

**LAJU KOROSI PIPA BAJA KARBON A106 SEBAGAI FUNGSI
TEMPERATUR DAN KONSENTRASI NaCl PADA FLUIDA
YANG TERSATURASI GAS CO₂**

TESIS MAGISTER ILMU MATERIAL

**Tesis Ini Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Magister
Dalam Bidang Ilmu Material**

Disusun Oleh :

Nama : Sofyan yusuf

NPM : 630500019X



**PROGRAM PASCASARJANA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
UNIVERSITAS INDONESIA
2008**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis dengan judul:

LAJU KOROSI PIPA BAJA KARBON A106 SEBAGAI FUNGSI TEMPERATUR DAN KONSENTRASI NaCl PADA FLUIDA YANG TERSATURASI GAS CO₂

Yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister sains pada Program Studi Ilmu Material, Program Pascasarjana – Fakultas Matematika dan Ilmu Penegetahuan Alam – Universitas Indonesia, bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari karya ilmiah yang sudah dipublikasikan dan atau pernah digunakan untuk mendapatkan gelar akademik di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Jakarta Juli 2008

Sofyan Yusuf

NPM. 630500019X

LEMBAR PERSETUJUAN

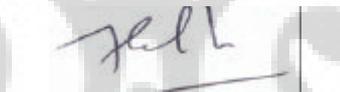
TESIS INI TELAH DIPERIKSA DAN DISETUJUI OLEH:



Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi S.,DEA
PEMBIMBING



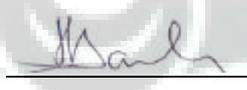
DR. Azwar Manaf
PENGUJI I



DR. Muhammad Hikam
PENGUJI II



DR. Suhardjo Poertadji
PENGUJI III



Dr. Bambang Soegijono
KETUA PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
PROGRAM PASCASARJANA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA
20 JULI 2008

Demi Tuhan, Bangsa dan Almamater...



ABSTRAK

Peralatan dan pipa pada instalasi pengolahan minyak dan gas bumi banyak berhubungan (contact) dengan gas CO₂ dan H₂S serta fluida-fluida kimia lainnya yang sangat korosif. Data-data hasil pengukuran seperti suhu, tekanan operasi, pH, kecepatan aliran fluida, komposisi dan jenis fluida serta data-data proses lainnya merupakan dasar dari penilaian korosi dan pemilihan jenis material yang tepat.

Penelitian ini bertujuan untuk meneliti pengaruh kandungan klorida terhadap kenaikan laju korosi pada baja karbon A106 dalam fluida yang tersaturasi gas CO₂.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah standard ASTM G 31-72 dan NACE Standard RP 0775-99 dimana pengujian ini didasarkan pada pengujian kehilangan berat (weight loss test). Material sampel yang digunakan adalah baja karbon A106. Larutan uji yang digunakan adalah larutan NaCl dengan konsentrasi 0,1%, 1% dan 3,5% kemudian dilakukan saturasi oleh gas CO₂.

Laju korosi meningkat secara tajam pada rentang konsentrasi NaCl diatas 1%. Peningkatan suhu larutan bersifat linier pada konsentrasi NaCl 0,1%, 1% dan 3,5%.

Secara umum model yang dihasilkan pada penelitian ini cukup valid digunakan pada rentang konsentrasi NaCl 1% hingga 3,5% pada rentang suhu 30°C sampai dengan 90°C.

ABSTRACT

Both pipes and equipments in oil and gas refineries directly contact with acid gas such as CO_2 and H_2S and other corrosive components. Measured data of pH, temperature, operating pressure, fluid velocity and type or fluids composition is basic data for corrosion assesment and selection materials.

The goal of this research is investigate the effect of chloride content in fluids toward corrosion rate on carbon steel in sytem with CO_2 saturated.

This research using ASTM G31-72 and NACE Standard RP 0775-99 where the test of specimen based on weight loss test. Type of material sample are carbon steel A106. The Solution is NaCl solution with concentration about 0,1%, 1% and 3,5%. Afterwards the solution is saturated with CO_2 .

Corrosion rate increase rapidly in the range of NaCl concentration above 1%. Increasing temperature of solution is linear function in the range of NaCl concentration between 0,1% to 3,5%.

Generally, the model in this research is valid in the range of NaCl concentration between 1% to 3,5% and temperature between 30°C to 90°C .

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penelitian tesis ini dapat diselesaikan dengan sebaik-baiknya.

Doa yang tulus penulis panjatkan untuk kedua orang tua dan saudara sekandung yang telah banyak memberikan bimbingan moril kepada penulis, semoga mereka selalu diberikan hidayah dan perlindungan-Nya.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis haturkan kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu didalam penyelesaian tesis ini, khususnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi S., selaku pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan, saran, dan pengetahuan kepada penulis.
2. Bapak Dr. Bambang Soegiyono selaku ketua Program Pasca Sarjana FMIPA program studi Ilmu Material, Universitas Indonesia.
3. Bapak Ary Sandjaja, Msc selaku kepala tim material di Inti Karya Persada Teknik (IKPT) yang telah banyak memberikan literatur kepada penulis.
4. Bapak Ir. M. Firwan A, Msc. Yang telah banyak memberikan pengarahan kepada penulis.
5. Bapak Erwin yang telah memberikan sampel material kepada penulis
6. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis yang tidak mungkin disebutkan namanya satu persatu, penulis mengucapkan terima kasih.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan adanya masukan berupa saran dan kritik yang dapat meningkatkan kualitas dari tesis ini. Semoga tesis ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan khususnya dibidang ilmu material di masa yang akan datang.

Jakarta, Juli 2008

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metode Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II LANDASAN TEORI	
2.1 Bentuk-Bentuk Korosi	6
2.2 Mekanisme Korosi	8
2.3 Laju Korosi	8
2.4 Persamaan De ward-Milliams	11
2.5 Modifikasi Persamaan Deward-Milliams	12

2.6	<i>Pitting Index</i> (Fpren) dan <i>carbon Equivalent</i> (CE)	14
2.7	Tinjauan Literatur/Pustaka	15
2.8	Paduan Logam	16
2.9	Diagram E/pH	17
2.10	Material Sampel	18
2.11	Karakterisasi Sampel	18
2.11.1	Fluoresensi Sinar-X	18
2.11.2	Pengamatan Visual	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Diagram Alir Penelitian	20
3.2	Preparasi Sampel	21
3.3	Pengujian Laboratorium	22
3.4	Pembentukan Model	23
3.5	Karakterisasi Sampel	24
3.5.1	XRF	24
3.5.2	Karakterisasi Sampel dengan Pengamatan Visual	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Uji Laboratorium	25
4.1.1	Pengujian Laju Korosi	25
4.1.2	Penghitungan Laju Korosi	26
4.2	Pengaruh Berbagai Parameter Kondisi Operasi	28
4.2.1	Pengaruh Temperatur terhadap Laju Korosi Sampel Pada Larutan NaCl Tanpa Penjenuhan gas CO ₂	28

4.2.2	Pengaruh Konsentrasi NaCl terhadap Laju Korosi Sampel Pada Larutan NaCl Tanpa Penjenuhan gas CO ₂	30
4.2.3	Pengaruh Konsentrasi NaCl terhadap Laju Korosi Sampel Pada Larutan NaCl Dengan Penjenuhan gas CO ₂	31
4.3	Faktor Koreksi	38
4.4	Pemodelan Laju Korosi Baja Karbon A106 Pada Larutan NaCl	41
4.5	Validasi Model Terhadap Hasil Laboratorium	45
4.5.1	Validasi Model untuk Baja Karbon A106 Dengan Parameter Konsentrasi NaCl	45
4.5.2	Validasi Model untuk Baja Karbon A106 Dengan Parameter Suhu	47
4.6	Batasan Parameter Operasi Pada Model penelitian	49
4.7	Karakterisasi Sampel	58
4.7.1	XRF	50
4.7.2	<i>Digital Imaging Photograph</i>	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran	52
DAFTAR ACUAN		

- LAMPIRAN A HASIL PENGUKURAN pH, TDS DAN POTENSIAL
KOROSI**
- LAMPIRAN B TABEL HARGA F_{PREN} DAN KARBON EKIVALEN**
- LAMPIRAN C PERHITUNGAN LAJU KOROSI UNTUK MODEL
KOREKSI NaCl**
- LAMPIRAN D KARAKTERISASI XRF**



DAFTAR GAMBAR

	Halaman	
Gambar 2.1	Skema klasifikasi dari paduan logam	17
Gambar 2.2	Diagram Pourbaix untuk baja	17
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	20
Gambar 3.2	Diagram alir penelitian laboratorium	21
Gambar 4.1	Skema peralatan uji korosi	25
Gambar 4.2	Laju korosi A106 pada larutan NaCl 0,1%	28
Gambar 4.3	Laju korosi A106 pada larutan NaCl 1%	28
Gambar 4.4	Laju korosi A106 pada larutan NaCl 3,5%	28
Gambar 4.5	Perbandingan laju korosi A106 pada larutan NaCl 3,5% dengan model Chiyoda	29
Gambar 4.6	Laju korosi A106 pada larutan NaCl 0,1%, 1% dan 3,5% tanpa penjenuhan gas CO ₂ pada suhu 30°C	30
Gambar 4.7	Laju korosi A106 pada larutan NaCl 0,1%, 1% dan 3,5% tanpa penjenuhan gas CO ₂ pada suhu 50°C	30
Gambar 4.8	Laju korosi A106 pada larutan NaCl 0,1%, 1% dan 3,5% dengan penjenuhan gas CO ₂ pada suhu 30°C	31
Gambar 4.9	Laju korosi A106 pada larutan NaCl 0,1%, 1% dan 3,5% dengan penjenuhan gas CO ₂ pada suhu 50°C	32
Gambar 4.10	Perbandingan laju korosi baja karbon A106 pada larutan NaCl tanpa penjenuhan gas CO ₂ dengan larutan yang	

	dijenuhkan gas CO ₂ pada suhu 30°C	32
Gambar 4.11	Perbandingan laju korosi baja karbon A106 pada larutan NaCl tanpa penjenuhan gas CO ₂ dengan larutan yang dijenuhkan gas CO ₂ pada suhu 50°C	33
Gambar 4.12	Produk korosi pada baja karbon	36
Gambar 4.13	Warna larutan sebelum proses perendaman pada baja karbon Dan setelah proses perendaman	36
Gambar 4.14	Pitting pada baja karbon A106	37
Gambar 4.15	Perbandingan laju korosi untuk baja karbon A106 pada larutan NaCl tanpa penjenuhan gas CO ₂ dengan model Chiyoda	38
Gambar 4.16	Perbandingan laju korosi untuk baja karbon A106 pada larutan NaCl dengan penjenuhan gas CO ₂ dengan model Chiyoda	39
Gambar 4.17	Model hubungan antara laju korosi dengan konsentrasi NaCl pada baja karbon A106	41
Gambar 4.18	Model hubungan antara laju korosi dengan suhu pada baja karbon A106	42
Gambar 4.19	Model laju korosi NaCl untuk baja karbon A106	44
Gambar 4.20	Validasi model baja karbon A106 terhadap hasil percobaan dengan parameter konsentrasi NaCl pada suhu 30°C dan 50°C	45
Gambar 4.21	Validasi model baja karbon A106 terhadap hasil percobaan dengan parameter konsentrasi NaCl pada suhu 70°C dan 90°C	45
Gambar 4.22	Validasi model baja karbon A106 terhadap hasil percobaan dengan parameter suhu	47

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 3.1	Penomoran sampel pada larutan NaCl tanpa penjenuhan CO ₂	22
Tabel 3.2	Penomoran sampel pada larutan NaCl yang dijenuhkan CO ₂	23
Tabel 4.1	Laju korosi sampel pada larutan NaCl tanpa penjenuhan CO ₂	26
Tabel 4.2	Laju korosi sampel pada larutan NaCl dengan penjenuhan CO ₂	27
Tabel 4.3	Perbedaan laju korosi model Chiyoda dengan laju korosi pada baja karbon A106 tanpa penjenuhan CO ₂ dan dengan penjenuhan CO ₂	39

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses seleksi material pada instalasi pengolahan *sour gas* membutuhkan suatu analisa data *process flow diagram*, *material heat and balances*, dan *utility flow diagram* serta penghitungan laju korosi pada tiap peralatan dan pipa pada unit-unit proses tersebut. Pemilihan jenis material yang tepat sangat diperlukan agar pabrik dapat beroperasi dalam jangka waktu yang diharapkan. Mengingat akan kondisi proses yang mengandung bahan-bahan kimia beracun dan berbahaya maka jenis-jenis materialnya pun harus sesuai dengan kondisi proses tersebut dan dapat memenuhi target umur pakai peralatan dan pipa.

Peralatan dan pipa pada instalasi pengolahan minyak dan gas bumi banyak berhubungan (*contact*) dengan gas CO₂ dan ion klorida serta fluida-fluida kimia lainnya yang sangat korosif. Data-data hasil pengukuran seperti suhu, tekanan operasi, pH, kecepatan aliran fluida, komposisi dan jenis fluida serta data-data proses lainnya merupakan dasar dari penilaian korosi dan pemilihan jenis material yang tepat. Efek dari kehadiran ion klorida pada fluida yang mengandung CO₂ terlarut perlu diperhitungkan. Karena pada kondisi aktual kehadiran ion klorida tidak dapat dihindari.

1.2 Perumusan Masalah

Instalasi (pabrik) pengolahan minyak dan gas bumi perlu dirancang sebaik mungkin dengan mempertimbangkan aspek keamanan dan umur pakai dari instalasi (pabrik) tersebut. Pemilihan material yang tepat merupakan faktor utama tercapainya target umur pakai dan aspek keamanan dari proses pengolahan tersebut.

Sistem peralatan dan perpipaan perlu menggunakan material yang sesuai dengan kondisi fluida didalamnya. Sebagian besar dari fluida tersebut mengandung gas CO₂, H₂S dan ion klorida yang sangat korosif.

Terdapat berbagai macam pemodelan korosi CO₂ yang dikembangkan oleh berbagai perusahaan yang bergerak dibidang minyak dan gas bumi seperti Chiyoda serta oleh berbagai lembaga penelitian. Tetapi model tersebut tidak memperhitungkan pengaruh ion klorida terhadap laju korosi baja. Efek dari kehadiran ion klorida pada fluida yang mengandung CO₂ terlarut perlu diperhitungkan. Karena pada kondisi aktual kehadiran ion klorida tidak dapat dihindari.

Dalam penelitian ini akan diteliti pengaruh dari kandungan klorida pada larutan yang dijenuhi CO₂ serta larutan yang tidak dijenuhi CO₂ terhadap laju korosi pada karbon sehingga akan didapat suatu faktor koreksi dari pemodelan laju korosi CO₂ yang sudah ada yang akan meningkatkan akurasi dari seleksi material yang dilakukan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meneliti pengaruh kandungan klorida dalam larutan terhadap laju korosi yang terjadi pada material baja karbon A106
2. Membuat suatu model laju korosi NaCl

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada seleksi material untuk peralatan dan pipa pada proses pengolahan gas di lingkungan *onshore* dengan asumsi dan batasan masalah sebagai berikut

1. Penelitian diarahkan pada pemodelan laju korosi NaCl pada pipa dan peralatan industri hulu minyak dan gas bumi secara empiris.
2. Parameter yang diteliti dibatasi pada kondisi operasi yang umum pada sistem perpipaan minyak dan gas bumi, yaitu: temperatur dan konsentrasi ion klorida.
3. Pengujian dilakukan pada material yang umum dipakai pada sistem perpipaan, yaitu A106 Grade B.
4. Tidak dilakukan pembahasan secara detail mengenai pembentukan lapisan tipis pelindung dan produk korosi yang terbentuk.
5. Tidak dilakukan pembahasan detail mengenai pengaruh gas oksigen yang terlarut terhadap laju korosi

1.5 Metode Penelitian

1. Melakukan studi literatur mengenai karakteristik pipa baja karbon A106

2. Melakukan studi literatur mengenai mekanisme korosi CO₂ dan NaCl
3. Pengambilan data dari hasil pengujian laboratorium meliputi data hasil uji pada fluida yang terlarut garam NaCl dan tersaturasi gas CO₂ dan fluida yang tidak tersaturasi gas CO₂.
4. Membandingkan hasil uji laboratorium dengan model laju korosi CO₂ dari De Waard Milliam.
5. Membuat pemodelan laju korosi NaCl
6. Validasi model laju korosi NaCl dengan hasil uji laboratorium.

