

DISERTASI

**DESAIN SISTEM AUTOMASI PERLINDUNGAN KATODIK
PADA *STAINLESS STEEL* 303 DI LINGKUNGAN AIR LAUT**

*Design of Cathodic Protection Automation System on Stainless Steel
303 in Seawater Environment*

Hamsir

D043172001



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK MESIN
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN DISERTASI

**DESAIN SISTEM AUTOMASI PERLINDUNGAN KATODIK
PADA *STAINLESS STEEL* 303 DI LINGKUNGAN AIR LAUT**

Disertasi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar doktor
Program Studi Ilmu Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

Hamsir

D043172001

kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

DISERTASI

**DESAIN SISTEM AUTOMASI PERLINDUNGAN KATODIK PADA
STAINLESS STEEL 303 DI LINGKUNGAN AIR LAUT**

**HAMSIR
NIM D043172001**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 07 Februari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Promotor

Prof.Dr.Ir. Onhy S. Sutresman, MT
NIP.195206071978021001

Co-Promotor

Co-Promotor

Dr.H.Hairul Arsyad, ST.,MT
NIP.19750322 200212 1 001

Dr. Muhammad Syahid, ST.,MT
NIP.19770707 200501 1 001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof.Dr.Eng.Ir.Muhammad Isran Ramli,
ST.,MT.,IPM.,ASEAN.Eng
NIP.19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi S3
Ilmu Teknik Mesin



Dr.Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST.,M.Sc
NIP.19760216 201012 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Hamsir
Nomor mahasiswa : D043172001
Program studi : S3 Teknik Mesin

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Desain Sistem Automasi Perlindungan Katodik Pada Baja SS 303 Di Lingkungan Air Laut” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof.Dr.Ir. Onny S. Sutresman, MT sebagai Promotor, Dr.H.Hairul Arsyad, ST.,MT sebagai co-promotor-1 dan Dr. Muhammad Syahid, ST.,MT sebagai co-promotor-2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Jurnal (*Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (12 (120)), 13–21, dan 10.15587/1729-4061.2022.267264)) sebagai artikel dengan judul “*Suppression of Corrosion on Stainless Steel 303 With Automatic Impressed Current Cathodic Protection (A-ICCP) Method In Simulated Seawater*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 07 - 02 -2023

Yang menyatakan


Hamsir

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmatnya sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.

Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan disertasi, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka disertasi ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Prof.Dr.Ir. Onny S. Sutresman, MT sebagai promotor, Dr.H.Hairul Arsyad, ST.,M.T sebagai co-promotor- 1, dan Dr. Muhammad Syahid, ST.,MT co-promotor-2.
2. Rektor universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program doktor serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
3. Bapak Maman yang banyak membantu pengujian sampel penelitian, di Laboratorium Batan Serpong.
4. Kepada Bapak Yantovita Ganjang,M.M, saya mengucapkan terima kasih atas atas dukungannya baik selama menempuh program pendidikan doktor.
5. Ketua Yayasan STT Migas Balikpapan dan Ketua STT Migas Balikpapan.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada istri dan anak-anak saya tercinta atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Penulis

Hamsir

ABSTRAK

Hamsir. Desain Sistem Automasi Perlindungan Katodik Pada *Stainless Steel* 303 Di Lingkungan Air Laut. (dibimbing oleh **Onny Sutresman, Hairul Arsyad, Muhammad Syahid**).

Korosi merupakan peristiwa alam yang terjadi pada logam yang berubah menjadi senyawa logam dan kehilangan sifat-sifatnya akibat pengaruh lingkungan sekitarnya. Lingkungan air laut merupakan lingkungan yang sangat korosif. Sehingga diperlukan suatu metode untuk dapat mengontrol laju korosi. Proteksi katodik arus paksa (Impressed Current Cathodic Protection/ICCP), merupakan metode yang efektif untuk mengendalikan laju korosi. Namun kendala di lapangan adalah pengendalian potensi proteksi ICCP yang jauh dari area stabil (imunitas) yaitu -0.800 VAg/AgCl hingga batas taman -1.100 VAg/AgCl . Pada dasarnya, penelitian ini mengusulkan sebuah desain ICCP yang dapat mengontrol potensi perlindungan di kawasan taman yang stabil (imunitas) secara otomatis. Pada penelitian ini sampel baja SS 400 dan SS 303 serta larutan NaCl digunakan sebagai simulasi air laut. Larutan NaCl yang digunakan bervariasi yaitu 2,7‰, 3,1‰, dan 3,5‰ dengan kondisi suhu 28°C dan 38°C . Kemudian dilakukan pengujian morfologi untuk mengetahui karakteristik laju korosi secara kualitatif. Pengurangan berat sampel digunakan untuk menentukan laju korosi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proteksi katodik arus paksa dapat secara otomatis mengontrol potensial proteksi pada area stabil (Imunitas) sebesar $-0,800 \text{ Volt}$ hingga $-1,100 \text{ Volt}$ dengan elektroda Ag/AgCl sebagai acuan sehingga laju korosi dapat dikontrol.

Kata Kunci: Korosi, , katodik proteksi, sistem auto.

ABSTRACT

Hamsir. Design of Cathodic Protection Automation System on Stainless Steel 303 in Seawater Environment. **(supervised by Onny Sutresman, Hairul Arsyad, Muhammad Syahid).**

Corrosion is a natural process that occurs in metals that turn into metal compounds and lose their properties due to the influence of the surrounding environment. The seawater environment is very corrosive environment. So we need a method to be able to control the corrosion rate. Forced current cathodic protection (Impressed Current Cathodic Protection/ICCP), is an effective method for controlling the corrosion rate. However, the problem in the field is controlling the potential for ICCP protection which is far from the stable area (immunity), namely $-0.800 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ to the park limit of $-1.100 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$. Basically, this research proposes an ICCP design that can control the potential protection in stable (immunity) area parks automatically. In this study steel samples, SS 400 and SS 303, and NaCl solution were used as seawater simulations. The NaCl solution used varies, namely 2.7‰, 3.1‰, and 3.5‰ with temperature conditions of 28°C and 38°C . Then performed morphological testing to determine the characteristics of the corrosion rate qualitatively. A reduction in sample weight is used to determine the corrosion rate. The results showed that forced current cathodic protection can automatically control the protection potential in a stable area (Immunity) of -0.800 Volts to -1.100 Volts with Ag/AgCl electrodes as a reference so that the corrosion rate can be controlled.

