

**PENGARUH *SOLUTION TREATMENT* TERHADAP  
LAJU KOROSI MAGNESIUM (Mg) SEBAGAI ANODA TUMBAL  
KOROSI BAJA API 5L X65**

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**RAVI MAULANA  
NIM. 155060201111052**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2019**

LEMBAR PENGESAHAN  
PENGARUH *SOLUTION TREATMENT* TERHADAP  
LAJU KOROSI MAGNESIUM (Mg) SEBAGAI ANODA TUMBAL  
KOROSI BAJA API 5L X65

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI MANUFAKTUR

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**RAVI MAULANA**  
NIM. 155060201111052

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 19 Juli 2019

**DOSEN PEMBIMBING I**

**Dr. Femiana Gapsari, ST., MT**  
NIP 19820704 200812 2 002

**DOSEN PEMBIMBING II**

**Khairul Anam, ST., M.Sc.**  
NIP 204310861127 1 001

Mengetahui,

**KETUA PROGRAM STUDI S1**

**Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.**  
NIP 19740930 200012 1 001



### PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 23 Juli 2019

Mahasiswa,



Ravi Maulana

NIM. 155060201111052





TURNITIN



**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM SARJANA**

**SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI**

Nomor : 075/UN10.F07.12.21/PP/2019

Sertifikat ini diberikan kepada :

**RAVI MAULANA**

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH SOLUTION TREATMENT TERHADAP LAJU KOROSI MAGNESIUM  
(Mg) SEBAGAI ANODA TUMBAL KOROSI BAJA 5L X65**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi  $\leq 20\%$ , dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **22 JUL 2019**

Ketua Jurusan Teknik Mesin

**Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D**  
NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

**Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT**  
NIP. 19740930 200012 1 001

**JUDUL SKRIPSI :**

**PENGARUH *SOLUTION TREATMENT* TERHADAP LAJU KOROSI  
MAGNESIUM (MG) SEBAGAI ANODA TUMBAL KOROSI BAJA API 5L X6**

Nama Mahasiswa : Ravi Maulana  
NIM : 155060201111052  
Program Studi : Teknik Mesin  
Konsentrasi : Teknik Manufaktur

**KOMISI PEMBIMBING :**

Dosen Pembimbing I : Dr. Femiana Gapsari M.F, ST., MT.  
Dosen Pembimbing II : Khairul Anam, ST., M.Sc.

**TIM DOSEN PENGUJI :**

Dosen Penguji I : Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.  
Dosen Penguji II : Ir. Erwin Sulistyono, MT.  
Dosen Penguji III : Redi Bintarto, ST., M.Eng.Pract.

Tanggal Ujian : 09 Juli 2019  
SK Penguji : 1386/UN10.F07/SK/2019



*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada :  
Papa, Mama dan Adik – Adik saya tercinta  
yang selalu memberi semangat dan dukungan.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, karena atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga skripsi yang berjudul “**Pengaruh *Solution Treatment* Terhadap Laju Korosi Magnesium (Mg) Sebagai Anoda Tumbal Korosi Baja API 5L X65**” ini dapat terselesaikan dengan baik.

Laporan ini disusun sebagai bentuk dokumentasi dan hasil akhir dari proses perkuliahan yang telah dilaksanakan. Laporan ini juga diajukan sebagai syarat kelulusan untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik dalam kurikulum program studi Teknik Mesin Universitas Brawijaya.

Dalam melaksanakan proses penelitian dan penyusunan laporan ini, penulis menyadari bahwa tidak akan dapat menyelesaikan semuanya dengan baik tanpa bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Bapak Mega Nur Sasongko, ST., MT., Dr.Eng selaku Kepala Program Studi S1 Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, MSc. CSE. selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Teknik Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Ibu Dr. Femiana Gapsari, M.F, ST., MT. selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan serta ilmu dalam penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Khairul Anam, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing II yang telah memberi saran dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Indra Gandhi dan Ibu Yenifa sebagai orang tua penulis, Tamia Yolanda dan Tasya Cesarani sebagai adik kandung penulis yang selalu menyemangati, memberi dukungan serta doa untuk penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Seluruh staf pengajar khususnya dosen-dosen dan jajaran Staf Karyawan Jurusan Teknik Mesin dan Fakultas Teknik.
8. Amalia Juwendah selaku partner pemberi semangat dan dukungan penuh untuk penulis.
9. Teman seperjuangan Fety dan Taqy yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.

10. Keluarga Besar Laboratorium Metrologi Industri FT UB, Mas Agil, Mas Dimas, Fadhil, Fety, Taqy, Zafirah, Denny, Debritto, Hamzah, Acel, Adji, Haekal dan Azka terima kasih atas bantuannya.
11. Teman-teman M15 yang selalu Memberikan Semangat dan Bantuan atas skripsi ini.
12. Teman-teman Kelas D yang selalu Memberikan Semangat dan Bantuan atas skripsi ini.
13. Teman-teman kost saya Andy, Bene, Abiell, Ade, Kusdi, Firman, dan Syafiq atas bantuannya dan menemani saya.
14. Sahabat-sahabat saya Andung, Daniel, Hanif, Aldi, Rahmi dan Nila teman baik saya yang banyak memberi semangat, dukungan dan motivasinya.
15. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini tidak lepas dari kekurangan. Oleh karena itu penulis sangat menghargai setiap saran dan masukan untuk kesempurnaan laporan skripsi ini maupun bagi penulis sendiri. Semoga laporan skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca sekaligus bisa menjadi bahan acuan penelitian selanjutnya.

Malang, Juli 2019

Penulis



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>RINGKASAN</b> .....	<b>viii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>ix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	<b>1</b>
1.2 Rumusan Masalah .....	<b>2</b>
1.3 Batasan Masalah.....	<b>3</b>
1.4 Tujuan Penelitian.....	<b>3</b>
1.5 Manfaat Penelitian.....	<b>3</b>
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Penelitian Sebelumnya .....	<b>5</b>
2.2 Magnesium .....	<b>5</b>
2.3 Korosi .....	<b>6</b>
2.3.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Terjadinya Korosi .....	<b>7</b>
2.3.2 Mekanisme Korosi .....	<b>8</b>
2.3.3 Korosi pada Pipa Gas/ Minyak .....	<b>8</b>
2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Terjadinya Korosi pada Pipa Gas/ Minyak ...	<b>9</b>
2.5 Cara Pengendalian Korosi .....	<b>15</b>
2.6 Korosi Berdasarkan Termodinamika.....	<b>16</b>
2.7 Korosi Berdasarkan Elektrokimia .....	<b>17</b>
2.8 Perhitungan Laju Korosi.....	<b>18</b>
2.9 <i>Heat Treatment</i> Mg .....	<b>18</b>
2.9.1 <i>Homogenization Treatment</i> .....	<b>19</b>
2.9.2 <i>Solution Treatment</i> .....	<b>20</b>
2.10 Baja API.....	<b>20</b>
2.11 Teknik Polarisation untuk Mengetahui Laju Korosi.....	<b>21</b>
2.12 Hipotesis .....	<b>22</b>



<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	23
3.1 Metode Penelitian .....	23
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian.....	23
3.3 Variabel Penelitian .....	23
3.4 Peralatan dan Bahan yang Digunakan.....	24
3.4.1 Peralatan yang Digunakan .....	24
3.4.2 Bahan yang Digunakan .....	27
3.5 Dimensi Benda Kerja .....	28
3.6 Skema Penelitian .....	29
3.7 Prosedur Penelitian .....	29
3.7.1 Proses <i>Heat Treatment</i> .....	29
3.7.2 Pengujian Kekerasan .....	30
3.7.2 Pengujian Korosi .....	30
3.7.2 Pengujian Korosi .....	31
3.8 Diagram Alir Penelitian .....	32
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	33
4.1 Data Pengukuran Laju Korosi Anoda dan Katoda Tanpa Perlakuan dengan Uji Elektrokimia .....	33
4.2 Perhitungan Laju Korosi dengan Metode <i>Weight Loss</i> .....	34
4.3 Efisiensi Laju Korosi Anoda Korban, Data Kekerasan dan Kebutuhan Anoda Korban pada Pipa .....	37
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	39
5.1 Kesimpulan.....	39
5.2 Saran.....	39

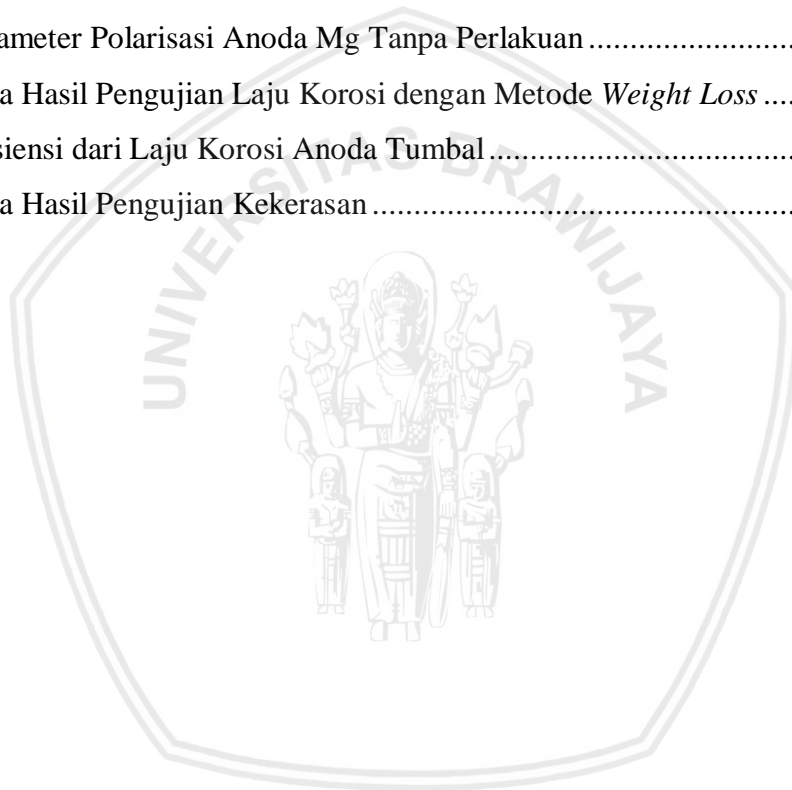
## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN



## DAFTAR TABEL

No. Tabel	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Sifat Magnesium.....	6
Tabel 2.2	Deret Elektrokimia Berdasarkan Urutan Potensial Oksidasi .....	12
Tabel 2.3	Seri Galvanik Dari Beberapa Logam dan Paduan Komersial Di Air Laut .....	13
Tabel 3.1	Komposisi Baja API 5L X65 (dalam %) .....	28
Tabel 4.1	Parameter Polarisasi Baja API 5L X65 Tanpa Perlakuan.....	34
Tabel 4.2	Parameter Polarisasi Anoda Mg Tanpa Perlakuan .....	34
Tabel 4.3	Data Hasil Pengujian Laju Korosi dengan Metode <i>Weight Loss</i> .....	35
Tabel 4.4	Efisiensi dari Laju Korosi Anoda Tumbal .....	37
Tabel 4.5	Data Hasil Pengujian Kekerasan .....	37



## DAFTAR GAMBAR

No. Gambar	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Korosi pada Pipa Air Laut .....	9
Gambar 2.2	Korosi Merata.....	10
Gambar 2.3	Korosi Sumuran .....	11
Gambar 2.4	Korosi Tegangan.....	11
Gambar 2.5	Korosi Erosi.....	12
Gambar 2.6	Korosi Galvanik.....	13
Gambar 2.7	Korosi Celah.....	14
Gambar 2.8	Diagram Fase Mg-Mn.....	19
Gambar 2.9	Polarisasi Logam (M) Dalam Larutan Asam .....	21
Gambar 3.1	Dapur Listrik .....	24
Gambar 3.2	<i>Hardness</i> Rockwell Mitutoyo.....	25
Gambar 3.3	Metrohm Autolab PGSTAT 204 .....	25
Gambar 3.4	<i>Moisture Balance</i> .....	26
Gambar 3.5	Adaptor.....	27
Gambar 3.6	<i>Baker Glass</i> .....	27
Gambar 3.7	Spesimen Anoda .....	27
Gambar 3.8	Spesimen Katoda .....	28
Gambar 3.9	Dimensi Spesimen .....	28
Gambar 3.10	Skema Penelitian .....	29
Gambar 3.11	Skema Rangkaian Sel Galvanik untuk Uji Korosi .....	21
Gambar 3.12	Diagram Alir Penelitian .....	32
Gambar 4.1	Kurva Polarisisasi Baja API 5L X65 Tanpa Perlakuan.....	33
Gambar 4.2	Kurva Polarisisasi Mg Tanpa Perlakuan.....	34
Gambar 4.3	Laju Korosi Anoda Tumbal Mg .....	36





## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Proses Pengujian Laju Korosi Metode Elektrokimia
- Lampiran 2 Proses Pengujian Laju Korosi Metode *Weight Loss*
- Lampiran 3 Komposisi Magnesium
- Lampiran 4 Dimensi Spesimen Pengujian



## RINGKASAN

**Ravi Maulana**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2019, Pengaruh *Solution Treatment* terhadap Laju Korosi Magnesium (Mg) Sebagai Anoda Tumbal Korosi Baja API 5L X65, Dosen Pembimbing : Dr. Femiana Gapsari M.F, ST., MT. dan Khairul Anam, ST., M.Sc.

Pipa gas/ minyak biasanya akan terjadi fenomena korosi dan korosi inilah penyebab mahalnya biaya perbaikan pada pipa tersebut. Metode proteksi katodik biasanya diterapkan untuk melindungi pipa tersebut dari korosi. Anoda tumbal merupakan salah satu dari metode proteksi katodik dengan cara menggunakan anoda untuk ditumbalkan yang berfungsi untuk melindungi katoda. Magnesium banyak digunakan sebagai anoda tumbal pada baja API 5L X65 dikarenakan lebih mudahnya terkorosi dengan memiliki potensial oksidasi lebih tinggi.

Proses *solution treatment* pada magnesium dari penelitian ini memiliki variasi temperatur 350°C, 400°C, dan 450°C dengan *holding time* selama 1 jam, 2 jam, dan 3 jam. Selanjutnya spesimen diuji kekerasan dan laju korosi menggunakan metode elektrokimia dan metode *weight loss*. Hasil laju korosi metode elektrokimia diukur dengan Potensiodinamik Autolab PGSTAT 204 dengan menggunakan *software* NOVA 1.11 dan laju korosi metode *weight loss* diketahui dengan menimbang masa yang hilang menggunakan *moisture analyzer* MOC – 120H.