1.6 Sistematika Penulisan

Tesis ini terdiri dari beberapa pokok bahasan yang berisi tentang uraian materi yang terkait dalam tesis ini. Adapun sistematika penulisan yang digunakan dalam tesis ini adalah:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian singkat mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan dari penelitian, batasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan yang digunakan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi uraian singkat mengenai mekanisme korosi, jenis-jenis korosi, persamaan De waard-Milliams, pengaruh gas CO₂ dalam larutan serta faktor-faktor yang mempengaruhi korosifitas pada baja.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi uraian mengenai standar prosedur pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi analisa dan pembahasan berdasarkan dari hasil penelitian yang dilakukan. Pembahasan difokuskan pada hasil pengujian dengan parameter temperatur dan konsentrasi NaCl.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian.

LAMPIRAN A HASIL PENGUKURAN pH, TDS DAN POTENSIAL KOROSI

LAMPIRAN B TABEL HARGA F_{PREN} DAN KARBON EKIVALEN

LAMPIRAN C PERHITUNGAN LAJU KOROSI UNTUK MODEL KOREKSI NaCl

LAMPIRAN D KARAKTERISASI XRF

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bentuk-Bentuk Korosi

Korosi adalah kerusakan pada material yang disebabkan oleh reaksi kimia atau elektro kimia dengan lingkungannya. Kerusakan material karena sebab fisik tidak disebut sebagai korosi, tetapi disebut sebagai erosi atau aus^[1].

Beberapa bentuk korosi yang ada dapat dikelompokkan berdasarkan mekanismenya sebagai berikut :

1. Korosi merata (*general corrosion*)

Korosi merata adalah korosi yang menyerang seluruh permukaan logam. Tipe korosi ini mudah dikenali karena seluruh permukaan logam terlihat rusak secara merata^[2].

2. korosi sumuran (*pitting corrosion*)

Korosi sumuran adalah korosi lokal yang secara selektif menyerang bagian permukaan logam

3. Korosi celah (*crevice corrosion*)

Korosi celah adalah serangan yang terjadi karena sebagian permukaan logam terhalang atau terasing dari lingkungan dibanding bagian lain logam yang menghadapi elektrolit dalam volume besar

4. korosi batas butir (*intergranular corrosion*)

Korosi batas butir terjadi bila daerah batas butir terserang akibat adanya endapan didalamnya. Batas butir menjadi tempat yang lebih disukai untuk proses pengendapan (*precipitation*) dan pemisahan (*segregation*)^[2].

5. Korosi retak tegang (*stress corrosion cracking*)

Korosi retak tegang terjadi karena adanya kombinasi tegangan tarik (*tensile stress*) yang diterima dan lingkungan yang korosif. Beberapa material yang tahan terhadap lingkungan korosif tertentu bisa terserang bentuk korosi ini ketika material tersebut mendapat tegangan (*stress*). Retakan kecil akan terjadi dan berkembang ke arah tegak lurus dari tegangan yang diterima.

6. Korosi dua logam (*galvanic corrosion*)

Korosi dua logam (*galvanic corrosion*) akan terjadi apabila dua logam atau paduan yang memiliki komposisi berbeda disambungkan dan berada di larutan elektrolit.

7. Korosi Selektif

Pada suatu paduan logam, unsur paduan yang bersifat lebih aktif dibandingkan dengan unsur paduannya cenderung terkorosi melalui mekanisme hilangnya unsur aktif tersebut dari paduannya (*dealloying*). Contohnya adalah pada kuningan yang terbentuk dari tembaga dan seng, unsur seng yang lebih aktif dari tembaga akan keluar dari paduan kuningan sehingga paduan memiliki pori-pori dan kekuatannya menurun. Proses tersebut terkenal dengan nama *dezincification*^[2].

8. Korosi Erosi

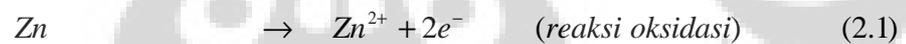
Perpaduan antara fluida korosif dan aliran fluida dengan kecepatan tinggi akan menghasilkan korosi erosi. Aliran yang cepat dari fluida korosif akan menghilangkan atau mengerosi lapisan produk korosi yang terbentuk yang sebenarnya merupakan penghambat terjadinya korosi lebih lanjut sehingga erosi ini akan mempercepat proses yang terjadi. Endapan pasir atau lumpur yang terbawa juga akan meningkatkan erosi dan pada akhirnya mempercepat korosi erosi yang terjadi.

Kavitasi juga merupakan salah satu bentuk dari korosi erosi^[2]. Kavitasi terjadi bila pada aliran bekecepatan tinggi terjadi pengurangan tekanan yang menghasilkan gelembung uap air yang kemudian menabrak permukaan material. Tabrakan dengan tekanan sangat tinggi tersebut dapat menghasilkan lubang-lubang yang dalam pada permukaan. Kavitasi sering dijumpai pada sudu-sudu turbin, baling-baling kapal dan pipa dimana perubahan tekanan yang tiba-tiba terjadi.

2.2 Mekanisme Korosi

Pada umumnya proses korosi pada logam merupakan reaksi elektrokimia^[2]. Reaksi elektrokimia adalah suatu reaksi yang melibatkan perpindahan. Reaksi ini meliputi reaksi oksidasi dan reaksi reduksi.

Contoh reaksi oksidasi dan reaksi reduksi adalah sebagai berikut :



Korosi yang terjadi pada suatu reaksi oksidasi disebut reaksi anodik (terjadi penambahan muatan positif), sedangkan pada korosi yang terjadi pada reaksi reduksi disebut reaksi katodik (terjadi pengurangan muatan positif). Jadi proses korosi memerlukan sepasang reaksi elektrokimia anodik-katodik.

2.3 Laju Korosi

Pengukuran laju korosi (*corrosion rate*) secara eksperimen dapat dilakukan dengan beberapa metode yaitu :

1. Metode pengukuran kehilangan berat
2. Metode elektrokimia (metode tafel dan polarisasi)
3. Metode perubahan tahanan listrik

Pada metode pengukuran kehilangan berat, besarnya korosi dinyatakan sebagai besarnya kehilangan berat kupon logam yang diuji persatuan luas permukaan persatuan waktu. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut :

$$CR = \frac{87,6 W}{D A T} \quad (2.3)$$

Dimana :

CR = Laju korosi (mm/year)

D = Densitas (gram/cm³)

A = Luas permukaan (cm²)

T = Waktu (jam)

Banyak cara yang telah dilakukan untuk menjelaskan satuan laju korosi yang terjadi pada suatu material contohnya gram per inchi kuadrat per jam, persen pengurangan berat dan yang paling banyak dipergunakan adalah *mills per year* (mpy).

Metode lain yang dapat dipergunakan untuk menentukan laju korosi logam adalah metode elektrokimia yang pada prinsipnya dengan cara menentukan besarnya arus korosi yang mengalir (i_{kor}) dari sistem elektroda tersebut.

Laju korosi dapat dihitung melalui arus korosi dengan menggunakan Hukum Faraday^[4] dengan ketentuan sebagai berikut :

1. Banyaknya produk suatu reaksi dapat ditentukan oleh banyaknya muatan yang dipindahkan.
2. Berat produk reaksi berbanding lurus dengan arus listrik yang mengalir per satuan waktu yang dirumuskan sebagai berikut :

$$W = \frac{BA \times i \times t}{n \times F} \quad (2.4)$$

Dimana :

W = Produk reaksi (gram)

i = Besar arus yang mengalir (coloumb / detik)

t = Lama reaksi (detik)

n = Banyaknya elektron yang menyertai reaksi

F = Bilangan Faraday (96500 coloumb / detik)

BA = Berat atom

Jika BA/n menyatakan berat ekuivalen (BE) dan W/t menyatakan laju reaksi (gram/detik) maka persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{W}{t} = \frac{BE \times i}{96500} \quad (gram / detik) \quad (2.5)$$

Laju korosi yang dinyatakan dalam gram/detik tidak dapat menunjukkan tingkat penetrasi dari serangan korosi. Jika kedalam persamaan diatas dimasukkan faktor luas area A (cm²) dan berat jenis logam (gram/cm³) maka didapat persamaan laju korosi yang dapat menyatakan daya penetrasi yaitu :

$$\frac{W}{t} = \frac{BE \times i}{r \times 96500 \times A} \quad (2.6)$$

Jika kita mengkonversikan beberapa satuan yang digunakan sebagai berikut :

- t dalam satuan detik diubah ke dalam tahun
- Centimeter diubah kedalam mili inchi
- μ/A diubah kedalam coloumb/detik
- i/A menyatakan rapat arus atau i_{kor}

maka persamaan laju korosi dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$CR (mpy) = \frac{0,13 \times i_{kor} \times BE}{r} \quad (2.7)$$

2.4 Persamaan Deward-Milliams

Deward-Milliams menjelaskan kehilangan berat akibat korosi oleh kehadiran gas CO_2 yang merupakan fungsi dari tekanan parsial CO_2 dan temperature. Berikut adalah persamaan yang dikembangkan untuk meramalkan laju korosi pada permukaan material^[3].

$$\text{Log } r = 8.78 - \frac{2320}{(T + 273.15)} - 5.55 \times 10^{-3} T + 0.67 \log P_{CO_2} \quad (2.8)$$

Dengan :

r = Laju korosi (mpy)

T = Temperature ($^{\circ}C$)

P_{CO_2} = Tekanan parsial CO_2 (psia)

Pada tahun 1993, berdasarkan data dari Dugstad et al, persamaan (2.8) direvisi menjadi^[3] :

$$\text{Log } r = 5.88 - \frac{1710}{(T + 273.15)} + 0,67 \log P_{CO_2} \quad (2.9)$$

Dengan :

r = Laju korosi (mpy)

T = Temperature ($^{\circ}C$)

P_{CO_2} = Tekanan parsial CO_2 (bar)

2.5 Modifikasi Persamaan Deward-Milliams

Deward-Lotz pada tahun 1993 mengajukan modifikasi terhadap persamaan Deward-Milliams dengan menambahkan faktor koreksi untuk scaling. Persamaan modifikasi ini valid untuk kondisi operasi pada temperature diatas $60^{\circ}C$. Persamaan tersebut dapat dituliskan menjadi^[3]:

Dimana :

$$r = F(S) \log \left[5.8 - \frac{1710}{(T + 273.15)} + 0.67 \log(fCO_2) \right] \quad (2.10)$$

r = Laju korosi (mpy)

$F(S)$ = Faktor *scaling*

fCO_2 = Fugasitas CO_2 .

T = Temperature ($^{\circ}C$)

Faktor *scaling* dapat dihitung dengan persamaan :

$$\text{Log } F(S) = \frac{2500}{(T + 273.15)} - 7.5 \quad (2.11)$$

Dimana :

T = Temperature (°C)

Untuk temperature > 60°C, F(S) = 1

Besarnya fugasitas CO₂ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$f_{CO_2} = a \times P_{CO_2} \quad (2.12)$$

Dimana :

a = Koefisien fugasitas

P_{CO₂} = Tekanan parsial CO₂ (bar)

Untuk menghitung besarnya koefisien fugasitas CO₂, digunakan persamaan^[4] :

$$\text{Log } (a) = \left(\frac{P}{14.22} \right) \left[0.0031 - \frac{1.4}{(T + 273.15)} \right] \quad (2.13)$$

P = Tekanan total (psi)

T = Temperature (°C)

Persamaan koreksi ini diajukan berdasarkan kondisi empiris dimana penelitian Cornelis Deward-Milliams dilakukan pada kondisi tekanan parsial CO₂ relatif rendah (< 1 bar) dan pada kondisi mendekati gas ideal.

Chiyoda mengembang suatu modifikasi dari persamaan De Waard-Milliams dengan merubah konstanta pada suku-suku persamaan. Persamaan tersebut dapat dituliskan menjadi^[5]:

$$\text{Log } r = 7.96 - \frac{2320}{(T + 273.15)} - 5.55 \times 10^{-3T} + 0.67 \log P_{CO_2} \quad (2.14)$$

Dimana :

- r = Laju korosi (mpy)
 T = Temperature (°C)
 P_{CO₂} = Tekanan parsial CO₂ (psi)

2.6 Pitting Index (F_{pren}) dan carbon Equivalent (CE)

Pitting index (F_{pren}) merupakan besaran yang menyatakan harga ketahanan suatu paduan terhadap korosi sumur (*pitting corrosion*)^[7]. Besarnya harga F_{pren} menurut standar NACE MR0175 adalah:

$$F_{PREN} = w\% Cr + 3,3(w\% Mo + 0,5w\% W) + 16w\% N \quad (2.15)$$

Dimana

- w% Cr : Persen berat dari unsur krom
 w% Mo : Persen berat dari unsur molibden
 w% W : Persen berat dari unsur tungsten
 w% N : Persen berat dari unsur nitrogen.

Karbon ekuivalen merupakan besaran yang menyatakan sifat mampu las dari paduan^[8].

Untuk C > 0.18 w%:

$$CE(w\%) = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (2.16)$$

Untuk C < 0.18 w%:

$$CE(w\%) = C + \frac{Si}{30} + \frac{(Mn + Cu + Cr)}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + 5B \quad (2.17)$$

Dimana Mn, Si, Cr, Mo, V, Ni, Cu, B masing masing menyatakan persen berat dari Mangan, Silikon, Krom, Molibden, Vanadium, Nikel, Tembaga dan Boron.

2.7 Tinjauan Literatur/Pustaka

Ladwein T.L., dkk.^[9], mengamati cracking yang diakibatkan oleh stress dalam lingkungan klorida dan sulfida pada material superaustenitik UNS S34565 pada lingkungan laut di North Sea didapat bahwa ada pengaruh kuat dari konsentrasi ion klorida terhadap terjadinya sulfide stress cracking yaitu pada kandungan ion klorida 25%. Pengujian tersebut adalah untuk sistem perpipaan tekanan tinggi dan untuk lingkungan bertemperatur rendah dan tekanan moderat.

M. Ueda^[10] dalam Jurnal Corrosion, 2006, melakukan pengamatan masalah material CRA yang digunakan pada industri minyak dan gas bumi pada lingkungan yang mengandung CO₂ dan H₂S. Penambahan Cr akan meningkatkan ketahanan terhadap serangan korosi oleh CO₂. Sedangkan penambahan Mo dan Ni akan menyebabkan terbentuknya lapisan Mo dan Ni sulfida pada lapisan luar dan lapisan Cr oksida pada bagian dalam yang berfungsi sebagai lapisan pasif pada lingkungan H₂S. Dapat dilihat bahwa Mo akan efektif berfungsi sebagai pengganti lapisan pasif yang terkorosi, karena pada pH rendah dan temperatur tinggi kelarutan Mo oksida dan sulfida sangat rendah.

