

TUGAS AKHIR - TL234839

**PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN ADITIF Na_2SO_4 DAN
WAKTU TAHAN PADA PROSES REDUKSI SELEKTIF BIJIH
NIKEL LATERITIK MENGGUNAKAN GAS NH_3**

DOLPH RAIKHAN SHAHRUKH RAMADHAN
NRP 5011211137

Dosen Pembimbing
Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng.
NIP 196809302000031001

Program Studi Sarjana Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



TUGAS AKHIR - TL234839

**PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN ADITIF Na_2SO_4 DAN
WAKTU TAHAN PADA PROSES REDUKSI SELEKTIF BIJIH
NIKEL LATERITIK MENGGUNAKAN GAS NH_3**

DOLPH RAIKHAN SHAHRUKH RAMADHAN
NRP 5011211137

Dosen Pembimbing
Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng.
NIP 196809302000031001

Program Studi Sarjana Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL234839

EFFECT OF Na_2SO_4 ADDITIVE ADDITION AND HOLDING TIME ON THE LATERITIC NICKEL ORE REDUCTION PROCESS USING NH_3 GAS

DOLPH RAIKHAN SHAHRUKH RAMADHAN
NRP 5011211137

Advisor
Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng.
NIP 196809302000031001

Study Program of Materials Engineering
Department of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN ADITIF Na_2SO_4 DAN WAKTU TAHAN PADA PROSES REDUKSI SELEKTIF BIJIH NIKEL LATERITIK MENGGUNAKAN GAS NH_3

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarja Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Material dan Metalurgi
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **DOLPH RAIKHAN SHAHRUKH RAMADHAN**
NRP. 5011211137

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng.
2. Yuli Setyorini, S.T., M.Phil., PhD.Eng.
3. Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng. PhD
4. Yusuf Pradesar, S.T., M.T., M.Sc., PhD

Pembimbing

Penguji

Penguji

Penguji



SURABAYA
Juli, 2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

EFFECT OF Na_2SO_4 ADDITIVE ADDITION AND HOLDING TIME ON THE LATERITIC NICKEL ORE REDUCTION PROCESS USING NH_3 GAS

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree of Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Materials and Metallurgical Engineering
Department of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **DOLPH RAIKHAN SHAHRUKH RAMADHAN**
NRP. 5011211137

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng.
2. Yuli Setyorini, S.T., M.Phil., Ph.D.Eng.
3. Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng. Ph.D.
4. Yusuf Pradesar, S.T., M.T., M.Sc., Ph.D.

Advisor

Examiner

Examiner

Examiner



SURABAYA
Juli, 2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

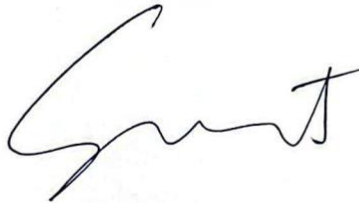
Nama mahasiswa / NRP : Dolph Raikhan Shahrukh Ramadhan / 5011211137
Program studi : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing / NIP : Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng./
196809302000031001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Pengaruh Variasi Penambahan Aditif Na_2SO_4 dan Waktu Tahan Pada Proses Reduksi Selektif Bijih Nikel Lateritik Menggunakan Gas NH_3 ” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

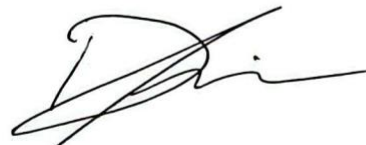
Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui
Dosen Pembimbing

Surabaya, 24 Juli 2025
Mahasiswa



(Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng.)
NIP. 196809302000031001



(Dolph Raikhan Shahrukh Ramadhan)
NRP. 5011211137

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Dolph Raikhan Shahrukh Ramadhan / 5011211137
Department : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Advisor / NIP : Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng. /
196809302000031001

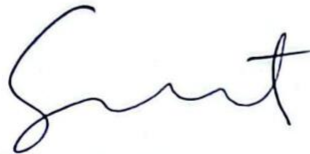
Hereby declare that the Final Project with the title of "Effect Of Na_2SO_4 Additive Addition And Holding Time On The Lateritic Nickel Ore Reduction Process Using NH_3 Gas" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

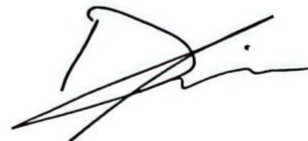
Acknowledged
Advisor

Surabaya, 24 Juli 2025

Student



(Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng.)
NIP. 196809302000031001



(Dolph Raikhan Shahrukh Ramadhan)
NRP. 5011211137

(This page is intentionally blank)

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN ADITIF Na_2SO_4 DAN WAKTU TAHAN PADA PROSES REDUKSI SELEKTIF BIJIH NIKEL LATERITIK MENGUNAKAN GAS NH_3

Nama Mahasiswa / NRP : Dolph Raikhan Shahrukh Ramadhan/5011211137
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng.

Abstrak

Indonesia memiliki cadangan nikel terbesar di dunia, menjadikannya sebagai komoditas strategis yang mendukung pertumbuhan ekonomi nasional dan transisi energi global. Namun, proses pengolahan bijih nikel laterit, khususnya metode pirometalurgi, masih bergantung pada bahan bakar fosil dan menghasilkan emisi CO_2 yang tinggi 18 ton CO_2 -eq/ton nikel. Salah satu metode alternatif yang dapat menurunkan emisi CO_2 adalah penggunaan reduktan non-karbon, seperti gas amonia (NH_3) dan natrium sulfat (Na_2SO_4) sebagai aditif selektif dalam proses reduksi bijih nikel laterit. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi penambahan Na_2SO_4 serta waktu tahan terhadap derajat reduksi, kandungan Ni morfologi, produk reduksi bijih nikel laterit menggunakan NH_3 . Selain itu, potensi pengurangan emisi CO_2 secara teoritis juga dianalisis untuk mengkaji efektivitas metode ini dalam mendukung teknologi pengolahan nikel yang lebih ramah lingkungan. Reduktan yang digunakan adalah Gas NH_3 yang akan dialirkan ke dalam *tube furnace* dengan laju alir 0.3 L/min. Variasi yang digunakan yaitu penambahan aditif Na_2SO_4 sebesar 5, 10, 15, 20% massa dan waktu tahan 0.5, 1, 2, dan 3 jam. Setelah seluruh proses reduksi selesai, pengujian *X-Ray Diffractometer* (XRD), *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX), dan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) dilakukan untuk menganalisis produk hasil reduksi. Dari hasil penelitian diperoleh hasil bahwa penambahan Na_2SO_4 dan peningkatan waktu tahan terbukti meningkatkan derajat reduksi, kadar Ni dan Fe, serta memperbaiki mineralogi dan morfologi produk reduksi bijih nikel laterit menggunakan gas NH_3 . Derajat reduksi tertinggi sebesar 82,74% diperoleh pada 15 wt% Na_2SO_4 dan waktu tahan 2 jam. Waktu tahan yang lebih lama memungkinkan lebih banyak oksida nikel dan besi tereduksi, membentuk fasa logam yang lebih stabil. Kandungan logam tertinggi tercapai pada 10 wt% Na_2SO_4 dan waktu tahan 120 menit, dengan kadar Ni dan Fe masing-masing 1,21% dan 12,28%. Na_2SO_4 memfasilitasi pembentukan fasa troilit (FeS) dan feronikel (FeNi), memperbesar partikel logam, serta menurunkan titik leleh slag agar mudah terpisah dari logam. Penggunaan NH_3 sebagai reduktan juga menghasilkan emisi CO_2 yang lebih rendah (4,77 kg CO_2 -eq/kg FeNi) dibandingkan proses konvensional, karena tidak menghasilkan CO_2 langsung selama proses reduksi.

Kata Kunci: Amonia, Nikel laterit, Na_2SO_4 , Reduksi selektif, Waktu tahan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRACT

EFFECT OF Na₂SO₄ ADDITIVE ADDITION AND HOLDING TIME ON THE LATERITIC NICKEL ORE REDUCTION PROCESS USING NH₃ GAS

Student Name / NRP : Dolph Raikhan Shahrukh Ramadhan/5011211137
Department : Materials and Metallurgical Engineering INDSYS-ITS
Advisor : Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng.

Abstract

Indonesia holds the largest nickel reserves in the world, positioning it as a strategic commodity in supporting national economic development and the global energy transition. However, the processing of lateritic nickel ore, particularly through pyrometallurgical methods, still relies heavily on fossil fuels and contributes to high CO₂ emissions, reaching up to 18 tons CO₂-eq per ton of nickel. One promising alternative to reduce CO₂ emissions is the application of non-carbon reductants such as ammonia gas (NH₃), along with sodium sulfate (Na₂SO₄) as a selective additive during the reduction of lateritic nickel ore. This study aims to analyze the effect of varying Na₂SO₄ additions and holding times on the reduction degree, Ni content, mineralogy, morphology, and overall characteristics of the reduced product using NH₃ gas. Additionally, the theoretical potential for CO₂ emission reduction is assessed to evaluate the effectiveness of this method in supporting more environmentally friendly nickel processing technologies. NH₃ gas was used as the reductant and introduced into a tube furnace at a flow rate of 0.3 L/min. The experimental variations included Na₂SO₄ additions of 5, 10, 15, and 20 wt% and holding times of 0.5, 1, 2, and 3 hours. After the reduction process, X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX), and Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) were conducted to analyze the reduced products. The results showed that increasing Na₂SO₄ addition and holding time significantly enhanced the reduction degree, Ni and Fe content, and improved the mineralogy and morphology of the reduced lateritic nickel ore. The highest reduction degree of 82.74% was achieved at 15 wt% Na₂SO₄ with a holding time of 2 hours. A longer holding time enabled more NiO and FeO to be reduced into stable metallic phases. The highest metal content was obtained at 10 wt% Na₂SO₄ and 120 minutes, yielding Ni and Fe concentrations of 1.21% and 12.28%, respectively. Na₂SO₄ facilitated the formation of troilite (FeS) and ferronickel (FeNi) phases, enlarged the metallic particles, and lowered the slag melting point, allowing easier separation from the metal that shown improved the morphology. Moreover, the use of NH₃ as a reductant led to significantly lower CO₂ emissions (4.77 kg CO₂-eq/kg FeNi) compared to conventional processes, as no direct CO₂ generation occurs during reduction.

Keywords: Ammonia, Laterite nickel, Na₂SO₄, Selective reduction, Holding time

(This page is intentionally blank)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
APPROVAL SHEET	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY.....	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Nikel dan Feronikel	5
2.2 Bijih Nikel Laterit.....	5
2.2.1 Bijih Nikel Limonit	6
2.2.2 Bijih Nikel Saprolit.....	7
2.3 Proses Pengolahan Bijih Nikel Laterit.....	8
2.3.2 Pirometalurgi	9
2.3.3 Hidrometalurgi.....	11
2.4 Ammonia (NH ₃).....	13
2.5 Natrium Sulfat (Na ₂ SO ₄)	14
2.6 Reduksi Mineral menggunakan Gas Ammonia (NH ₃)	14
2.7 Reduksi Bijih Nikel Laterit dengan Zat Aditif Na ₂ SO ₄	14
2.8 Termodinamika Reaksi	16
2.9 Penelitian Sebelumnya	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	25
3.1 Diagram Alir	25
3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian	26
3.2.1 Peralatan Penelitian	26
3.2.2 Bahan Penelitian	31

3.3 Prosedur Penelitian	33
3.3.1 Prosedur Preparasi Sampel	33
3.3.2 Prosedur Reduksi Sampel	34
3.4 Pengujian	34
3.4.1 Perhitungan Derajat Reduksi	35
3.4.2 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	35
3.4.3 Pengujian SEM-EDX	36
3.4.4 Pengujian <i>Atomic Absorption Spectrophotometer</i> (AAS)	38
3.5 Rancangan Penelitian	38
3.6 Jadwal Penelitian	39
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Karakteristik Bijih Nikel Laterit	41
4.2 Pengaruh Penambahan Na ₂ SO ₄ dan Waktu Tahan Terhadap Derajat Reduksi Hasil Proses Reduksi	43
4.3 Pengaruh Variasi Penambahan Na ₂ SO ₄ Terhadap Kandungan Ni dan Fe Hasil Proses Reduksi	44
4.4 Pengaruh Penambahan Na ₂ SO ₄ Terhadap Mineralogi Produk Hasil Proses Reduksi	46
4.5 Pengaruh Penambahan Na ₂ SO ₄ dan Waktu Tahan Terhadap Morfologi Produk Hasil Proses Reduksi	50
4.6 Perbandingan Emisi CO ₂ Teoritik Proses Reduksi Bijih Nikel Lateritik Menggunakan Gas NH ₃ Dengan Kondisi Di Industri	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Profil Nikel Laterit.....	6
Gambar 2.2 Proses Peningkatan Kualitas Bijih Nikel.....	9
Gambar 2.3 <i>Flowsheet Blast Furnace</i>	10
Gambar 2.4 <i>Flowsheet RKEF</i>	11
Gambar 2.5 <i>Flowsheet HPAL</i>	12
Gambar 2.6 <i>Flowsheet AL</i>	13
Gambar 2. 7 Nilai Energi Gibbs dari Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , NiO , dan dekomposisi NH_3	17
Gambar 2.8 Nilai Entalpi dari Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , NiO , dan dekomposisi NH_3	18
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3.2 Timbangan Analitik	27
Gambar 3.3 Alat Tumbuk	27
Gambar 3.4 Spatula	27
Gambar 3.5 Kertas Timbang.....	28
Gambar 3.6 Ayakan	28
Gambar 3.7 <i>Oven</i>	28
Gambar 3.8 Alat Pembuat Briket.....	29
Gambar 3.9 <i>Crucible Boat</i>	29
Gambar 3.10 <i>Dessicator</i>	30
Gambar 3.11 <i>Tube Furnace</i>	30
Gambar 3. 12 <i>Gas Wash Bottle</i>	31
Gambar 3.13 Termokopel Tipe K	31
Gambar 3.14 Bijih Nikel Laterit.....	32
Gambar 3.15 Gas Amonia (NH_3).....	32
Gambar 3.16 Gas Nitrogen (N_2).....	32
Gambar 3.17 Larutan H_2SO_4	33
Gambar 3.18 Natrium Sulfat (Na_2SO_4)	33
Gambar 3.19 Setup eksperimen reduksi	34
Gambar 3.20 Alat Pengujian XRD	36
Gambar 3.21 Alat Pengujian XRD	36
Gambar 3.22 Prinsip Kerja Pengujian SEM-EDX	37
Gambar 3.23 Alat Uji SEM-EDX.....	37
Gambar 3.24 Alat Uji AAS.....	38
Gambar 4.1 Hasil Pengujian XRD Bijih Nikel Laterit Limonit.....	41
Gambar 4.2 Hasil Pengujian SEM-EDX Bijih Nikel Laterit.....	42
Gambar 4.3 Grafik derajat reduksi seiring dengan penambahan Na_2SO_4 pada Temperatur 900°C	43
Gambar 4.4 Hasil AAS Produk Reduksi Bijih Nikel Laterit.....	45
Gambar 4.5 Hasil XRD Produk Hasil Reduksi dengan Variasi Penambahan Na_2SO_4 pada Temperatur 900°C dan waktu selama 120 menit	46
Gambar 4.6 Hasil Pengamatan Produk melalui SEM EDX untuk (a) saat dipanaskan hanya dengan aliran N_2 dan (b) saat reduksi menggunakan NH_3 dengan 10 wt% Na_2SO_4 selama 2 Jam	51
Gambar 4.7 Distribusi Unsur dalam produk untuk (a) saat dipanaskan hanya dengan aliran N_2 dan (b) saat reduksi menggunakan NH_3 dengan 10 wt% Na_2SO_4 selama 2 Jam	52
Gambar 4. 8 <i>Block Diagram Mass Balance</i> Proses Reduksi Bijih Nikel Laterit	54

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Sebelumnya.....	19
Tabel 3.1 Kandungan Unsur Lainnya Pada Serbuk Na_2SO_4	33
Tabel 3.2 Rancangan Penelitian.....	38
Tabel 3.3 Jadwal Penelitian	39
Tabel 4.1 Hasil Pengujian ICP-OES Bijih Nikel Laterit Limonit	41
Tabel 4.2 Identifikasi Fasa pada Bijih Nikel Laterit.....	42
Tabel 4.3 Identifikasi Fasa pada Produk Hasil Proses Reduksi.....	46

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan sumber daya mineral yang melimpah, terutama dalam hal cadangan nikel. Berdasarkan laporan dari United States Geological Survey (USGS) dan Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Indonesia memiliki cadangan nikel terbesar di dunia, dengan estimasi mencapai 21 juta ton atau sekitar 22% dari total cadangan global pada tahun 2022. Cadangan ini tersebar di beberapa wilayah utama, seperti Sulawesi, Maluku, dan Papua. Selain sebagai pemilik cadangan terbesar, Indonesia juga merupakan produsen utama nikel global dengan produksi mencapai 1,6 juta ton pada tahun 2022, meningkat dari 1 juta ton pada tahun sebelumnya. Hal ini menjadikan nikel sebagai komoditas strategis yang tidak hanya berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi nasional, tetapi juga berperan dalam mendukung upaya global menuju masyarakat rendah karbon (*decarbonized society*) dengan menekan emisi gas rumah kaca. Untuk mengoptimalkan nilai tambah sumber daya ini, pemerintah Indonesia menerapkan kebijakan hilirisasi dengan melarang ekspor bijih nikel sejak tahun 2020. Kebijakan ini terbukti meningkatkan nilai ekspor produk hilir nikel, seperti feronikel dan nikel matte, masing-masing sebesar 92% dan 300% pada tahun 2022. Saat ini, terdapat 15 smelter nikel yang beroperasi di Indonesia.

Meskipun demikian, kegiatan pengolahan nikel menjadi feronikel ini menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2) dalam jumlah besar. Produksi feronikel dilaporkan menghasilkan emisi CO_2 sebesar 18 ton CO_2 -eq per ton produk, yang lebih tinggi dibandingkan dengan industri logam lainnya, seperti aluminium, seng, tembaga, dan timbal (Abdul et al., 2023). Proses pirometalurgi masih menjadi metode utama dalam produksi nikel di Indonesia. Metode ini memiliki konsumsi energi yang tinggi dan sangat bergantung pada bahan bakar fosil, terutama batu bara. Teknologi yang digunakan meliputi *Blast Furnace* (BF) dan *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF), yang berkontribusi terhadap tingginya emisi CO_2 . Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi dampak lingkungan dari proses ini, seperti penggunaan metode reduksi karbotermik pada suhu yang lebih rendah serta penambahan zat aditif seperti natrium sulfat (Na_2SO_4) (Rao et al., 2016).

Pengolahan bijih nikel laterit menjadi feronikel umumnya menggunakan metode reduksi berbasis karbon, yang menghasilkan emisi CO_2 tinggi dan memiliki selektivitas reduksi yang rendah terhadap nikel. Solusi dari permasalahan ini adalah penggunaan agen pereduksi terbarukan dan bebas karbon yang dapat mengurangi emisi CO_2 secara signifikan yakni salah satu solusi agen pereduksinya ialah Hidrogen (H_2). Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Lu et al., 2013) konsentrasi gas H_2 memiliki pengaruh signifikan terhadap kinetika reduksi oksida besi. Penelitian menunjukkan bahwa pada tekanan parsial H_2 yang rendah, laju reduksi fasa wustit berlangsung lebih lambat dibandingkan dengan magnetit. Namun, peningkatan tekanan parsial H_2 mempercepat reduksi oksida besi menjadi besi metalik.

Hidrogen memiliki keunggulan dalam proses reduksi dan menjadi agen reduktan terbarukan, tetapi penggunaannya menghadapi tantangan dalam aspek penyimpanan, khususnya terkait keselamatan, ketahanan, dan efisiensi biaya. Alternatif dari hidrogen (H_2) merupakan amonia (NH_3) sebagai agen pereduksi yang memiliki potensi yang menjanjikan dalam proses reduksi bijih besi. NH_3 tidak hanya berperan sebagai sumber hidrogen, tetapi juga berpotensi untuk membentuk nitrida besi yang dapat menghambat reoksidasi logam yang telah direduksi (Iwamoto et al., 2022). Salah satu penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan NH_3 sebagai reduktan dan Na_2SO_4 sebagai aditif selektif dapat meningkatkan efisiensi reduksi

nikel sekaligus mengurangi emisi karbon. NH_3 mengalami dekomposisi menjadi N_2 dan H_2 , di mana hidrogen bertindak sebagai agen reduksi utama dalam mengonversi hematit (Fe_2O_3) menjadi magnetit (Fe_3O_4) dan akhirnya besi metalik (Fe). Selain itu, Na_2SO_4 berperan dalam meningkatkan selektivitas reduksi nikel dengan menghambat pembentukan besi metalik melalui reaksi dengan FeO membentuk FeS . Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimal tercapai pada 900°C selama 4 jam dengan 15% Na_2SO_4 , menghasilkan pemulihan nikel hingga 98,7% setelah proses peleburan. Proses ini juga menghasilkan feronikel dengan kandungan 7,45% – 11,65% Ni dan 59,78% – 70,12% Fe, membuktikan efektivitas metode reduksi selektif menggunakan NH_3 dalam meningkatkan efisiensi ekstraksi nikel yang lebih ramah lingkungan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut mengenai optimalisasi penggunaan NH_3 sebagai reduktan dalam reduksi bijih nikel laterit menjadi penting untuk mendukung pengembangan teknologi pengolahan nikel yang lebih berkelanjutan (Abdul et al., 2024). Sayangnya, belum ada penelitian yang menggabungkan parameter seperti variasi penambahan aditif dan waktu tahan. Padahal pengaruh Na_2SO_4 terhadap keberhasilan proses reduksi akan berubah seiring dengan berubahnya waktu.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi penambahan aditif Na_2SO_4 serta waktu proses reduksi terhadap derajat reduksi, morfologi, dan mineralogi produk yang dihasilkan pada reduksi bijih nikel laterit menggunakan gas NH_3 . Selain itu, penelitian ini juga berfokus pada estimasi potensi pengurangan emisi CO_2 secara teoritis dalam proses reduksi bijih nikel laterit berbasis NH_3 . Pelaksanaan penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi pengolahan nikel yang berkelanjutan, sejalan dengan upaya menuju *decarbonized society*.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan Na_2SO_4 dan waktu tahan pada proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan NH_3 terhadap derajat reduksi yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh penambahan Na_2SO_4 dan waktu tahan pada proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan NH_3 terhadap kandungan Ni dan Fe dari produk yang dihasilkan?
3. Bagaimana pengaruh penambahan Na_2SO_4 dan waktu tahan pada proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan NH_3 terhadap mineralogi produk yang dihasilkan?
4. Bagaimana pengaruh penambahan Na_2SO_4 dan waktu tahan pada proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan NH_3 terhadap morfologi produk yang dihasilkan?
5. Bagaimana perbandingan emisi CO_2 teoritik dari proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan gas NH_3 dengan kondisi di industri saat ini?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Percobaan dilakukan dalam keadaan laju alir konstan untuk setiap variasi penambahan zat aditif dan waktu tahan.
2. Pengaruh lingkungan (temperature dan *humidity*) selama proses reduksi diabaikan.
3. Briket bijih nikel lateritik yang digunakan dianggap homogen.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh penambahan Na_2SO_4 dan waktu tahan pada proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan NH_3 terhadap derajat reduksi yang dihasilkan.

2. Menganalisis pengaruh penambahan Na_2SO_4 dan waktu tahan pada proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan NH_3 terhadap kandungan Ni dan Fe dari produk yang dihasilkan.
3. Menganalisis pengaruh penambahan Na_2SO_4 dan waktu tahan pada proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan NH_3 terhadap mineralogi produk yang dihasilkan.
4. Menganalisis pengaruh penambahan Na_2SO_4 dan waktu tahan pada proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan NH_3 terhadap morfologi produk yang dihasilkan.
5. Membandingkan emisi CO_2 teoritik dari proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan gas NH_3 dengan kondisi di industri saat ini.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya dalam optimasi proses reduksi bijih nikel lateritik. Data yang diperoleh adalah pengaruh penambahan Na_2SO_4 dan waktu tahan terhadap proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan NH_3 yang dapat menjadi dasar bagi inovasi penggunaan agen pereduksi alternatif yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan dalam skala komersial. Dengan demikian, hasil penelitian ini berpotensi mendukung implementasi teknologi reduksi pada skala industri yang sejalan dengan visi transisi menuju *decarbonized society*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Nikel dan Feronikel

Nikel merupakan logam yang membentuk deret transisi pertama golongan VIIIb dari tabel periodik bersama dengan kobalt dan besi yang berwarna putih keperakan (*silvery white*). Sebagai salah satu anggota dari deret logam transisi, nikel adalah logam yang memiliki ketahanan korosi yang tinggi (udara, air dan alkali), konduktivitas termal dan listrik yang baik, serta sifat mekanis yang unggul, menjadikannya bahan penting dalam berbagai aplikasi industri (Donald Barceloux & Barceloux, 1999). Dalam pengaplikasian industri, nikel digunakan dalam produksi baja tahan karat (65%), superalloy dan paduan non-ferrous (12%), elektroplating (8%), serta baterai isi ulang dan produk kimia lainnya (5%) (Nurjaman et al., 2021).

Secara umum, nikel diklasifikasikan menjadi tiga kelas utama melalui proses peleburan dan pemurniannya, yaitu *Refined Nickel* (Nikel Kelas 1) dan *Recharged Nickel* (Nikel Kelas 2), *Chemicals* (Nikel Kelas 3). Klasifikasi ini didasarkan pada kandungan nikel dalam produk akhir serta proses pengolahannya. Nikel Kelas I dicirikan oleh kandungan nikel yang sangat tinggi, mencapai 99% atau lebih, dengan contoh produk meliputi nikel elektrolitik, pelet, briket, butiran, rondel, dan serbuk/serpihan. Sebaliknya, Nikel Kelas II memiliki kadar nikel di bawah 99%, dan sering ditemukan dalam bentuk Ferro-nikel, sinter oksida nikel, utility nickel, serta Nickel Pig Iron. Selain itu, nikel juga hadir dalam berbagai senyawa kimia, seperti nikel oksida, nikel sulfat, nikel klorida, nikel karbonat, nikel asetat, dan nikel hidroksida (Pintowantoro & Abdul, 2019).

Bijih nikel secara umum ditemukan dalam dua jenis utama, yaitu sulfida dan laterit. Bijih laterit menyimpan sekitar 70% dari total cadangan nikel di dunia. Namun, kontribusinya terhadap produksi nikel global saat ini hanya sekitar 40%. Hal ini disebabkan oleh kompleksitas proses pengolahan bijih laterit yang lebih tinggi dibandingkan bijih sulfida yang membuatnya lebih mahal dibandingkan dengan pengolahan bijih sulfida (Norgate & Jahanshahi, 2011).

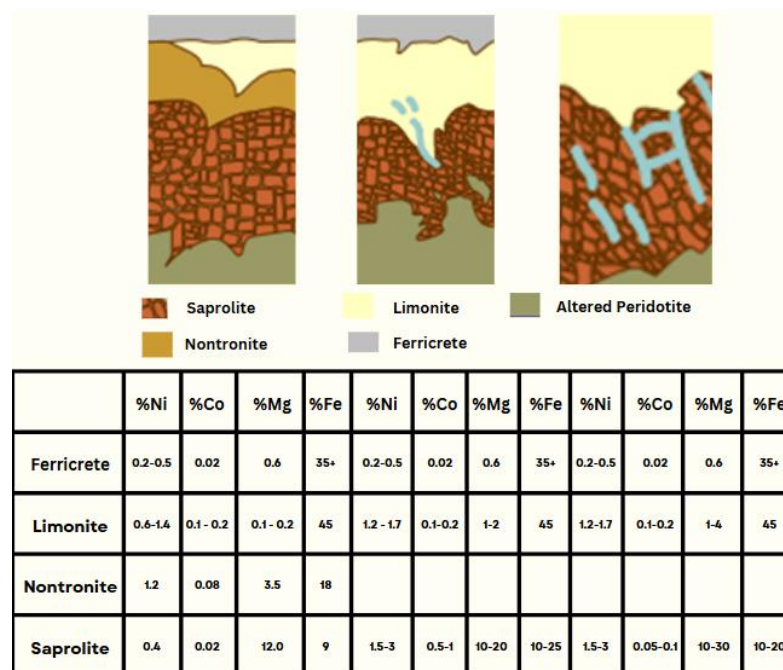
Ferronikel merupakan salah satu produk dari bijih laterit yang diproduksi melalui berbagai proses pirometalurgi. Ferronikel dikelompokkan menjadi dua kategori berdasarkan komposisi nikel dan besinya. *High Grade Ferronickel* memiliki konsentrasi nikel yang tinggi namun tingkat recovery besi yang rendah, yang merupakan hasil dari rendahnya potensial reduksi selama proses *smelting*. Sebaliknya, *Low Grade Ferronickel* dicirikan oleh kadar nikel yang lebih rendah dan kadar besi yang lebih tinggi, yang disebabkan oleh tingginya potensial reduksi pada proses pengolahannya (Solar et al., 2008). Dibandingkan dengan nikel elektrolitik, ferronikel menawarkan solusi yang lebih ekonomis untuk produksi baja tahan karat. Beberapa proses komersial yang digunakan termasuk peleburan tanur tinggi (BF), peleburan tanur putar-tungku listrik (RKEF), dan proses Krupp-Renn. Di antara metode-metode tersebut, RKEF banyak digunakan untuk memproduksi ferronikel dengan kadar nikel 20-40% dari bijih laterit (Li et al., 2015).

2.2 Bijih Nikel Laterit

Bijih nikel laterit umumnya ditemukan di wilayah tropis dan sub-tropis, yang terbentuk melalui pelapukan batuan ultramafik dengan kandungan kadar besi dan magnesium yang tinggi. Endapan bijih ini menunjukkan lapisan-lapisan yang berbeda sebagai akibat pengaruh cuaca. Lapisan pertama memiliki kandungan silika yang tinggi, lapisan kedua adalah limonit yang didominasi oleh mineral goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$) dan hematit (Fe_2O_3), sementara lapisan ketiga adalah saprolit yang kaya akan magnesium dan unsur-unsur basal. Di bawah lapisan saprolit,

terdapat batuan dasar yang mengalami perubahan dan yang tidak mengalami perubahan. Antara lapisan limonit dan saprolit terdapat lapisan transisi yang mengandung magnesium sekitar 10-20% dengan kadar besi, yang dikenal dengan nama serpentinit $[(Mg_3Si_2O_5(OH))]$. Dalam deposit laterit yang ideal, lapisan limonit tidak dapat dimanfaatkan secara optimal, sementara lapisan saprolit yang kaya magnesium memiliki keterbatasan dalam konsentrasi nikel yang dapat diekstraksi (Yildirim et al., 2020). Dengan meningkatnya permintaan nikel secara global, pemanfaatan bijih laterit yang kaya akan nikel menjadi semakin krusial, mengingat bijih tersebut menyumbang sekitar 70% dari total cadangan nikel dunia (Luo et al., 2015).