Berdasarkan data hasil penelitian didapatkan bahwa pada spesimen tanpa perlakuan memiliki laju korosi paling tinggi. Dengan *solution treatment* laju korosi paling tinggi terdapat pada temperatur 450°C dengan *holding time* selama 3 jam dan laju korosi paling rendah terdapat pada temperatur 350°C dengan *holding time* selama 1 jam. Semakin tinggi temperatur *solution treatment* dan semakin lama *holding time* maka kekerasan semakin menurun menyebabkan laju korosi semakin tinggi. Dengan temperatur yang optimal dan *holding time* yang optimal yaitu pada temperatur 350°C dan *holding time* selama 1 jam memiliki nilai kekerasan paling besar oleh karena itu ketahanan terhadap korosinya juga tinggi.

**Kata kunci** : Magnesium (Mg), Baja API 5L X65, *Solution Treatment*, Korosi, Kekerasan.

## SUMMARY

**Ravi Maulana**, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, July 2019, Effect of Solution Treatment on Corrosion Rate of Magnesium (Mg) As a Sacrificial Anode of Corrosion API 5L X65 Steel, Academic Supervisor : Dr. Femiana Gapsari M.F, ST., MT. and Khairul Anam, ST., M.Sc.

Gas/ oil pipes will usually occur corrosion and corrosion phenomena is the cause of the high cost of repairs on the pipe. Cathodic protection methods are usually applied to protect the pipe from corrosion. The sacrificial anode is one of the cathodic protection methods by using an anode to be sacrificed which serves to protect the cathode. Magnesium is widely used as a sacrificial anode in API 5L X65 steel because it is easier to corrode by having a higher oxidation potential.

The solution treatment process in magnesium from this study has a temperature variation of 350°C, 400°C, and 450°C with a holding time of 1 hour, 2 hours and 3 hours. Furthermore, the specimens were tested for hardness and corrosion rate using electrochemical methods and weight loss methods. The results of the corrosion rate of the electrochemical method were measured by Potentiodynamic Autolab PGSTAT 204 using NOVA 1.11 software and the corrosion rate of the weight loss method was known by weighing the lost period using the MOC-120H moisture analyzer.

Based on the results of the research data, it was found that the untreated specimens had the highest corrosion rate. With the solution treatment, the highest corrosion rate is found at a temperature of 450°C with a holding time of 3 hours and the lowest corrosion rate is at a temperature of 350°C with a holding time of 1 hour. The higher the temperature of the solution treatment and the longer the holding time the hardness decreases causing the corrosion rate to be higher. With the optimal temperature and optimal holding time, at 350°C and holding time for 1 hour, the greatest hardness is therefore high resistance to corrosion.

**Keywords :** Magnesium (Mg), API 5L X65 Steel, Solution Treatment, Corrosion, Hardness.

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Magnesium paduan semakin meningkat penggunaannya pada bidang industri otomotif, industri elektronik, industri pesawat, karena rendahnya densitas dan magnesium memiliki massa yang ringan namun juga tetap memiliki kekuatan yang baik. Bagaimanapun, ketahanannya terhadap korosi yang rendah menyebabkan keterbatasan penggunaannya. Sekarang, banyak perlakuan permukaan yang telah diterapkan pada magnesium dan paduannya untuk meningkatkan ketahanannya terhadap korosi, seperti konversi kimia, oksidasi anodik, pelapisan organik, dan pelapisan logam (Liu et al., 2008).

Korosi atau karat pada suatu logam merupakan fenomena alam yang biasa terjadi disekitar kita. Korosi merupakan sebuah fenomena yang sangat mengganggu dan sulit untuk dihindari. Korosi dapat dikatakan kerusakan material bukan murni mekanik. Dikatakan bukan murni mekanik karena bisa dilihat logam-logam yang dibiarkan begitu saja di udara terbuka dapat mengalami korosi. Hal ini disebabkan karena adanya reaksi antara logam tersebut dengan lingkungannya, dalam hal ini udara terbuka. Oleh karenanya ada tiga aspek dari korosi yaitu: material, reaksi, dan lingkungan. Ketiga aspek ini menunjukkan bahwa apabila kita membahas korosi tidak akan pernah lepas dari ketiga aspek tersebut (Gapsari, 2017).

Metode pengendalian korosi pada dasarnya dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu metode kinetika dan metode termodinamika. Dalam metode kinetika pengendalian korosi dilakukan dengan memberi hambatan pada interaksi dengan lingkungannya sehingga laju korosinya dapat dikurangi, tetapi kecenderungan untuk terjadinya korosi itu sendiri tidak diselesaikan, sehingga apabila hambatan ditiadakan korosi akan segera berlangsung lagi. Selain dari pada itu apabila jumlah hambatan yang ditambahkan tidak mencukupi maka korosi akan menjadi lebih parah lagi misalnya terjadinya korosi setempat. Salah satu metode termodinamika adalah proteksi katodik yang diterapkan secara luas. (Utami, 2009). Proteksi katodik diberikan pada material yang terkubur yang telah diproteksi dengan coating dan untuk mencegah kebocoran coating dilakukan proteksi katodik. Logam-logam yang dipakai biasanya Mg (Magnesium), Al (Aluminium), dan Zn (Zinc).



Magnesium digunakan secara luas sebagai material anoda tumbal galvanik untuk perlindungan pada pipa dan bangunan yang tertanam lainnya karena yang sifat potensialnya yang negatif dan output arus yang tinggi tiap persatuan berat unitnya yang diinginkan. Bagaimanapun, anoda magnesium biasanya memiliki efisiensi arus dibawah dari anoda galvanik lainnya. Pada percobaan, efisiensi arus dari anoda magnesium jarang melebihi 50%. Ini dibandingkan pada anoda seng dan aluminium (Kim, 2001).

Magnesium yang sebagai anoda tumbal sebaiknya memiliki sifat mekanik yang baik. Untuk itu perlu dilakukan proses *homogenization treatment*. Kualitas hasil proses *homogenization treatment* sangat ditentukan oleh *holding time* dan temperaturnya. *Homogenization treatment* merupakan suatu proses perlakuan yang bertujuan untuk menyamakan ukuran butir pada material. Dengan adanya proses *homogenization treatment* didapatkan bentuk butir yang seragam dan berkurangnya *impurity* pada stuktur mikro. Dilakukannya *solution treatment* agar dapat menjadikan material tersebut memiliki sifat mekanik yang baik dengan kekerasannya yang meningkat. Untuk itu pada penelitian ini dilakukan penentuan temperatur *solution treatment* sehingga terbentuk anoda tumbal magnesium yang memiliki kekerasan yang tinggi sehingga memiliki laju korosi yang rendah.

Tahapan perlakuan panasnya terdiri dari *homogenization treatment* dan *solution treatment*. *Homogenization treatment* merupakan proses yang bertujuan untuk merubah ukuran bentuk butir dari material yang diberi perlakuan panas tersebut. Dan kelebihan dari *solution treatment* adalah memperbaiki sifat mekanik dan meningkatkan kekerasan pada saat sebelum tanpa perlakuan tetapi terdapat kekurangan dimana semakin tinggi suhu dari *solution treatment* menyebabkan berkurangnya kekerasan pada material tersebut. Pengaruh dari temperatur dan *holding time* yang semakin meningkat pada *solution treatment* menyebabkan kekerasannya makin berkurang (Cabrini et al., 2019).

Penelitian ini sangat bermanfaat pada bidang perindustrian lebih tepatnya pada pipa yang biasa digunakan pada perusahaan minyak dan gas sebab biasanya pada pipa tersebut sering terjadi korosi yang sangat merugikan perusahaan tersebut. Dengan adanya penelitian dapat memberikan solusi untuk menanggulangi kerugian akibat korosi yang terjadi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka rumusan permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi temperatur dan *holding time* pada proses *solution treatment* magnesium sebagai anoda tumbal terhadap laju korosi.

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Material yang digunakan adalah baja API 5L X65.
2. Hal yang diamati dalam penelitian ini adalah laju korosi yang terjadi tanpa membahas jenis korosi yang terjadi pada material tersebut.
3. Luas dimensi semua spesimen sama.
4. Anoda tumbal yang digunakan adalah Mg (Magnesium).
5. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi korosi dianggap konstan dalam setiap pengujian.
6. Jarak anoda dengan katoda dibuat sama sebesar 2 cm.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur dan *holding time* proses *solution treatment* magnesium sebagai anoda tumbal terhadap laju korosi.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Dapat memberikan solusi baru dalam menanggulangi permasalahan korosi. Terutama yang terjadi pada pipa industri minyak dan gas.
2. Dapat dijadikan referensi tambahan untuk penelitian selanjutnya khususnya dalam penelitian tentang pengujian korosi.



Halaman ini sengaja dikosongkan



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Retno Indarti dkk (2018) meneliti tentang karakterisasi simulator sistem proteksi katodik metode anoda korban pada sistem perpipaan yang tertanam dalam tanah. Material yang diproteksi berperan sebagai katoda dan logam yang dikorbankan sebagai anoda. Kebutuhan arus proteksi adalah 0,003445 A. Anoda korban yang diterapkan pada simulator ini adalah anoda korban magnesium (Mg) dengan berat 7 kg dan arus keluaran 0,0328 ampere. Hasil uji karakteristik pipa yaitu potensial proteksi -1400mV/CSE. Hasil penelitian adalah anoda korban yang lebih baik digunakan adalah anoda Magnesium, karena lebih efisien dan efektif daripada anoda Aluminium dan anoda Seng (Zn), sebagai anoda korban di lingkungan tanah.

M Cabrini dkk (2019) meneliti tentang pengaruh perlakuan panas terhadap ketahanan korosi. Didapatkan hasil semakin tinggi temperatur berpengaruh terhadap turunnya kekerasan yang menyebabkan turunnya juga ketahanan korosi sehingga semakin cepat terjadinya korosi dan semakin lama waktu *holding time* maka akan semakin homogen struktur butirnya.

Ahmad Ilzam (2018) meneliti tentang pengaruh kekerasan dan impak terhadap laju korosi pada pegas daun truk baja paduan AISI 5160 akibat pengaruh media air, cairan abu vulkanik dan air laut. Didapatkan dari hasil penelitian proses perlakuan *hardening* dilakukan meningkatkan kekerasan pada baja paduan AISI 5160. Dengan semakin meningkatnya kekerasan maka semakin rendah laju korosi yang terjadi pada baja paduan tersebut.

### 2.2 Magnesium

Magnesium adalah logam ringan dan banyak digunakan pada pengaplikasian yang membutuhkan massa jenis yang ringan contohnya digunakan sebagai dasar untuk paduan konstruksi. Paduan logam magnesium sangat kuat namun beratnya ringan sehingga logam magnesium digunakan untuk industri pesawat terbang dalam perang dunia II dan sesudahnya (Mordike & Ebert, 2001).

Magnesium merupakan unsur kimia yang memiliki simbol Mg dengan nomor atom 12 serta berat atom 24,31 gr/mol. Magnesium merupakan salah satu unsur yang paling luas



penyebarannya dan penyusun 2% dari kerak bumi serta merupakan unsur terlarut ketiga terbanyak pada air laut. Ditinjau dari segi sifat, magnesium merupakan logam yang memiliki sifat yang dapat ditempa menjadi lembaran, ditarik menjadi kawat dan ekstruksi menjadi batangan dengan bermacam – macam penampang. Dari segi ketahanan terhadap korosi, magnesium memiliki tingkat ketahanan korosi yang rendah, sehingga magnesium dapat digunakan untuk pelindung pipa yang berada dalam tanah yang mudah mengalami korosi. Sifat – sifat yang kurang pada magnesium murni dapat diperbaiki dengan memberi paduan contohnya seperti dipadu dengan Al dan Zn. Hal ini akan meningkatkan daya guna dari magnesium sebagai material dalam pembuatan suatu produk dan ketahanannya terhadap korosi. Penggunaan paduan magnesium dalam kehidupan sehari – hari cukup luas mulai dari sebagai pelapis tungku hingga konstruksi pesawat terbang (Mordike & Ebert, 2001).

Karakteristik dari Mg yaitu adalah memiliki struktur atom HCP (*Hexagonal Closed Packed*). Massa jenis dari Magnesium seberat 1,74 gram/cm<sup>3</sup>. (paling ringan dalam aplikasi logam). Titik cair dari Magnesium adalah 650°C dan titik didih sebesar 1107°C. Nilai potensial standar magnesium termasuk nilai potensial yang rendah yaitu sebesar -2,36 Volt. Dari ilmu material teknik logam magnesium merupakan yang paling tidak stabil yang dimana logam ini mudah terkorosi oleh air terutama bila bersama dengan Fe, Cu, Ni. Oleh sebab itu sebelum digunakan Mg dilakukan perlakuan panas yang bertujuan untuk membuatnya menjadi lebih tahan terhadap korosi (Gupta, 2010). Sesuai Tabel 2.1 berikut sifat magnesium.

Tabel 2.1  
Sifat Magnesium

Material	Density	Melting Point	Boiling Point	Standard Potential
Magnesium	1,74 g/cm <sup>3</sup>	650°C	1107°C	-2,36V

Sumber: Gupta (2010)

### 2.3 Korosi

Korosi atau perkaratan berasal dari bahasa latin “*Corrodere*” yang artinya perusakan logam atau berkarat. Definisi korosi adalah proses degradasi logam atau penurunan mutu logam yang terjadi disebabkan oleh reaksi elektrokimia dan lingkungan sekelilingnya (Jones, 1993).

Korosi didefinisikan sebagai kerusakan atau kemunduran sifat-sifat yang dimiliki material karena bereaksi dengan lingkungan di sekitarnya (Fontana, 2010). Korosi tidak dapat dihentikan, namun dapat dikurangi dengan berbagai cara. Salah satu cara untuk mengurangi laju korosi adalah dengan penggunaan inhibitor. Inhibitor korosi merupakan zat

kimia yang ketika ditambahkan dalam konsentrasi kecil ke suatu lingkungan dapat memperlambat terjadinya korosi (Roberge, 2008).