Rhodes P.R., dkk.^[11] dalam Jurnal Corrosion, 2007, melakukan evaluasi kekuatan dan ketahanan korosi terhadap material *low alloy steel* dan CRA yang digunakan pada industri minyak dan gas pada lingkungan mengandung H₂S yang membantu terjadinya cracking.

Klower J., dkk^[12] dalam Paper Corrosion 2001, melakukan uji laboratorium dan uji lapangan dalam lingkungan laut dalam dengan dan tanpa penambahan CO₂ dan/atau H₂S pada material CRA untuk pemilihan material casing, wireline, downhole tubing dan fasilitas topside. Material yang dipilih yaitu UNS N08031 dan telah diuji kondisi cold-worked (HRC35). Hasil uji menunjukkan bahwa material tersebut memiliki ketahanan tinggi *terhadap chloride stress corrosion cracking*.

McCoy S.A., dkk^[13], melakukan prosedur pemilihan material untuk sumur eksplorasi minyak dan gas bumi dengan kategori sumur dalam khususnya untuk laut dalam dan sour well yang mengandung H₂S, CO₂ dan ion klorida dan sulfur bebas dengan temperatur mencapai 500°F dan tekanan sebesar 25.000 psia.

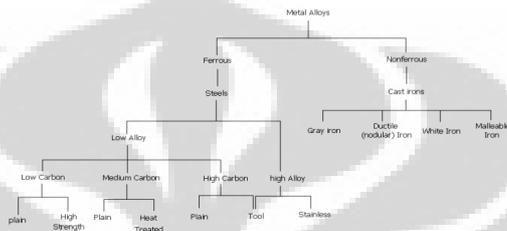
2.8 Paduan Logam

Ditinjau dari komposisinya, baja paduan dikelompokkan menjadi dua yaitu *ferrous* dan *nonferrous*. Paduan ferrous adalah paduan yang menggunakan besi sebagai unsur utama, termasuk didalamnya baja (*steel*), besi tuang (*cast iron*), stainless steel, dan duplex. Sedangkan paduan nonferrous yaitu paduan yang tidak menggunakan besi sebagai bahan dasarnya^[14]. Paduan logam yang mengandung unsur krom > 10,5% berat disebut juga sebagai *stainless steel*. *Stainless Steel* sendiri dikelompokkan menjadi enam tipe yaitu^[14]:

- Austenitik
- Feritik
- Martensitik

- Pengerasan Presipitasi (*Precipitation hardened stainless steel*)
- Austenitik Paduan Tinggi (*Highly-alloyed austenitic stainless steel*)
- Duplex (*Ferritic-Austenitic Alloy*)

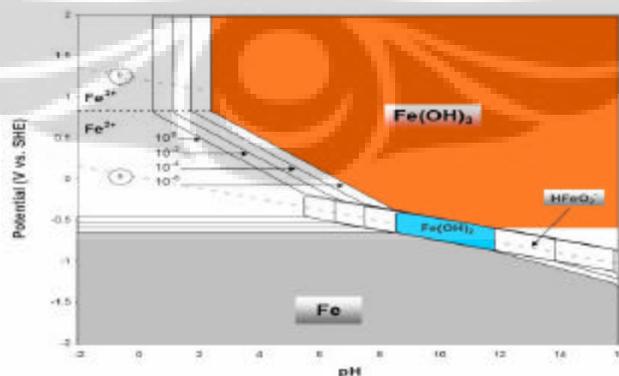
Klasifikasi dari paduan logam dapat dilihat pada Gambar 2.2:



Gambar 2.1 Skema klasifikasi dari paduan logam^[14]

2.9 Diagram E/pH

Terdapat hubungan antara pH dan potensial elektroda (Ekorr). Hubungan ini ditampilkan dalam bentuk sebuah diagram yang menggambarkan kondisi-kondisi dimana logam akan terkorosi, tidak terkorosi atau mengalami pemasifan dalam larutan berpelarut air. Bagan ini disebut diagram E/pH atau diagram Pourbaix. Diagram E/pH untuk besi ditunjukkan oleh Gambar 2.4:



Gambar 2.2 Diagram Pourbaix untuk baja^[16]

Suatu logam dianggap dalam keadaan terkorosi bila konsentrasi ion-ionnya (C_o) = 10^{-6} M. Harga potensial korosi bebas (E^0) untuk baja adalah -0,447 SHE.

2.10 Material Sampel

Dalam penelitian ini digunakan sampel dari material yang sama dengan material yang umum digunakan sebagai bahan material pipa di industri hulu minyak dan gas bumi Indonesia yaitu A106 gr.B dengan persen berat (wt %): 0.3C, 0.4Cr, 0.4Ni, 1.06Mn, 0.1Si, 0.15Mo, 0.035P, 0.035S^[17].

2.11 Karakterisasi Sampel

2.11.1 Fluoresensi Sinar-X

Prinsip pengujian XRF dilakukan dengan menembakkan sinar-X pada sampel yang diuji dimana sinar-X yang ditembakkan akan mempunyai dua kemungkinan yaitu diserap oleh atom atau dihamburkan. Pada proses dimana sinar-X diserap oleh atom dan mentransfer semua energinya ke elektron paling dekat dengan inti dikenal dengan nama fotoelektrik. Apabila sinar-X primer yang ditembakkan mempunyai energi yang cukup, elektron yang berada dalam orbit terdalam akan terlempar keluar dari orbitnya dan menyebabkan atom menjadi tidak stabil. Ketika atom berusaha untuk kembali pada kondisi yang stabil, elektron dari orbit luar akan melompat ke orbit yang lebih dalam sambil memancarkan sinar-X karakteristik yang energinya sebanding dengan energi ikatan kedua orbit tersebut. Karena setiap unsur memiliki level energi yang unik maka setiap unsur akan menghasilkan level energi yang

berbeda dan memungkinkan untuk mengetahui komposisi unsur penyusun material.

Proses emisi sinar-X karakteristik ini dinamakan *X-Ray Fluorescence* atau XRF.

2.11.2 Pengamatan Visual

Pengamatan secara visual dilakukan dengan mengambil gambar dari sampel yang digunakan dengan memakai peralatan kamera digital. Pengamatan ini dilakukan untuk menggantikan karakterisasi SEM-EDAX karena penelitian ini dilakukan pada kondisi yang tidak mengubah struktur mikro dari sampel. Citra digital yang dihasilkan memperlihatkan tampak luar dari proses dan produk korosi yang terjadi.

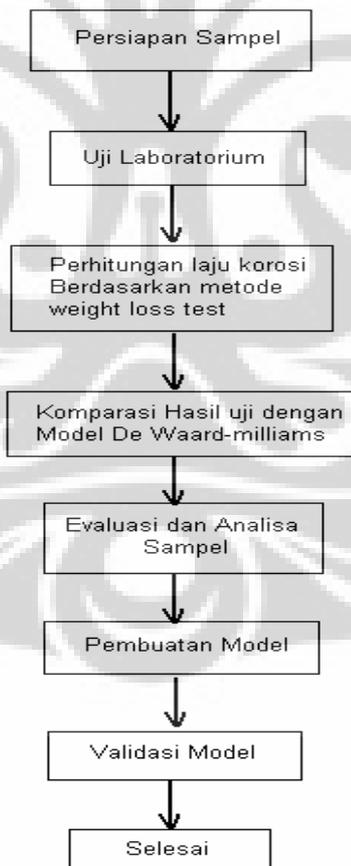
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

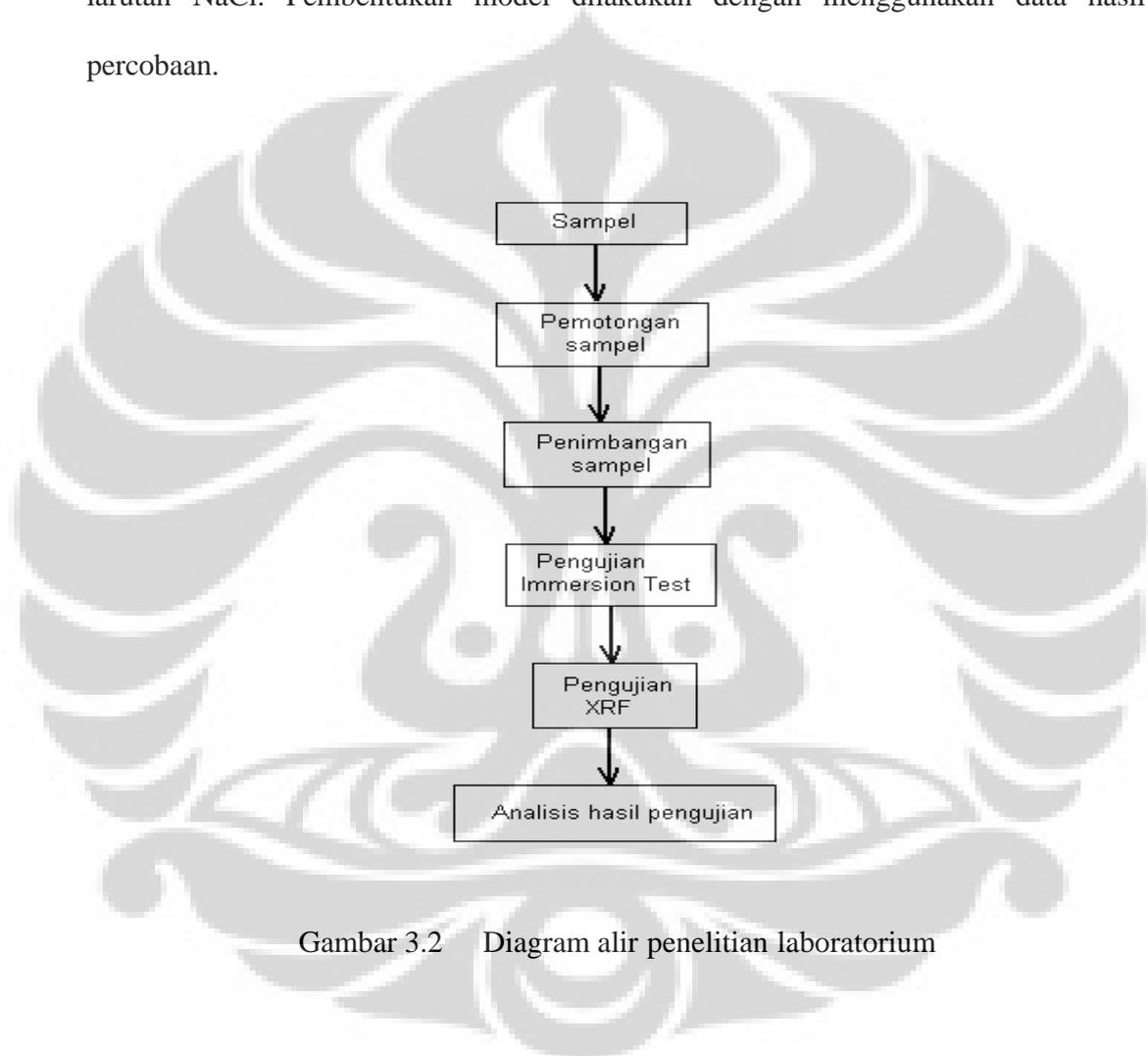
Penelitian dan karakterisasi sampel dilakukan di Laboratorium Program Studi Ilmu Material, Program Pasca Sarjana FMIPA-UI Salemba dan Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

Diagram alir penelitian yang dilakukan dalam pembuatan tesis ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Penelitian di laboratorium dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi aktual yang terjadi pada sistem perpipaan minyak dan gas bumi. Sampel berupa pelat baja karbon A106 Gr. B dan dilakukan karakterisasi dengan XRF setelah perendaman pada larutan NaCl. Pembentukan model dilakukan dengan menggunakan data hasil percobaan.



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian laboratorium

3.2 Preparasi Sampel

Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah baja karbon A106 Gr. B. Sampel berbentuk pelat (*coupon*) kemudian dilakukan preparasi sebelum direndam kedalam larutan NaCl.

3.3 Pengujian Laboratorium

Pengujian didasarkan pada *standard ASTM G 31-72 dan NACE Standard RP 0775-99* dengan menggunakan prinsip kehilangan berat (*weight loss test*).

Pengujian diawali dengan pemotongan sampel menjadi pelat (*coupon*) dengan ukuran tertentu. Sebelum dan setelah diuji, sampel dibersihkan dengan menggunakan air distilat dan aseton untuk menghilangkan debu, lemak dan kotoran lain yang menempel pada permukaan dan dilakukan penimbangan berat awal dan berat akhir. Penimbangan berat sampel menggunakan neraca analitis dengan tingkat ketelitian tinggi.

Pengujian dilakukan dengan merendam sample baja karbon A106 Gr. B masing-masing kedalam larutan natrium klorida (NaCl) 0,1%, 1% dan 3,5% pada suhu 30°C, 50°C, 70°C dan 90°C . Masing-masing sampel diberi nomor untuk memudahkan identifikasi kemudian ditabelkan pada Tabel 3.1 dibawah:

Tabel 3.1 Penomoran sample pada larutan NaCl

Nomor Sampel	Ukuran (P x L x T) (mm)	Luas Permukaan (cm ²)	Suhu (Celcius)	Konsentrasi Larutan NaCl (%)	Jenis Material	Jumlah
1-1	29,5 x 30,3 x 2,1	20.3886	30	0.1	Baja Karbon (A 106)	12
1-2	30,2 x 30 x 2	20.5280	50	0.1		
1-3	28,9 x 29,6 x 2	19.4488	70	0.1		
1-4	30,5 x 29 x 2,2	20.3080	90	0.1		
1-5	29,5 x 30,3 x 2,1	20.3886	30	1		
1-6	30,2 x 30 x 2	20.5280	50	1		
1-7	28,9 x 29,6 x 2	19.4488	70	1		
1-8	30,5 x 29 x 2,2	20.3080	90	1		
1-9	29,5 x 30,3 x 2,1	20.3886	30	3.5		
1-10	30,2 x 30 x 2	20.5280	50	3.5		
1-11	28,9 x 29,6 x 2	19.4488	70	3.5		
1-12	30,5 x 29 x 2,2	20.3080	90	3.5		

Pengujian berikutnya yaitu pada larutan NaCl yang dijenuhkan CO₂ dilakukan pada sampel baja karbon tipe A 106 Gr.B. Pengujian dilakukan dengan merendam sample masing-masing kedalam larutan natrium chloride (NaCl) 0,1%, 1% dan 3,5% kemudian masing-masing larutan dijenuhkan oleh gas CO₂ pada suhu 30°C dan 50°C. Masing-masing sampel diberi nomor untuk memudahkan identifikasi kemudian ditabelkan pada Tabel 3.2 dibawah:

Tabel 3.2 Penomoran sampel pada larutan NaCl yang dijenuhkan CO₂

Nomor Sampel	Ukuran (P x L x T) (mm)	Luas Permukaan (cm ²)	Suhu (C)	Konsentrasi NaCl (%)	Jenis Material	Jumlah
1A	29,5 x 30,3 x 2,1	20.3886	30	0.1	Baja Karbon (A 106)	6
2A	30,2 x 30 x 2	20.5280	30	1		
3A	28,9 x 29,6 x 2	19.4488	30	3.5		
4A	30,3 x 30 x 2	20.5920	50	0.1		
5A	29 x 29,6 x 2	19.5120	50	1		
6A	30,5 x 29 x 2,2	20.3080	50	3.5		

3.4 Pembentukan Model

Data dari hasil pengujian laboratorium digunakan sebagai dasar dalam pembentukan model. Model dihasilkan dengan mengintegrasikan pengaruh masing - masing parameter yang dilakukan selama percobaan seperti suhu dan konsentrasi NaCl. Pemodelan ini tidak memperhitungkan pengaruh pembentukan lapisan pasivasi dan unsur-unsur pengotor lain. Kemudian model yang dihasilkan, divalidasi dengan membandingkan hasil dari pemodelan dengan hasil pengujian laboratorium.

