01 | 7,14E-04 | -8,12E-01 |



|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2,40E-04 | -8,40E-01 | 4,10E-04 | -8,23E-01 | 4,90E-04 | -8,11E-01 | 5,90E-04 | -8,10E-01 | 7,13E-04 | -8,10E-01 |
| 2,37E-04 | -8,38E-01 | 4,08E-04 | -8,21E-01 | 4,88E-04 | -8,09E-01 | 5,92E-04 | -8,08E-01 | 7,11E-04 | -8,08E-01 |
| 2,35E-04 | -8,36E-01 | 4,06E-04 | -8,19E-01 | 4,86E-04 | -8,07E-01 | 5,88E-04 | -8,06E-01 | 7,10E-04 | -8,06E-01 |
| 2,32E-04 | -8,34E-01 | 4,09E-04 | -8,17E-01 | 4,88E-04 | -8,05E-01 | 5,89E-04 | -8,04E-01 | 7,04E-04 | -8,04E-01 |
| 2,30E-04 | -8,32E-01 | 4,05E-04 | -8,15E-01 | 4,86E-04 | -8,03E-01 | 5,85E-04 | -8,02E-01 | 6,99E-04 | -8,02E-01 |
| 2,28E-04 | -8,30E-01 | 4,06E-04 | -8,13E-01 | 4,83E-04 | -8,01E-01 | 5,84E-04 | -8,00E-01 | 7,01E-04 | -8,00E-01 |
| 2,26E-04 | -8,28E-01 | 4,00E-04 | -8,11E-01 | 4,82E-04 | -7,99E-01 | 5,82E-04 | -7,98E-01 | 6,98E-04 | -7,98E-01 |
| 2,24E-04 | -8,26E-01 | 4,00E-04 | -8,09E-01 | 4,81E-04 | -7,97E-01 | 5,79E-04 | -7,96E-01 | 6,97E-04 | -7,96E-01 |
| 2,22E-04 | -8,24E-01 | 4,00E-04 | -8,07E-01 | 4,81E-04 | -7,95E-01 | 5,77E-04 | -7,94E-01 | 6,96E-04 | -7,94E-01 |
| 2,20E-04 | -8,22E-01 | 3,98E-04 | -8,05E-01 | 4,77E-04 | -7,93E-01 | 5,76E-04 | -7,92E-01 | 6,94E-04 | -7,92E-01 |
| 2,19E-04 | -8,20E-01 | 3,98E-04 | -8,03E-01 | 4,75E-04 | -7,91E-01 | 5,72E-04 | -7,90E-01 | 6,91E-04 | -7,90E-01 |
| 2,17E-04 | -8,18E-01 | 3,95E-04 | -8,01E-01 | 4,75E-04 | -7,89E-01 | 5,70E-04 | -7,88E-01 | 6,90E-04 | -7,88E-01 |
| 2,16E-04 | -8,16E-01 | 3,97E-04 | -7,99E-01 | 4,72E-04 | -7,87E-01 | 5,73E-04 | -7,86E-01 | 6,86E-04 | -7,86E-01 |
| 2,14E-04 | -8,14E-01 | 3,92E-04 | -7,97E-01 | 4,70E-04 | -7,85E-01 | 5,68E-04 | -7,84E-01 | 6,84E-04 | -7,84E-01 |
| 2,13E-04 | -8,12E-01 | 3,94E-04 | -7,95E-01 | 4,71E-04 | -7,83E-01 | 5,71E-04 | -7,82E-01 | 6,80E-04 | -7,82E-01 |
| 2,11E-04 | -8,10E-01 | 3,94E-04 | -7,93E-01 | 4,68E-04 | -7,81E-01 | 5,66E-04 | -7,80E-01 | 6,78E-04 | -7,80E-01 |
| 2,10E-04 | -8,08E-01 | 3,91E-04 | -7,91E-01 | 4,67E-04 | -7,79E-01 | 5,64E-04 | -7,78E-01 | 6,78E-04 | -7,78E-01 |
| 2,08E-04 | -8,06E-01 | 3,91E-04 | -7,89E-01 | 4,67E-04 | -7,77E-01 | 5,62E-04 | -7,76E-01 | 6,73E-04 | -7,76E-01 |
| 2,07E-04 | -8,04E-01 | 3,90E-04 | -7,87E-01 | 4,66E-04 | -7,75E-01 | 5,62E-04 | -7,74E-01 | 6,71E-04 | -7,74E-01 |
| 2,06E-04 | -8,02E-01 | 3,89E-04 | -7,85E-01 | 4,64E-04 | -7,73E-01 | 5,61E-04 | -7,72E-01 | 6,72E-04 | -7,72E-01 |
| 2,05E-04 | -8,00E-01 | 3,86E-04 | -7,83E-01 | 4,64E-04 | -7,71E-01 | 5,59E-04 | -7,70E-01 | 6,67E-04 | -7,70E-01 |
| 2,04E-04 | -7,98E-01 | 3,83E-04 | -7,81E-01 | 4,63E-04 | -7,69E-01 | 5,56E-04 | -7,68E-01 | 6,70E-04 | -7,68E-01 |
| 2,02E-04 | -7,96E-01 | 3,86E-04 | -7,79E-01 | 4,63E-04 | -7,67E-01 | 5,57E-04 | -7,66E-01 | 6,68E-04 | -7,66E-01 |
| 2,01E-04 | -7,94E-01 | 3,82E-04 | -7,77E-01 | 4,56E-04 | -7,65E-01 | 5,52E-04 | -7,64E-01 | 6,64E-04 | -7,64E-01 |
| 2,00E-04 | -7,92E-01 | 3,86E-04 | -7,75E-01 | 4,56E-04 | -7,63E-01 | 5,55E-04 | -7,62E-01 | 6,60E-04 | -7,62E-01 |
| 1,99E-04 | -7,90E-01 | 3,83E-04 | -7,73E-01 | 4,58E-04 | -7,61E-01 | 5,50E-04 | -7,60E-01 | 6,60E-04 | -7,60E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1,98E-04 | -7,88E-01 | 3,82E-04 | -7,71E-01 | 4,57E-04 | -7,59E-01 | 5,48E-04 | -7,58E-01 | 6,58E-04 | -7,58E-01 |