Keyword: Corrosion, Cathodic Protection, auto

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SINGKATAN, ISTILAH, DAN LAMBANG	xiv
BAB I PENDAHULUAN UMUM	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TOPIK I	7
2.1 Abstrak	7
2.2 Pendahuluan	8
2.3 Metodologi Penelitian	11
2.4 Hasil dan Pembahasan	14
2.5 Kesimpulan	19
2.6 Daftar Pustaka	20
BAB III TOPIK II	22
3.1 Abstrak	22

3.2 Pendahuluan	23
3.2 Metodologi Penelitian	25
3.3 Hasil dan Pembahasan	31
3.4 Kesimpulan	39
3.5 Daftar Pustaka	40
BAB IV TOPIK III	42
4.1 Abstrak	42
4.2 Pendahuluan	43
4.2 Metodologi Penelitian	47
4.3 Hasil dan Pembahasan	49
4.4 Kesimpulan	57
4.5 Daftar Pustaka	58
BAB V PEMBAHASAN UMUM	62
5.1 Percobaan I : Pemetaan Current Density dan Kurva Polarisasi pada sampel <i>Mild Steel</i> (MS) 400 dan <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 menggunakan pengujian sel tiga elektroda menggunakan larutan NaCl 2,7 ‰; 3,1 ‰ dan 3,5 ‰ pada temperatur 28°C dan 38°C	62
5.2 Percobaan II : Sistem <i>Rectifier Direct Current</i> (Dc) Penyearah DC Secara Manual Dan Otomatis Untuk Proteksi Katodik Baja Tahan Karat SS 303 Di Salinitas 3,5 ‰	62
5.3 Sistem <i>Rectifier Direct Current</i> (Dc) Penyearah DC Secara Otomatis Untuk Proteksi Katodik Baja SS 303 di Salinitas 2,7 ‰; 3,1 ‰ Dan 3,5 ‰	63
BAB VI KESIMPULAN UMUM	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi kimia sampel Stainless Steel (SS) 303	14
Tabel 2.2 Komposisi kimia sampel Mild Steel (MS) 400.....	14
Tabel 2.3 Tabel laju korosi sampel Mild Steel (MS) 400 pada temperatur 28°C.	16
Tabel 2.4 Tabel laju korosi sampel Mild Steel (MS) 400 pada temperatur 38°C.	16
Tabel 2.5 Tabel Laju Korosi sampel Stainless Steel (SS) pada temperatur 28°C..	16
Tabel 2.6 Tabel Laju Korosi sampel Stainless Steel (SS) pada temperatur 28°C..	16

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 dan <i>Mild Steel</i> (MS) 400	12
Gambar 2.2 Cel electrode dan Potensiostat reference 600.....	14
Gambar 2.3 Sampel <i>Mild Steel</i> (MS) 400 yang direndam dalam larutan NaCl....	15
Gambar 2.4 Sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 yang direndam dalam larutan NaCl15	
Gambar 2.5 Kurva polarisasi <i>Mild Steel</i> (MS) 400 pada temperatur 28°C dan 38°C.....	15
Gambar 2.6 Kurva polarisasi <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 pada temperatur 28°C dan 38°C.....	16
Gambar 2.7 Laju korosi <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 dan <i>Mild Steel</i> (MS) 400	18
Gambar 3.1 Rangkaian <i>Rectifier Direct Current</i> (DC) Auto.....	26
Gambar 3.2 Sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303.....	27
Gambar 3.3 Instalasi pengujian ICCP secara Auto.....	29
Gambar 3.4 Instalasi pengujian ICCP secara Manual.....	30
Gambar 3.5 Tampilan <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 yang tidak ICCP , ICCP manual dan ICCP auto	31
Gambar 3.6 Grafik <i>weight loss</i> dengan variasi metode proteksi ICCP.....	32
Gambar 3.7 Grafik laju korosi dengan variasi metode proteksi ICCP.....	32
Gambar 3.8 Potensial proteksi <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 pada temperatur 28°C dan 38°C	30
Gambar 3.9 Potensial proteksi <i>Mild Steel</i> (MS) 400 pada temperatur 28°C dan 38°C.....	30
Gambar 3.10 Hasil pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	36
Gambar 3.10 Hasil pengujian <i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> (EDS)	38
Gambar 4.1 Rangkaian <i>Rectifier Direct Current</i> (DC) Auto.....	48
Gambar 4.2 Pemasangan ICCP Auto pada <i>Stainless Steel</i> (SS) 303	48
Gambar 4.3 Tampilan pengujian ICCP pada sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303	50
Gambar 4.4 Grafik <i>weight loss</i> pada sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303.....	51
Gambar 4.5 Grafik laju korosi pada sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 menggunakan ICCP Auto.....	51

Gambar 4.6 Laju korosi pada sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 menggunakan ICCP Auto dengan variasi temperatur	52
Gambar 4.7 Potensial sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 menggunakan ICCP Auto dengan variasi larutan NaCl	53
Gambar 4.8 Hasil pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	53
Gambar 4.9 Hasil pengujian <i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> (EDS) sebelum sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 direndam dalam larutan NaCl.....	53
Gambar 4.10 Hasil pengujian <i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> (EDS) sebelum sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 direndam dalam larutan NaCl 2,7 %.....	55
Gambar 4.11 Hasil pengujian <i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> (EDS) sebelum sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 direndam dalam larutan NaCl 3,1 %.....	55
Gambar 4.12 Hasil pengujian <i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> (EDS) sebelum sampel <i>Stainless Steel</i> (SS) 303 direndam dalam larutan NaCl 3,5 %.....	55

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran.1 Rangkaian rectifier auto	75
Lampiran.2 <i>Chemical result Stainless Steel</i> (SS) 303.....	76
Lampiran.3 <i>Chemical result Mild Steel</i> (MS) 400	77
Lampiran.4 Luaran Penelitian	78
Lampiran.5 Data sheet Integrated Circuit (IC) LM 324	79

DAFTAR SINGKATAN, ISTILAH DAN LAMBANG

Lambang/singkatan	Arti dan penjelasan
AgCl	Rumus senyawa kimia dari perak klorida
AC	Alternatif Current
CSE	Copper Sulfate Electrode
Cr	Cromium
DC	Direct Current
EDS	Energy Dispersive X – Ray Spectroscopy
Fe	Besi
ICCP	Impressed Current Cathodic Protection
mV	milli volt
NACE	National Association Corrosion Engineers
NaCl	Rumus senyawa kimia dari Natrium klorida
V	Volt
SEM	Scanning Electron Microscope
SCE	Saturated Calomel Electrode
O	Oksigen
ppt	Part per thousand
pH	Derajat keasaman
Ni	Nikel
Br	Bromine
Mg	Magnesium
Si	Silikon
C	Carbon
Ca	Calcium
mpy	mils per years
°C	Derajat Celcius
gr	gram

BAB I PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Penggunaan bahan logam dalam kehidupan manusia dan kegiatan industri sangat tinggi. Namun dari data statistik 1/3 dari kerusakan material logam itu disebabkan oleh korosi, bahkan berdampak langsung pada kerugian ekonomi sebesar 2% hingga 4% dari produk domestik (PDB) setiap negara (Hou et al. 2018). Korosi merupakan peristiwa alami yang terjadi pada logam yang berubah kembali menjadi senyawa logam dan kehilangan karakteristiknya terhadap pengaruh di lingkungan sekitarnya.

Perubahan iklim juga mempengaruhi dimana infrastruktur material baja terpapar. Hal tersebut dapat merubah beberapa faktor-faktor yang diketahui mempengaruhi terjadinya korosi seperti kadar CO₂, temperatur, kelembaban, salinitas dan polutan udara (Stewart and Bastidas-Arteaga 2019). Korosi merupakan suatu masalah yang dialami oleh bangunan-bangunan struktur pantai seperti dermaga, pelabuhan peti kemas, industri-industri migas lepas pantai baik yang berada pada daerah pesisir pantai, bahkan di laut. Karena sifat fisik logam dan sifat kimia tidak seragam, maka potensi yang berbeda tersebut menyebabkan terjadinya sel korosi lokal atau sel mikro yang terbentuk di air laut (Hou et al. 2018).