3.5 Karakterisasi Sampel

3.5.1 XRF

Karakterisasi sampel dilakukan untuk mengetahui karakter dari sampel sesudah percobaan dilakukan. Dalam penelitian ini, dilakukan karakterisasi XRF untuk mengidentifikasi pembentukan produk korosi pada material.

Pengujian XRF dilakukan di Laboratorium Program Studi Ilmu Material Program Pascasarjana FMIPA UI Salemba dengan menggunakan perangkat JEOL Element Analyzer JSX-3211 dengan menggunakan sampel yang telah terpapar dengan berbagai variabel pengujian.

3.5.2 Pengamatan Visual

Karakterisasi ini dilakukan berdasarkan asumsi tidak terjadi perubahan dalam struktur mikro dari material. Hal ini secara teori didukung oleh berbagai penelitian yang menyebutkan bahwa perubahan struktur mikro pada material baja karbon ringan terjadi pada temperatur minimal 723°C . Penelitian ini dilakukan hanya pada temperature ambient dan dilakukan pemanasan hingga 90°C sehingga tidak memungkinkan terjadinya perubahan struktur mikro. Untuk mengamati proses korosi yang terjadi, pengamatan visual yang dilakukan pada sampel cukup memberikan hasil yang memuaskan, mengingat korosi dan produk korosi yang terjadi umumnya terjadi dipermukaan material. Pengamatan visual dilakukan dengan menggunakan peralatan pencitraan digital (*digital camera*) yang memiliki tingkat ketelitian tinggi mencapai 5 *megapixel*.

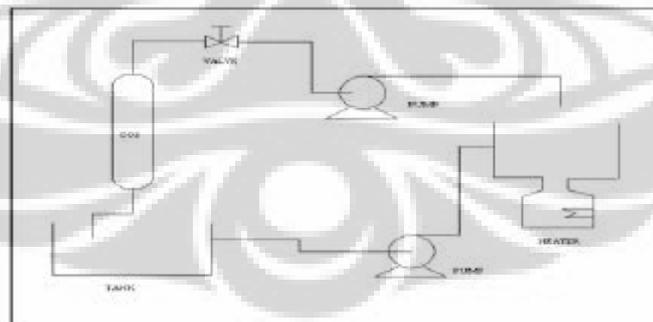
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji Laboratorium

4.1.1 Pengujian Laju Korosi

Pengujian dilakukan dengan metode *immersion test* atau pencelupan kedalam larutan korosif dengan berbagai parameter operasi yang disesuaikan untuk mendekati kondisi nyata dilapangan. Larutan korosif yang digunakan dalam penelitian ini adalah larutan NaCl dengan berbagai macam variasi konsentrasi. Parameter yang digunakan selama penelitian ini adalah konsentrasi NaCl, suhu dan tekanan parsial CO₂. Kondisi awal larutan memiliki pH sekitar 7-8 kemudian dilakukan penjenjuran oleh gas CO₂. Pengaturan suhu dilakukan menggunakan heater. Skema peralatan yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.2



Gambar 4.1 Skema peralatan uji korosi

4.1.2 Penghitungan Laju Korosi

Laju korosi dengan *immersion test* dilakukan berdasarkan kehilangan berat dengan menggunakan perhitungan standard NACE G31-72. Sebagai contoh dilakukan perhitungan laju korosi untuk material baja karbon A106 (sampel 1-1) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Berat awal (W}_{\text{awal}}) &= 26.8761 \text{ gr} & \text{Massa jenis (D)} &= 7,84 \text{ gr/cm}^3 \\ \text{Berat akhir (W}_{\text{akhir}}) &= 26,8721 \text{ gr} & \text{Luas permukaan (A)} &= 20,3886 \text{ cm}^2 \\ \text{Selisih berat (W)} &= 4 \text{ mg} & \text{Lama uji (T)} &= 120 \text{ jam} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Laju korosi} &= \frac{87,6 W}{D A T} \\ &= \frac{87,6 \times 4}{7,84 \times 20,3886 \times 120} \\ &= 0,0183 \text{ mm/year.} \end{aligned}$$

Hasil pengujian laju korosi pada baja karbon tipe A 106 Gr.B pada larutan NaCl yang tidak dijenuhkan oleh gas CO₂ dengan menggunakan rumus diatas ditabelkan pada Tabel 4.1 dibawah:

Tabel 4.1 Laju korosi sampel pada larutan NaCl tanpa penjenuhan CO₂

Nomor Sampel	Jenis Sampel	Luas Permukaan (cm ²)	Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Selisih Berat (mg)	Lama Uji (Jam)	Laju Korosi (mm/year)
1-1	Baja Karbon	20.3886	26.8761	26.8721	4	120	0.0183
1-2		20.5280	26.9252	26.9211	4.1	120	0.0186
1-3		19.4488	25.1351	25.1301	5	120	0.0239
1-4		20.3080	26.2433	26.2373	6	120	0.0275
1-5		20.3886	26.8761	26.8711	5	120	0.0228
1-6		20.528	26.9252	26.9174	7.8	120	0.0354

1-7		19.4488	25.1351	25.1265	8.6	120	0.0412
1-8		20.308	26.2433	26.2333	10	120	0.0459
1-9		20.3886	26.8761	26.8691	7	120	0.0320
1-10		20.528	26.9252	26.9102	15	120	0.0680
1-11		19.4488	25.1351	25.1176	17.5	120	0.0838
1-12		20.308	26.2433	26.2201	23.2	120	0.1064

Hasil pengujian laju korosi pada baja karbon tipe A 106 Gr.B pada larutan NaCl yang dijenuhkan oleh gas CO₂ dengan menggunakan rumus diatas ditabelkan pada Tabel 4.2 dibawah:

Tabel 4.2 Laju korosi pada larutan NaCl dengan penjenuhan CO₂

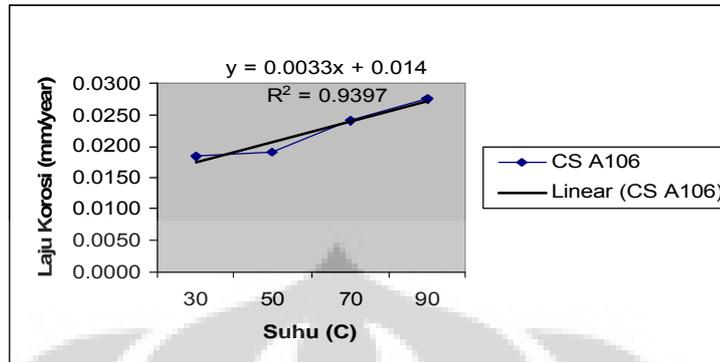
Nomor Sampel	Jenis Sampel	Luas Permukaan (cm ²)	Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Selisih Berat (mg)	Lama Uji (Jam)	Laju Korosi (mm/year)
1A	Baja Karbon	20.3886	26.8761	26.8232	52.9	120	0.2416
2A		20.5280	26.9252	26.8679	57.3	120	0.2599
3A		19.4488	25.1351	25.0722	62.9	120	0.3011
4A		20.592	26.9526	26.8382	114.4	120	0.5173
5A		19.512	25.9025	25.7825	120	120	0.5726
6A		20.308	26.8507	26.7207	130	120	0.5961

Hasil pengukuran untuk harga pH, TDS dan potensial korosi (E_{kor}) pada larutan NaCl yang tidak dijenuhkan gas CO₂ dan yang dijenuhkan gas CO₂ pada kondisi sebelum dan sesudah perendaman pada baja karbon A 106 Gr.B dapat dilihat pada lampiran A.

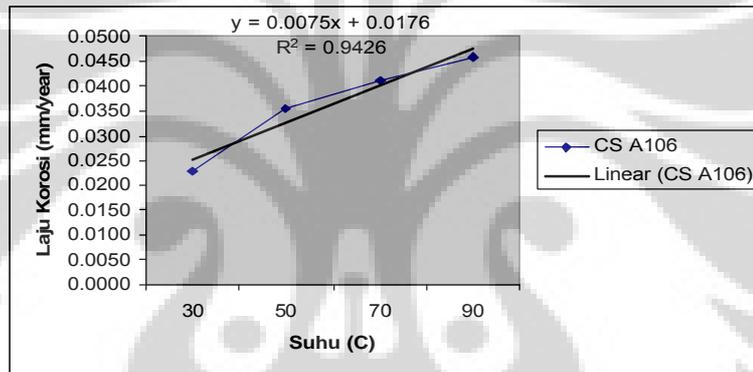
4.2 Pengaruh Berbagai Parameter Kondisi Operasi

4.2.1 Pengaruh Temperatur terhadap Laju Korosi Sampel Pada Larutan NaCl Tanpa Penjenuhan gas CO₂

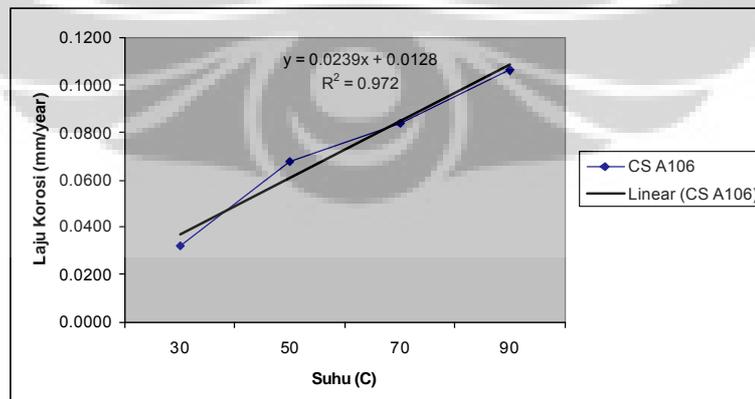
Pengaruh temperatur terhadap laju korosi pada baja karbon A106 didalam larutan NaCl ditunjukkan pada Gambar 4.2, 4.3, dan 4.4.



Gambar 4.2 Laju korosi A106 pada larutan NaCl 0,1%



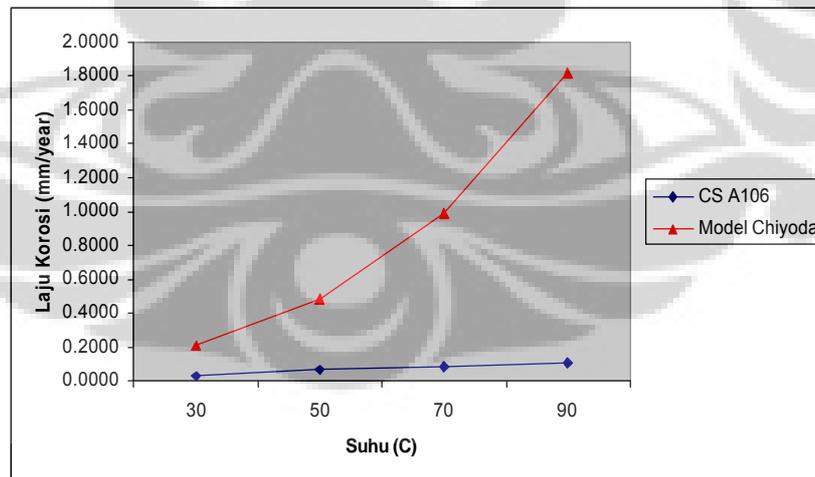
Gambar 4.3 Laju korosi A106 pada larutan NaCl 1%



Gambar 4.4 Laju korosi A106 pada larutan NaCl 3,5%

Dari Gambar 4.2, 4.3 dan 4.4 tersebut terlihat bahwa laju korosi pada sampel baja karbon mengalami peningkatan jika suhu larutan dinaikkan. Kenaikan laju korosi pada sampel bersifat linier.

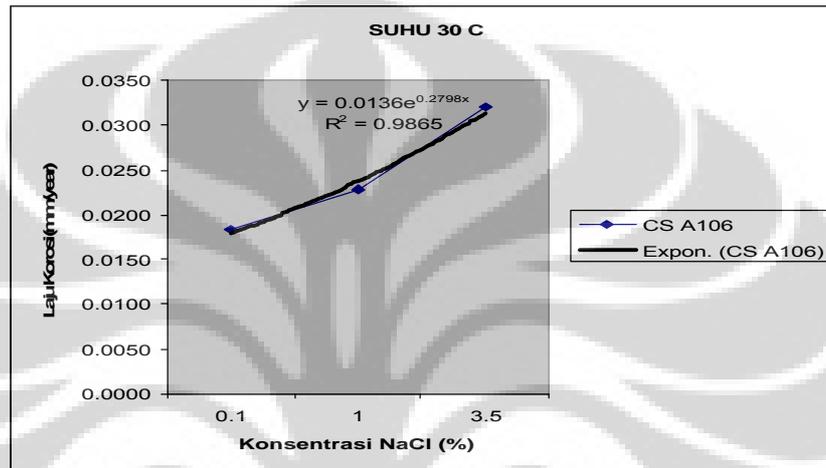
Perbandingan laju korosi baja karbon A106 pada larutan NaCl 3,5% dengan pemodelan yang dilakukan oleh Chiyoda pada rentang suhu 30°C sampai dengan 90°C ditunjukkan pada Gambar 4.5. Terlihat bahwa terdapat perbedaan yang cukup besar, hal ini disebabkan karena model Chiyoda mengasumsikan seluruh ion hidrogen (H^+) yang terdapat dalam fluida berasal dari penguraian H_2CO_3 yang terkandung dalam larutan dan tingkat pH yang terjadi cukup rendah ($pH < 7$) yang disebabkan oleh naiknya konsentrasi ion H^+ pada larutan, sedangkan pada hasil pengujian, laju korosi hanya dipengaruhi oleh adanya kandungan ion klorida dimana tingkat pH masih diatas 7.



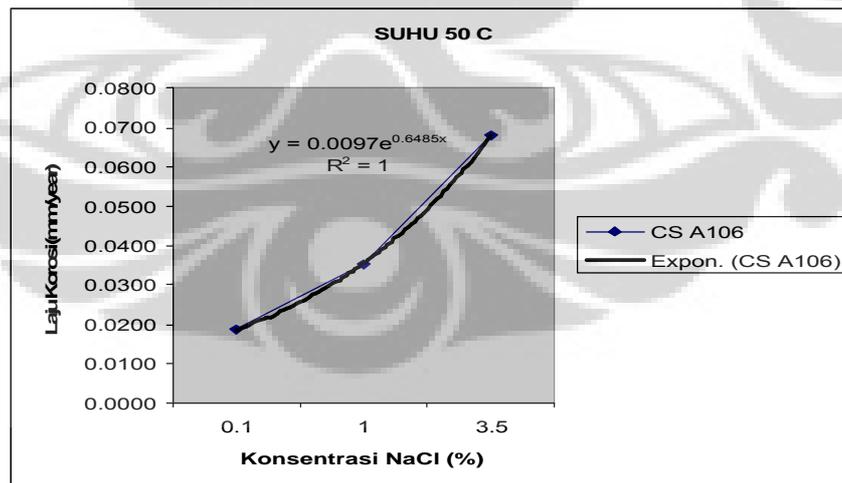
Gambar 4.5 Perbandingan laju korosi A106 pada larutan NaCl 3,5% dengan model Chiyoda

4.2.2 Pengaruh Konsentrasi NaCl terhadap Laju Korosi Sampel Pada Larutan NaCl Tanpa Penjenuhan Gas CO₂

Pengaruh NaCl terhadap laju korosi pada baja karbon A106 ditunjukkan pada Gambar 4.6 dan 4.7.



