

ANALISIS LAJU KOROSI DAN KEKERASAN PADA *STAINLESS STEEL* 304 DAN BAJA NIKEL LATERIT DENGAN VARIASI KADAR Ni (0, 3, dan 10% Ni) DALAM MEDIUM KOROSIF

(Skripsi)

Oleh
Sinta Novita



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2018**

ABSTRAK

Analisis Laju Korosi dan Kekerasan pada *Stainless Steel* 304 dan Baja Nikel Laterit dengan Variasi Kadar Ni (0, 3, dan 10%) dalam Medium Korosif

Oleh

Sinta Novita

Pada penelitian ini telah dilakukan analisis laju korosi dan kekerasan pada *stainless steel* 304 dan baja nikel laterit dalam medium korosif. Baja nikel laterit yang digunakan memiliki kadar Ni yang berbeda yaitu 0, 3, 4, 6, dan 10%. Laju korosi dihitung menggunakan metode kehilangan massa sedang kekerasan diukur dengan metode Rockwell. Hasil perhitungan setelah dilakukan uji menunjukkan laju korosi tertinggi terjadi pada sampel yang direndam dalam medium korosif H₂SO₄ 3,5% selama 7 hari, yaitu sebesar $8,39 \times 10^{-3}$ mm/tahun untuk SS-304. Untuk baja nikel laterit laju korosi tertinggi terjadi pada baja dengan kadar Ni 0% dalam medium korosif H₂SO₄ 3,5% yaitu sebesar 50,85 mm/tahun. Kekerasan sampel menurun setelah mengalami korosi. Hasil analisis XRD menunjukkan baja SS-304 memiliki fasa Fe- α (ferit) dan Fe- γ (austenit). Pada baja nikel laterit dengan kadar Ni 0% dan 3% terbentuk fasa Fe. Namun, pada baja nikel laterit dengan kadar Ni 6% terdapat pula fasa Ni, sedangkan pada kadar Ni 10% terbentuk fasa Fe- γ (austenit) selain fasa Fe. Tidak terjadi perubahan fasa setelah dilakukan uji korosi. Hasil karakterisasi SEM dan mikroskop metalurgi memperlihatkan produk korosi yang terbentuk adalah korosi sumuran (*pitting corrosion*) dengan diameter lubang yang berbeda. Hasil analisis EDX memperlihatkan adanya unsur O, Na, dan Cl pada sampel yang terkorosi dalam medium korosif NaCl 3,5%.

Kata kunci: *stainless steel* 304, baja nikel laterit, korosi, kekerasan

ABSTRACT

Analysis of Corrosion Rate and Hardness on Stainless Steel 304 and Nickel Laterite Steels with Variations of Ni (0, 3 and 10%) in Corrosive Medium.

By

Sinta Novita

In this research, the analysis of corrosion rate and hardness on stainless steel 304 and lateritic nickel steel in corrosive medium has been done. The lateritic nickel steel used has different Ni content of 0, 3, 4, 6, and 10%. The corrosion rate was calculated using the weight loss method while the hardness was measured by the Rockwell method. The calculation results after the test showed that the corrosion rate was highest in samples immersed in the corrosive medium H_2SO_4 3.5% for 7 days, that is equal to 8.39×10^{-3} mm/year for the SS-304. For lateritic nickel steel, the highest corrosion rate occurred in the sample with 0% Ni in corrosive medium H_2SO_4 3.5% which is equal to 50.85 mm/year. The hardness of the samples decreased after corrosion. The result of XRD analysis showed that SS-304 steel has an Fe- α (ferrite) and Fe- γ (austenite) phase. In lateritic nickel steel with Ni content of 0% and 3% formed Fe phase. However, in lateritic nickel steel with Ni content of 6% there is also Ni phase, while at Ni content of 10% formed Fe- γ (austenite) phase other than Fe. The result of SEM characterization showed that the corrosion product formed is pitting corrosion with different hole diameter. The result of EDX analysis showed the presence of elements of O, Na, and Cl on corroded samples in the corrosive medium NaCl 3.5%.

Keyword: *stainless steel 304, lateritic nickel steel, corrosion, hardness*

**ANALISIS LAJU KOROSI DAN KEKERASAN PADA *STAINLESS STEEL*
304 DAN BAJA NIKEL LATERIT DENGAN VARIASI KADAR Ni (0, 3,
DAN 10%) DALAM MEDIUM KOROSIF**

Oleh

Sinta Novita

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA SAINS

Pada

Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2018**

**Judul Skripsi : ANALISIS LAJU KOROSI DAN KEKERASAN
PADA STAINLESS STEEL 304 DAN BAJA
NIKEL LATERIT DENGAN KADAR Ni (0, 3,
DAN 10%) DALAM MEDIUM KOROSIF**

Nama Mahasiswa : Sinta Novita

Nomor Pokok Mahasiswa : 1317041042

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


Drs. Edman Ginting Suka, M.Si.
NIP. 19670825 198603 1 002


Dr. Eng. Widi Astuti
NIP. 19780819 200212 2 003

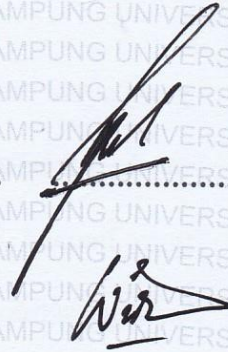
2. Ketua Jurusan Fisika


Arif Surtono, M.Si., M.Eng.
NIP. 19710909 200012 1 001

MENGESAHKAN

1. **Tim Penguji
Ketua**

: Drs. Ediman Ginting Suka, M.Si.



Sekretaris

: Dr. Eng. Widi Astuti

Penguji

Bukan Pembimbing

: Prof. Posman Manurung, Ph.D.

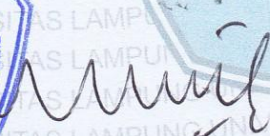


2. **Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



Prof. Dr. Warsito, S.Si., D.E.A.

NIP. 19710212 199512 1 001



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 11 Januari 2018

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain. Sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebut dalam daftar pustaka. selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 15 Januari 2018



Sinta Novita
NPM. 1317041042

RIWAYAT HIDUP



Sinta Novita dilahirkan di Tanjung Gunung, Tanggamus pada tanggal 28 November 1995. Penulis merupakan putri pertama dari pasangan Bapak Jujun Juhairi dan Ibu Entin. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SD Negeri 2 Pulaupanggung pada tahun 2007, kemudian melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 1 Pulaupanggung pada tahun 2010, dan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Pulaupanggung pada tahun 2013. Pada tahun 2013 penulis diterima sebagai mahasiswa di Universitas Lampung, program strata 1 Jurusan Fisika melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) dan merupakan penerima beasiswa Bidik Misi angkatan ke-empat.

Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah menjadi asisten praktikum mata kuliah Sains Dasar Fisika Jurusan Ilmu Komputer Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam tahun 2014, asisten praktikum mata kuliah Fisika Dasar I Jurusan Budidaya Perairan Fakultas Pertanian tahun 2015, asisten praktikum mata kuliah Fisika Dasar II Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian tahun 2015, asisten praktikum mata kuliah Fisika Dasar I Jurusan Budidaya Perairan Fakultas Pertanian tahun 2016, asisten praktikum mata kuliah Optika Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam tahun 2016, asisten praktikum mata kuliah Fisika Eksperimen Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan

Alam tahun 2016. Penulis juga mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Fisika (Himafi) dimulai dengan menjadi Kader Muda Himafi 2013, anggota Bidang Sosial dan Masyarakat (Sosmas) Himafi FMIPA Unila 2013 – 2014, anggota Biro Kesekretariatan dan Rumah Tangga (KRT) Himafi FMIPA Unila 2014 – 2015, dan Sekretaris Biro KRT Himafi FMIPA Unila 2015 – 2016.

MOTTO

Allah akan meninggikan orang – orang yang beriman di antara kamu dan orang – orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat

(Q.S. al-Mujadalah: 11)

Menuntut ilmu adalah kewajiban bagi setiap muslim

(HR. Ibn Majah)

Apabila manusia telah meninggal dunia maka terputuslah semua amalannya kecuali tiga amalan yaitu: shadaqah jariyah, ilmu yang bermanfaat, dan do'a anak yang shaleh

(HR. Muslim).

Dengan mengucapkan Alhamdulillahirabbil'alamin kepada Allah SWT yang telah memberikan kemudahan pada setiap kesulitan.

Kupersembahkan sebuah tulisan dalam karya kecil ini sebagai wujud rasa tanggung jawab dan terimakasihku terhadap wakil Allah dalam hidupku di dunia ini. Bapak dan Ibu yang tak pernah lelah bekerja dan selalu berdo'a dalam setiap sujudnya. Bapak dan Ibu lewat karya kecil ini ananda ingin mengucapkan terima kasih atas segala ketulusan, pengorbanan, dan kasih sayang yang tidak akan pernah dapat terbayarkan sampai kapanpun.

Kakekku tercinta dan keluarga yang selalu memberikan dukungan, semangat, serta kasih sayang.

Teman – teman yang selalu mengajarkan tentang arti berbagi, cinta, persahabatan, dan kebersamaan.

Serta Almamaterku Tercinta ...

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkat, rahmat, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “ **Analisis Laju Korosi dan Kekerasan pada *Stainless Steel 304* dan Baja Nikel Laterit dengan Variasi Kadar Ni (0, 3, dan 10%) dalam Medium Korosif.**

Penulis menyadari bahwa dalam proses penulisan terdapat banyak kesalahan, namun berkat rahmat dari Allah SWT serta bimbingan dan kerjasama dari berbagai pihak sehingga permasalahan tersebut dapat terselesaikan.

Dalam penulisan skripsi ini penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan, sehingga diharapkan adanya kritik dan saran yang bersifat membangun.

Bandar Lampung, 15 Januari 2018

Penulis,

Sinta Novita

SANWACANA

Alhamdulillahirabbil'aalamiin, segala puji bagi Allah *Rabb* semesta alam atas segala nikmat dan karunia-Nya yang tak terhingga serta rahmat-Nya yang tak pernah putus sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “**Analisis Laju Korosi dan Kekerasan pada *Stainless Steel* 304 dan Baja Nikel Laterit dengan Variasi Kadar Ni (0, 3, dan 10%) dalam Medium Korosif**” sebagai syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains pada Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Teriring do'a dan segenap ketulusan hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Drs. Ediman Ginting Suka, M.Si. selaku pembimbing I atas segala dedikasi yang telah Beliau berikan selama menempuh pendidikan di kampus, atas semua kebaikan, kesabaran, bimbingan, dan ilmu sehingga penelitian dan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Ibu Dr. Eng. Widi Astuti selaku pembimbing II yang telah memberikan bimbingan serta arahan dengan ikhlas dan penuh kesabaran.
3. Bapak Prof. Posman Manurung, Ph.D. selaku pembahas atas bimbingan, arahan, dan ilmu yang telah diberikan.
4. Ibu Suprihatin, M.Si. selaku pembimbing akademik atas bimbingan, nasehat, serta motivasi yang telah diberikan.

5. Bapak Prof. Warsito, D.E.A selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
6. Bapak Arif Surtono, M.Si., M.Eng. selaku Ketua jurusan Fisika FMIPA Unila.
7. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Fisika FMIPA Unila atas segala dedikasi, ilmu, dan pengalaman yang telah diberikan selama mengikuti perkuliahan di kampus.
8. Bapak Driszal Fryantoni, M.Eng., Sc. selaku Kepala Balai Penelitian Teknologi Mineral (BPTM) – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Lampung.
9. Ibu Nurbaiti Marsas Prilitasari, S.T., Ibu Isti Nurjanah, dan Mba Yepi Triapiani, S.Si. selaku Koordinator Laboratorium Analisis Kimia dan Metalurgi BPTM-LIPI beserta jajarannya yang telah memberikan izin dan kemudahan bagi penulis dalam melakukan penelitian.
10. Dengan segenap ketulusan hati, terima kasih untuk Bapak Suyanto dan Ibu Entin atas seluruh cinta, kasih sayang, kesabaran, keikhlasan, pengorbanan, dan ketulusan do'a yang selalu dipanjatkan.
11. Terima kasih kepada kakekku dan keluarga atas segala dukungan dan do'a yang tak pernah putus.
12. Sahabat seperjuangan Aisiyah Putri Sandi, Ratna Noviyana, Reni Septiana, Reza Andika, dan Herullah yang telah memberikan dukungan, do'a, dan semangat.
13. Teman-teman seperjuangan di Fisika FMIPA Unila angkatan 2013 atas segala dukungan dan semangat. Semoga kita dipertemukan di puncak kesuksesan. Aaniin.

14. Semua pihak yang telah membantu dan memberikan saran serta kritik dalam penyelesaian skripsi ini. Terima kasih atas segala ketulusan dan bantuannya.

Bandar Lampung, 15 Januari 2018
Penulis,

Sinta Novita

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xxi

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Batasan Masalah.....	6
1.4. Tujuan Penelitian.....	7
1.5. Manfaat Penelitian.....	7

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Baja.....	8
2.1.1. Baja Karbon.....	9
2.1.1.1. Baja karbon ringan	9
2.1.1.2. Baja karbon menengah	9
2.1.1.3. Baja karbon tinggi	9
2.1.2. Baja Paduan	10
2.1.2.1. Baja paduan rendah	10
2.1.2.2. Baja paduan menengah.....	10
2.1.2.3. Baja paduan tinggi.....	10
2.2. Baja Tahan Karat (<i>Stainless Steel</i>)	10
2.3. Baja Tahan Karat Austenitik SS 304	13
2.4. Baja Nikel Laterit	14
2.5. Korosi	15
2.5.1. Jenis-Jenis Korosi.....	15
2.5.1.1. Korosi seragam (<i>uniform corrosion</i>).....	16
2.5.1.2. Korosi sumuran (<i>pitting corrosion</i>).....	16
2.5.1.3. Korosi celah (<i>crevice corrosion</i>).....	17
2.5.1.4. Korosi galvanis (<i>galvanic corrosion</i>).....	18
2.5.1.5. Korosi erosi (<i>erosion corrosion</i>).....	18
2.5.1.6. Korosi kavitasi (<i>cavitation corrosion</i>)	19
2.5.1.7. <i>Fretting corrosion</i>	19

2.5.1.8.	Korosi batas butir (<i>intergranular corrosion</i>)	20
2.5.1.9.	Peluluhan selektif (<i>selective leaching/dealloying</i>) ...	20
2.5.1.10.	Korosi retak tegang (<i>stress corrosion cracking</i>)	21
2.5.1.11.	Korosi lelah (<i>fatigue corrosion</i>)	22
2.5.2.	Laju Korosi	22
2.6.	Pengujian Kekerasan	25
2.7.	Medium korosif	28
2.7.1.	Asam Sulfat (H ₂ SO ₄)	28
2.7.2.	Natrium Klorida (NaCl)	29
2.8.	Analisis dan karakterisasi	30
2.8.1.	<i>Optical Emission Spectroscopy</i> (OES)	30
2.8.2.	<i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	32
2.8.3.	Mikroskop Metalurgi	36
2.8.4.	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	38

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1.	Waktu dan Tempat Penelitian	42
3.2.	Alat dan Bahan	42
3.3.	Prosedur Penelitian	43
3.3.1.	Preparasi Sampel Baja (Pemotongan dan Pembersihan)	44
3.3.2.	Pengujian Komposisi	44
3.3.3.	Pengujian Kekerasan Awal Sampel	44
3.3.4.	Analisis Mikroskop Metalurgi	44
3.3.5.	Penimbangan Massa Awal Sampel	45
3.3.6.	Pembuatan Medium Korosif	45
3.3.7.	Perendaman Sampel	46
3.3.8.	Pembersihan dan Penimbangan Massa Akhir Sampel	46
3.3.9.	Perhitungan Laju Korosi	46
3.3.10.	Pengujian Kekerasan setelah Perendaman	47
3.3.11.	Analisis Mikroskop Metalurgi setelah Perendaman	47
3.3.12.	Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	47
3.3.13.	Analisis <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	48