Korosi pada laut sangat rumit karena banyak faktor lingkungan yang mempengaruhi, seperti temperatur, kadar garam, oksigen yang larut, pH, gaya pukulan ombak dan arus, serta pencemaran biologi. Korosi laut juga dipengaruhi oleh

faktor-faktor yang berkaitan dengan logam (Sharma et al. 2018). Pengaruh salinitas dan pH yang terdapat pada air laut, sangat mempengaruhi tingkat penghantar arus katodik (Baturina, Strom, and Martin 2017)

Salah satu metode pengendalian laju korosi pada struktur material/logam yang berada di lingkungan air laut adalah katodik proteksi menggunakan sumber arus listrik yang dikenal dengan istilah *impressed current cathodic protection* (ICCP) (Janowski, et al., 2016). Metode ini telah banyak digunakan untuk melindungi material logam yang digunakan pada struktur bangunan dermaga, transportasi laut dan lainnya. Namun permasalahan yang sering timbul adalah kontrol potensial perlindungan pada material/logam tidak tercapai berdasarkan perubahan pada lingkungan sekitarnya. Sehingga laju korosi tidak dapat dikendalikan dengan maksimal. Secara umum range potensial optimum dari struktur baja adalah -805 mV sampai dengan -1000 mV dengan elektroda acuan Ag/AgCl ((Norske Veritas 2010). Tetapi range nilai potensial ini bisa berubah tergantung kondisi lingkungan. Kriteria untuk proteksi katodik dapat menekan laju korosi pada material baja dalam air laut yaitu mengatur potensial baja selalu dalam daerah yang stabil/immunity sebesar $-800V_{Ag/AgCl}$ sampai dengan $-1,100 V_{Ag/AgCl}$ (Googan 2020)(Kim, et al 2016). Selain itu dapat menimbulkan potensi osilasi yang merusak lapisan pelindung baja (Brenna, et al 2020).

(Pangrazzi, et al 1994) dalam pengujiannya menggunakan *power supply* sebagai sumber arus listrik pada proteksi katodik untuk perlindungan besi beton yang diletakan pada air laut secara vertikal. Hasil yang didapatkan dalam pengujian

tersebut pada potensial $0,72 V_{SCE}$ (saturated Calomel Electrode) terdapat kerusakan (*crack*) sepanjang 20 cm dan potensial $-0,85 V_{SCE}$ terdapat *crack* sepanjang 30 cm di lokasi korosi. Perendaman spesimen di lakukan selama 60 hari. Terjadinya penurunan nilai potensial pada hari ke-15.

(Sun et al. 2020) menguraikan penelitiannya pada material baja paduan direndam didalam laut dengan kedalaman 350 meter selama 14 hari. Menggunakan elektroda Ag/AgCl sebagai elektrode referensi. Menghasilkan potensial proteksi katodik $-0,695 V_{SCE}$ jauh dari kriteria standar (Rp0169, NACE Standard, 2002) menyatakan bahwa standarisasi potensial proteksi katodik pada stuktur baja tetap di lingkungan lepas pantai dengan faktor temperatur dan tekanan sebesar $-0,85 V_{SCE}$. Hasil $-0,695 V_{SCE}$ dipengaruhi oleh bertambahnya kedalam air laut, *hidrostatic pressure* dan temperature yang semakin menurun.

Selanjutnya (Kim, et al., 2016) dalam penelitiannya melakukan simulasi kecepatan air laut terhadap pengaruh nilai potensial perlindungan katodik. Dimana besar potensial awal yang digunakan sebesar $-800 mV_{SCE}$ ($-781 mV_{Ag/AgCl}$) standarisasi NACE. Adapun nilai potensial katodik yang diperoleh pada simulasi kecepatan aliran air laut yang berbeda mulai dari posisi 0 (m/s) = $-686 mV_{Ag/AgCl}$ ($-705 mV_{SCE}$), 2 (m/s) = $-536 mV_{Ag/AgCl}$ ($-555 mV_{SCE}$) dan 5 (m/s) = $-489 mV_{Ag/AgCl}$ ($-508 mV_{SCE}$). Sehingga jauh dari nilai potensial perlindungan katodik awal ditetapkan sebesar $-0,800 V_{SCE}$, juga merupakan rekomendasi dari NACE (*National Association Corrosion Engineers*).

Perlindungan katodik adalah teknik elektrokimia yang digunakan untuk mencegah atau mengurangi laju korosi pada struktur logam. Sistem elektrokimia membutuhkan anoda, katoda, rangkaian listrik dan elektrolit untuk menghantarkan arus fluks antara anoda dan katoda. Penerapan perlindungan katodik dapat dilakukan pada kondisi struktur yang ada di dalam tanah, terendam pada air atau struktur beton. sistem perlindungan katodik yang menggunakan sistem penyearah DC (*direct current*) atau yang dikenal dengan istilah *impressed current cathodic protection (ICCP)* untuk melindungi peralatan pengeboran pada sumur (Sharma, et al., 2018). Kelebihan dari sistem ICCP dapat didesain untuk tingkat fleksibilitas yang tinggi karena mempunyai rentang kapasitas arus yang luas dapat diatur baik secara manual maupun secara otomatis dengan merubah tegangan output sesuai dengan kebutuhan.

Penerapan teknik impressed current cathodic protection (ICCP) memberikan solusi yang baik dalam sistem pengendalian laju korosi, namun perlu mengoptimalkan kerapatan arus serta penyesuain kondisi lingkungan (Zhu, et al., 2018).

Dari beberapa penelitian diatas menunjukkan bahwa laju korosi disebabkan beberapa faktor yang mengakibatkan terjadinya korosi tersebut diantaranya temperatur, kadar garam (salinitas) dan kerapatan arus serta beda potensial. Sehingga penulis mencoba mengembangkan perlindungan katodik secara otomatis yang dapat mempertahankan potensial proteksi katodik pada material yang dilindungi sebesar $-0,800 V_{Ag/AgCl}$ sampai dengan batas $-1,100 V_{Ag/AgCl}$ untuk lingkungan air laut. Sehingga laju korosi pada material dapat dikendalikan dengan maksimal.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada rumusan masalah :

1. Bagaimana merancang proteksi katodik *impressed current cathodic protection* (ICCP) secara otomatis
2. Bagaimana Proteksi katodik ICCP otomatis dapat melindungi baja berdasarkan nilai potensial proteksi yang standar $-0,800 V_{Ag/AgCl}$ sampai dengan ambang batas $-1,100 V_{Ag/AgCl}$ di lingkungan air laut.
3. Bagaimana laju korosi dari spesimen SS 303 dapat dikendalikan dengan katodik proteksi sistem ICCP secara otomatis.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini adalah :

1. Merancang proteksi katodik *impressed current cathodic protection* (ICCP) secara otomatis
2. Mengendali laju korosi pada sampel SS 303 dengan perlindungan katodik ICCP secara otomatis.
3. Mengetahui fenomena laju korosi pada sampel SS 303

1.4 Batasan Penelitian

1. Sampel penelitian yang digunakana pada penelitian ini adalah *Mild Steel* (MS) dan *Stainless Steel* (SS) 303

2. Media air laut sebagai elektrolit yang digunakan pada proses pengujian proteksi katodik ICCP adalah larutan NaCl dengan ukuran 2,7 ‰, 3,1‰ dan 3,5‰

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan diharapkan dari penelitian ini adalah :

1. Manfaat Teoritis

Apabila proses pengendalian korosi di lingkungan air laut dapat dikendalikan dengan proteksi katodik dengan sistem *impressed current cathodic protection* yang bekerja secara otomatis. Dimana besaran potensial proteksi katodiknya dipertahankan pada nilai $-0,800 V_{Ag/AgCl}$ sampai dengan ambang batas $-1,100 V_{Ag/AgCl}$.