Korosi dapat terjadi ketika logam bersentuhan dengan lingkungan sekitarnya. Sebagai contoh sebuah tiang dibiarkan ada pada udara terbuka lama kelamaan akan terjadi korosi. Hal ini disebabkan karena udara mengandung oksigen, dalam udara terbuka logam akan melepaskan elektron dan elektron tersebut ditangkap dan bereaksi dengan uap air (reduksi oksigen). Reaksi oksidasi yang terjadi pada logam dan reduksi oksigen udara terbuka menghasilkan oksida logam yang warnanya kecoklatan. Warna kecoklatan atau kehitaman pada permukaan logam tersebut adalah ciri khas dari warna produk korosi yang terjadi pada logam. Oksida logam ini lah yang biasanya dikenal sebagai korosi.

### 2.3.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Terjadinya Korosi

Menurut Hidayat (2015) korosi bisa terjadi karena disebabkan oleh beberapa faktor antara lain:

1. Kontak Langsung logam dengan  $H_2O$  dan  $O_2$

Korosi pada permukaan logam merupakan proses yang mengandung reaksi redoks. Reaksi yang terjadi ini merupakan sel Volta mini. sebagai contoh, korosi besi terjadi apabila ada oksigen ( $O_2$ ) dan air ( $H_2O$ ). Logam besi tidaklah murni, melainkan mengandung campuran karbon yang menyebar secara tidak merata dalam logam tersebut, hal tersebut menimbulkan perbedaan potensial listrik antara atom logam dengan atom karbon (C). Atom logam besi (Fe) bertindak sebagai anoda dan atom C sebagai katoda. Oksigen dari udara yang larut dalam air akan tereduksi, sedangkan air sendiri berfungsi sebagai media tempat berlangsungnya reaksi redoks pada peristiwa korosi. Jika jumlah  $O_2$  dan  $H_2O$  yang mengalami kontak dengan permukaan logam semakin banyak, maka semakin cepat berlangsungnya korosi pada permukaan logam tersebut.

2. Keberadaan Zat Pengotor

Zat Pengotor di permukaan logam dapat menyebabkan terjadinya reaksi reduksi tambahan sehingga lebih banyak atom logam yang teroksidasi. Zat pengotor pada permukaan logam dapat menyebabkan reaksi reduksi tambahan sehingga lebih banyak atom logam yang teroksidasi. Sebagai contoh, adanya tumpukan debu karbon dari hasil pembakaran Bahan Bakar Minyak (BBM) pada permukaan logam mampu mempercepat reaksi reduksi gas oksigen pada permukaan logam. Dengan demikian reaksi korosi semakin cepat.

### 3. Kontak dengan Elektrolit

Keberadaan elektrolit, seperti garam dalam air laut dapat mempercepat laju korosi dengan menambah terjadinya reaksi tambahan. Logam yang berkontak langsung dengan elektrolit dalam jangka waktu yang cukup lama maka akan meningkatkan terjadinya korosi. Konsentrasi elektrolit yang besar juga dapat meningkatkan laju aliran elektron sehingga laju korosi meningkat.

### 4. Temperatur

Temperatur mempengaruhi kecepatan reaksi redoks pada peristiwa korosi. Secara umum, semakin tinggi temperatur maka semakin cepat terjadinya korosi. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya temperatur maka meningkat pula energi kinetik partikel sehingga kemungkinan terjadinya tumbukan efektif pada reaksi redoks semakin besar dan laju korosi pada logam semakin meningkat.

### 2.3.2 Mekanisme Korosi

Mekanisme terjadinya korosi tidak terlepas dari reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia berhubungan dengan perpindahan elektron yang terjadi pada material. Perpindahan elektron merupakan hasil dari reaksi reduksi-oksidasi (Gapsari, 2017). Elektron bermuatan negatif berpindah sehingga perpindahan elektron menyebabkan perpindahan arus listrik. Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi anodik dan katodik pada daerah anoda dan katoda. Reaksi anodik dan katodik yang terjadi pada proses korosi logam yaitu:



$\text{Fe}(\text{OH})_2$  oleh  $\text{O}_2$  di udara dioksidasi menjadi  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . (Afandi, 2015).

Penelitian ini diarahkan untuk mengetahui pengaruh perlakuan untuk meningkatkan kekerasan magnesium sebagai anoda tumbal terhadap laju korosi baja API 5L X65.

### 2.3.3 Korosi pada Pipa Gas/ Minyak

Andi Irawan (2016) menjelaskan bahwa penempatan yang dilalui saluran pipa sangat beragam yaitu mulai dari didalam tanah, diatas tanah bahkan di air laut maka dalam pengoperasiannya akan banyak ditemukan berbagai masalah seperti korosi, retak dan kegagalan lainnya.

Restrepo dkk (2008) menyebutkan diketahui bahwa penyebab terbesar terjadinya kegagalan pada pipa dengan diikutinya kecelakaan adalah korosi. Tercatat kegagalan tertinggi disebabkan oleh *external corrosion* dengan 119 kejadian dan disusul oleh *internal corrosion* dengan 94 kejadian.



Gambar 2.1 Korosi Pada Pipa Air Laut

Sumber : <http://www.marine-knowledge.com/general/marine-pipelines/> (2019)

#### 2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Terjadinya Korosi pada Pipa Gas/Minyak

Faktor-faktor yang mempengaruhi kemungkinan terjadinya korosi pipa gas/minyak ada dua jenis, yaitu:

##### 1. Korosi Internal

Korosi internal adalah korosi yang terjadi akibat adanya kandungan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  pada minyak bumi maupun gas bumi sehingga apabila terjadi kontak dengan air akan membentuk asam yang merupakan penyebab korosi.

##### 2. Korosi Eksternal

Korosi eksternal adalah korosi yang terjadi pada bagian permukaan dari sistem perpipaan dan peralatan, baik yang kontak dengan udara bebas dan permukaan tanah/air laut, akibat adanya kandungan zat asam pada udara dari tanah.

Tipe-tipe korosi pada pipa gas/ minyak umumnya diklarifikasikan sebagai berikut:

##### 2.1 *Uniform Corrosion* (Korosi Merata)

Merupakan korosi yang terjadi secara bersamaan dan menyeluruh pada permukaan logam. Terbentuknya pengikisan permukaan logam secara merata sehingga ketebalan logam berkurang atau menjadi lebih tipis dan akhirnya rusak. Lingkungan yang menyebabkan korosi ini adalah uap air, kelembapan, pH, dan lainnya. Korosi ini terjadi pada keseluruhan permukaan logam yang berkontak dengan lingkungan dengan intensitas yang sama. Menyebabkan kehilangan berat paling besar dibandingkan dengan

jenis korosi yang lain. Korosi ini berbahaya di alam dan jauh lebih sulit untuk diprediksi, cenderung menyebabkan kerusakan prematur atau kerusakan yang tidak terprediksi. Biasanya terjadi pada peralatan-peralatan terbuka, misalnya permukaan luar pipa. (Gapsari, 2017)

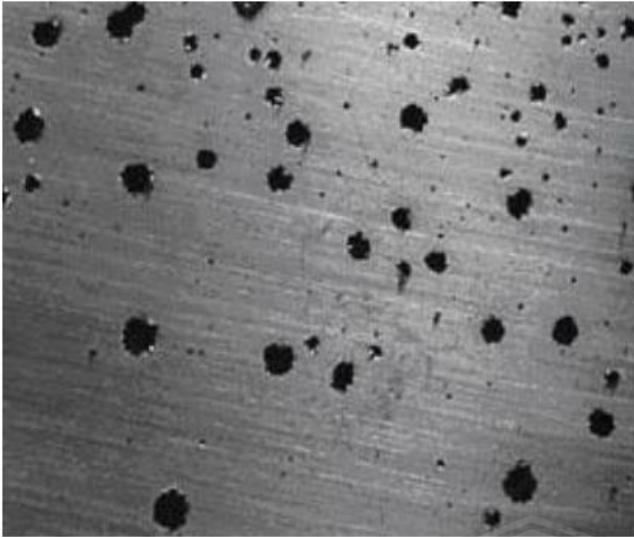


Gambar 2.2 Korosi Merata  
Sumber : Utomo (2009)

## 2.2 *Pitting Corrosion* (Korosi Sumuran)

Merupakan korosi yang berbentuk lubang-lubang pada permukaan yang tidak merata karena hancurnya film dari proteksi logam yang disebabkan laju korosi yang berbeda antara satu tempat dengan tempat lainnya pada permukaan logam tersebut. Korosi ini biasanya disebabkan oleh klorida atau ion yang mengandung klorin. Biasanya terlihat seperti permukaan yang kasar. Korosi ini termasuk yang berbahaya karena lubang yang susah terdeteksi karena ukurannya yang kecil dan area lubang-lubang tersebut tertutup oleh produk korosi. Salah satu penyebab korosi sumuran ini adalah komposisi logam yang tidak homogen dan biasanya terjadi pada baja dan aluminium karena logam yang dapat membentuk lapisan pasif. (Gapsari, 2017)





Gambar 2.3 Korosi Sumuran  
Sumber : Utomo (2009)

### 2.3 *Stress Corrosion Cracking* (SCC)

*Stress Corrosion Cracking* (SCC) adalah retak akibat adanya *stress* dan terjadinya korosi secara bersamaan. Korosi jenis ini hanya terjadi jika kedua unsur penyebabnya, yaitu tegangan (*stress*) dan lingkungan korosif berada secara bersama-sama. SCC tidak akan ada kalau hanya ada tegangan atau ada lingkungan korosif saja. Tipe korosi model SCC ini biasanya terjadi pada logam SS. Hal ini disebabkan karena ketika terjadi korosi, pada permukaan logam terbentuk lapisan produk korosi. (Gapsari, 2017)



Gambar 2.4 Korosi Tegangan  
Sumber : Utomo (2009)

### 2.4 *Errosion Corrosion* (Korosi Erosi)

Merupakan korosi yang terjadi karena tercegahnya pembentukan film pelindung yang disebabkan oleh kecepatan fluida yang memiliki kandungan material abrasif. Sangat



banyak ditemukan pada pipa-pipa minyak/ gas. Pengaruh lain yang dapat menyebabkan korosi erosi antara lain adalah pengausan, abrasi, dan gesekan. Logam yang terkena korosi erosi akan menimbulkan bagian-bagian yang kasar dan tajam. Korosi erosi ini dicirikan dengan lubang bulat, bergelombang dan lembah dan biasanya menunjukkan pola arah. Logam yang rentan terkena korosi erosi ini adalah tembaga dan timah, dikarenakan logam yang lunak dan telah rusak atau aus. Penyebab korosi ini meliputi gas, lautan air, sistem organik, dan logam cair.



Gambar 2.5 Korosi Erosi  
Sumber : Utomo (2009)

## 2.5 Galvanic Corrosion (Korosi Galvanik)

Merupakan korosi yang terjadi karena terdapat dua logam yang memiliki potensial elektrokimia berbeda yang berada berdekatan. Yang akan menyebabkan logam yang lebih anodik terkorosi dan sedangkan yang lebih katodik akan terlindungi. Urutan logam pada deret elektrokimia menentukan kemungkinan oksidasi atau reduksi yang dialami logam. Deret elektrokimia ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2

Deret Elektrokimia Berdasarkan Urutan Potensial Oksidasi

Material	Reaksi Oksidasi	Potensial Standar ( $E^{\circ}$ ), volts
Lithium	$\text{Li(s)} \rightarrow \text{Li}^{\text{+}}(\text{aq}) + \text{e}^{-}$	-3.40
Kalium	$\text{K(s)} \rightarrow \text{K}^{\text{+}}(\text{aq}) + \text{e}^{-}$	-2.95
Natrium	$\text{Na(s)} \rightarrow \text{Na}^{\text{+}}(\text{aq}) + \text{e}^{-}$	-2.74
Magnesium	$\text{Mg(s)} \rightarrow \text{Mg}^{\text{2+}}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-}$	-2.363
Aluminium	$\text{Al(s)} \rightarrow \text{Al}^{\text{3+}}(\text{aq}) + 3\text{e}^{-}$	-1.66
Air	$\text{H}_2\text{O(l)} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^{-}(\text{aq})$	-0.83
Seng	$\text{Zn(s)} \rightarrow \text{Zn}^{\text{2+}}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-}$	-0.76
Kromium	$\text{Cr(s)} \rightarrow \text{Cr}^{\text{3+}}(\text{aq}) + 3\text{e}^{-}$	-0.74
Besi	$\text{Fe(s)} \rightarrow \text{Fe}^{\text{2+}}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-}$	-0.41
Cadmium	$\text{Cd(s)} \rightarrow \text{Cd}^{\text{2+}}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-}$	-0.40
Nikel	$\text{Ni(s)} \rightarrow \text{Ni}^{\text{2+}}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-}$	-0.23
Timah	$\text{Sn(s)} \rightarrow \text{Sn}^{\text{2+}}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-}$	-0.14

Material	Reaksi Oksidasi	Potensial Standar ( $E^\circ$ ), volts
Timbal	$\text{Pb(s)} \rightarrow \text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	-0.13
Besi	$\text{Fe(s)} \rightarrow \text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^-$	-0.04
Hidrogen	$\text{H}_2(\text{s}) \rightarrow 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	0.00
Timah	$\text{Sn}^{2+}(\text{s}) \rightarrow \text{Sn}^{4+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	0.15
Tembaga	$\text{Cu}^+(\text{s}) \rightarrow \text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	0.16
Tembaga	$\text{Cu(s)} \rightarrow \text{Cu}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	0.34
Iodine	$2\text{I}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{I}_2(\text{s}) + 2\text{e}^-$	0.54
Besi	$\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^-$	0.77
Perak	$\text{Ag(s)} \rightarrow \text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	0.8
Platina	$\text{Pt(s)} \rightarrow \text{Pt}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	1.2
Emas	$\text{Au(s)} \rightarrow \text{Au}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	1.498

Sumber: Gapsari (2017)




Gambar 2.6 Korosi Galvanik  
Sumber : Utomo (2009)

Prinsip korosi galvanik sama dengan prinsip elektrokimia yaitu terdapat elektroda, elektrolit, dan arus listrik. logam yang kurang tahan korosi akan menjadi anodik dan yang lebih tahan akan menjadi katodik. Biasanya katoda sangat sedikit berkarat atau bahkan tidak sama sekali. Sebagian besar aplikasi rekayasa paduan material menggunakan pasangan galvanis biasanya melibatkan satu atau dua paduan logam (Gapsari, 2017). Dengan kondisi seperti pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3