Gambar 4.6 Laju korosi A106 pada larutan NaCl 0.1%, 1% dan 3,5% tanpa penjenuhan CO₂ pada suhu 30°C.

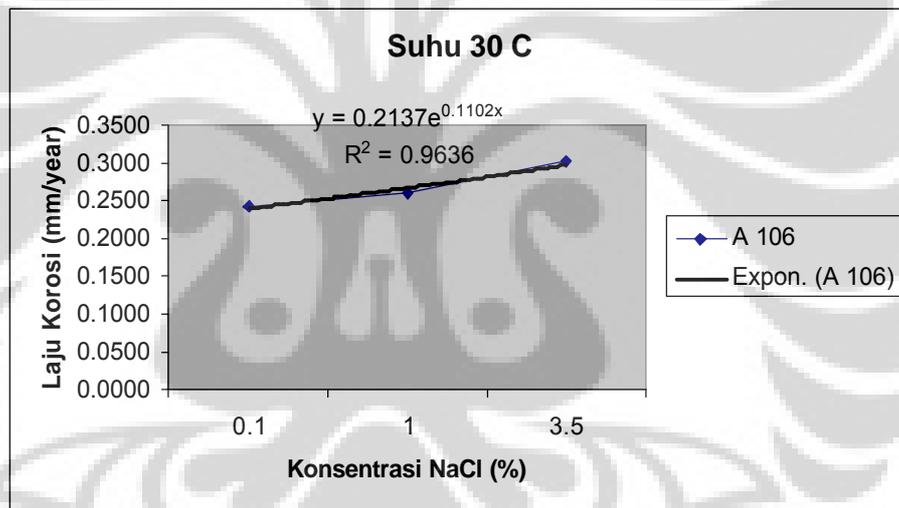


Gambar 4.7 Laju korosi A106 pada larutan NaCl 0.1%, 1% dan 3,5% tanpa penjenuhan CO₂ pada suhu 50°C.

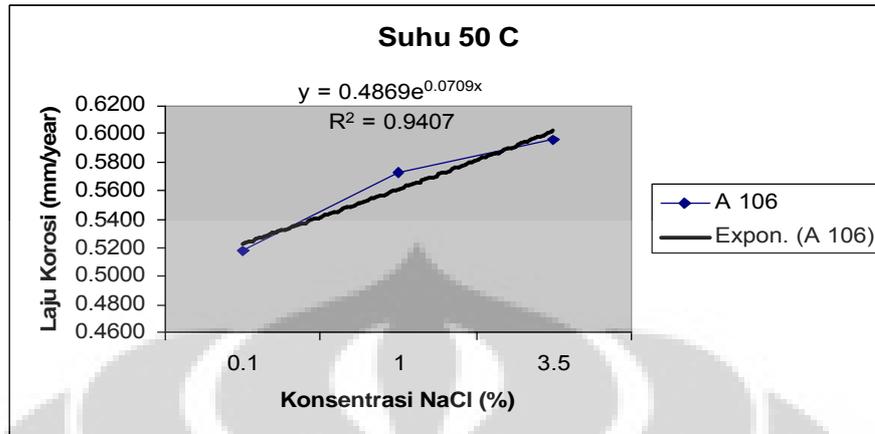
Dari gambar-gambar tersebut terlihat bahwa laju korosi pada sampel baja karbon mengalami peningkatan jika konsentrasi NaCl di dalam larutan dinaikkan.

4.2.3 Pengaruh Konsentrasi NaCl terhadap Laju Korosi Sampel Pada Larutan NaCl Dengan Penjenuhan CO₂

Pengaruh konsentrasi NaCl terhadap laju korosi pada baja karbon A106 dan pada larutan NaCl yang dijenuhkan oleh gas CO₂ ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan 4.9.

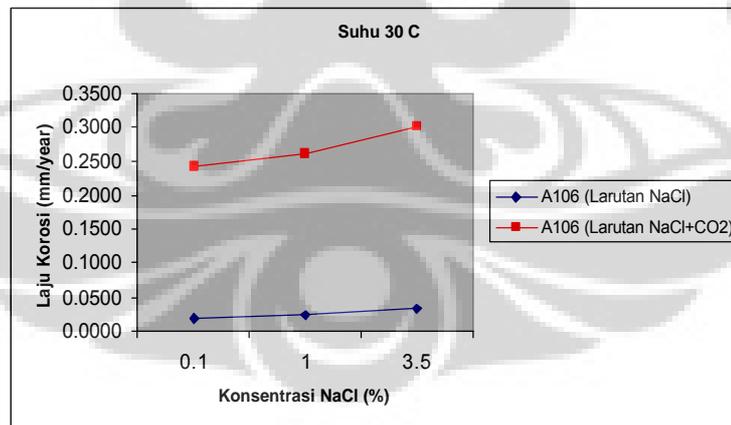


Gambar 4.8 Laju korosi A106 pada larutan NaCl 0.1%, 1% dan 3,5% dengan penjenuhan CO₂ pada suhu 30°C.



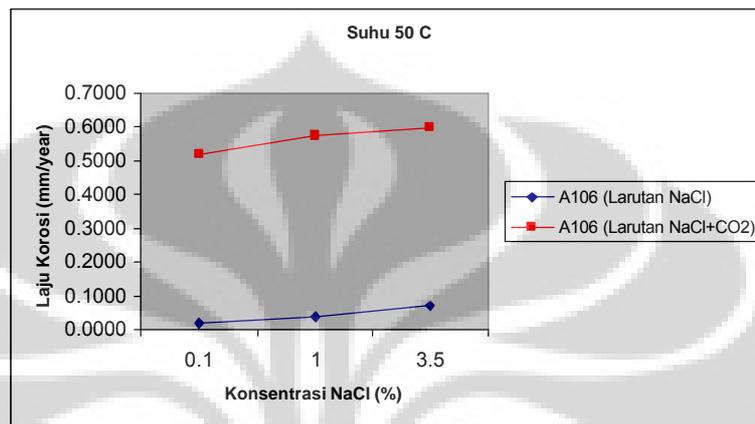
Gambar 4.9 Laju korosi A106 pada larutan NaCl 0.1%, 1% dan 3,5% dengan penjenuhan CO₂ pada suhu 50°C

Perbandingan laju korosi baja karbon A106 pada larutan NaCl tanpa penjenuhan gas CO₂ dengan larutan yang dijenuhkan gas CO₂ pada suhu 30°C ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Perbandingan laju korosi baja karbon A106 pada larutan NaCl tanpa penjenuhan gas CO₂ dengan larutan yang dijenuhkan gas CO₂ pada suhu 30°C

Perbandingan laju korosi baja karbon A106 pada larutan NaCl tanpa penjujukan gas CO₂ dengan larutan yang dijenuhkan gas CO₂ pada suhu 50°C ditunjukkan pada Gambar 4.11.



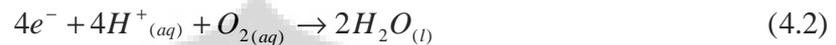
Gambar 4.11 Perbandingan laju korosi baja karbon A106 pada larutan NaCl tanpa penjujukan gas CO₂ dengan larutan yang dijenuhkan gas CO₂ pada suhu 50°C

Dari Gambar 4.10 dan 4.11 terlihat bahwa terjadi kenaikan laju korosi pada saat larutan NaCl dijenuhkan oleh gas CO₂ pada suhu 30°C dan 50°C. Pada saat baja karbon direndam didalam larutan NaCl yang bersifat elektrolit proses korosi mulai terjadi. Ketika larutan mengandung sedikit oksigen terlarut maka baja akan mengalami reaksi oksidasi dengan melepaskan elektron sehingga terbentuk ion Fe²⁺ sesuai dengan mekanisme reaksi^[3]:



Dalam hal ini baja bertindak sebagai anoda dan reaksi tersebut disebut juga sebagai reaksi anoda. Dan proses perusakan baja mulai berlangsung. Sebagian elektron yang

dilepaskan dari reaksi oksidasi tersebut akan dikonsumsi oleh ion hidrogen yang berasal dari air (H₂O) dan bersama-sama dengan oksigen yang terlarut akan membentuk air kembali sesuai dengan mekanisme reaksi^[3]:



Pada saat yang sama sebagian elektron didalam larutan juga bereaksi dengan dengan air (H₂O) dan oksigen yang terlarut membentuk ion hidroksil (OH⁻) sesuai dengan mekanisme reaksi^[3]:



Dalam hal ini larutan bertindak sebagai katoda dan reaksi yang terjadi tersebut disebut sebagai reaksi katoda. Sementara itu NaCl yang terlarut didalam larutan akan terdisosiasi membentuk ion Na⁺ dan Cl⁻ sesuai dengan mekanisme reaksi^[3]:

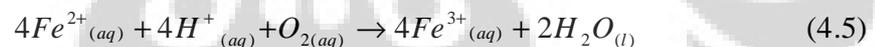


Adanya ion Cl⁻ akan menyebabkan proses korosi merata dan *pitting* pada baja karbon. Timbulnya *pitting* terlihat jelas pada sampel baja karbon yang telah mengalami proses perendaman selama 120 jam (Gambar 4.14) dan dari hasil pengujian XRF yang mengindikasikan adanya unsur klorida (Cl) pada produk korosi.

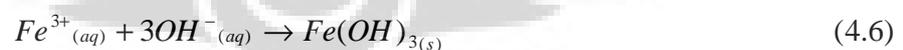
Apabila gas CO₂ dialirkan kedalam larutan tersebut maka akan bereaksi dengan air. Gas CO₂ yang bereaksi dengan air tersebut akan membentuk endapan bikarbonat. Selanjutnya H₂CO₃ akan terurai menjadi ion HCO₃⁻ dan H⁺. Proses berikutnya adalah mengurainya ion HCO₃⁻ menjadi ion CO₃²⁻ dan ion H⁺. pada saat

yang sama harga pH akan turun yang semula berharga sekitar 7,5 turun menjadi 5 seiring dengan jumlah ion H^+ yang terbentuk hal ini sesuai dengan pengukuran pH larutan setelah proses penjenhuan larutan dengan gas CO_2 selesai dilakukan yang semula berharga sekitar 7,5 turun menjadi 5. Turunnya nilai pH menyebabkan semakin meningkatnya serangan korosi terhadap baja, oleh karena itu laju korosi pada larutan yang dijenuhi gas CO_2 lebih besar dibandingkan dengan larutan yang tidak dijenuhkan.

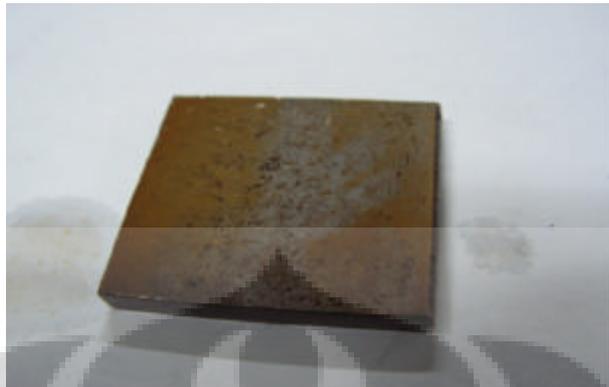
Selama proses korosi berlangsung ion H^+ di konsumsi membentuk produk korosi disaat yang sama jumlah ion hidroksil (OH^-) bertambah seiring dengan turunnya konsentrasi ion H^+ . Ion Fe^{2+} yang ada didalam larutan akan bereaksi dengan ion H^+ dan oksigen yang terlarut membentuk ion Fe^{3+} sesuai dengan mekanisme reaksi^{[3]:}:



Selanjutnya ion Fe^{3+} yang terbentuk didalam larutan akan bereaksi dengan ion hidroksil (OH^-) membentuk hidrat oksida besi(III) atau besi(III) hidroksida sesuai dengan mekanisme reaksi^{[3]:}:



Kemudian besi(III) hidroksida yang terbentuk tidak dapat larut didalam air dan secara perlahan-lahan akan berubah menjadi $Fe_2O_3 \cdot H_2O$. hal ini dapat ditunjukkan dengan warna larutan yang terdapat endapan berwarna merah kecoklatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 dan 4.13:



Gambar 4.12 Produk korosi pada baja karbon



Gambar 4.13 Warna larutan sebelum proses perendaman untuk baja karbon dan setelah proses perendaman

Seiring dengan proses korosi yang terjadi pada baja karbon yang direndam didalam larutan tersebut, ion-ion klorida akan menyerang baja dan menembus masuk kedalam permukaan baja sehingga terbentuk *pitting* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14:



Gambar 4.14 *Pitting* pada baja karbon A106

Harga pH larutan diakhir proses perendaman naik pada semua konsentrasi NaCl, hal ini disebabkan oleh dikonsumsi ion H^+ didalam larutan selama proses korosi berlangsung dan bertambahnya ion-ion hidroksil OH^- serta terbentuknya besi(III) hidroksida, $Fe(OH)_3$. Harga pH pada larutan NaCl 0,1%, 1% dan 3,5% setelah proses perendaman berturut-turut adalah 6.96, 6.78 dan 6.74.

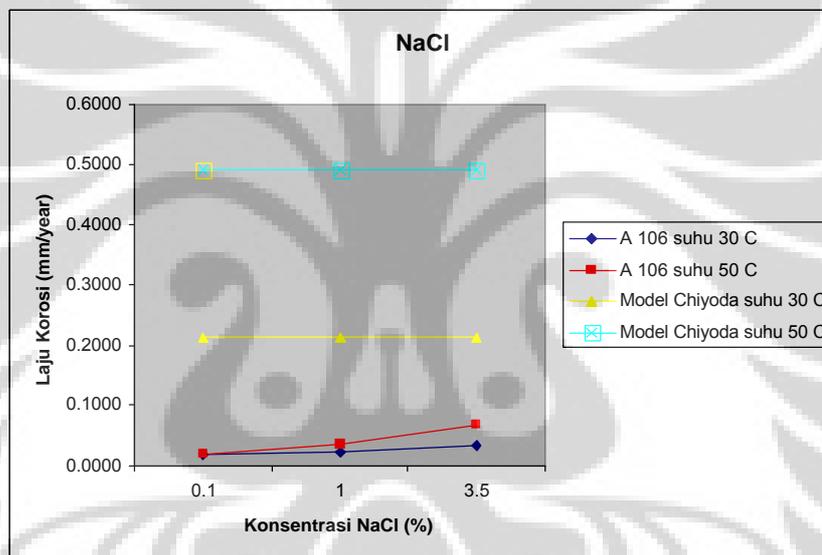
Harga potensial korosi (E_{kor}) baja yang terukur di dalam larutan yang jenuh CO_2 yaitu berturut-turut berkisar -0,606 V, -0,611 V dan -0,633V. Jika mengacu pada diagram E/pH (diagram Pourbaix) maka rentang harga E_{kor} untuk baja karbon didalam larutan yang dijenuhkan oleh CO_2 sebelum proses perendaman selesai terletak pada daerah kebal (*immunity*).