Bijih nikel laterit merupakan jenis bijih yang kompleks yang terbentuk ketika aktivitas tektonik mendorong pelapukan dasar laut. Selama jutaan tahun, pelapukan ini menghasilkan profil mineral yang bervariasi, mulai dari permukaan hingga batuan dasar. Profil bijih nikel laterit yang ditunjukkan pada **Gambar 2.1** terdiri dari tiga lapisan yang masing-masing mengandung nikel. Lapisan pertama adalah limonit yang berada di dekat permukaan, lapisan kedua adalah smektit yang juga terletak dekat permukaan, dan lapisan ketiga adalah saprolit yang terletak di bawah limonit dan smektit. Bijih laterit ini terdiri dari campuran oksida besi terhidrasi dan silikat magnesium hidrat. Endapan ini terbentuk akibat pelapukan batuan peridotit, yang sebagian besar terdiri dari olivin $[(Mg,Fe)_2SiO_4]$ dengan sedikit piroksen $[(Mg,Fe)_2Si_2O_6]$ (Crundwell et al., 1961).



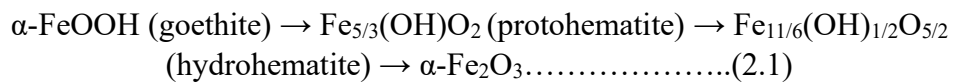
Gambar 2.1 Profil Nikel Laterit

Gambar ini digambar ulang berdasarkan (Dalvi et al., 2004)

2.2.1 Bijih Nikel Limonit

Bijih nikel limonit merupakan campuran mineral dengan kadar magnesium oksida (MgO) dan nikel yang rendah. Untuk memproses bijih nikel limonit, umumnya melalui metode hidrometalurgi, seperti *high-pressure acid leaching* (HPAL) dan *atmospheric leaching* (AL). Metode ini lebih sering diterapkan pada bijih nikel limonit yang memiliki kandungan besi tinggi, karena bijih tersebut sulit untuk diproses melalui pirometalurgi (Nurjaman et al., 2021).

Kandungan nikel (Ni) dalam bijih nikel limonit berkisar antara 1,1-1,8 wt% dan senyawa dominan $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Selain itu bijih limonit memiliki kandungan besi yang tinggi namun mengandung MgO dan SiO_2 yang lebih rendah dibandingkan dengan bijih saprolit dikarenakan mengalami pelapukan yang lebih sedikit (Nurjaman et al., 2021) (Pintowantoro & Abdul, 2019). Akhir-akhir ini pengolahan bijih laterit limonit telah mendapatkan lebih banyak perhatian dikarenakan kesulitan dalam menambang laterit saprolit dengan kadar nikel tinggi, serta meningkatnya permintaan terhadap kobalt (Ningjie Sun, 2021). Transformasi goetit menjadi hematit melalui proses dehidroksilasi terjadi akibat pemanasan dalam berbagai proses manufaktur. Dehidroksilasi goetit merupakan proses yang kompleks, sebagaimana ditunjukkan pada **persamaan 2.1** berikut ini (Pintowantoro & Abdul, 2019).



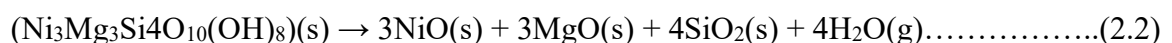
Tahap awal transformasi goetit menjadi hematit ditandai dengan pelepasan gugus OH, yang menyebabkan perubahan signifikan pada struktur kristal. Hematit yang terbentuk memiliki kisi kristal yang tidak sempurna akibat adanya cacat struktural, yang dipengaruhi oleh tegangan internal dan keterbatasan mikrostruktural. Pada suhu 800°C , terjadi rekristalisasi dan pertumbuhan butir, namun pengaruh ukuran butir mengalami penurunan akibat tingginya konsentrasi pengotor. Hal ini sebagian dicegah oleh difusi atom ke dalam kisi kristal hematit secara substitusional (Gialanella et al., 2010). Air yang terdapat dalam bijih nikel dapat diklasifikasikan menjadi air bebas, air kristal, dan gugus hidroksil. Adapun beberapa tahapan selama proses pemanasan. Tahap pertama, terjadi penghilangan air bebas yang berlangsung pada suhu $25 - 140^\circ\text{C}$. Tahap kedua terjadi penghilangan air kristal yang berlangsung pada $200 - 480^\circ\text{C}$, dan tahap ketiga terjadi pelepasan gugus hidroksil yang berlangsung pada suhu $500 - 800^\circ\text{C}$ (Rizov, 2012).

Bijih nikel laterit dengan kadar rendah masih belum dioptimalkan untuk diolah dalam proses pirometalurgi untuk menghasilkan feronikel atau nikel matte. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut guna mengembangkan metode yang dapat meningkatkan kadar nikel dalam bijih laterit menggunakan bijih laterit kadar rendah dengan proses pirometalurgi (Subagja et al., 2016).

2.2.2 Bijih Nikel Saprolit

Lapisan saprolit terletak di bawah lapisan limonit. Bijih saprolit memiliki kandungan besi yang rendah tetapi kaya akan MgO . Karena posisinya yang lebih dalam dari permukaan, bijih ini mengalami pelapukan atau perubahan kimia yang lebih sedikit dibandingkan limonit. Bijih saprolit umumnya dilebur menjadi feronikel, yang biasanya mengandung 30% Ni dan 70% Fe, untuk digunakan dalam produksi baja tahan karat serta paduan logam besi lainnya (Crundwell et al., 1961).

Bijih nikel saprolitik ditemukan dalam bentuk garnierite ($\text{Ni}_3\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$). Mineral ini akan mengalami dekomposisi ketika dipanaskan hingga mencapai suhu 700°C . Proses terurainya garnierite dapat diamati dalam **persamaan 2.2** (Pintowantoro & Abdul, 2019).



Selain garnierite, mineral yang terkandung dalam bijih laterit saprolitik meliputi goethite, serpentin, dan *quartz*. Ketika suhu meningkat hingga 400°C, fase bijih mengalami perubahan, di mana seluruh fase akan bertransformasi menjadi serpentin. Dalam pemanasan bijih laterit saprolitik, terjadi dua jenis proses dehidroksilasi. Proses dehidroksilasi pertama pada serpentin selesai ketika suhu melebihi 650°C, sedangkan proses dehidroksilasi kedua selesai pada suhu 750°C (Valix & Cheung, 2002).

Sebuah penelitian oleh J. Yang et al. (2013) menganalisis perlakuan termal bijih nikel garnieritik dan menunjukkan bahwa pada suhu rendah (400°C dan 500°C), tidak terjadi perubahan signifikan pada fase mineral. Namun, pada suhu 600°C, mineralnya didominasi oleh klorit dan sebagian dehidrasi. Saat suhu mencapai 700°C, beberapa serpentin terurai menjadi forsterit (Mg_2SiO_4). Di atas 800°C, klorit berubah menjadi forsterit dan enstatit (MgSiO_3), dan pada suhu 1000°C, mineral talc akan berubah menjadi forsterit dan enstatit. Setelah suhu 1000°C, fase mineral utama yang ada adalah forsterit, enstatit, hematit, dan *quartz*. Ketika suhu meningkat hingga 1300°C, bijih nikel saprolitik mengalami perubahan lebih lanjut menjadi mineral kompleks, yang didominasi oleh olivin (Li et al., 2015).

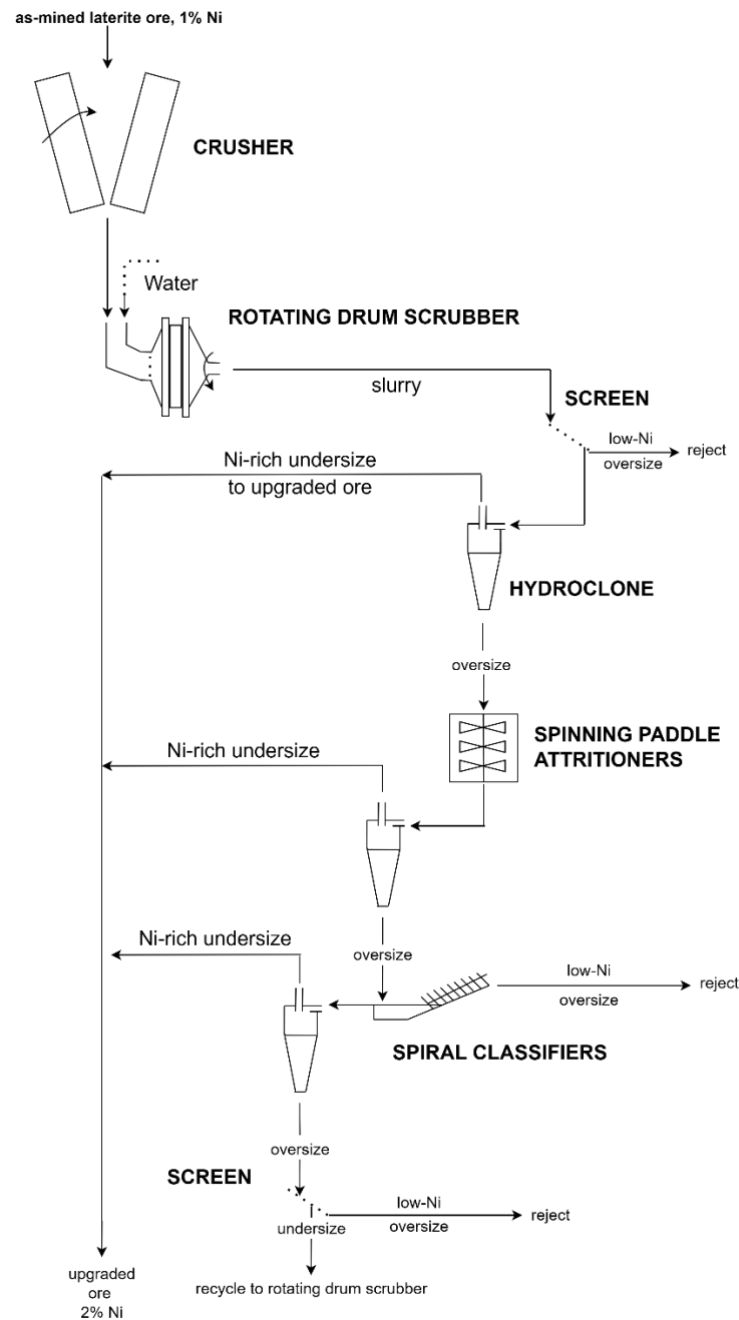
Proses reduksi bijih nikel saprolitik menghasilkan perolehan nikel yang lebih rendah jika dibandingkan dengan limonit, sehingga membutuhkan lebih banyak bahan tambahan dan suhu tinggi dalam proses reduksinya (Nurjaman et al., 2021). Oleh karena itu, bijih nikel saprolitik umumnya direduksi menggunakan metode pirometalurgi. Selain itu, kandungan magnesium silikat dalam bijih ini mempermudah proses reduksi dengan metode pirometalurgi.

2.3 Proses Pengolahan Bijih Nikel Laterit

Beberapa teknologi digunakan dalam pengolahan bijih nikel laterit, di antaranya adalah pirometalurgi, hidrometalurgi, proses karon, reduksi selektif, dan reduksi karbotermik. Pilihan teknologi yang diterapkan tergantung pada komposisi bijih yang ada. Bijih nikel saprolit umumnya diproses dengan pirometalurgi, sementara bijih nikel limonit lebih sering diproses menggunakan hidrometalurgi. Sebelum bijih nikel laterit diproses dengan metode-metode tersebut, kualitas bijih perlu ditingkatkan terlebih dahulu. Proses peningkatan kualitas bijih ini meliputi beberapa tahapan, di antaranya (Crundwell et al., 1961) :

- a. Menghancurkan atau menggiling bijih.
- b. Memisahkan partikel halus yang kaya nikel dari partikel yang lebih besar dan keras yang tidak mengandung nikel, menggunakan hidrosiklon dan pengklasifikasi spiral.

Tujuan dari peningkatan kualitas bijih ini adalah untuk mengurangi jumlah material yang perlu diangkut dan dilebur, yang pada gilirannya akan menurunkan biaya dan konsumsi energi. Proses ini juga bertujuan untuk menghilangkan mineral-mineral yang tidak diinginkan, seperti olivin ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$), yang mengandung magnesium tinggi dan dapat mengganggu proses pengolahan selanjutnya. Gambar 2.2 merupakan proses peningkatan kualitas bijih nikel laterit (Crundwell et al., 1961).



Gambar 2.2 Proses Peningkatan Kualitas Bijih Nikel
Gambar ini digambar ulang berdasarkan (Crundwell et al., 1961).

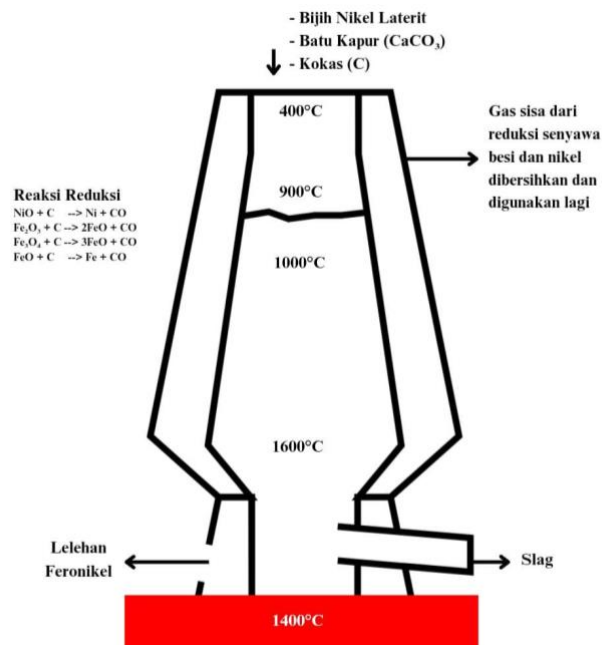
2.3.2 Pirometalurgi

Pirometalurgi merupakan salah satu metode ekstraksi logam yang dilakukan dengan memanfaatkan suhu tinggi untuk mengolah mineral ber kandungan logam tinggi. Proses ini banyak diterapkan dalam industri nikel, timah, besi, dan baja untuk menghasilkan logam yang dapat digunakan secara komersial. Dalam pelaksanaannya, pirometalurgi terdiri dari beberapa tahapan utama, termasuk pengeringan (penghilangan kandungan air dalam bijih), kalsinasi (penghilangan air kristal dalam bijih), peleburan, dan pemurnian (peningkatan kadar suatu logam) (Taruminkeng et al., 2016). Beberapa proses pengolahan bijih nikel laterit secara pirometalurgi saat ini antara lain:

1. Blast Furnace (BF)

Metode pengolahan bijih nikel laterit menggunakan blast furnace (BF) tidak umum diterapkan karena memiliki efisiensi yang lebih rendah dan menghasilkan lebih banyak polusi dibandingkan dengan proses RKEF. Namun, beberapa penelitian telah mengeksplorasi penggunaan BF dalam produksi nickel pig iron (NPI). Berikut tahapan dalam produksi NPI dengan BF dan Flowsheet ditunjukkan pada **Gambar 2.3**:

- Pengeringan dan Pemanasan Awal : Bijih nikel laterit dikeringkan terlebih dahulu dan dipanaskan untuk mengurangi kadar air serta menghilangkan komponen yang mudah menguap.
- Reduksi : Bijih kemudian dimasukkan ke dalam BF bersama dengan kokas sebagai agen pereduksi serta batu kapur (limestone) yang berfungsi menurunkan titik leleh slag. Hal ini diperlukan karena kandungan FeO dalam bijih relatif rendah, sedangkan kadar silika dan magnesia dalam slag cukup tinggi. Pada tahap ini, oksida nikel direduksi menjadi nikel logam, dan oksida besi mengalami reduksi menjadi besi logam.
- Peleburan (Smelting) : Bijih yang telah melalui proses reduksi dilebur di dalam BF, menghasilkan NPI, yaitu paduan kasar yang terdiri dari nikel dan besi.
- Pemurnian (Refining) : NPI mentah kemudian dimurnikan melalui berbagai teknik untuk menghilangkan pengotor serta menyesuaikan kandungan nikel agar sesuai dengan standar industri dan kebutuhan pasar (Setiawan, 2016).



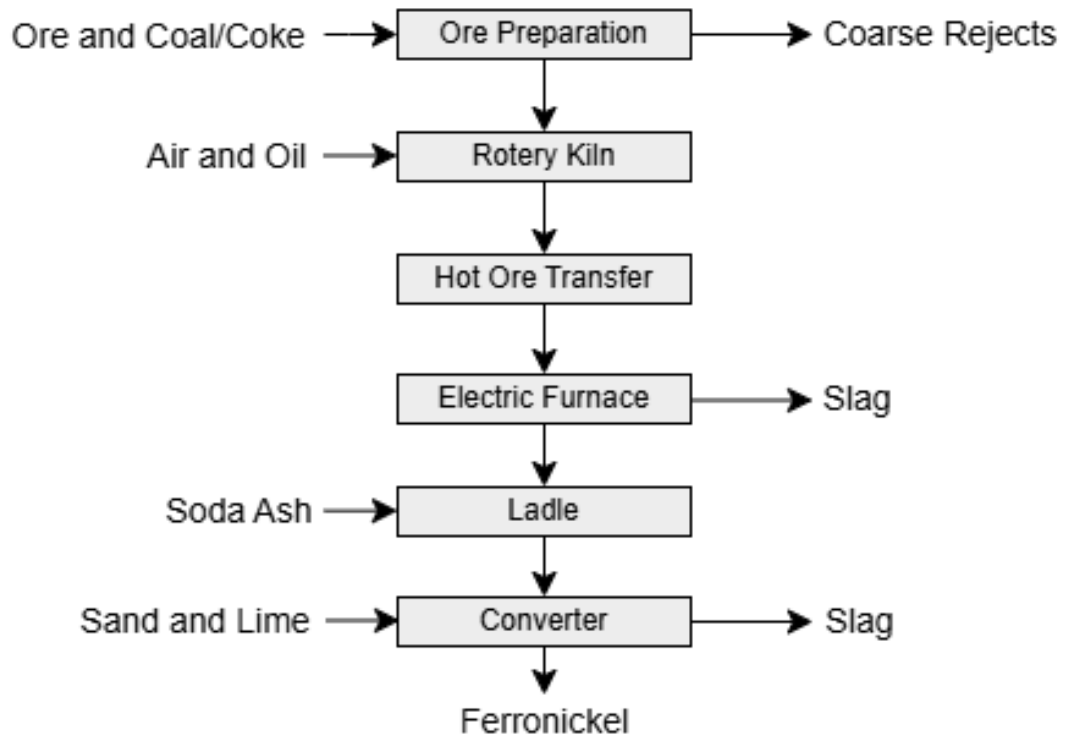
Gambar 2.3 Flowsheet Blast Furnace

Gambar ini digambar ulang berdasarkan (Taruminkeng et al., 2016).

2. Rotary Kiln Electric Furnace (RKEF)

Proses RKEF merupakan metode yang banyak digunakan untuk produksi feronikel dan nikel-matte. Tahapan awal dalam proses ini adalah pengurangan kadar air (*moisture*) hingga 45% melalui tahap pretreatment. Pada tahap ini, bijih laterit dikeringkan menggunakan *rotary dryer* pada suhu 250°C hingga kadar airnya berkurang menjadi sekitar 15-20%. Setelah proses

pengeringan, bijih kemudian memasuki tahap kalsinasi (pre-reduksi) di dalam *rotary kiln* dengan suhu 800-900°C. Selama proses dalam *rotary kiln*, terjadi beberapa reaksi, yaitu penguapan air, dekomposisi mineral pada suhu 700°C menjadi oksida-oksida serta uap air, serta reduksi nikel oksida dan besi oksida oleh gas reduktor pada sekitar 800°C. Hasil dari tahap kalsinasi kemudian dilebur dalam electric furnace pada suhu 1500-1600°C untuk menghasilkan feronikel. Dalam electric furnace, feronikel dipisahkan dari terak silika-magnesia, terjadi reduksi lebih lanjut dari nikel oksida dan besi oksida kalsin menjadi nikel logam, serta pelelehan dan pelarutan nikel dalam feronikel. Metode RKEF menjadi pilihan utama dalam industri pirometalurgi untuk pengolahan nikel karena memiliki tahapan yang relatif sederhana seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.4** dan dapat diterapkan pada berbagai jenis bijih nikel dari berbagai lokasi tambang (Setiawan, 2016).



Gambar 2.4 *Flowsheet* RKEF

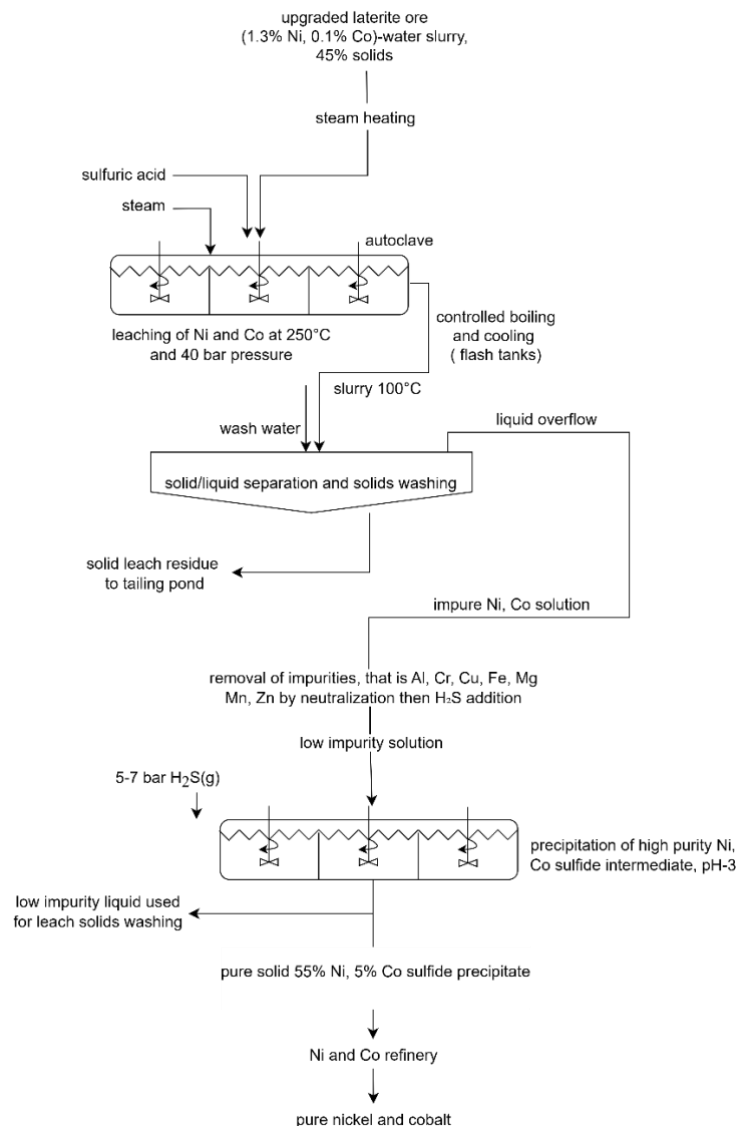
Gambar ini digambar ulang berdasarkan (Kyle, 2015).

2.3.3 Hidrometalurgi

Secara umum, hidrometalurgi merupakan metode ekstraksi logam dari bijih atau batuan yang melibatkan penggunaan larutan berair (*aqueous solution*). Dalam proses ekstraksi bijih nikel, tahap konsentrasi biasanya tidak dilakukan terlebih dahulu karena bijih nikel tidak mengandung NiO yang sepenuhnya dikarenakan sifatnya yang selalu berikatan dengan mineral lainnya. Salah satu tahap utama dalam hidrometalurgi adalah pelindian, yaitu proses pelarutan selektif logam berharga dari bijih atau konsentrat, sekaligus memisahkannya dari mineral pengotor menggunakan larutan berair. Dalam hidrometalurgi nikel dari bijih laterit, terdapat beberapa metode utama yang digunakan untuk proses pelindian, yaitu pelindian asam bertekanan tinggi (*High Pressure Acid Leaching*), pelindian asam atmosfer (*Atmospheric Leaching*) (Chandra Yoga, 2022).

1. *High Pressure Acid Leaching* (HPAL)

Proses dalam HPAL meliputi bijih yang direaksikan dalam autoklaf menggunakan asam sulfat pada suhu 240–270°C, yang melarutkan sebagian besar komponen bijih ke dalam larutan. Suhu tinggi dalam proses ini memastikan waktu reaksi yang cepat, yaitu sekitar 60–90 menit. Salah satu keunggulan utama dari proses *High Pressure Acid Leaching* (HPAL) adalah kemampuannya untuk mengendapkan besi dalam bentuk hematit dan/atau jarosit, yang berkontribusi pada pengurangan konsumsi asam serta memudahkan pemisahan besi dari larutan kaya nikel. HPAL sendiri memiliki keunggulan dibandingkan metode pelindian asam lainnya, seperti *atmospheric leaching*, dikarenakan prosesnya yang lebih mudah dan mampu meregenerasi asam dalam jumlah yang lebih banyak (Kyle, 2015). *Flowsheet* proses HPAL dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



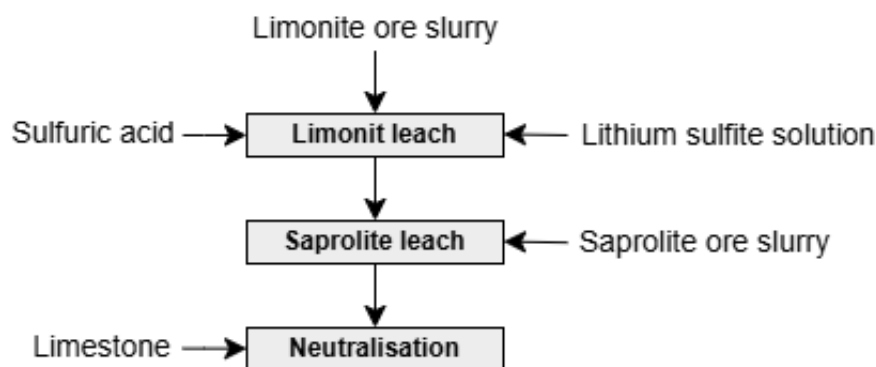
Gambar 2.5 *Flowsheet* HPAL

Gambar ini digambar ulang berdasarkan (Crundwell et al., 1961)

2. *Atmospheric Leaching (AL)*

Proses *Atmospheric Leaching* nikel dari bijih laterit limonit dianggap menjadi metode potensial dalam produksi nikel, meskipun efisiensi perolehan nikel yang lebih rendah serta laju pelindian yang lebih lambat dibandingkan dengan *High Pressure Acid Leaching* (HPAL). Penggunaan sulfur dioksida (SO₂) diketahui mampu meningkatkan efektivitas pelindian asam

sulfat pada bijih laterit, namun perannya dalam pelindian asam sulfat pada kondisi atmosferik masih belum sepenuhnya dipahami karena adanya potensi kehilangan dan emisi SO₂. Penggunaan *Atmospheric Leaching* terhadap nikel dan besi dari bijih laterit limonit dengan menggunakan asam sulfat yang dikombinasikan dengan natriul sulfat telah diteliti. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses ekstraksi nikel dan besi memiliki hubungan linear setelah goetit mulai terlarut, yang mengindikasikan adanya keterkaitan kuat antara kedua unsur dalam mineral tersebut. Temperatur memberikan pengaruh dalam proses ekstraksi secara signifikan, Suhu rendah memberikan keuntungan dalam meningkatkan selektivitas pelindian nikel terhadap besi, tetapi menghambat tingkat ekstraksi nikel secara keseluruhan. Sebaliknya, suhu tinggi mampu meningkatkan ekstraksi nikel secara signifikan, namun juga menyebabkan peningkatan ekstraksi besi (Luo et al., 2015). Proses dari *Atmospheric Leaching* dapat dilihat pada **Gambar 2.6** sebagai berikut.



Gambar 2.6 Flowsheet AL

Gambar ini digambar ulang berdasarkan (Fan & Gerson, 2013)

2.4 Ammonia (NH₃)

Ammonia, dengan kandungan hidrogen yang tinggi, telah menarik perhatian besar dalam beberapa tahun terakhir sebagai media potensial untuk transportasi hidrogen. Kepadatan penyimpanan ammonia dalam bentuk cair (NH₃) mencapai 17,6% massa atau 120 kg/m³, yang secara signifikan lebih besar dibandingkan dengan kebanyakan hidrida logam canggih. Selain itu, ammonia gas lebih mudah dicairkan dibandingkan hidrogen, dengan titik pencairan 240 K pada tekanan 101 kPa, sedangkan hidrogen memerlukan suhu 140 K untuk mencair pada tekanan yang sama. Keunggulan lain dari ammonia adalah teknologi produksinya yang berkembang pesat, dengan lebih dari 160 juta ton diproduksi setiap tahun (Iwamoto et al., 2022).

Ammonia telah digunakan sebagai alternatif agen pereduksi dalam produksi besi berbasis hidrogen, dengan potensi untuk langsung digunakan dalam reduksi oksida besi. Salah satu keunggulan ammonia adalah kemampuannya bereaksi dengan besi metalik, membentuk senyawa besi nitrida yang berfungsi sebagai penghalang terhadap reoksidasi besi yang telah direduksi. Khususnya, bijih goethite diketahui memiliki sifat katalitik yang mendukung proses dekomposisi ammonia. Penelitian mengenai pemanfaatan ammonia sebagai agen pereduksi dalam produksi besi telah dilakukan dengan menggunakan hematit sebagai bahan reduksi. Hasil studi tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi ammonia dalam gas reduksi berpengaruh terhadap efektivitas proses, sementara laju aliran hidrogen menjadi faktor utama yang membatasi tingkat reduksi besi (Yasuda et al., 2015).

2.5 Natrium Sulfat (Na₂SO₄)

Natrium sulfat merupakan senyawa anorganik berbentuk padatan kristal berwarna putih dengan rumus kimia Na₂SO₄. Senyawa ini memiliki kelarutan tinggi dalam air dan bersifat inert terhadap sebagian besar zat pengoksidasi maupun pereduksi. Berkat karakteristiknya yang unik dan serbaguna, natrium sulfat banyak dimanfaatkan dalam berbagai industri sebagai zat aditif.