Seri Galvanik dari Beberapa Logam dan Paduan Komersial di Air Laut

Mulia atau Katodik  	Platina
	Emas
	Grafit
	Titanium
	Perak
	Chlorimet 3(62 Ni, 18 Cr, 18 Mo)
	Hastelloy C (62 Ni, 17 Cr, 15 Mo)
	18-8 Mo baja tahan karat (pasif)
	18-8 baja tahan karat (pasif)
	Baja tahan karat kromium 11-30% Cr (pasif)
	Inkonel (pasif) (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe)
	Nikel (pasif)

Perak solder  
 Monel (70 Ni, 30 Cu)  
 Kupronikel (60 Ni, 32 Mo, 1 Fe)  
 Perunggu (Cu-Sn)  
 Tembaga  
 Kuningan (Cu-Zn)  
 Klorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)  
 Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)  
 Inkonel (aktif)  
 Nikel (aktif)  
 Timah  
 Timah bubuk  
 Timah solder  
 18-8 Mo baja tahan karat (aktif)  
 18-8 baja tahan karat (aktif)  
 Ni-tahan karat (besi tuang dengan Ni yang tinggi)  
 Baja tahan karat kromium 13% Cr (aktif)  
 Besi tuang  
 Baja atau besi  
 Aluminium 2024 (4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)  
 Kadmium  
 Aluminium murni komersial (1100)  
 Seng  
 Magnesium dan paduan magnesium



Aktif atau Anodik

Sumber: Gapsari (2017)

## 2.6 Crevice Corrosion (Korosi Celah)

Merupakan jenis korosi lokal. Terjadi di selal-sela gasket, sambungan berpindah, sekrup-sekrup atau daerah permukaan logam yang tersembunyi yang terkena korosi. Korosi lokal intensif sering terjadi di dalam celah-celah dan daerah terlindung lainnya pada permukaan logam yang terkena korosi. Serangan korosi jenis ini biasanya berhubungan dengan sejumlah kecil larutan yang terjebak oleh lubang, kotoran permukaan, dan celah-celah dibawah kepala baut. (Gapsari, 2017)



Gambar 2.7 Korosi Celah  
 Sumber : Utomo (2009)

## 2.5 Cara Pengendalian Korosi

### 1. Perlindungan Anodik

Sebuah logam aktif-pasif M terkorosi pada keadaan aktif dengan tingkatan yang setara dengan  $I_{corr}(active)$ . Dalam sistem ini, hanya keadaan aktif saja yang stabil dan logam tidak dapat secara spontan berubah menuju keadaan pasif tanpa aplikasi dari arus luar. Jika logam ini berada pada keadaan pasif, maka tingkat korosinya akan berkurang menjadi  $I_{corr}(passive)$ . Batasan potensial dimana perlindungan anodik dapat dihasilkan disebut batasan perlindungan, yang mengacu pada daerah pasif. Potensial optimum untuk perlindungan anodik adalah pada tengah daerah pasif, dikarenakan logam ini memungkinkan untuk mendapat berbagai variasi pada potensialnya tanpa mempengaruhi tingkat korosi. Potensial dari elektroda atau struktur yang terbentuk dapat dibentuk dapat dipertahankan konstan dengan alat potensial konstan yang dinamakan potensiostat.

### 2. Perlindungan Katodik

Jika logam besi dihubungkan dengan magnesium, besi tersebut akan sukar mengalami korosi. Hal ini disebabkan magnesium lebih mudah teroksidasi dibandingkan besi. Magnesium bereaksi dengan oksigen dan air dalam lingkungan yang mengandung karbon dioksida dan membentuk senyawa magnesium karbonat. Magnesium karbonat yang terbentuk berfungsi untuk melindungi magnesium itu sendiri dari korosi.

#### a. Sistem Anoda Korban (*Sacrificial Anode*)

Biasanya disebut juga dengan anoda galvanik. Hal ini karena prinsip proteksi dan sumber arus yang digunakan hanya berasal dari reaksi galvanik logam (anoda) tersebut. Elektrolitnya dapat berupa air atau tanah. Proteksi katodik dengan anoda korban biasanya digunakan pada struktur dimana resistivitas tanahnya rendah dan kebutuhan arus proteksi rendah.

#### b. Sistem Arus Tanding (*Impressed Current*)

Berbeda dengan sistem anoda korban, sumber arus yang digunakan berasal dari luar, biasanya DC atau AC yang dilengkapi dengan penyearah arus, dimana kutub positif dihubungkan ke anoda. Karena struktur menerima arus dari elektrolit, maka struktur menjadi terproteksi. Keluaran arus rectifier diatur untuk mengalirkan arus yang cukup sehingga dapat mencegah arus korosi yang akan meninggalkan daerah anoda pada struktur yang dilindungi. Dengan keluaran arus dari anoda ini maka anoda tersebut terkonsumsi. Untuk itu maka sebaiknya menggunakan bahan yang laju konsumsinya lebih rendah dari magnesium, seng dan aluminium.

### 3. Paduan Logam Murni

Sambungan galvanis dari titanium dan krom menghasilkan kepasifan spontan adanya oksigen dan pengoksidasi. Ketahanan korosi dari logam aktif-pasif dalam media pengoksidasi juga dapat ditingkatkan dengan penambahan logam mulia. Sejumlah baja tahan karat mengandung sedikit platina akan menjadi pasif lebih cepat dengan kehadiran dari oksigen dan pengoksidasi lainnya. Konsep paduan ini merupakan aplikasi dari teori potensial campuran terdapat reaksi korosi.

### 4. Pelapisan (*Coating*)

Jika logam besi dilapisi timah atau tembaga, besi akan terlindungi dari korosi. Hal ini disebabkan logam Cu dan Sn memiliki potensial reduksi yang lebih positif daripada potensial reduksi besi. Namun jika lapisan ini bocor besi akan mengalami korosi dengan cepat karena lapisan tembaga atau timah terbuka. Selain dilapisi dengan tembaga dan timah, besi juga dapat dilapisi dengan logam lain yang sukar teroksidasi. Logam yang dapat digunakan adalah logam yang memiliki potensial reduksi lebih positif dibandingkan besi, seperti perak, emas, nikel, timah, tembaga, dan platina.

### 5. Inhibitor

Inhibitor adalah suatu bahan kimia yang ketika ditambahkan dalam jumlah konsentrasi yang tertentu pada suatu lingkungan, dapat secara efektif mengurangi laju korosi. Inhibitor bereaksi dengan permukaan logam yang terekspos dalam suatu lingkungan dan akan memberikan proteksi pada permukaan tersebut.

## 2.6 Korosi Berdasarkan Termodinamika

Dalam bebas kebanyakan logam ditemukan dalam keadaan tergabung secara kimia yang disebut *ore*. Bijih – bijih ini bisa berupa oksida, sulfida, karbonat atau senyawa lain yang lebih kompleks. Dengan adanya teori termodinamika dapat dikatakan bahwa bijih atau senyawa lain berada pada energi yang terendah. Energi yang besar diperlukan untuk memisahkan logam misalnya besi dari bijihnya seperti besi oksida, ini dilakukan dengan melalui pemanasan (dengan pereduksi) dalam sebuah *blast furnace* dengan temperatur sekitar 1600°C. Oleh karena itu logam – logam dalam keadaan tidak bergabung dengan bahan lain yang memiliki tingkat energi yang tinggi, Hukum termodinamika menggambarkan keadaan energi yang tinggi yang akan berubah ke energi yang rendah. Kecendrungan ini membuat logam – logam bergabung kembali dengan unsur – unsur yang ada dilingkungan, yang akhirnya membentuk gejala korosi.



Energi bebas merupakan faktor satu – satunya yang menentukan suatu korosi berlangsung spontan atau tidak. Setiap energi bebas suatu unsur dinyatakan sebagai  $G$  dan perubahan energi dinyatakan sebagai  $\Delta G$ . Peralihan energi tinggi ke rendah, yang menyebutkan bahwa energi yang diberikan dengan tanda negatif dan energi yang diserap oleh sistem dengan tanda positif. Jadi agar suatu reaksi dapat berjalan spontan maka  $\Delta G$  harus negatif. Semua korosi bergantung pada temperatur, ini karena tingkat energi bebas unsur – unsur terlibat bergantung pada temperatur. (Chodijah, 2008)

## 2.7 Korosi Berdasarkan Elektrokimia

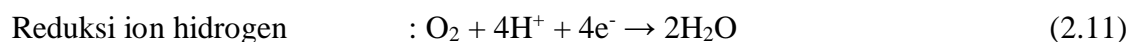
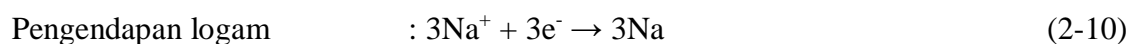
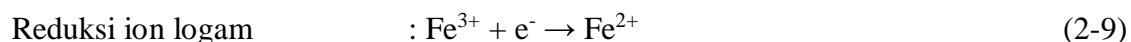
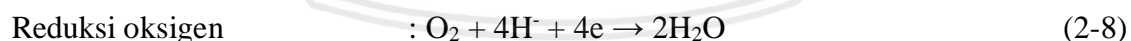
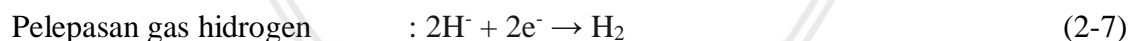
Mekanisme korosi tidak terlepas dari reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan elektron – elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks. Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi anodik di daerah anodik. Reaksi anodik (oksidasi) diindikasikan melalui peningkatan valensi atau produk elektron – elektron.



Proses korosi dari logam  $M$  adalah proses oksidasi logam menjadi satu ion ( $n^+$ ) dalam pelepasan  $n$  elektron. Harga dari  $n$  bergantung dari sifat logam sebagai contoh besi :



Dan reaksi katodik juga berlangsung di proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan valensi atau konsumsi elektron – elektron yang dihasilkan dari reaksi anodik. Reaksi katodik terletak di daerah katoda. Contoh jenis reaksi katodik yang terjadi pada saat proses korosi logam yaitu:



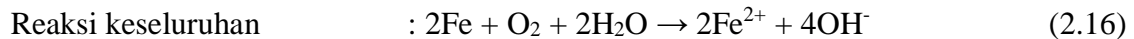
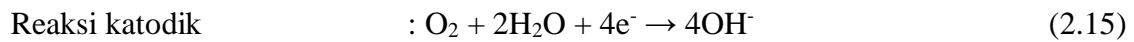
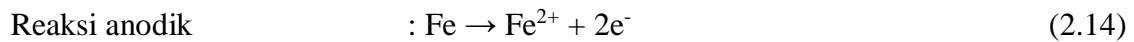
Reaksi katodik dimana oksigen dari udara akan larut dalam larutan terbuka ( $NaCl.H_2O$ ).

Reaksi korosi tersebut sebagai berikut :



Peristiwa korosi pada struktur pipa, baik yang terjadi di lingkungan tanah dan air harus melibatkan syarat – syarat diatas. Peristiwa korosi pada struktur pipa memiliki reaksi anoda dan katoda :





Pada reaksi (2.13) dan (2.14) melibatkan elektron. Reaksi anodik adalah reaksi perubahan logam baja menjadi ion  $\text{Fe}^{2+}$  dengan melepaskan 2 elektron dimana terjadi penambahan bilangan oksidasi dari 0 menjadi 2, sedangkan reaksi katodik adalah reaksi pelarutan oksigen  $\text{O}_2$  didalam air menjadi ion  $\text{OH}^-$  dengan membutuhkan 4 elektron dimana terjadi pengurangan bilangan oksidasi 0 menjadi -4. Elektron ini akan mengalir dari reaksi anodik menuju reaksi katodik untuk mencapai kesetimbangan yang dinamis. Pergerakan elektron ini mengakibatkan terjadinya arus listrik yang arahnya berlawanan dengan arah aliran arus listrik berasal dari katoda menuju anoda. (Chodijah, 2008)

## 2.8 Perhitungan Laju Korosi

Mengetahui laju korosi dengan menggunakan metode *weight loss*. Setelah didapat berat yang hilang maka laju korosi juga akan dapat cari menggunakan rumus berikut:

$$\text{CR(mmpy)} = \frac{87600 \times (m_o - m)}{A \times d \times t} \quad (2-17)$$

Sumber: (Wu et al., 2019)

$$\text{CR(g/m}^2\text{day)} = \text{CR(mmpy)} \times 2,74\text{d} \quad (2-18)$$

Sumber: (Popov, 2015)

Dimana:

$m_o$  = Massa sebelum terjadi korosi (g)

$m$  = Massa setelah terjadi korosi (g)

$A$  = Luas area terkena korosi ( $\text{cm}^2$ )

$d$  = Massa jenis spesimen ( $\text{g/cm}^3$ )

$t$  = Durasi pencelupan (jam)

CR = Laju korosi (mmpy atau  $\text{g/m}^2\text{day}$ )

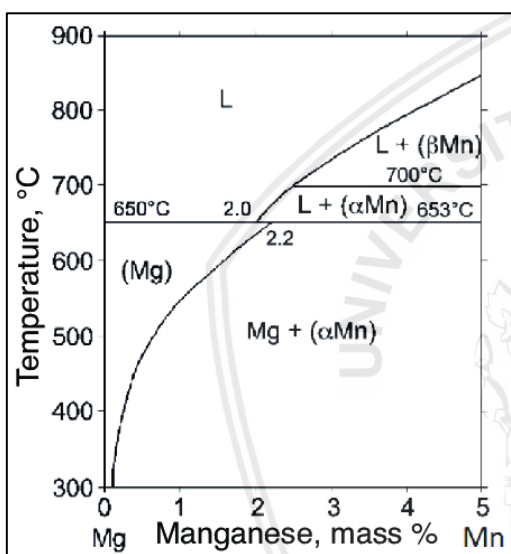
## 2.9 Heat Treatment Mg

*Heat treatment* merupakan sebuah proses dimana sifat logam dapat berubah dengan cara mengubah struktur mikronya melalui proses pemberian panas kepada logam dan dengan mengatur waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan suhu logam tersebut pada proses pendinginan dengan atau tanpa merubah komposisi kimia logam tersebut. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan sifat-sifat logam sesuai dengan kebutuhan pengguna. Pada

proses berjalannya, seluruh bagian atau hanya sebagian dari logam dapat terpengaruh proses ini.

Perubahan fisik yang terjadi pada logam setelah melalui proses *heat treatment* berpengaruh pada konduktifitas elektrisnya, dimana pada proses *heat treatment* dengan proses pendinginan lambat dapat meningkatkan konduktivitas listriknya.