| 1,96E-04 | -7,86E-01 | 3,82E-04 | -7,69E-01 | 4,54E-04 | -7,57E-01 | 5,47E-04 | -7,56E-01 | 6,55E-04 | -7,56E-01 |
| 1,95E-04 | -7,84E-01 | 3,81E-04 | -7,67E-01 | 4,51E-04 | -7,55E-01 | 5,47E-04 | -7,54E-01 | 6,51E-04 | -7,54E-01 |
| 1,94E-04 | -7,82E-01 | 3,83E-04 | -7,65E-01 | 4,51E-04 | -7,53E-01 | 5,47E-04 | -7,52E-01 | 6,52E-04 | -7,52E-01 |
| 1,93E-04 | -7,80E-01 | 3,79E-04 | -7,63E-01 | 4,50E-04 | -7,51E-01 | 5,45E-04 | -7,50E-01 | 6,45E-04 | -7,50E-01 |
| 1,92E-04 | -7,78E-01 | 3,78E-04 | -7,61E-01 | 4,49E-04 | -7,49E-01 | 5,42E-04 | -7,48E-01 | 6,48E-04 | -7,48E-01 |
| 1,91E-04 | -7,76E-01 | 3,77E-04 | -7,59E-01 | 4,47E-04 | -7,47E-01 | 5,40E-04 | -7,46E-01 | 6,45E-04 | -7,46E-01 |
| 1,90E-04 | -7,74E-01 | 3,71E-04 | -7,57E-01 | 4,47E-04 | -7,45E-01 | 5,37E-04 | -7,44E-01 | 6,40E-04 | -7,44E-01 |
| 1,89E-04 | -7,72E-01 | 3,75E-04 | -7,55E-01 | 4,45E-04 | -7,43E-01 | 5,38E-04 | -7,42E-01 | 6,44E-04 | -7,42E-01 |
| 1,88E-04 | -7,70E-01 | 3,74E-04 | -7,53E-01 | 4,44E-04 | -7,41E-01 | 5,34E-04 | -7,40E-01 | 6,35E-04 | -7,40E-01 |
| 1,87E-04 | -7,68E-01 | 3,68E-04 | -7,51E-01 | 4,42E-04 | -7,39E-01 | 5,32E-04 | -7,38E-01 | 6,38E-04 | -7,38E-01 |
| 1,86E-04 | -7,66E-01 | 3,72E-04 | -7,49E-01 | 4,41E-04 | -7,37E-01 | 5,31E-04 | -7,36E-01 | 6,35E-04 | -7,36E-01 |
| 1,85E-04 | -7,64E-01 | 3,66E-04 | -7,47E-01 | 4,38E-04 | -7,35E-01 | 5,27E-04 | -7,34E-01 | 6,38E-04 | -7,34E-01 |
| 1,84E-04 | -7,62E-01 | 3,68E-04 | -7,45E-01 | 4,39E-04 | -7,33E-01 | 5,30E-04 | -7,32E-01 | 6,33E-04 | -7,32E-01 |
| 1,83E-04 | -7,60E-01 | 3,66E-04 | -7,43E-01 | 4,38E-04 | -7,31E-01 | 5,25E-04 | -7,30E-01 | 6,28E-04 | -7,30E-01 |
| 1,81E-04 | -7,58E-01 | 3,68E-04 | -7,41E-01 | 4,34E-04 | -7,29E-01 | 5,23E-04 | -7,28E-01 | 6,31E-04 | -7,28E-01 |
| 1,80E-04 | -7,56E-01 | 3,65E-04 | -7,39E-01 | 4,34E-04 | -7,27E-01 | 5,22E-04 | -7,26E-01 | 6,24E-04 | -7,26E-01 |
| 1,79E-04 | -7,54E-01 | 3,65E-04 | -7,37E-01 | 4,33E-04 | -7,25E-01 | 5,20E-04 | -7,24E-01 | 6,27E-04 | -7,24E-01 |
| 1,78E-04 | -7,52E-01 | 3,62E-04 | -7,35E-01 | 4,30E-04 | -7,23E-01 | 5,17E-04 | -7,22E-01 | 6,26E-04 | -7,22E-01 |
| 1,77E-04 | -7,50E-01 | 3,61E-04 | -7,33E-01 | 4,31E-04 | -7,21E-01 | 5,19E-04 | -7,20E-01 | 6,25E-04 | -7,20E-01 |
| 1,75E-04 | -7,48E-01 | 3,60E-04 | -7,31E-01 | 4,28E-04 | -7,19E-01 | 5,14E-04 | -7,18E-01 | 6,18E-04 | -7,18E-01 |
| 1,74E-04 | -7,46E-01 | 3,60E-04 | -7,29E-01 | 4,26E-04 | -7,17E-01 | 5,13E-04 | -7,16E-01 | 6,19E-04 | -7,16E-01 |
| 1,72E-04 | -7,44E-01 | 3,58E-04 | -7,27E-01 | 4,25E-04 | -7,15E-01 | 5,11E-04 | -7,14E-01 | 6,19E-04 | -7,14E-01 |
| 1,71E-04 | -7,42E-01 | 3,57E-04 | -7,25E-01 | 4,25E-04 | -7,13E-01 | 5,06E-04 | -7,12E-01 | 6,17E-04 | -7,12E-01 |
| 1,69E-04 | -7,40E-01 | 3,53E-04 | -7,23E-01 | 4,23E-04 | -7,11E-01 | 5,07E-04 | -7,10E-01 | 6,15E-04 | -7,10E-01 |
| 1,68E-04 | -7,38E-01 | 3,51E-04 | -7,21E-01 | 4,20E-04 | -7,09E-01 | 5,04E-04 | -7,08E-01 | 6,15E-04 | -7,08E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1,67E-04 | -7,36E-01 | 3,50E-04 | -7,19E-01 | 4,19E-04 | -7,07E-01 | 5,04E-04 | -7,06E-01 | 6,12E-04 | -7,06E-01 |
| 1,65E-04 | -7,34E-01 | 3,51E-04 | -7,17E-01 | 4,19E-04 | -7,05E-01 | 5,01E-04 | -7,04E-01 | 6,11E-04 | -7,04E-01 |