2. Manfaat Praktis

Apabila sistem proteksi katodik yang bekerja secara otomatis ini, dapat beroperasi dengan baik, sehingga laju korosi dapat dikendalikan dengan baik, maka akan menjadi salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengendalikan korosi bagi struktur-struktur bangunan yang ada di lingkungan laut bahkan yang berada dilepas pantai.

BAB II. TOPIK I

Pemetaan *Current Density* dan Kurva Polarisasi pada *Mild Steel* (MS) 400 dan *Stainless Steel* (SS) 303 menggunakan pengujian sel tiga elektroda menggunakan larutan NaCl 2,7 ‰; 3,1 ‰ dan 3,5 ‰ pada temperatur 28°C dan 38°C.

2.1 Abstrak

Korosi merupakan masalah serius yang dihadapi oleh industri yang berlokasi dekat dengan lingkungan pesisir. Penggunaan baja tahan karat dan baja karbon merupakan material yang banyak digunakan pada struktur bangunan industri. Di lingkungan pesisir, laju korosi sangat tinggi, yang diantaranya dipengaruhi oleh perubahan salinitas dan temperatur. Penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh salinitas dan temperatur terhadap laju korosi baja MS 400 dan SS 303 menggunakan pengujian sel tiga elektroda. Larutan NaCl yang digunakan dengan ukuran 2,7 ‰, 3,1 ‰ dan 3,5 ‰. Temperatur yang digunakan adalah 28°C dan 38°C. Hasil pengujian menunjukkan nilai arus korosi (I_{corr}) tertinggi pada temperatur 38°C dengan NaCl 3,5 ‰ sebesar 4.26×10^{-7} Amper untuk Mild Steel 400 dan Stainless Steel 303 sebesar 1.32×10^{-6} Amper. Selanjutnya semakin besar temperatur dan salinitas maka tingkat korosi akan semakin meningkat pula. Laju korosi tertinggi terjadi pada salinitas (NaCl) 3,5 ‰ dengan temperatur 38°C, laju korosi MS 400 sebesar 0,6930 mpy dan SS 303 sebesar 0,5851 mpy.

Kata Kunci : *Current Density*, Polarisasi, Laju Korosi, NaCl, Salinitas dan Temperatur

2.2 Pendahuluan

National Association of Corrosion Engineers (NACE) melakukan studi tentang kerugian langsung yang diakibatkan korosi memiliki nilai yang sangat tinggi, diperkirakan sekitar 276 milyar dolar AS atau senilai dengan 3,1 % dari *gross domestic product (GDP)*(Ahmad 2006). Indonesia memiliki kawasan perairan dan lepas pantai yang sangat luas. Struktur lepas pantai , dermaga dan bangunan yang berada di lingkungan laut sangat rentan terhadap kerusakan korosi. Akibat yang ditimbulkan oleh korosi menyebabkan beberapa kecelakaan seperti kerusakan struktur jembatan, keruntuhan struktur dermaga, kegagalan pipa dan kecelakaan lainnya. Adapun lingkungan korosi di lingkungan laut terdiri dari lima zona yaitu zona atmosfer, zona percikan, zona pasang surut dan zona perendaman penuh dan zona area berlumpur (John *et al.* 1995)

Ketahanan korosi dari suatu logam dalam air laut tergantung pada kondisi yang terkandung dalam air laut seperti salinitas, temperatur, oksigen yang terlarut, pH, biofouling (Toloei, *et al* 2013). Sedangkan kondisi material tergantung dari komposisi kimia, struktur dan keadaan permukaan (Zakowski *et al* 2014). Pengaruh salinitas dan pH yang terdapat pada air laut, sangat mempengaruhi tingkat penghantar arus katodik (Baturina, *et al* 2017)

Korosi merupakan peristiwa alami yang terjadi pada logam yang berubah kembali menjadi senyawa logam dan kehilangan karakteristiknya terhadap pengaruh di lingkungan sekitarnya.

Perubahan iklim juga mempengaruhi dimana infrastruktur material baja terpapar. Hal tersebut dapat merubah beberapa faktor-faktor yang diketahui mempengaruhi terjadinya korosi seperti kadar CO₂, temperatur, kelembaban, permukaan air laut, , salinitas dan polutan udara (Stewart, *et al* 2019)(Sharma, *et al* 2018). Dampak yang ditimbulkan oleh korosi terhadap bangunan struktur pantai seperti dermaga, pelabuhan peti kemas, industri-industri migas lepas pantai baik yang berada pada daerah pesisir pantai, bahkan di laut. Karena sifat fisik logam dan sifat kimia tidak seragam, maka potensi yang berbeda tersebut menyebabkan terjadinya sel korosi lokal atau sel mikro yang terbentuk di air laut (Hou, *et al* 2018).

Beberapa metode penanggulangan korosi yang populer digunakan di industri saat ini adalah metode pelapisan (*coating*) dan proteksi katodik. Pada kondisi tertentu seperti struktur material baja yang terpasang di area air laut menggunakan sistem kombinasi antara *coating* dan proteksi katodik merupakan pilihan yang terbaik untuk pengendalian laju korosi (Bardal, *et al* 2007). Suatu struktur dikatakan terproteksi korosi dengan baik jika nilai potensialnya sama atau lebih negative dari - 850 mV, jika menggunakan acuan elektroda Cu/CuSO₄. Sedangkan menggunakan elektroda acuan Ag/AgCl nilai potensialnya sebesar - 805 mV (Baxter, *et al.*, 2017) (Diedericks, *et al.*, 2019). Secara umum range potensial optimum dari struktur baja adalah - 805 mV sampai -1000 mV, dengan elektroda acuan Ag/AgCl (Skavås, *et al* 2019). Namun range nilai potensial ini bisa berubah-ubah tergantung kondisi lingkungan. Prinsip kerja proteksi katodik dengan cara menghubungkan struktur baja yang dilindungi dengan logam lain yang memiliki potensial rendah dikenal dengan istilah anoda korban/*Sacrificial Anode Cathodic Protection* (SACP) atau dengan mengalirkan arus listrik (*converter AC/DC*) yang dikenal dengan istilah *impressed current cathodic protection* (ICCP) (Janowski, *et al* 2016). Metode ini telah banyak digunakan untuk melindungi material logam yang digunakan pada struktur bangunan dermaga, transportasi laut dan lainnya.