Pada saat akhir proses perendaman harga potensial korosi baja pada larutan NaCl 0,1%, 1% dan 10% berturut-turut adalah -0,244V, -0,294V dan -0,311 V. Jika mengacu pada diagram E/pH (diagram Pourbaix) maka rentang harga E_{kor} untuk baja karbon didalam larutan yang dijenuhkan oleh CO_2 setelah proses perendaman selesai

terletak pada daerah korosi aktif (Fe^{2+} region). Hal ini menunjukkan bahwa baja tersebut cenderung terkorosi.

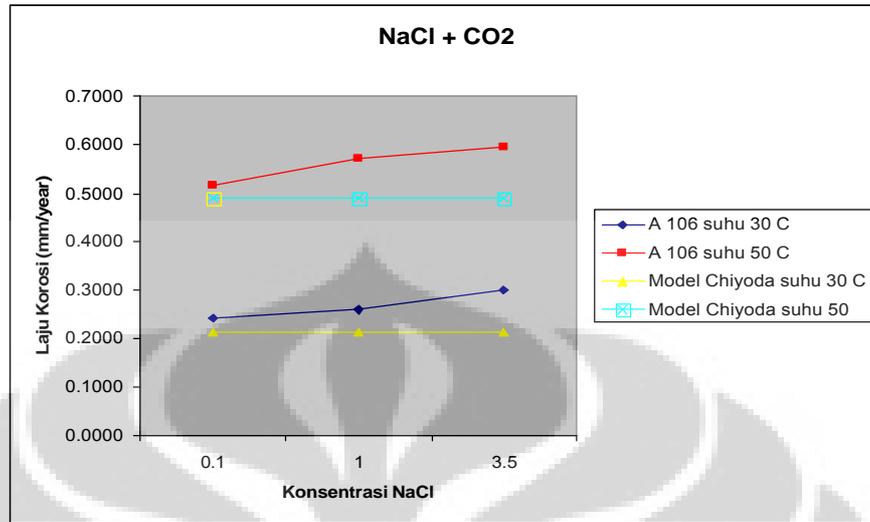
4.3 Faktor Koreksi

Perbandingan laju korosi untuk baja karbon pada larutan NaCl yang tidak dijenuhkan CO_2 dengan model Chiyoda pada suhu $30^\circ C$ dan $50^\circ C$ ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Perbandingan laju korosi untuk baja karbon A106 pada larutan NaCl tanpa penjenuhan gas CO_2 dengan model Chiyoda

Perbandingan laju korosi untuk baja karbon pada larutan NaCl yang dijenuhkan CO_2 dengan model Chiyoda pada suhu $30^\circ C$ dan $50^\circ C$ ditunjukkan pada Gambar 4.16



Gambar 4.16 Perbandingan laju korosi untuk baja karbon A106 pada larutan NaCl dengan penjenhuan gas CO₂ dengan model Chiyoda

Perbedaan laju korosi antara model Chiyoda dengan laju korosi baja karbon A106 pada larutan NaCl yang tidak dijenuhkan gas CO₂ dan dengan larutan yang dijenuhkan gas CO₂ pada suhu 30°C dan suhu 50°C ini ditabelkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perbedaan laju korosi model Chiyoda dengan laju korosi pada baja karbon tanpa penjenhuan CO₂ dan dengan penjenhuan CO₂

Jenis Sampel	Konsentrasi NaCl (%)	Suhu (C)	Laju korosi Model Chiyoda (mm/year)	Laju korosi NaCl (mm/year)	Laju korosi NaCl + CO2 (mm/year)
A 106	0.1	30	0.2125	0.0183	0.2416
	1	30	0.2125	0.0228	0.2599
	3.5	30	0.2125	0.0320	0.3011
	0.1	50	0.4898	0.0186	0.5173
	1	50	0.4898	0.0354	0.5726
	3.5	50	0.4898	0.0680	0.5961

Dari Table 4.3 diatas terlihat bahwa laju korosi baja karbon A106 pada larutan NaCl yang dijenuhkan oleh gas CO₂ memiliki harga lebih tinggi dibandingkan dengan model Chiyoda, perbedaan harga ini disebabkan karena model Chiyoda tidak memperhitungkan pengaruh kandungan klorida di dalam larutan. Persamaan Chiyoda (de Waard-Milliams) hanya mengkorelasikan pengaruh laju korosi dari material API 5L X-52 sebagai fungsi dari tekanan parsial CO₂ dan suhu.

Pada kondisi aktual dilapangan dimana fluida mengandung CO₂ dan ion klorida maka persamaan Chiyoda memerlukan faktor koreksi. Model koreksi yang terbentuk menggunakan metode *trial and error* untuk mendapatkan hasil yang dapat mengakomodasi seluruh parameter yang digunakan. Sehingga untuk setiap parameter, tidak digunakan persamaan *trendline* terbaik tetapi yang memiliki tingkat fleksibilitas yang tinggi.

Secara matematis, hubungan antara laju korosi dengan konsentrasi NaCl dapat dituliskan sebagai berikut:

Untuk baja karbon A 106 pada suhu 30°C:

$$CR_{(NaCl\ Dissv.)} = 0,0166 e^{0,1908x} \quad (4.7)$$

Untuk baja karbon A 106 pada suhu 50°C:

$$CR_{(NaCl\ Dissv.)} = 0,02 e^{0,3605x} \quad (4.8)$$

Dimana

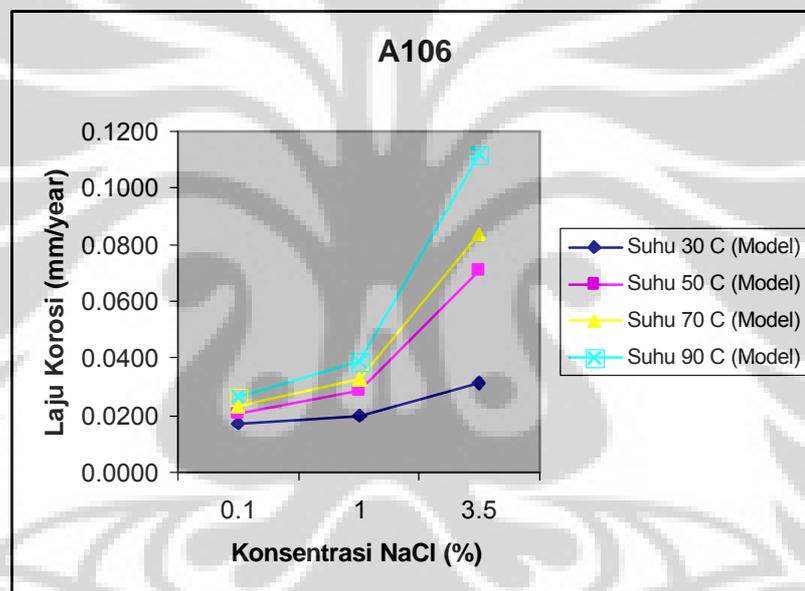
x : Konsentrasi NaCl (%)

CR : Laju korosi (mm/year)

4.4 Pemodelan Laju Korosi Baja Karbon A106 Pada Larutan NaCl

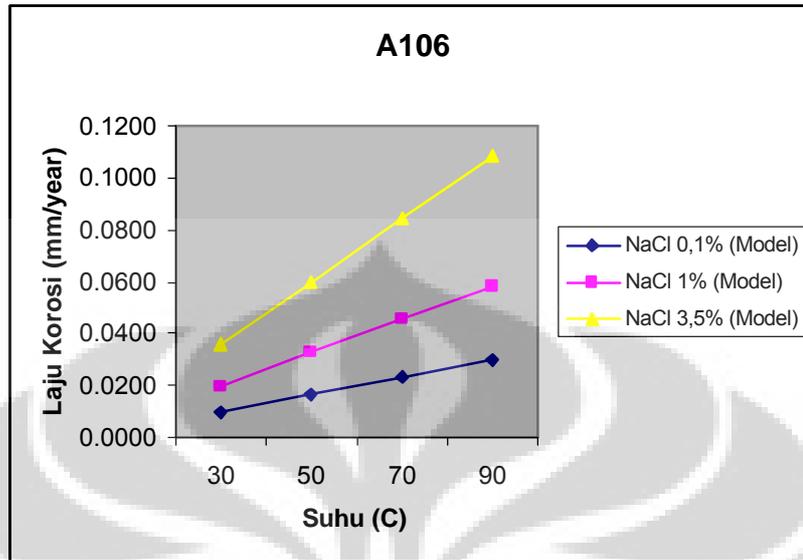
Dari hasil penelitian, dapat dituliskan suatu model koreksi yang dapat digunakan untuk memprediksi laju korosi pada baja karbon A106 yang disebabkan oleh kandungan NaCl dalam fluida yang mengalir di sistem perpipaan migas.

Dari pengolahan data pada tabel 4.1 didapatkan grafik laju korosi baja karbon A106 terhadap konsentrasi NaCl pada rentang suhu 30°C sampai dengan 90°C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.17:



Gambar 4.17 Model hubungan antara laju korosi dengan konsentrasi NaCl pada baja karbon A106

Grafik laju korosi baja karbon A106 terhadap suhu pada rentang konsentrasi NaCl 0,1% sampai dengan 3,5% ditunjukkan pada Gambar 4.18:



Gambar 4.18 Model hubungan antara laju korosi dengan suhu pada baja karbon A106

Secara matematis, hubungan antara laju korosi dengan konsentrasi NaCl pada baja karbon A106 untuk suhu 30°C dan 50°C ditunjukkan pada persamaan 4.7 dan 4.8. Dan pada suhu 70°C dan 90°C dapat dituliskan sebagai berikut:

Untuk baja karbon A 106 pada suhu 70°C

$$CR_{(NaCl\ Dissv.)} = 0,0224 e^{0,3764 \cdot x} \quad (4.9)$$

Untuk baja karbon A 106 pada suhu 90°C:

$$CR_{(NaCl\ Dissv.)} = 0,0252 e^{0,4262 \cdot x} \quad (4.10)$$

Dimana

x : Konsentrasi NaCl (%)

CR : Laju korosi (mm/year)

Hubungan matematis antara laju korosi dengan suhu pada baja karbon A106 dapat dituliskan sebagai berikut:

Untuk baja karbon A 106 pada konsentrasi NaCl 0,1 %:

$$CR_{(NaCl\ Dissv.)} = 0,00033 y \quad (4.11)$$

Untuk baja karbon A 106 pada konsentrasi NaCl 1 % :

$$CR_{(NaCl\ Dissv.)} = 0,00065 y \quad (4.12)$$

Untuk baja karbon A 106 pada konsentrasi NaCl 3,5 %:

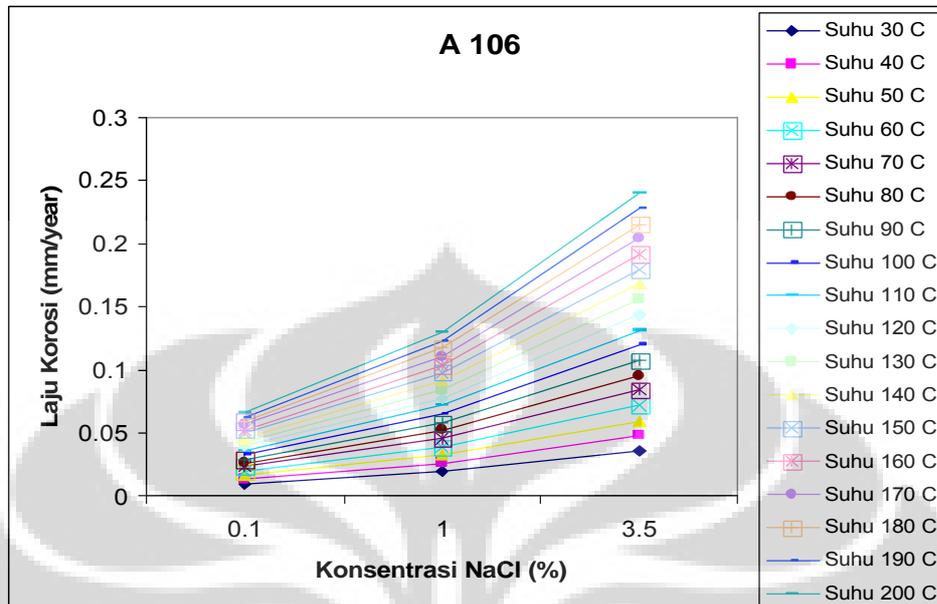
$$CR_{(NaCl\ Dissv.)} = 0,0012 y \quad (4.12)$$

Dimana

y : suhu (Celcius)

CR : Laju korosi (mm/year)

Dari Gambar 4.17 dan 4.18 tersebut maka dapat di buat model laju korosi jika pada suatu fluida mengandung NaCl terlarut dengan menggunakan persamaan-persamaan *trendline* diatas seperti ditunjukkan pada Gambar 4.19:



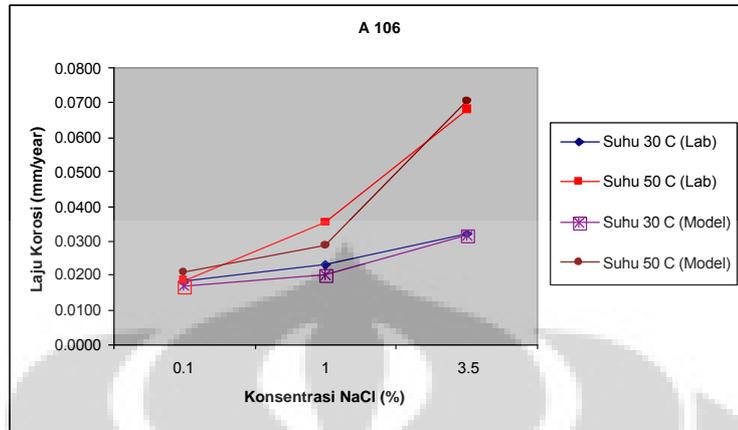
Gambar 4.19 Model laju korosi NaCl untuk baja karbon A 106

4.5 Validasi Model Terhadap Hasil Laboratorium

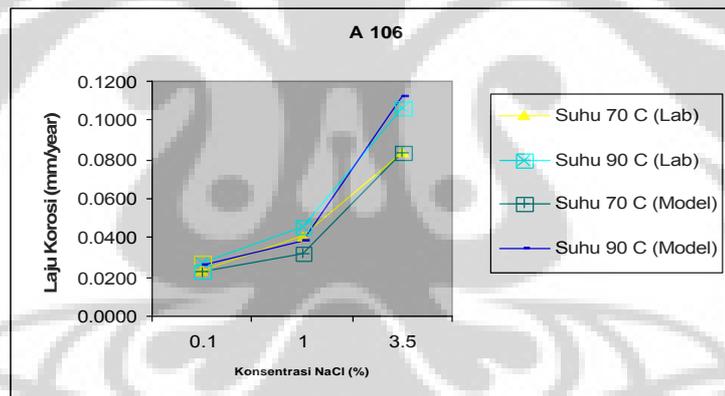
Model yang didapat dari hasil pengolahan data laboratorium diuji kembali terhadap hasil percobaan yang didapatkan selama penelitian ini dengan memasukkan besaran kondisi operasi yang sama dengan kondisi operasi pada saat percobaan dilakukan ke dalam model laju korosi, sehingga didapatkan beberapa perbandingan hasil laju korosi yang dihasilkan oleh model dan dari hasil percobaan

4.5.1 Validasi Model Untuk Baja Karbon A106 Dengan Parameter Konsentrasi NaCl

Perbandingan korosi yang dihasilkan oleh model terhadap hasil percobaan dengan parameter konsentrasi NaCl ditunjukkan pada Gambar 4.21 dan 4.22.