Temperatur rekristalisasi *heat treatment* untuk magnesium adalah sekitar 385°C. Saat mencapai titik rekristalisasi maka sifat mekanik dari magnesium akan berubah, sebelum tanpa perlakuan magnesium akan memiliki kekerasan yang rendah ketika diberi perlakuan hingga mencapai temperatur rekristalisasi akan meningkatkan kekerasan dari magnesium tersebut.



Gambar 2.8 Diagram Fase Mg-Mn

### 2.9.1 Homogenization Treatment

Homogenitas dan heterogenitas adalah konsep yang berkaitan dengan keseragaman atau kesamarataan suatu substansi. Bahan yang homogen seragam dalam komposisi atau karakter. Heterogen merupakan ketidakseragaman dari segi komposisi dan karakter pada material. Perlakuan ini digunakan sebelum proses kerja panas dan dilakukan untuk menyamakan suhu di seluruh paduan atau untuk mengurangi efek cor yang disebabkan oleh komposisi kimia yang tidak seragam.

Banerjee (2016) mengatakan bahwa *homogenization* dilakukan untuk menghilangkan ketidakhomogenan kimia yang terjadi dalam pengecoran baja paduan. Pada kenyataannya sebagian besar pengecoran baja diproduksi dibawah laju pendinginan sedang seperti pada *sand mold* mengalami pemisahan elemen paduan disepanjang batas sel dari struktur dendritik sel. *Homogenization* jika dilakukan pada suhu tinggi maka akan menghasilkan

struktur mikro butir yang kasar dan disertai dengan pembentukan sisik pada permukaan *casting*.

### 2.9.2 Solution Treatment

*Solution treatment* merupakan tahap perlakuan panas setelah *homogenization treatment* yang bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanik dan meningkatkan kekerasan. Prosesnya adalah fasa-fasa yang terlarut menjadi padat dan semakin lama *holding time* kemudian ukuran butir dari fasa tersebut mulai bertambah. Dengan diberi perlakuan *solution treatment* akan didapat sifat mekanik yang lebih baik. Akan tetapi semakin tinggi temperatur *solution treatment* menyebabkan kekerasan dari material berkurang (Li, 2013).

### 2.10 Baja API 5L

API adalah singkatan dari *American Petroleum Institute* yang merupakan asosiasi perdagangan. Hal ini didirikan serangkaian standar untuk memastikan kualitas minyak bumi dan peralatan terkait dan produk. Pipa baja API digunakan untuk mentransfer air, gas atau minyak bumi. Ketika pipa baja yang digunakan untuk mengangkut minyak bumi, *installer* perlu untuk memungkinkan untuk standar yang dikeluarkan oleh API. Pipa baja API dirancang dengan diameter standar dan ketebalan dinding. API perlu memainkan perannya dalam mengatur pengembangan industri minyak bumi di Amerika, sehingga tugasnya untuk membuat peraturan yang harus diikuti untuk memastikan keamanan dan properti. Menurut peraturan, diameter pipa Baja API harus lebih tebal dari 0,375 inci. Sementara diameter harus lebih kurang 10 inci. Kualifikasi pipa tersebut perlu diuji oleh insinyur yang memenuhi syarat tertentu dan pipa yang tidak termasuk kualifikasi harus ditinggalkan. (American Petroleum Institute, 1995)

Tabel 2.3  
Spesifikasi Baja API 5L

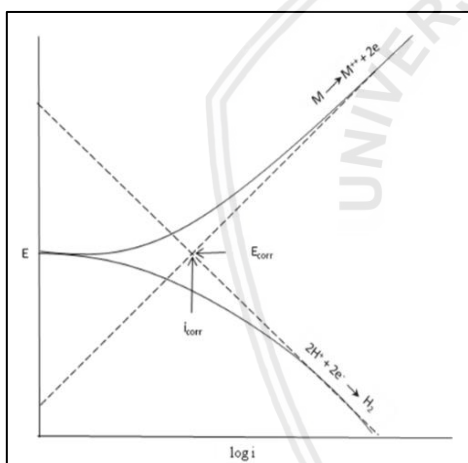
Grade	<i>Yield Strength</i>	<i>Tensile Strength</i>	<i>Yield to Tensile</i>	<i>Elongation</i>
	Min. (KSI)	Min. (KSI)	Ratio (max)	%
API 5L X52	52	66	0,93	21
API 5L X56	56	71	0,93	19
API 5L X60	60	75	0,93	19
API 5L X65	65	77	0,93	18
API 5L X70	70	82	0,93	17

Sumber : API 5L *International Suppliers*

## 2.11 Teknik Polarisasi untuk Mengetahui Laju Korosi

Tafel ekstrapolasi dan resistensi polarisasi adalah dua metode untuk mengukur laju korosi. Metode polarisasi adalah teknik eksperimental yang lebih cepat dibandingkan dengan estimasi *weight loss*. Hubungan tafel sehubungan dengan aktivasi yang dikendalikan anodik dan proses katodik. Untuk reaksi elektrokimia di bawah kontrol aktivasi, kurva polarisasi menunjukkan perilaku linier dalam plot E Vs (i) yang disebut perilaku Tafel. Perilaku polarisasi dari logam dalam larutan asam dengan adanya dan tidak adanya oksigen diilustrasikan pada Gambar 2.9.

Kurva polarisasi katodik yang khas sehubungan dengan perilaku Tafel juga diberikan. Ekstrapolasi Tafel katodik dan anodik bergaris miring ke potensi korosi ( $E_{\text{corr}}$ ) ditunjukkan. Titik persimpangan sesuai dengan kepadatan arus korosi ( $i_{\text{corr}}$ ) atau laju korosi pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Polarisasi logam (M) dalam larutan asam  
Sumber : Natarajan (2018)

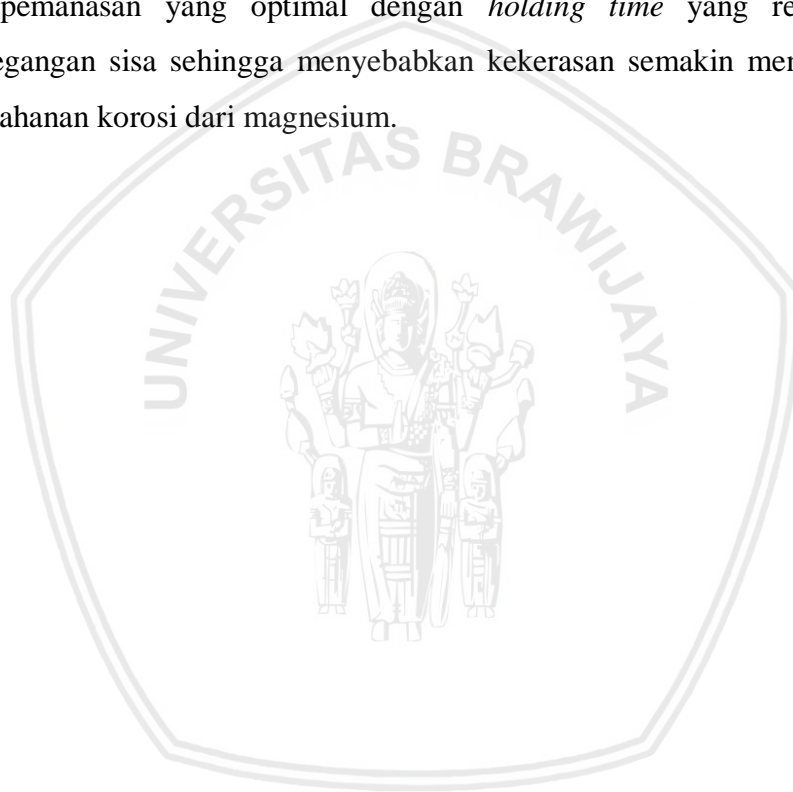
Setidaknya satu dekade linearitas dalam ekstrapolasi Tafel diinginkan untuk memastikan akurasi yang baik. Ketika polarisasi konsentrasi dan resistensi ohmik muncul, akurasi dalam ekstrapolasi Tafel menjadi semakin sulit. Kurva polarisasi keadaan stabil perlu diperoleh agar lebih mewakili reaksi korosi. Metode potensiostatik dan galvanostatik perlu dibandingkan untuk memastikan pilihan teknik yang lebih baik untuk menentukan laju korosi.

Ada beberapa kekurangan dalam ekstrapolasi Tafel. Karena kurva polarisasi tidak dapat dibalik dan dipengaruhi oleh kondisi eksperimental dan lingkungan, konstanta Tafel dapat bervariasi dari satu sistem ke sistem lainnya. Seringkali kurva anodik mungkin tidak menunjukkan perilaku linier di dekat  $E_{\text{corr}}$ . (Natarajan, 2018)

## 2.12 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka yang dibuat, dapat diambil hipotesis bahwa magnesium (Mg) dapat menghambat korosi pada baja API 5L X65 dengan menjadikannya sebagai anoda tumbal. Magnesium tersebut dilakukan *solution treatment* yang bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanik dan meningkatkan kekerasan dari magnesium. Dengan semakin tingginya temperatur dan semakin lama *holding time* menurunkan kekerasan magnesium. Sehingga menurunnya kekerasan pada magnesium menyebabkan turunnya juga tingkat ketahanan korosi pada magnesium tersebut. Ketahanan korosi rendah menyebabkan laju korosi yang tinggi.

Temperatur pemanasan yang optimal dengan *holding time* yang rendah akan menghilangkan tegangan sisa sehingga menyebabkan kekerasan semakin meningkat dan meningkatkan ketahanan korosi dari magnesium.



## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Spesimen yang digunakan sebagai anoda tumbal adalah magnesium murni yang belum diberi perlakuan. Perlunya diberi perlakuan supaya dapat diperbaikinya sifat mekanik dan ditingkatkannya kekerasan anoda tumbal tersebut.

Spesimen anoda tumbal dilakukan proses perlakuan panas *homogenization treatment*. Temperatur *homogenization treatment* 400°C. Sedangkan waktu penahanan (*holding time*) yang dilakukan adalah selama 6 jam kemudian didinginkan oleh media udara. Setelah *homogenization treatment* dilanjutkan dengan *solution treatment* dengan temperatur 350, 400, dan 450°C dan waktu *holding* selama 1, 2, dan 3 jam dengan pendinginan oleh media udara.

Kemudian spesimen yang telah diberi perlakuan *solution treatment* diuji ketahanan korosinya pada media air laut. Anoda tumbal Mg dikopel dengan baja API 5L X65 yang berperan sebagai logam yang dilindungi (katoda) dan direndam dalam media air laut. Uji korosi dilakukan untuk mengetahui laju pengurangan berat anoda tumbal magnesium pada selang waktu.

### 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada rentang waktu 19 April 2019 hingga 12 Juni 2019. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium sebagai berikut:

1. Laboratorium Pengujian Bahan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

### 3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan sebelum penelitian. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah:



- a. Variasi temperatur *solution treatment* adalah 350°C, 400°C, dan 450°C.
- b. Variasi waktu *solution treatment* adalah 1 jam, 2 jam, dan 3 jam.

## 2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas. Dalam penelitian ini variabel terikatnya adalah laju korosi.

## 3. Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dikonstantakan. Dalam penelitian ini yang menjadi variabel terkontrol adalah:

- a. Temperatur *homogenization treatment* adalah 400°C dan *holding time* selama 6 jam.
- b. Pendinginan *homogenization* dan *solution treatment* adalah menggunakan pendinginan oleh media udara.
- c. Dimensi spesimen yaitu 40 mm x 5 mm x 10 mm.
- d. Temperatur untuk pengujian korosi adalah temperatur kamar.

## 3.4 Peralatan dan Bahan yang Digunakan

### 3.4.1 Peralatan yang Digunakan

Pada penelitian ini digunakan beberapa peralatan, yaitu:

#### 1. Dapur listrik

Digunakan untuk proses pemanasan dan *holding* spesimen dengan variasi temperatur dan variasi *holding time*.



Gambar 3.1 Dapur Listrik

Spesifikasi :

Merk : OPENBAU HOFMAN

Tipe : E/90

<i>Voltage</i>	: 220 V
<i>Daya</i>	: 3.3 Kw
<i>Temperatur Maks.</i>	: 1100°C
<i>Buatan</i>	: Austria

## 2. Alat uji kekerasan

Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan pada spesimen.



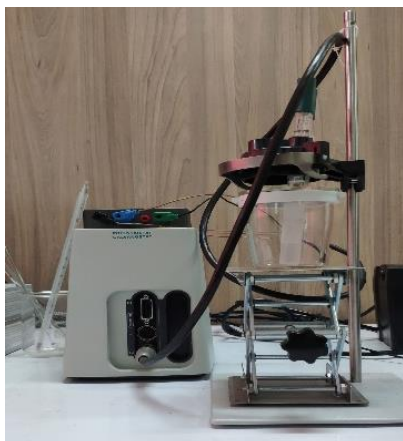
Gambar 3.2 Hardness Rockwell Mitutoyo

Spesifikasi :

<i>Merk</i>	: HR-320MS
<i>Display</i>	: <i>Digital</i>
<i>Type of hardness test</i>	: Rockwell & Rockwell Superficial
<i>Power Supply</i>	: AC100-240V, 1.2A

## 3. Potensiodinamik Autolab PGSTAT 204

Digunakan untuk mengetahui laju korosi secara elektrokimia.



Gambar 3.3 Metrohm Autolab PGSTAT 204

Spesifikasi :

<i>Electrode connections</i>	: 2, 3 dan 4
<i>Potential range</i>	: +/- 10 V
<i>Compliance voltage</i>	: +/- 20 V
<i>Maximum current</i>	: +/- 400 mA
<i>Current ranges</i>	: 100 mA to 10 nA
<i>Potential accuracy</i>	: +/- 0.2%
<i>Potential resolution</i>	: 3 $\mu$ V
<i>Current accuracy</i>	: +/- 0.2%
<i>Current resolution</i>	: 0.0003% (of current range)
<i>Input impedance</i>	: > 100 GOhm
<i>Potentiostat bandwidth</i>	: 1 MHz
<i>Computer interface</i>	: USB
<i>Control software</i>	: NOVA 1.11

#### 4. *Moisture Analyzer* MOC – 120H

Digunakan untuk menimbang *weight loss* setelah terjadinya korosi.