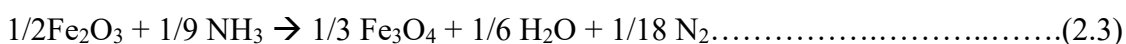
Dalam industri, natrium sulfat digunakan sebagai agen pengering pada proses produksi pewarna dengan cara menyerap molekul air. Selain itu, senyawa ini berperan sebagai buffering agent yang membantu menjaga kestabilan pH dalam berbagai proses industri. Pada produksi kaca dan kertas, natrium sulfat bertindak sebagai stabilisator yang meningkatkan kualitas serta daya tahan produk. Dalam industri pangan, natrium sulfat sering digunakan sebagai pengencer pewarna makanan, khususnya dalam pembuatan produk susu dan mentega.

Selain aplikasi industri umum, natrium sulfat juga memiliki peran krusial dalam proses reduksi bijih nikel laterit. Senyawa ini berkontribusi dalam meningkatkan efisiensi reduksi serta kualitas perolehan nikel (Lu et al., 2013). Efektivitas natrium sulfat sebagai aditif semakin meningkat seiring dengan bertambahnya suhu dan reaksi dekomposisinya. Mekanisme dekomposisi natrium sulfat berperan dalam aglomerasi partikel feronikel serta penggantian ion nikel dalam mineral silikat yang terkandung dalam bijih nikel laterit.

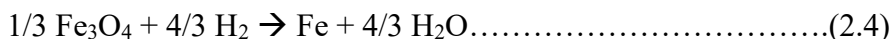
2.6 Reduksi Mineral menggunakan Gas Ammonia (NH₃)

Penggunaan amonia (NH₃) sebagai agen pereduksi memiliki potensi yang menjanjikan dalam proses reduksi bijih besi telah menarik perhatian sebagai alternatif ramah lingkungan terhadap reduktor berbasis karbon seperti kokas atau gas alam. NH₃ tidak hanya berperan sebagai sumber hidrogen, tetapi juga berpotensi untuk membentuk nitrida besi yang dapat menghambat reoksidasi logam yang telah direduksi (Iwamoto et al., 2022). Penelitian dalam Proses reduksi dan nitridasi hematit dengan ammonia menunjukkan pengaruh suhu dan konsentrasi ammonia terhadap produk (Yasuda et al., 2015). Berikut merupakan reaksi dari penelitian tersebut:

Dalam proses reduksi, hematit tereduksi menjadi magnetit oleh ammonia pada suhu 793K hingga 863K sesuai **persamaan 2.3** berikut:



Pada suhu 873K, α -Fe terbentuk dan memicu ammonia terdekomposisi. Kemudian Magnetit tereduksi menjadi besi oleh hidrogen yang dihasilkan dari dekomposisi ammonia sesuai **persamaan 2.4** berikut:

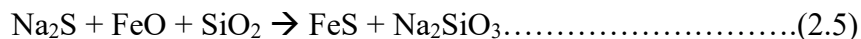


Seiring dengan bertambahnya konsentrasi ammonia dan penurunan suhu reaksi dengan meningkatnya potensial nitridasi.

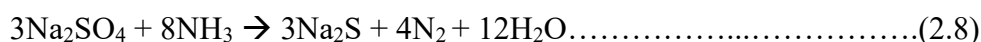
2.7 Reduksi Bijih Nikel Laterit dengan Zat Aditif Na₂SO₄

Na₂SO₄ merupakan salah satu aditif yang paling sering diteliti dan telah terbukti efektif dalam meningkatkan pemulihan nikel serta meningkatkan selektivitas reduksi (Suharno et al., 2021). Na₂SO₄ berperan dalam meningkatkan selektivitas reduksi nikel dengan mencegah reduksi atau metalisasi besi dari oksida besi dalam bijih nikel laterit. Proses ini berlangsung

melalui pembentukan senyawa sulfida yang disebut FeS (troilit). Pada tahap awal, Na₂SO₄ bereaksi dengan agen pereduksi membentuk Na₂S, yang selanjutnya berinteraksi dengan FeO untuk menghasilkan FeS sesuai dengan **persamaan 2.5, 2.6, 2.7** (Jiang et al., 2013).



Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Abdul et al., 2024) tingkat reaksi reduksi (RRE) meningkat dengan bertambahnya konsentrasi Na₂SO₄ dalam kisaran 0–15%. Namun, saat penambahan Na₂SO₄ melebihi 15% (yakni 20%), RRE mengalami penurunan hingga mencapai 71,9%. Nilai RRE tertinggi, yaitu $81,6 \pm 1,17\%$, diperoleh dengan penambahan 15% Na₂SO₄. Jika ditinjau lebih detail, RRE justru mengalami penurunan ketika Na₂SO₄ ditambahkan sebesar 5%. Hal ini dikarenakan jumlah 5% Na₂SO₄ belum cukup signifikan dalam mendukung proses reduksi. Na₂SO₄ bereaksi dengan NH₃, menghasilkan Na₂S sesuai dengan **persamaan 2.8**. Selain itu, terbentuknya Na₂O dapat bertindak sebagai pengotor yang menghalangi kontak langsung antara NH₃ dan bijih, sehingga sedikit menurunkan RRE pada penambahan 5% Na₂SO₄. Saat konsentrasi Na₂SO₄ meningkat menjadi 10%, terjadi sedikit kenaikan dalam tingkat reaksi reduksi (RRE), meskipun tidak terlalu signifikan, yaitu mencapai $63,6 \pm 3,52\%$. Sementara itu, penambahan 15% Na₂SO₄ menghasilkan RRE tertinggi dalam penelitian ini, sebesar $81,6 \pm 1,17\%$. Pada kadar ini, laju reaksi permukaan meningkat, terutama dalam proses reduksi oksida besi dan nikel dengan NH₃. Selain itu, terbentuknya larutan padat yang mengandung Fe dan S memberikan manfaat dalam memperlancar perpindahan massa serta proses difusi gas. Senyawa FeS kemungkinan terbentuk bersamaan dengan larutan padat Fe dan S. Selain reaksi antara Na₂S, FeO, dan SiO₂, reaksi yang tercantum dalam **persamaan 2.9, 2.10** juga berperan dalam pembentukan FeS. Lebih lanjut, ketika Na₂SO₄ ditambahkan sebanyak 15%, tampak bahwa *slag* mulai muncul dalam jumlah yang cukup besar. Hal ini mengindikasikan bahwa pengotor yang sebelumnya berada dalam fase padat telah berubah menjadi cair, yang pada akhirnya meningkatkan proses difusi gas NH₃ ke reaktan.



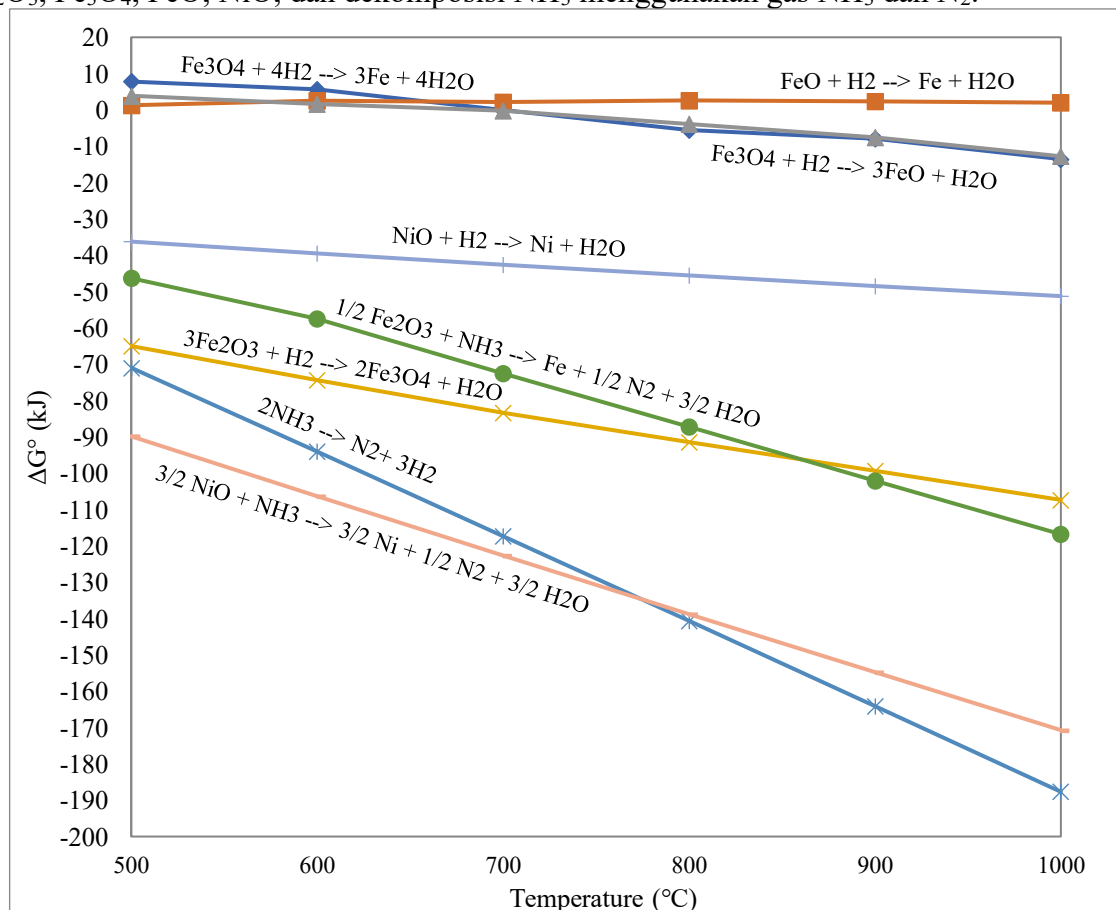
Namun, jika Na₂SO₄ ditambahkan secara berlebihan (hingga 20%), jumlah terak (*slag*) yang terbentuk menjadi terlalu banyak, sehingga menutupi reaktan seperti oksida besi dan nikel dalam bijih. Kondisi ini memperpanjang jalur difusi gas NH₃ menuju reaktan, meningkatkan jarak yang harus ditempuh gas sebelum bereaksi. Selain itu, keberadaan lapisan reaktan juga menghambat pelepasan produk reduksi dalam bentuk gas (N₂ dan H₂O), yang dapat menurunkan potensi reduksi lokal akibat berkurangnya konsentrasi NH₃ di sekitar permukaan reaktan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa penambahan Na₂SO₄ dalam jumlah berlebihan dapat mengganggu kinetika reaksi reduksi oksida besi dan nikel oleh NH₃. Untuk mengoptimalkan tingkat reaksi reduksi (RRE), diperlukan keseimbangan dalam jumlah Na₂SO₄

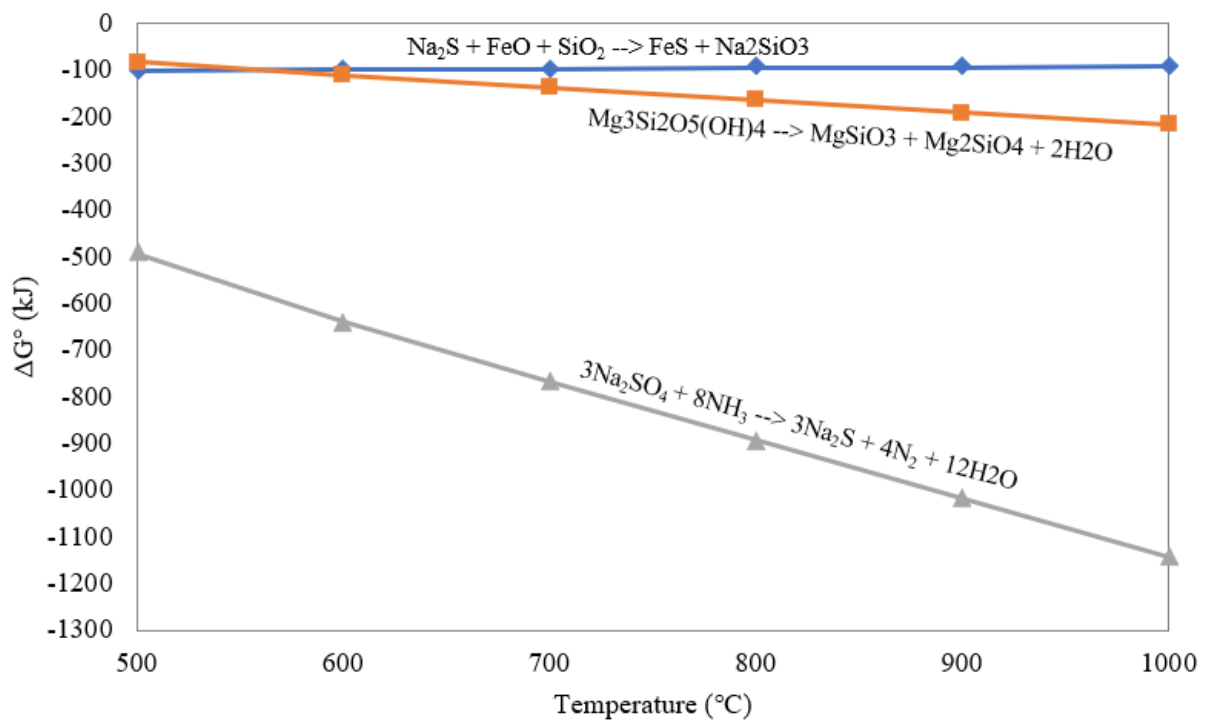
yang digunakan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Subagja et al., 2016) diketahui bahwa kadar nikel dan besi dalam konsentrat lebih tinggi dibandingkan dengan hasil reduksi. Selain itu, kadar nikel dalam konsentrat mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan kandungan Na_2SO_4 dalam pelet dari 5% hingga 20%. Konsentrasi nikel tertinggi dalam konsentrat diperoleh saat penambahan Na_2SO_4 mencapai 20%. Peningkatan kadar nikel ini disebabkan oleh terbentuknya senyawa FeS , yang mengakibatkan besi lebih banyak terbawa ke dalam tailing, sehingga kadar nikel dalam konsentrat meningkat. Selain itu, penambahan Na_2SO_4 juga berkontribusi pada peningkatan kinetika reduksi bijih nikel laterit, yang membuat proses pelepasan besi dan nikel dari mineralnya menjadi lebih optimal.

2.8 Termodinamika Reaksi

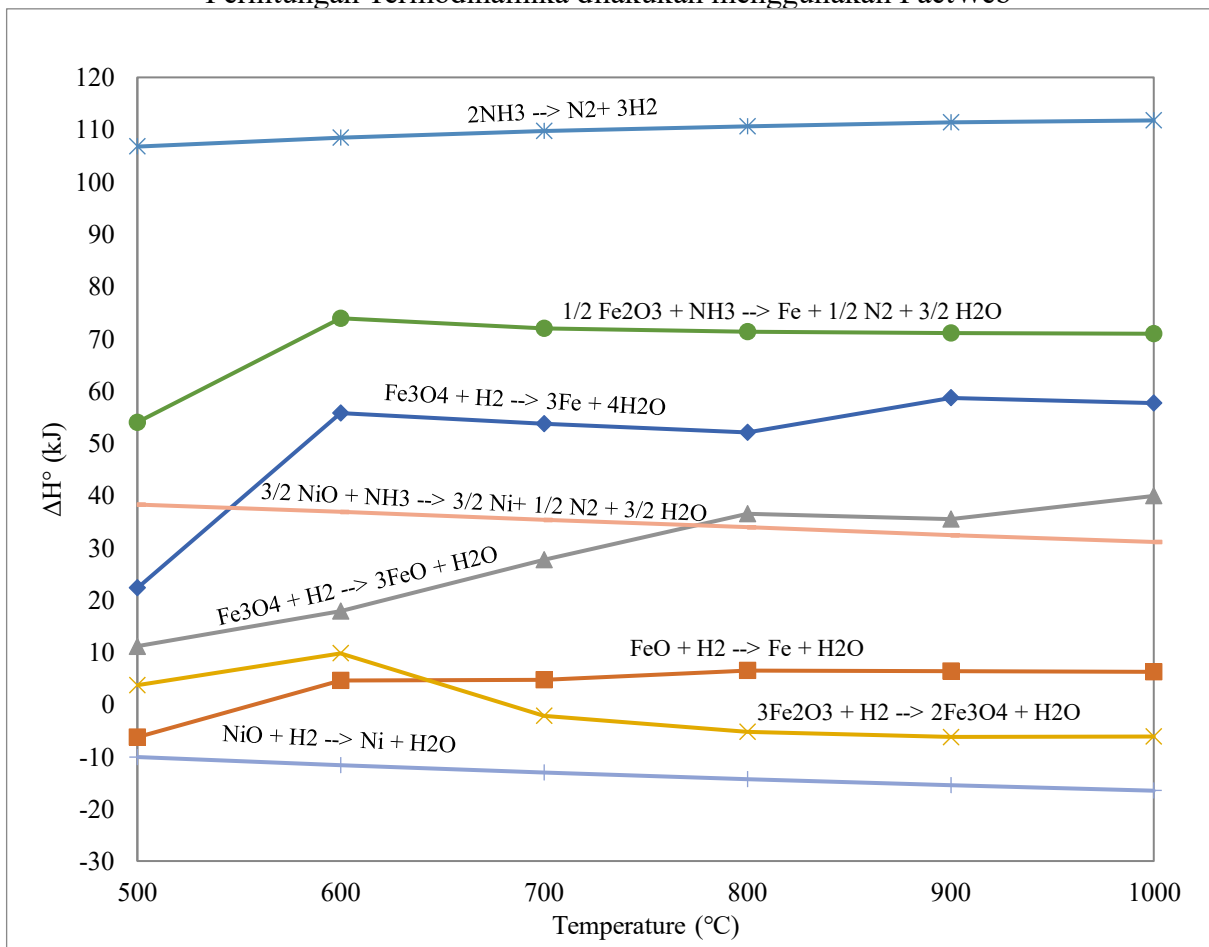
Termodinamika merupakan salah satu aspek penting dalam Pengolahan Mineral menjadi logam komersil (nikel). Terdapat variabel-variabel fisika yang perlu dikendalikan untuk mengoptimalkan proses pengolahan mineral. Variabel-variabel termodinamika dalam reaksi yang berlangsung dan berkaitan dapat terlihat pada termodinamika kesetimbangan dari suatu reaksi kimia (Potensial Gibbs) (Taruminkeng et al., 2016).

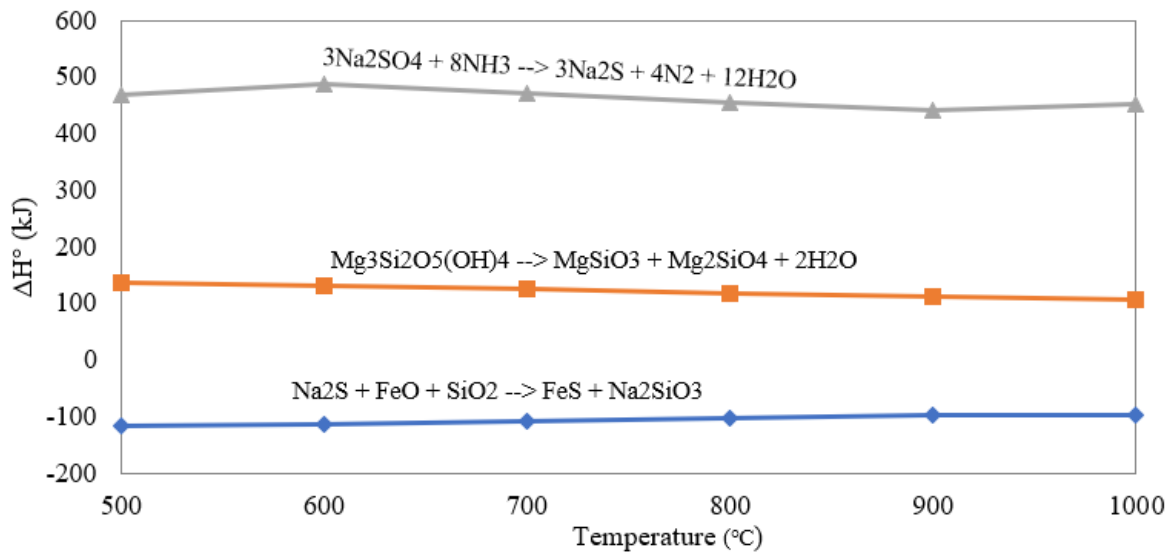
Terdapat senyawa besi oksida dan nikel oksida dalam bijih nikel laterit yang akan direduksi untuk memperoleh Fe dan Ni. Dalam proses reduksi, energi bebas gibbs dan entalpi perlu dilihat untuk mengetahui apakah reaksi reduksi oksida nikel dan oksida besi menggunakan NH_3 dapat berlangsung. Energi gibbs dan entalpi dapat dihitung menggunakan *FactSage Education 8.2*. **Gambar 2.7** menunjukkan nilai energy bebas gibbs dari Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , NiO , dan dekomposisi NH_3 menggunakan gas NH_3 dan N_2 . **Gambar 2.8** menunjukkan nilai entalpi dari Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , NiO , dan dekomposisi NH_3 menggunakan gas NH_3 dan N_2 .





Gambar 2. 7 Nilai Energi Gibbs dari Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , NiO , dan dekomposisi NH_3
Perhitungan Termodinamika dilakukan menggunakan FactWeb

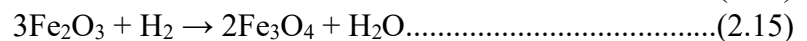
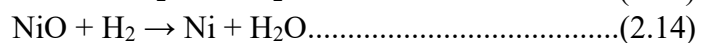
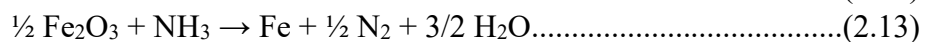
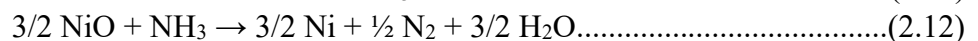




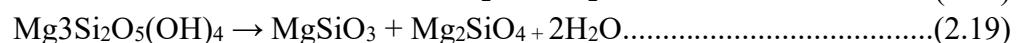
Gambar 2.8 Nilai Entalpi dari Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , NiO , dan dekomposisi NH_3
Perhitungan Termodinamika dilakukan menggunakan FactWeb

Suatu reaksi dapat dikatakan berlangsung ke arah produk jika nilai ΔG° negatif, sebaliknya reaksi dapat dikatakan tidak berlangsung atau akan berlangsung ke arah reaktan jika nilai ΔG° positif (Taruminkeng et al., 2016). Berdasarkan **Gambar 2.7**, reaksi reduksi Fe_2O_3 dan NiO menghasilkan nilai ΔG° negatif yang menandakan proses pada tahapan tersebut berlangsung spontan. Temperatur berpengaruh pada tahapan tersebut yakni semakin tinggi temperatur, nilai ΔG° akan semakin negatif yang mempengaruhi reaksi dapat berlangsung dengan spontan. Berdasarkan **Gambar 2.8**, reaksi reduksi Fe_2O_3 dan NiO menghasilkan nilai ΔG° positif yang menandakan reaksi yang terjadi adalah endotermik (menyerap kalor). Sebaliknya jika ΔG° bernilai negatif, maka reaksi yang akan terjadi adalah eksotermik (menghasilkan kalor).

Persamaan 2.11-2.17 merupakan reaksi yang mungkin terjadi ketika bijih nikel laterit direduksi menggunakan gas NH_3 dan H_2 :



Bijih nikel laterit yang mengandung beberapa mineral yang kompleks yang memiliki senyawa utama dengan kandungan Ni dan Fe, seperti senyawa goetit (FeOOH) dan lizardite ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Kedua senyawa tersebut akan terdekomposisi selama proses pemanasan, yakni reaksinya dinyatakan dalam **persamaan (2.18)** dan **(2.19)** (Abdul et al., 2024).



2.9 Penelitian Sebelumnya

Penelitian-penelitian terdahulu yang bersinggungan mengenai pengaruh penambahan aditif Na_2SO_4 dalam proses reduksi bijih nikel laterit dapat dilihat pada **Tabel 2.1** mencantumkan metode dan hasil penelitiannya sebagai acuan.

Tabel 2.1 Penelitian Sebelumnya

No.	Jenis Material	Metode	Hasil	Referensi
1	Bijih nikel laterit	Reduktan : NH_3 Variasi aditif : 0 – 20% Na_2SO_4 Temperatur : 900°C Waktu : 4 jam Laju Alir 0,4 L/menit	Peningkatan reduksi terjadi dengan penambahan Na_2SO_4 hingga 15%, dengan tingkat reduksi maksimum mencapai 81,6% pada suhu 900°C selama 4 jam dengan konsentrasi Na_2SO_4 sebesar 15%. Amonia (NH_3) terbukti sebagai reduktan yang efektif dalam meningkatkan selektivitas reduksi nikel dibandingkan besi. Penambahan Na_2SO_4 berperan dalam meningkatkan selektivitas reduksi dengan menghambat reduksi besi, namun penggunaan Na_2SO_4 melebihi 15% justru menurunkan efisiensi proses. Selain itu, NH_3 dapat digunakan sebagai reduktan bebas karbon, sehingga berpotensi mengurangi emisi CO_2 dalam proses reduksi.	(Abdul et al., 2024)
2	High & Low-CW Iron Ore	Reduktan : NH_3 Temperatur : 650, 700, dan 750°C Waktu : 5, 10, 20, dan 30 menit	Peningkatan suhu berkontribusi terhadap peningkatan laju reduksi. Pada suhu 650°C, reduksi besi masih berlangsung secara terbatas, namun proses nitridasi besi	(Iwamoto et al., 2022)

		Laju alir : 200mL/menit	lebih dominan. Ketika suhu mencapai 700°C, reduksi berlangsung secara optimal dengan terbentuknya besi metalik. Pada suhu 750°C, reduksi besi terjadi lebih cepat, tetapi senyawa nitrida hampir sepenuhnya terdekomposisi menjadi besi metalik. Selain itu, laju reduksi terus meningkat seiring bertambahnya waktu hingga mencapai 30 menit, di mana tingkat reduksi mencapai 96% dan hampir seluruh besi telah berubah menjadi besi metalik.	
3	Bijih nikel laterit	Reduktan : Batubara Temperatur : 1400 °C Waktu : 6 Jam Konsentrasi : Na ₂ SO ₄ : 20%	Na ₂ SO ₄ efektif meningkatkan selektivitas reduksi nikel dengan menekan pembentukan besi metalik melalui pembentukan FeS. Batu kapur menghasilkan kadar nikel tertinggi (21,68%), sedangkan dolomit memberikan pemulihan nikel tertinggi (93,73%), menunjukkan bahwa pemilihan fluks berpengaruh signifikan terhadap hasil reduksi. Suhu optimal 1400°C dan waktu reduksi 6 jam menghasilkan produk feronikel dengan segregasi yang baik.	(Widyarthana et al., 2020)
4	Bijih nikel laterit	Reduktan : Batubara Temperatur :	Reduksi bijih limonit tidak berlangsung secara optimal pada	(Yudianto et al., 2018)

		700, 800, 900, dan 1000 °C Waktu : 1 Jam Konsentrasi : Ni : 1,16%, Fe : 41,46%	suhu tinggi karena nikel cenderung berasosiasi dengan magnesium silikat, yang menghambat peningkatan kadar nikel. Temperatur 700°C terbukti sebagai kondisi terbaik untuk meningkatkan kandungan nikel serta mengoptimalkan reduksi besi menjadi magnetit. Selain itu, durasi pemanasan yang terlalu lama dalam <i>muffle furnace</i> menyebabkan reduktan terkonsumsi sebelum proses reduksi selesai, sekaligus memungkinkan terjadinya reoksidasi besi, sehingga menghambat peningkatan kadar nikel.	
5	Bijih nikel laterit	Reduktan : NH_3 Temperatur : 500 – 700 Waktu : 2 Jam Konsentrasi : 5%, 10%, 15%, 20%	Proses reduksi dan nitridasi hematit dapat berlangsung dengan menggunakan NH_3 sebagai agen pereduksi, di mana suhu optimalnya tercapai pada 700°C. Konsentrasi NH_3 yang paling efektif untuk reduksi adalah sebesar 20%. Pada suhu 700°C, besi metalik mengalami transformasi menjadi besi nitrida. Selain itu, potensial nitridasi cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi NH_3 serta	(Yasuda et al., 2015)

			menurunnya suhu reaksi.	
6	Bijih nikel laterit	Reduktan : Hidrogen (H_2) Temperatur : 600, 700, 750, dan 800 °C Waktu : 130-220 menit Konsentrasi : Na_2SO_4 : 5,10,15,20%	Natrium sulfat (Na_2SO_4) berperan sebagai katalis yang efektif dalam meningkatkan kinetika reduksi serta efisiensi pemisahan magnetik pada proses reduksi bijih nikel laterit. Suhu optimal untuk proses ini adalah 800°C, dengan waktu reduksi 220 menit, yang menghasilkan perolehan nikel tertinggi. Konsentrasi Na_2SO_4 sebesar 20% terbukti memberikan hasil terbaik dalam meningkatkan perolehan nikel tanpa menghambat reduksi besi. Selain itu, metode impregnasi larutan menghasilkan perolehan nikel yang lebih tinggi dibandingkan metode pencampuran fisik, menunjukkan bahwa distribusi Na_2SO_4 yang lebih merata dalam struktur bijih dapat meningkatkan efisiensi reduksi. Penggunaan hidrogen sebagai reduktan utama juga terbukti efektif, dengan tekanan parsial optimal sebesar 70%, yang berkontribusi pada peningkatan perolehan nikel dan besi. Secara keseluruhan, penelitian ini mengonfirmasi bahwa kombinasi	(Lu et al., 2013)