Banyak faktor yang mempengaruhi keberhasilan dari perancangan proteksi katodik baik dengan tipe anoda korban (SACP) maupun tipe arus paksa (ICCP), antara lain kondisi lingkungan, identifikasi zona proteksi, kebutuhan arus proteksi, pemilihan anoda dan lainnya. Ada banyak penelitian ataupun studi yang dilakukan dalam rangka mendesain/ perencanaan proteksi katodik untuk struktur di laut maupun didarat.

Beberapa penelitian yang berhubungan dengan perencanaan proteksi katodik juga pernah dilakukan.

(Sun, *et al* 2020) menguraikan penelitiannya pada material baja paduan direndam didalam laut dengan kedalaman 350 meter selama 14 hari. Menggunakan elektroda Ag/AgCl sebagai elektrode referensi. Menghasilkan potensial proteksi katodik -0,695 V_{SCE} jauh dari kriteria standar (Rp0169, NACE

Standard, 2002) menyatakan bahwa standarisasi potensial proteksi katodik pada struktur baja tetap di lingkungan lepas pantai dengan faktor temperatur dan tekanan sebesar $-0,85 V_{SCE}$. Hasil $-0,695 V_{SCE}$ dipengaruhi oleh bertambahnya kedalaman air laut, *hidrostatic pressure* dan temperatur yang semakin menurun.

Selanjutnya (Kim, *et al* 2016) dalam penelitiannya melakukan simulasi kecepatan air laut terhadap pengaruh nilai potensial perlindungan katodik. Dimana besar potensial awal yang digunakan sebesar $-800 mV_{SCE}$ ($-781 mV_{Ag/AgCl}$) standarisasi NACE. Adapun nilai potensial katodik yang diperoleh pada simulasi kecepatan aliran air laut yang berbeda mulai dari $0 (m/s) = -686 mV_{Ag/AgCl}$ ($-705 mV_{SCE}$), $2 (m/s) = -536 mV_{Ag/AgCl}$ ($-555 mV_{SCE}$) dan $5 (m/s) = -489 mV_{Ag/AgCl}$ ($-508 mV_{SCE}$). Sehingga jauh dari nilai potensial perlindungan katodik awal ditetapkan sebesar $-0,800 V_{SCE}$, juga merupakan rekomendasi dari NACE (*National Association Corrosion Engineers*).

(Mahdavi, *et al* 2016) melakukan perancangan proteksi katodik menggunakan tiga sensor multi array yang terintegrasi dengan secara elektrokimia dengan mengatur potensial secara manual proteksi dari $-0,95 V_{Ag/AgCl}$ sampai $-1,40 V_{Ag/AgCl}$. Hasilnya didapatkan impedansi elektroda yang mengelilingi area cacat terus menurun pada potensial $-1,40 V_{Ag/AgCl}$ dalam periode perendaman selama 624 jam. Menyebabkan *coating* pada sampel terlepas. Namun pada potensial $-0,95 V_{Ag/AgCl}$ tidak terlihat adanya pelepasan *coating* pada sampel uji.

Dari beberapa penelitian diatas menunjukkan bahwa laju korosi disebabkan beberapa faktor yang mengakibatkan terjadinya korosi tersebut diantaranya temperatur, kadar garam (salinitas) dan kerapatan arus serta beda potensial. Sehingga penulis mencoba mengembangkan perlindungan katodik secara otomatis yang dapat mempertahankan potensial proteksi katodik pada material yang dilindungi sebesar $-0,800 V_{Ag/AgCl}$ hingga ambang batas $-1,100 V_{Ag/AgCl}$ untuk lingkungan air laut. Sehingga laju korosi pada material yang dilindungi dapat dikendalikan.

2.3 Metode Penelitian

A. Rancangan Penelitian

- Melakukan pemetaan terhadap *density current* dan kurva polarisasi katodik pada baja karbon rendah MS 400 dan SS 303 menggunakan variabel temperatur dan salinitas air laut.
- Melakukan pengujian proteksi katodik secara manual dengan sistem arus paksa menggunakan *rectifier DC (Direct Current)*. Selanjutnya dibandingkan dengan data pemetaan *density current* dan kurva polarisasi pada baja karbon MS 400 dan SS 303 .
- Pembuatan *rectifier DC (Direct Current)* otomatis untuk sistem proteksi katodik arus pada SS 303.

B. Bahan dan Alat Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Sampel MS 400
2. Sampel SS 303
3. Sampel *electrode reference (AgCl/AgCl)*
4. NaCl
5. Air Aquades

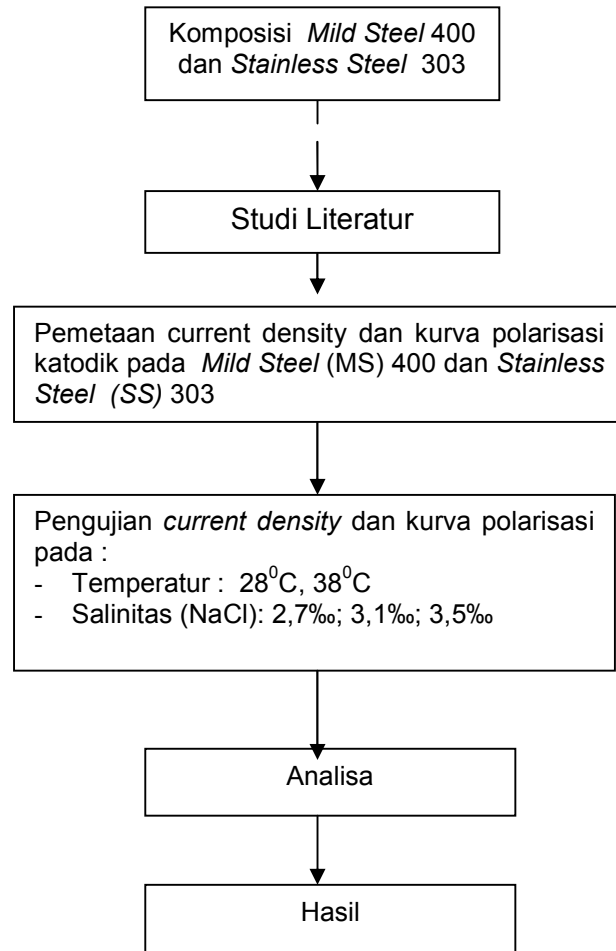
Alat:

1. *Cel electrode*
2. *Potensiostat reference 600S*

C. Variabel Penelitian

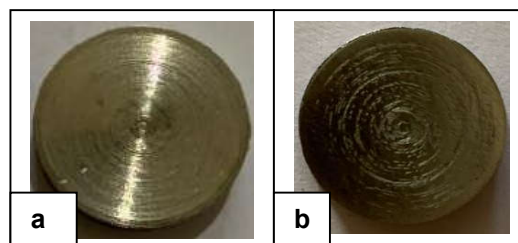
1. Kerapatan arus/ *Current density*
2. Kurva polarisasi katodik
3. Temperatur
4. Salinitas (NaCl)

D. Diagram Alir Penelitian



E. Sampel

Sampel yang digunakan adalah *Mild Steel* (MS) 400 dan *Stainless Steel* (SS) 303 .