Gambar 3.4 *Moisture Analyzer*

Spesifikasi :

<i>Maximum capacity</i>	: 120 g
<i>Minimum readability</i>	: 0.001 g
<i>Pan size</i>	: Dia. 130 mm
<i>Display</i>	: LCD with backlight

### 5. Adaptor AC – DC

Digunakan untuk memberi tegangan pada saat uji *immerse*



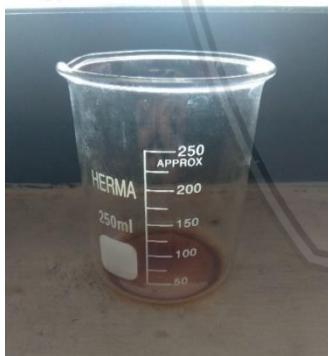
Gambar 3.5 Adaptor

Spesifikasi :

Merk	: VISERO
Buatan	: China
Input	: 220V 50-60 Hz
Output	: 1.5-12 V 1000mA

### 6. Baker glass

Digunakan sebagai wadah larutan NaCl 3,38% untuk pengujian korosi.



Gambar 3.6 Baker Glass

### 3.4.2 Bahan yang Digunakan

#### 1. Anoda Tumbal

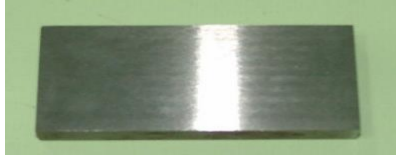
Magnesium murni digunakan sebagai anoda tumbal yang akan diuji komposisinya setelah diperlakukan panas. Magnesium ditunjukkan pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Spesimen Anoda

## 2. Logam yang Dilindungi (Katoda)

Sedangkan katoda atau logam yang akan dilindungi adalah baja untuk struktur dan konstruksi yaitu pelat baja API 5L. Baja yang digunakan untuk katoda adalah baja API 5L X65 tanpa perlakuan pada Gambar 3.8



Gambar 3.8 Spesimen Katoda

Tabel 3.1 merupakan komposisi dari logam yang dilindungi yaitu baja API 5L X65.

Tabel 3.1

Komposisi Baja API 5L X65 (dalam %)

Fe	Mn	P	C	S
98,23	1,45	0,03	0,26	0,03

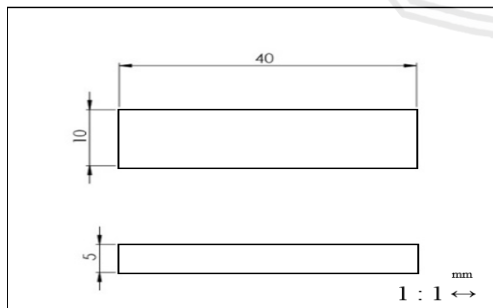
Sumber: KRM (2019)

## 3. Media Pengkorosif

Media pengkorosif atau elektrolit yang digunakan pada uji korosi adalah air laut 3,38% NaCl. Elektrolit dibuat dengan menambahkan 35 g NaCl dalam 1000 ml aquadest.

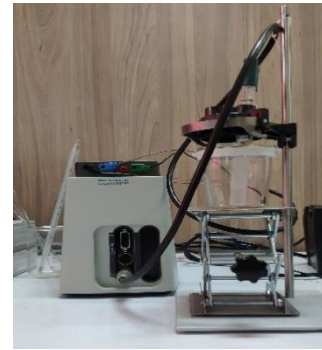
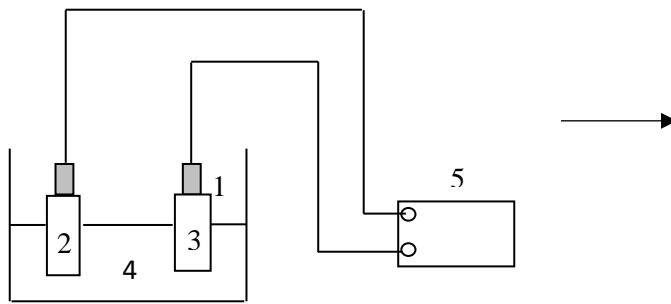
### 3.5 Dimensi Benda Kerja

Plat baja API 5L X65 dan magnesium akan dipotong dengan dimensi 40 mm x 5 mm x 10 mm. Setelah plat baja API 5L X65 dan magnesium dipotong sesuai dengan dimensi yang ditentukan, spesimen akan dibersihkan permukaannya menggunakan amplas. Gambar 3.9 merupakan dimensi dari spesimen.



Gambar 3.9 Dimensi Spesimen

### 3.6 Skema Penelitian



Gambar 3.10 Skema Penelitian

### 3.7 Prosedur Penelitian

#### 3.7.1 Proses *Heat Treatment*

1. Mempersiapkan spesimen yang akan diberi perlakuan panas.
2. Spesimen kemudian dipanaskan dalam dapur pemanasan dengan temperatur awal adalah temperatur kamar dan kecepatan pemanasannya  $1^{\circ}\text{C/s}$ .
3. Kemudian dilakukan *homogenization treatment* dengan cara dilakukan pemanasan hingga  $400^{\circ}\text{C}$ .
4. Setelah mencapai temperatur *homogenization treatment* yaitu  $400^{\circ}\text{C}$ , kemudian temperatur dipertahankan selama 6 jam.
5. Saat waktu *homogenization treatment* selesai, selanjutnya spesimen uji didinginkan dengan pendinginan media udara.



6. Selesai *homogenization treatment* dilanjutkan dengan *solution treatment* yaitu dengan memanaskan spesimen dengan temperatur 350°C pada variasi waktu (*holding time*) sebesar 1 jam, 2 jam dan 3 jam.
7. Kemudian spesimen uji dikeluarkan dari dapur dan didinginkan oleh media udara.
8. *Point* no 6-7 diulangi lagi dengan temperatur sebesar 400°C dan 450°C.

### 3.7.2 Pengujian Kekerasan

1. Siapkan spesimen yang akan diuji
2. Bersihkan kotoran yang ada pada spesimen
3. Siapkan permukaan spesimen yang mau diuji.
4. Siapkan perangkat uji kekerasan Rockwell *Hardness* Mitutoyo:
  - a. Mengatur beban sebesar (15 kgf)
  - b. Memasang *indenter ball* 1/16"
  - c. Menaruh spesimen pada landasan
  - d. Atur tuas pada posisi *unloading*
5. Putar *turn wheel* searah jarum jam secara perlahan hingga benda kerja menyentuh indenter tanpa mengalami *impact*.
6. Tunggu sampai harga kekerasan senilai HR15T terbaca pada layar.

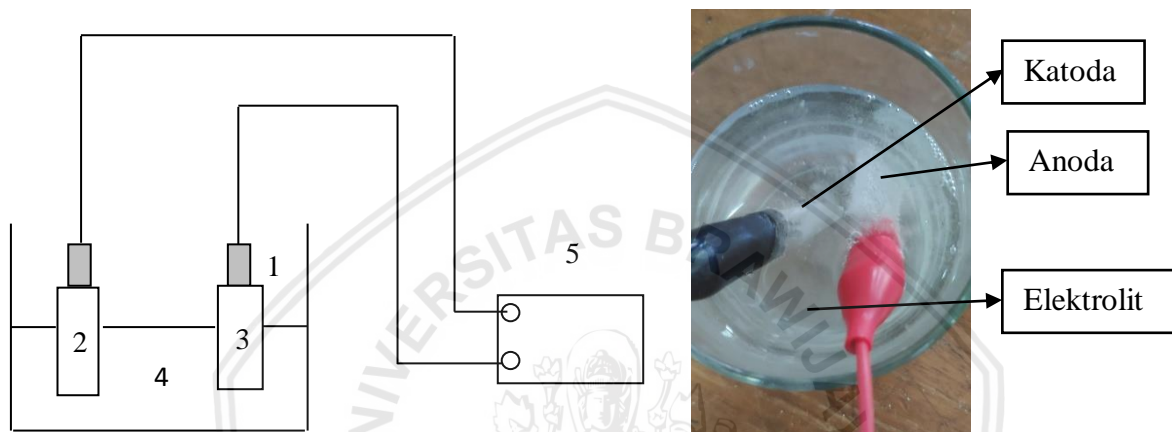
### 3.7.3 Pengujian Korosi Metode *Weight Loss*

Pengujian korosi berdasarkan standar ASTM G 1 – 90 vol 03.02 tentang korosi.

1. Persiapan spesimen yaitu magnesium dan baja API 5L X65 dipotong sesuai dengan ukuran spesimen uji. Permukaan spesimen, katoda dan anoda, dibersihkan dari kotoran dan permukaan digosok dengan kertas amplas sampai *grade* 2000 agar nantinya menghasilkan hasil korosi yang *uniform*. Kemudian spesimen dicuci bersih dan dikeringkan. Spesimen ditimbang untuk mengetahui berat mula-mula dan diukur lagi dimensinya.
2. Persiapan sarana uji meliputi persiapan wadah yang diisi sampai dengan 1000 mL aquadest ditambah 35 g NaCl.
3. Setiap sepasang spesimen, anoda dan katoda, dicelup ke dalam baker glass. Yang tercelup pada elektrolit adalah dua pertiga dari total luasan spesimen. Percobaan dilakukan tanpa pengadukan dan kecepatan elektrolit diabaikan. Anoda dan katoda dihubungkan dengan konduktor listrik sehingga terbentuk sel galvanik. Reaksi korosi akan dipercepat dengan pemberian tegangan dari adaptor AC – DC dengan besar

tegangan sebesar 6V. Pengukuran dilakukan pada selang waktu tertentu. Rangkaian sel galvanik tampak seperti Gambar 3.11.

4. Spesimen dicelup (imersi) selama 6 jam pertama. Setelah waktu pencelupan selesai, spesimen uji diangkat kemudian dibersihkan untuk menghilangkan produk korosi. Pembersihan produk korosi menggunakan metode *mechanical cleaning* yaitu disikat dengan sikat halus sambil dialiri air. Spesimen kemudian dikeringkan sampai benar-benar kering. Setelah itu spesimen difoto dan ditimbang kembali.
5. *Point* no. 4 diulangi untuk waktu pencelupan selama 12, 18, dan 24 jam.



Gambar 3.11 Skema Rangkaian Sel Galvanik untuk Uji Korosi

Keterangan:

1. Penjepit buaya
2. Anoda
3. Katoda
4. Elektrolit (air laut)
5. Adaptor

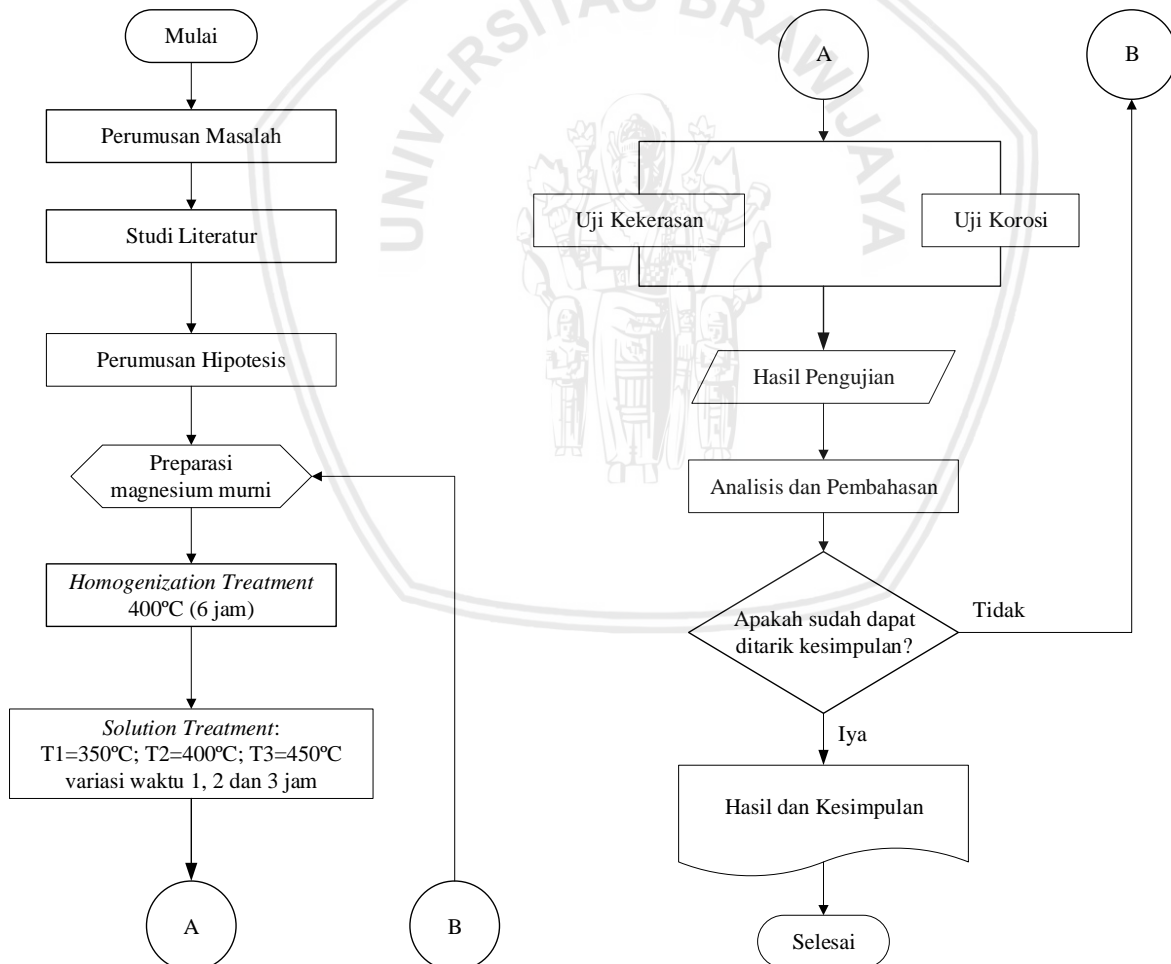
### 3.7.4 Pengujian Korosi Secara Elektrokimia

1. Siapkan larutan NaCl 3,38% terbuat dari 35 gram NaCl dicampur dengan Aquades sebanyak 1000 ml.
2. Persiapkan peralatan untuk pengujian elektrokimia, yaitu Potensiostat Autolab PGSTAT 204 yang dihubungkan dengan komputer dan software NOVA 1.11.
3. Letakkan spesimen baja karbon rendah pada elektroda kerja, kemudian Ag/ AgCl dipasang sebagai elektroda pembanding, dan platina sebagai elektroda bantu. Kemudian masukkan kedalam gelas ukur yang berisi larutan NaCl 3,38%.
4. Pada Software NOVA 1.11 yang sudah terhubung dengan potensiostat Autolab PGSTAT 204 yang berfungsi sebagai sumber potensial diatur pada 0 mv hingga -0,1 mv.