| 1,64E-04 | -7,32E-01 | 3,47E-04 | -7,15E-01 | 4,16E-04 | -7,03E-01 | 5,02E-04 | -7,02E-01 | 6,07E-04 | -7,02E-01 |
| 1,62E-04 | -7,30E-01 | 3,47E-04 | -7,13E-01 | 4,14E-04 | -7,01E-01 | 4,97E-04 | -7,00E-01 | 6,08E-04 | -7,00E-01 |
| 1,60E-04 | -7,28E-01 | 3,46E-04 | -7,11E-01 | 4,11E-04 | -6,99E-01 | 4,98E-04 | -6,98E-01 | 6,10E-04 | -6,98E-01 |
| 1,58E-04 | -7,26E-01 | 3,46E-04 | -7,09E-01 | 4,10E-04 | -6,97E-01 | 4,95E-04 | -6,96E-01 | 6,05E-04 | -6,96E-01 |
| 1,57E-04 | -7,24E-01 | 3,45E-04 | -7,07E-01 | 4,09E-04 | -6,95E-01 | 4,94E-04 | -6,94E-01 | 6,05E-04 | -6,94E-01 |
| 1,55E-04 | -7,22E-01 | 3,42E-04 | -7,05E-01 | 4,07E-04 | -6,93E-01 | 4,92E-04 | -6,92E-01 | 6,04E-04 | -6,92E-01 |
| 1,53E-04 | -7,20E-01 | 3,41E-04 | -7,03E-01 | 4,06E-04 | -6,91E-01 | 4,89E-04 | -6,90E-01 | 5,99E-04 | -6,90E-01 |
| 1,51E-04 | -7,18E-01 | 3,37E-04 | -7,01E-01 | 4,05E-04 | -6,89E-01 | 4,87E-04 | -6,88E-01 | 5,99E-04 | -6,88E-01 |
| 1,49E-04 | -7,16E-01 | 3,35E-04 | -6,99E-01 | 4,05E-04 | -6,87E-01 | 4,84E-04 | -6,86E-01 | 6,01E-04 | -6,86E-01 |
| 1,47E-04 | -7,14E-01 | 3,39E-04 | -6,97E-01 | 4,01E-04 | -6,85E-01 | 4,83E-04 | -6,84E-01 | 5,95E-04 | -6,84E-01 |
| 1,45E-04 | -7,12E-01 | 3,33E-04 | -6,95E-01 | 4,00E-04 | -6,83E-01 | 4,83E-04 | -6,82E-01 | 5,97E-04 | -6,82E-01 |
| 1,42E-04 | -7,10E-01 | 3,30E-04 | -6,93E-01 | 3,97E-04 | -6,81E-01 | 4,82E-04 | -6,80E-01 | 5,92E-04 | -6,80E-01 |
| 1,40E-04 | -7,08E-01 | 3,29E-04 | -6,91E-01 | 3,97E-04 | -6,79E-01 | 4,75E-04 | -6,78E-01 | 5,92E-04 | -6,78E-01 |
| 1,38E-04 | -7,06E-01 | 3,31E-04 | -6,89E-01 | 3,94E-04 | -6,77E-01 | 4,75E-04 | -6,76E-01 | 5,88E-04 | -6,76E-01 |
| 1,35E-04 | -7,04E-01 | 3,27E-04 | -6,87E-01 | 3,93E-04 | -6,75E-01 | 4,74E-04 | -6,74E-01 | 5,87E-04 | -6,74E-01 |
| 1,33E-04 | -7,02E-01 | 3,25E-04 | -6,85E-01 | 3,89E-04 | -6,73E-01 | 4,71E-04 | -6,72E-01 | 5,82E-04 | -6,72E-01 |
| 1,30E-04 | -7,00E-01 | 3,22E-04 | -6,83E-01 | 3,89E-04 | -6,71E-01 | 4,69E-04 | -6,70E-01 | 5,83E-04 | -6,70E-01 |
| 1,27E-04 | -6,98E-01 | 3,22E-04 | -6,81E-01 | 3,86E-04 | -6,69E-01 | 4,67E-04 | -6,68E-01 | 5,81E-04 | -6,68E-01 |
| 1,24E-04 | -6,96E-01 | 3,20E-04 | -6,79E-01 | 3,84E-04 | -6,67E-01 | 4,63E-04 | -6,66E-01 | 5,78E-04 | -6,66E-01 |
| 1,21E-04 | -6,94E-01 | 3,17E-04 | -6,77E-01 | 3,82E-04 | -6,65E-01 | 4,61E-04 | -6,64E-01 | 5,77E-04 | -6,64E-01 |
| 1,18E-04 | -6,92E-01 | 3,16E-04 | -6,75E-01 | 3,80E-04 | -6,63E-01 | 4,57E-04 | -6,62E-01 | 5,69E-04 | -6,62E-01 |
| 1,15E-04 | -6,90E-01 | 3,14E-04 | -6,73E-01 | 3,78E-04 | -6,61E-01 | 4,55E-04 | -6,60E-01 | 5,70E-04 | -6,60E-01 |
| 1,12E-04 | -6,88E-01 | 3,13E-04 | -6,71E-01 | 3,73E-04 | -6,59E-01 | 4,53E-04 | -6,58E-01 | 5,67E-04 | -6,58E-01 |
| 1,09E-04 | -6,86E-01 | 3,07E-04 | -6,69E-01 | 3,68E-04 | -6,57E-01 | 4,49E-04 | -6,56E-01 | 5,63E-04 | -6,56E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1,05E-04 | -6,84E-01 | 3,05E-04 | -6,67E-01 | 3,67E-04 | -6,55E-01 | 4,44E-04 | -6,54E-01 | 5,60E-04 | -6,54E-01 |
| 1,01E-04 | -6,82E-01 | 3,05E-04 | -6,65E-01 | 3,64E-04 | -6,53E-01 | 4,39E-04 | -6,52E-01 | 5,49E-04 | -6,52E-01 |
| 9,74E-05 | -6,80E-01 | 3,00E-04 | -6,63E-01 | 3,59E-04 | -6,51E-01 | 4,37E-04 | -6,50E-01 | 5,53E-04 | -6,50E-01 |