IV. HASIL PENGAMATAN DAN PEMBAHASAN

4.1.	Preparasi Sampel Baja	49
4.2.	Pengujian Komposisi	50
4.3.	Pengukuran Laju Korosi	51
4.3.1.	Hasil Pengukuran Laju Korosi	52
4.4.	Hasil Uji Kekerasan	58
4.5.	Hasil Analisis Mikroskop Metalurgi	61
4.6.	Hasil karakterisasi XRD	66
4.6.1.	Hasil Karakterisasi XRD Sampel SS-304	66
4.6.2.	Hasil Karakterisasi XRD Sampel Baja Nikel Laterit	70
4.7.	Hasil Analisis SEM/EDX	76
4.7.1.	Hasil Analisis SEM/EDX Sampel SS-304	77
4.7.2.	Hasil Analisis SEM/EDX Sampel Baja Nikel Laterit	80

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan.....	85
5.2. Saran.....	86

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Korosi seragam.....	16
2.2. Korosi sumuran	17
2.3. Korosi celah.....	17
2.4. Korosi galvanis.....	18
2.5. Korosi erosi	18
2.6. Korosi kavitasi.....	19
2.7. <i>Fretting corrosion</i>	19
2.8. Korosi batas butir	20
2.9. Peluluhan selektif	21
2.10. Korosi retak tegang.....	21
2.11. Korosi lelah	22
2.12. Tes mekanis kekerasan material.....	25
2.13. Mesin uji kekerasan Rockwell.....	26
2.14. Prinsip kerja metode Rockwell.....	26
2.15. Alat pengujian OES	31
2.16. Difraksi sinar-X pada kisi kristal.....	32
2.17. Skema difraktometer sinar-X	34
2.18. Difraksi sinar-X menggunakan metode rotasi kristal.....	35
2.19. Mikroskop metalurgi	36

2.20. Skema dasar pengujian mikroskop metalurgi.....	37
2.21. Komponen utama SEM	39
2.22. Interaksi berkas elektron dan spesimen.....	40
2.23. Skema dasar SEM.....	41
3.1. Diagram alir penelitian	43
4.1. Potongan baja (a) sebelum diampas (b) setelah diampas	50
4.2. Grafik perbandingan nilai laju korosi SS-304 dalam medium korosif H ₂ SO ₄ dan NaCl.....	52
4.3. Grafik laju korosi baja nikel laterit dalam medium korosif (a) NaCl 3,5%; (b) H ₂ SO ₄ 3,5%	54
4.4. Warna larutan NaCl 3,5% (a) sebelum uji (b) setelah uji.....	57
4.5. Grafik perubahan nilai kekerasan pada (a) SS-304 (b) baja nikel laterit	59
4.6. Permukaan sampel SS-304 sebelum dilakukan uji.....	61
4.7. Foto permukaan sampel SS-304 setelah direndam dalam medium korosif (a) NaCl 7 hari; (b) NaCl 14 hari; (c) NaCl 21 hari; (d) H ₂ SO ₄ 7 hari; (e) H ₂ SO ₄ 14 hari; (f) H ₂ SO ₄ 21 hari	62
4.8. Foto permukaan sampel baja nikel laterit (a) 0% Ni; (b) 3% Ni; (c) 4% Ni; (d) 6% Ni; (e) 10% Ni	63
4.9. Foto permukaan sampel baja nikel laterit setelah uji korosi	64
4.10. Difraktogram hasil analisis XRD SS-304 dengan panjang gelombang sinar-X yang digunakan $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$	66
4.11. Difraktogram hasil analisis XRD SS-304/NaCl(21) dengan panjang gelombang sinar-X yang digunakan $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$	68
4.12. Difraktogram sampel SS-304 dan SS-304/NaCl(21)	69
4.13. Difraktogram sampel baja nikel laterit dengan panjang gelombang sinar-X yang digunakan $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$	71
4.14. Difraktogram hasil analisis XRD S-10N dengan panjang gelombang sinar-X yang digunakan $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$	73

4.15. Difraktogram hasil analisis XRD S-10N/NaCl dengan panjang gelombang sinar-X yang digunakan $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$	74
4.16. Difraktogram sampel S-10N dan S-10N/NaCl.....	76
4.17. Foto SEM sampel SS-304 (a) sebelum uji (b) setelah uji Korosi	77
4.18. Mekanisme korosi sumuran pada permukaan logam dalam medium NaCl.....	78
4.19. Grafik hasil analisis EDX sampel (a) SS-304 (b) SS-304/NaCl(21)	79
4.20. Foto SEM sampel S-10N.....	81
4.21. Foto SEM sampel S-10N/NaCl dengan ukuran (a) 100 μm ; (b) 20 μm	82
4.22. Grafik hasil analisis EDX sampel (a) S-10N; (b) S-10N/NaCl.....	83

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Struktur kristal baja	8
2.2. Komposisi unsur kimia baja tahan karat tipe 304	14
2.3. Komposisi unsur kimia baja nikel laterit.....	14
2.4. Perbandingan satuan laju korosi <i>mils per year</i> (mpy) dengan satuan laju korosi yang lain.....	23
2.5. Skala kekerasan Rockwell.....	27
3.1. Konstanta laju korosi.....	47
4.1. Komposisi unsur kimia penyusun baja.....	51
4.2. Selisih nilai $2\theta/d(\text{\AA})$ antara data XRD sampel SS-304 dan data standar	67
4.3. Selisih nilai $2\theta/d(\text{\AA})$ antara data XRD sampel SS-304/NaCl(21) dan data standar	69
4.4. Selisih nilai $2\theta/d(\text{\AA})$ antara data XRD sampel S-10N dan data standar	74
4.5. Selisih nilai $2\theta/d(\text{\AA})$ antara data XRD sampel S-10N/NaCl dan data standar.....	75
4.6. Komposisi unsur hasil analisis EDX sampel SS-304 dan SS-304/NaCl(21).....	79
4.7. Komposisi unsur hasil analisis EDX sampel S-10N dan S-10N/NaCl.....	83

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam dunia industri, barang hasil produksi dibuat dan dirancang supaya memiliki ketahanan yang baik terhadap lingkungan, terutama produk yang berbahan logam. Logam merupakan salah satu jenis bahan yang banyak dimanfaatkan dalam peralatan penunjang bagi kehidupan manusia. Suatu logam dapat mengalami kerusakan akibat adanya korosi (Fontana, 1987). Korosi merupakan reaksi elektrokimia antara logam dan lingkungan yang menyebabkan pengkaratan dan menurunkan mutu logam (Trethewey dan Chamberlein, 1991).

Baja merupakan salah satu material logam yang banyak diaplikasikan dalam dunia industri. Ketahanan korosi pada baja dipengaruhi oleh unsur paduan yang terkandung di dalamnya seperti nikel (Ni), krom (Cr), dan mangan (Mn). Ketiga unsur tersebut akan berdampak pada sifat ketahanan korosi. Baja nikel laterit adalah baja yang diolah dari bijih nikel laterit kadar rendah. Baja ini dapat digolongkan ke dalam baja paduan rendah dengan kandungan nikel dan kromium lebih sedikit dibandingkan *stainless steel* (Herbirowo dan Adjiantoro, 2016).

Stainless steel merupakan baja anti karat yang tahan terhadap korosi karena memiliki unsur paduan minimal 18% krom dan 8% nikel. *Stainless steel* dapat diperoleh dengan mencampurkan feronikel (18-20% Ni, 75-78% Fe) ke dalam

leburan nikel ferokrom melalui oksidasi sebelum dilakukan proses pembuatan baja. Feronikel yang ditambahkan disesuaikan dengan kandungan nikel yang terdapat dalam nikel ferokrom (Yusuf, 2013). Berdasarkan struktur kristalnya, baja tahan karat dikelompokkan menjadi lima yaitu baja tahan karat austenitik, baja tahan karat feritik, baja tahan karat martensitik, baja tahan karat dupleks, dan baja tahan karat pengerasan pengendapan (Cobb, 1999).

Baja tahan karat austenitik adalah baja yang mempunyai ketahanan korosi baik, sifat mampu bentuk, dan sifat mampu las serta bersifat non feromagnetik. Pada suhu rendah sering dimanfaatkan dalam aplikasi kriogenik (Outokumpu, 2013). Baja tahan karat austenitik yang mengandung kromium dan nikel diberi nomor seri 300 dan seri 200 untuk kromium, nikel, dan mangan (Cobb, 1999).

Baja SS-304 merupakan baja tahan karat jenis austenitik dengan kemampuan las, kekuatan mekanik, dan ketahanan korosi yang baik (Sumarji, 2011). Baja SS-304 dapat diaplikasikan pada berbagai bidang industri dan non industri (Talbot and Talbot, 1997). Penggunaan SS-304 antara lain untuk berbagai macam cairan dan padatan (tanki dan *container*), peralatan pertambangan, kimia, makanan, dan industri farmasi (Sumarji, 2011).

Meskipun *stainless steel* merupakan baja tahan karat, tetapi masih dapat terserang korosi. Korosi yang terjadi dapat berupa korosi batas butir (*intergranular corrosion*), korosi lubang (*crevice corrosion*), korosi sumuran (*pitting corrosion*), dan korosi retak tegang (*stress corrosion cracking*) (Khatak dan Raj, 2002). Untuk mengetahui keunggulan *austenitic stainless steel* sebagai bahan konstruksi, perlu dilakukan penelitian mengenai korosi lokal dari *stainless steel* tersebut. Penelitian

mengenai korosi dilakukan dengan cara mereaksikan *stainless steel* dalam media korosif seperti larutan asam (Loto, 2013).

Loto *et al* (2012) melakukan penelitian mengenai ketahanan korosi baja austenitik tipe 304 dalam larutan asam sulfat. Baja direndam selama 16 hari dalam 100 ml larutan H_2SO_4 (2 M dan 5 M) dengan dan tanpa penambahan konsentrasi NaCl sebanyak 5%. Dalam penelitian ini digunakan metode kehilangan massa untuk menghitung laju korosi pada baja. Penambahan NaCl dengan konsentrasi 5% ke dalam larutan H_2SO_4 menyebabkan laju korosi meningkat. Hasil analisis SEM menunjukkan adanya korosi sumuran (*pitting corrosion*) yang signifikan dan kerusakan yang luas pada permukaan logam. Dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa baja austenitik tipe 304 rentan terhadap lingkungan asam.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Iliyasa *et al* (2012) mengenai korosi pada *austenitic stainless steel* dalam larutan asam sulfat dengan berbagai variasi konsentrasi. Baja yang digunakan adalah *stainless steel* 304 (SS-304) dengan kadar nikel 8,03%. Baja direndam dalam larutan asam sulfat (dengan konsentrasi 0,3 M, 0,5 M, 0,7 M, dan 1 M) selama 7 hari. Laju korosi yang paling besar terjadi pada baja yang direndam dalam 1 M H_2SO_4 . Selain itu juga dilakukan penelitian mengenai pengaruh waktu dan suhu perendaman terhadap laju korosi SS-304 dalam 1 M H_2SO_4 . Dari hasil penelitian diketahui bahwa laju korosi semakin meningkat dengan meningkatnya suhu dan konsentrasi larutan asam sulfat. Semakin lama waktu perendaman, laju korosi semakin menurun. Baja yang direndam selama 7 hari dalam 1 M H_2SO_4 pada suhu 80°C mengalami laju korosi paling tinggi. Kesimpulan yang diperoleh menunjukkan bahwa konsentrasi larutan, suhu, dan

waktu perendaman merupakan parameter yang dapat mempengaruhi laju korosi pada *stainless steel*.

Kataru *et al* (2016) juga melakukan penelitian mengenai kekerasan dan laju korosi *stainless steel* 304 dalam medium korosif. Medium korosif yang digunakan yaitu NaCl 3,5%, air laut, dan HCl. Pada penelitian ini, sampel uji direndam dalam medium korosif (3,5% NaCl, air laut, dan larutan HCl) selama 7 hari. Laju korosi tidak terlalu berpengaruh terhadap tingkat kekerasan pada sampel. Kekerasan sampel menurun sekitar 0,1 HRB setelah direndam dalam medium korosif. Baja yang direndam dalam 3,5% NaCl mengalami laju korosi tertinggi dibandingkan dengan air laut dan larutan HCl.

Beberapa penelitian di atas menunjukkan bahwa proses korosi dipengaruhi oleh lingkungan, suhu, dan waktu perendaman. Namun, unsur paduan pada baja juga berpengaruh terhadap proses korosi. Nikel adalah salah satu unsur paduan yang dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi, kekerasan, dan kekuatan pada baja (Outokumpu, 2013). Oleh sebab itu, pada penelitian ini akan dilakukan analisis laju korosi dan kekerasan pada beberapa sampel baja dengan kadar nikel yang berbeda. Sampel yang akan digunakan adalah *stainless steel* 304 (dengan kadar nikel 8,01%) dan baja nikel laterit (dengan kadar nikel 0%, 3%, 4%, 6%, dan 10%). Menurut penelitian sebelumnya, ketahanan korosi pada baja nikel laterit lebih baik dibandingkan baja karbon karena unsur paduan yang terkandung di dalamnya (Desiana, 2008). Baja nikel laterit yang digunakan yaitu baja dari proses pembuatan *Nickel Pig Iron* (NPI) di Balai Penelitian Teknologi Mineral (BPTM) – LIPI Lampung.

Dalam penelitian ini, baja SS-304 direndam dalam medium korosif selama 7 hari, 14 hari, dan 21 hari. Waktu perendaman yang menghasilkan laju korosi paling tinggi kemudian digunakan untuk merendam sampel baja nikel laterit. Pengukuran laju korosi menggunakan metode kehilangan berat. Berat sampel sebelum dan setelah dilakukan perendaman ditimbang menggunakan neraca Sartorius.

Medium korosif yang digunakan untuk merendam sampel yakni larutan NaCl dan H₂SO₄ dengan konsentrasi 3,5%. Pada larutan NaCl 3,5% terdapat ion klorida yang dapat mempengaruhi kandungan oksigen terlarut (Fontana, 1987). Ion klorida akan menyerang lapisan pelindung pada material yang menyebabkan terjadinya korosi sumuran, korosi celah, dan pecahnya paduan (Gunaatmaja, 2011). Asam sulfat sama halnya dengan asam klorida, merupakan jenis asam kuat dan bersifat korosif (Oxtobi dkk., 2003). Ion sulfat dapat menyebabkan korosi lubang atau sumuran maupun korosi retak tegang pada material (Febrianto, 2010).

Sampel dianalisis menggunakan *Optical Emission Spectrometry* (OES) untuk mengetahui komposisi unsur kimia penyusun bahan. Mesin uji kekerasan Rockwell digunakan untuk mengetahui kekerasan pada baja. Untuk melihat struktur mikro dan produk-produk korosi yang dihasilkan dilakukan analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan mikroskop metalurgi serta *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada sampel.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh unsur paduan nikel terhadap laju korosi dan kekerasan pada baja dalam medium korosif. Selain itu juga untuk melihat struktur mikro, fasa, dan produk-produk korosi yang dihasilkan pada baja setelah direndam dalam medium korosif.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Apakah komposisi unsur kimia penyusun baja tahan karat tipe 304 dan baja nikel laterit.
2. Bagaimana pengaruh waktu perendaman terhadap laju korosi dan kekerasan pada baja SS-304 dalam medium korosif NaCl 3,5% dan H₂SO₄ 3,5%.
3. Bagaimana pengaruh unsur paduan nikel terhadap laju korosi dan kekerasan pada baja nikel laterit yang direndam dalam medium korosif.
4. Bagaimana struktur mikro, fasa, dan produk-produk korosi yang dihasilkan pada sampel setelah mengalami pengkorosian.

1.3. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini digunakan batasan masalah sebagai berikut:

1. Sampel yang digunakan adalah *stainless steel* 304 dan baja nikel laterit dengan variasi kadar nikel 0, 3, 4, 6, dan 10% berat.
2. Medium korosif yang digunakan adalah NaCl dan H₂SO₄ dengan konsentrasi 3,5%.
3. Perendaman baja SS-304 dilakukan selama 7 hari, 14 hari, dan 21 hari. Sedangkan untuk baja nikel laterit berdasarkan waktu yang menghasilkan laju korosi paling tinggi pada sampel SS-304.
4. Laju korosi dihitung menggunakan metode kehilangan berat.
5. Analisis dan karakterisasi menggunakan mesin uji kekerasan Rockwell, mikroskop metalurgi, OES, XRD, dan SEM/EDX.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengetahui komposisi unsur kimia penyusun baja SS-304 dan baja nikel laterit.
2. Mengetahui pengaruh waktu perendaman terhadap laju korosi dan kekerasan pada baja SS-304 dalam medium korosif.
3. Mengetahui pengaruh unsur paduan nikel terhadap laju korosi dan kekerasan pada baja nikel laterit yang direndam dalam medium korosif.
4. Melihat struktur mikro, fasa, dan produk-produk korosi yang dihasilkan pada baja setelah mengalami pengkorosian.