5. Setelah pengaturan selesai, klik tanda Start untuk memulai proses scanning yang berlangsung selama 15 menit, hal ini bertujuan untuk mencari nilai potensial yang akan digunakan untuk running pengujian spesimen tersebut.
6. Setelah nilai potensial ditemukan, berikutnya *software* NOVA 1.11 di running pada potensial 0 mv hingga -0,1 mv. Selama proses running secara otomatis NOVA 1.11 akan menampilkan pembuatan grafik Tafel yang dibuat secara bertahap.
7. Setelah grafik Tafel terbentuk, masukkan data massa jenis material yang diuji ( $\text{g/cm}^3$ ), *equivalent weight*, serta luas permukaan material yang diuji ( $\text{cm}^2$ ). Data-data tersebut kemudian digunakan oleh *software* untuk menghitung laju korosinya.

### 3.8 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.12 merupakan gambar diagram penelitian dalam skripsi ini.

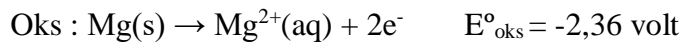


Gambar 3.12 Diagram Alir Penelitian

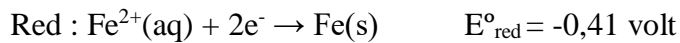
## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara teoritis perhitungan energi bebas dapat dihitung sebagai berikut :

a. Untuk proses oksidasi yang terjadi pada Mg dapat dihitung sebagai berikut :



b. Sedangkan proses reduksi yang terjadi pada Fe, didapatkan persamaan berikut :



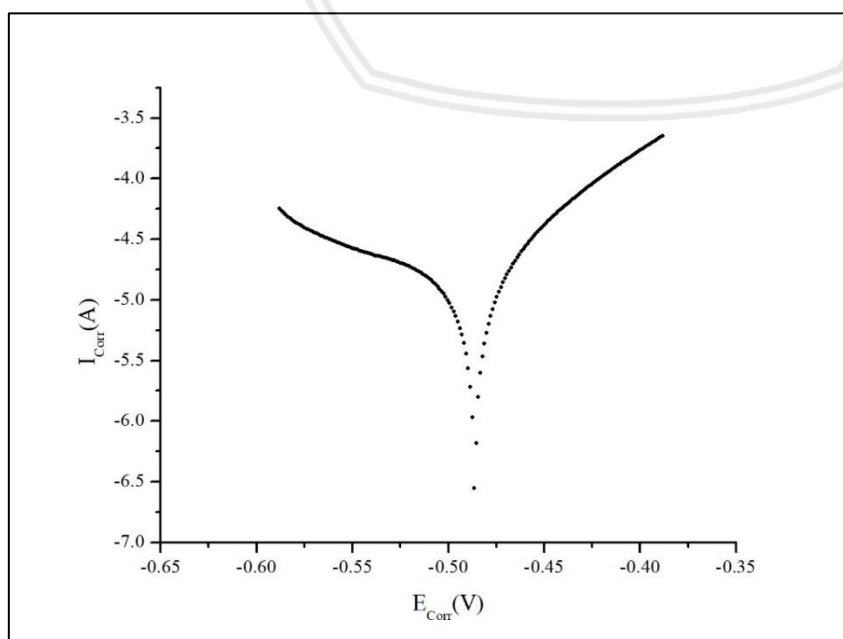
$$\begin{aligned} E(\text{Mg/Mg}^{2+}) &= E^\circ(\text{Mg/Mg}^{2+}) - 0,059/2 \log[\text{Mg}^{2+}] \\ &= -2,36 - 0,059/2 \log [10^{-2}] = -2,419 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}) &= E^\circ(\text{Fe/Fe}^{2+}) - 0,059/2 \log[1/\text{Fe}^{2+}] \\ &= -0,41 - 0,059/2 \log [1/10^{-2}] = -0,469 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{sel}} &= E_{\text{red}} - E_{\text{oks}} \\ &= (-0,469) - (-2,419) = 1,95 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta G &= -n F E \\ &= - (2 \times 96500 \times 1,95) = -376,350 \text{ kJ} \end{aligned}$$

### 4.1 Data Pengukuran Laju Korosi Anoda dan Katoda Tanpa Perlakuan dengan Uji Elektrokimia

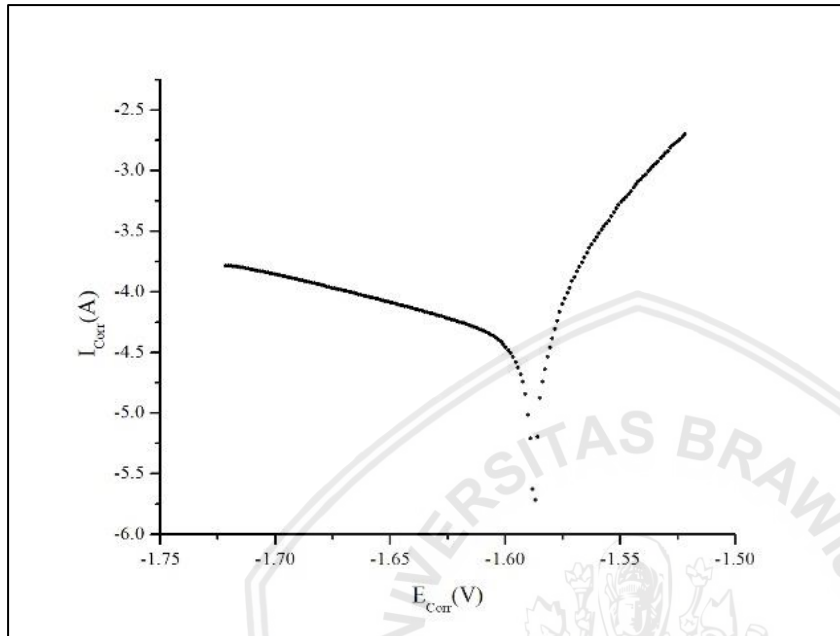


Gambar 4.1 Kurva Polarisasi Baja API 5L X65 Tanpa Perlakuan



Tabel 4.1  
Parameter Polarisasi Baja API 5L X65 Tanpa Perlakuan

$i_{\text{corr}}$ (A)	Corrosion rate (mppy)	Scan Rate (V/s)	Start Potential (V)	Stop Potential (V)	Step Potential (V)
$3,85 \times 10^{-05}$	0,4475	0,001	-0,1	0,1	0,001



Gambar 4.2 Kurva Polarisasi Anoda Mg Tanpa Perlakuan

Tabel 4.2  
Parameter Polarisasi Anoda Mg Tanpa Perlakuan

$i_{\text{corr}}$ (A)	Corrosion rate (mppy)	Scan Rate (V/s)	Start Potential (V)	Stop Potential (V)	Step Potential (V)
$4,73 \times 10^{-05}$	1,0659	0,001	-0,1	0,1	0,001

Dari Gambar 4.1 dan 4.2 dengan Tabel 4.1 dan 4.2 menunjukkan laju korosi dari anoda tumbal Mg dan baja API 5L X65 sebagai katoda. Dapat dilihat dari gambar kurva polarisasi bahwa magnesium memiliki potensial yang lebih negatif dari baja API 5L X65. Potensial yang lebih negatif mengakibatkan semakin tinggi juga laju korosi hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan 4.2 bahwa laju korosi magnesium lebih tinggi dibandingkan baja API 5L X65 karena magnesium memiliki potensial yang lebih negatif.

#### 4.2 Perhitungan Laju Korosi dengan Metode *Weight Loss*

Pengujian dilakukan dengan merendam spesimen anoda (magnesium) dan katoda (baja API 5L X65) kedalam larutan yang korosif yaitu NaCl 3,38%. Magnesium dan baja API 5L X65 diberi tegangan sebesar 6 volt guna mempercepat proses korosi. Masing - masing



spesimen diberi nomor untuk memudahkan identifikasi kemudian di tabelkan pada tabel 4.3 dibawah:

Tabel 4.3

Data Hasil Pengujian Laju korosi dengan Metode *Weight Loss*

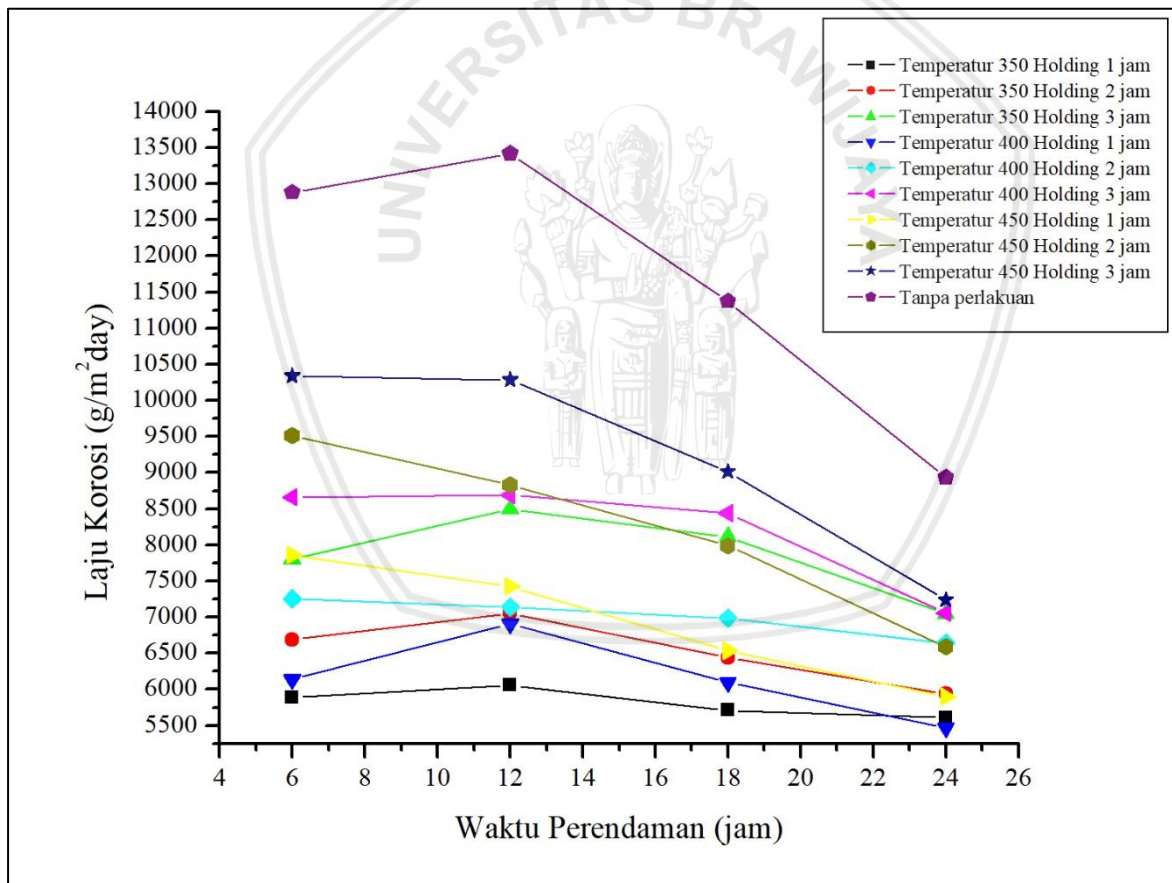
No. Sampel	Luas Permukaan (cm <sup>2</sup> )	Berat Awal (g)	Berat Akhir (g)	Selisih Berat (g)	Lama Uji (Jam)	Laju Korosi (g/m <sup>2</sup> day)
X11	4	3.356	2.767	0.589	6	5890.589
	4	3.356	2.145	1.211	12	6055.606
	4	3.356	1.643	1.713	18	5710.571
	4	3.356	1.113	2.146	24	5608.061
X12	4	3.336	2.667	0.669	6	6690.669
	4	3.336	1.925	1.411	12	7055.706
	4	3.336	1.404	1.932	18	6440.644
	4	3.336	0.958	2.378	24	5945.595
X13	4	3.376	2.596	0.780	6	7800.78
	4	3.376	1.677	1.699	12	8495.85
	4	3.376	0.942	2.434	18	8114.145
	4	3.376	0.558	3.018	24	7045.705
X21	4	3.401	2.787	0.614	6	6140.614
	4	3.401	2.020	1.381	12	6905.691
	4	3.401	1.573	1.828	18	6093.943
	4	3.401	1.214	2.187	24	5468.047
X22	4	3.262	2.537	0.725	6	7250.725
	4	3.262	1.834	1.428	12	7140.714
	4	3.262	1.165	2.097	18	6990.699
	4	3.262	0.606	2.656	24	6640.664
X23	4	3.298	2.432	0.866	6	8660.866
	4	3.298	1.560	1.738	12	8690.869
	4	3.298	0.767	2.531	18	8437.51
	4	3.298	0.474	3.024	24	7060.706
X31	4	3.343	2.557	0.786	6	7860.786
	4	3.343	1.858	1.485	12	7425.743
	4	3.343	1.383	1.960	18	6533.987
	4	3.343	0.984	2.359	24	5898.09
X32	4	3.304	2.353	0.951	6	9510.951
	4	3.304	1.538	1.766	12	8830.883
	4	3.304	0.907	2.397	18	7990.799
	4	3.304	0.670	2.634	24	6585.659
X33	4	3.277	2.243	1.034	6	10341.03
	4	3.277	1.220	2.057	12	10286.03
	4	3.277	0.573	2.704	18	9014.235
	4	3.277	0.383	2.894	24	7235.724

Keterangan : Xij; i = variasi temperatur, j = variasi *holding time*

Pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa pengurangan berat terbesar adalah pada temperatur 450 °C dengan *holding time* selama 3 jam yaitu pada perendaman 6 jam sebesar 1,034 g, pada pe-rendaman 12 jam sebesar 2,057 g, pada pe-rendaman 18 jam sebesar 2,704 g dan pada perendaman 24 jam sebesar 2,894 g. Sedangkan pengurangan terkecil pada temperatur 350°C dengan *holding time* selama 1 jam yaitu pada perendaman 6 jam sebesar

0,589 g, pada perendaman 12 jam sebesar 1,211 g, pada perendaman 18 jam sebesar 1,713 g dan pada perendaman 24 jam sebesar 2,146 g. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada temperatur 350°C selama 1 jam merupakan temperatur dan *holding time* yang optimal untuk *solution treatment* magnesium dan pada temperatur 450°C dengan *holding time* selama 3 jam pengurangan berat sangat besar. Laju korosi yang semakin menurun tersebut disebabkan oleh *heat treatment* dari *solution treatment* yang memperbaiki sifat mekanik dari anoda, sehingga perubahan sifat mekanik dapat ditunjukkan oleh data uji kekerasan.