| 9,31E-05 | -6,78E-01 | 2,98E-04 | -6,61E-01 | 3,54E-04 | -6,49E-01 | 4,29E-04 | -6,48E-01 | 5,40E-04 | -6,48E-01 |
| 8,85E-05 | -6,76E-01 | 2,94E-04 | -6,59E-01 | 3,49E-04 | -6,47E-01 | 4,26E-04 | -6,46E-01 | 5,34E-04 | -6,46E-01 |
| 8,37E-05 | -6,74E-01 | 2,92E-04 | -6,57E-01 | 3,38E-04 | -6,45E-01 | 4,18E-04 | -6,44E-01 | 5,25E-04 | -6,44E-01 |
| 7,87E-05 | -6,72E-01 | 2,88E-04 | -6,55E-01 | 3,31E-04 | -6,43E-01 | 4,11E-04 | -6,42E-01 | 5,16E-04 | -6,42E-01 |
| 7,33E-05 | -6,70E-01 | 2,84E-04 | -6,53E-01 | 3,22E-04 | -6,41E-01 | 3,98E-04 | -6,40E-01 | 4,93E-04 | -6,40E-01 |
| 6,75E-05 | -6,68E-01 | 2,83E-04 | -6,51E-01 | 3,08E-04 | -6,39E-01 | 3,79E-04 | -6,38E-01 | 4,84E-04 | -6,38E-01 |
| 6,14E-05 | -6,66E-01 | 2,76E-04 | -6,49E-01 | 2,88E-04 | -6,37E-01 | 3,61E-04 | -6,36E-01 | 4,59E-04 | -6,36E-01 |
| 5,49E-05 | -6,64E-01 | 2,73E-04 | -6,47E-01 | 2,68E-04 | -6,35E-01 | 3,43E-04 | -6,34E-01 | 4,42E-04 | -6,34E-01 |
| 4,71E-05 | -6,62E-01 | 2,66E-04 | -6,45E-01 | 2,46E-04 | -6,33E-01 | 3,22E-04 | -6,32E-01 | 4,13E-04 | -6,32E-01 |
| 3,90E-05 | -6,60E-01 | 2,58E-04 | -6,43E-01 | 2,23E-04 | -6,31E-01 | 2,93E-04 | -6,30E-01 | 3,84E-04 | -6,30E-01 |
| 2,97E-05 | -6,58E-01 | 2,50E-04 | -6,41E-01 | 1,96E-04 | -6,29E-01 | 2,62E-04 | -6,28E-01 | 3,57E-04 | -6,28E-01 |
| 1,88E-05 | -6,56E-01 | 2,40E-04 | -6,39E-01 | 1,66E-04 | -6,27E-01 | 2,29E-04 | -6,26E-01 | 3,25E-04 | -6,26E-01 |
| 5,90E-06 | -6,54E-01 | 2,25E-04 | -6,37E-01 | 1,38E-04 | -6,25E-01 | 1,95E-04 | -6,24E-01 | 2,85E-04 | -6,24E-01 |
| 5,83E-06 | -6,52E-01 | 2,14E-04 | -6,35E-01 | 1,02E-04 | -6,23E-01 | 1,56E-04 | -6,22E-01 | 2,49E-04 | -6,22E-01 |
| 2,78E-05 | -6,50E-01 | 1,94E-04 | -6,33E-01 | 7,12E-05 | -6,21E-01 | 1,18E-04 | -6,20E-01 | 2,06E-04 | -6,20E-01 |
| 5,00E-05 | -6,48E-01 | 1,77E-04 | -6,31E-01 | 3,35E-05 | -6,19E-01 | 7,55E-05 | -6,18E-01 | 1,57E-04 | -6,18E-01 |
| 7,65E-05 | -6,46E-01 | 1,46E-04 | -6,29E-01 | 3,87E-06 | -6,17E-01 | 3,39E-05 | -6,16E-01 | 1,08E-04 | -6,16E-01 |
| 1,10E-04 | -6,44E-01 | 1,16E-04 | -6,27E-01 | 8,19E-06 | -6,25E-01 | 2,47E-05 | -6,14E-01 | 4,78E-05 | -6,14E-01 |
| 1,49E-04 | -6,42E-01 | 8,17E-05 | -6,25E-01 | 8,19E-05 | -6,29E-01 | 7,36E-05 | -6,12E-01 | 1,62E-05 | -6,12E-01 |
| 1,94E-04 | -6,40E-01 | 4,15E-05 | -6,23E-01 | 1,41E-04 | -6,11E-01 | 1,35E-04 | -6,10E-01 | 7,87E-05 | -6,11E-01 |
| 2,47E-04 | -6,38E-01 | 5,23E-06 | -6,21E-01 | 1,95E-04 | -6,09E-01 | 1,93E-04 | -6,08E-01 | 1,67E-04 | -6,08E-01 |
| 3,08E-04 | -6,36E-01 | 8,19E-06 | -6,28E-01 | 2,56E-04 | -6,07E-01 | 2,73E-04 | -6,06E-01 | 2,57E-04 | -6,06E-01 |
| 3,77E-04 | -6,34E-01 | 8,19E-05 | -6,26E-01 | 3,25E-04 | -6,05E-01 | 3,50E-04 | -6,04E-01 | 3,56E-04 | -6,05E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 4,56E-04 | -6,32E-01 | 1,92E-04 | -6,15E-01 | 4,00E-04 | -6,03E-01 | 4,53E-04 | -6,02E-01 | 4,79E-04 | -6,02E-01 |
| 5,45E-04 | -6,30E-01 | 2,73E-04 | -6,13E-01 | 4,87E-04 | -6,01E-01 | 5,53E-04 | -6,00E-01 | 6,07E-04 | -6,01E-01 |
| 6,46E-04 | -6,28E-01 | 3,59E-04 | -6,11E-01 | 5,88E-04 | -5,99E-01 | 6,71E-04 | -5,98E-01 | 7,51E-04 | -5,99E-01 |
| 7,59E-04 | -6,26E-01 | 4,67E-04 | -6,09E-01 | 6,98E-04 | -5,97E-01 | 8,12E-04 | -5,96E-01 | 9,28E-04 | -5,96E-01 |
| 8,88E-04 | -6,24E-01 | 5,85E-04 | -6,07E-01 | 8,31E-04 | -5,95E-01 | 9,59E-04 | -5,94E-01 | 1,12E-03 | -5,94E-01 |