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai:

1. Tambahan pengetahuan mengenai manfaat bijih nikel laterit.
2. Media informasi mengenai pengaruh unsur paduan nikel terhadap laju korosi dan kekerasan pada baja dalam medium korosif.
3. Referensi bagi mahasiswa yang akan melakukan penelitian terkait SS-304 maupun baja nikel laterit.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Baja

Baja merupakan logam paduan antara besi (Fe) dan karbon (C) dengan kadar karbon maksimum 1,7%. Paduan antara besi dan karbon dengan kadar karbon 1,7% sampai 3,5% dinamakan besi cor. Besi cor adalah baja yang mempunyai kadar karbon rendah (Indiyanto, 2005). Besi dan baja merupakan bahan yang paling banyak digunakan dalam bidang industri. Tabel 2.1 menunjukkan karakteristik baja berdasarkan struktur kristal (Surdia dan Saito, 1999).

Tabel 2.1. Struktur kristal baja (Surdia dan Saito, 1999)

Fasa	Struktur	Penjelasan
Austenit	<i>fcc</i>	Paramagnetik dan stabil pada temperatur tinggi
Ferit	<i>bcc</i>	Stabil pada temperatur rendah, kelarutan padat terbatas
Bainit	<i>bcc</i>	Austenit metastabil didinginkan dengan laju pendinginan cepat
Martensit	<i>bct</i>	Fasa tidak stabil, terbentuk dengan laju pendinginan cepat, semua unsur paduan larut dalam keadaan padat

Struktur kristal *face center cubic (fcc)* memiliki atom yang terletak pada pusat bidang dan di setiap titik sudut kubusnya. Struktur kristal *body center cubic (bcc)* memiliki atom pada tiap titik sudut kubus dan satu atom di pusat kubus. Pada baja karbon dengan kadar karbon dalam martensit $\text{FeC} < 0,2\% \text{C}$, struktur kristal *fcc* akan

bertransformasi menjadi *bcc*. Apabila kadar karbon pada paduan Fe-C meningkat, struktur kristal *bcc* berubah menjadi *body center tetragonal (bct)*. Struktur *bcc* akan berubah menjadi *bct* akibat pendinginan cepat (*quenching*). Berdasarkan komposisi kimianya, baja diklasifikasikan menjadi baja karbon dan baja paduan.

2.1.1. Baja Karbon

Baja karbon terdiri dari besi dan karbon. Berdasarkan kandungan karbon, baja ini dibagi menjadi tiga macam yaitu:

2.1.1.1. Baja karbon ringan

Baja karbon ringan merupakan baja yang mengandung 0,10 – 0,25% C. Baja ini memiliki ketangguhan dan keuletan yang tinggi, mudah dibentuk dan dilas, sehingga dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan komponen bodi mobil, struktur bangunan, pedal gas, rem, pagar dan lain-lain.

2.1.1.2. Baja karbon menengah

Baja karbon menengah merupakan baja yang mengandung 0,20 – 0,50% C. Baja karbon menengah memiliki kekerasan dan kuat tarik yang lebih tinggi dibanding baja karbon ringan. Baja jenis ini biasa digunakan sebagai bahan baku pembuatan alat-alat pertanian seperti cangkul, sekop, dan garpu.

2.1.1.3. Baja karbon tinggi

Baja karbon tinggi mengandung 0,5 – 1,7% C. Baja karbon tinggi memiliki keuletan rendah, ketahanan panas, dan kuat tarik tinggi sehingga banyak digunakan untuk material peralatan sarana atau mekanik (Fox, 1979).

2.1.2. Baja Paduan

Baja paduan merupakan baja yang terdiri dari beberapa unsur seperti nikel, mangan, kromium, dan molibdenum. Setiap unsur berguna untuk memperoleh sifat-sifat baja yang diinginkan, seperti sifat kekuatan, kekerasan, keuletan, dan ketahanan terhadap korosi. Paduan dari beberapa unsur yang berbeda menghasilkan sifat khas dari baja.

Berdasarkan kadar paduannya, baja paduan dibagi menjadi tiga yaitu:

2.1.2.1. Baja paduan rendah

Baja paduan rendah merupakan baja yang terdiri dari unsur Cr, Mn, S, Si, P dan lain-lain dengan berat elemen paduannya kurang dari 2,5%.

2.1.2.2. Baja paduan menengah

Baja paduan menengah merupakan baja yang terdiri dari unsur Cr, Mn, S, Si, P dan lain-lain dengan berat elemen paduannya 2,5 – 10 %.

2.1.2.3. Baja paduan tinggi

Baja paduan tinggi merupakan baja yang terdiri dari unsur Cr, Mn, S, Si, P dan lain-lain dengan berat elemen paduannya lebih dari 10% (Amanto dan Daryanto, 1999).

2.2. Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)

Baja tahan karat merupakan baja paduan tinggi dengan kandungan unsur kromium minimal 10%, sehingga mempunyai sifat tahan korosi. Selain unsur kromium terdapat unsur tambahan lain yaitu Ni, Mo, Mn, Al, Cu, Ti, C, dan Nb (Yunaidi, 2016). Setiap unsur memiliki pengaruh dalam proses oksidasi suhu tinggi. Proses

oksidasi akan menghasilkan senyawa FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃, Cr₂O₃, dan CrO (Bandriyana dkk., 2004).

Pengaruh unsur tambahan dalam baja tahan karat antara lain:

a. Nikel (Ni)

Nikel (Ni) adalah unsur yang sangat penting dalam pembuatan baja tahan karat. Nikel dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan serta ketahanan terhadap korosi.

b. Molibdenum (Mo)

Molibdenum (Mo) berfungsi untuk meningkatkan kekuatan, kekerasan, ketangguhan, dan ketahanan baja terhadap korosi.

c. Mangan (Mn)

Mangan (Mn) dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik. Selain itu, dapat mengurangi distorsi pada baja.

d. Aluminium (Al)

Aluminium (Al) dapat meningkatkan ketahanan korosi pada saat oksidasi.

e. Tembaga (Cu)

Tembaga (Cu) dapat meningkatkan ketahanan korosi dalam larutan asam tertentu, menurunkan kekerasan, dan meningkatkan *machinability*.

f. Titanium (Ti)

Titanium (Ti) digunakan sebagai penstabil unsur dalam baja tahan karat.

g. Karbon (C)

Karbon (C) merupakan komponen utama dari baja karena dapat meningkatkan kekuatan tarik, kekerasan, dan ketahanan. Unsur karbon dapat menurunkan keuletan, ketangguhan, dan *machinability* pada baja.

h. Kromium (Cr)

Kromium (Cr) dapat meningkatkan kekuatan tarik, kekerasan, ketangguhan, ketahanan terhadap abrasi dan korosi karena membentuk lapisan pasif kromium oksida (Outokumpu, 2013).

Berdasarkan struktur kristalnya, baja tahan karat dibagi menjadi lima yaitu:

1. Baja tahan karat austenitik (*austenitic stainless steel*)

Austenitic stainless steel merupakan baja yang mengandung 18% Cr dan 8% Ni dengan kadar karbon rendah. Baja jenis ini diaplikasikan dalam pembuatan peralatan makanan. Baja austenitik bersifat non-magnetik, ulet, mudah dibentuk dan dilas serta tahan korosi. Tetapi, jika bereaksi dengan klorida akan menimbulkan korosi retak tegang (SCC). Jenis baja austenitik misalnya AISI 201, 202, 304, 302, dan 316 (Dewangan *et al.*, 2015).

2. Baja tahan karat feritik (*ferritic stainless steel*)

Ferritic stainless steel merupakan baja dengan kandungan 11 – 27% kromium dan sedikit nikel atau tidak ada sama sekali. Tidak dapat dikeraskan dengan perlakuan panas, namun dapat dikeraskan dengan perlakuan dingin. Bersifat magnetik, ulet, tahan terhadap korosi dan oksidasi. Jenis baja tahan karat feritik misalnya AISI 430 dan 409 (Cobb, 1999).

3. Baja tahan karat martensitik (*martensitic stainless steel*)

Martensitic stainless steel merupakan baja dengan kadar kromium 10,5 – 18% dan karbon sekitar 1,2% tanpa tambahan nikel. Dikeraskan melalui pendinginan cepat (*quenching*). Bersifat magnetik dan rapuh, sehingga diperlukan proses *tempering* untuk mendapatkan keuletannya. Jenis baja martensitik misalnya AISI 410 dan 440 (Davis, 1994).

4. Baja Tahan Karat Dupleks (*Duplex Stainless Steel*)

Duplex Stainless Steel merupakan baja dengan bentuk struktur campuran antara austenitik dan feritik, mempunyai kekuatan tarik dan luluh lebih tinggi dibandingkan dengan jenis austenitik maupun feritik. Baja ini biasa digunakan dalam peralatan atau mesin yang memiliki tegangan dinamis. Tipe dari baja ini antara lain AISI 2205 dan 2304 (Yunaidi, 2016).

5. Baja Tahan Karat Pengerasan Pengendapan (*Precipitation Hardenable Stainless Steel*)

Precipitation Hardenable Stainless Steel merupakan baja dengan kandungan 11 – 17,5%Cr, 4 – 8%Ni, dan 0 – 2%Mo. Bersifat magnetik dan dapat dikeraskan dengan perlakuan panas. Jenis baja ini misalnya S17400 dan S13800 (Davis, 1994).

2.3. Baja Tahan Karat Austenitik SS-304

Baja tahan karat austenitik tipe 304 merupakan baja paduan dengan kandungan Cr 18 – 20%, dan Ni 8 – 10,5% (Roberge, 2000). Baja jenis ini biasa digunakan sebagai bahan konstruksi utama dalam beberapa industri seperti industri nuklir, kimia, dan makanan. Baja ini memiliki ketahanan korosi yang baik karena terdapat lapisan kromium oksida pada permukaannya (Riszki dan Harmami, 2015). Ketahanan

korosi SS-304 akan menurun jika direndam secara terus menerus dalam larutan asam maupun air laut. Semakin lama baja tersebut direndam dalam medium korosif, laju korosinya akan semakin menurun (Iliyasa *et al.*, 2012). SS-304 merupakan baja yang memiliki tingkat kekerasan rendah sekitar 123 HB dan kekuatan tarik sebesar 505 N/mm² (Nasir, 2014). Tabel 2.2 menunjukkan komposisi unsur kimia penyusun baja SS-304.

Tabel 2.2. Komposisi unsur kimia baja tahan karat tipe 304 (Yunaidi, 2016)

Unsur	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
Kadar (%)	72,07	0,0423	0,57	1,1973	17,289	0,0241	8,4	0,0008	0,04

2.4. Baja Nikel Laterit

Bijih laterit kadar rendah memiliki kandungan Ni 0,8 – 1,5% dan Fe 35 – 45%. Di samping kandungan Ni dan Fe, terdapat unsur lain yaitu Cr dan Mn. Bijih tersebut dapat diolah menjadi baja nikel laterit. Baja nikel laterit memiliki kandungan nikel dan kromium lebih sedikit dibandingkan dengan *stainless steel*. Baja ini memiliki sifat mekanis yang sesuai dengan standar baja konstruksi, sehingga dapat digunakan untuk aplikasi pada baja konstruksi jembatan dan bangunan. Kekerasan pada baja dapat ditingkatkan dengan perlakuan panas *quench* (Herbirowo dan Adjiantoro, 2016). Komposisi unsur kimia penyusun baja nikel laterit dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Komposisi unsur kimia baja nikel laterit (Desiana, 2008)

Unsur	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
Kadar (%)	99,3	0,05	0,01	0,23	0,07	<0,005	0,1	0,01	0,007

2.5. Korosi

Korosi merupakan penurunan mutu logam akibat adanya reaksi elektrokimia antara logam dengan lingkungannya. Korosi diawali dengan reaksi hidrolisis yang mengakibatkan keasaman meningkat. Pada reaksi tersebut molekul air pecah menjadi ion H^+ dan OH^- . Ion OH^- berikatan dengan besi (Fe) membentuk Besi II Oksida ($Fe(OH)_2$) dan kemudian teroksidasi membentuk besi III oksida ($Fe(OH)_3$) yang menghasilkan endapan berwarna merah atau karat (Thretewey and Chamberlein, 1991).

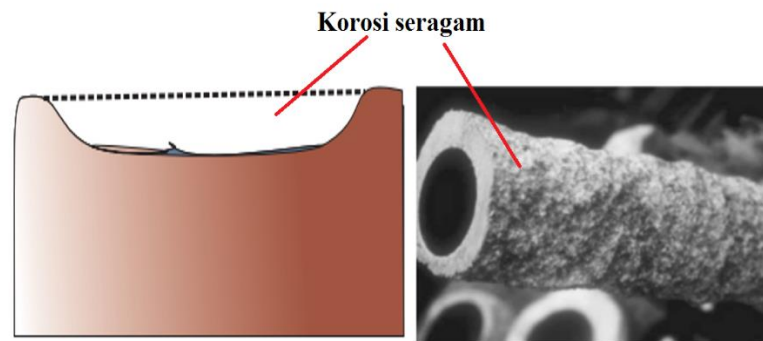
Terdapat dua faktor yang mempengaruhi korosi yaitu jenis bahan (logam) dan lingkungan. Jenis bahan meliputi kemurnian bahan, struktur bahan, bentuk kristal, dan unsur yang terkandung dalam bahan. Baja merupakan logam transisi yang cenderung membentuk ion atau senyawa kompleks (Wahyuni dkk., 2013). Lingkungan dapat berasal dari udara, air, tanah, dan zat-zat kimia seperti asam. Selain itu, korosi juga dipengaruhi oleh pH, temperatur, ataupun bakteri pereduksi (Fontana, 1987). Kerusakan yang disebabkan karena adanya korosi dapat berupa oksida logam, kerusakan permukaan logam secara morfologi, perubahan sifat mekanis, dan perubahan sifat kimia (Muzkantri dan Kusumawati, 2015). Korosi dapat berjalan cepat ataupun lambat bergantung pada medium pengkorosifnya (Fontana, 1987).

2.5.1. Jenis-Jenis Korosi

Jenis-jenis korosi sangat beraneka ragam. Secara umum, jenis-jenis korosi dapat dibedakan sebagai berikut:

2.5.1.1. Korosi seragam (*uniform corrosion*)

Korosi seragam ditandai dengan serangan korosif secara merata di seluruh luas permukaan atau sebagian besar dari total luas tersebut, dapat dilihat pada Gambar 2.1 (Roberge, 2000).



Gambar 2.1. Korosi seragam (Roberge, 2000)

Korosi jenis ini mengakibatkan pengurangan ketebalan yang relatif merata pada permukaan logam (Bardal, 2003). Korosi ini terjadi ketika luas permukaan logam terkorosi sepenuhnya dalam lingkungan seperti cairan elektrolit (larutan kimia, logam cair), gas elektrolit (udara), atau elektrolit *hybrid* (air, organisme biologis). Contohnya seperti *stainless steel* yang direndam dalam lingkungan natrium klorida (NaCl), tangki baja yang berkarat karena terkena udara, korosi pada pipa dekat rel kereta api dan lain-lain (Perez, 2004).

2.5.1.2. Korosi sumuran (*pitting corrosion*)

Korosi sumuran merupakan jenis korosi lokal yang secara selektif menyerang bagian permukaan logam. Gambar 2.2 menunjukkan contoh logam yang mengalami korosi sumuran.

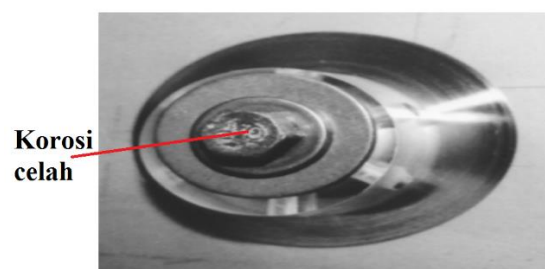


Gambar 2.2. Korosi sumuran (Cramer dan Bernard, 2003)

Permukaan logam yang terserang korosi sumuran ditandai dengan adanya lubang. Korosi ini lebih sulit diamati dibandingkan jenis korosi seragam. Korosi retak tegang dan korosi lelah merupakan awal terbentuknya korosi sumuran (Roberge, 2000).