Data selisih berat dan waktu celup dimasukkan dalam persamaan rumus 2 sehingga didapatkan laju korosi tiap spesimen. Laju korosi tiap spesimen ditunjukkan oleh Gambar 4.3. Laju korosi spesimen anoda meningkat pada saat dicelup setelah 12 jam, kemudian menurun setelah dicelup selama 18 dan 24 jam. Hal ini dikarenakan laju pengurangan berat spesimen kecil.



Gambar 4.3 Laju Korosi Anoda Tumbal Mg

Gambar 4.3 menunjukkan hubungan laju korosi dengan waktu perendaman. Laju korosi pada temperatur 450 °C sebesar 10341,03 g/m<sup>2</sup>day pada perendaman 6 jam, kemudian sebesar 10286,03 g/m<sup>2</sup>day pada perendaman 12 jam, kemudian sebesar 9014,235 pada perendaman 18 jam dan sebesar 7235,724 pada perendaman 24 jam.

Sedangkan pada temperatur 350 °C laju korosi sebesar 5890,589 g/m<sup>2</sup>day pada perendaman 6 jam, kemudian 6055,606 g/m<sup>2</sup>day pada perendaman 12 jam, kemudian sebesar 5710,571 g/m<sup>2</sup>day pada perendaman 18 jam dan 5608,061 g/m<sup>2</sup>day pada perendaman 24 jam. Hal tersebut karena anoda merupakan tempat terjadinya oksidasi sehingga ion negatif semakin bertambah, sedangkan sebaliknya yang terjadi pada proses reduksi potensialnya akan selalu positif (+). Hal ini menunjukkan bahwa magnesium berlaku sebagai anoda yang ditumbalkan untuk melindungi baja. API 5L X65. Besarnya perubahan laju korosi anoda dapat dilihat dari efisiensi laju korosi anoda tumbal karena dapat melihat seberapa baik ketahanan korosi melalui efisiensi laju korosi anoda korban.

### 4.3 Efisiensi Laju Korosi Anoda Korban, Data Kekerasan dan Kebutuhan Anoda Korban pada Pipa

Tabel 4.4  
Efisiensi dari Laju Korosi Anoda Tumbal

Nama Sampel	Laju Korosi Tanpa Perlakuan (mmpy)	Laju korosi dengan perlakuan (mmpy)	Efisiensi (%)
X11	11651.37	5816.207	50.08136
X12	11651.37	6533.153	43.92804
X13	11651.37	7864.12	32.50478
X21	11651.37	6152.073	47.19873
X22	11651.37	7005.701	39.87232
X23	11651.37	8212.488	29.51485
X31	11651.37	6929.651	40.52503
X32	11651.37	8229.573	29.36821
X33	11651.37	9219.255	20.87409

Keterangan : Xij; i = variasi temperatur, j = variasi *holding time*

Dari Tabel 4.4 dapat dilihat efisiensi terbesar pada temperatur 350°C dengan *holding time* 1 jam yaitu sebesar 50,08 %, karena disebabkan diperbaikinya sifat mekanik magnesium dan kekerasannya yang meningkat. Hal ini karena temperatur 350°C merupakan temperatur optimal untuk *solution treatment*. Untuk mengetahuinya perlu dilakukan uji kekerasan. Dan temperatur pemanasan 450°C dengan *holding time* 3 jam memiliki efisiensi sebesar 20,87% karena disebabkan temperatur *solution treatment* yang lebih tinggi sehingga menyebabkan kekerasannya semakin menurun.

Tabel 4.5  
Data Hasil Pengujian Kekerasan

Nama Spesimen	Kekerasan (HR15T)
X11	36,9
X33	21,5
Tanpa Perlakuan	17,6

Keterangan : Xij; i = variasi temperatur, j = variasi *holding time*

Dari tabel 4.5 dapat dilihat bahwa uji kekerasan dengan temperatur 350°C paling tinggi disebabkan temperatur untuk *solution treatment* yang optimal dan pada temperatur 450°C memiliki nilai kekerasan dibawah 350°C karena kekerasannya menurun akibat temperatur yang lebih tinggi dan memiliki nilai kekerasan lebih besar dibandingkan perlakuan karena diperbaikinya sifat mekanik dari magnesium tanpa perlakuan. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi temperatur pemanasan maka kekerasan menurun, ketika suatu material kekerasan yang menurun maka laju korosinya akan semakin cepat. Dan pada temperatur optimal yaitu 350°C didapat sifat mekanik yang dibutuhkan untuk memperlambat laju korosi agar efisiensi laju korosi dari magnesium sebagai anoda tumbal meningkat dengan meningkatnya juga kekerasan. Hal inilah yang menyebabkan efisiensi dari laju korosi anoda tumbal meningkat dan laju korosi menurun.

Dengan menggunakan data pipa yang diproteksi katodik dari PT. Pertamina diketahui panjang pipa yang diproteksi sepanjang 2605,8 m dan diameter sebesar 0,254 m didapat luas permukaan pipa yang diproteksi adalah sebesar 2078,38 m<sup>2</sup>. Dengan pipa yang diproteksi seluas 2078,38 m<sup>2</sup> jumlah berat anoda tanpa perlakuan yang dibutuhkan untuk melindungi pipa tersebut selama 20 tahun adalah sebesar 145,303 kg maka dengan diberi perlakuan pada anoda untuk berat yang dibutuhkan adalah 72,7677 kg karena efisiensi laju korosi yang dimiliki dapat mencapai sebesar 50,08%. Dengan efisiensi yang tinggi maka semakin baik anoda tersebut memiliki ketahanannya terhadap korosi.

## BAB V

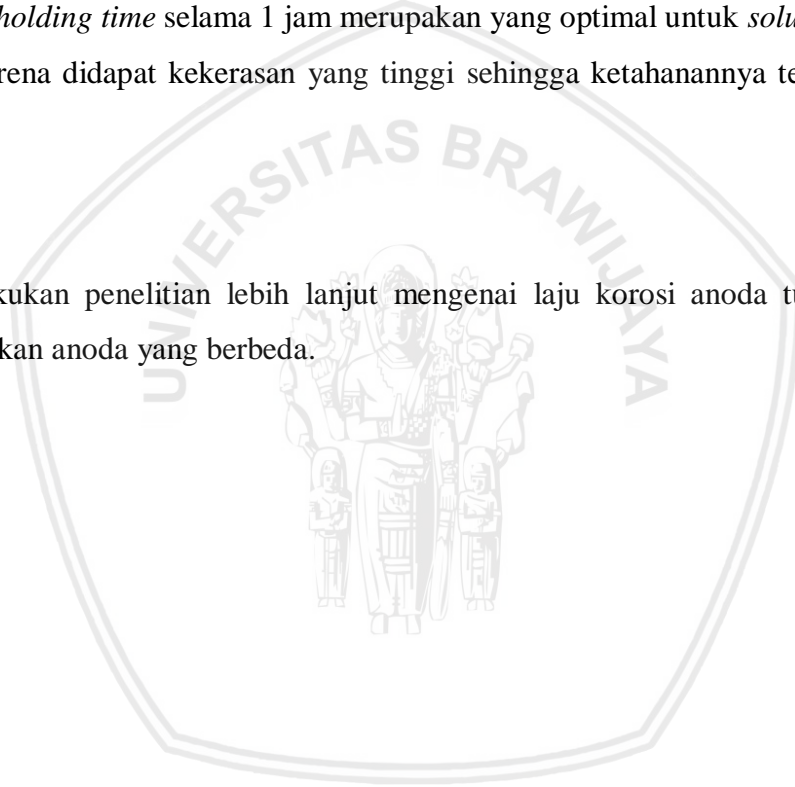
### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian didapatkan kesimpulan bahwa semakin tinggi temperatur *solution treatment* dan semakin lama *holding time* maka kekerasan akan menurun dan laju korosi akan semakin meningkat dan dengan temperatur yang optimal dengan *holding time* optimal didapat kekerasan yang tinggi dan laju korosi akan semakin rendah. Temperatur 350°C dengan *holding time* selama 1 jam merupakan yang optimal untuk *solution treatment* magnesium karena didapat kekerasan yang tinggi sehingga ketahanannya terhadap korosi juga tinggi.

#### 5.2 Saran

1. Agar dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai laju korosi anoda tumbal dengan menggunakan anoda yang berbeda.







Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, Y. K., Arief, I. S., & Amiadji. 2015. Analisa Laju Korosi pada Pelat Baja Karbon dengan Variasi Ketebalan Coating. *Jurnal Teknik Its*, 4(1), 1–5.
- Burhanudin, M. 2000. Analisa Teknis dan Ekonomis Perlindungan Korosi Menggunakan Sistem Sacrificial Anode dan Impressed Current Cathodic Protection pada Kapal. Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Cabrini, M., Lorenzi, S., Testa, C., Pastore, T., Manfredi, D., Lorusso, M., ... Fino, P. 2019. Statistical approach for electrochemical evaluation of the effect of heat treatments on the corrosion resistance of AISi10Mg alloy by laser powder bed fusion. *Electrochimica Acta*.
- Chodijah, Siti. 2008. Efektivitas Penggunaan Pelapis Epoksi Terhadap Ketahanan Korosi Pipa Baja ASTM A53 Didalam Tanah. *Jurnal Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia*.
- Deng, P. 2011. Effect of Solution Treatment Process on the Microstructure and Properties of AZ80 Magnesium Alloy. *Advanced Materials Research*. Henan University of Technology.
- Feng, Liu. 2008. Improvement of Corrosion Resistance of Pure Magnesium via Vacuum Pack Treatment. Taiyuan University of Technology, PR China.
- Fontana, M. G. 2010. Corrosion engineering. *Corrosion Engineering*.
- Gapsari, Femiana. 2017. Pengantar Korosi. Malang: Universitas Brawijaya Press
- Gupta, M., & Sharon, N. M. L. 2010. Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites. In *Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites*.
- Ilzam, Ahmad. 2018. Studi Eksperimental Laju Korosi, Kekerasan Vickers dan Ketangguhan Impak *Charpy* pada Pegas Daun Truk Baja Paduan (AISI 5160) Akibat Pengaruh Media Air Sungai, Cairan Abu Vulkanik, dan Air Laut. *Jurnal Teknik Mesin USU*.
- Indarti, Retno. 2017. Karakterisasi Simulator Sistem Proteksi Katodik Metode Anoda Korban Pada Sistem Perpipaan Yang Tertanam Dalam Tanah. *Jurnal Teknik Kimia Politeknik Negeri Bandung*.
- Irawan, Andi. 2016. Analisa Korosi Pada Pipa Gas. *Jurnal Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang*.
- Haryono, G. 2010. Ekstrak Bahan Alam Sebagai Inhibitor Korosi. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional.

- Hidayat, Hari. 2015. Makalah korosi. Yogyakarta: Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hidayat, Darmawan. 2017. Analisa Fenomena Korosi Pelat Baja API 5L X65 Dalam Larutan 250 ml Asam Asetat Dan 4750 ml Aquadest Pada Kondisi Gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S Jenuh Pada Temperatur Ruang. Universitas Padjajaran, Bandung.
- Jones, D. A. 1993. Principles and prevention of corrosion. *Materials & Design*.
- Kim, J. G., & Kim, Y. W. 2001. Advanced Mg-Mn-Ca sacrificial anode materials for cathodic protection. *Materials and Corrosion*, 52(2), 137–139.
- L.G. Bland, A.D. King, N. Birbilis, J.R Scully. 2014. Assessing the corrosion of commercially pure magnesium and commercial AZ31B by electrochemical impedance, mass-loss, hydrogen collection, and inductively coupled plasma optical emission spectrometry solution analysis. University of Virginia. United States.
- Li, C., Dong, Y. 2013. The Effect of Solution Heat Treatments on The Microstructure and Hardness of ZK60 Magnesium Alloys Prepared Under Low-Frequency Alternating Magnetic Fields. *Journal Materials Science & Engineering*.
- Liu, F., Liang, W., Li, X., Zhao, X., Zhang, Y., & Wang, H. 2008. Improvement of corrosion resistance of pure magnesium via vacuum pack treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 461(1–2), 399–403.
- M. Esmailly, J.E. Svensson. dkk. 2017. Fundamentals and Advance in magnesium alloy corrosion.
- Mordike, B. L., & Ebert, T. 2001. Magnesium Properties - applications - potential. *Materials Science and Engineering A*, 302(1), 37–45.
- P. Deng. Dkk. 2011. Effects of Solution Treatment Process on the Microstructure and Properties of AZ80 Magnesium Alloy. *Advanced Materials Research*. Henan University of Technology. Popov, B. N. 2015. Basics of Corrosion Measurements. In *Corrosion Engineering*.
- Restrepo, Carlos., Simonoff, Jeffrey., Zimmerman, Rae. 2008. Causes, Cost Consequences, and Risk Implications of Accidents in US Hazardous Liquid Pipeline Infrastructure. *Journal of Critical Infrastructure Protection*.
- Roberge, P. R. 2008. Corrosion engineering: principles and practice. In *The McGraw-Hill Companies, Inc*.
- Utami, Isni. 2009. Proteksi Katodik Dengan Anoda Tumbal Sebagai Pengendali Laju Korosi Baja Dalam Lingkungan Aqueous. *Jurnal Teknik Kimia*, 3(2), 240–245.

- Utomo, Budi. 2009. Jenis Korosi dan Penanggulangannya. *Jurnal Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro*.
- Wu, Kunxiang., Zhou, Xiaobin., Wu, Xiaomin., Lv, Bihong., Jing Guohua., Zhou, Zuoming. 2019. Understand The Corrosion Behaviour of Carbon Steel in Amino-Functionalized Ionic Liquids For CO<sub>2</sub> Capture Assisted By Weight Loss And Electrochemical Techniques. Huaqiao University. Xiamen, China.
- Xu, Zhen. Effect of Annealing Temperature on The Corrosion Resistance of MgO Coatings on Mg Alloy. Saskatchewan, Canada.