| 1,03E-03 | -6,22E-01 | 7,28E-04 | -6,05E-01 | 9,75E-04 | -5,93E-01 | 1,14E-03 | -5,92E-01 | 1,34E-03 | -5,92E-01 |
| 1,19E-03 | -6,20E-01 | 8,99E-04 | -6,03E-01 | 1,15E-03 | -5,91E-01 | 1,34E-03 | -5,90E-01 | 1,60E-03 | -5,90E-01 |
| 1,36E-03 | -6,18E-01 | 1,09E-03 | -6,01E-01 | 1,35E-03 | -5,89E-01 | 1,58E-03 | -5,88E-01 | 1,88E-03 | -5,88E-01 |
| 1,54E-03 | -6,16E-01 | 1,32E-03 | -5,99E-01 | 1,59E-03 | -5,87E-01 | 1,85E-03 | -5,86E-01 | 2,19E-03 | -5,86E-01 |
| 1,75E-03 | -6,14E-01 | 1,60E-03 | -5,97E-01 | 1,87E-03 | -5,85E-01 | 2,17E-03 | -5,84E-01 | 2,55E-03 | -5,84E-01 |
| 1,96E-03 | -6,12E-01 | 1,95E-03 | -5,95E-01 | 2,22E-03 | -5,83E-01 | 2,57E-03 | -5,82E-01 | 2,92E-03 | -5,83E-01 |
| 2,19E-03 | -6,10E-01 | 2,38E-03 | -5,93E-01 | 2,67E-03 | -5,81E-01 | 3,04E-03 | -5,80E-01 | 3,30E-03 | -5,80E-01 |
| 2,43E-03 | -6,08E-01 | 2,92E-03 | -5,91E-01 | 3,20E-03 | -5,79E-01 | 3,60E-03 | -5,78E-01 | 3,68E-03 | -5,79E-01 |
| 2,68E-03 | -6,06E-01 | 3,52E-03 | -5,89E-01 | 3,85E-03 | -5,77E-01 | 4,29E-03 | -5,76E-01 | 4,06E-03 | -5,76E-01 |
| 2,94E-03 | -6,04E-01 | 4,17E-03 | -5,87E-01 | 4,61E-03 | -5,75E-01 | 5,03E-03 | -5,74E-01 | 4,46E-03 | -5,75E-01 |
| 3,21E-03 | -6,02E-01 | 4,81E-03 | -5,85E-01 | 5,37E-03 | -5,73E-01 | 5,84E-03 | -5,72E-01 | 4,85E-03 | -5,73E-01 |
| 3,49E-03 | -6,00E-01 | 5,44E-03 | -5,83E-01 | 6,16E-03 | -5,71E-01 | 6,65E-03 | -5,70E-01 | 5,25E-03 | -5,71E-01 |
| 3,78E-03 | -5,98E-01 | 6,01E-03 | -5,81E-01 | 6,93E-03 | -5,69E-01 | 7,42E-03 | -5,68E-01 | 5,66E-03 | -5,69E-01 |
| 4,07E-03 | -5,96E-01 | 6,56E-03 | -5,79E-01 | 7,71E-03 | -5,67E-01 | 8,15E-03 | -5,66E-01 | 6,06E-03 | -5,67E-01 |
| 4,36E-03 | -5,94E-01 | 7,04E-03 | -5,77E-01 | 8,45E-03 | -5,65E-01 | 8,83E-03 | -5,64E-01 | 6,47E-03 | -5,65E-01 |
| 4,66E-03 | -5,92E-01 | 7,56E-03 | -5,75E-01 | 9,17E-03 | -5,63E-01 | 9,47E-03 | -5,62E-01 | 6,87E-03 | -5,63E-01 |
| 4,96E-03 | -5,90E-01 | 8,02E-03 | -5,73E-01 | 9,85E-03 | -5,61E-01 | 1,01E-02 | -5,60E-01 | 7,27E-03 | -5,61E-01 |
| 5,26E-03 | -5,88E-01 | 8,51E-03 | -5,71E-01 | 1,05E-02 | -5,59E-01 | 1,07E-02 | -5,58E-01 | 7,66E-03 | -5,58E-01 |
| 5,57E-03 | -5,86E-01 | 8,94E-03 | -5,69E-01 | 1,11E-02 | -5,57E-01 | 1,12E-02 | -5,56E-01 | 8,03E-03 | -5,56E-01 |
| 5,89E-03 | -5,84E-01 | 9,41E-03 | -5,67E-01 | 1,16E-02 | -5,55E-01 | 1,17E-02 | -5,54E-01 | 8,40E-03 | -5,54E-01 |
| 6,20E-03 | -5,82E-01 | 9,85E-03 | -5,65E-01 | 1,21E-02 | -5,53E-01 | 1,22E-02 | -5,52E-01 | 8,75E-03 | -5,52E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 6,52E-03 | -5,80E-01 | 1,03E-02 | -5,63E-01 | 1,26E-02 | -5,51E-01 | 1,26E-02 | -5,50E-01 | 9,10E-03 | -5,50E-01 |
| 6,84E-03 | -5,78E-01 | 1,08E-02 | -5,61E-01 | 1,30E-02 | -5,49E-01 | 1,30E-02 | -5,48E-01 | 9,43E-03 | -5,48E-01 |
| 7,16E-03 | -5,76E-01 | 1,12E-02 | -5,59E-01 | 1,35E-02 | -5,47E-01 | 1,34E-02 | -5,46E-01 | 9,77E-03 | -5,46E-01 |
| 7,48E-03 | -5,74E-01 | 1,17E-02 | -5,57E-01 | 1,39E-02 | -5,45E-01 | 1,38E-02 | -5,44E-01 | 1,01E-02 | -5,44E-01 |
| 7,81E-03 | -5,72E-01 | 1,21E-02 | -5,55E-01 | 1,43E-02 | -5,43E-01 | 1,42E-02 | -5,42E-01 | 1,04E-02 | -5,42E-01 |
| 8,13E-03 | -5,70E-01 | 1,26E-02 | -5,53E-01 | 1,47E-02 | -5,41E-01 | 1,45E-02 | -5,40E-01 | 1,07E-02 | -5,41E-01 |