2.5.1.3. Korosi celah (*crevice corrosion*)

Korosi celah terjadi ketika permukaan logam terkena medium korosif yang menyebabkan korosi terlokalisasi (Sidiq, 2013). Logam yang mengalami korosi celah ditandai dengan adanya celah-celah, lubang, ataupun retak seperti pada Gambar 2.3.

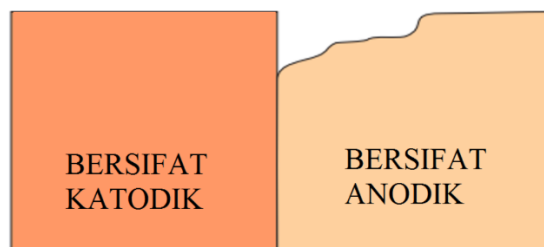


Gambar 2.3. Korosi celah (Cramer dan Bernard, 2003)

Celah tersebut hadir akibat tersumbatnya kotoran dan air di antara dua logam yang berdempetan (Roberge, 2000).

2.5.1.4. Korosi galvanis (*galvanic corrosion*)

Korosi galvanis merupakan proses pengkaratan elektro kimiawi. Korosi ini dapat terjadi apabila dua jenis logam yang berbeda potensial dimasukkan ke dalam satu elektrolit. Elektron dari logam yang bersifat anodik mengalir menuju logam yang bersifat katodik (Widharto, 1999). Akibatnya, logam yang bersifat anodik akan terkorosi. Korosi galvanis dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.4.

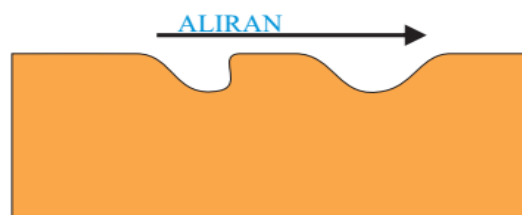


Gambar 2.4. Korosi galvanis (Roberge, 2000)

Logam dengan potensial elektroda lebih tinggi (katodik) akan mengalami reduksi, sedangkan logam yang memiliki potensial elektroda lebih rendah (anodik) akan mengalami oksidasi. Kedua logam akan membentuk sel galvanik. Bahan dengan potensial korosi lebih tinggi menjadi katoda sedangkan yang lebih rendah sebagai anoda dan terkorosi. (Roberge, 2000).

2.5.1.5. Korosi erosi (*erosion corrosion*)

Korosi erosi adalah jenis korosi yang disebabkan karena adanya aliran, dapat dilihat pada Gambar 2.5.

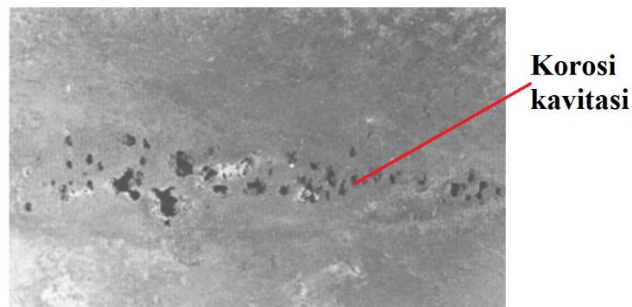


Gambar 2.5. Korosi erosi (Roberge, 2000)

Laju korosi erosi bergantung pada kecepatan pelarutan lapisan pelindung permukaan logam (Shreir *et al.*, 2000).

2.5.1.6. Korosi kavitasi (*cavitation corrosion*)

Bentuk korosi ini berkaitan erat dengan korosi erosi. Jenis korosi ini dapat dilihat pada Gambar 2.6.

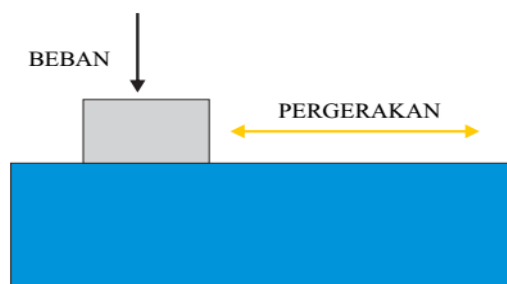


Gambar 2.6. Korosi kavitasi (Bardal, 2003)

Korosi jenis ini terjadi ketika tingginya kecepatan cairan yang menghasilkan gelembung-gelembung uap air. Apabila gelembung-gelembung tersebut mengenai permukaan logam akan menyebabkan lapisan pelindung pecah dan terjadilah korosi (Bardal 2003).

2.5.1.7. *Fretting corrosion*

Korosi jenis ini terjadi ketika terdapat pergerakan relatif beban pada suatu logam, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7.

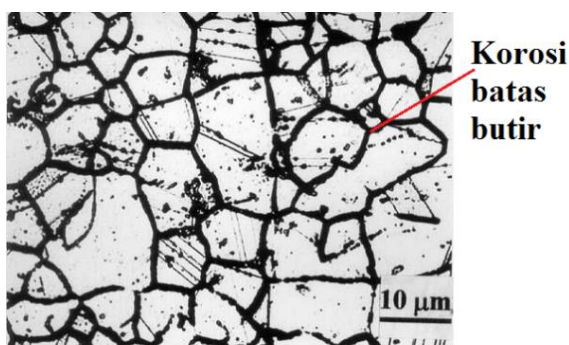


Gambar 2.7. *Fretting corrosion* (Roberge, 2000)

Fretting corrosion merupakan jenis korosi yang terjadi pada dua permukaan kontak logam dengan beban yang bergerak relatif (Bardal, 2003). Karena gerakan tersebut maka terjadilah gesekan (friksi) atau *slippage* (tergelincir) dengan amplitudo kecil (Widharto, 1999).

2.5.1.8. Korosi batas butir (*intergranular corrosion*)

Korosi batas butir merupakan korosi yang menyerang batas butir secara lokal, sehingga butir-butir logam akan hilang. Korosi jenis ini dapat dilihat pada Gambar 2.8.

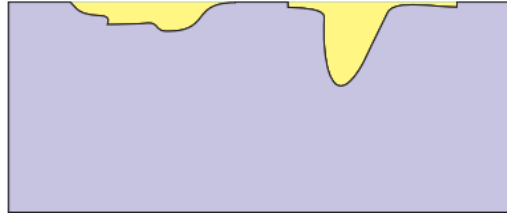


Gambar 2.8. Korosi batas butir (Budianto dkk., 2009)

Korosi ini disebabkan adanya kotoran pada batas butir, kelebihan atau kekurangan unsur paduan. Kerentanan paduan terhadap korosi batas butir dapat dikurangi dengan perlakuan panas (Roberge, 2000).

2.5.1.9. Peluluhan selektif (*selective leaching/dealloying*)

Peluluhan selektif merupakan proses penghilangan salah satu unsur paduan logam karena proses korosi (Roberge, 2000). Secara visual dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Peluluhan selektif (Roberge, 2000)

Dalam peluluhan selektif, proses karat diberi nama sesuai dengan zat komponen paduan yang larut kecuali graphitisasi. Misalnya, terdapat istilah *dezincification* yang artinya proses peluluhan zat seng dari logam paduan kuningan (*brass*). Paduan dengan kadar seng rendah cenderung mengalami proses *dezincification*. Proses ini akan lebih cepat pada suhu tinggi (Widharto, 1999).

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

Korosi retak tegang merupakan korosi yang terjadi akibat adanya tegangan tarik atau geser, tegangan sisa, dan media korosif yang menyebabkan terjadi penampakan retak pada logam. Logam yang mengalami korosi jenis ini dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Korosi retak tegang (Bardal, 2003)

Korosi ini biasanya terjadi pada logam dengan lingkungan tertentu. Misalnya, pada logam yang rentan terhadap keretakan (Landolt, 2007).

2.5.1.11. Korosi lelah (*fatigue corrosion*)

Korosi jenis ini dapat disebabkan oleh korosi retak tegang dan menunjukkan sifat morfologi yang khas. Gambar 2.11 memperlihatkan logam yang mengalami korosi lelah.



Gambar 2.11. Korosi lelah (Bardal, 2003)

Logam mendapatkan beban siklik secara terus menerus sehingga patah karena mengalami kelelahan logam (Landolt, 2007).

2.5.2. Laju Korosi

Laju korosi merupakan kecepatan merambatnya proses korosi terhadap waktu pada suatu material. Secara eksperimen, laju korosi dapat diukur menggunakan beberapa metode yaitu, metode pengurangan massa, metode elektrokimia, dan metode perubahan tahanan listrik (Yusuf, 2008). Metode pengurangan berat merupakan metode pengukuran laju korosi paling sederhana. Massa sampel sebelum dan setelah dilakukan uji ditimbang untuk mengetahui selisih massanya (Kumar, 2014).

Menurut ASTM International (2005) pengukuran laju korosi dengan metode pengurangan berat dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$CR = \frac{KW}{AT\rho} \quad (2.1)$$

dengan CR = Laju korosi (mm/tahun)

K	= Konstanta
W	= Selisih massa (gram)
A	= Luas permukaan (cm^2)
T	= Waktu perendaman (jam)
ρ	= Massa jenis baja (gram/cm^3)

Pada metode elektrokimia, laju korosi diukur dengan cara menentukan besarnya arus korosi yang mengalir (i_{corr}) dari sistem elektroda (Yusuf, 2008).

Tabel 2.4 menunjukkan perbandingan nilai laju korosi dalam mpy dengan unit satuan yang lain. Laju korosi dalam mm/tahun menampilkan nilai bentuk pecahan, μm /tahun memberikan hasil dalam bilangan bulat besar, dan nm/jam serta pm/jam menunjukkan nilai laju korosi dengan bilangan bulat kecil. Nilai laju korosi tersebut menunjukkan ketahanan suatu logam terhadap proses korosi.

Tabel 2.4. Perbandingan satuan laju korosi *mils per year* (mpy) dengan satuan laju korosi yang lain (Jones, 1996)

Laju korosi relatif	mil/tahun	mm/tahun	μm /tahun	nm/jam	pm/detik
Amat sangat baik	< 1	< 0,025	< 25	< 2,89	< 0,8
Sangat baik	1 – 5	0,025 – 0,1	25 – 100	2,89 – 10	0,8– 4
Baik	5 -20	0,1 – 0,5	100 – 500	10 – 50	4 – 16
Sedang	20 – 50	0,5 – 1	500 – 1000	50 – 150	16 – 40
Buruk	50 - 200	1 – 5	1000 – 5000	150 – 500	40 – 161
Sangat buruk	200+	5+	5000+	500+	161+

Suatu baja dapat dikatakan memiliki ketahanan korosi baik jika laju korosinya < 1 *mils per year* (mpy) (Jones, 1996).

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi laju korosi yaitu:

1. Kandungan Gas dan Padatan Terlarut

a. Oksigen (O_2)

Gas oksigen yang terlarut akan menyebabkan laju korosi pada material meningkat.

Kelarutan dalam air merupakan fungsi dari tekanan, temperatur, dan kandungan klorida. Oksigen akan bereaksi dengan besi yang kemudian menghasilkan karat.

b. Karbondioksida (CO_2)

Karbondioksida yang terlarut dalam air akan membentuk asam karbonat dan menyebabkan pH air menurun sehingga korosifitas meningkat. Jenis korosi yang dihasilkan berupa korosi piting atau sumuran.

c. Klorida (Cl^-)

Klorida akan menyerang lapisan pelindung pada material yang menyebabkan terjadinya korosi sumuran, korosi celah, dan pecahnya paduan.

d. Sulfat (SO_4)

Ion sulfat dalam air dapat berubah menjadi sulfida yang bersifat korosif.

2. Temperatur

Laju korosi pada umumnya akan meningkat seiring dengan bertambahnya temperatur meskipun kelarutan oksigen berkurang. Hal ini disebabkan karena reaksi kimia akan meningkat pada temperatur yang lebih tinggi.

3. Derajat keasaman (pH)

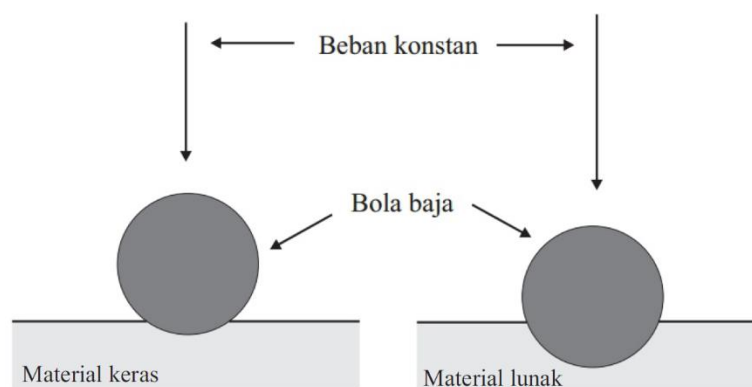
Suatu lingkungan akan bersifat asam jika $pH < 7$ dan basa jika $pH > 7$. Laju korosi akan meningkat dengan menurunnya pH. Penurunan pH akan menjadikan lingkungan bersifat semakin asam dan kandungannya hidrogennya meningkat.

4. Bakteri Pereduksi

Bakteri pereduksi sulfat (SRB) akan mereduksi ion sulfat menjadi gas H_2S . Apabila gas tersebut kontak dengan material logam akan menyebabkan terjadinya korosi (Gunaatmaja, 2011).

2.6. Pengujian Kekerasan

Kekerasan (*hardness*) merupakan ketahanan bahan terhadap pembebanan pada permukaannya. Kekerasan adalah bentuk daya tahan material terhadap benda uji (Setiawan, 2013). Kekerasan dapat dihubungkan dengan kekuatan luluh atau kekuatan tarik logam. Pada saat indentasi, material akan mengalami deformasi plastis (Smallman and Bishop, 1999). Baja memiliki kekerasan sekitar 110 hingga 500 BHN (Hadi, 2016). Gambar 2.12 memperlihatkan ketahanan suatu material terhadap beban yang diberikan melalui tes mekanis. Bola baja ditekankan pada dua jenis material, yaitu material keras dan lunak. Lekukan yang dihasilkan pada material lunak lebih dalam dibandingkan material keras (Timings, 1998). Semakin lunak material, lekukannya akan semakin besar dan nilai kekerasannya rendah. Kekerasan yang terukur dari tes mekanis bersifat relatif sehingga perlu dilakukan uji kekerasan (Callister and Rethwisch, 2010).



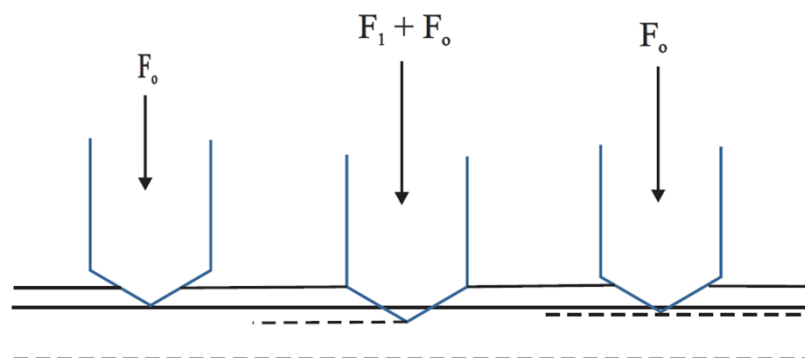
Gambar 2.12. Tes mekanis kekerasan material (Timings, 1998)

Terdapat tiga metode pengujian kekerasan suatu material (logam) yaitu Brinell, Rockwell, dan Vickers (Van Vlack, 1994). Gambar 2.13 menunjukkan alat uji kekerasan menggunakan metode Rockwell.



Gambar 2.13. Mesin uji kekerasan Rockwell (Laboratorium Analisis Kimia dan Metalurgi BPTM – LIPI Lampung)

Metode Rockwell adalah metode pengujian yang paling banyak digunakan karena lebih sederhana dan cocok untuk semua jenis material, baik yang keras maupun yang lunak. Ukuran lekukan yang dihasilkan juga kecil (Surdia dan Saito, 1999). Pada prinsipnya uji kekerasan Rockwell membandingkan perbedaan kedalaman penetrasi ketika indenter ditekan pada material (Timings, 1998). Prinsip kerja metode Rockwell diilustrasikan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Prinsip kerja metode Rockwell (Geels, 2007)

Benda uji ditekan oleh indentor dengan beban awal F_0 , kemudian ditahan selama waktu tertentu hingga kedalaman indentasi terukur. Setelah itu ditekan dengan beban tambahan F_1 sehingga beban pada indentor meningkat dan menghasilkan beban total F ($F_1 + F_0$). Selanjutnya beban tambahan dihilangkan dan hanya ada beban awal. Setelah beban awal ditahan selama waktu tertentu, kedalaman indentasi akhir terukur. Tabel 2.5 menunjukkan skala kekerasan Rockwell.