Gambar 4.20 Validasi model baja karbon A106 terhadap hasil percobaan dengan parameter konsentrasi NaCl pada suhu 30°C dan 50°C



Gambar 4.21 Validasi model baja karbon A106 terhadap hasil percobaan dengan parameter konsentrasi NaCl pada suhu 70°C dan 90°C

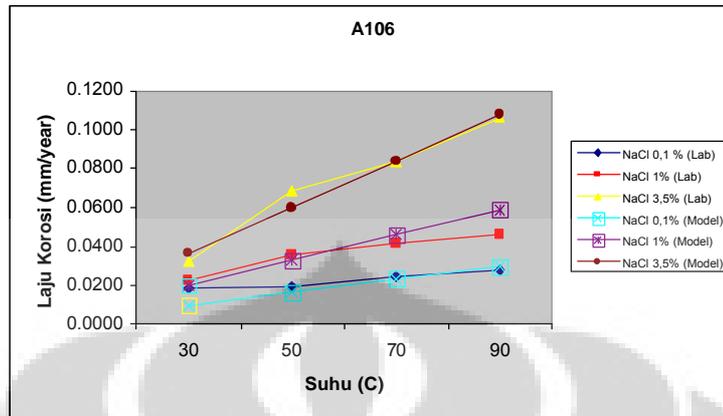
Dari Gambar 4.20 dan 4.21 terlihat bahwa pada suhu 30°C hasil dari model memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil percobaan, perbedaan terjadi pada tingkat kemiringan kurva, dimana hasil laboratorium memiliki *gradient* sekitar 0,0046 yang sedikit lebih curam dibandingkan dengan model yang memiliki *gradient* sekitar

0,0032 pada rentang konsentrasi NaCl 0,1% sampai 1%. Dengan kata lain laju korosi model memberikan hasil yang lebih rendah ketimbang hasil pengujian laboratorium hal ini disebabkan karena model hanya memperhitungkan satu variabel saja yaitu konsentrasi NaCl tanpa memperhitungkan faktor lain yang dapat mempengaruhi korosifitas dari sample baja seperti kandungan oksigen yang terlarut dan tingkat kemurnian garam yang dipakai dalam percobaan.

Untuk rentang konsentrasi NaCl 1% sampai 3,5%, *gradient* model lebih curam yaitu sebesar 0,0113 dibandingkan dengan hasil laboratorium yang berharga 0,0091. Hal ini disebabkan karena pada konsentrasi NaCl yang cukup besar, produk korosi yang timbul akan mencapai kadar yang cukup untuk menghalangi proses korosi selanjutnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 Walaupun proses korosi tetap berjalan tetapi akan memberikan hasil laju korosi yang rendah ketimbang model yang tidak memperhitungkan lapisan penghalang yang terbentuk. Mekanisme yang sama berlaku juga untuk suhu 50°C, 70°C dan 90°C. Secara keseluruhan model ini memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil laboratorium sehingga dapat digunakan sebagai acuan model korosifitas pada sistem perpipaan yang mengandung ion klorida terlarut.

4.5.2 Validasi Model Untuk Baja Karbon A106 Dengan Parameter Suhu

Perbandingan hasil laju korosi yang dihasilkan oleh model terhadap hasil percobaan dengan parameter suhu ditunjukkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Validasi model baja karbon A106 terhadap hasil percobaan dengan parameter suhu

Dari gambar 4.22 terlihat bahwa pada model secara umum memberikan kecenderungan yang sama dengan hasil laboratorium. Pada rentang suhu 30°C sampai dengan 50°C hasil laboratorium memberikan kemiringan kurva laju korosi yang lebih tinggi dibandingkan hasil lab, hal ini disebabkan karena model tidak memperhitungkan parameter lain seperti kandungan oksigen pada larutan dan faktor pengotor lainnya yang dapat mempengaruhi korosifitas larutan terhadap baja. Untuk suhu 50°C sampai dengan 90°C, model memberikan tingkat kemiringan kurva yang lebih tajam ketimbang hasil laboratorium, hal ini disebabkan karena terbentuknya lapisan pasivasi berupa produk korosi yang menutupi permukaan baja sehingga dapat memperlambat proses korosi selanjutnya. Adanya lapisan pasivasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.12.

4.6 Batasan Parameter Operasi Pada Model Penelitian

Model yang dihasilkan dari penelitian ini mengasumsikan bahwa laju korosi hanya dipengaruhi oleh parameter konsentrasi NaCl dan suhu saja. Model ini tidak memperhitungkan pengaruh kandungan oksigen yang terlarut dan unsur pengotor lainnya didalam fluida. Model ini cukup valid digunakan pada rentang konsentrasi NaCl 0,1% sampai dengan 3,5% pada daerah temperatur operasi 30°C sampai dengan 90°C.

Jika didalam fluida mengandung spesi lain seperti H₂S, asam-asam organik dan agen-agen korosi lainnya maka diperlukan adanya faktor koreksi sehingga hasil yang diperoleh akan lebih presisi.

4.7 Karakterisasi Sampel

Secara umum dapat diketahui secara langsung bahwa dalam penelitian ini tidak akan terjadi perubahan mikrostruktur dari sampel karena penelitian ini hanya dilakukan pada suhu yang relatif tidak terlalu tinggi, sehingga tidak akan memicu terjadinya perubahan struktur secara mikro. Berdasarkan hal tersebut, tidak akan dilakukan karakterisasi secara kompleks dan karakterisasi hanya dilakukan untuk mengamati lapisan oksida yang terbentuk pada sampel tersebut dan mengetahui unsur-unsur maupun senyawa yang terdapat dalam sampel. Karakterisasi sampel dilakukan sesudah proses pengujian korosi dilakukan. Dilakukan dua jenis karakterisasi pada penelitian ini dengan tujuan karakterisasi yang berbeda-beda yaitu XRF dan *Digital Imaging Photograph*.

4.7.1 XRF

Hasil uji XRF memberikan kandungan unsur-unsur produk korosi yang mengendap pada larutan dan pada permukaan material baja karbon A106. Berdasarkan hasil XRF, unsur-unsur yang terdapat pada endapan (dalam persen berat) sebagian besar terdiri dari Cl (77,69 %), Na (21,14%) dan Fe (0,37%). Beberapa unsur ringan tidak dapat diidentifikasi namun secara makro dapat diduga bahwa unsur tersebut terdapat dalam jumlah yang relatif kecil. Adanya Fe yang mengendap menunjukkan bahwa baja terkorosi dan membentuk senyawa berupa oksida logam.

Produk korosi yang terbentuk pada permukaan material baja karbon A106 sebagian besar terdiri dari Fe (86,017%) dan Cl (10,82%). Unsur Na tidak teridentifikasi. Adanya unsur Cl mengindikasikan adanya *pitting* yang terjadi pada baja karbon.

4.7.2 *Digital imaging Photograph*

Pengambilan gambar dengan menggunakan kamera digital dilakukan untuk mengamati tekstur permukaan sampel yang mengalami korosi secara makro. Dari citra yang dihasilkan dapat dilihat bahwa sampel mengalami korosi dan berwarna kecoklatan. Jenis korosi yang terjadi adalah *uniform corrosion*. Dan setelah sampel dibersihkan, terlihat jelas adanya *pitting* pada sampel baja karbon A106.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Laju korosi baja karbon A106 dalam larutan NaCl pada suhu 30°C rata-rata bertambah sebesar 0,24 mm/year jika dijenuhkan oleh gas CO₂. Dan pada suhu 50°C rata-rata bertambah sebesar 0,52 mm/year.
2. Laju korosi yang terjadi pada sistem perpipaan minyak dan gas bumi melalui penelitian ini dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti temperatur dan konsentrasi NaCl dan dapat dituliskan dalam bentuk pemodelan sebagai berikut:

- Untuk baja karbon A 106 pada suhu 30°C:

$$CR_{(NaCl\ Dissv.)} = 0,02 e^{0,1908.x}$$

- Untuk baja karbon A 106 pada suhu 50°C:

$$CR_{(NaCl\ Dissv.)} = 0,02 e^{0,3605.x}$$

- Untuk baja karbon A 106 pada suhu 70°C

$$CR_{(NaCl\ Dissv.)} = 0,02 e^{0,3764.x}$$

- Untuk baja karbon A 106 pada suhu 90°C:

$$CR_{(NaCl\ Dissv.)} = 0,02 e^{0,4262.x}$$

3. Pemodelan yang diperoleh pada penelitian ini tidak memperhitungkan pengaruh dari lapisan pasivasi yang terbentuk pada permukaan sampel.
4. Hubungan antara laju korosi dengan suhu larutan bersifat linier pada konsentrasi NaCl 0,1%, 1% dan 3,5%.
5. Model ini berlaku pada rentang konsentrasi NaCl 0,1% sampai dengan 3,5% pada daerah temperatur operasi 30°C sampai dengan 90°C.

5.2 Saran

1. Berdasarkan hasil penelitian maka penulis menyarankan agar dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh laju alir dan pH terhadap laju korosi yang terjadi.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh gas H₂S yang terlarut didalam fluida yang mengandung ion klorida di dalam sistem perpipaan minyak dan gas bumi.

DAFTAR ACUAN

1. Trethewey, Kenneth R., "Corrosion, for students of Science and Engineering", Longman Group, UK Limited 1988.
2. Uhlig, Herbert H., "Corrosion and Corrosion Control", Canada 1985.
3. De Waard, C-Milliams, DE., "Carbonic Acid Corrosion of Steel", Corrosion Vol 31 No.5, NACE International, May 1975
4. Norsok Standard M-506, CO₂ Corrosion Rate Calculation Model, Norwegian Technology Standards Institution, Norway, 1988
5. Chiyoda standard job specification, *Material Selection Criteria*, Oct 07, 1999
6. Pendidikan dan Pelatihan Inspektur Korosi, Pengantar Metalurgi dan Pengembangan Bahan, Balai Besar Bahan dan Barang Teknik, Bandung 2002
7. NACE MR0175, "Petroleum and Natural Gas Industries-Materials for use in H₂S-Containing Environments in Oil and Gas Production"
8. Smith, William F., "Principles of Material Science and Engineering", Mc Graw-Hill Book Co., Singapore 1986.
9. T.L. Ladwein, J.M. Drugli, K. Hollen., "The Chlorine and Sulphide Stress Corrosion Cracking Behaviour of the High Strength Superaustenitic Stainless Steel UNS S34565" Corrosion Paper No.00148, NACE International, 2000.
10. M. Ueda., "2006 F.N. Speller Award Lecture : Development of Corrosion Resistant Alloy for the Oil and Gas Industry-Based on spontaneous Passivity Mechanism" Corrosion, 62, 10, 2006.

11. Rhodes P.R., Skogsberg L.A., "Pushing the Limits of Metals in Corrosive Oil and Gas Well Environment", Corrosion, 63, 1, 2007.
12. J. Klower, H. Scherkmann, R. Popperling., "H₂S Resistant Materials for Oil & Gas Production", Paper No. 01004, Corrosion 2001, NACE International, 2001.
13. S.A McCoy, B.C. Puckett., "High Performance Age-Hardenable Nickel Alloys Solve Problem in Sour Oil and Gas Service", Stainless Steel World Article, 2002.
14. Callister, William D., "Materials Science and Engineering an Introduction", Canada 1994.
15. <http://naio.kcc.hawaii.edu/chemistry/everyday-corrosion.html>
16. <http://www.mos.org/sln/sem>
17. <http://www.webelements.com>
18. ASTM Standard G-31, "Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals"
19. API 945, "Avoiding Environmental Cracking in Amine Units"

LAMPIRAN A

HASIL PENGUKURAN pH, TDS dan E_{korr}

- A. Hasil pengukuran untuk harga pH, TDS dan potensial korosi E_{korr} sebelum proses perendaman pada baja karbon A106

Konsentrasi NaCl pada Larutan (%)	Larutan NaCl tanpa penjenjihan CO ₂			Larutan NaCl dengan penjenjihan CO ₂		
	Baja Karbon A106			Baja Karbon A106		
	pH	TDS (ppt)	Ekorr (V)	pH	TDS (ppt)	Ekorr (V)
0.1	7.72	0.87	-0.621	5.55	0.84	-0.606
1	7.71	3.59	-0.683	5.28	3.51	-0.611
3.5	7.7	9.03	-0.691	4.88	8.62	-0.633

- B. Hasil pengukuran untuk harga pH, TDS dan potensial korosi E_{korr} sesudah proses perendaman pada baja karbon A106

Konsentrasi NaCl pada Larutan (%)	Larutan NaCl tanpa penjenjihan CO ₂			Larutan NaCl dengan penjenjihan CO ₂		
	Baja Karbon A106			Baja Karbon A106		
	pH	TDS (ppt)	Ekorr (V)	pH	TDS (ppt)	Ekorr (V)
0.1	8.01	1.02	-0.301	6.96	0.94	-0.244
1	8.23	3.76	-0.374	6.78	3.85	-0.294
3.5	8.29	9.95	-0.325	6.74	9.25	-0.311

LAMPIRAN B
TABEL HARGA F_{PREN} DAN KARBON EKIVALEN

No	UNS	Name	C max w% C	Cr max w% C	Ni max w% C	Mn max w% C	Si max w% C	Mo max w% C	N max w% C	P max w% C	S max w% C	Fpren	CE
Austenitic Stainless Steels													
1	J92500	CF-3	0.03	21	12	1.5	2	0	0	0.04	0.04	21	1.42
2	J92600	CF-8	0.08	21	11	1.5	2	0	0	0.04	0.04	21	1.46
3	J92800	CF-3M	0.03	21	13	1.5	1.5	3	0	0.04	0.04	30.9	1.62
4	J92843	-	0.35	21	11	1.5	1	1.75	0	0.04	0.04	28.425	6.08
5	J92900	CF-8M	0.08	21	12	1.5	2	3	0	0.04	0.04	30.9	1.67
6	S20100	201 SS	0.15	18	5.5	7.5	1	0	0.25	0.06	0.03	22	1.55
7	S20200	202 SS	0.15	19	6	10	1	0	0	0.06	0.03	19	1.73
8	S20500	205 SS	0.25	18	1.75	15.5	1	0	0	0.06	0.03	18	6.72
9	S20910	22-13-5	0.06	23.5	13.5	6	1	3	0.4	0.04	0.03	39.8	1.99
10	S30200	302 SS	0.15	19	10	2	1	0	0	0.045	0.03	19	1.40
11	S30400	304 SS	0.08	20	10.5	2	1	0	0	0.045	0.03	20	1.39
12	S30403	304L SS	0.03	20	12	2	1	0	0	0.045	0.03	20	1.36
13	S30500	305 SS	0.12	19	13	2	1	0	0	0.045	0.03	19	1.42
14	S30800	308 SS	0.08	21	12	2	1	0	0	0.045	0.03	21	1.46
15	S30900	309 SS	0.2	24	15	2	1	0	0	0.045	0.03	24	6.50
16	S31000	310 SS	0.25	26	22	2	1.5	0	0	0.045	0.03	26	7.50
17	S31600	316 SS	0.08	18	14	2	1	3	0	0.045	0.03	27.9	1.55
18	S31603	316L SS	0.03	18	14	2	1	3	0	0.045	0.03	27.9	1.50
19	S31635	316Ti SS	0.08	18	14	2	1	3	0.1	0.045	0.03	29.5	1.55
20	S31700	317 SS	0.08	20	15	2	1	4	0	0.045	0.03	33.2	1.73
21	S32100	321 SS	0.08	19	12	2	1	0	0	0.045	0.03	19	1.36
22	S34700	347 SS	0.08	19	13	2	1	0	0	0.045	0.03	19	1.38
23	S38100	18-18-2	0.08	19	18.5	2	2.5	0	0	0.03	0.03	19	1.52
Ferritic Stainless Steels													
1	S40500	405 SS	0.08	14.5	0	1	1	0	0	0.04	0.03	14.5	0.89
2	S40900	409 SS	0.08	11.75	0.5	1	1	0	0	0.045	0.045	11.75	0.76
3	S43000	430 SS	0.12	18	0	1	1	0	0	0.04	0.03	18	1.10
4	S43400	434 SS	0.12	18	0	1	1	1.25	0	0.04	0.03	22.125	1.19
5	S43600	436 SS	0.12	18	0	1	1	1.25	0	0.04	0.03	22.125	1.19
6	S44200	442 SS	0.2	23	0	1	1	0	0	0.04	0.03	23	5.13
7	S44400	18-Feb	0.025	19.5	1	1	1	2.5	0.025	0.04	0.03	28.15	1.27
8	44500	-	0.02	21	0.6	1	1	0	0.03	0.04	0.012	21.48	1.19
9	S44600	446 SS	0.2	27	0	1.5	1	0	0.25	0.04	0.03	31	6.02
10	S44626	26-1 Ti	0.06	27	0.5	0.75	0.75	1.5	0.04	0.04	0.02	32.59	1.59
11	S44627	26-1 Cb	0.01	27	0.5	0.4	0.4	1.5	0.015	0.02	0.02	32.19	1.51