Gambar 2.1 a) sampel SS 303 b) sampel MS 400

F. Prosedur pengujian korosi

Preparasi sampel

1. Sampel dipotong sesuai dengan bentuk dan ukuran diameter 12 mm, tebal 2-3 mm.
2. Pada bagian belakang sampel (salah satu permukaan) disolder dengan kawat tembaga diameter 1,25 mm, panjang 30 cm
3. Mounting sampel yang telah di solder sehingga pada permukaan yg akan diuji saja yg terekspos dengan lingkungannya (luas permukaan sekitar 1 cm²) dan mounting untuk mempermudah proses grinding dan poles
4. *Grinding* permukaan sampel dengan kertas amplas secara bertahap dari tingkat kekasaran tinggi hingga halus (grit 1200)
5. Lakukan pencucian dengan air demineral dan juga alkohol kemudian keringkan
6. Lakukan pengujian korosi dengan alat potensiostat
7. Kemudian untuk mengetahui komposisi kimia pada baja MS 400 dan SS 303 dikarakteristik dengan menggunakan teknik *X-Ray fluorescence (XRF)* yang dapat diamati pada **tabel 2.1** dan **tabel 2.2**

G. Pengujian korosi polarisasi

1. Masukkan larutan NaCl 2,7 %, NaCl 3,1 % dan NaCl 3,5 % secara bergantian yang akan digunakan, pada temperatur 28°C dan 38°C
2. Masukkan sampel dalam labu korosi
3. Masukkan elektroda kalomel dan pembanding (grafit) kedalam labu korosi sesuai tempatnya
4. Lakukan pencelupan sekitar 10 menit dan ukur potensial korosi terbuka hingga kondisi stabil
5. Lakukan pengujian laju korosi dengan metode tafel atau polarisasi
6. Pengujian tafel dilakukan pada tegangan awal -250 mV vs Eocp dan tegangan akhir +250 mV vs Eocp, scan rate 0,5 mv/detik
7. Diperoleh kurva potensial vs arus korosi

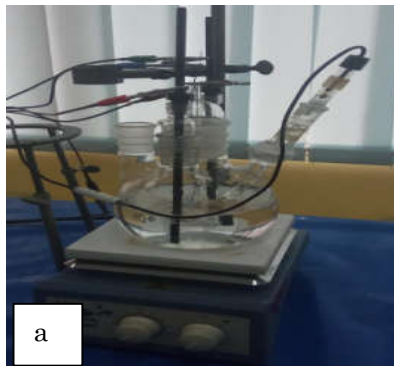
8. Analisis kurva tersebut dengan ekstrapolasi elektroda (*tafel equation*) dengan *software Echem*
9. Diperoleh data uji korosi : arus, korosi dan laju korosi

Tabel 2.1 Komposisi kimia Stainless Steel (SS) 303 (wt %)

(SS) 303	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	0,0925	0,42	1,93	<0,0015	<0,0010	>6,00	0,0034
	Ni	Al	Cu	Nb	Ti	V	Fe
	>6,00	0,42	0,0192	0,0027	<0,0002	0,11	73,2

Tabel 2.2 Komposisi kimia *Mild Steel* (MS) 400 (wt %)

(MS) 400	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	0.135	0.135	0.320	< 0.0015	0.0032	0.0991	0.0106
	Ni	Al	Cu	Nb	Ti	V	Fe
	0.0482	0.0242	0.110	0.0011	0.0033	0.0015	98.1

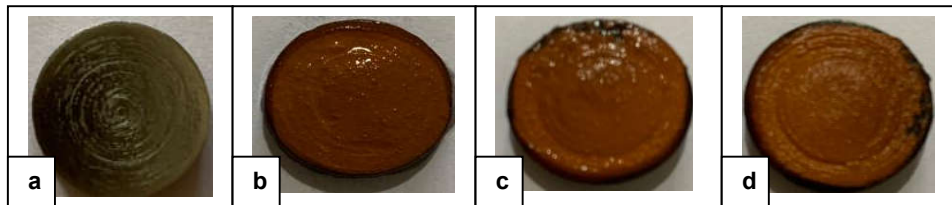


Gambar. 2.2 a) *Cel electrode* b) Potensiostat reference 600

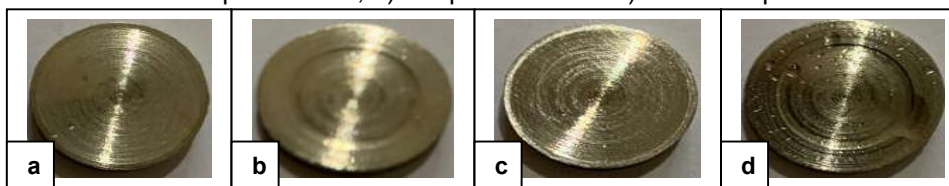
2.4 Hasil dan Pembahasan

Pada **gambar 2.3** memperlihatkan kondisi sampel MS 400 sebelum direndam dan setelah direndam pada larutan NaCl dengan ukuran 2,7 ‰, 3,1 ‰ dan 3,5 ‰ selama 21 hari atau 504 jam, tanpa menggunakan proteksi katodik. Terlihat kondisi sampel yang mengalami korosi akibat pengaruh kadar salinitas.

Sedangkan pada **gambar 2.4** menunjukkan kondisi sampel SS 303 yang sangat berbeda dengan MS 400. Dimana pada Sampel SS 303 kurang terlihat secara langsung. Namun melalui pengujian kurva polarisasi akan menampilkan laju korosi dari masing-masing sampel MS 400 dan SS 303.



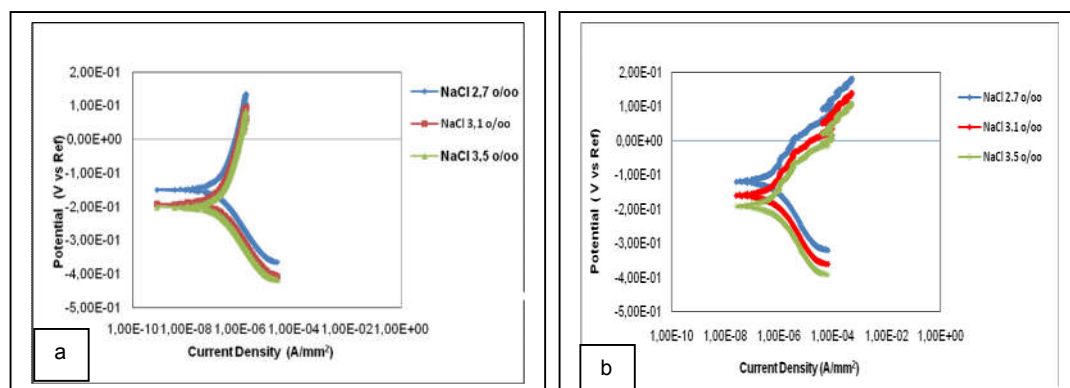
Gambar 2.3 Sampel MS 400, a) Tanpa direndam. b) direndam pada NaCl