Tabel 2.5. Skala kekerasan Rockwell (ASTM Standar E18 – 15, 2007)

Simbol Skala	Indentor	Beban Uji Total (kgf)	N	Jenis Material Uji
A	Intan	60	100	Semen karbida, baja tipis, dan baja yang dikeraskan
B	$1/16$ -in (1,588 mm) bola baja	100	130	Paduan tembaga, baja lunak, paduan aluminium, besi lunak, dll.
C	Intan	150	100	Baja, besi cor keras, besi lunak <i>pearlitic</i> , titanium, baja yang dikeraskan, dan material yang lebih keras dari B100
D	Intan	100	100	Baja tipis, baja keras medium, dan besi lunak <i>pearlitic</i>
E	$1/8$ -in (3,175 mm) bola baja	100	130	Besi cor, paduan aluminium dan magnesium, logam keras
F	$1/16$ -in (1,588 mm) bola baja	60	130	Paduan tembaga anil, logam lunak, lembaran logam tipis
G	$1/16$ -in (1,588 mm) bola baja	150	130	Besi lunak, Cu-Ni-Zn dan paduan nikel
H	$1/8$ -in (3,175 mm) bola baja	60	130	Aluminium, Seng, Timah
K	$1/8$ -in (3,175 mm) bola baja	150	130	Material lunak atau tipis.
L	$1/4$ -in (6,350 mm) bola baja	60	130	Material lunak atau tipis
M	$1/4$ -in (6,350 mm) bola baja	100	130	Material lunak atau tipis
P	$1/4$ -in (6,350 mm) bola baja	150	130	Material lunak atau tipis
R	$1/2$ -in (12,70 mm) bola baja	60	130	Material lunak atau tipis
S	$1/2$ -in (12,70 mm) bola baja	100	130	Material lunak atau tipis

Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk mencari nilai kekerasan suatu bahan menggunakan metode Rockwell.

$$HR = N - \frac{h}{0,002 \text{ mm}} \quad (2.2)$$

Di mana N adalah nilai numerik (dapat dilihat pada Tabel 2.5), h adalah perbedaan kedalaman indentasi dalam satuan mm (Geels, 2007; ASTM Standar E18 – 15, 2007).

Beban awal yang diberikan pada metode Rockwell adalah 29 N (3 kgf) dengan beban total 589 N (60 kgf), 981 N (100 kgf), dan 1471 N (150 kgf). Rockwell skala B (bola baja berdiameter 1,588 mm) dan C (kerucut intan) merupakan skala yang paling sering digunakan dalam pengujian. Nilai kekerasan Rockwell ditulis dengan simbol HR diikuti skala yang digunakan. Seperti HRC berarti pengujian menggunakan Rockwell skala C (Geels, 2007).

2.7. Medium Korosif

Medium korosif merupakan lingkungan yang dapat menyebabkan suatu logam mengalami korosi. Dalam penelitian ini, medium korosif yang digunakan adalah asam sulfat (H_2SO_4) dan natrium klorida (NaCl).

2.7.1. Asam Sulfat (H_2SO_4)

Ion sulfat dapat menyebabkan korosi lubang atau sumuran maupun korosi retak tegang pada material (Febrianto, 2010). Asam sulfat murni tidak berwarna, berupa cairan kental pada suhu $10,4^\circ\text{C}$ dan mendidih pada suhu $279,6^\circ\text{C}$. Asam sulfat sama

halnya dengan asam klorida, merupakan jenis asam kuat dan bersifat korosif. Asam ini digunakan secara luas dalam berbagai bidang. Misalnya, dalam pengolahan logam digunakan untuk menghilangkan kerak baja. Banyak asam sulfat digunakan sebagai zat pendehidrasi dalam sintesis bahan kimia organik dan dalam pengolahan petrokimia. Kegunaan asam sulfat yang lain yaitu dalam pembuatan asam klorida, asam fluorida, dan pigmen TiO_2 untuk cat (Oxtobi dkk., 2003).

Sebagian besar logam dan paduan mengalami korosi apabila terkena asam sulfat karena memiliki pH yang rendah (0,5% H_2SO_4 dengan pH = 2,1; 5% H_2SO_4 dengan pH = 1,2; dan 50% H_2SO_4 dengan pH = 0,3). Nilai pH pada asam sulfat dipengaruhi oleh konsentrasi dan temperatur.

2.7.2. Natrium Klorida (NaCl)

Natrium klorida biasa disebut garam dapur. Garam dapur sendiri merupakan campuran antara natrium klorida dengan sedikit natrium iodida (untuk memenuhi kebutuhan kelenjar tiroid) dan magnesium karbonat (agar garam tidak menggumpal). Natrium klorida murni mengandung 60,66% klorin (Oxtobi dkk., 2003).

Dalam beberapa eksperimen korosi biasanya digunakan NaCl dengan kadar 3,5% untuk aplikasi air laut. Kadar NaCl dalam air laut berkisar antara 3 – 3,5%. Namun, terdapat kandungan ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} yang dapat menghambat laju korosi dengan membentuk lapisan CaCO_3 dan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (Gunaatmaja, 2011). Pada larutan NaCl 3,5%, terdapat ion klorida yang dapat mempengaruhi kandungan oksigen terlarut.

Semakin tinggi konsentrasi ion klorida, maka kandungan oksigen terlarut semakin berkurang (Fontana, 1987).

2.8. Analisis dan Karakterisasi

Baja yang berinteraksi dengan medium korosif akan mengalami pengkaratan atau korosi. Korosi yang dihasilkan dapat berupa korosi seragam, korosi sumuran, dan lain-lain. Selain itu, kekerasan pada baja juga akan berkurang akibat adanya korosi. Korosi dan kekerasan pada logam dipengaruhi oleh komposisi unsur kimia penyusun bahan. Untuk mengetahui hal tersebut, perlu dilakukan analisis dan karakterisasi bahan. Dalam penelitian ini dilakukan analisis dan karakterisasi menggunakan OES, XRD, mikroskop metalurgi, dan SEM/EDX.

2.8.1. *Optical Emission Spectrometry (OES)*

Spektroskopi emisi adalah salah satu alat analisis kimia yang digunakan untuk menentukan unsur-unsur yang terkandung dalam suatu material padat logam maupun paduan logam, secara kualitatif ataupun kuantitatif (Anggraini dkk., 2005). *Inductively Coupled Plasma/Optical Emission Spectrometry (ICP/OES)* merupakan salah satu alat analisis yang digunakan untuk menentukan elemen-elemen yang terkandung dalam suatu material. Tekniknya didasarkan pada emisi spontan foton dari atom-atom dan ion-ion yang tereksitasi dalam pelepasan frekuensi radio (RF). Foton memiliki energi karakteristik yang ditentukan oleh tingkat energi terkuantisasi dari atom-atom atau ion-ion, sehingga panjang gelombang foton dapat digunakan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang terdapat dalam material uji.

Jumlah foton yang digunakan sesuai dengan konsentrasi unsur yang terkandung dalam bahan.

Sebagian foton yang dipancarkan akan dikumpulkan oleh ICP menggunakan lensa atau cermin cekung. Optik fokus akan membentuk gambar pada perangkat ICP. Panjang gelombang yang keluar dari monokromator diubah menjadi sinyal listrik oleh fotodetektor. Sinyal tersebut diperkuat dan diproses oleh detektor elektronik, kemudian hasilnya disimpan dalam komputer (Hou and Jones, 2000). Instrumentasi OES dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Alat pengujian OES (Sumber: Laboratorium Analisis Kimia dan Metalurgi BPTM – LIPI Lampung).

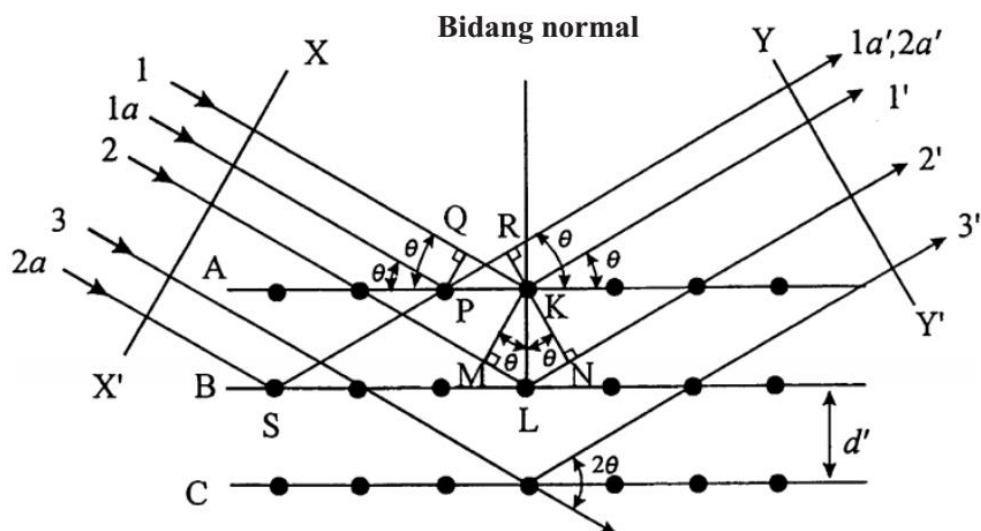
Analisis OES merupakan suatu metode karakterisasi material dengan cara mengeksitasi atom pada bahan menggunakan perbedaan potensial antara sampel dan elektroda. Energi yang dihasilkan menyebabkan elektron pada sampel memancarkan sinar. Sinar yang dipancarkan memiliki intensitas yang berbeda-beda sesuai dengan karakteristik dari setiap unsur. Pancaran sinar tersebut akan ditangkap oleh *detector* kemudian *analyzer* akan mengkarakterisasi intensitasnya, sehingga didapatkan komposisi penyusun dari material yang dianalisis. Analisis ini

dilakukan untuk mengetahui persentasi unsur kimia penyusun material yang terkandung dalam logam. Setiap unsur yang terkandung dalam logam menentukan sifat mekanis dari material tersebut.

2.8.2. X-Ray Diffraction (XRD)

Difraksi sinar-X (XRD) merupakan proses hamburan sinar-X oleh kristal. Sinar-X adalah gelombang elektromagnetik transversal. Panjang gelombang sinar-X yang digunakan dalam difraksi sekitar $0,5 - 2,5 \text{ \AA}$ (Cullity, 1978). Dengan daya tembus yang cukup besar dan panjang gelombang yang bersesuaian dengan kisi kristal, sinar-X dapat digunakan untuk menganalisis struktur kristal suatu bahan melalui peristiwa difraksi.

Ketika berkas sinar-X didifraksikan oleh suatu bidang, sinar tersebut akan tampak seperti dipantulkan oleh sederetan pantulan yang berasal dari dua lapisan (bidang) yang pertama (Bird, 1993). Gambar 2.16 memperlihatkan sinar-X yang menumbuk suatu bidang pada kisi dua dimensi.



Gambar 2.16. Difraksi sinar-X pada kisi kristal (Sumber: Waseda *et al.*, 2011)

Sinar 1 dan 1a menumbuk atom K dan P pada bidang A, kemudian dihamburkan ke segala arah. Sinar 1' dan 1a' merupakan sinar yang saling menguatkan. Perbedaan lintasan antara muka gelombang XX' dan YY' yaitu:

$$QK - PR = PK \cos \theta - PK \cos \theta = 0 \quad (2.2)$$

Sinar 1 dan 2 dihamburkan oleh atom K dan L. Perbedaan lintasan 1K1' dan 2L2' adalah:

$$ML + LN = d' \sin \theta + d' \sin \theta \quad (2.3)$$

Hukum Bragg merupakan dasar untuk mempelajari kisi kristal dalam difraksi sinar-X yang dirumuskan sebagai berikut:

$$n\lambda = 2d' \sin \theta \quad (2.4)$$

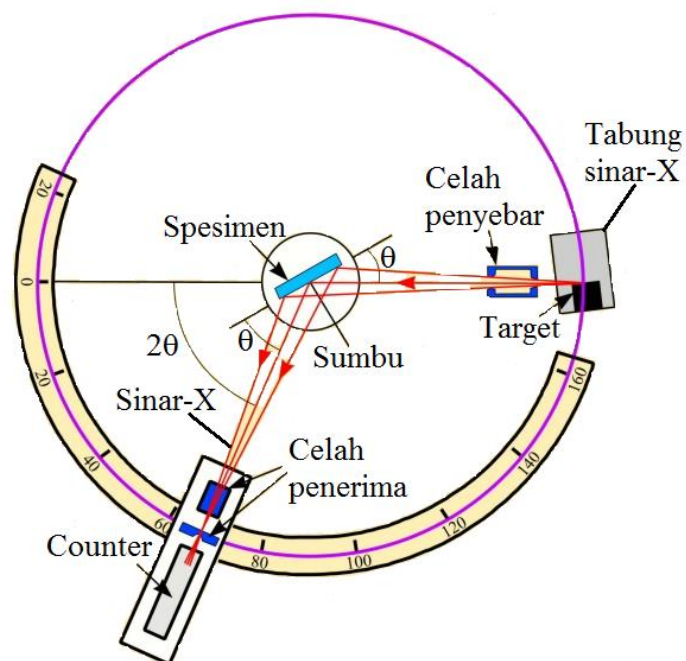
n adalah bilangan bulat 1, 2, 3, ..., λ adalah panjang gelombang sinar-X, d' adalah jarak antar bidang, dan θ adalah sudut difraksi (Cullity, 1978).

Jika seberkas sinar-X dengan panjang gelombang λ diarahkan pada permukaan kristal dengan sudut θ , maka sinar tersebut akan dihamburkan oleh bidang kristal dan menghasilkan puncak-puncak difraksi (Cullity, 1978). Puncak-puncak tersebut merupakan intensitas sinar-X terdifraksi yang menunjukkan struktur kristal dari suatu bahan. Puncak intensitas sinar-X terdifraksi dipengaruhi oleh tegangan anoda. Tegangan anoda yang semakin tinggi akan menghasilkan puncak intensitas sinar-X terdifraksi semakin tinggi pula.

Saat sinar-X mengenai suatu material, intensitas sinar yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Hal ini disebabkan intensitas tersebut ada yang terserap oleh material dan juga dihamburkan oleh atom-atom dalam material itu

sendiri. Berkas sinar-X yang dihamburkan akan saling menguatkan jika sefasa dan saling meniadakan apabila berbeda fasa. Berkas sinar-X yang saling menguatkan disebut berkas difraksi (Cullity, 1978).

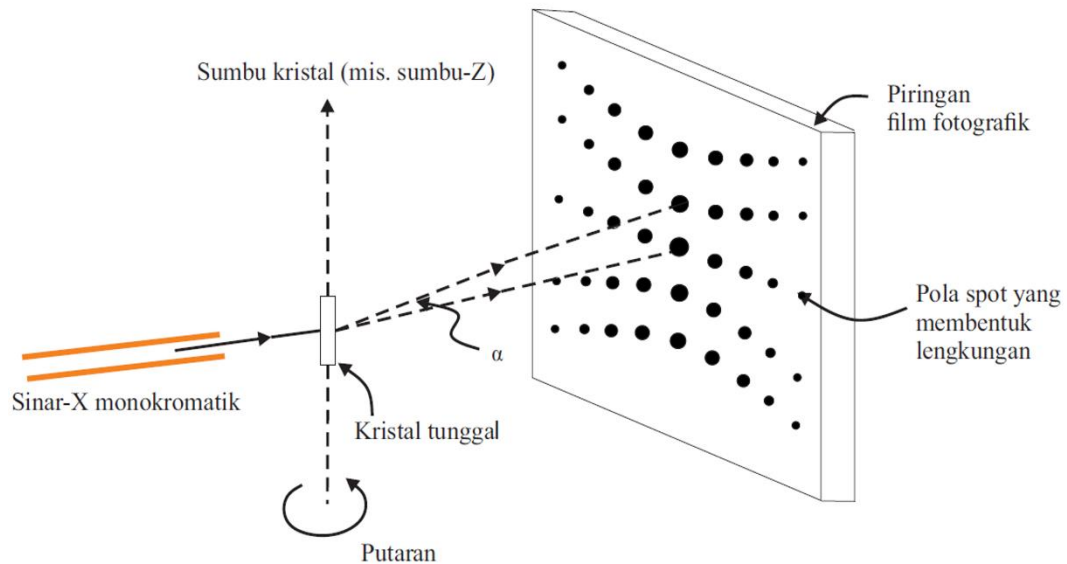
Salah satu teknik yang umum digunakan untuk menentukan struktur suatu padatan kristal adalah metode serbuk atau polikristalin yang terdiri dari kristal-kristal berukuran kecil. Namun, hasil yang paling baik akan diperoleh apabila menggunakan metode kristal tunggal (Bird, 1993). Gambar 2.17 merupakan skema difraktometer sinar-X yang digunakan pada metode serbuk.