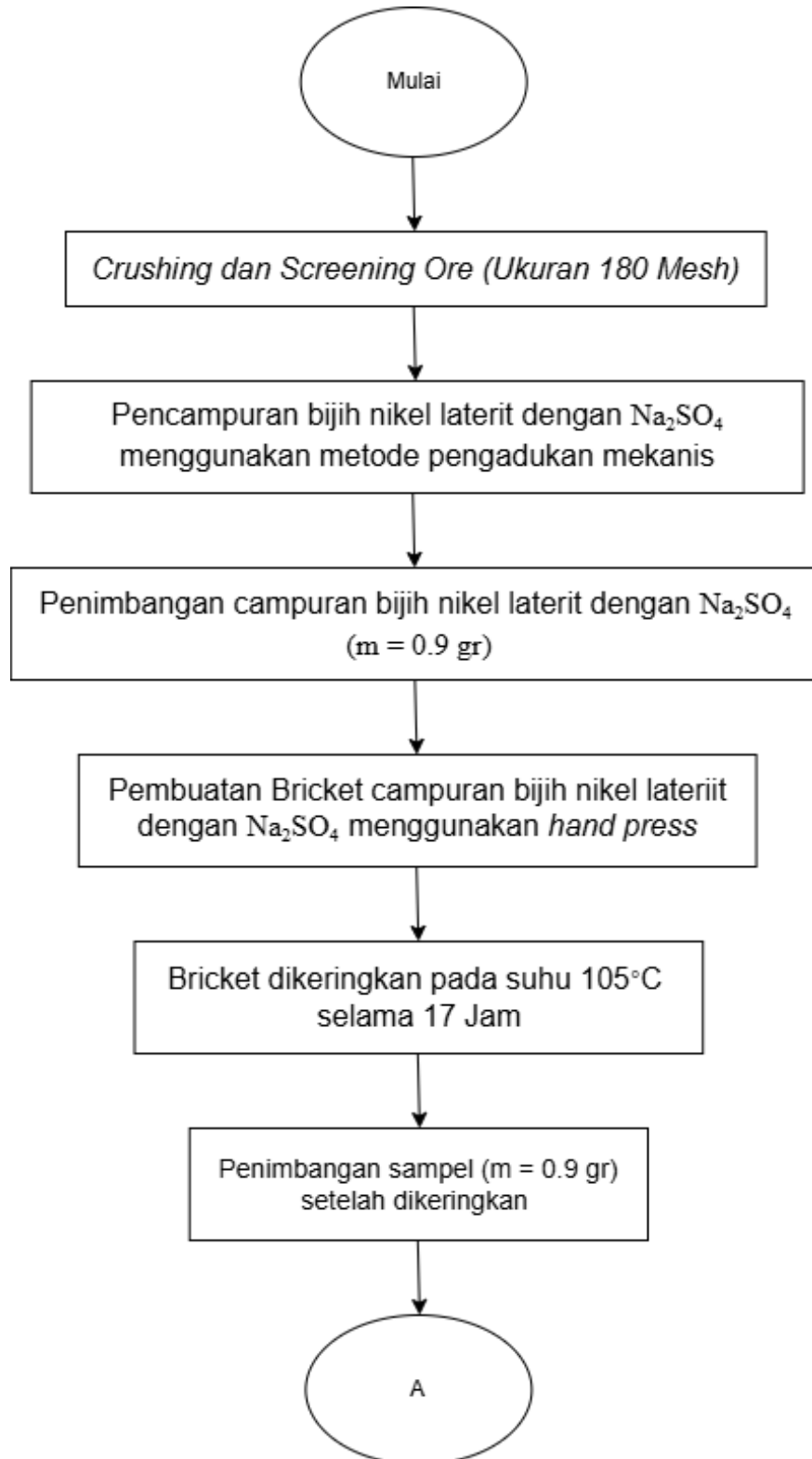
			Na_2SO_4 sebagai katalis, suhu 800°C , waktu 220 menit, dan tekanan parsial H_2 sebesar 70% merupakan parameter terbaik dalam meningkatkan efisiensi reduksi dan pemisahan nikel dari bijih laterit.	
--	--	--	---	--

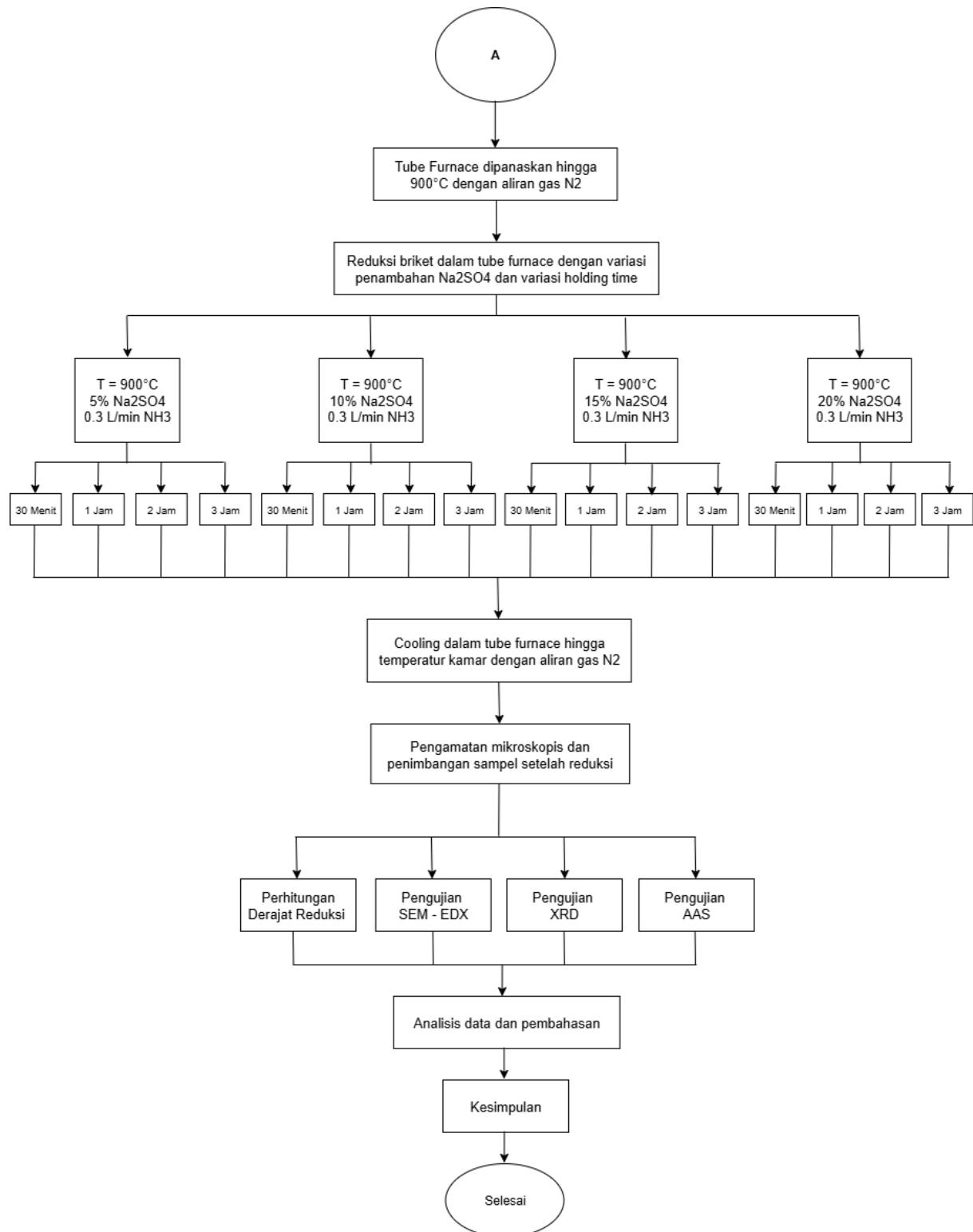
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Berikut merupakan diagram alir yang dapat dilihat pada **Gambar 3.1** dibawah ini :





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

3.2.1 Peralatan Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan beberapa alat sebagai berikut:

1. Timbangan Analitik

Timbangan analitik yang ditunjukkan pada **Gambar 3.2** untuk menimbang bahan yang akan digunakan pada penelitian.



Gambar 3.2 Timbangan Analitik

2. Alat Tumbuk

Alat tumbuk yang ditunjukkan pada **Gambar 3.3** sebagai penghancur bahan baku yang digunakan agar mendapatkan ukuran butir bahan baku yang sesuai yaitu 180 mesh dan juga penghancur produk smelting.



Gambar 3.3 Alat Tumbuk

3. Spatula

Spatula yang ditunjukkan pada **Gambar 3.4** untuk mengambil, memindahkan, atau menimbang bahan kimia dalam bentuk padat atau serbuk tanpa menyentuhnya langsung.



Gambar 3.4 Spatula

4. Kertas Timbang

Kertas timbang yang ditunjukkan pada **Gambar 3.5** sebagai wadah untuk menimbang bahan baku.



Gambar 3.5 Kertas Timbang

5. Ayakan (*Sieve*)

Ayakan yang ditunjukkan pada **Gambar 3.6** digunakan untuk menentukan ukuran butir bijih nikel laterit yang dijadikan bahan baku dalam penelitian. Dalam proses ini, digunakan ayakan dengan ukuran 180 mesh



Gambar 3.6 Ayakan

6. *Oven*

Oven yang ditunjukkan pada **Gambar 3.7** sebagai pengering bahan baku dan briket untuk menghilangkan *moisture content*.



Gambar 3.7 *Oven*

7. Alat Pembuat Briket

Alat pencetak briket yang ditunjukkan pada **Gambar 3.8** digunakan untuk membentuk campuran bahan menjadi briket dengan bahan baku utama bijih nikel laterit. Alat ini terbuat dari paduan aluminium. Briket yang dihasilkan memiliki massa 0,16 gram dan diameter 6 mm.



Gambar 3.8 Alat Pembuat Briket

8. *Crucible Boat*

Crucible boat yang ditunjukkan pada **Gambar 3.9** sebagai wadah briket nikel laterit yang dimasukkan ke dalam tube furnace. *Crucible boat* dengan bahan dasar campuran SiO_2 (63%) dan Al_2O_3 (31%). Dimensi dari crucible boat yang digunakan adalah sebagai berikut:

Panjang : 13,5 mm

Lebar : 80 mm

Tinggi : 10 mm



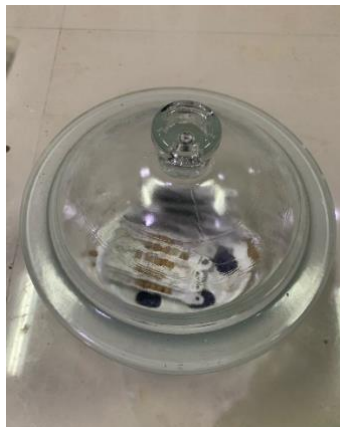
Gambar 3.9 *Crucible Boat*

9. *Dessicator*

Dessicator yang ditunjukkan pada **Gambar 3.10** sebagai wadah penyimpan briket dalam crucible boat yang telah dikeringkan sebelum di reduksi. *Dessicator* berfungsi untuk mengurangi kadar air pada briket sekaligus melakukan sterilisasi. Desikator yang digunakan memiliki dimensi sebagai berikut:

Diameter dalam (ID) : 18 cm

Tinggi (H) : 28 cm



Gambar 3.10 *Dessicator*

10. *Tube Furnace*

Tube furnace yang ditunjukkan pada **Gambar 3.11** berfungsi sebagai wadah untuk proses reduksi sekaligus sebagai jalur aliran fluida yang akan dipanaskan. Alat ini menghasilkan panas yang digunakan untuk memanaskan fluida di dalamnya, sehingga memungkinkan terjadinya reduksi pada briket bijih nikel laterit. Panas dihasilkan melalui kawat pemanas yang dililitkan pada tabung, kemudian dialiri listrik untuk meningkatkan suhu. *Tube* yang digunakan terbuat dari *high alumina ceramic*, yang mampu menahan suhu hingga 1600°C, dengan dimensi sebagai berikut.:

Diameter Luar (OD)	: 25 mm
Diameter Dalam (ID)	: 19,5 mm
Panjang	: 650 mm



Gambar 3.11 *Tube Furnace*

11. *Gas Wash Bottle*

Gas wash bottle yang ditunjukkan pada **Gambar 3.12** berfungsi sebagai wadah untuk larutan H_2SO_4 yang digunakan untuk menangkap sisa gas NH_3 dari proses reduksi. Botol yang digunakan memiliki volume 500 ml.



Gambar 3. 12 *Gas Wash Bottle*

12. Termokopel Tipe K

Termokopel tipe K yang ditunjukkan pada **Gambar 3.13** digunakan dalam penelitian ini untuk mengukur suhu di dalam tube furnace. Alat ini terbuat dari *stainless steel* dan memiliki rentang suhu operasi hingga $1000^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$. Dimensi termokopel yang digunakan adalah sebagai berikut:

<i>Probe diameter</i>	: 5 mm
<i>Probe length</i>	: 150 mm
<i>Threads diameter size</i>	: 8mm
<i>Cable length</i>	: 3 m



Gambar 3.13 Termokopel Tipe K

3.2.2 Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan beberapa bahan sebagai berikut:

1. Bijih Nikel Laterit

Bijih nikel laterit yang ditunjukkan pada **Gambar 3.14** yang digunakan dalam penelitian ini merupakan bijih nikel limonit yang berasal dari Sulawesi Tenggara. Bijih nikel ini akan dihancurkan terlebih dahulu lalu diayak hingga berukuran 180 mesh.



Gambar 3.14 Bijih Nikel Laterit

2. Gas Amonia (NH_3)

Gas amonia (NH_3) yang ditunjukkan pada **Gambar 3.15** berperan sebagai reduktor untuk mereduksi bijih nikel laterit. Tabung gas NH_3 yang digunakan memiliki kapasitas penyimpanan 50 kg dengan tekanan sebesar 15 bar.



Gambar 3.15 Gas Amonia (NH_3)

3. Gas Nitrogen (N_2)

Gas nitrogen yang ditunjukkan pada **Gambar 3.16** berfungsi sebagai gas inert yang digunakan untuk menciptakan atmosfer selama proses pemanasan dan pendinginan dalam furnace.



Gambar 3.16 Gas Nitrogen (N_2)

4. Larutan H_2SO_4

Larutan H_2SO_4 yang ditunjukkan pada **Gambar 3.17** digunakan untuk bereaksi dengan gas sisa dari proses reduksi. Larutan tersebut ditempatkan dalam gas wash bottle yang terhubung dengan selang keluaran gas, sehingga gas sisa reduksi langsung masuk ke dalamnya. Larutan H_2SO_4 yang digunakan merupakan campuran dari 130 ml H_2SO_4 pekat 98% dan 270 ml aquades.



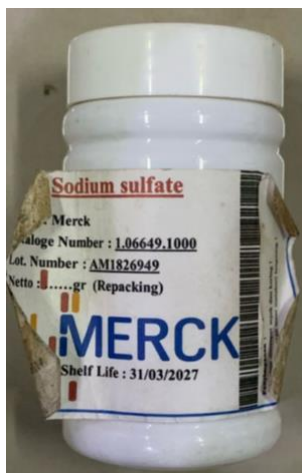
Gambar 3.17 Larutan H_2SO_4

5. Serbuk Natrium Sulfat (Na_2SO_4)

Serbuk natrium sulfat (Na_2SO_4) yang ditunjukkan pada **Gambar 3.18** merupakan *grade* pro-analis dengan merk MERCK. Hasil *assay* menunjukkan kemurnian dari Na_2SO_4 adalah sebesar 99% dengan kandungan unsur lain yang disebutkan pada tabel 3.1 di bawah ini :

Tabel 3.1 Kandungan Unsur Lainnya Pada Serbuk Na_2SO_4

Unsur	Cl	PO ₄	As	Ca	Fe	K	Mg
Satuan (%)	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,005$	$\leq 0,000$	$\leq 0,002$	$\leq 0,001$



Gambar 3.18 Natrium Sulfat (Na_2SO_4)

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur pada penelitian ini terdiri dari prosedur preparasi sampel hingga prosedur reduksi sampel.

3.3.1 Prosedur Preparasi Sampel

Berikut adalah prosedur dalam melakukan proses preparasi sampel:

1. Bijih nikel laterit terlebih dahulu dikeringkan dalam oven pada suhu $105^{\circ}C$ selama 17 jam.
2. Setelah proses pengeringan, bijih dihancurkan menggunakan alat penumbuk. Bijih yang telah ditumbuk kemudian diayak hingga mencapai ukuran 180 mesh.

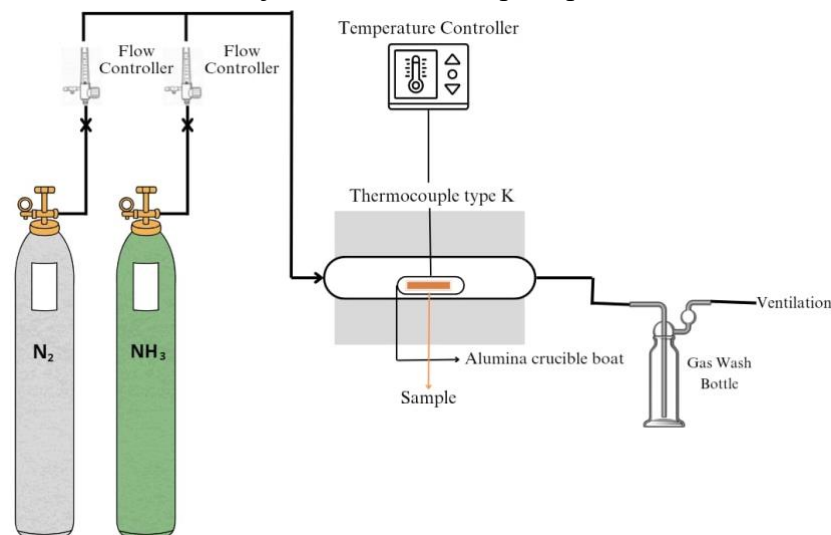
3. Bijih nikel laterit dicampurkan dengan Na_2SO_4 10% dengan metode pengadukan mekanis.
4. Campuran bijih nikel laterit dan Na_2SO_4 ini kemudian akan dibuat menjadi briket menggunakan *hand press*. Dalam satu kali reduksi dibutuhkan 5 buah briket dengan total massa 0,9 gram
5. Briket yang telah jadi dimasukkan ke dalam *crucible boat*. Briket yang telah jadi dimasukkan ke dalam *crucible boat*.
6. Briket di dalam *crucible boat* akan dikeringkan kembali menggunakan *oven* dengan temperatur 105°C selama 17 jam.
7. Briket yang telah dikeringkan kemudian ditimbang massanya.
8. Briket yang telah ditimbang dimasukkan dan disimpan di dalam *dessicator*.

3.3.2 Prosedur Reduksi Sampel

Berikut adalah prosedur dalam melakukan proses reduksi sampel:

1. Briket ditempatkan di dalam *tube furnace*.
2. *Tube furnace* dipanaskan hingga mencapai suhu target dalam suasana gas nitrogen.
3. Setelah suhu yang diinginkan tercapai, aliran gas nitrogen dihentikan, kemudian gas NH_3 dialirkan ke dalam furnace dengan laju 0,3 NL/menit, dan proses ditahan selama 0,5; 1; 2; 3 jam.
4. Setelah waktu penahanan tercapai, aliran gas NH_3 dihentikan, dan gas nitrogen kembali dialirkan.
5. Furnace didinginkan hingga mencapai suhu kamar dalam atmosfer gas nitrogen.
6. Setelah proses pendinginan selesai, sampel hasil reduksi dikeluarkan dari *tube furnace*.
7. Massa sampel hasil reduksi ditimbang untuk menghitung derajat reduksi.

Gambar 3.19 menunjukkan skema setup eksperimen reduksi



Gambar 3.19 Setup eksperimen reduksi

3.4 Pengujian

Terdapat lima pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini, yaitu Perhitungan derajat reduksi, *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX)*, *X-Ray Diffraction (XRD)*, *X-Ray Fluorescence (XRF)* dan *Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)*. Berikut adalah penjelasan mengenai prosedur keempat metode pengujian tersebut:

3.4.1 Perhitungan Derajat Reduksi

Derajat reduksi mengacu pada sejauh mana proses reduksi telah berlangsung. Dalam penelitian ini, derajat reduksi memiliki peran krusial karena menjadi indikator tingkat keberhasilan reduksi nikel dalam bijih. Optimalisasi derajat reduksi dapat dicapai dengan menyesuaikan parameter temperatur, waktu, dan rasio gas. Derajat reduksi bijih nikel laterit dapat ditentukan dengan menganalisis kandungan nikel yang terdapat pada produk hasil reduksi. Berikut adalah persamaan 3.1 yang digunakan untuk menentukan derajat reduksi:

$$\text{Derajat reduksi}(\%) = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ N}_2}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100 \dots \dots \dots (3.1)$$

$\Delta m = m_o - m'$

m_o = Massa awal sampel

m' = Massa akhir sampel

Δm Oksigen = Massa oksigen yang hilang saat di reduksi menggunakan gas N_2

Oksigen pada Na_2SO_4 = Dihitung dengan perbandingan berat molekul O terhadap Na_2SO_4 .

Nilai ini akan berbeda untuk setiap variasi massa Na_2SO_4 .

Oksigen pada bijih Fe dan Ni = Bijih Fe diasumsikan sebagai Fe_2O_3 dan bijih Ni diasumsikan sebagai NiO.

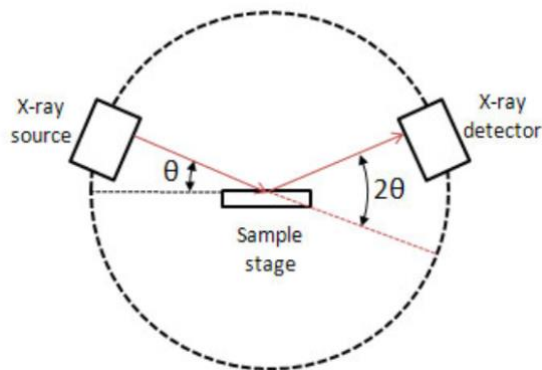
3.4.2 Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Uji XRD (Difraksi sinar-X) adalah metode analisis nondestruktif yang efektif untuk mengkarakterisasi bahan kristal, memberikan informasi tentang komposisi kimia dan struktur kristal bahan tersebut. Pengukuran XRD dilakukan dengan menggunakan anoda target Cu-K $\text{K}\alpha$ ($\lambda=1,54056 \text{ \AA}$) dengan sudut $10^\circ - 70^\circ$, ukuran langkah $0,0017^\circ$, tegangan 40 kV, dan arus 30 mA. Tahap karakterisasi ini diawali dengan analisis kualitatif terhadap pola-pola yang dihasilkan oleh XRD berdasarkan hukum Bragg. Pengujian ini menggunakan sudut $10^\circ - 60^\circ$.

Pendekatan analisis pertama dalam penelitian ini bersifat kuantitatif, yaitu dengan mengidentifikasi fasa yang terbentuk melalui pencocokan pola difraksi sinar-X (XRD) yang diperoleh dengan model referensi yang tersedia. Urutan intensitas sudut 2θ serta daftar bidang kristal (hkl) menunjukkan kesesuaian antara pola XRD hasil pengukuran dan model yang digunakan. Hal ini mengindikasikan bahwa sampel yang dianalisis telah mengalami kristalisasi sesuai dengan struktur dan fasa yang dimodelkan.

Sampel diletakkan pada titik fokus difraksi sinar-X, yaitu di pusat plate. Prosedur pengujian XRD yang ditunjukkan pada **Gambar 3.20** dan **Gambar 3.21** mencakup tahapan berikut:

1. Sampel diposisikan di bagian tengah tatakan (plate), yang berbentuk plat tipis dengan lubang di bagian tengahnya. Tatakan ini dilengkapi perekat di bagian belakang untuk memastikan sampel tetap stabil selama proses pemutaran. Jika sampel berbentuk serbuk, digunakan plate khusus yang dilapisi plastik.
2. Berkas sinar-X yang mengenai sampel akan mengalami difraksi dan diarahkan melalui celah menuju detektor. Selama proses ini, ketika sampel berputar sebesar 2θ , alat difraktometer juga bergerak sebesar θ .
3. Pola difraksi sinar-X dicatat dalam bentuk kurva sudut difraksi intensitas.



Gambar 3.20 Alat Pengujian XRD



Gambar 3.21 Alat Pengujian XRD

Alat X-Ray Diffraction (XRD) yang digunakan dalam penelitian ini adalah RIGAKU MiniFlex600, merupakan produk dari Rigaku Corporation, sebuah perusahaan instrumentasi ilmiah yang berbasis di Jepang. MiniFlex600 termasuk dalam kategori difraktometer benchtop dengan kemampuan analisis fasa kristalin, identifikasi material, dan perhitungan ukuran kristalit secara akurat.

3.4.3 Pengujian SEM-EDX

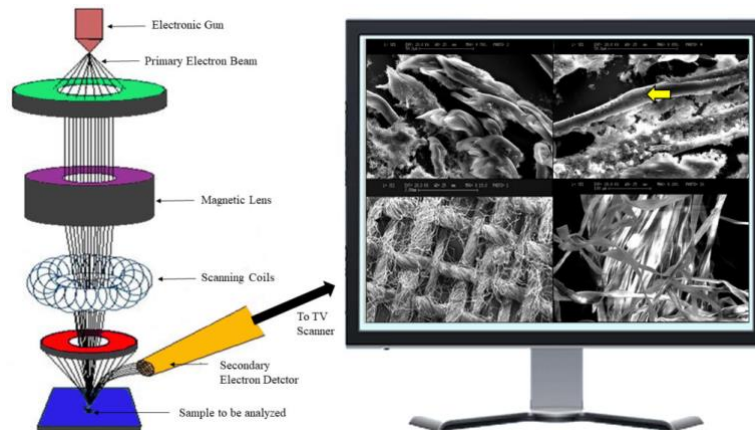
Pengujian SEM adalah instrumen yang menghasilkan berkas elektron pada permukaan sampel target dan mengumpulkan serta menampilkan sinyal yang dipancarkan oleh bahan target yang ditunjukkan pada **Gambar 3.22**. Pada dasarnya SEM terdiri dari kolom elektron, ruang sampel dan sistem vakum. Dalam hal analisis morfologi kopolimer penggunaan alat SEM berkembang luas.

Teknologi Scanning Electron Microscopy (SEM) berfungsi untuk melakukan inspeksi dan analisis karakteristik permukaan suatu material. Informasi yang diperoleh berasal dari lapisan terluar dengan kedalaman sekitar 20 μm . Gambar permukaan yang diperoleh merupakan topografi yang mencakup seluruh tonjolan, cekungan, dan lubang pada permukaan. Pola topografi ini diperoleh dengan mendeteksi elektron sekunder yang dipancarkan dari sampel saat terkena berkas elektron. Untuk memastikan analisis yang optimal, sampel yang digunakan dalam teknik ini harus memiliki permukaan dengan tingkat konduktivitas yang tinggi.

Berikut merupakan langkah-langkah persiapan sampel masuk ke alat uji SEM:

1. Sampel diletakan pada tempat sampel lalu dimasukkan ke spesimen *chamber*.
2. Sampel dianalisis menggunakan analisis area.
3. Berkas elektron yang dihasilkan dari daerah meriam diradiasi hingga mengenai sampel.
4. Berkas elektron kemudian dipusatkan pada arus menggunakan kolom optik elektron sebelum berkas elektron terbentuk atau mengenai sampel.
5. Ketika sinar mengenai sampel, timbul interaksi-interaksi di dalam sampel yang diradiasi.
6. Berikutnya akan dideteksi dan diubah ke dalam sebuah gambar oleh analisis SEM.

Pengujian Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) digunakan untuk mengidentifikasi jenis serta kuantitas unsur yang menyusun sampel. Perangkat utama dalam sistem SEM terdiri dari tiga pasang lensa elektromagnetik yang berperan dalam memfokuskan berkas elektron ke titik yang sangat kecil. Selain itu, dua pasang kumparan pemindai digunakan untuk memindai permukaan sampel dengan frekuensi tinggi. Resolusi lateral yang dihasilkan akan semakin tinggi seiring dengan semakin kecilnya ukuran berkas elektron yang difokuskan kristal. **Gambar 3.22** menunjukkan prinsip kerja dari pengujian SEM-EDX yakni sebagai berikut :



Gambar 3.22 Prinsip Kerja Pengujian SEM-EDX



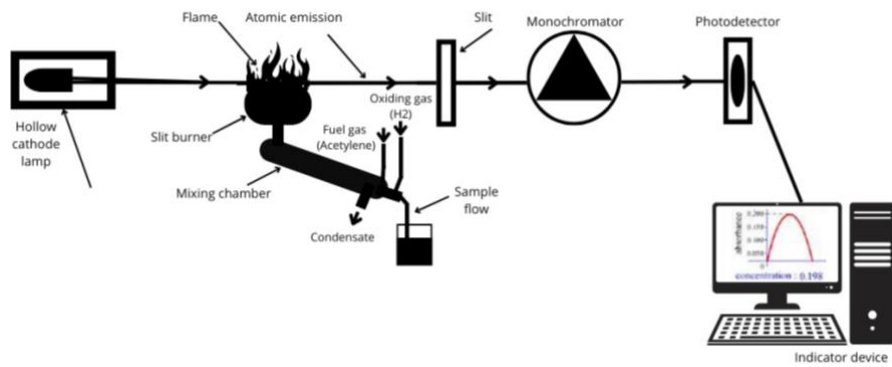
Gambar 3.23 Alat Uji SEM-EDX

Gambar 2.3 menunjukkan alat Scanning Electron Microscope (SEM) yang digunakan dalam penelitian ini yakni seri *Inspect 550* yang dilengkapi dengan sistem Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) buatan *FEI Company*, sebuah perusahaan asal Amerika Serikat. Alat ini termasuk dalam seri *Inspect* yang dirancang untuk keperluan karakterisasi material

dengan resolusi tinggi dan analisis unsur secara kuantitatif melalui detektor EDX berbasis Silicon Drift Detector (SDD).

3.4.4 Pengujian *Atomic Absoprtion Spectrophotometer* (AAS)

Prinsip kerja Spektrofotometer Serapan Atom (AAS) didasarkan pada penyerapan cahaya oleh atom bebas dalam nyala. Prosesnya dimulai dengan sampel cair yang dihisap ke dalam nebulizer, diubah menjadi aerosol, lalu dipisahkan berdasarkan ukuran partikel. Partikel halus dicampur dengan gas pengoksidasi dan bahan bakar sebelum diarahkan ke nyala untuk diubah menjadi atom gas. Atom-atom tersebut kemudian disinari dengan panjang gelombang tertentu dari lampu katoda berongga, di mana sebagian cahaya diserap dan menyebabkan eksitasi elektron. Setelah kembali ke kondisi dasar, energi dilepaskan. Cahaya yang tersisa melewati monokromator untuk menyaring panjang gelombang yang tidak sesuai, lalu diterima oleh detektor. Sinyal optik ini dikonversi menjadi sinyal listrik dan dibaca oleh komputer sebagai nilai absorbansi, yang menunjukkan konsentrasi unsur dalam sampel. **Gambar 3.24** menunjukkan prinsip kerja dari pengujian AAS yakni sebagai berikut :



Gambar 3.24 Alat Uji AAS

Alat Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) yang digunakan dalam penelitian ini adalah Thermo Scientific iCE 3000 Series AA, yang diproduksi oleh Thermo Fisher Scientific, sebuah perusahaan di Amerika Serikat. Seri iCE 3000 dirancang untuk analisis elemen secara kuantitatif dalam berbagai jenis sampel dengan sensitivitas tinggi dan presisi yang andal, serta dilengkapi dengan teknologi otomatisasi untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam pengukuran kadar logam.