| 8,46E-03 | -5,68E-01 | 1,30E-02 | -5,51E-01 | 1,51E-02 | -5,39E-01 | 1,49E-02 | -5,38E-01 | 1,10E-02 | -5,38E-01 |
| 8,79E-03 | -5,66E-01 | 1,35E-02 | -5,49E-01 | 1,54E-02 | -5,37E-01 | 1,52E-02 | -5,36E-01 | 1,13E-02 | -5,37E-01 |
| 9,11E-03 | -5,64E-01 | 1,39E-02 | -5,47E-01 | 1,58E-02 | -5,35E-01 | 1,56E-02 | -5,34E-01 | 1,15E-02 | -5,35E-01 |
| 9,43E-03 | -5,62E-01 | 1,44E-02 | -5,45E-01 | 1,62E-02 | -5,33E-01 | 1,59E-02 | -5,32E-01 | 1,18E-02 | -5,33E-01 |
| 9,75E-03 | -5,60E-01 | 1,48E-02 | -5,43E-01 | 1,65E-02 | -5,31E-01 | 1,62E-02 | -5,31E-01 | 1,21E-02 | -5,31E-01 |
| 1,01E-02 | -5,58E-01 | 1,52E-02 | -5,41E-01 | 1,69E-02 | -5,29E-01 | 1,65E-02 | -5,28E-01 | 1,23E-02 | -5,28E-01 |
| 1,04E-02 | -5,56E-01 | 1,56E-02 | -5,39E-01 | 1,72E-02 | -5,27E-01 | 1,67E-02 | -5,26E-01 | 1,25E-02 | -5,27E-01 |
| 1,07E-02 | -5,54E-01 | 1,60E-02 | -5,37E-01 | 1,75E-02 | -5,25E-01 | 1,70E-02 | -5,24E-01 | 1,27E-02 | -5,25E-01 |
| 1,10E-02 | -5,52E-01 | 1,64E-02 | -5,35E-01 | 1,79E-02 | -5,23E-01 | 1,73E-02 | -5,22E-01 | 1,29E-02 | -5,22E-01 |
| 1,13E-02 | -5,50E-01 | 1,68E-02 | -5,33E-01 | 1,82E-02 | -5,21E-01 | 1,75E-02 | -5,21E-01 | 1,31E-02 | -5,20E-01 |
| 1,16E-02 | -5,48E-01 | 1,71E-02 | -5,31E-01 | 1,85E-02 | -5,19E-01 | 1,77E-02 | -5,18E-01 | 1,32E-02 | -5,19E-01 |
| 1,19E-02 | -5,46E-01 | 1,75E-02 | -5,29E-01 | 1,88E-02 | -5,17E-01 | 1,79E-02 | -5,16E-01 | 1,33E-02 | -5,17E-01 |
| 1,22E-02 | -5,44E-01 | 1,79E-02 | -5,27E-01 | 1,90E-02 | -5,15E-01 | 1,80E-02 | -5,14E-01 | 1,34E-02 | -5,15E-01 |
| 1,25E-02 | -5,42E-01 | 1,82E-02 | -5,25E-01 | 1,93E-02 | -5,13E-01 | 1,81E-02 | -5,12E-01 | 1,35E-02 | -5,13E-01 |
| 1,28E-02 | -5,40E-01 | 1,86E-02 | -5,23E-01 | 1,95E-02 | -5,11E-01 | 1,82E-02 | -5,10E-01 | 1,35E-02 | -5,11E-01 |
| 1,31E-02 | -5,38E-01 | 1,88E-02 | -5,21E-01 | 1,97E-02 | -5,09E-01 | 1,83E-02 | -5,08E-01 | 1,35E-02 | -5,09E-01 |
| 1,33E-02 | -5,36E-01 | 1,92E-02 | -5,19E-01 | 2,00E-02 | -5,07E-01 | 1,83E-02 | -5,06E-01 | 1,34E-02 | -5,07E-01 |
| 1,36E-02 | -5,34E-01 | 1,95E-02 | -5,17E-01 | 2,01E-02 | -5,05E-01 | 1,82E-02 | -5,04E-01 | 1,33E-02 | -5,05E-01 |
| 1,38E-02 | -5,32E-01 | 1,99E-02 | -5,15E-01 | 2,02E-02 | -5,03E-01 | 1,81E-02 | -5,02E-01 | 1,32E-02 | -5,03E-01 |
| 1,41E-02 | -5,30E-01 | 2,00E-02 | -5,13E-01 | 2,03E-02 | -5,01E-01 | 1,80E-02 | -5,00E-01 | 1,30E-02 | -5,01E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1,43E-02 | -5,28E-01 | 2,04E-02 | -5,11E-01 | 2,04E-02 | -4,99E-01 | 1,78E-02 | -4,98E-01 | 1,28E-02 | -4,99E-01 |
| 1,45E-02 | -5,26E-01 | 2,06E-02 | -5,09E-01 | 2,04E-02 | -4,97E-01 | 1,75E-02 | -4,96E-01 | 1,26E-02 | -4,97E-01 |
| 1,47E-02 | -5,24E-01 | 2,09E-02 | -5,07E-01 | 2,04E-02 | -4,95E-01 | 1,72E-02 | -4,94E-01 | 1,24E-02 | -4,95E-01 |
| 1,49E-02 | -5,22E-01 | 2,10E-02 | -5,05E-01 | 2,03E-02 | -4,93E-01 | 1,70E-02 | -4,92E-01 | 1,22E-02 | -4,93E-01 |
| 1,51E-02 | -5,20E-01 | 2,13E-02 | -5,03E-01 | 2,02E-02 | -4,91E-01 | 1,67E-02 | -4,91E-01 | 1,20E-02 | -4,91E-01 |
| 1,52E-02 | -5,18E-01 | 2,14E-02 | -5,01E-01 | 2,00E-02 | -4,89E-01 | 1,64E-02 | -4,89E-01 | 1,18E-02 | -4,89E-01 |
| 1,54E-02 | -5,16E-01 | 2,15E-02 | -4,99E-01 | 1,98E-02 | -4,87E-01 | 1,61E-02 | -4,87E-01 | 1,17E-02 | -4,87E-01 |