Gambar 2.17. Skema difraktometer sinar-X (Cullity, 1978)

Difraktometer adalah alat yang digunakan untuk menentukan di mana sudut difraksi terjadi pada metode serbuk. Spesimen berupa pelat datar yang dapat diputar dengan sumbu O. Sinar-X monokromatik dihasilkan dari filamen yang terdapat pada tabung sinar-X. Sinar tersebut disearahkan oleh sehingga mengenai sampel. *Counter* (C)

pada detektor akan mendeteksi intensitas sinar yang terdifraksi (Callister and Rethawisch, 2010). Gambar 2.18 memperlihatkan pola difraksi sinar-X yang terbentuk apabila menggunakan metode rotasi kristal.



Gambar 2.18. Difraksi sinar-X menggunakan metode rotasi kristal (Bird, 1993)

Pada metode kristal tunggal, sebuah kristal dengan kualitas baik diletakkan sedemikian rupa sehingga dapat berotasi pada salah satu sumbu kristalnya. Ketika kristal diputar pada salah satu sumbunya, seberkas sinar-X monokromatik dipancarkan ke arah kristal. Perangkat-perangkat bidang yang ada di dalamnya secara berurutan akan memantulkan berkas sinar-X ketika kristal berputar. Berkas yang dipantulkan kemudian direkam oleh sebuah piringan fotografik. Apabila dalam pengujian digunakan piringan datar, akan diperoleh pola seperti pada Gambar 2.18.

Elektron yang terdapat di sekeliling atom atau ion menyebabkan terjadinya pemantulan ketika sinar-X menumbuk kristal. Semakin banyak jumlah elektron

pada suatu bidang, makin besar intensitas pantulan dan menyebabkan *spot* yang terekam pada film semakin jelas (Bird, 1993). Intensitas pantulan akan semakin kuat apabila banyak bidang kristal yang terdapat dalam sampel. Tiap puncak yang dihasilkan pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu dalam tiga dimensi.

2.8.3. Mikroskop Metalurgi

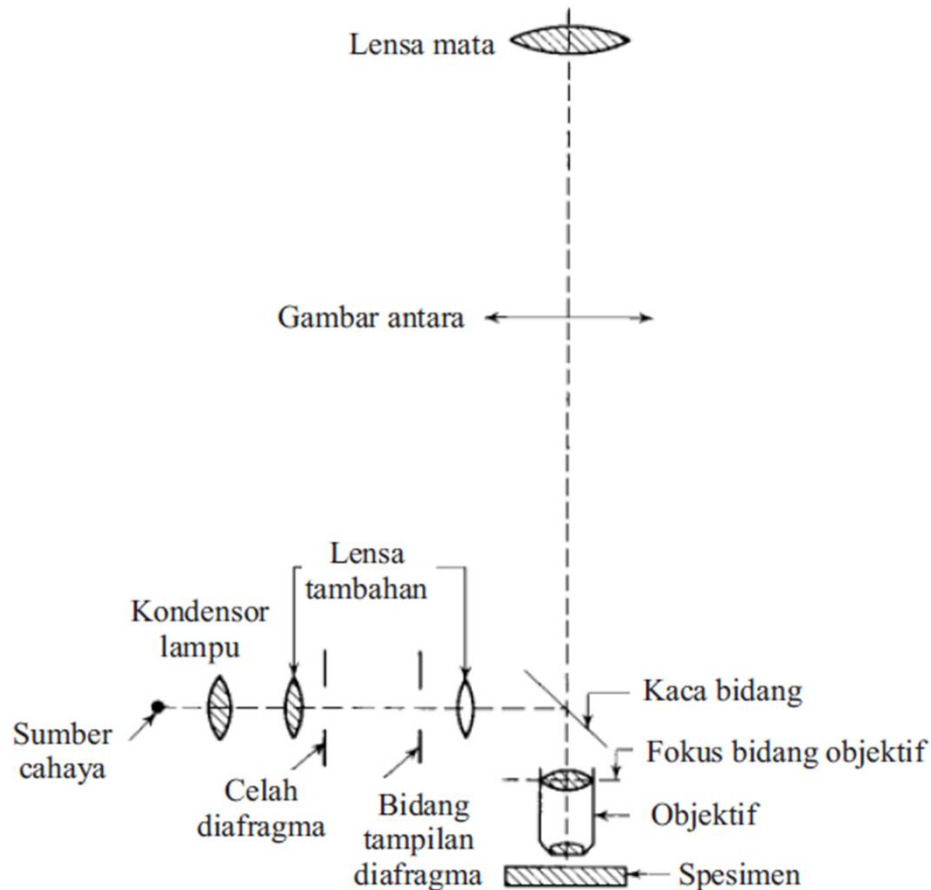
Metalografi merupakan studi mengenai struktur logam dan paduan logam melalui pengujian spesimen menggunakan mikroskop metalurgi. Mikroskop metalurgi merupakan instrumentasi yang digunakan untuk mengamati struktur mikro suatu material secara fotografis. Hasil pengujian berupa gambar yang berasal dari ketidakaturan butir, ukuran butir, distribusi fasa, dan lain-lain (Smallman and Bishop, 1999). Instrumentasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Mikroskop metalurgi (Laboratorium Analisis Kimia dan Metalurgi BPTM – LIPI Lampung)

Komponen mikroskop metalurgi terdiri dari sumber cahaya, sistem kondensor, filter cahaya, lensa objektif, lensa okuler (lensa mata), tempat spesimen, variabel

kontrol, bidang resolusi, dan lensa tambahan. Skema dasar pengujian mikroskop metalurgi dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20. Skema dasar pengujian mikroskop metalurgi (Modin and Modin, 1973)

Sumber cahaya yang digunakan terdiri dari beberapa jenis yaitu lampu filamen tungsten tegangan rendah, pancaran karbon, pancaran xenon, lampu kuarsa iodin, lampu zirkonium dan lampu uap merkuri (Voort, 1999). Sumber cahaya yang dipancarkan dikumpulkan oleh lampu kondensor. Sebuah celah diafragma digunakan untuk mengatur intensitas cahaya yang masuk. Kemudian bidang diafragma akan mengontrol ukuran spesimen yang disinari. Sejumlah lensa

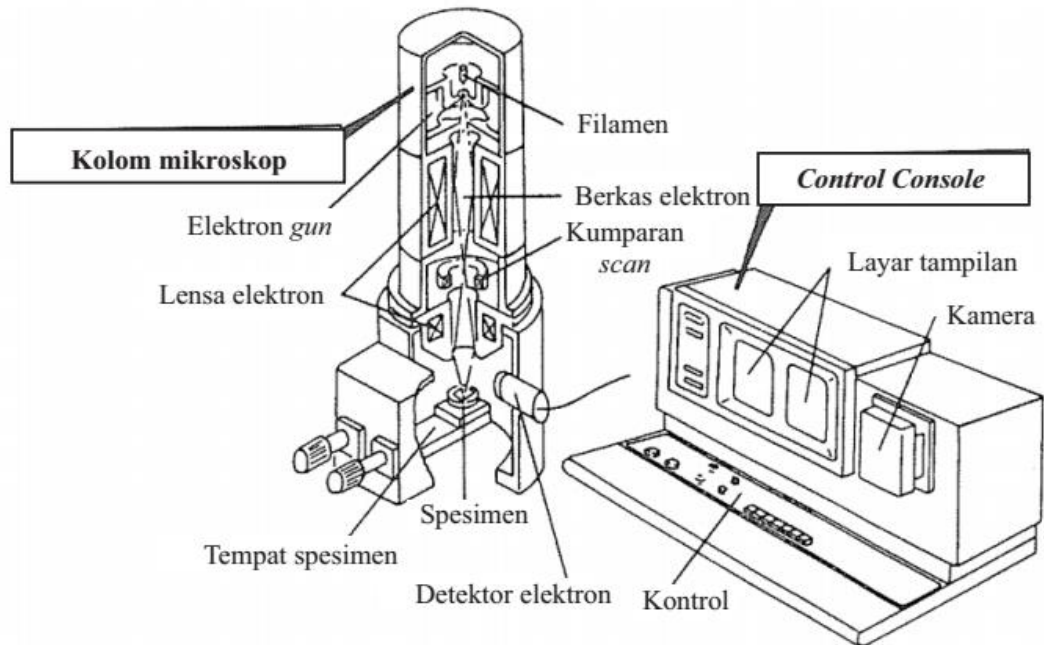
tambahan dapat memberikan sinar yang diinginkan untuk menyinari spesimen tersebut. Sinar yang masuk akan melewati kaca reflektor yang membentuk sudut 45° dan dipantulkan menuju objektif. Objektif berfungsi sebagai kondensor untuk menerangi objek yang sedang diamati. Selanjutnya, sinar yang mengenai objek dipantulkan kembali melewati objektif dan kaca bidang kemudian mikroskop akan menghasilkan gambar yang sebenarnya. Gambar tersebut kemudian direproduksi oleh lensa mata. Lensa mata berfungsi sebagai kaca pembesar, sehingga gambar yang dihasilkan jauh lebih jelas dan nyata (Modin and Modin, 1973).

2.8.4. *Scanning Electron Microscopy (SEM)*

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang paling banyak digunakan dari berbagai peralatan instrumentasi berkas elektron lainnya. SEM memberikan hasil berupa gambar bentuk permukaan material yang dianalisis. SEM dapat digunakan untuk menganalisis bahan organik dan anorganik pada skala nanometer (nm) sampai mikrometer (μm). Resolusi gambar yang dihasilkan berkisar 10 – 10.000 kali (Goldstein *et al*, 2003).

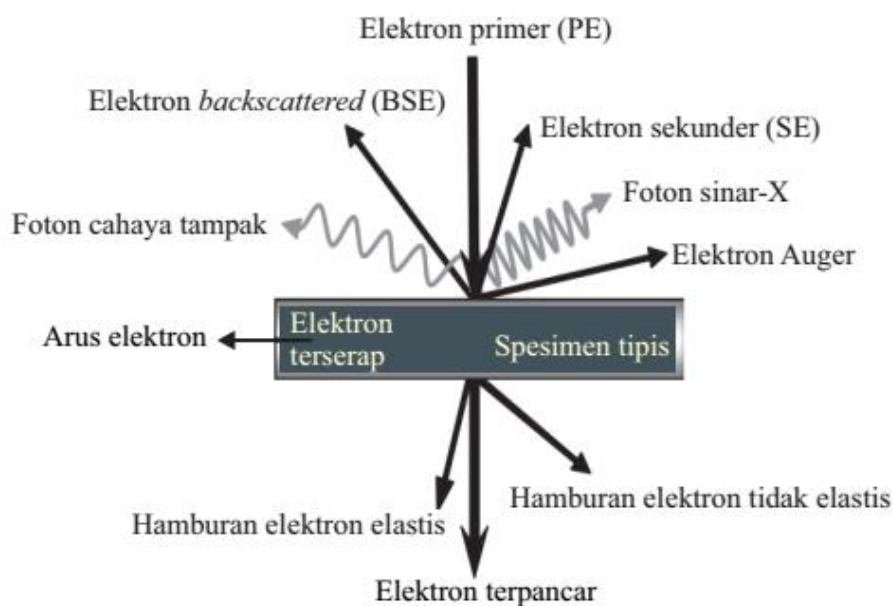
Komponen utama SEM yakni kolom elektron (*electron column*) dan *control console* seperti yang terlihat pada Gambar 2.21. Kolom elektron terdiri dari senapan elektron dan dua atau lebih lensa elektron (lensa kondensor). *Control console* terdiri dari layar tampilan tabung sinar katoda (CRT) dan tombol serta *keyboard* komputer yang mengontrol berkas elektron. Bagian dari senapan elektron adalah katoda, yaitu filamen berbentuk V yang terbuat dari bahan tungsten atau lanthanum hexaboride (LaB_6) dan plat anoda. Senapan elektron berfungsi sebagai sumber untuk menghasilkan berkas elektron yang digunakan untuk menganalisis bahan. Berkas

elektron yang dihasilkan oleh senapan elektron akan menyapu permukaan raster spesimen untuk mendapatkan satu posisi analisis.



Gambar 2.21. Komponen utama SEM (Goldstein *et al.*, 2003)

Interaksi antara berkas elektron dan spesimen menghasilkan beberapa jenis sinyal yaitu elektron sekunder (*secondary electron*), elektron *backscattered*, sinar-X karakteristik, dan foton dari berbagai energi (Goldstein, *et al.*, 2003). Elektron sekunder (SE) dan elektron *backscattered* (BSE) adalah jenis detektor yang terdapat dalam SEM. Ketika berkas elektron mengenai sampel, terjadi interaksi antara elektron dan atom-atom di permukaan maupun di bawah permukaan sampel seperti yang terlihat pada Gambar 2.22.

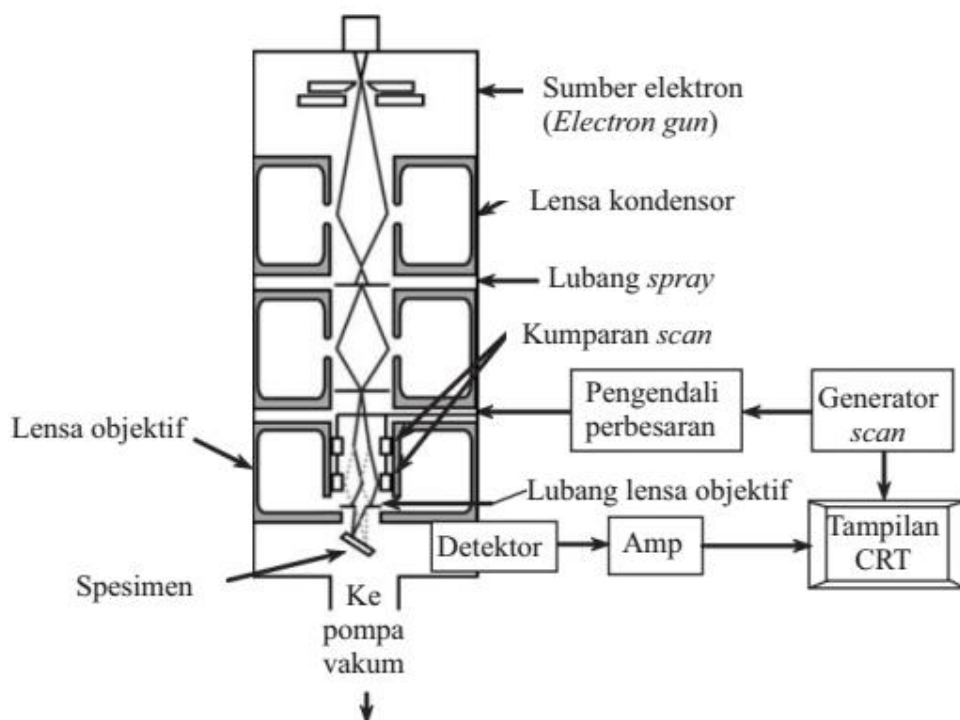


Gambar 2.22. Interaksi berkas elektron dan spesimen (Stokes, 2008)

Interaksi tersebut mengakibatkan sebagian besar berkas elektron keluar kembali yang disebut elektron *backscattered*. Elektron *backscattered* terjadi karena tumbukan antara elektron dengan inti atom. Sebagian kecil elektron terserap ke dalam bahan, kemudian terpental ke luar permukaan bahan dan menghasilkan elektron sekunder yang memiliki energi rendah. Elektron jenis ini dapat dimanfaatkan untuk membentuk gambar morfologi permukaan bahan dengan bantuan detektor.