3.5 Rancangan Penelitian

Berikut merupakan rancangan penelitian yang ditunjukkan pada **Tabel 3.2** :

Tabel 3. 2 Rancangan Penelitian

Nama Sampel	T (°C)	Holding Time (Jam)	Na ₂ SO ₄ (wt%)	Derajat Reduksi	Pengujian		
					XRD	SEM-EDX	AAS
NL 0	900	2	0	√	√	√	√
NL 5	900	0,5	5	√			
	900	1		√			
	900	2		√	√	√	√
	900	3		√			
	900						

NL 10	900	0,5	10	√			
	900	1		√			
	900	2		√	√	√	√
	900	3		√			
NL 15	900	0,5	15	√			
	900	1		√			
	900	2		√	√	√	
	900	3		√			
NL 20	900	0,5	20	√			
	900	1		√			
	900	2		√	√	√	
	900	3		√			

3.6 Jadwal Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam jangka waktu 6 bulan yang dirincikan pada Tabel 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3.3 Jadwal Penelitian

Kegiatan	Bulan																							
	Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur																								
Bimbingan																								
Pembuatan Alat																								
Persiapan Alat dan Bahan																								
Proses Reduksi Sampel																								
Perhitungan Derajat Reduksi																								
Pengujian XRD, SEM-EDX, AAS																								
Perhitungan Emisi CO ₂ Teoritik																								
Penyusunan Laporan Akhir																								

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

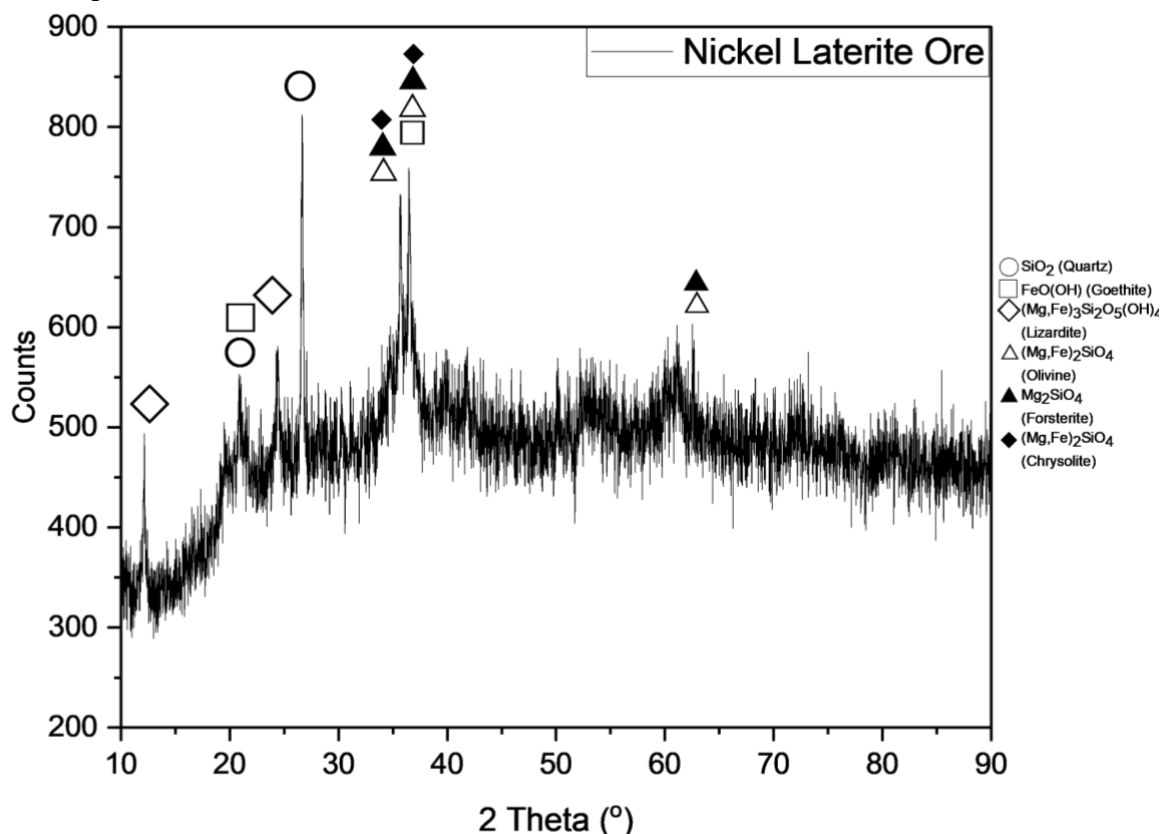
4.1 Karakteristik Bijih Nikel Laterit

Bijih nikel laterit yang digunakan dalam penelitian ini merupakan jenis limonit dan berasal dari wilayah Sulawesi Tenggara. pengujian ICP-OES dilakukan untuk menentukan komposisi atau kadar yang terkandung dalam bijih nikel laterit. Sebelum dilakukan analisis, sampel harus melalui tahap preparasi. Prosedur preparasi diawali dengan proses *crushing* untuk memperkecil ukuran partikel, kemudian diayak hingga lolos ukuran 180 mesh. Selanjutnya, sebanyak 50 mg sampel dilarutkan dalam campuran larutan yang terdiri dari 2,5 mL HCl 40%, 6 mL HNO₃ 70%, dan 5 mL HF 50%. Hasil pengujian ICP-OES yang menunjukkan kandungan dalam bijih nikel lateritik dapat dilihat pada **Tabel 4.1**

Tabel 4.1 Hasil Pengujian ICP-OES Bijih Nikel Laterit Limonit

Unsur	Ni	Fe	Si	Mg
% Massa	1,31	34,32	14,83	4,88

Selain itu, Karakterisasi fasa mineral dalam bijih nikel laterit dilakukan melalui analisis pengujian XRD (X-Ray Diffraction). Pengujian ini dilakukan menggunakan perangkat XRD PAN *Analytical*, dengan rentang sudut 2 θ dari 10° hingga 90°, serta memanfaatkan sinar-X dengan panjang gelombang CuK α sebesar 1,64060 Å. Hasil pengujian XRD dari bijih nikel laterit dapat dilihat pada **gambar 4.1** dan fasa yang teridentifikasi dalam bijih nikel laterit yang dapat dilihat pada **tabel 4.2**.



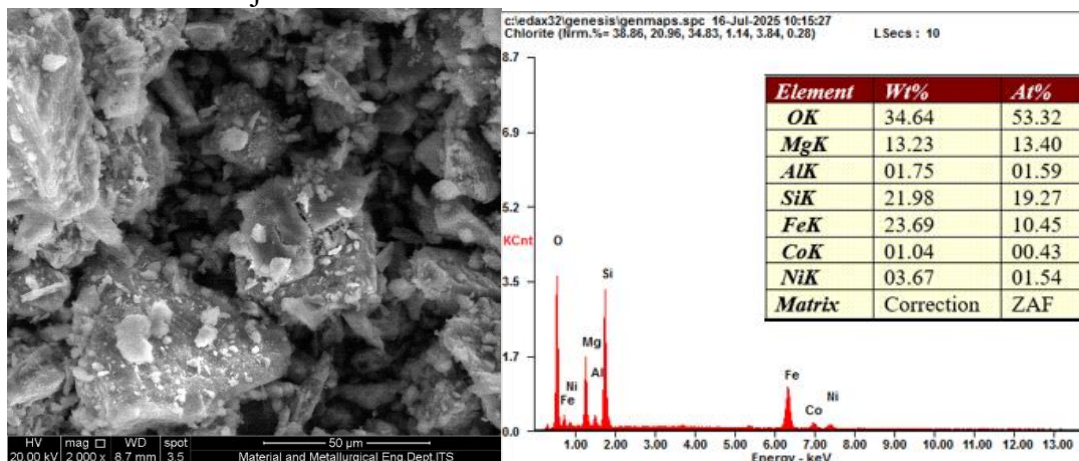
Gambar 4.1 Hasil Pengujian XRD Bijih Nikel Laterit Limonit
Analisis Hasil Pengujian dilakukan menggunakan HighScore

Tabel 4.2 Identifikasi Fasa pada Bijih Nikel Laterit

No	Fasa	Rumus Kimia	PDF Number	2 Theta (°)
1	Lizardite	$((\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$	00-050-1606	12,101
				24,346
2	Quartz	SiO_2	03-065-0466	20,856
				26,636
3	Goethite	$\text{FeO}(\text{OH})$	01-081-0462	21,189
				36,622
4	Olivine	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	01-075-1556	35,715
				36,524
				62,764
5	Forsterite	Mg_2SiO_4	01-071-1081	35,624
				36,441
				62,57
6	Chrysolite	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	00-007-0156	35,671
				36,481

Analisis hasil uji XRD dilakukan menggunakan aplikasi HighScore yang mengidentifikasi bahwa *peak* pada bijih nikel laterit menunjukkan fasa dominan berupa *quartz* (SiO_2). Selain itu, terdapat beberapa fasa lainnya seperti *goethite* (FeOOH), *lizardite* ($((\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$), *olivine* ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$), *forsterite* (Mg_2SiO_4), dan *chrysolite* ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$). Fasa *goethite* dan *lizardite* merupakan mineral utama yang terdeteksi dalam bijih nikel laterit jenis limonit. *Goethite* merupakan fasa dominan yang mengandung nikel dalam bentuk *solid solution* dengan besi oksida (Fe_2O_3) di dalam struktur kristalnya (Lu et al., 2013). Sementara itu, lizardit adalah mineral magnesium silikat hidrat yang termasuk dalam kelompok serpentin dan memiliki kandungan nikel (Setiawan, 2016). Mineral-mineral dalam bijih nikel laterit nantinya akan direduksi untuk memperoleh logam nikel (Ni) dan besi (Fe).

Karakterisasi bijih nikel laterit tipe limonit dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) guna mengamati morfologi permukaan, dan komposisi unsur dalam bijih nikel laterit.



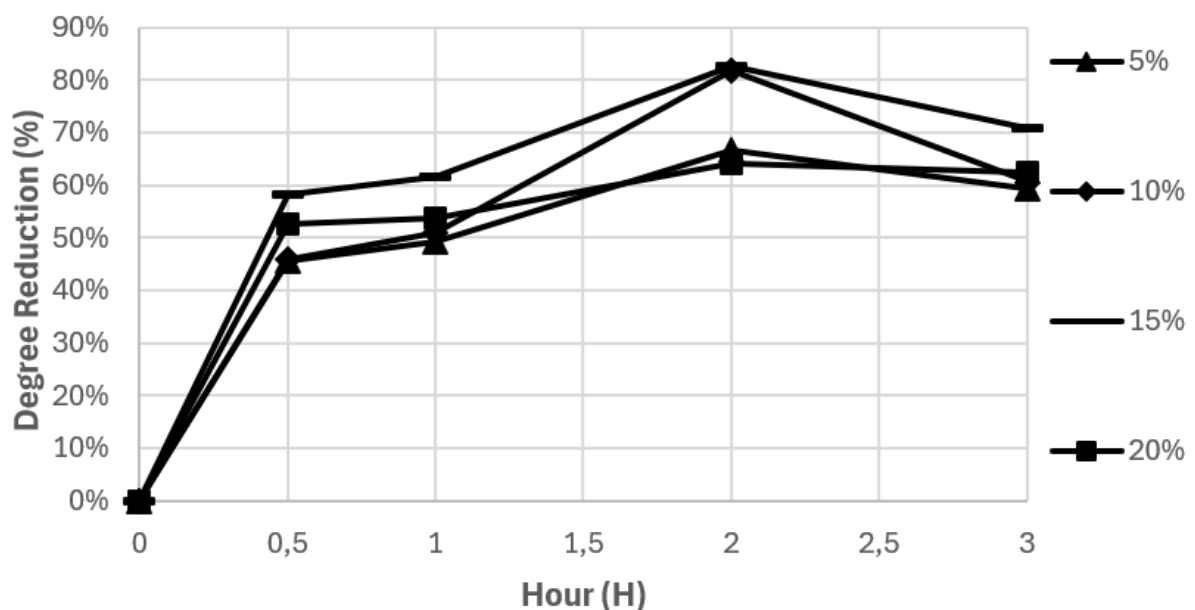
Gambar 4.2 Hasil Pengujian SEM-EDX Bijih Nikel Laterit

Hasil pengujian pada **Gambar 4.2** menunjukkan kandungan unsur utama yang terdapat dalam bijih nikel laterit tipe limonit. Dari hasil pengujian berikut menunjukkan kandungan bijih

nikel laterit sebelum proses reduksi dengan unsur kandungan unsur Fe sebesar 23,69 wt% dan unsur Ni sebesar 03,67 wt%.

4.2 Pengaruh Penambahan Na_2SO_4 dan Waktu Tahan Terhadap Derajat Reduksi Hasil Proses Reduksi

Dalam proses reduksi bijih nikel laterit, penambahan natrium sulfat (Na_2SO_4) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi reaksi reduksi yang terjadi. Selain itu, waktu tahan juga merupakan variabel penting yang sangat berpengaruh terhadap hasil dari proses reduksi. Lamanya waktu reduksi dapat memengaruhi sejauh mana bijih nikel laterit mengalami reaksi reduksi, yang berpengaruh terhadap nilai derajat reduksi yang dihasilkan. Efisiensi ini ditunjukkan melalui derajat reduksi, yang merepresentasikan sejauh mana senyawa nikel oksida (NiO) berhasil direduksi menjadi logam nikel dengan memanfaatkan gas amonia (NH_3) sebagai reduktan. Derajat reduksi tersebut juga dapat diinterpretasikan sebagai jumlah oksigen yang berhasil dilepaskan dari sampel selama proses reduksi berlangsung. Grafik berikut menunjukkan keterkaitan antara variasi kadar penambahan Na_2SO_4 (0, 5, 10, 15, 20 wt%) dengan nilai derajat reduksi yang dicapai pada temperatur 900°C dan *holding time* selama 0,5, 1, 2, 3 jam.



Gambar 4.3 Grafik derajat reduksi seiring dengan penambahan Na_2SO_4 pada Temperatur 900°C

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Jiang et al., 2013) penambahan natrium sulfat (Na_2SO_4) terbukti mampu mempercepat laju kinetika reaksi reduksi serta meningkatkan aktivitas katalitik selama proses berlangsung. Namun demikian, efektivitas peningkatan ini sangat bergantung pada besarnya konsentrasi Na_2SO_4 yang digunakan serta suhu reduksi yang diterapkan. Dalam penelitian tersebut menunjukkan bahwa suhu minimum yang diperlukan agar proses reduksi berlangsung secara optimal adalah di atas 750°C . Oleh karena itu, penggunaan suhu sebesar 900°C dalam penelitian ini telah memenuhi kondisi termal yang memadai untuk mendukung dekomposisi mineral serta pelepasan unsur nikel dan besi dari ikatan mineraloginya. Hal ini sejalan dengan capaian derajat reduksi sebesar 67,46% pada sampel tanpa penambahan Na_2SO_4 , yang mengindikasikan bahwa reaksi reduksi telah berlangsung secara efektif pada suhu yang digunakan. Peningkatan konsentrasi penambahan Na_2SO_4 dalam proses reduksi diketahui

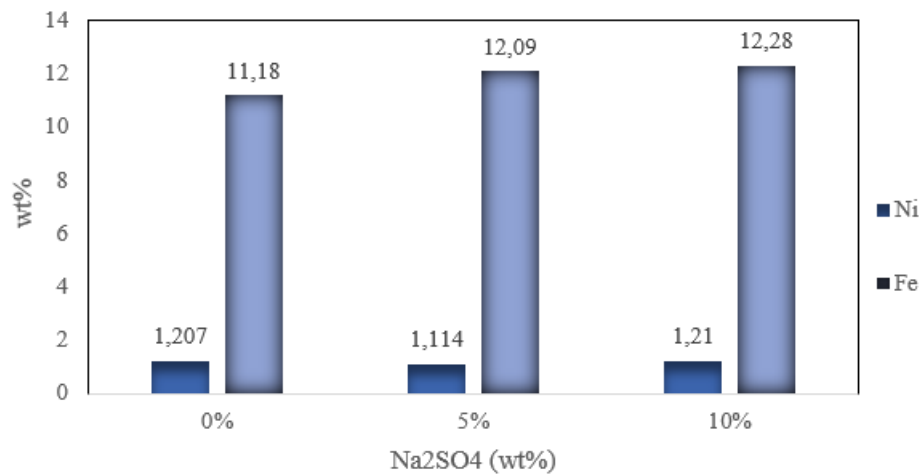
mampu menghasilkan distribusi aditif lebih merata pada permukaan sampel yang mempercepat laju reaksi pada permukaan aktif dan mendukung terbentuknya larutan padat FeS. Pembentukan larutan padat FeS ini dapat mempengaruhi difusi hidrogen ke lokasi reaksi dan reaksi kimia. Berdasarkan teori di atas, dapat dikatakan bahwa derajat reduksi penambahan 0 wt% dan 5 wt% Na₂SO₄ cenderung konstan karena Na₂SO₄ tidak terdistribusi secara merata sehingga laju dan efisiensi reaksi kurang maksimal. Sedangkan pada saat penambahan 10 wt% dan 15 wt% Na₂SO₄, derajat reduksi yang dihasilkan naik secara signifikan sehingga dapat dikatakan bahwa pada dosis ini Na₂SO₄ sudah terdistribusi lebih seragam yang menyebabkan laju reaksi nya menjadi lebih cepat. Hal ini didukung oleh studi yang dilakukan oleh (Abdul et al., 2024) yang menyatakan bahwa penambahan Na₂SO₄ dapat meningkatkan laju reaksi reduksi bijih nikel laterit. Namun, pada saat penambahan 20 wt% Na₂SO₄, derajat reduksi menurun. Hal ini dapat disebabkan karena penambahan Na₂SO₄ yang berlebihan dapat mengubah sifat fisik, struktur kristal bijih nikel laterit sehingga dapat menghalangi kontak antara gas NH₃ dengan oksida besi dan nikel. Terhalangnya kontak antara gas NH₃ dengan oksida besi dan nikel dapat membuat proses reduksi tidak dapat berjalan secara optimal yang mengganggu kinetika reaksi reduksi sehingga dapat mengurangi nilai derajat reduksi.

Produk hasil reduksi dengan penambahan 15 dan 20 wt% Na₂SO₄ menghasilkan pembentukan fasa cair yang melimpah, di mana pencairan sampel terjadi akibat kontribusi dari Na₂SO₄. Hal ini dapat dijelaskan karena Na₂SO₄ memiliki titik leleh sebesar 850-900°C, sementara proses reduksi dilakukan pada suhu 900°C, sehingga pada kondisi tersebut Na₂SO₄ telah berada dalam fase cair (Pintowantoro & Abdul, 2019). Sebaliknya, pada penambahan 0 dan 5 wt% Na₂SO₄, hasil reduksi masih didominasi oleh fasa padat, yang menunjukkan bahwa distribusi aditif Na₂SO₄ dalam material belum merata dan jumlahnya belum mencukupi untuk membentuk fase cair. Sementara itu, penambahan sebesar 10 wt% menghasilkan dua fasa, di mana sebagian material telah membentuk fasa cair, dan sebagian lainnya masih dalam kondisi padat. Hal ini selaras dengan peningkatan derajat reduksi yang terobservasi pada komposisi tersebut. Adapun dominasi fasa cair mulai terbentuk signifikan pada variasi penambahan 15 dan 20 wt% Na₂SO₄, mengindikasikan bahwa senyawa aditif telah terdistribusi secara homogen dan jumlahnya mencukupi untuk mempercepat proses reaksi. Oleh karena itu, peningkatan derajat reduksi yang dicapai pada komposisi tersebut berkorelasi dengan terbentuknya fasa cair serta distribusi aditif yang optimal, yang mendukung efisiensi proses reduksi secara maksimal.

Berdasarkan **Gambar 4.3** menunjukkan bahwa waktu tahan berpengaruh pada hasil derajat reduksi pada waktu tahan 0,5 jam dan 1 jam relatif stabil. Nilai derajat reduksi meningkat seiring dengan waktu penahanan yang lebih lama yakni 2 jam, hal ini dikarenakan semakin banyak oksida besi dan oksida nikel yang tereduksi. Namun, derajat reduksi dalam waktu tahan 3 jam mengalami penurunan, hal ini dikarenakan dapat menyebabkan senyawa yang telah tereduksi akan teroksidasi kembali menjadi senyawa oksida. Selain itu semakin lama waktu penahanan menyebabkan Na₂SO₄ terdekomposisi menjadi natrium yang dapat mengikat mineral silikat dan sulfur akan bereaksi dengan Fe dan membentuk FeS dalam *slag* (Abdul, Pintowantoro, & Yuwandono, 2018).

4.3 Pengaruh Variasi Penambahan Na₂SO₄ Terhadap Kandungan Ni dan Fe Hasil Proses Reduksi

Dalam penelitian ini, penambahan natrium sulfat (Na₂SO₄) memberikan pengaruh terhadap kandungan Ni dan Fe dalam produk hasil proses reduksi. Untuk mengetahui kandungan Ni dan Fe dalam produk, pengujian *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) dilakukan. Grafik berikut menunjukkan keterkaitan antara variasi kadar penambahan 0; 5; 10% Na₂SO₄ dan *holding time* selama 2 jam dengan nilai kandungan Ni dan Fe yang diperoleh.



Gambar 4.4 Hasil AAS Produk Reduksi Bijih Nikel Laterit

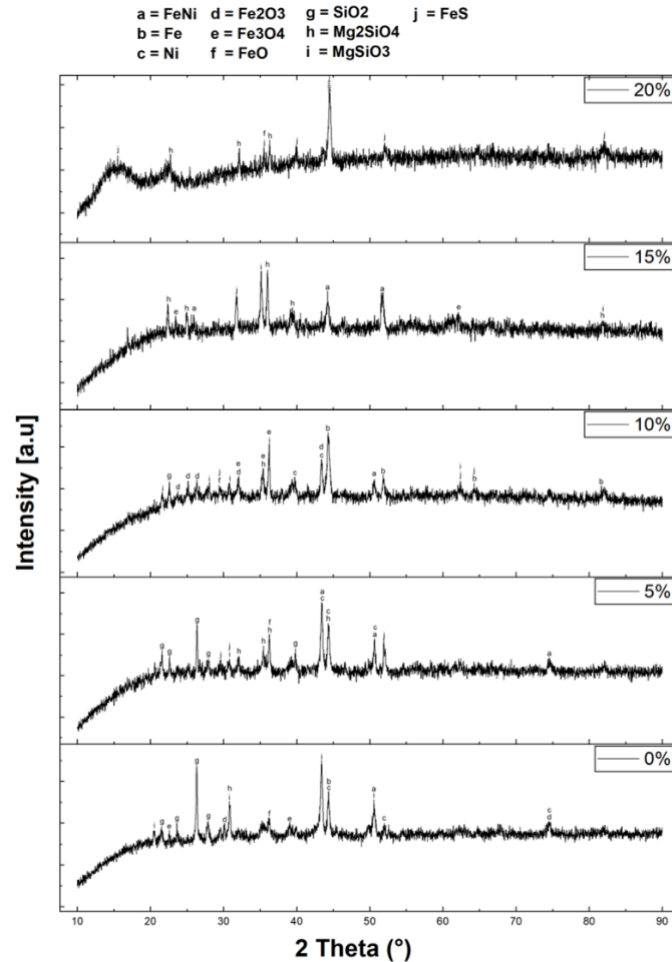
Berdasarkan hasil pengujian AAS, diperoleh data kandungan unsur Ni dan Fe pada variasi penambahan Na₂SO₄ 0%, 5%, dan 15% dengan waktu tahan 120 menit. Pada penambahan aditif 0, 5, 15 wt% Na₂SO₄ dalam waktu tahan 2 jam masing-masing menghasilkan kandungan nikel (Ni) yang dihasilkan masing-masing sebesar 1,207%, 1,114%, dan 1,21%. Sementara itu, kandungan besi (Fe) yang terdeteksi adalah 11,18%, 12,09%, dan 12,28%. Diketahui bahwa konsentrasi Ni dan Fe tertinggi diperoleh pada penambahan aditif 10 wt% Na₂SO₄, yakni kandungan Ni dengan nilai sebesar 1,210%, dan kandungan Fe dengan nilai sebesar 12,28%. Dari hasil yang telah diperoleh, dapat dilihat bahwa kandungan Ni dan Fe pada masing-masing variasi mengalami kenaikan yang stabil seiring dengan penambahan Na₂SO₄.

Penambahan Na₂SO₄ 10% menunjukkan kondisi paling optimal, ditandai dengan kadar nikel (Ni) dan besi (Fe) tertinggi yang diperoleh dengan kadar sebesar 1,21% dan 12,28%. Hal ini menunjukkan bahwa reduksi NiO menjadi logam Ni, dan reduksi FeO menjadi logam Fe berlangsung secara efisien. Sebaliknya, pada penambahan 0% Na₂SO₄, menunjukkan kadar Ni dan Fe yang diperoleh masih rendah, hal ini mengindikasikan bahwa belum adanya penambahan Na₂SO₄ yang dapat memfasilitasi penyatuan dan peningkatan kadar logam yang lebih besar (Pintowantoro & Abdul, 2019). Selain itu waktu penahanan selama 120 menit mampu menyebabkan semakin banyak NiO yang tereduksi menjadi Ni dan FeO yang tereduksi menjadi Fe. Dengan tereduksinya NiO dan FeO meningkatkan kandungan Ni dan Fe dalam produk. Selain itu seiring dengan bertambahnya penambahan Na₂SO₄ dan waktu penahanan, natrium sulfat akan mengalami reaksi dekomposisi menjadi Na₂O, Na₂S, dan Sulfur. Kemudian natrium akan mengikat silikat membentuk Na₂SiO₃, dan sulfur akan mengikat Fe membentuk FeS sesuai dengan **persamaan (4.9)** (Abdul, Pintowantoro, & Yuwandono, 2018). Namun, besi (Fe) yang terdeteksi dalam sampel masih tinggi akibat jumlah sulfur yang diperlukan untuk mengikat besi menjadi FeS masih terlalu kecil (Subagja et al., 2016).

Jika dibandingkan dengan data derajat reduksi, terlihat bahwa pada penambahan 0% dan 5% mengalami penurunan 0,7%, sedangkan pada penambahan 10% mengalami peningkatan kembali, yang selaras dengan tren kandungan Ni berdasarkan hasil AAS. Maka dari itu, untuk analisis yang lebih komprehensif, diperlukan perbandingan dengan data derajat reduksi yang disajikan pada **gambar 4.3**.

4.4 Pengaruh Penambahan Na_2SO_4 Terhadap Mineralogi Produk Hasil Proses Reduksi

Dalam penelitian ini, karakterisasi produk hasil reduksi dilakukan menggunakan perangkat XRD PANalytical untuk mengidentifikasi jenis-jenis fasa mineral yang terbentuk selama proses reduksi berlangsung.



Gambar 4.5 Hasil XRD Produk Hasil Reduksi dengan Variasi Penambahan Na_2SO_4 pada Temperatur 900°C dan waktu selama 120 menit

Gambar 4.5 merupakan hasil pengujian XRD produk hasil reduksi pada setiap variasi penambahan Na_2SO_4 , fasa-fasa yang teridentifikasi ditunjukkan oleh **Tabel 4.3** berikut ini.

Tabel 4.3 Identifikasi Fasa pada Produk Hasil Proses Reduksi

No	Fasa	Rumus Kimia	PDF Number	2 Theta ($^\circ$)
1	Feronikel	FeNi	00-003-1206	50,375
			00-003-1017	43,473
			00-047-1417	50,674
			00-047-1417	74,541
			01-088-1715	25,1
			01-088-1715	44,217
			01-074-0816	81,874
			00-003-1044	44,6
2	Iron	Fe	01-085-1410	44,354
			96-901-5973	44,296

			96-901-3482	44,241
			96-901-5331	51,8
			96-901-3475	81,932
			96-901-5530	51,737
			96-901-3476	81,794
			96-901-5938	44,375
3	Nickel	Ni	00-045-1027	39,101
			96-901-3034	43,469
			01-089-7128	44,349
			96-901-3034	50,629
			96-901-3034	51,895
			96-901-3034	74,415
			96-901-2993	44,322
			01-089-7129	39,66
			96-901-3035	43,317
			96-901-5938	44,375
4	Hematite	Fe ₂ O ₃	00-025-1402	27,858
			00-039-1346	23,772
			00-039-1346	24,29
			00-039-1346	26,189
			00-039-1346	32,125
			00-025-1402	43,341
			01-076-1821	39,262
			00-047-1417	74,473
5	Magnetite	Fe ₃ O ₄	01-076-0958	22,489
			01-076-0958	30,095
			96-901-6810	36,192
			01-076-0958	51,993
			96-901-6811	30,79
			96-901-6811	32,054
			96-901-6811	35,452
			96-901-6811	36,275
			96-901-3100	35,991
6	Wustite	FeO	00-039-1088	43,517
			01-089-0690	29,402
7	Quartz	SiO ₂	01-089-3435	20,607
			01-089-3435	21,518
			00-051-1377	23,844
			00-051-1377	26,369
			00-051-1377	27,88
			00-051-1377	30,172
8	Forsterite	Mg ₂ SiO ₄	00-013-0230	30,732
			00-013-0230	36,162
			96-901-5975	44,276
			96-901-5975	22,637
			96-901-3098	29,53
			96-901-3098	32,097

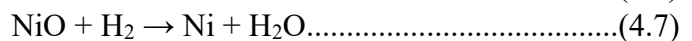
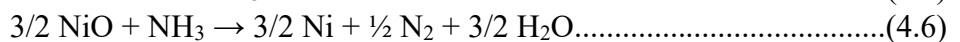
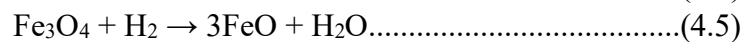
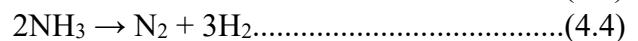
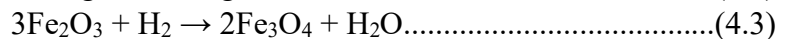
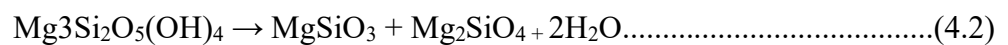
			96-901-3098	35,475
			96-901-3098	36,175
			96-900-0322	51,966
			96-901-3100	22,513
			96-901-3100	23,576
			01-085-1359	51,68
			96-901-3100	39,433
			01-071-1082	22,722
			01-071-1082	32,097
			01-074-0816	36,322
9	Enstatite	MgSiO ₃	01-074-0816	26,372
			01-074-0816	44,279
			01-074-0816	21,772
			01-074-0816	26,372
			01-074-0816	28,108
			01-074-0816	30,724
			00-011-0273	21,712
			00-022-0714	28,037
			00-011-0273	30,721
			00-022-0714	36,237
			00-022-0714	62,353
			01-074-0816	35,144
			96-901-3100	35,991
			96-901-3100	39,433
10	Troilit	FeS	01-075-2165	43,203
			01-075-2377	43,7
			01-075-2377	21,45
			01-075-2377	39,885
			01-089-4076	22,908
			01-089-4076	62,457
			01-089-4076	64,377
			00-049-1632	31,809
			00-049-1632	36,146
			00-049-1632	62,028
			96-900-7652	15,12
			00-037-0477	35,525
			01-075-2377	39,885
			01-089-6268	44,569
			96-900-7652	52,096
			96-900-7652	82,048

Berdasarkan hasil XRD pada **Gambar 4.5**, fasa utama yang diperoleh dari penambahan 0 wt% Na₂SO₄, yaitu nikel (Ni), enstatit (MgSiO₃), quartz (SiO₂), hematit (Fe₂O₃).