| 1,55E-02 | -5,14E-01 | 2,16E-02 | -4,97E-01 | 1,96E-02 | -4,85E-01 | 1,59E-02 | -4,84E-01 | 1,16E-02 | -4,85E-01 |
| 1,56E-02 | -5,12E-01 | 2,16E-02 | -4,95E-01 | 1,94E-02 | -4,83E-01 | 1,57E-02 | -4,83E-01 | 1,15E-02 | -4,83E-01 |
| 1,56E-02 | -5,10E-01 | 2,17E-02 | -4,93E-01 | 1,91E-02 | -4,81E-01 | 1,55E-02 | -4,80E-01 | 1,14E-02 | -4,81E-01 |
| 1,57E-02 | -5,09E-01 | 2,16E-02 | -4,91E-01 | 1,89E-02 | -4,79E-01 | 1,53E-02 | -4,78E-01 | 1,14E-02 | -4,79E-01 |
| 1,57E-02 | -5,06E-01 | 2,16E-02 | -4,89E-01 | 1,86E-02 | -4,77E-01 | 1,52E-02 | -4,77E-01 | 1,14E-02 | -4,77E-01 |
| 1,58E-02 | -5,04E-01 | 2,13E-02 | -4,87E-01 | 1,84E-02 | -4,75E-01 | 1,51E-02 | -4,75E-01 | 1,15E-02 | -4,75E-01 |
| 1,58E-02 | -5,02E-01 | 2,12E-02 | -4,85E-01 | 1,83E-02 | -4,73E-01 | 1,51E-02 | -4,72E-01 | 1,15E-02 | -4,73E-01 |
| 1,58E-02 | -5,00E-01 | 2,08E-02 | -4,83E-01 | 1,81E-02 | -4,71E-01 | 1,51E-02 | -4,71E-01 | 1,16E-02 | -4,71E-01 |
| 1,57E-02 | -4,98E-01 | 2,08E-02 | -4,81E-01 | 1,80E-02 | -4,69E-01 | 1,52E-02 | -4,68E-01 | 1,17E-02 | -4,69E-01 |
| 1,57E-02 | -4,96E-01 | 2,02E-02 | -4,79E-01 | 1,79E-02 | -4,67E-01 | 1,52E-02 | -4,67E-01 | 1,19E-02 | -4,67E-01 |
| 1,57E-02 | -4,94E-01 | 2,02E-02 | -4,77E-01 | 1,79E-02 | -4,65E-01 | 1,53E-02 | -4,65E-01 | 1,21E-02 | -4,65E-01 |
| 1,56E-02 | -4,92E-01 | 1,97E-02 | -4,75E-01 | 1,79E-02 | -4,63E-01 | 1,55E-02 | -4,63E-01 | 1,23E-02 | -4,63E-01 |
| 1,56E-02 | -4,90E-01 | 1,96E-02 | -4,73E-01 | 1,80E-02 | -4,61E-01 | 1,57E-02 | -4,61E-01 | 1,25E-02 | -4,61E-01 |
| 1,55E-02 | -4,88E-01 | 1,93E-02 | -4,71E-01 | 1,80E-02 | -4,59E-01 | 1,59E-02 | -4,59E-01 | 1,28E-02 | -4,59E-01 |
| 1,55E-02 | -4,86E-01 | 1,92E-02 | -4,69E-01 | 1,82E-02 | -4,57E-01 | 1,61E-02 | -4,57E-01 | 1,31E-02 | -4,57E-01 |
| 1,55E-02 | -4,84E-01 | 1,91E-02 | -4,67E-01 | 1,83E-02 | -4,55E-01 | 1,64E-02 | -4,55E-01 | 1,34E-02 | -4,55E-01 |
| 1,55E-02 | -4,82E-01 | 1,90E-02 | -4,65E-01 | 1,85E-02 | -4,53E-01 | 1,67E-02 | -4,53E-01 | 1,37E-02 | -4,53E-01 |
| 1,55E-02 | -4,80E-01 | 1,91E-02 | -4,63E-01 | 1,87E-02 | -4,51E-01 | 1,70E-02 | -4,51E-01 | 1,41E-02 | -4,51E-01 |
| 1,55E-02 | -4,78E-01 | 1,90E-02 | -4,61E-01 | 1,90E-02 | -4,49E-01 | 1,74E-02 | -4,49E-01 | 1,45E-02 | -4,49E-01 |

|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1,56E-02 | -4,77E-01 | 1,92E-02 | -4,59E-01 | 1,93E-02 | -4,47E-01 | 1,78E-02 | -4,47E-01 | 1,49E-02 | -4,47E-01 |
| 1,57E-02 | -4,74E-01 | 1,92E-02 | -4,57E-01 | 1,96E-02 | -4,45E-01 | 1,82E-02 | -4,45E-01 | 1,54E-02 | -4,45E-01 |
| 1,58E-02 | -4,72E-01 | 1,94E-02 | -4,55E-01 | 1,99E-02 | -4,43E-01 | 1,87E-02 | -4,43E-01 | 1,58E-02 | -4,43E-01 |
| 1,60E-02 | -4,71E-01 | 1,95E-02 | -4,53E-01 | 2,03E-02 | -4,41E-01 | 1,92E-02 | -4,41E-01 | 1,64E-02 | -4,41E-01 |
| 1,62E-02 | -4,69E-01 | 1,97E-02 | -4,51E-01 | 2,07E-02 | -4,39E-01 | 1,97E-02 | -4,39E-01 | 1,69E-02 | -4,39E-01 |
| 1,64E-02 | -4,66E-01 | 1,99E-02 | -4,49E-01 | 2,11E-02 | -4,37E-01 | 2,02E-02 | -4,37E-01 | 1,74E-02 | -4,37E-01 |
| 1,66E-02 | -4,65E-01 | 2,02E-02 | -4,47E-01 | 2,16E-02 | -4,35E-01 | 2,08E-02 | -4,35E-01 | 1,80E-02 | -4,35E-01 |
| 1,68E-02 | -4,63E-01 | 2,05E-02 | -4,45E-01 | 2,20E-02 | -4,33E-01 | 2,13E-02 | -4,33E-01 | 1,85E-02 | -4,33E-01 |
| 1,71E-02 | -4,61E-01 | 2,07E-02 | -4,43E-01 | 2,25E-02 | -4,31E-01 | 2,19E-02 | -4,31E-01 | 1,92E-02 | -4,31E-01 |