Elektron sekunder akan masuk ke dalam detektor dan diubah menjadi sinyal listrik yang menghasilkan gambar pada layar monitor. Sinyal keluaran dari detektor ini berpengaruh terhadap intensitas cahaya di dalam tabung monitor, karena jumlah cahaya yang dipancarkan oleh monitor sebanding dengan jumlah elektron yang berinteraksi dengan spesimen. Apabila jumlah elektron yang dipancarkan semakin banyak maka gambar yang dihasilkan semakin jelas dan sebaliknya (Goldstein *et*

al., 2003). Detektor yang terdapat dalam SEM hanya akan mendeteksi berkas elektron yang memiliki intensitas tertinggi (Amelinckx *et al.*, 1997). Hasil yang ditampilkan berupa tofografi permukaan sampel (Goldstein *et al.*, 2003). Skema dasar SEM dapat dilihat pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23. Skema dasar SEM (Stokes, 2008; Goldstein *et al.*, 2003)

SEM yang dilengkapi dengan *Enegy Dispersive X-Ray* (EDX) dapat menghasilkan data berupa grafik pancaran sinar-X. Pancaran sinar-X yang dihasilkan selama penembakan elektron akan diukur oleh EDX pada SEM untuk menentukan komposisi kimia suatu material. Analisis EDX menghasilkan data terkait komposisi unsur-unsur yang terdapat dalam sampel. Selain itu, EDX juga dapat melakukan *elemental mapping* (pemetaan elemen) dengan memberikan warna yang berbeda dari masing-masing elemen yang terdapat dalam bahan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei 2017 sampai September 2017 di bengkel, Laboratorium Pengecoran, Laboratorium Analisis Kimia dan Metalurgi Balai Penelitian Teknologi Mineral (BPTM) – LIPI yang bertempat di Jl. Ir. Sutami Km. 15 Tanjung Bintang, Lampung Selatan, dan Pusat Penelitian LIPI Serpong, Tangerang Selatan.

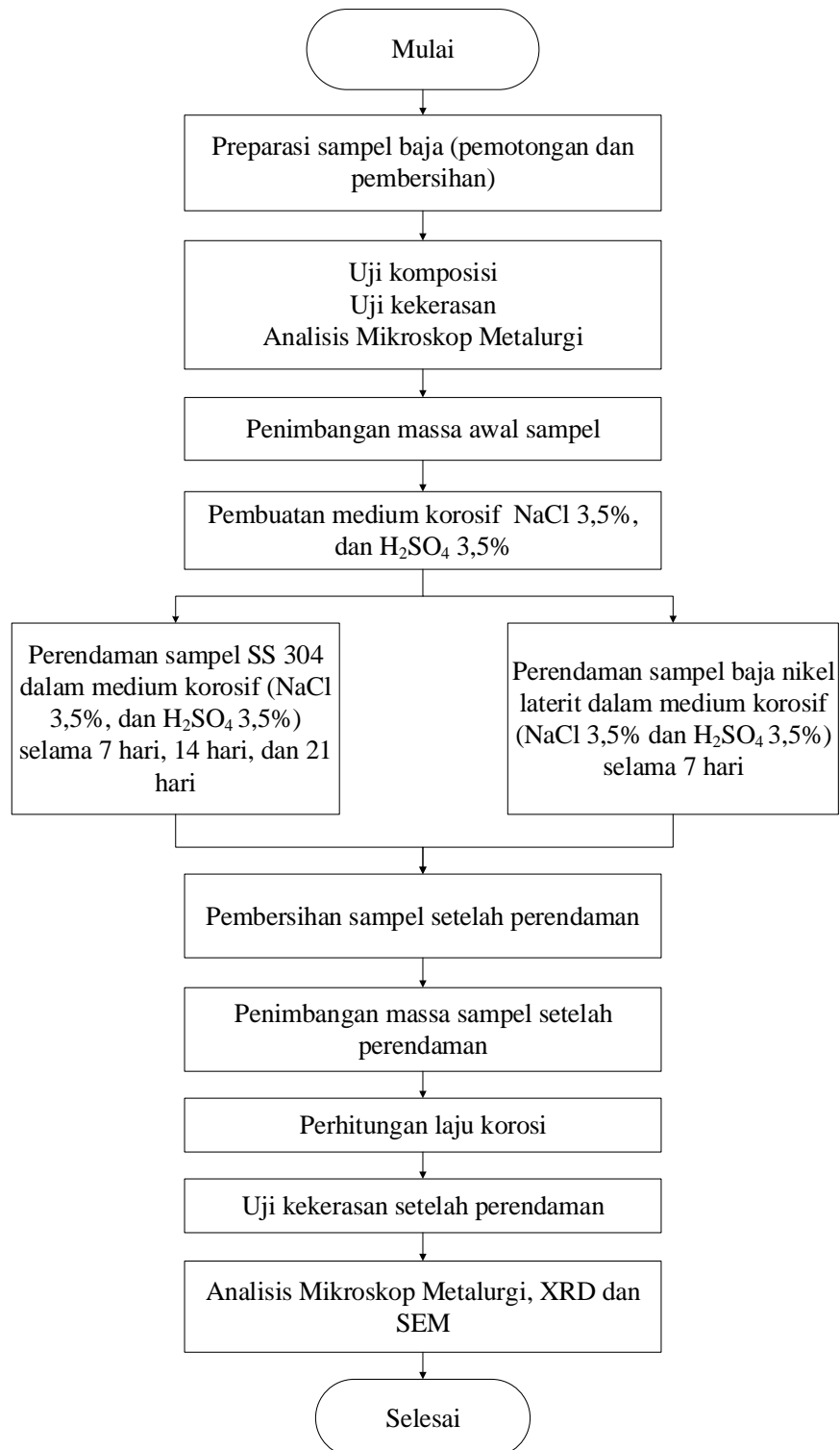
3.2. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari: alat pemotong baja, neraca digital Sartorius, gergaji mesin, gelas ukur, labu ukur, plastik kecil, *beaker glass*, benang, kayu kecil, spatula, aluminium foil, kertas amplas (grit 100, 320, 600, 800, dan 1000), wadah sampel, corong, buret, pipet tetes, *Analog Hardness Tester* Model No. 3841, Nikon *Inverted Metallurgical Microscope* (IMM) Eclipse MA100, *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *X'pert³ Powder PANalytical Diffractometers* (XRD), dan *Optical Emission Spectrometry* (OES) Spectromaxx.

Sedangkan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah: baja tahan karat (SS-304), baja nikel laterit (dengan kadar Ni 0%, 3%, 4%, 6%, dan 10% berat), asam sulfat (H₂SO₄) 97%, natrium klorida (NaCl), alkohol 70%, dan aquades.

3.3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dapat dilihat pada diagram alir dalam Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.3.1. Preparasi Sampel Baja (Pemotongan dan Pembersihan)

Langkah-langkah yang dilakukan dalam preparasi sampel baja yaitu:

1. *Stainless steel* tipe 304 dipotong dengan ukuran 20 mm x 10 mm x 2 mm dan baja nikel laterit dengan ukuran bervariasi.
2. Baja yang telah dipotong kemudian dibersihkan dan diperhalus permukaannya menggunakan amplas dengan grit 100, 320, 600, 800, dan 1000 untuk menghilangkan pengotor.
3. Baja dicelupkan ke dalam alkohol 70% untuk membersihkan pengotor yang menempel pada baja kemudian dicuci menggunakan akuades.

3.3.2. Pengujian Komposisi

Baja dianalisis menggunakan *Optical Emission Spectrometry* (OES) untuk mengetahui komposisi unsur kimia penyusun bahan. Setiap unsur dalam bahan memiliki pengaruh terhadap sifat yang dimiliki oleh bahan tersebut.

3.3.3. Pengujian kekerasan awal sampel

Baja dianalisis menggunakan metode Rockwell untuk mengetahui kekerasan baja sebelum dilakukan uji korosi. Pengujian mengacu pada ASTM E18-51 tentang standar uji metode Rockwell pada bahan logam.

3.3.4. Analisis Mikroskop Metalurgi

Baja dianalisis menggunakan mikroskop metalurgi untuk melihat permukaan/struktur mikro pada sampel sebelum mengalami korosi.

3.3.5. Penimbangan Massa Awal Sampel

Baja yang telah dibersihkan ditimbang terlebih dahulu menggunakan neraca digital Sartorius untuk mengetahui massa sebelum terjadi pengkorosian.

3.3.6. Pembuatan Medium Korosif

Medium korosif merupakan larutan yang menyebabkan terjadinya korosi. Dalam penelitian ini digunakan medium korosif berupa larutan NaCl, dan H₂SO₄ dengan konsentrasi 3,5%. Pembuatan larutan H₂SO₄ dilakukan dengan cara pengenceran berdasarkan persamaan (3.1)

$$V_1 \times M_1 = V_2 \times M_2 \quad (3.1)$$

Di mana V_1 = Volume mula-mula

M_1 = Konsentrasi mula-mula

V_2 = Volume setelah pengenceran

M_2 = Konsentrasi setelah pengenceran

Sedangkan untuk larutan NaCl dibuat berdasarkan persamaan (3.2)

$$C = \frac{m_p}{m_l} \times 100\% \quad (3.2)$$

$$m_l = V_l \times \rho_l \quad (3.3)$$

Dengan C = Konsentrasi larutan (%)

m_p = massa zat terlarut (gram)

m_l = massa pelarut (gram)

V_l = volume pelarut (ml)

ρ_l = massa jenis pelarut (gr/cm³)

Berdasarkan ASTM G31-72 (2004) volume minimum medium korosif adalah $(0,2 - 0,4 \text{ ml/mm}^2) \times (\text{luas permukaan sampel})$. Sehingga, pada penelitian ini volume larutan yang digunakan adalah 200 ml/sampel (Lampiran 1).

3.3.7. Perendaman Sampel

Menurut ASTM G31-72 (2004) waktu perendaman umum sampel untuk pengukuran laju korosi skala laboratorium adalah 2 – 7 hari. Dalam penelitian ini, perendaman sampel dilakukan selama 7 hari, 14 hari, dan 21 hari. Sampel Baja SS 304 direndam dalam medium korosif (NaCl 3,5% dan H₂SO₄ 3,5%) selama 7 hari, 14 hari, dan 21 hari. Kemudian, waktu perendaman yang menghasilkan laju korosi paling tinggi digunakan untuk menentukan lama perendaman sampel baja nikel laterit.

3.3.8. Pembersihan dan Penimbangan Massa Akhir Sampel

Sampel hasil perendaman dikeringkan, kemudian dicelupkan ke dalam alkohol 70% dan dicuci kembali menggunakan akuades. Setelah kering, sampel ditimbang menggunakan neraca digital Sartorius untuk mengetahui massa setelah perendaman.

3.3.9. Perhitungan Laju Korosi

Laju korosi diukur menggunakan metode pengurangan massa sampel tiap satuan luas dan waktu menurut persamaan (2.1) dengan konstanta laju korosi ditampilkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Konstanta laju korosi

No	Laju Korosi	K
1	<i>Mills per years (mpy)</i>	$3,45 \times 10^6$
2	<i>Inches per years (ipy)</i>	$3,45 \times 10^3$
3	<i>Inches per month (ipm)</i>	$2,87 \times 10^2$
4	<i>Milimetres per years (mm/y)</i>	$8,76 \times 10^4$
5	<i>Micrometres per years ($\mu\text{m}/\text{y}$)</i>	$8,76 \times 10^7$
6	<i>Picometres per second (pm/s)</i>	$2,78 \times 10^6$
7	<i>Gram per square metre per hour (g/m².h)</i>	$1,00 \times 10^4 \times D^a$
8	<i>Milligrams per square decimeter per day (mmd)</i>	$2,40 \times 10^6 \times D^a$
9	<i>Micrograms per square metre per second ($\mu\text{g}/\text{m}^2.\text{s}$)</i>	$2,78 \times 10^6 \times D^a$

Sumber: ASTM International, 2005. Hlm. 23.

3.3.10. Pengujian kekerasan setelah perendaman

Sampel hasil uji dianalisis kembali menggunakan metode Rockwell untuk mengetahui kekerasan baja setelah terjadi pengkorosian. Kekerasan baja akan menurun jika mengalami korosi (Kataru, 2016).

3.3.11. Analisis Mikroskop Metalurgi setelah Perendaman

Baja yang telah terkorosi dianalisis kembali menggunakan mikroskop metalurgi untuk melihat permukaan baja setelah mengalami korosi.

3.3.12. Analisis X-Ray Diffraction (XRD)

Analisis XRD dilakukan menggunakan *X'pert³ Powder PANalytical Diffractometers*. Untuk mengetahui fasa dan struktur kristal yang terbentuk pada sampel dilakukan analisis menggunakan bantuan *software X'pert HighScore* versi 3.0.5.

3.3.13. Analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray* (EDX)

Sampel juga dianalisis menggunakan SEM yang dilengkapi dengan EDX untuk melihat struktur mikro dan produk-produk korosi yang terbentuk serta unsur-unsur kimia yang terdapat dalam sampel.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.:

1. Baja SS-304 memiliki kadar Fe sebesar 71,4%, Ni 7,99%, Cr 17,93%, dan C 0,05%. Baja nikel laterit memiliki kadar Fe, Ni, Cr, dan C sebesar 90,4%Fe, 0,03Ni, 0,52Cr, dan 4,16%C untuk sampel S-0N. Komposisi unsur kimia pada sampel S-3N yaitu 84,4%Fe, 3%Ni, 1,88%Cr, dan 4,33%Cr. Pada sampel S-4N diperoleh persentase Fe, Ni, Cr, dan C sebesar 88,9%Fe, 3,91%Ni, 1,33%Cr, dan >4,35%C. Untuk sampel S-6N memiliki kadar Fe, Ni, Cr, dan C sebesar 85,3%Fe, 6,02%Ni, 2,66%Cr, dan >4,35%C. Sedangkan sampel S-10N memiliki kadar Fe, Ni, Cr, dan C sebesar 76,8%Fe, 10,63%Fe, 2,05%Cr, dan 3,77%C.
2. Laju korosi sampel dalam medium korosif H₂SO₄ lebih tinggi dibanding NaCl. Laju korosi pada sampel SS-304 yang direndam dalam larutan 3,5% NaCl selama 7 hari, 14 hari, dan 21 hari masing-masing sebesar $4,20 \times 10^{-3}$ mm/tahun, $2,80 \times 10^{-3}$ mm/tahun, dan $2,33 \times 10^{-3}$ mm/tahun. Semakin lama waktu perendaman maka laju korosinya semakin menurun.
3. Kekerasan dan ketahanan korosi pada baja tidak bergantung pada tingginya kadar nikel (Ni). Hal ini disebabkan terdapat unsur lain yang dapat

mempengaruhi tingkat kekerasan dan ketahanan korosi pada baja seperti karbon (C). Tingkat kekerasan baja nikel laterit lebih tinggi dibanding SS-304. Baja nikel laterit dengan kadar Ni 6% memiliki tingkat kekerasan paling tinggi. Tingkat kekerasan sampel menurun setelah mengalami korosi. Penurunan tingkat kekerasan pada sampel yang direndam dalam larutan H_2SO_4 lebih besar dibandingkan NaCl.

4. Hasil karakterisasi XRD memperlihatkan baja SS-304 memiliki fasa Fe- α (ferit) dan Fe- γ (austenit). Fasa ferit memiliki struktur BCC dan FCC untuk austenit. Sedangkan fasa yang terbentuk pada baja nikel laterit adalah Fe murni. Baja dengan kadar Ni 6% memiliki fasa Ni dan Fe. Untuk kadar Ni 10% terbentuk fasa Fe dan Fe- γ (austenit).
5. Hasil analisis mikroskop metalurgi dan SEM menunjukkan adanya korosi sumuran pada sampel setelah bereaksi dengan H_2SO_4 dan NaCl baik pada SS-304 maupun baja nikel laterit.
6. Hasil analisis EDX menunjukkan adanya unsur oksigen (O) pada sampel yang telah mengalami korosi. Selain itu terdapat unsur natrium (Na) dan klorida (Cl) pada baja nikel laterit setelah mengalami korosi. Unsur O dan Cl yang terdeteksi merupakan unsur yang menandakan adanya korosi pada sampel karena membentuk oksida logam.