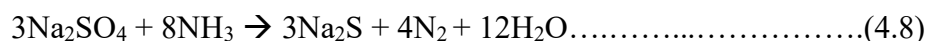
Adapun beberapa fasa minor seperti, feronikel (FeNi), magnetit (Fe₃O₄), wustit (FeO), dan forsterit (Mg₂SiO₄). Fasa hematit (Fe₂O₃) yang dihasilkan merupakan hasil dari dehidroksilasi goetit (FeOOH) yang sudah mulai terjadi pada temperatur 150°C seperti yang dijelaskan pada **persamaan 4.1**.



Sedangkan fasa forsterit (Mg_2SiO_4) dan enstatit (MgSiO_3) yang terbentuk merupakan hasil dari dehidroksilasi lizardit ($(\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) yang sudah mulai terjadi pada temperatur 450°C seperti yang dijelaskan pada **persamaan 4.2**. Fasa hematit (Fe_2O_3) yang dihasilkan ini kemudian akan direduksi menjadi magnetit (Fe_3O_4) oleh gas amonia (NH_3) sesuai dengan **persamaan 4.3**. Gas NH_3 sendiri mengalami dekomposisi menjadi gas hidrogen (H_2) dan gas nitrogen (N_2) pada temperatur 600°C sesuai dengan **persamaan 4.4**. Magnetit (Fe_3O_4) dapat direduksi menjadi wustit (FeO) karena proses reduksi dilakukan pada temperatur lebih dari 570°C sesuai dengan **persamaan 4.5** dan wustit (FeO) akan direduksi menjadi logam Fe. Logam Fe yang tereduksi kemudian akan bermigrasi dan berkumpul dengan logam Fe lain membentuk logam yang lebih besar. Selain itu, logam Ni yang terbentuk merupakan hasil dari reduksi nikel oksida (NiO) yang dihasilkan dari dehidroksilasi goetit (FeOOH). Reaksi reduksi dari NiO ini dijelaskan dalam **persamaan 4.6** dan **4.7**. Kemudian logam Fe dan Ni yang terbentuk akan bergabung membentuk solid solution logam feronikel (Abdul, Pintowantoro, Kawigraha, et al., 2018).



Pada sampel dengan penambahan 5 wt% Na_2SO_4 , menunjukkan bahwa fasa utama yang terbentuk ialah nikel (Ni) dan quartz (SiO_2). Selain itu, beberapa fasa minor yang muncul meliputi feronikel (FeNi), troilit (FeS), wustite (FeO), hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4), forsterit (Mg_2SiO_4), enstatit (MgSiO_3). Dengan penambahan Na_2SO_4 membuat terbentuknya fasa troilit (FeS) pada variasi ini dikarenakan adanya proses dekomposisi senyawa Na_2SO_4 menjadi Na_2S sesuai dengan reaksi yang ditunjukkan dalam **persamaan 4.8**. Selanjutnya, Na_2S bereaksi dengan wustit (FeO) menghasilkan troilit (FeS) sesuai dengan reaksi yang ditunjukkan dalam **persamaan 4.9**.



Terjadinya reaksi reduksi ini didukung dengan perhitungan nilai energi Gibbs dari Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , NiO , dan dekomposisi gas NH_3 dan N_2 menggunakan FactWeb. Perhitungan Termodinamika menghasilkan nilai ΔG° negatif yang menandakan proses pada tahapan tersebut berlangsung spontan. Temperatur berpengaruh pada tahapan tersebut yakni semakin tinggi temperatur, nilai ΔG° akan semakin negatif yang mempengaruhi reaksi dapat berlangsung dengan spontan.

Pada variasi penambahan 10 wt% Na_2SO_4 , fasa utama yang teridentifikasi adalah iron (Fe), nikel (Ni), hematite (Fe_2O_3), enstatite (MgSiO_3), sementara itu fasa minor yang dihasilkan serupa dengan yang ditemukan pada sampel dengan penambahan 5 wt% Na_2SO_4 . Namun, seiring dengan penambahan Na_2SO_4 menyebabkan adanya pengurangan dari pembentukan quartz (SiO_2), wustite (FeO), dan meningkatkan pembentukan fasa Fe dan Ni, hal ini dikarenakan Na_2S yang bereaksi dengan FeO dan SiO_2 sehingga dapat memisahkan Fe, Ni dari pengotor dan memfasilitasi penyatuan dan pembentukan partikel logam dengan ukuran yang lebih besar (Pintowantoro & Abdul, 2019).

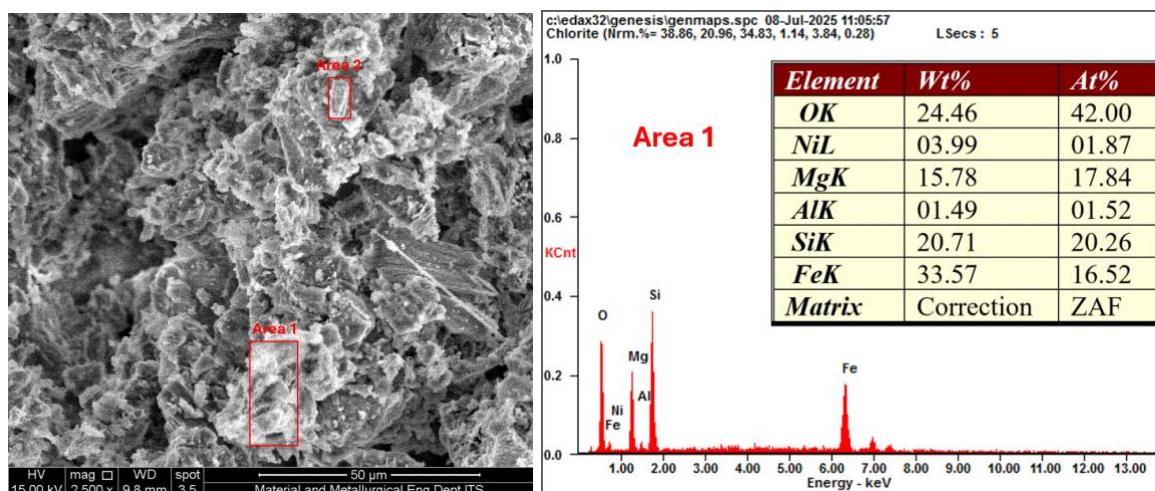
Sewaktu penambahan ditingkatkan menjadi 15 wt% Na_2SO_4 , fasa utama yang teridentifikasi adalah feronikel (FeNi), forsterite (Mg_2SiO_4), dan enstatite (MgSiO_3). Adapun fasa minor yang terbentuk meliputi hematite (Fe_2O_3), magnetite (Fe_3O_4). Pada kondisi ini, logam nikel (Ni)

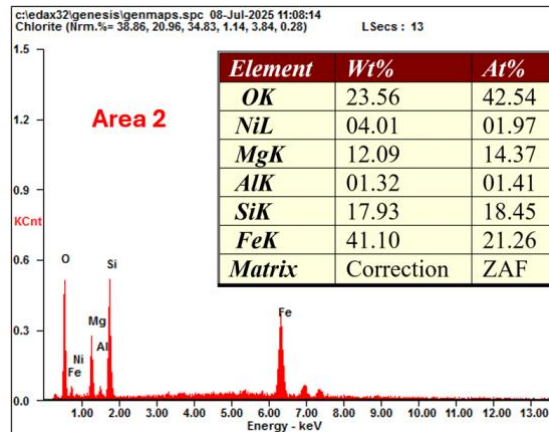
maupun wustit (FeO) tidak terdeteksi dalam produk hasil reduksi. Berdasarkan hasil XRD yang ditampilkan pada **Gambar 4.5**, fasa wustit (FeO) tidak terbentuk karena telah sepenuhnya bereaksi dengan senyawa Na_2S , membentuk senyawa troilit (FeS). Hal ini ditandai dengan terbentuknya fasa troilit (FeS) dengan intensitas peak tinggi dengan fasa feronikel (FeNi). Fasa troilit (FeS) bertujuan untuk menunjang pertumbuhan partikel feronikel yang lebih besar selama proses reduksi (Xueming et al., 2018). Fasa logam nikel (Ni) tidak terdeteksi pada sampel, yang menunjukkan bahwa unsur Ni telah sepenuhnya berinteraksi dengan unsur Fe membentuk larutan padat (solid solution) berupa feronikel (FeNi). Hal ini didukung dengan data derajat reduksi pada **gambar 4.3** yang menunjukkan efisiensi dari proses reduksi variasi ini dari perolehan derajat reduksi tertinggi dalam penelitian ini. Selain itu waktu tahan yang tinggi memaksimalkan dalam perolehan fasa Fe dan Ni (Nurjaman et al., 2019)

Pada sampel dengan penambahan 20 wt% Na_2SO_4 , fasa utama yang teridentifikasi meliputi feronikel (FeNi), besi (Fe), nikel (Ni), dan troilit (FeS) dengan *peak* tertinggi. Adapun fasa minor yang terbentuk meliputi wustite (FeO) dan forsterite (Mg_2SiO_4). Fasa FeNi yang ditunjukkan dari deteksi fasa utama pada sampel menunjukkan adanya dekomposisi dari Na_2SO_4 dalam pembentukan fasa FeS yang membantu untuk memisahkan FeNi dari pengotor dan membuatnya teraglomerasi dengan baik serta membentuk partikel logam yang besar (Jiang et al., 2013). Fasa wustite yang belum tereduksi menunjukkan bahwa penambahan Na_2SO_4 berlebihan dapat membentuk *slag* terlalu banyak yang dapat membentuk terak sehingga menutupi reaktan dan menyebabkan jarak jalur difusi gas NH_3 ke reaktan lebih besar serta menurunkan konsentrasi NH_3 dalam proses reduksi (Abdul et al., 2024). Hal ini didukung dengan data derajat reduksi pada **gambar 4.3** yang menunjukkan penurunan derajat reduksi pada produk ini dari penambahan Na_2SO_4 15%, maka dari itu perlu pertimbangan dalam penambahan Na_2SO_4 agar tidak menyebabkan penurunan potensi reduksi nikel dan oksida besi.

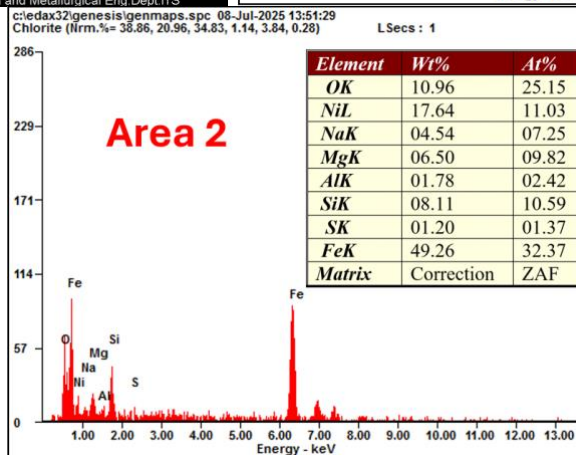
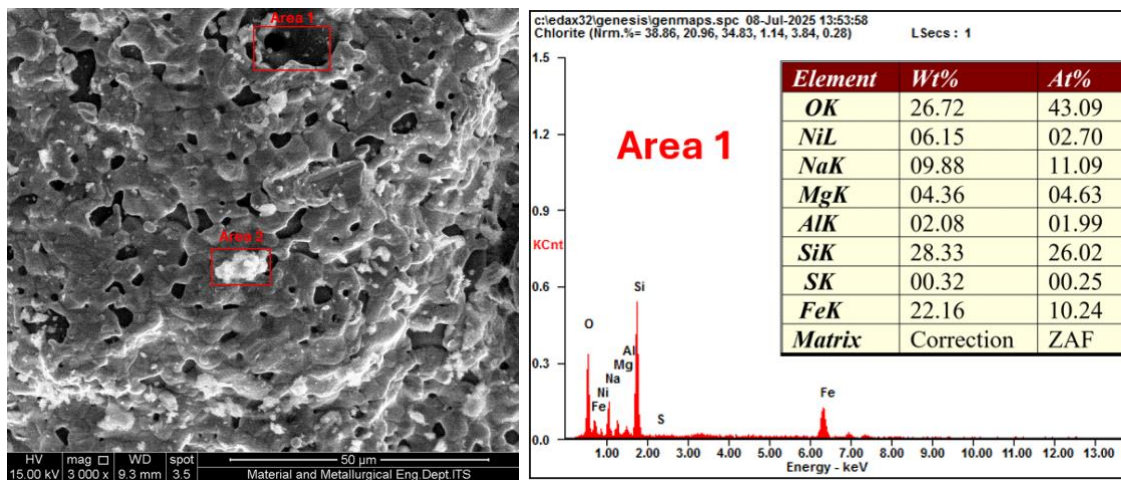
4.5 Pengaruh Penambahan Na_2SO_4 dan Waktu Tahan Terhadap Morfologi Produk Hasil Proses Reduksi

Karakterisasi hasil reduksi bijih nikel laterit tipe limonit dengan variasi penambahan Na_2SO_4 dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) guna mengamati morfologi permukaan, distribusi unsur, serta identifikasi awal terhadap pembentukan fasa logam pasca proses reduksi.



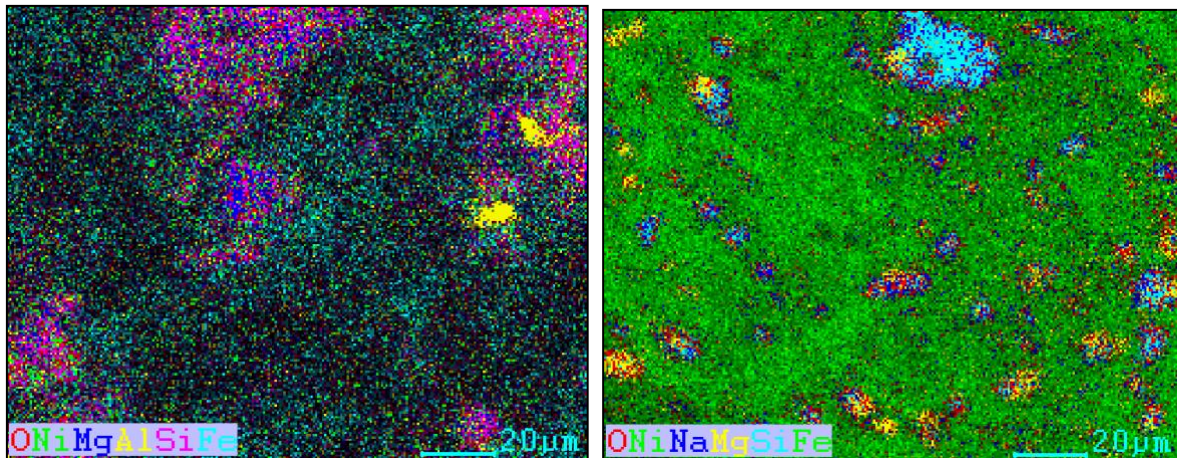


(a)



(b)

Gambar 4.6 Hasil Pengamatan Produk melalui SEM EDX untuk (a) saat dipanaskan hanya dengan aliran N_2 dan (b) saat reduksi menggunakan NH_3 dengan 10 wt% Na_2SO_4 selama 2 Jam



Gambar 4.7 Distribusi Unsur dalam produk untuk (a) saat dipanaskan hanya dengan aliran N_2 dan (b) saat reduksi menggunakan NH_3 dengan 10 wt% Na_2SO_4 selama 2 Jam

Adapun perbedaan dari pengaruh penambahan Na_2SO_4 dan waktu tahan terhadap morfologi produk hasil proses reduksi melalui pengujian SEM-EDX. **Gambar 4.6 (a)** menunjukkan hasil pengujian SEM-EDX produk dengan penambahan 0 wt% Na_2SO_4 dan waktu tahan 0 jam, terlihat permukaannya dan aglomerat aglomerat yang berbentuk tidak beraturan. Dapat dilihat dari hasil EDX pada area 1 yang menunjukkan campuran aglomerat berwarna terang dan gelap mengandung dominasi dari kandungan Fe, Mg, Si dan O yang dapat diindikasikan sebagai fasa iron (Fe), forsterit (Mg_2SiO_4), dan enstatit ($MgSiO_3$) yang muncul dalam sampel sesuai dengan hasil pengujian XRD dalam **Gambar 4.5**, fasa silikat ini bersifat stabil dan dapat menjebak logam-logam tereduksi seperti Fe dan Ni, menghambat pembentukan aglomerat logam besar (Nurjaman et al., 2021). Sedangkan area 2 dengan warna yang lebih terang menunjukkan peningkatan dari kandungan Fe dan Ni. Hal tersebut didukung melalui hasil analisis distribusi unsur pada **Gambar 4.7 (a)**, yang memperlihatkan bahwa unsur logam Fe dan Ni pada variasi ini masih tersebar secara merata. Distribusi tersebut mengindikasikan bahwa kedua unsur belum berikatan membentuk partikel logam berukuran besar. Hal tersebut menunjukkan bahwa sampel aglomerat yang berbentuk tidak beraturan dan fasa Fe-Ni belum menyatu sepenuhnya disebabkan oleh sampel belum direduksi dan adanya penambahan Na_2SO_4 yang memfasilitasi penyatuan dan pembentukan partikel logam lebih besar (Pintowantoro & Abdul, 2019).

Gambar 4.6 (b) menunjukkan hasil pengujian SEM-EDX produk dengan penambahan 10 wt% Na_2SO_4 . Morfologi pada Area 1 menunjukkan permukaan gelap dan tidak padat, yang tersusun atas aglomerat yang tersebar secara tidak merata. Tekstur ini mengindikasikan bahwa area tersebut merupakan bagian dari pengotor dan belum sepenuhnya tereduksi. Hasil EDX menunjukkan bahwa elemen dominan adalah O (26,72 wt%) dan Si (28,33 wt%) disertai keberadaan Na (9,88 wt%), Al (2,08 wt%), Mg (4,36 wt%), dan unsur minor logam Ni (6,18 wt%) dan Fe (22,16 wt%). Kandungan Si dan O yang tinggi menunjukkan bahwa area ini kemungkinan besar merupakan fasa silikat, seperti forsterit (Mg_2SiO_4) atau enstatit ($MgSiO_3$). Fasa ini bersifat stabil dan dapat menjebak logam-logam tereduksi seperti Fe dan Ni, menghambat pembentukan aglomerat logam besar (Nurjaman et al., 2021). Kandungan Na yang signifikan menandakan bahwa senyawa Na_2SO_4 masih tersisa atau telah berinteraksi dalam pembentukan fasa (FeS) melalui dekomposisi Na_2S (Abdul et al., 2024).

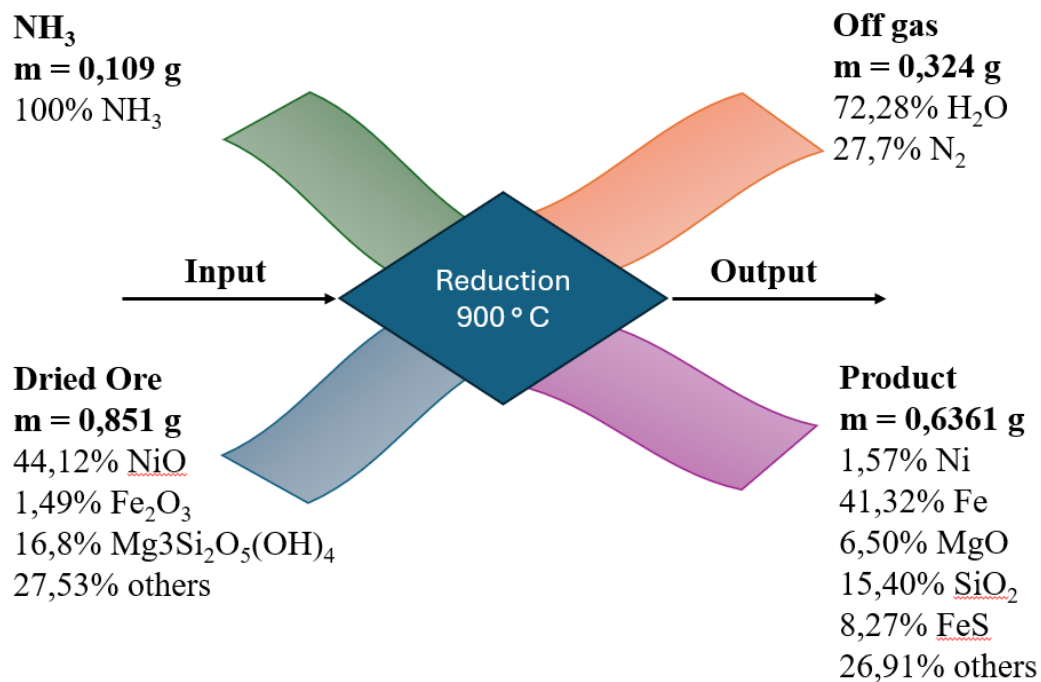
Area 2 memperlihatkan morfologi lebih padat dan terang, menunjukkan terbentuknya fasa logam. Ini diperkuat oleh hasil EDX yang menunjukkan kandungan Fe sebesar 49,26 wt% dan Ni sebesar 17,64 wt%, menandakan terbentuknya feronikel (FeNi) dalam jumlah signifikan. Rendahnya kadar Si dan O (masing-masing hanya 8,11 wt% dan 10,96 wt%) memperkuat bahwa area ini minim pengotor, dan logam telah memisahkan diri dari matriks silikat.

Kandungan Na yang rendah pada area ini menandakan bahwa Na_2S yang telah berikatan dengan Na_2S yang berikatan dengan wustite (FeO) dan quartz (SiO_2) dan membentuk Fasa FeS (Abdul et al., 2024). Kehadiran S dalam jumlah kecil (1,20 wt%) juga menunjukkan pembentukan fasa FeS yang membantu dalam menurunkan tegangan dan mendorong pembentukan partikel logam yang lebih besar (Jiang et al., 2013). Kandungan Ni dan Fe yang tinggi di area ini dibandingkan area 1 menunjukkan bahwa fasa logam di area 2 sudah mengalami proses agregasi dan pertumbuhan kristal yang baik, sesuai dengan mekanisme pembentukan logam mikroskopis akibat fasa cair dari slag Na_2SO_4 yang meningkatkan laju penggabungan partikel Fe-Ni didukung dengan morfologi yang mengindikasikan bahwa difusi antar atom Fe dan Ni telah terjadi optimal, membentuk padatan larutan FeNi yang stabil dan terlapis oleh Fasa Troilit (FeS) (Li et al., 2012). Selain itu, pada produk terlihat aglomerat menyatu membentuk aglomerat padat, hal ini mengindikasikan bahwa dengan waktu penahanan 2 jam proses reduksi dapat membuat aglomerat setelah reduksi menyatu, lebih besar dan membentuk partikel logam (Abdul, Pintowantoro, & Yuwandono, 2018). Hal ini didukung dengan hasil analisis distribusi unsur pada **Gambar 4.7 (b)** yang memperlihatkan bahwa distribusi antara unsur Fe dan Ni dengan pengotornya sudah terlihat dengan jelas. Distribusi unsur di dominasi oleh unsur Fe dan Ni yang mengindikasikan bahwa kedua unsur tersebut telah berikatan dan membentuk partikel logam berukuran yang lebih besar. Kandungan Fe dan Ni yang dihasilkan dari variasi ini juga mengalami peningkatan dari variasi penambahan 0 wt% Na_2SO_4 dan waktu tahan 0 jam yang sesuai dengan hasil derajat reduksi yang dihasilkan.

4.6 Perbandingan Emisi CO_2 Teoritik Proses Reduksi Bijih Nikel Lateritik Menggunakan Gas NH_3 Dengan Kondisi Di Industri

Perbandingan emisi CO_2 secara teoritik menjadi langkah krusial dalam penelitian ini yang bertujuan untuk pengupayaan menekan emisi CO_2 yang dihasilkan dari proses reduksi bijih nikel laterit. Analisis perbandingan ini dilakukan untuk mengevaluasi metode alternatif dalam penelitian ini yakni penggunaan gas NH_3 sebagai reduktan yang mampu memberikan kontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca yang diketahui sebagai salah satu penyebab utama perubahan iklim global. Perbandingan emisi teoritis juga diperlukan guna mengukur efektivitas pengurangan emisi CO_2 antara proses reduksi berbasis NH_3 dengan metode yang diterapkan di industri saat ini. Proses perhitungan dilakukan melalui perhitungan neraca energi, yang mencakup analisis kuantitatif terhadap total emisi CO_2 yang dihasilkan dan dibandingkan dengan data emisi dari teknologi konvensional. Dengan analisis perhitungan ini, dapat ditentukan sejauh mana potensi gas NH_3 sebagai reduktan dalam mendukung teknologi pengolahan nikel yang lebih berkelanjutan dan rendah karbon.

Dalam perhitungan potensi emisi global (GWP) menggunakan satuan CO_2 equivalent ($\text{CO}_2\text{-eq}$) untuk menyatakan emisi CO_2 teoritik (Bartzas & Komnitsas, 2015). Berdasarkan *Life Cycle Assessment* (LCA), diketahui bahwa Rotary Kiln Electric Furnace (RKEF) dan Blast Furnace (BF) memiliki kebutuhan energi primer (*Primary Energy Demand* - PED) dan potensi pemanasan global (*Global Warming Potential* - GWP), masing-masing pada rentang 140–154 GJ/ton FeNi untuk PED dan 7,7–13,9 ton $\text{CO}_2\text{-eq}$ /ton FeNi untuk GWP (Abdul et al., 2024). Berdasarkan studi yang dilakukan oleh (Haque & Norgate, 2013) menghasilkan emisi CO_2 sebesar 13,9 $\text{CO}_2\text{-eq}$ /kg FeNi, (Bartzas & Komnitsas, 2015) menghasilkan emisi CO_2 sebesar 12,6 $\text{CO}_2\text{-eq}$ /kg FeNi. Berikut merupakan hasil perhitungan *mass balance* dan *energy balance* dengan hasil emisi CO_2 yang terlampir pada **gambar 4.8** yang menunjukkan *block diagram mass balance* dan **tabel 4.3** yang menunjukkan hasil perhitungan *mass balance* dan *energy balance* sebagai berikut.



Gambar 4. 8 Block Diagram Mass Balance Proses Reduksi Bijih Nikel Laterit

Tabel 4.3 Hasil perhitungan *Mass* dan *Energy Balance* Emisi CO₂ Teoritik

	Hasil Reduksi (10% Na ₂ SO ₄ , 120 menit)
Total Energi (J)	4429,49
Total Energi (kJ/kg-produk)	6465,13
Total Energi (kWh)	1,79
Total Emisi (kg-CO ₂ /kg FeNi)	4,77

Berdasarkan hasil perhitungan *mass balance* dan *energy balance*, diperoleh bahwa emisi karbon dioksida (CO₂) dari proses reduksi bijih nikel laterit menggunakan gas NH₃ pada penambahan 10 wt% Na₂SO₄ sebesar 4,77 kg CO₂-eq/kg FeNi. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan penambahan jumlah aditif Na₂SO₄ meningkatkan emisi CO₂ yang dihasilkan. Penelitian ini menunjukkan penurunan emisi CO₂ yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan proses konvensional. Penurunan ini dikarenakan proses reduksi bijih nikel laterit dengan NH₃ tidak menghasilkan gas CO₂ secara langsung, melainkan menghasilkan gas buang berupa H₂O dan N₂ yang lebih ramah lingkungan. Namun demikian, emisi CO₂ tetap muncul secara tidak langsung akibat konsumsi energi selama proses reduksi, terutama karena energi listrik yang digunakan masih bersumber dari pembangkit berbahan bakar fosil yang menghasilkan emisi karbon. Total konsumsi energi dalam proses reduksi dengan NH₃ dipengaruhi oleh entalpi reaksi pembentukan dan pembakaran senyawa yang terlibat. Oleh karena itu, perhitungan emisi CO₂ dilakukan berdasarkan kebutuhan energi total proses, yang kemudian dikonversikan menjadi nilai ekuivalen emisi karbon untuk mengetahui kontribusi metode reduksi penelitian ini terhadap lingkungan.