12	S44635	26-44	0.025	26	4.5	1	0.75	4.5	0.035	0.04	0.03	41.41	1.78
13	S44660	SC-1	0.025	27	3.5	1	1	3.5	0.035	0.04	0.03	39.11	1.75
14	S44700	29-4	0.01	30	0.15	0.3	0.2	4.2	0.02	0.025	0.02	44.18	1.82
15	S44735	29-4C	0.03	30	1	1	1	4.2	0.045	0.04	0.03	44.58	1.91
16	S44800	29-4-2	0.01	30	2.5	0.3	0.2	4.2	0.02	0.025	0.02	44.18	1.86
Martensitic Stainless Steels													
1	S41000	410	0.15	13.5	0	1	1	0	0	0.04	0.03	13.5	0.91
2	S41425	SW 13Cr	0.05	15	7	1	0.5	2	0.12	0.02	0.005	23.52	1.13
3	S41426	13CRS	0.03	13.5	6.5	0.5	0.5	3	0	0.02	0.005	23.4	1.06
4	S41427	-	0.03	13.5	6	1	0.5	2.5	0	0.02	0.005	21.75	1.04
5	S42000	420	0.15	14	0	1	1	0	0	0.03	0.03	14	0.93
6	S42400	F6 NM	0.06	14	4.5	1	1	0.7	0	0.03	0.03	16.31	0.97
7	S42500	15Cr	0.2	16	2	1	1	0.7	0.2	0.01	0.01	21.51	4.01
8	J91150	CA 15	0.15	14	1	1	1.5	0.5	0	0.04	0.04	15.65	1.00
9	J91151	CA 15M	0.15	14	1	1	1	1	0	0.04	0.04	17.3	1.02
10	J91540	CA6 NM	0.06	14	4.5	1	1	1	0	0.03	0.03	17.3	0.99
11	-	420 M	0.22	14	0.5	1	1	0	0	0.01	0.01	14	3.44
12	K90941	9Cr 1Mo	0.15	10	0	0.6	1	1.1	0	0.03	0.03	13.63	0.79
13	-	L80 13Cr	0.22	14	0.5	1	1	0	0	0.01	0.01	14	3.44
Highly-Alloyed Austenitic Stainless Steels													
1	S31254	254 Smo	0.02	20.5	18.5	1	0.8	6.5	0.22	0.03	0.01	45.47	1.91
2	J93254	Cast 254 Smo	0.025	20.5	19.7	1.2	1	7	0.24	0.45	0.01	47.44	1.99
3	J95370	-	0.03	25	18	9	0.5	5	0.8	0.03	0.01	54.465	2.41
4	S31266	B66	0.03	25	24	2	1	7	0.6	0.035	0.02	62.65	2.43
5	S32200	NIC 25	0.03	23	27	1	0.5	3.5	0	0.03	0.005	34.55	1.93
6	S32654	654 Smo	0.02	25	23	4	0.5	8	0.55	0.03	0.005	60.2	2.43
7	N08007	CN-7M	0.07	22	30.5	1.5	1.5	3	0	0	0	31.9	2.20
8	N08020	20 Cb3	0.07	21	38	2	1	3	0	0.045	0.035	30.9	2.29
9	N08320	20Mod	0.05	23	27	2.5	1	6	0	0.04	0.03	42.8	2.21
10	N08367	Al6XN	0.03	22	25.5	2	1	7	0	0.04	0.04	45.1	2.16
11	N08904	904L	0.02	23	28	2	1	5	0	0.045	0.035	39.5	2.20
12	N08925	25-6Mo	0.02	21	26	1	0.5	7	0.2	0.045	0.03	47.3	2.11
13	N08926	1925hMo	0.02	21	26	2	0.5	7	0.25	0.03	0.01	48.1	2.16
Duplex Stainless Steels													
1	S31200	44LN	0.03	26	6.5	2	1	2	0.2	0.045	0.03	35.8	1.71
2	S31260	DP-3	0.03	26	7.5	1	0.75	3.5	0.3	0.03	0.03	43.175	1.80
3	S31803	2205	0.03	23	6.5	2	1	3.5	0.2	0.03	0.02	37.75	1.66
4	S32404	U 50	0.04	22.5	8.5	2	1	3	0.2	0.03	0.01	35.6495	1.74
5	S32520	52N+	0.03	26	8	1.5	0.8	5	0.35	0.035	0.02	48.1	2.05
6	S32550	255	0.04	27	6.5	1.5	1	4	0.25	0.04	0.03	44.2	2.00
7	S32750	2507	0.03	26	8	1.2	0.8	4	0.32	0.035	0.02	44.32	1.82
8	S32760	Z100	0.03	26	8	1	1	4	0.3	0.03	0.01	45.65	1.86
9	S32803	2803Mo	0.01	29	4	0.5	0.5	2.5	0.025	0.02	0.005	37.65	1.74
10	S32900	329 SS	0.2	28	5	1	0.75	2	0	0.04	0.03	34.6	6.83

11	S32950	7Mo Plus	0.03	29	5.2	2	0.6	2.5	0.35	0.035	0.01	42.85	1.85
12	S39274	DP3W	0.03	26	8	1	0.8	3.5	0.32	0.03	0.02	46.795	1.81
13	S39277	AF918	0.025	26	8	0	0.8	4	0.33	0.025	0.002	46.46	1.85
14	J93370	CD4MCu	0.04	26.5	6	1	1	2.25	0	0.04	0.04	33.925	1.86
15	J93345	Escoloy	0.08	27	11	1	0	4.5	0.3	0.04	0.025	46.65	1.96
16	J93380	Z100	0.03	26	8.5	1	1	4	0.3	0.03	0.025	45.65	1.87
17	J93404	958	0.03	26	8	1.5	1	5	0.3	0	0	47.3	1.91
Precipitation Hardened Stainless Steels													
1	S66286	A286	0.08	16	27	2	1	1.5	0	0.04	0.03	20.95	1.61
2	S15500	15-5 PH	0.07	15.5	5.5	1	1	0	0	0.04	0.03	15.5	1.25
3	S15700	PH 15-7Mo	0.09	16	7.75	1	1	3	0	0.04	0.03	25.9	1.30
4	S17400	17-4 PH	0.07	17.5	5	1	1	0	0	0.04	0.03	17.5	1.36
5	S45000	450	0.05	16	7	1	1	1	0	0.03	0.03	19.3	1.20
Precipitation Hardened Nickel Base Alloy													
1	N06625	625	0.1	23	70	0.5	0.5	10	0	0.015	0.015	56	3.13
2	N07031	31	0.06	23	58	0.2	0.2	2.3	0	0.015	0.015	30.59	2.44
3	N07048	48	0.015	23.5	70	1	0.1	7	0	0.02	0.01	46.6	2.99
4	N07090	90	0.13	21	70	1	0	0	0	0	0	21	2.40
5	N07626	-	0.05	23	70	0.5	0.5	10	0.05	0.02	0.015	56.8	3.10
6	N07716	625 Plus	0.03	22	63	0.2	0.2	9.5	0	0.015	0.01	53.35	2.83
7	N07718	718	0.08	21	55	0.35	0.35	3.3	0	0.015	0.015	31.89	2.34
8	N07725	725	0.03	22.5	59	0.35	0.2	9.5	0	0.015	0.01	53.85	2.80
9	N07773	PH3	0.03	27	60	1	0.5	5.5	0	0.03	0.01	45.15	2.81
10	N07924	-	0.02	22.5	52	0.2	0.2	7	0.2	0.03	0.005	48.8	2.70
11	N09777	PH7	0.03	19	42	1	0.5	5.5	0	0.03	0.01	37.15	2.11
12	N09925	925	0.03	23.5	46	1	0.5	3.5	0	0	0.03	35.05	2.42
13	N05500	K-500	0.25	0	70	1.5	0.5	0	0	0	0	0	5.45
14	N07750	X-750	0.08	17	70	1	0.5	0	0	0	0.01	17	2.19

LAMPIRAN C

PERHITUNGAN LAJU KOROSI UNTUK MODEL KOREKSI NaCl

Model koreksi untuk A106 dihitung berdasarkan persamaan 4.14, 4.15 dan 4.16 dimana rentang suhu yang dimasukkan antara 30°C sampai dengan 200°C. Sebagai contoh dilakukan perhitungan laju korosi untuk baja karbon A106 sebagai berikut:

Konsentrasi NaCl = 0,1%

Suhu = 30°C

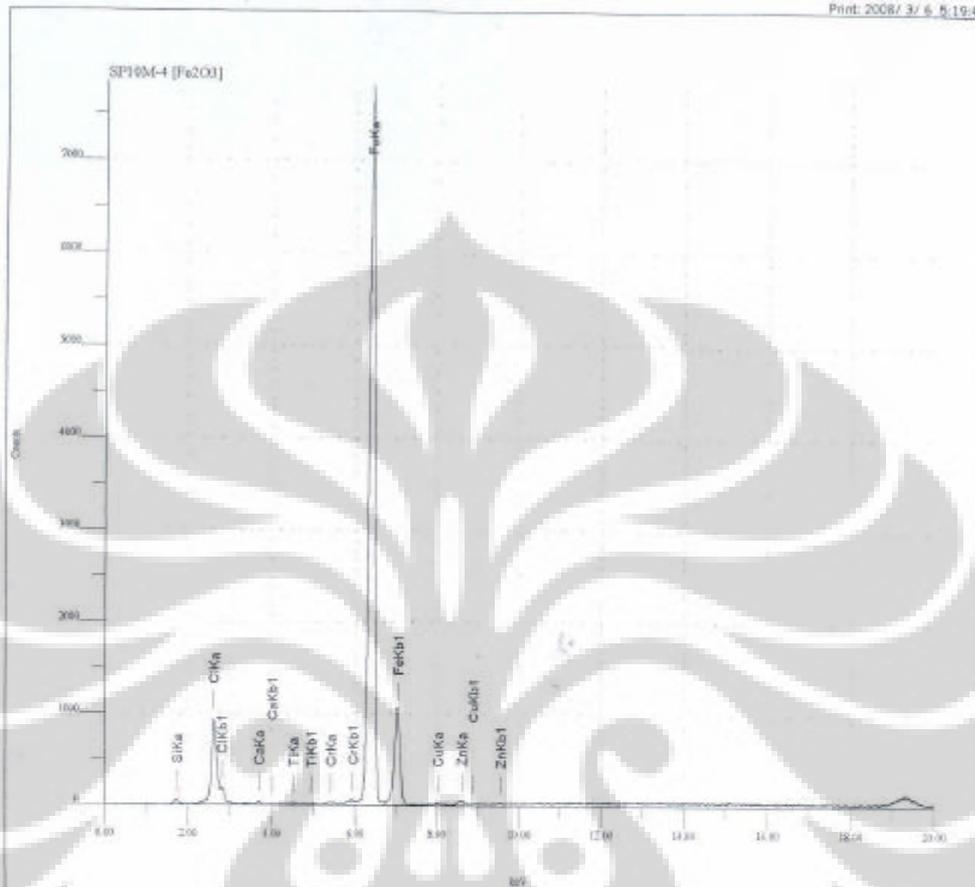
$$\begin{aligned} CR_{(NaCl\ Dissv.)} &= 0,00033\ y && (4.14) \\ &= 0,00033 \times 30 \\ &= 0,0099\ mm / year \end{aligned}$$

Hasil dari perhitungan laju korosi seluruhnya pada baja karbon A106 ditabelkan pada tabel 1. dibawah:

Tabel 1. Perhitungan laju korosi untuk model koreksi

NaCl (%)	Suhu	Value- y [A106]
0.1	30	0.0099
0.1	40	0.0132
0.1	50	0.0165
0.1	60	0.0198
0.1	70	0.0231
0.1	80	0.0264
0.1	90	0.0297
0.1	100	0.033
0.1	110	0.0363
0.1	120	0.0396
0.1	130	0.0429
0.1	140	0.0462

0.1	150	0.0495
0.1	160	0.0528
0.1	170	0.0561
0.1	180	0.0594
0.1	190	0.0627
0.1	200	0.066
1	30	0.0195
1	40	0.026
1	50	0.0325
1	60	0.039
1	70	0.0455
1	80	0.052
1	90	0.0585
1	100	0.065
1	110	0.0715
1	120	0.078
1	130	0.0845
1	140	0.091
1	150	0.0975
1	160	0.104
1	170	0.1105
1	180	0.117
1	190	0.1235
1	200	0.13
3.5	30	0.036
3.5	40	0.048
3.5	50	0.06
3.5	60	0.072
3.5	70	0.084
3.5	80	0.096
3.5	90	0.108
3.5	100	0.12
3.5	110	0.132
3.5	120	0.144
3.5	130	0.156
3.5	140	0.168
3.5	150	0.18
3.5	160	0.192
3.5	170	0.204
3.5	180	0.216
3.5	190	0.228
3.5	200	0.24



File Name : D:\USER\MARET08\SP10M-4.SPC Acq. Time: 2008/ 3/ 6 3:44:15
 Sample Name: Fe2O3
 Memo : Sofyan
 Acq. Cond.: Voltage: 30.0kV Current: 0.156mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Si,Cl,Ca,Ti,Cr,Fe,Cu,Zn

Num	Atom/Chem Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
1	14 Si	1.3968	2.5798	0.0013565	483	0.4074
2	17 Cl	10.8215	15.8335	0.0224635	9976	0.1823
3	20 Ca	0.4146	0.5366	0.0008316	422	0.1817
4	22 Ti	0.1818	0.1969	0.0003357	294	0.1261
5	24 Cr	0.1137	0.1134	0.0002437	279	0.0913
6	26 Fe	86.0174	79.8966	0.1084240	138343	0.1536
7	29 Cu	0.2927	0.2389	0.0001850	247	0.3428
8	30 Zn	0.7615	0.6043	0.0005304	706	0.3267