5.2. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, saran untuk penelitian selanjutnya yang terkait baja SS-304 agar konsentrasi H_2SO_4 dan NaCl di atas 3,5% atau bervariasi serta dilakukan perlakuan panas untuk melihat apakah terjadi perubahan fasa. Untuk baja

nikel laterit agar memvariasikan kadar unsur yang lain selain nikel untuk melihat pengaruhnya terhadap ketahanan korosi dan kekerasan pada baja.

DAFTAR PUSTAKA

- Amanto, H dan Daryanto. 1999. *Ilmu Bahan*. Bumi Aksara. Jakarta. Hal 63 – 87.
- Amelinckx, S., Dyck, D. V., J. Van, L and G. Van, T. 1997. *Handbook of Microscopy: Applications in Material Science, Solid-State Physics and Chemistry*. VCH Verlagsgesellschaft mbH. Jerman. Page 120, 124, 694.
- Anggraini, D., Boybul dan Arifin, N. 2005. Aplikasi Spektrometer Emisi pada Analisis Unsur-Unsur Bahan Paduan Aluminium SiMgSi-1. *Jurnal Teknik Bahan Nuklir*. 1 (2): 95 – 104.
- ASTM Internasional. 2005. *Corrosion Test and Standar: Application and Interpretation. Second Edition*. ASTM International. Page 23.
- Asmi, N. 2014. Pengaruh Waktu Terhadap Kecepatan Korosi Logam Fe, Ni, dan Cr pada Baja SS 304 dalam Medium Asam Sulfat (H₂SO₄) 1M. (Skripsi). Universitas Sumatera Utara. Medan. Hal 34, 40 – 47.
- ASTM International. 2004. *ASTM G31-72: Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*. United States of America. Page 5.
- ASTM Standar E18 – 15. 20017. *Standar Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. ASTM International. United States of America. Page 1 – 38.
- Baldenebro, F. J., Gomez, C. D., Ramon, C., Susana, P. A., Manuel, J. P., Jose, E. L., Roberto, M and Jose, M. H. 2015. Influence of Size on the Microstructure and Mechanical Properties of an AISI 304L Stainless Steel – A Comparison between Bulk and Fiber. *Materials*. 8: 451 – 461.
- Bandriyana, B., Udhi, N dan Bagus, J. 2004. Ketahanan Korosi Baja Anti Karat pada Operasi Suhu Tinggi. *Inasea*. 5: 117 – 126.
- Bardal, E. 2003. *Corrosion and Protection*. Springer. United States of America. Page 90 – 171.
- Basuki, M., Putra Abdul A. A dan Dzikri, H. 2012. Analisa Laju Korosi Duplex SS AWS 2205 dengan Metode Weigh Loss. *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains dan teknologi (SNAST) Periode III*. Hal 344 – 354.

- Bird, T. 1993. *Kimia Fisik untuk Universitas*. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. Hal. 35 – 40.
- Bülbül, Ş and Sun, Y. 2010. Corrosion Behaviours of High Cr-Ni Cast Steel in the HCl Solution. *Journal of Alloys and Compounds*. 498: 143 – 147.
- Budianto, A., Purwantini, K dan BA. Tjipto, S. 2009. Pengamatan Struktur Mikro pada Korosi Antar Butir dari Material Baja Tahan Karat Austenitik setelah Mengalami Proses Pemanasan. *Jurnal Forum Nuklir*. 3 (2): 107 – 130.
- Callister, W. D and Rethwisch, D. G. 2010. *Material Science and Engineering an Introduction Eight Edition*. John Wiley & Sons, Inc. United States of America. Page 77 – 78.
- Chang, R. 2005. *Kimia Dasar Konsep-Konsep Inti Edisi Ketiga Jilid 1*. Erlangga. Jakarta. Hal 20 – 219.
- Cobb, H. M. 1999. *Steel Products Manual: Stainless Steel*. Iron and Steel Society. United States of America. Page 1.
- Cramer, S. D and Jr. Bernard, S. C. 2003. *ASM Handbook Volume 13A Corrosion: Fundamental, Testing, and Protection*. ASM international. United States of America. Page 589 – 592, 606 – 608, 764, 1052, 1420.
- Cullity, B. D. 1978. *Elements of X-Ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. United States of America. Page 1 – 6.
- Davis, J. R. 1994. *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*. ASM International. United States of America. Page 14 – 17, 34.
- Desiana, C. 2008. Pengaruh Temperatur terhadap Laju Korosi Baja Karbon dan Baja Laterit pada Lingkungan Air. (*Skripsi*). Universitas Indonesia. Depok. Hal 1 – 69.
- Dewangan, A. K., Patel, A. D and Bhadania, A. G. 2015. Stainless Steel for Dairy and Food Industry: A Review. *Journal of Material Science and Engineering*. (4): 1 – 4.
- Fitri., Ginting, E dan Pulung, K. 2013. Komposisi Kimia, Struktur Mikro, Holding Time, dan Sifat Ketangguhan Baja karbon Medium pada Suhu 780°C. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*. 1 (1): 75 – 78.
- Febrianto. 2003. Pengaruh Konsentrasi Klorida pada Sifat Korosi SS 316L dan SS 347. *Prosiding Seminar Nasional ke-9 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir*. Hal 229 – 238.
- Febrianto. 2010. Analisa Laju Korosi Material Bejana Tekan PWR dalam Berbagai Konsentrasi H₂SO₄ dan Temperatur. *Sigma Epsilon*. 14 (1): 10 – 13.

- Fontana, M. G. 1987. *Corrosion Engineering*. McGraw-Hill Book. Singapore. Page 5 – 30.
- Fox, J. H. E. 1979. *An Introduction to Steel Selection: Part 1 Carbon and Low-Alloy Steels*. Design Council. Oxford University Press. Britania Raya. Page 7 – 8.
- Geels, K. 2007. *Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, Light Microscopy, Image Analysis and Hardness Testing*. ASTM International. United States of America. Page 559, 634 – 637.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Patrick, E., David, C. J., Charles, E. L., Eric, L., Linda, S and Joseph, R. M. 2003. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis Third Edition*. Plenum Publishers. New York. Page 1, 21 – 27.
- Gunaatmaja, A. 2011. Korosi pada Baja Karbon Rendah dengan Penambahan Ekstrak Ubi Ungu sebagai Inhibitor Organik di Lingkungan NaCl 3,5%. (*Skripsi*). Universitas Indonesia. Depok. Hal 9 – 13.
- Gusti, D. R., Aritonang, H. F dan Sriwati, A. 2008. Pengaruh Penambahan Asam Suksinat dalam Menghambat Korosi dalam Larutan Asam Sulfat. *Chemical Prog.* 1(1): 36 – 42.
- Hadi, S. 2016. *Teknologi Bahan*. CV. Andi Offset. Yogyakarta. Hal 95.
- Herbirowo, S dan Adjiantoro, B. 2016. Pengaruh Perlakuan Panas terhadap Struktur Mikro dan Kekuatan Mekanik Baja Nikel Laterit. *Widyariset.* 2: 153 – 160.
- Hidayat, T., Rhamdhani, M. A., E. Jak and P.C. Hayes. 2008. The Characterization of Nickel Metal Pore Structures and Measurement of Intrinsic Reaction Rate During the Reduction of Nickel Oxide in H₂-N₂ and H₂-H₂O Atmospheres. *Mineral Engineering.* 21: 157 – 166.
- Hou, X and Jones, B T. 2000. *Inductively Coupled Plasma / Optical Emission Spectroscopy*. John Wiley and Sons, Ltd. United States of America. Page 1 – 15.
- Iliyasu, I., D. S. Yawas and Aku, S. Y. 2012. Corrosion Behaviour of Austenitic Stainless Steel in Sulphuric Acid at Various Concentrations. *Advanced in Applied Science Research.* 3: 3909 – 3915.
- Indiyanto, R. 2005. *Diktat Pengantar Pengetahuan Bahan Teknik*. Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”. Surabaya. Hal 13 – 16.
- Jones, D. A. 1996. *Principles and Prevention of Corrosion Second Edition*. Prentice Hall, Inc. Unites States of America. Page 34 – 390.

- Kataru, V., Subhan, M., Yashodeepp., Vilas, K. B and Prashanth, T. 2016. Evaluation of Corrosion, Hardness for Stainless Steel – 304 in Varied Corrosive Environments. *Advanced Materials Manufacturing and Characterization*. 6 (2): 61 – 63.
- Kayadoe, V., Fadli, M., Rahman H dan Mitra, T. 2015. Ekstrak Daun Pandan (*Pandanus amaryllifous Roxb*) sebagai Inhibitor Korosi Baja SS-304 dalam Larutan H₂SO₄. *Molekul*. 10(2): 88 – 96.
- Khatak, H. S and Raj, B. 2002. *Corrosion of Austenitic Stainless Steel*. Alpha Science International Ltd. India. Page 1 – 163.
- Kumar, N., Singh, A. K., Ajit, K and Sushi, PP. 2014. Corrosion Behaviour of Austenitic Stainless Steel Grade 316 in Strong Acid Solution. *International Journal of Advanced Research*. 2 (5): 1 – 9.
- Landolt, D. 2007. *Corrosion and Surface Chemistry of Metals*. EPFL Press. Swiss. Page 461 – 462, 505 – 508.
- Loto, R. T., Loto, C. A., Popoola, A. PP. I and M. Ranyaoa. 2012. Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steel in Sulphuric Acid. *International Journal of Physical Sciences*. 7: 1677 – 1688.
- Loto, R. T. 2013. Pitting Corrosion Evaluation of Austenitic Stainless Steel Type 304 in Acid Chloride Media. *Journal of Matererials and Environmental Science*. 4: 448 – 459.
- Marwati, S., Padmaningrum, R. T dan Marfuatun. 2009. Pemanfaatan Ion Logam Berat Tembaga (III), Kromium (III), Timbal (II), dan Seng (II) dalam Limbah Cair Industri Elektroplating untuk Pelapisan Logam Besi. *Jurnal Penelitian Sainstek*. 14(1): 17 – 40.
- Muzkantri, V. R dan Kusumawati, D. H. 2015. Pengaruh Variasi TiO₂ dalam Komposit PANi-TiO₂/Cat sebagai Pelapis Anti Korosi pada Baja Karbon ASTM A36. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*. 4: 61 – 64.
- Modin, H and Modin, S. 1973. *Metallurgical Microscopy*. London Butterworths. London. Page 47 – 50.
- Nasir, N. I. 2014. The Effect of Heat Treatment on the mechanical Properties of Stainless Steel Type 304. *International Journal of Scientific Engineering and Research*. 3 (8): 87 – 93.
- Nurjaman. F., Shofi, A., Fathan, B dan Bambang, S. Pembuatan Spiegel Pig Iron menggunakan Hot Blast Cupola. *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan*. 25(1): 13 – 22.

- Outokumpu. 2013. *Handbook of Stainless Steel*. Outokumpu Oyj. Sweden. Page 12 – 15.
- Oxtobi, D. W., Gillis, H. P dan Norman, H. N. 2003. *Prinsip-Prinsip Kimia Modern Edisi Keempat Jilid 2*. Erlangga. Jakarta. Hal 8 – 227.
- Pakpahan, M. S., Ginting, E dan Suprihatin. 2015. Inhibisi Korosi Baja Karbon Rendah C-Mn Steel oleh Ekstrak Daun Teh (*Camellia sinesis*) dalam Medium Korosif. *JURNAL Teori dan Aplikasi Fisika*. 3(2): 195 – 210.
- Perez, N. 2004. *Electrochemistry and Corrosion Science*. Kluwer Academic Publisher. New York. Page 1 – 6.
- Pozio, A., Silva, R. F dan A Masci. 2008. Corrosion Study of SS430/Nb as Bipolar Plate Materials for PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*. 33: 5697 – 5702.
- Risandi, Y., Emriadi dan Yeni, S. 2012. Ekstrak Daun Pepaya (*Carica papaya*) sebagai Inhibitor Korosi Baja St. 37 dalam Medium Asam Sulfat. *Jurnal Kimia Unand*. 1(2): 27 – 33.
- Riszki, T. I dan Harmami. 2015. Pengaruh Suhu Terhadap Kualitas Coating (Pelapisan) Stainless Steel Tipe 304 dengan Kitosan secara Elektroforesis. *Jurnal Sains dan Seni ITS*. 4(1) : 25 – 28.
- Roberge, P. R. 2000. *Handbook of Corrosion Engineering*. McGraw-Hill. New York. Page 333 – 351, 1093.
- Rusianto, T. 2009. Perubahan Laju Korosi akibat Tegangan Dalam dengan Metode C-Ring. *Jurnal Teknologi Technoscientia*. 2(1): 134 – 142.
- Shahab, A. 2010. Kekasaran dan Morfologi Hasil Pengelasan TIG Baja Tahan Karat 316 dengan Kadar Sulfur Berbeda. *Jurnal Teknik Mesin*. 12(1): 27 – 34.
- Setiawan, H. 2013. Pengujian Kekuatan Tarik, Kekerasan, dan Struktur Mikro Produk Cor Propeler Kuningan. *Jurnal Simetris*. 3 (1): 71 – 79.
- Sidiq, M. F. 2013. Analisa Korosi dan Pengendaliannya. *Jurnal Foundry*. 3 (1): 25 – 30.
- Shreir, L. L., Jarman, R. A and Burstein, G. T. 2000. *Corrosion Volume 1: Metal/Environment Reactions*. Planta Tree. Britania. Page 193 – 195.
- Smallman, R. E and Bishop, R. J. 1999. *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering: Science, Process, Applications. Sixth Edition*. Butterworth – Heinemann. Oxford. Page 126 – 128, 151, 197 – 200.

- Stokes, D. J. 2008. *Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy (VP-ESEM)*. John Wiley and Sons, Ltd. United States of America. Page 18, 30 – 31.
- Suharno, B dan Kurniawan, A. 2005. Studi Perbandingan Ketahanan Korosi dan Struktur Mikro Baja COR CF8M (SS 316) yang Dibuat dengan Ferronikel Lokal dan Nikel Impor. *Jurnal Teknologi*. 1: 26 – 37.
- Sumarji. 2011. Studi Perbandingan Ketahanan Korosi Stainless Steel Tipe SS 304 dan SS 201 menggunakan Metode U-Bend Test secara Siklik dengan Variasi Suhu dan pH. *Jurnal ROTOR*. 4 (1): 1 – 8.
- Surdia, T dan Saito, S. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. PT. Pradnya Paramita. Jakarta. Hal 1 – 375.
- Talbot, D and Talbot, J. 1997. *Corrosion Science and Technology*. CRC Press. United States of America. Page 289 – 290.
- Thretewey, K. R dan J. Chamberlein. 1991. *Korosi untuk Mahasiswa Sains dan Rekayasawan*. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. Hal 1 – 393.
- Timings, R.L. 1998. *Engineering Materials Volume 1 Second Edition*. Addison Wesley Longman. Singapore. Page 8, 52, 310 – 312.
- Van Vlack, L. H. 1994. *Ilmu dan Teknologi Bahan*. Erlangga. Jakarta. Hal 11, 485 – 510.
- Voort, G. F. V. 1999. *Metallography Principles and Practice*. ASM International. United States of America. Page 270 – 282.
- Wahyuni, M., Djamas, D dan Ratnawulan. 2013. Pengaruh Waktu Perendaman Baja dengan Ekstrak Buah Pinang dan HCl terhadap Laju Korosi dan Potensial Logam. *Pillar of Physics*. 2: 59 – 67.
- Waseda, Y., Matsubara, E and Kozo, S. 2011. *X-Ray Diffraction Crystallography: Introduction, Examples and Solved Problems*. Spinger. New York. Page 74 – 75.
- Widharto, Sri. 1999. *Korosi dan Pencegahannya*. PT Pradnya Paramita. Jakarta. Hal 5 – 45, 78 – 79.
- Yunaidi. 2016. Perbandingan Laju Korosi pada Baja Karbon Rendah dan Stainless Steel Seri 201, 304, dan 430 dalam Media Nira. *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*. 1: 1 – 6.
- Yusuf. 2013. Seminar Nasional Besi dan Baja III 2013. (*Proceeding*). Institut Teknologi Bandung. Bandung. Hal 208 – 213.

Yusuf, S. 2008. Laju Korosi Pipa Baja Karbon A106 sebagai Fungsi Temperatur dan Konsentrasi NaCl pada Fluida yang Tersaturasi Gas CO₂. (*Thesis*). Universitas Indonesia. Jakarta. Hal 23 – 25.