Berdasarkan data yang diperoleh, evaluasi terhadap emisi CO₂ sebaiknya dilakukan lebih komprehensif melalui *Life Cycle Assessment* (LCA). Hal ini disebabkan oleh keterbatasan informasi dalam studi sebelumnya, termasuk perbedaan metode, jenis dan kadar bijih nikel, serta metode perhitungan yang digunakan. Nilai emisi CO₂ sebesar 12,6 kg CO₂-eq/kg FeNi hingga 13,9 kg CO₂-eq/kg FeNi yang dilaporkan pada industri feronikel menunjukkan total emisi

dari seluruh tahapan proses, mulai dari penambangan (*mining*) hingga pemurnian (*refining*). Sementara itu, perhitungan emisi CO₂ dalam penelitian ini hanya pada tahapan proses reduksi. Meskipun cakupan perhitungannya berbeda, hasil perbandingan tetap menguatkan hipotesis bahwa penggunaan gas NH₃ sebagai reduktan alternatif dalam proses reduksi bijih nikel laterit mampu menurunkan emisi CO₂ secara signifikan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil melakukan proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan gas NH_3 dengan variasi penambahan Na_2SO_4 . Kesimpulan yang didapatkan dari hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penambahan Na_2SO_4 dan peningkatan waktu tahan berpengaruh terhadap peningkatan derajat reduksi dalam proses reduksi bijih nikel laterit menggunakan gas NH_3 . Efektivitas ini disebabkan oleh penambahan Na_2SO_4 dapat membuat distribusi Na_2SO_4 menjadi lebih seragam, mempercepat kinetika reaksi, serta memfasilitasi terbentuknya fasa FeS yang mendukung pembentukan partikel logam. Selain itu, peningkatan waktu tahan memungkinkan lebih banyak oksida besi dan nikel tereduksi. Derajat reduksi tertinggi dicapai pada penambahan 15 wt% Na_2SO_4 dengan waktu tahan 2 jam sebesar 82,74%. Namun, penurunan derajat reduksi terjadi pada penambahan 20 wt% Na_2SO_4 dan waktu tahan 3 jam. Hal ini sesuai teori, bahwa kelebihan aditif dapat membentuk terak dan menghambat kontak langsung antara gas NH_3 dan oksida logam. Selain itu, pada waktu tahan 3 jam yang diduga akibat reoksidasi produk reduksi yang telah terbentuk.
2. Penambahan Na_2SO_4 dan peningkatan waktu tahan berpengaruh terhadap kandungan Ni dan Fe dalam produk hasil reduksi bijih nikel laterit menggunakan gas NH_3 . Penambahan Na_2SO_4 sebesar 10% dan waktu tahan 120 menit memberikan kondisi paling optimal dalam proses reduksi bijih nikel laterit menggunakan gas NH_3 . Hal ini ditunjukkan oleh kadar tertinggi unsur nikel (1,21%) dan besi (12,28%) dalam produk hasil reduksi. Peningkatan waktu tahan menghasilkan proses reduksi yang optimal dari NiO menjadi Ni dan FeO menjadi Fe yang memperkaya kandungan logam. Seiring penambahan Na_2SO_4 menyebabkan peningkatan kandungan Fe dan Ni. Namun, kandungan Fe yang masih tinggi menunjukkan bahwa jumlah sulfur yang terbentuk belum cukup untuk mengikat seluruh Fe menjadi FeS , sehingga efisiensi pengikatan besi belum maksimal.
3. Penambahan Na_2SO_4 dan peningkatan waktu tahan berpengaruh terhadap mineralogi produk hasil reduksi bijih nikel laterit menggunakan gas NH_3 . Na_2SO_4 berperan dalam meningkatkan selektivitas reduksi nikel dengan membentuk fasa troilit (FeS) yang mengikat besi (Fe), sehingga mencegah pembentukan logam Fe dan meningkatkan kandungan nikel (Ni) yang dapat meningkatkan intensitas fasa feronikel (FeNi). Selain itu, peningkatan waktu tahan menghasilkan perolehan fasa Fe dan Ni yang lebih optimal. Diperoleh variasi yang memiliki perolehan fasa Fe dan Ni yang meningkat pada penambahan 15% Na_2SO_4 dalam waktu 2 jam dengan fasa utama feronikel (FeNi). Hal ini sesuai teori, bahwa penambahan Na_2SO_4 dan waktu tahan yang tepat dapat reduksi oksida besi dan nikel secara menyeluruh serta mendistribusikan fasa merata.
4. Penambahan Na_2SO_4 dan peningkatan waktu tahan berpengaruh signifikan terhadap morfologi produk reduksi. Na_2SO_4 berperan dalam pembentukan fasa troilit (FeS) yang mendorong pertumbuhan partikel feronikel menjadi lebih besar dan padat, serta menurunkan titik leleh slag agar mudah terpisah dari logam. Waktu tahan yang lebih lama juga mempercepat aglomerasi partikel logam. Hal ini sesuai teori, bahwa semakin tinggi dosis Na_2SO_4 dan waktu tahan, semakin optimal pembentukan partikel logam dan pemisahan slag.
5. Proses reduksi bijih nikel lateritik menggunakan gas NH_3 terbukti mampu menurunkan emisi CO_2 secara signifikan. Penelitian ini mencatat emisi sebesar 4,77 kg CO_2 -eq/kg FeNi yang hanya berasal dari konsumsi energi listrik pada tahap reduksi, jauh lebih rendah

dibandingkan emisi industri feronikel yang berkisar antara 12,6-13,9 kg CO₂-eq/kg FeNi pada keseluruhan tahap dari penambangan hingga pemurnian. Rendahnya emisi ini disebabkan karena tidak adanya pembentukan gas CO₂ selama proses reduksi dengan NH₃. Emisi CO₂ pada penelitian ini muncul secara tidak langsung akibat konsumsi energi selama proses reduksi, terutama karena energi listrik yang digunakan masih bersumber dari pembangkit berbahan bakar fosil yang menghasilkan emisi karbon.

5.2 Saran

Adapun saran yang perlu diperhatikan untuk penelitian selanjutnya berdasarkan penelitian ini agar diperoleh hasil yang lebih akurat adalah sebagai berikut:

1. Pengaturan laju alir gas NH₃ perlu dilakukan secara lebih teliti guna memperoleh hasil reduksi yang lebih akurat dan konsisten.
2. Proses pencampuran bijih nikel laterit dengan Na₂SO₄ sebaiknya dilakukan secara mekanis dan berulang untuk memastikan homogenitas sampel.
3. Penyimpanan sampel sebelum proses reduksi disarankan dilakukan dalam ruang vakum tertutup guna mencegah oksidasi awal.
4. Diperlukan penelitian lanjutan terkait mekanisme pemisahan logam Fe dan Ni dari unsur pengotor untuk meningkatkan kemurnian produk.
5. Studi perbandingan emisi CO₂ secara teoritis dari proses reduksi menggunakan gas NH₃ perlu dilakukan lebih lanjut guna memperoleh data emisi yang lebih representatif.

DAFTAR PUSTAKA

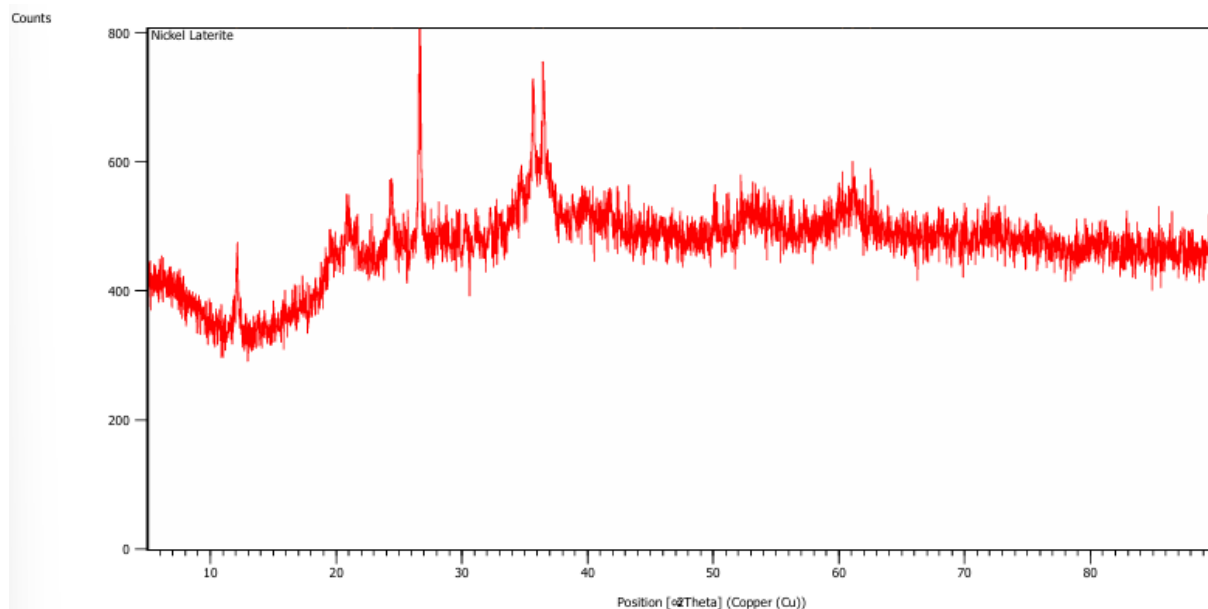
- Abdul, F., Iizuka, A., Jung, H., Ken, H., & Etsuro, A. (2023). Potential of major by - products from non - ferrous metal industries for - CO 2 emission reduction by mineral carbonation : a review. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 30, Issue 32). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27898-y>
- Abdul, F., Kusmayadi, R. T. N., Ardian, F., Setiyorini, Y., Ananda, M. B., & Pintowantoro, S. (2024). Selective reduction of nickel from lateritic ore using Na₂SO₄ in an NH₃ atmosphere. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10(October), 100989. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100989>
- Abdul, F., Pintowantoro, S., Kawigraha, A., & Nursidiq, A. (2018). Effects of reduction temperature to Ni and Fe content and the morphology of agglomerate of reduced laterite limonitic nickel ore by coal-bed method. *AIP Conference Proceedings*, 1945. <https://doi.org/10.1063/1.5030256>
- Abdul, F., Pintowantoro, S., & Yuwandono, R. B. (2018). Analysis of holding time variations to Ni and Fe content and morphology in nickel laterite limonitic reduction process by using coal-dolomite bed. *AIP Conference Proceedings*, 1945. <https://doi.org/10.1063/1.5030255>
- Bartzas, G., & Komnitsas, K. (2015). Life cycle assessment of ferronickel production in Greece. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.016>
- Chandra Yoga, J. P. (2022). *Proses Hidrometalurgi Ekstraksi Nikel Menggunakan Bijih Laterit Untuk Memproduksi Mhp*. March, 7. https://www.researchgate.net/publication/359506531_PROSES_HIDROMETALURGI_EKSTRAKSI_NIKEL_MENGGUNAKAN_BIJIH_LATERIT_UNTUK_MEMPRODUKSI_MHP
- Crundwell, F. K., Moats, M. S., Robinson, T. G., & Davenport, W. G. (1961). Extractive metallurgy of copper, nickel, and cobalt. In *Journal of the Franklin Institute* (Vol. 272, Issue 1). [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(61\)90684-6](https://doi.org/10.1016/0016-0032(61)90684-6)
- Dalvi, A. D., Bacon, W. G., & Osborne, R. C. (2004). The Past and the Future of Nickel Laterites World's Land Based Nickel Resources and Primary Nickel Production Nickel Production , kt / yr. *PDAC 2004 International Convention*, Figure 2, 1–27.
- Donald Barceloux, N. G., & Barceloux, D. (1999). For personal use only. *Clinical Toxicology*, 37(2), 239–258. www.dekker.com
- Fan, R., & Gerson, A. R. (2013). Mineralogical characterisation of Indonesian laterites prior to and post atmospheric leaching. *Hydrometallurgy*, 134–135, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.02.004>
- Gialanella, S., Girardi, F., Ischia, G., Lonardelli, I., Mattarelli, M., & Montagna, M. (2010). On the goethite to hematite phase transformation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 102(3), 867–873. <https://doi.org/10.1007/s10973-010-0756-2>
- Haque, N., & Norgate, T. (2013). Estimation of greenhouse gas emissions from ferroalloy production using life cycle assessment with particular reference to Australia. *Journal of Cleaner Production*, 39, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.010>
- Iwamoto, I., Kurniawan, A., Hasegawa, H., Kashiwaya, Y., Nomura, T., & Akiyama, T. (2022). Reduction Behaviors and Generated Phases of Iron Ores using Ammonia as Reducing Agent. *ISIJ International*, 62(12), 2483–2490. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-155>
- Jiang, M., Sun, T., Liu, Z., Kou, J., Liu, N., & Zhang, S. (2013). Mechanism of sodium sulfate in promoting selective reduction of nickel laterite ore during reduction roasting

- process. *International Journal of Mineral Processing*, 123, 32–38.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.04.005>
- Kyle, J. H. (2015). *to next ? In : ALTA 2010 Nickel / Cobalt / Copper Conference , 24 - 27 May , Perth , Western Australia . May 2010.*
- Li, G., Luo, J., Peng, Z., Zhang, Y., Rao, M., & Jiang, T. (2015). Effect of quaternary basicity on melting behavior and ferronickel particles growth of saprolitic laterite ores in Krupp-Renn process. *ISIJ International*, 55(9), 1828–1833.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-058>
- Li, G., Shi, T., Rao, M., Jiang, T., & Zhang, Y. (2012). Beneficiation of nickeliferous laterite by reduction roasting in the presence of sodium sulfate. *Minerals Engineering*, 32, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.012>
- Lu, J., Liu, S., Shangguan, J., Du, W., Pan, F., & Yang, S. (2013). The effect of sodium sulphate on the hydrogen reduction process of nickel laterite ore. *Minerals Engineering*, 49, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.023>
- Luo, J., Li, G., Rao, M., Peng, Z., Zhang, Y., & Jiang, T. (2015). Atmospheric leaching characteristics of nickel and iron in limonitic laterite with sulfuric acid in the presence of sodium sulfite. *Minerals Engineering*, 78, 38–44.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.030>
- Norgate, T., & Jahanshahi, S. (2011). Assessing the energy and greenhouse gas footprints of nickel laterite processing. *Minerals Engineering*, 24(7), 698–707.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.10.002>
- Nurjaman, F., Astuti, W., Bahfie, F., & Suharno, B. (2021). Study of selective reduction in lateritic nickel ore: Saprolite versus limonite. *Materials Today: Proceedings*, 44, 1488–1494. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.687>
- Nurjaman, F., Sa, A., & Suharno, B. (2019). *Optimal conditions for selective reduction process of Nickel Laterite Ore*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/523/1/012068>
- Pintowantoro, S., & Abdul, F. (2019). Selective reduction of laterite nickel ore. *Materials Transactions*, 60(11), 2245–2254. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2019101>
- Rao, M., Li, G., Zhang, X., Luo, J., Peng, Z., & Jiang, T. (2016). *Ac ce pt e t* (Vol. 6395, Issue March). <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1162173>
- Rizov, B. (2012). Phase transformations from goethite to hematite and thermal decomposition in various nickeliferous laterite ores. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 47(2), 207–210.
- Setiawan, I. (2016). Pengolahan Nikel Laterit Secara Pirometalurgi : Kini Dan Penelitian Kedepan. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi*, November, 1–7.
- Solar, M. Y., Candy, I., & Wasmund, B. (2008). Selection of optimum ferronickel grade for smelting nickel laterites. *CIM Bulletin*, 3(2), 101–108. <https://store.cim.org/en/selection-of-optimum-ferronickel-grade-for-smelting-nickel-laterites>
- Subagja, R., Prasetyo, A. B., & Sari, W. M. (2016). Peningkatan Kadar Nikel Dalam Laterit Jenis Limonit Dengan Cara Peletasi, Pemangangan Reduksi Dan Pemisahan Magnet Campuran Bijih, Batu Bara, Dan Na₂SO₄ [Upgrading of Nickel Content in The Limonitic Laterite Ores by Pelletizing, Reduction Roasting and Ma. *Metallurgi*, 31(2), 103. <https://doi.org/10.14203/metalurgi.v31i2.156>
- Suharno, B., Nurjaman, F., Ramadini, C., & Shofi, A. (2021). Additives in Selective Reduction of Lateritic Nickel Ores: Sodium Sulfate, Sodium Carbonate, and Sodium Chloride. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 38(5), 2145–2159.
<https://doi.org/10.1007/s42461-021-00456-1>
- Taruminkeng, S., Mustopa, E. J., & Hendrajaya, L. (2016). *Termodinamika Dalam*

- Memahami Proses Pengolahan Mineral. V*, SNF2016-ERE-37-SNF2016-ERE-42.
<https://doi.org/10.21009/0305020607>
- Valix, M., & Cheung, W. H. (2002). Study of phase transformation of laterite ores at high temperature. *Minerals Engineering*, 15(8), 607–612. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00068-7)
- Widyartha, B., Setiyorini, Y., Abdul, F., Subakti, T. J., & Pintowantoro, S. (2020). Effective beneficiation of low content nickel ferrous laterite using fluxing agent through Na₂SO₄ selective reduction. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 51(6), 750–757.
<https://doi.org/10.1002/mawe.202000007>
- Xueming, L. V., Wei, L. V., Mei, L. I. U., Zhixiong, Y. O. U., Xuewei, L. V., & Bai, C. (2018). Effect of sodium sulfate on preparation of ferronickel from nickel laterite by carbothermal reduction. *ISIJ International*, 58(5), 799–807.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-611>
- Yasuda, N., Mochizuki, Y., Tsubouchi, N., & Akiyama, T. (2015). Reduction and nitriding behavior of hematite with ammonia. *ISIJ International*, 55(4), 736–741.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.55.736>
- Yildirim, H., Morcali, H., Turan, A., & Yucel, O. (2020). Nickel pig iron production from lateritic nickel ores. *Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry, February 2018*, 237–244.
- Yudianto, Maksum, A., Delfiendra, & Soedarsono, J. W. (2018). Effects of temperature on the direct reduction of Southeast Sulawesi's limonite ore. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 105(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/105/1/012066>

LAMPIRAN

A. Hasil Pengujian XRD Bijih Nikel Laterit



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12,1150	118,57	0,1338	7,30561	39,02
20,9472	67,48	0,4015	4,24099	22,21
22,8610	82,04	0,0900	3,88688	27,00
24,3974	102,81	0,2007	3,64850	33,83
26,6397	303,87	0,1673	3,34627	100,00
35,6719	188,53	0,1673	2,51699	62,04
36,4860	206,27	0,1673	2,46268	67,88
50,0971	87,82	0,0900	1,81938	28,90
52,1936	94,80	0,0900	1,75112	31,20
60,2533	56,67	0,0900	1,53473	18,65
61,0931	74,39	0,0900	1,51563	24,48
62,5384	89,99	0,0900	1,48403	29,62

Pattern List:

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
	01-073-0603	47	Iron Oxide	0,000	0,535	Fe ₂ O ₃
	03-065-0466	36	Silicon Oxide	0,000	1,042	SiO ₂
	01-089-1683	8	Iron Aluminum Oxide	0,000	0,300	(Fe _{0.868} Al _{0.132})(Al _{1.868} Fe _{0.132})O ₄
	00-037-1461	14	Aluminum Silicate	0,000	0,163	Al _{1.4} Si _{0.3} O _{2.7}
	00-007-0156	8	Magnesium Iron Silicate	0,000	0,693	2(Mg _{0.88} Fe _{0.12})O ₂ SiO ₂
	01-080-0072	10	Nickel Iron Oxide	0,000	0,535	Ni _{1.43} Fe _{1.7} O ₄
	01-078-0643	No Matching Lines	Nickel Oxide	0,000	0,000	NiO
	00-050-1606	20	Magnesium Iron Silicate Hydroxide	0,000	0,295	(Mg, Fe) ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
	01-075-1556	6	Magnesium Iron Silicate	0,000	0,417	Fe _{0.2} Mg _{1.8} SiO ₄
	01-071-1081	7	Magnesium Silicate	0,000	0,377	Mg ₂ SiO ₄
	01-075-2078	31	Graphite	0,000	0,731	C
	00-052-1449	1	Iron Oxide	0,000	0,860	Fe ₂ O ₃
	01-081-0462	1	Iron Oxide Hydroxide	0,000	0,790	FeO(OH)
	00-009-0402	8	Cobalt Oxide	0,000	0,627	CoO

B. Hasil Perhitungan Derajat Reduksi Hasil Proses Reduksi

$$\text{Derajat reduksi}(\%) = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100 \dots\dots\dots$$

Dimana

$\Delta m = m_o - m'$

m_o = Massa awal sampel

m' = Massa akhir sampel

Δm oksigen = Massa oksigen yang hilang saat di reduksi menggunakan gas N₂

Oksigen pada Na₂SO₄ = Dihitung dengan perbandingan berat molekul O terhadap Na₂SO₄.

Oksigen pada bijih Fe dan Ni = Bijih Fe diasumsikan sebagai Fe₂O₃ dan bijih Ni diasumsikan sebagai NiO.

% Fe dan % Ni diperoleh dari hasil pengujian ICP-OES.

Δm oksigen dari pengujian TGA 8% dari massa awal sampel (pasca *drying*)

1. Penambahan 5 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 0.5 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,833 gr

Massa akhir : 0,693 gr

Δm oksigen : 0,067 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,140 gr

$$m_{Na_2SO_4} = \frac{\%Na_2SO_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m_{Na_2SO_4} = \frac{5}{100} \times 0,833 = 0,04165 \text{ gr}$$

$$m_{Fe} = \frac{\%Fe}{100} \times (\text{massa awal} - m_{Na_2SO_4})$$

$$m_{Fe} = \frac{34,32}{100} \times (0,833 - 0,04165) = 0,2716 \text{ gr}$$

$$m_{Fe_2O_3} = \frac{Mr_{Fe_2O_3}}{2 \times Ar_{Fe}} \times m_{Fe}$$

$$m_{Fe_2O_3} = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2716 = 0,3883 \text{ gr}$$

$$m_{Ni} = \frac{\%Ni}{100} \times (\text{massa awal} - m_{Na_2SO_4})$$

$$m_{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,833 - 0,04165) = 0,0104 \text{ gr}$$

$$m_{NiO} = \frac{Mr_{NiO}}{Ar_{Ni}} \times m_{Ni}$$

$$m_{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0104) = 0,01319 \text{ gr}$$

$$O \text{ in } Na_2SO_4 = \frac{4 \times Ar_{O}}{Mr_{Na_2SO_4}} \times m_{Na_2SO_4}$$

$$O \text{ in } Na_2SO_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,04165 = 0,0188 \text{ gr}$$

$$O \text{ in } Fe_2O_3 = \frac{3 \times Ar_{O}}{Mr_{Fe_2O_3}} \times m_{Fe_2O_3}$$

$$O \text{ in } Fe_2O_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3883 = 0,11672 \text{ gr}$$

$$O \text{ in } NiO = \frac{Ar_{O}}{Mr_{NiO}} \times m_{NiO}$$

$$O \text{ in } NiO = \frac{16}{74,6928} \times 0,01319 = 0,00283 \text{ gr}$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada } Na_2SO_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada } Na_2SO_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times Ar_{O}}{Mr_{Fe_2O_3}} \times m_{Fe_2O_3}\right) + \left(\frac{Ar_{O}}{Mr_{NiO}} \times m_{NiO}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,140 - 0,0188 - 0,067}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3883\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01319\right)} \times 100 = 45,66\%$$

2. Penambahan 5 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 1 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,842 gr

Massa akhir : 0,696 gr

Δm oksigen : 0,067 gr

Perhitungan :

$\Delta m = \text{massa awal} - \text{massa setelah reduksi} = 0,146 \text{ gr}$

$$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \frac{\% \text{Na}_2\text{SO}_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \frac{5}{100} \times 0,842 = 0,0421 \text{ gr}$$

$$m_{\text{Fe}} = \frac{\% \text{Fe}}{100} \times (\text{massa awal} - m_{\text{Na}_2\text{SO}_4})$$

$$m_{\text{Fe}} = \frac{34,32}{100} \times (0,834 - 0,0421) = 0,2745 \text{ gr}$$

$$m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3}{2 \times Ar \text{ Fe}} \times m_{\text{Fe}}$$

$$m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2745 = 0,3925 \text{ gr}$$

$$m_{\text{Ni}} = \frac{\% \text{Ni}}{100} \times (\text{massa awal} - m_{\text{Na}_2\text{SO}_4})$$

$$m_{\text{Ni}} = \frac{1,31}{100} \times (0,842 - 0,0421) = 0,0105 \text{ gr}$$

$$m_{\text{NiO}} = \frac{Mr \text{ NiO}}{Ar \text{ Ni}} \times m_{\text{Ni}}$$

$$m_{\text{NiO}} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0105) = 0,01334 \text{ gr}$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Na}_2\text{SO}_4} \times m \text{ Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,0421 = 0,0190 \text{ gr}$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3925 = 0,11798 \text{ gr}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{Ar \text{ O}}{Mr \text{ NiO}} \times m \text{ NiO}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{16}{74,6928} \times 0,01334 = 0,00286 \text{ gr}$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3} \times m_{\text{Fe}_2\text{O}_3}\right) + \left(\frac{Ar \text{ O}}{Mr \text{ NiO}} \times m_{\text{NiO}}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,146 - 0,0190 - 0,067}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3925\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01334\right)} \times 100 = 49,37\%$$

3. Penambahan 5 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 2 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,852 gr

Massa akhir : 0,683 gr

Δm oksigen : 0,068 gr

Perhitungan :

$$\Delta m = \text{massa awal} - \text{massa setelah reduksi} = 0,169 \text{ gr}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \frac{\% \text{Na}_2\text{SO}_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \frac{5}{100} \times 0,852 = 0,0426 \text{ gr}$$

$$m_{\text{Fe}} = \frac{\% \text{Fe}}{100} \times (\text{massa awal} - m_{\text{Na}_2\text{SO}_4})$$

$$m_{\text{Fe}} = \frac{34,32}{100} \times (0,852 - 0,0426) = 0,2778 \text{ gr}$$

$$m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3}{2 \times Ar \text{ Fe}} \times m_{\text{Fe}}$$

$$m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2778 = 0,3972 \text{ gr}$$

$$m_{\text{Ni}} = \frac{\% \text{Ni}}{100} \times (\text{massa awal} - m_{\text{Na}_2\text{SO}_4})$$

$$m_{\text{Ni}} = \frac{1,31}{100} \times (0,852 - 0,0426) = 0,0106 \text{ gr}$$

$$m_{\text{NiO}} = \frac{Mr \text{ NiO}}{Ar \text{ Ni}} \times m_{\text{Ni}}$$

$$m_{\text{NiO}} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0106) = 0,01349 \text{ gr}$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Na}_2\text{SO}_4} \times m \text{ Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,0426 = 0,0192 \text{ gr}$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3972 = 0,11938 \text{ gr}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{Ar \text{ O}}{Mr \text{ NiO}} \times m \text{ NiO}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{16}{74,6928} \times 0,01349 = 0,00289 \text{ gr}$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3} \times m_{\text{Fe}_2\text{O}_3}\right) + \left(\frac{Ar \text{ O}}{Mr \text{ NiO}} \times m_{\text{NiO}}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,169 - 0,0192 - 0,068}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3972\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01349\right)} \times 100 = 66,76\%$$

4. Penambahan 5 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 3 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,852 gr

Massa akhir : 0,692 gr

Δm oksigen : 0,068 gr

Perhitungan :

$$\Delta m = \text{massa awal} - \text{massa setelah reduksi} = 0,160 \text{ gr}$$

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{\% \text{Na}_2\text{SO}_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{5}{100} \times 0,852 = 0,0426 \text{ gr}$$

$$m\text{Fe} = \frac{\% \text{Fe}}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Fe} = \frac{34,32}{100} \times (0,860 - 0,0426) = 0,2778 \text{ gr}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{Mr \text{Fe}_2\text{O}_3}{2 \times Ar \text{Fe}} \times m\text{Fe}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2778 = 0,3972 \text{ gr}$$

$$m\text{Ni} = \frac{\% \text{Ni}}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,852 - 0,0426) = 0,0106 \text{ gr}$$

$$m\text{NiO} = \frac{Mr \text{NiO}}{Ar \text{Ni}} \times m\text{Ni}$$

$$m\text{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0106) = 0,01349 \text{ gr}$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times Ar \text{O}}{Mr \text{Na}_2\text{SO}_4} \times m \text{Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,0426 = 0,0192 \text{ gr}$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3 \times Ar \text{O}}{Mr \text{Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3972 = 0,11938 \text{ gr}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{Ar \text{O}}{Mr \text{NiO}} \times m \text{NiO}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{16}{74,6928} \times 0,01349 = 0,00289 \text{ gr}$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times Ar \text{O}}{Mr \text{Fe}_2\text{O}_3} \times m\text{Fe}_2\text{O}_3\right) + \left(\frac{Ar \text{O}}{Mr \text{NiO}} \times m\text{NiO}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,160 - 0,0192 - 0,068}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3972\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01349\right)} \times 100 = 59,40\%$$

5. Penambahan 10 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 0,5 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,838 gr

Massa akhir : 0,681 gr

Δm oksigen : 0,067 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,157 gr

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{\% \text{Na}_2\text{SO}_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{10}{100} \times 0,838 = 0,0838 \text{ gr}$$

$$mFe = \frac{\%Fe}{100} \times (massa\ awal - mNa_2SO_4)$$

$$mFe = \frac{34,32}{100} \times (0,838 - 0,0838) = 0,2588\text{ gr}$$

$$mFe_2O_3 = \frac{Mr\ Fe_2O_3}{2 \times Ar\ Fe} \times mFe$$

$$mFe_2O_3 = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2588 = 0,3701\text{ gr}$$

$$mNi = \frac{\%Ni}{100} \times (massa\ awal - mNa_2SO_4)$$

$$mNi = \frac{1,31}{100} \times (0,838 - 0,0838) = 0,0099\text{ gr}$$

$$mNiO = \frac{Mr\ NiO}{Ar\ Ni} \times mNi$$

$$mNiO = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0099) = 0,01257\text{ gr}$$

$$O\text{ in } Na_2SO_4 = \frac{4 \times Ar\ O}{Mr\ Na_2SO_4} \times m\ Na_2SO_4$$

$$O\text{ in } Na_2SO_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,0838 = 0,0378\text{ gr}$$

$$O\text{ in } Fe_2O_3 = \frac{3 \times Ar\ O}{Mr\ Fe_2O_3} \times m\ Fe_2O_3$$

$$O\text{ in } Fe_2O_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3701 = 0,11124\text{ gr}$$

$$O\text{ in } NiO = \frac{Ar\ O}{Mr\ NiO} \times m\ NiO$$

$$O\text{ in } NiO = \frac{16}{74,6928} \times 0,01257 = 0,00269\text{ gr}$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada } Na_2SO_4 - \Delta m\ \text{Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada } Na_2SO_4 - \Delta m\ \text{oksigen}}{\left(\frac{3 \times Ar\ O}{Mr\ Fe_2O_3} \times mFe_2O_3\right) + \left(\frac{Ar\ O}{Mr\ NiO} \times mNiO\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,157 - 0,0378 - 0,067}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3701\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01257\right)} \times 100 = 45,80\%$$

6. Penambahan 10 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 1 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,838 gr

Massa akhir : 0,675 gr

Δm oksigen : 0,067 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,163 gr

$$mNa_2SO_4 = \frac{\%Na_2SO_4}{100} \times massa\ awal$$

$$mNa_2SO_4 = \frac{10}{100} \times 0,838 = 0,0838\text{ gr}$$

$$mFe = \frac{\%Fe}{100} \times (massa\ awal - mNa_2SO_4)$$

$$mFe = \frac{34,32}{100} \times (0,838 - 0,0838) = 0,2588\text{ gr}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3}{2 \times Ar \text{ Fe}} \times m\text{Fe}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2588 = 0,3701 \text{ gr}$$

$$m\text{Ni} = \frac{\% \text{Ni}}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,838 - 0,0838) = 0,0099 \text{ gr}$$

$$m\text{NiO} = \frac{Mr \text{ NiO}}{Ar \text{ Ni}} \times m\text{Ni}$$

$$m\text{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0099) = 0,01257 \text{ gr}$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Na}_2\text{SO}_4} \times m \text{ Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,0838 = 0,0378 \text{ gr}$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3701 = 0,11124 \text{ gr}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{Ar \text{ O}}{Mr \text{ NiO}} \times m \text{ NiO}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{16}{74,6928} \times 0,01257 = 0,00269 \text{ gr}$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3} \times m\text{Fe}_2\text{O}_3\right) + \left(\frac{Ar \text{ O}}{Mr \text{ NiO}} \times m\text{NiO}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,163 - 0,0378 - 0,067}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3701\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01257\right)} \times 100 = 51,07\%$$