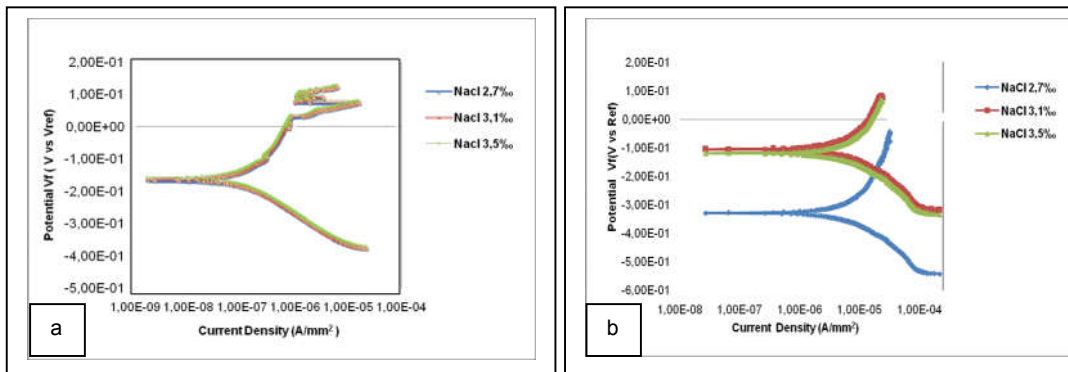
Gambar 2.4 Sampel SS 303, a) Tanpa direndam. b) direndam pada NaCl 2,7‰. c) direndam pada NaCl 3,1 ‰. d) direndam pada NaCl 3,5 ‰

2.4.1 Pengaruh salinitas terhadap korosi

Pada **gambar 2.5** dan **2.6** terlihat kurva polarisasi yang didapatkan untuk pengujian spesimen MS 400 dan SS 303 . Pengujian dilakukan dengan variasi salinitas menggunakan 2,7 ‰ dan 3,1 ‰ dan 3,5 ‰ serta variasi temperatur 28°C dan 38°C. Pengujian tafel dilakukan pada tegangan awal -250 mV vs E_{ocp} dan tegangan akhir +250 mV vs E_{ocp}, scan rate 0,5 mv/detik. Kemudian menganalisa kurva polarsasi menggunakan ekstrapolasi tafel.



Gambar 2.5 Kuva polarisai MS 400 pada temperatur. a) 28°C, b) 38°C



Gambar 2.6 Kurva Polarisasi SS 303 di temperatur. a) 28°C, b) 38°C

Table 2.3 Laju korosi MS 400 pada temperatur 28°C

Jenis Media/Larutan	Metode Tafel/Polarisasi	
	Icorr (A)	Corrosion Rate (mpy)
NaCl 2,7 ‰	1.27×10^{-7}	0,0517
NaCl 3,1 ‰	1.96×10^{-7}	0,0889
NaCl 3,5 ‰	2.69×10^{-7}	0,1270

Table 2.4 Laju korosi MS 400 pada temperatur 38°C

Jenis Media/Larutan	Metode Tafel/Polarisasi	
	Icorr (A)	Corrosion Rate (mpy)
NaCl 2,7 ‰	1.76×10^{-7}	0,1952
NaCl 3,1 ‰	3.33×10^{-7}	0,1798
NaCl 3,5 ‰	4.26×10^{-7}	0,6930

Table 2.5 Laju korosi SS 303 pada temperatur 28°C

Jenis Media/Larutan	Metode Tafel/Polarisasi	
	Icorr (A)	Corrosion Rate (mpy)
NaCl 2,7 ‰	8.89×10^{-8}	0,0395
NaCl 3,1 ‰	1.78×10^{-7}	0,0789
NaCl 3,5 ‰	2.86×10^{-7}	0,1213

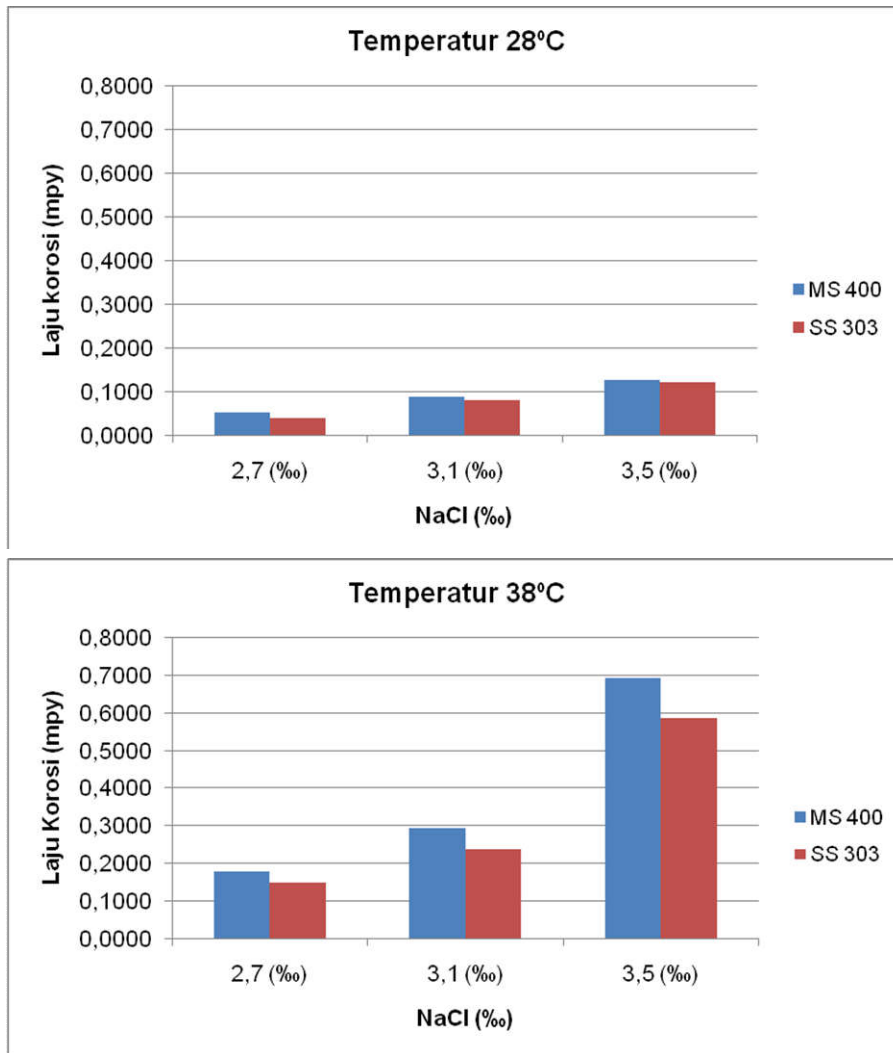
Table 2.6 Laju korosi SS 303 pada temperatur 38°C

Jenis Media/Larutan	Metode Tafel/Polarisasi	
	Icorr (A)	Corrosion Rate (mpy)
NaCl 2,7 ‰	4.27×10^{-7}	0,1490
NaCl 3,1 ‰	5.39×10^{-7}	0,2393
NaCl 3,5 ‰	1.32×10^{-6}	0,5851

Dari **tabel 2.3** dan **tabel 2.4**, dapat diketahui uji polarisasi dari sampel baja MS 400 diperoleh arus korosi (I_{corr}) yang tertinggi pada temperatur 38°C dengan NaCl 3,5 ‰ sebesar 4.26×10^{-7} Ampere.