| 1,74E-02 | -4,58E-01 | 2,11E-02 | -4,41E-01 | 2,30E-02 | -4,29E-01 | 2,25E-02 | -4,29E-01 | 1,98E-02 | -4,29E-01 |
| 1,77E-02 | -4,56E-01 | 2,14E-02 | -4,39E-01 | 2,36E-02 | -4,27E-01 | 2,32E-02 | -4,27E-01 | 2,04E-02 | -4,27E-01 |
| 1,80E-02 | -4,55E-01 | 2,19E-02 | -4,37E-01 | 2,41E-02 | -4,25E-01 | 2,38E-02 | -4,25E-01 | 2,10E-02 | -4,25E-01 |
| 1,83E-02 | -4,53E-01 | 2,21E-02 | -4,35E-01 | 2,47E-02 | -4,23E-01 | 2,45E-02 | -4,23E-01 | 2,16E-02 | -4,23E-01 |
| 1,87E-02 | -4,50E-01 | 2,27E-02 | -4,33E-01 | 2,53E-02 | -4,21E-01 | 2,52E-02 | -4,21E-01 | 2,23E-02 | -4,21E-01 |
| 1,91E-02 | -4,48E-01 | 2,30E-02 | -4,31E-01 | 2,59E-02 | -4,19E-01 | 2,59E-02 | -4,19E-01 | 2,29E-02 | -4,19E-01 |
| 1,95E-02 | -4,47E-01 | 2,35E-02 | -4,29E-01 | 2,65E-02 | -4,17E-01 | 2,66E-02 | -4,17E-01 | 2,36E-02 | -4,17E-01 |
| 1,99E-02 | -4,45E-01 | 2,39E-02 | -4,27E-01 | 2,72E-02 | -4,15E-01 | 2,73E-02 | -4,15E-01 | 2,43E-02 | -4,15E-01 |
| 2,03E-02 | -4,43E-01 | 2,44E-02 | -4,25E-01 | 2,78E-02 | -4,13E-01 | 2,80E-02 | -4,13E-01 | 2,49E-02 | -4,13E-01 |
| 2,08E-02 | -4,41E-01 | 2,49E-02 | -4,23E-01 | 2,85E-02 | -4,11E-01 | 2,88E-02 | -4,11E-01 | 2,56E-02 | -4,11E-01 |
| 2,12E-02 | -4,39E-01 | 2,53E-02 | -4,21E-01 | 2,92E-02 | -4,09E-01 | 2,95E-02 | -4,09E-01 | 2,62E-02 | -4,09E-01 |
| 2,17E-02 | -4,37E-01 | 2,60E-02 | -4,19E-01 | 2,98E-02 | -4,08E-01 | 3,03E-02 | -4,07E-01 | 2,69E-02 | -4,07E-01 |
| 2,22E-02 | -4,35E-01 | 2,63E-02 | -4,17E-01 | 3,05E-02 | -4,05E-01 | 3,11E-02 | -4,05E-01 | 2,75E-02 | -4,05E-01 |
| 2,27E-02 | -4,33E-01 | 2,71E-02 | -4,15E-01 | 3,12E-02 | -4,04E-01 | 3,19E-02 | -4,03E-01 | 2,82E-02 | -4,03E-01 |
| 2,32E-02 | -4,31E-01 | 2,74E-02 | -4,13E-01 | 3,20E-02 | -4,02E-01 | 3,26E-02 | -4,01E-01 | 2,89E-02 | -4,01E-01 |
| 2,37E-02 | -4,29E-01 | 2,83E-02 | -4,11E-01 | 3,27E-02 | -3,99E-01 | 3,35E-02 | -3,99E-01 | 2,95E-02 | -3,99E-01 |
| 2,42E-02 | -4,27E-01 | 2,86E-02 | -4,09E-01 | 3,34E-02 | -3,97E-01 | 3,42E-02 | -3,97E-01 | 3,02E-02 | -3,97E-01 |



|          |           |          |           |          |           |          |           |          |           |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2,48E-02 | -4,25E-01 | 2,94E-02 | -4,07E-01 | 3,42E-02 | -3,95E-01 | 3,51E-02 | -3,95E-01 | 3,09E-02 | -3,95E-01 |
| 2,53E-02 | -4,23E-01 | 2,98E-02 | -4,05E-01 | 3,50E-02 | -3,94E-01 | 3,58E-02 | -3,93E-01 | 3,15E-02 | -3,93E-01 |
| 2,59E-02 | -4,21E-01 | 3,06E-02 | -4,03E-01 | 3,58E-02 | -3,91E-01 | 3,67E-02 | -3,91E-01 | 3,22E-02 | -3,91E-01 |
| 2,65E-02 | -4,19E-01 | 3,11E-02 | -4,01E-01 | 3,65E-02 | -3,89E-01 | 3,75E-02 | -3,89E-01 | 3,29E-02 | -3,89E-01 |
| 2,71E-02 | -4,17E-01 | 3,17E-02 | -3,99E-01 | 3,73E-02 | -3,87E-01 | 3,83E-02 | -3,87E-01 | 3,35E-02 | -3,87E-01 |
| 2,77E-02 | -4,15E-01 | 3,24E-02 | -3,97E-01 | 3,82E-02 | -3,86E-01 | 3,91E-02 | -3,85E-01 | 3,42E-02 | -3,85E-01 |
| 2,83E-02 | -4,13E-01 | 3,29E-02 | -3,95E-01 | 3,90E-02 | -3,83E-01 | 4,00E-02 | -3,83E-01 | 3,49E-02 | -3,83E-01 |
| 2,89E-02 | -4,11E-01 | 3,38E-02 | -3,93E-01 | 3,98E-02 | -3,81E-01 | 4,08E-02 | -3,81E-01 | 3,56E-02 | -3,81E-01 |
| 2,95E-02 | -4,09E-01 | 3,42E-02 | -3,91E-01 | 4,05E-02 | -3,79E-01 | 4,17E-02 | -3,79E-01 | 3,63E-02 | -3,79E-01 |