Pada **tabel 2.5** dan **tabel 2.6** menampilkan nilai arus korosi (I_{corr}) dari baja SS 303 yang dihasilkan melalui proses polarisasi tafel dengan temperatur 28°C dan 38°C di dalam larutan NaCl yang berbeda-beda. Diperoleh arus korosi (I_{corr}) yang tertinggi pada temperatur 38°C dengan NaCl 3,5 ‰ sebesar 1.32×10^{-6} Ampere. Apabila kerapatan arus yang ditimbulkan semakin besar, maka nilai korosi akan semakin meningkat, begitu pula apabila korosi yang dihasilkan sedikit maka kerapatan arus diperkecil

Dari **gambar 2.7** menampilkan laju korosi dari sampel MS 400 dan SS 303, terlihat perbedaan yang sangat signifikan, dimana pada larutan NaCl 3,5 ‰ dan temperatur 38°C mengalami laju korosi yang tinggi yaitu sampel *Mild Steel* 400 sebesar 0,6930 mpy dan SS 303 sebesar 0,5851. Sedangkan pada kondisi temperatur 28°C dan Larutan NaCl 3,5 ‰, laju korosi MS 400 sebesar 0,1270 mpy dan SS 303 sebesar 0,1213 mpy. Diakibatkan adanya kenaikan temperatur, yang menyebabkan bertambahnya laju korosi, karena penambahan energi kinetik dari partikel-partikel yang bereaksi akibat peningkatan temperatur sehingga melebihi besarnya energi aktivasi. Kecepatan laju korosi semakin tinggi jika energi kinetik lebih besar dari harga energi aktivasinya (Melchers 2002). Selain itu menurut (Revie, 2008) korosi pada baja yang diakibatkan oleh oksigen sangat dipengaruhi oleh temperatur. Umumnya peristiwa korosi pada sebuah logam di lingkungan air berawal dari logam yang teroksidasi di dalam larutan dan melepaskan elektron (e^-) untuk menghasilkan ion logam bermuatan positif (M^+). Dimana larutan akan bertindak sebagai katoda dengan reaksi yang umum terjadi adalah pelepasan H_2 dan Reduksi O_2 , akibat H^+ dan H_2O yang tereduksi. Reaksi tersebut terjadi pada bagian permukaan logam yang terendam secara terus menerus (Möller, *et al* 2006)



Gambar 2.7 Laju korosi MS 400 dan SS 303

2.5 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, Laju korosi pada material *Mild Steel* (MS) 400 dan *Stainless Steel* (SS) 303 dalam media larutan NaCl dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya :

1. Perubahan tingkat larutan NaCl memiliki pengaruh yang besar terhadap laju korosi.
2. Laju korosi juga dipengaruhi oleh kenaikan temperatur dapat menyebabkan meningkatnya proses reaksi korosi sehingga laju korosi pada semakin tinggi
3. Laju korosi *Stainlees Steel* (SS) 303 sebesar 0,5851 mpy mempunyai ketahanan korosi lebih baik, dibandingkan dengan *Mild Steel* (MS) 400 sebesar 0,7930 mpy. Karena pengaruh elemen paduan yang terkandung dalam *Stainless Steel* (SS) 303.

Daftar Pustaka

1. Ahmad, Zaki. 2006. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Elsevier.
2. Anon. 2007. "Different Forms of Corrosion Classified on the Basis of Appearance." *Corrosion and Protection* 89–191.
3. Baturina, Olga A., Matthew Strom, and Farrel J. Martin. 2017. "Effect of PH and Salinity on Polarization Behavior of Cathodically Protected HY80 Steel, Inconel 625 and Nickel-Aluminum Bronze in Mexican Gulf Seawater." 80(10):475–86.
4. Baxter, Dick and Jim Britton. 2017. "Offshore Cathodic Protection 101 : What Is It and How Does It Work ?" 2:10–13.
5. Diedericks, Dewald E., George Van Schoor, and Eugen O. Ranft. 2019. "Cathodic Protection System Design Framework." *Proceedings - 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa, SAUPEC/RobMech/PRASA 2019* 530–37.
6. Hou, Xiangyu, Lili Gao, Zhendong Cui, and Jianhua Yin. 2018. "Corrosion and Protection of Metal in the Seawater Desalination Corrosion and Protection of Metal in the Seawater Desalination."
7. Janowski, Mirosław and Agnieszka Wantuch. 2016. "ICCP Cathodic Protection of Tanks with Photovoltaic Power Supply." *E3S Web of Conferences* 10:1–4.
8. Kim, Jin-ho, Yong-sang Kim, and Jung-gu Kim. 2016. "Cathodic Protection Criteria of Ship Hull Steel under Flow Condition in Seawater." *Ocean Engineering* 115:149–58.
9. Mahdavi, Fariba, Mike Yongjun Tan, and Maria Forsyth. 2016. "Communication—An Approach to Measuring Local Electrochemical Impedance for Monitoring Cathodic Disbondment of Coatings." *Journal of The Electrochemical Society* 163(5):C228–31.
10. Melchers, R. E. 2002. "Effect of Temperature on the Marine Immersion

- Corrosion of Carbon Steels.” *Corrosion* 58(09).
11. Möller, H., E. T. Boshoff, and H. Froneman. 2006. “The Corrosion Behaviour of a Low Carbon Steel in Natural and Synthetic Seawaters.” *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 106(8):585–92.
 12. Officer, Project, Robert S. Dyer, Standards Division, and U. S. Environmental Protection Agency. n.d. “Mm Imm.”
 13. Revie, R. Winston. 2008. *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. John Wiley & Sons.
 14. Rp, Nace Standard. 2002. *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*. Vol. 22.
 15. Skavås, Erling, Kari Lønvik, Anette Pedersen, and Brit Graver. 2019. “Review of Design Parameters in DNVGL-RP-B401 Cathodic Protection Design.” *CORROSION 2019 NACE-2019-13056*.
 16. Stewart, Mark G. and Emilio Bastidas-Arteaga. 2019. *Corrosion of Concrete and Steel Structures in a Changing Climate*. Elsevier Inc.
 17. Sun, Haijing, Weihai Xue, Jiaxin Xu, Guoliang Chen, and Jie Sun. 2020. “Cathodic Protection Criteria of Low Alloy Steel in Simulated Deep Water Environment.” *Anti-Corrosion Methods and Materials* 67(4):427–34.
 18. Toloei, Alisina, Sanam Atashin, and Mahmood Pakshir. 2013. “Corrosion Rate of Carbon Steel under Synergistic Effect of Seawater Parameters Including PH, Temperature, and Salinity in Turbulent Condition.” *Corrosion Reviews* 31(3–6):135–44.
 19. Zakowski, K., M. Narozny, M. Szocinski, and K. Darowicki. 2014. “Influence of Water Salinity on Corrosion Risk - The Case of the Southern Baltic Sea Coast.” *Environmental Monitoring and Assessment* 186(8):4871–79.