7. Penambahan 10 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 2 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,851 gr

Massa akhir : 0,650 gr

Δm oksigen : 0,068 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,201 gr

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{\% \text{Na}_2\text{SO}_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{10}{100} \times 0,851 = 0,0851 \text{ gr}$$

$$m\text{Fe} = \frac{\% \text{Fe}}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Fe} = \frac{34,32}{100} \times (0,851 - 0,0851) = 0,2629 \text{ gr}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3}{2 \times Ar \text{ Fe}} \times m\text{Fe}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2629 = 0,3758 \text{ gr}$$

$$m_{Ni} = \frac{\%Ni}{100} \times (massa\ awal - m_{Na_2SO_4})$$

$$m_{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,851 - 0,0851) = 0,0100\ gr$$

$$m_{NiO} = \frac{Mr\ NiO}{Ar\ Ni} \times m_{Ni}$$

$$m_{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0100) = 0,01277\ gr$$

$$O\ in\ Na_2SO_4 = \frac{4 \times Ar\ O}{Mr\ Na_2SO_4} \times m\ Na_2SO_4$$

$$O\ in\ Na_2SO_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,0851 = 0,0384\ gr$$

$$O\ in\ Fe_2O_3 = \frac{3 \times Ar\ O}{Mr\ Fe_2O_3} \times m\ Fe_2O_3$$

$$O\ in\ Fe_2O_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3758 = 0,11297\ gr$$

$$O\ in\ NiO = \frac{Ar\ O}{Mr\ NiO} \times m\ NiO$$

$$O\ in\ NiO = \frac{16}{74,6928} \times 0,01277 = 0,00274\ gr$$

$$Derajat\ Reduksi\ (\%) = \frac{Massa\ oksigen\ yang\ hilang - Oksigen\ pada\ Na_2SO_4 - \Delta m\ Oksigen}{Oksigen\ pada\ bijih\ Fe\ dan\ Ni} \times 100$$

$$Derajat\ Reduksi\ (\%) = \frac{\Delta m - Oksigen\ pada\ Na_2SO_4 - \Delta m\ oksigen}{\left(\frac{3 \times Ar\ O}{Mr\ Fe_2O_3} \times m_{Fe_2O_3}\right) + \left(\frac{Ar\ O}{Mr\ NiO} \times m_{NiO}\right)} \times 100$$

$$Derajat\ Reduksi\ (\%) = \frac{0,201 - 0,0384 - 0,068}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3758\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01277\right)} \times 100 = 81,73\%$$

8. Penambahan 10 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 3 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,853 gr

Massa akhir : 0,676 gr

Δm oksigen : 0,068 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,177 gr

$$m_{Na_2SO_4} = \frac{\%Na_2SO_4}{100} \times massa\ awal$$

$$m_{Na_2SO_4} = \frac{10}{100} \times 0,853 = 0,0853\ gr$$

$$m_{Fe} = \frac{\%Fe}{100} \times (massa\ awal - m_{Na_2SO_4})$$

$$m_{Fe} = \frac{34,32}{100} \times (0,853 - 0,0853) = 0,2635\ gr$$

$$m_{Fe_2O_3} = \frac{Mr\ Fe_2O_3}{2 \times Ar\ Fe} \times m_{Fe}$$

$$m_{Fe_2O_3} = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2635 = 0,3767\ gr$$

$$m_{Ni} = \frac{\%Ni}{100} \times (massa\ awal - m_{Na_2SO_4})$$

$$m_{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,853 - 0,0853) = 0,0101\ gr$$

$$m\text{NiO} = \frac{Mr \text{ NiO}}{Ar \text{ Ni}} \times m\text{Ni}$$

$$m\text{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0101) = 0,01280 \text{ gr}$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Na}_2\text{SO}_4} \times m \text{ Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,0853 = 0,0384 \text{ gr}$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3767 = 0,11323 \text{ gr}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{Ar \text{ O}}{Mr \text{ NiO}} \times m \text{ NiO}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{16}{74,6928} \times 0,01280 = 0,00274 \text{ gr}$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{ Fe}_2\text{O}_3\right) + \left(\frac{Ar \text{ O}}{Mr \text{ NiO}} \times m \text{ NiO}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,177 - 0,0384 - 0,068}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3767\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01280\right)} \times 100 = 60,63\%$$

9. Penambahan 15 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 0,5 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,841 gr

Massa akhir : 0,654 gr

Δm oksigen : 0,067 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,187 gr

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{\% \text{Na}_2\text{SO}_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{15}{100} \times 0,841 = 0,12615 \text{ gr}$$

$$m\text{Fe} = \frac{\% \text{Fe}}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Fe} = \frac{34,32}{100} \times (0,841 - 0,12615) = 0,2453 \text{ gr}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3}{2 \times Ar \text{ Fe}} \times m\text{Fe}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2453 = 0,3508 \text{ gr}$$

$$m\text{Ni} = \frac{\% \text{Ni}}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,841 - 0,12615) = 0,0094 \text{ gr}$$

$$m\text{NiO} = \frac{Mr \text{ NiO}}{Ar \text{ Ni}} \times m\text{Ni}$$

$$m\text{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0094) = 0,01192 \text{ gr}$$

$$\begin{aligned} \text{O in Na}_2\text{SO}_4 &= \frac{4 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Na}_2\text{SO}_4} \times m \text{ Na}_2\text{SO}_4 \\ \text{O in Na}_2\text{SO}_4 &= \frac{4 \times 16}{142} \times 0,12615 = 0,0569 \text{ gr} \\ \text{O in Fe}_2\text{O}_3 &= \frac{3 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{ Fe}_2\text{O}_3 \\ \text{O in Fe}_2\text{O}_3 &= \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3508 = 0,10544 \text{ gr} \\ \text{O in NiO} &= \frac{\text{Ar O}}{\text{Mr NiO}} \times m \text{ NiO} \\ \text{O in NiO} &= \frac{16}{74,6928} \times 0,01192 = 0,00255 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Derajat Reduksi (\%)} &= \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100 \\ \text{Derajat Reduksi (\%)} &= \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{ Fe}_2\text{O}_3\right) + \left(\frac{\text{Ar O}}{\text{Mr NiO}} \times m \text{ NiO}\right)} \times 100 \\ \text{Derajat Reduksi (\%)} &= \frac{0,187 - 0,0569 - 0,067}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3508\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01192\right)} \times 100 = 58,21\% \end{aligned}$$

10. Penambahan 15 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 1 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,857 gr

Massa akhir : 0,662 gr

Δm oksigen : 0,069 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,195 gr

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{\% \text{Na}_2\text{SO}_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{15}{100} \times 0,857 = 0,12855 \text{ gr}$$

$$m\text{Fe} = \frac{\% \text{Fe}}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Fe} = \frac{34,32}{100} \times (0,857 - 0,12855) = 0,2500 \text{ gr}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3}{2 \times \text{Ar Fe}} \times m\text{Fe}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2500 = 0,3574 \text{ gr}$$

$$m\text{Ni} = \frac{\% \text{Ni}}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,857 - 0,12855) = 0,0095 \text{ gr}$$

$$m\text{NiO} = \frac{\text{Mr NiO}}{\text{Ar Ni}} \times m\text{Ni}$$

$$m\text{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0095) = 0,01214 \text{ gr}$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Na}_2\text{SO}_4} \times m \text{ Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,12855 = 0,0579 \text{ gr}$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3574 = 0,10744 \text{ gr}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{\text{Ar O}}{\text{Mr NiO}} \times m \text{ NiO}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{16}{74,6928} \times 0,01214 = 0,00260 \text{ gr}$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{ Fe}_2\text{O}_3\right) + \left(\frac{\text{Ar O}}{\text{Mr NiO}} \times m \text{ NiO}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,195 - 0,0579 - 0,069}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3574\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01214\right)} \times 100 = 62,25\%$$

11. Penambahan 15 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 2 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,843 gr

Massa akhir : 0,629 gr

Δm oksigen : 0,067 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,214 gr

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{\% \text{Na}_2\text{SO}_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{15}{100} \times 0,843 = 0,12645 \text{ gr}$$

$$m\text{Fe} = \frac{\% \text{Fe}}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Fe} = \frac{34,32}{100} \times (0,843 - 0,12645) = 0,2459 \text{ gr}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3}{2 \times \text{Ar Fe}} \times m\text{Fe}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2459 = 0,3516 \text{ gr}$$

$$m\text{Ni} = \frac{\% \text{Ni}}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,857 - 0,12645) = 0,0094 \text{ gr}$$

$$m\text{NiO} = \frac{\text{Mr NiO}}{\text{Ar Ni}} \times m\text{Ni}$$

$$m\text{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0094) = 0,01195 \text{ gr}$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Na}_2\text{SO}_4} \times m \text{ Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,12645 = 0,0570 \text{ gr}$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3516 = 0,10569 \text{ gr}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{Ar\ O}{Mr\ NiO} \times m\ NiO$$

$$\text{O in NiO} = \frac{16}{74,6928} \times 0,01195 = 0,00256\ gr$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m\ \text{Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m\ \text{oksigen}}{\left(\frac{3 \times Ar\ O}{Mr\ Fe_2O_3} \times m\ Fe_2O_3\right) + \left(\frac{Ar\ O}{Mr\ NiO} \times m\ NiO\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,214 - 0,0570 - 0,067}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3516\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01195\right)} \times 100 = 82,74\%$$

12. Penambahan 15 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 3 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,863 gr

Massa akhir : 0,657 gr

Δm oksigen : 0,069 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,206 gr

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{\%Na_2SO_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{15}{100} \times 0,863 = 0,12945\ gr$$

$$m\text{Fe} = \frac{\%Fe}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Fe} = \frac{34,32}{100} \times (0,863 - 0,12945) = 0,2518\ gr$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{Mr\ Fe_2O_3}{2 \times Ar\ Fe} \times m\text{Fe}$$

$$m\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2518 = 0,3599\ gr$$

$$m\text{Ni} = \frac{\%Ni}{100} \times (\text{massa awal} - m\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m\text{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,857 - 0,12945) = 0,0096\ gr$$

$$m\text{NiO} = \frac{Mr\ NiO}{Ar\ Ni} \times m\text{Ni}$$

$$m\text{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0096) = 0,01223\ gr$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times Ar\ O}{Mr\ Na_2SO_4} \times m\ Na_2SO_4$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,12945 = 0,0583\ gr$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3 \times Ar\ O}{Mr\ Fe_2O_3} \times m\ Fe_2O_3$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3599 = 0,10819\ gr$$

$$\text{O in NiO} = \frac{Ar\ O}{Mr\ NiO} \times m\ NiO$$

$$\text{O in NiO} = \frac{16}{74,6928} \times 0,01223 = 0,00262\ gr$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{Fe}_2\text{O}_3\right) + \left(\frac{\text{Ar O}}{\text{Mr NiO}} \times m \text{NiO}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,206 - 0,0583 - 0,069}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3599\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01223\right)} \times 100 = 70,94\%$$

13. Penambahan 20 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 0,5 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,860 gr

Massa akhir : 0,659 gr

Δm oksigen : 0,069 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,201 gr

$$m \text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{\% \text{Na}_2\text{SO}_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m \text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{20}{100} \times 0,860 = 0,172 \text{ gr}$$

$$m \text{Fe} = \frac{\% \text{Fe}}{100} \times (\text{massa awal} - m \text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m \text{Fe} = \frac{34,32}{100} \times (0,860 - 0,172) = 0,2361 \text{ gr}$$

$$m \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3}{2 \times \text{Ar Fe}} \times m \text{Fe}$$

$$m \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2361 = 0,3376 \text{ gr}$$

$$m \text{Ni} = \frac{\% \text{Ni}}{100} \times (\text{massa awal} - m \text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m \text{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,860 - 0,172) = 0,0090 \text{ gr}$$

$$m \text{NiO} = \frac{\text{Mr NiO}}{\text{Ar Ni}} \times m \text{Ni}$$

$$m \text{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0090) = 0,01147 \text{ gr}$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Na}_2\text{SO}_4} \times m \text{Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,172 = 0,0775 \text{ gr}$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3376 = 0,10148 \text{ gr}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{\text{Ar O}}{\text{Mr NiO}} \times m \text{NiO}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{16}{74,6928} \times 0,01280 = 0,00246 \text{ gr}$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{Fe}_2\text{O}_3\right) + \left(\frac{\text{Ar O}}{\text{Mr NiO}} \times m \text{NiO}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,201 - 0,0775 - 0,069}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3767\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01147\right)} \times 100 = 52,60\%$$

14. Penambahan 20 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 1 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,838 gr

Massa akhir : 0,641 gr

Δm oksigen : 0,067 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,197 gr

$$m \text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{\% \text{Na}_2\text{SO}_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m \text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{20}{100} \times 0,838 = 0,197 \text{ gr}$$

$$m \text{Fe} = \frac{\% \text{Fe}}{100} \times (\text{massa awal} - m \text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m \text{Fe} = \frac{34,32}{100} \times (0,838 - 0,197) = 0,1676 \text{ gr}$$

$$m \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3}{2 \times \text{Ar Fe}} \times m \text{Fe}$$

$$m \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,1676 = 0,3290 \text{ gr}$$

$$m \text{Ni} = \frac{\% \text{Ni}}{100} \times (\text{massa awal} - m \text{Na}_2\text{SO}_4)$$

$$m \text{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,838 - 0,197) = 0,0088 \text{ gr}$$

$$m \text{NiO} = \frac{\text{Mr NiO}}{\text{Ar Ni}} \times m \text{Ni}$$

$$m \text{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0088) = 0,01118 \text{ gr}$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Na}_2\text{SO}_4} \times m \text{Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,197 = 0,0755 \text{ gr}$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3290 = 0,09888 \text{ gr}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{\text{Ar O}}{\text{Mr NiO}} \times m \text{NiO}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{16}{74,6928} \times 0,01118 = 0,00239 \text{ gr}$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times \text{Ar O}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{Fe}_2\text{O}_3\right) + \left(\frac{\text{Ar O}}{\text{Mr NiO}} \times m \text{NiO}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,197 - 0,0755 - 0,067}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3290\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01118\right)} \times 100 = 53,73\%$$

15. Penambahan 20 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 2 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,856 gr

Massa akhir : 0,644 gr

Δm oksigen : 0,068 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,212 gr

$$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \frac{\% \text{Na}_2\text{SO}_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \frac{20}{100} \times 0,856 = 0,1712 \text{ gr}$$

$$m_{\text{Fe}} = \frac{\% \text{Fe}}{100} \times (\text{massa awal} - m_{\text{Na}_2\text{SO}_4})$$

$$m_{\text{Fe}} = \frac{34,32}{100} \times (0,856 - 0,1712) = 0,2301 \text{ gr}$$

$$m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3}{2 \times Ar \text{ Fe}} \times m_{\text{Fe}}$$

$$m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2301 = 0,3360 \text{ gr}$$

$$m_{\text{Ni}} = \frac{\% \text{Ni}}{100} \times (\text{massa awal} - m_{\text{Na}_2\text{SO}_4})$$

$$m_{\text{Ni}} = \frac{1,31}{100} \times (0,856 - 0,1712) = 0,0090 \text{ gr}$$

$$m_{\text{NiO}} = \frac{Mr \text{ NiO}}{Ar \text{ Ni}} \times m_{\text{Ni}}$$

$$m_{\text{NiO}} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0090) = 0,01142 \text{ gr}$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Na}_2\text{SO}_4} \times m \text{ Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{O in Na}_2\text{SO}_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,1712 = 0,0772 \text{ gr}$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3} \times m \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{O in Fe}_2\text{O}_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3360 = 0,10100 \text{ gr}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{Ar \text{ O}}{Mr \text{ NiO}} \times m \text{ NiO}$$

$$\text{O in NiO} = \frac{16}{74,6928} \times 0,01142 = 0,00245 \text{ gr}$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada Na}_2\text{SO}_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times Ar \text{ O}}{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3} \times m_{\text{Fe}_2\text{O}_3}\right) + \left(\frac{Ar \text{ O}}{Mr \text{ NiO}} \times m_{\text{NiO}}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,212 - 0,0772 - 0,068}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3360\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01142\right)} \times 100 = 64,14\%$$

16. Penambahan 20 wt% Na₂SO₄ dan waktu tahan 3 jam

Diketahui :

Massa Awal : 0,855 gr

Massa akhir : 0,645 gr

Δm oksigen : 0,068 gr

Perhitungan :

Δm = massa awal – massa setelah reduksi = 0,210 gr

$$m_{Na_2SO_4} = \frac{\%Na_2SO_4}{100} \times \text{massa awal}$$

$$m_{Na_2SO_4} = \frac{20}{100} \times 0,855 = 0,171 \text{ gr}$$

$$m_{Fe} = \frac{\%Fe}{100} \times (\text{massa awal} - m_{Na_2SO_4})$$

$$m_{Fe} = \frac{34,32}{100} \times (0,855 - 0,171) = 0,2347 \text{ gr}$$

$$m_{Fe_2O_3} = \frac{Mr_{Fe_2O_3}}{2 \times Ar_{Fe}} \times m_{Fe}$$

$$m_{Fe_2O_3} = \frac{159,69}{2 \times (55,845)} \times 0,2347 = 0,3356 \text{ gr}$$

$$m_{Ni} = \frac{\%Ni}{100} \times (\text{massa awal} - m_{Na_2SO_4})$$

$$m_{Ni} = \frac{1,31}{100} \times (0,855 - 0,171) = 0,0090 \text{ gr}$$

$$m_{NiO} = \frac{Mr_{NiO}}{Ar_{Ni}} \times m_{Ni}$$

$$m_{NiO} = \frac{74,6928}{58,6934} \times (0,0090) = 0,01140 \text{ gr}$$

$$O \text{ in } Na_2SO_4 = \frac{4 \times Ar_{O}}{Mr_{Na_2SO_4}} \times m_{Na_2SO_4}$$

$$O \text{ in } Na_2SO_4 = \frac{4 \times 16}{142} \times 0,171 = 0,0771 \text{ gr}$$

$$O \text{ in } Fe_2O_3 = \frac{3 \times Ar_{O}}{Mr_{Fe_2O_3}} \times m_{Fe_2O_3}$$

$$O \text{ in } Fe_2O_3 = \frac{3(16)}{159,69} \times 0,3356 = 0,10089 \text{ gr}$$

$$O \text{ in } NiO = \frac{Ar_{O}}{Mr_{NiO}} \times m_{NiO}$$

$$O \text{ in } NiO = \frac{16}{74,6928} \times 0,01140 = 0,00244 \text{ gr}$$

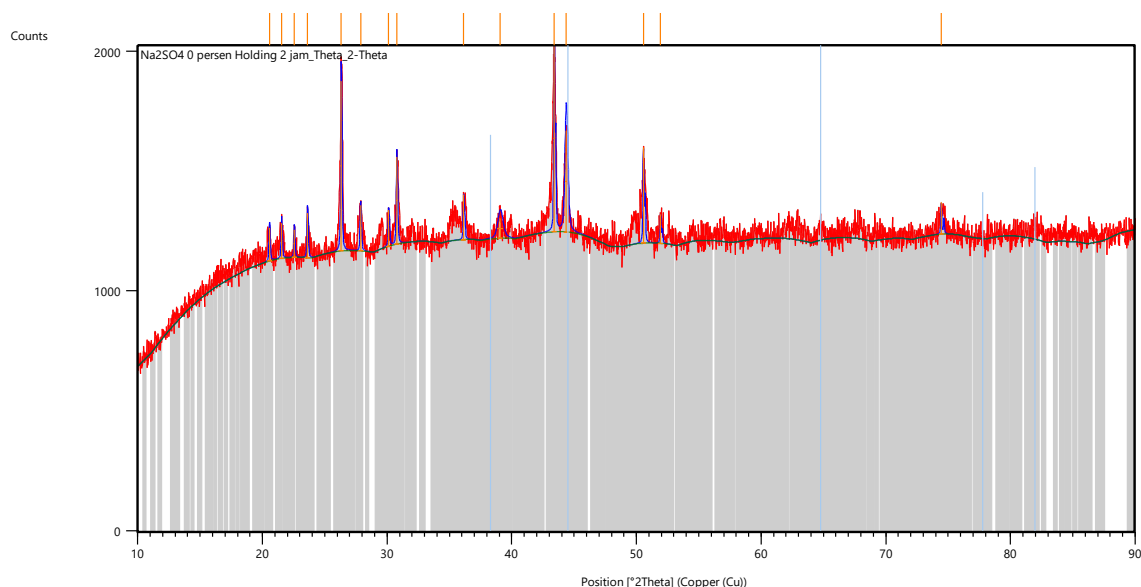
$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\text{Massa oksigen yang hilang} - \text{Oksigen pada } Na_2SO_4 - \Delta m \text{ Oksigen}}{\text{Oksigen pada bijih Fe dan Ni}} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{\Delta m - \text{Oksigen pada } Na_2SO_4 - \Delta m \text{ oksigen}}{\left(\frac{3 \times Ar_{O}}{Mr_{Fe_2O_3}} \times m_{Fe_2O_3}\right) + \left(\frac{Ar_{O}}{Mr_{NiO}} \times m_{NiO}\right)} \times 100$$

$$\text{Derajat Reduksi (\%)} = \frac{0,210 - 0,0771 - 0,068}{\left(\frac{48}{159,69} \times 0,3356\right) + \left(\frac{16}{74,6928} \times 0,01140\right)} \times 100 = 62,45\%$$

C. Hasil Pengujian XRD Produk Hasil Reduksi

1. Hasil XRD Produk Penambahan 0% Na₂SO₄



Peak List :

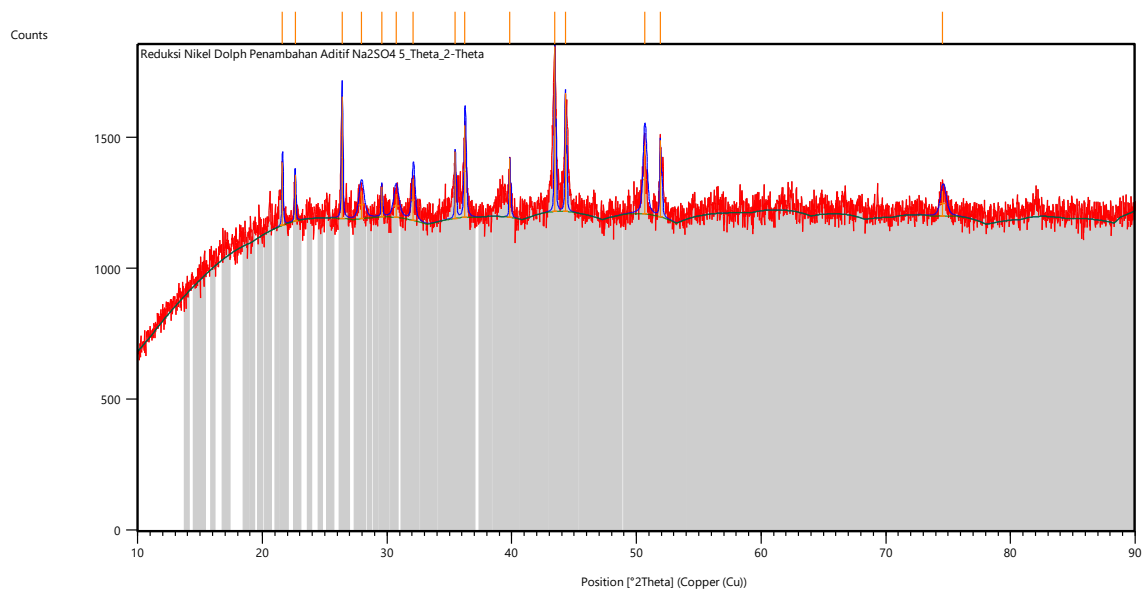
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20,5613	138,84	0,0900	4,31612	17,51
21,5304	147,01	0,0900	4,12399	18,54
22,5527	116,00	0,0900	3,93932	14,63
23,6120	186,60	0,0900	3,76493	23,54
26,3145	708,75	0,0900	3,38408	89,41
27,8737	190,54	0,0900	3,19822	24,04
30,1245	150,24	0,0900	2,96419	18,95
30,7791	364,44	0,0900	2,90262	45,97
36,1452	188,14	0,0900	2,48306	23,73
39,0618	82,85	0,4723	2,30602	10,45
43,4095	792,72	0,0900	2,08288	100,00
44,3552	421,35	0,2362	2,04233	53,15
50,5611	399,68	0,0900	1,80376	50,42
51,9409	121,76	0,0900	1,75904	15,36
74,4491	132,81	0,0900	1,27335	16,75

Pattern List :

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
	00-051-1377	1	Silicon Oxide	0,000	1,617	Si O2
	01-089-8940	27	Silicon Oxide	0,000	0,949	Si O2
	00-013-0230	9	Magnesium	0,000	0,201	Mg2 Si O4

01-075-1406	3	Silicate Magnesium	0,000	0,453	Mg Si O3
01-080-0568	1	Silicate Magnesium	0,000	0,748	Mg Si O3
		Silicon			
		Oxide			
96-901-6814	4	Magnetite	0,000	1,157	Fe24.00 O32.00
96-900-5813	3	Magnetite	0,000	0,550	Fe24.00 O32.00
96-900-5839	2	Magnetite	0,000	0,767	Fe24.00 O32.00
01-076-0958	1	Iron Oxide	0,000	0,521	Fe3 O4
01-089-7128	24	Nickel	0,000	0,500	Ni
96-901-2986	22	Nickel	0,000	0,500	Ni4.00
96-901-2970	10	Nickel	0,000	0,203	Ni4.00
96-901-5331	14	Iron	0,000	0,338	Fe4.00
01-085-1410	29	Iron	0,000	0,539	Fe
01-089-4186	5	Iron	0,000	0,182	Fe
00-025-1402	2	Iron Oxide	0,000	4,303	Fe2 O3
00-052-1449	1	Iron Oxide	0,000	0,406	Fe2 O3
01-077-2355	1	Iron Oxide	0,000	0,111	Fe O
01-075-1550	5	Iron Oxide	0,000	0,203	Fe O
00-003-1206	-	Iron Nickel	-	-	Fe Ni

2. Hasil XRD Produk Penambahan 5% Na₂SO₄



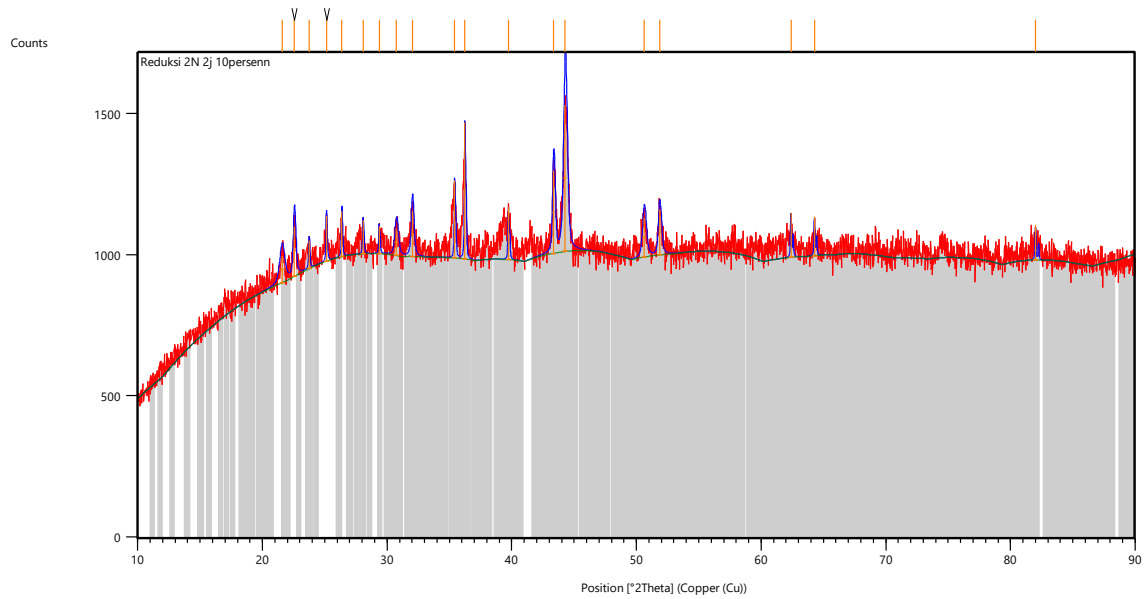
Peak List :

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
21,6039	240,03	0,0900	4,11014	37,99
22,6207	175,57	0,0900	3,92762	27,79
26,3797	464,69	0,0984	3,37866	73,55
27,9299	102,13	0,4723	3,19456	16,16
29,5619	115,74	0,0900	3,01931	18,32
30,7187	88,32	0,4723	2,91060	13,98
32,0903	158,14	0,2755	2,78926	25,03
35,4617	255,87	0,0900	2,52934	40,50
36,2398	352,66	0,1574	2,47885	55,82
39,8421	226,25	0,0900	2,26076	35,81
43,4401	631,79	0,0900	2,08148	100,00
44,3007	452,87	0,0900	2,04303	71,68
50,6516	261,89	0,3149	1,80225	41,45
51,9183	292,25	0,1181	1,76121	46,26
74,5550	94,59	0,4723	1,27285	14,97

Pattern List :

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
	96-901-3034	59	Nickel	0,000	0,941	Ni4.00
	01-087-0712	25	Nickel	0,000	0,451	Ni
	96-901-3001	23	Nickel	0,000	0,447	Ni4.00
	01-075-2165	2	Iron Sulfide	0,000	0,114	Fe S
	00-049-1632	3	Iron Sulfide	0,000	0,643	Fe S
	01-080-1029	4	Iron Sulfide	0,000	0,345	Fe S
	01-089-6271	2	Iron Sulfide	0,000	0,372	Fe S
	01-075-1550	4	Iron Oxide	0,000	0,436	Fe O
	01-077-2355	2	Iron Oxide	0,000	0,223	Fe O
	00-001-1252	5	Iron	0,000	0,194	Fe
	96-901-3488	4	Iron	0,000	0,164	Fe2.00
	96-901-6507	2	Iron	0,000	0,747	Fe4.00
	00-027-0605	26	Silicon Oxide	0,000	0,376	Si O2
	01-089-8941	16	Silicon Oxide	0,000	0,502	Si O2
	01-082-1557	6	Silicon Oxide	0,000	0,164	Si O2
	01-082-1571	4	Silicon Oxide	0,000	0,174	Si O2
	01-074-1686	17	Magnesium Silicate	0,000	0,383	Mg2 Si O4
	01-071-1082	12	Magnesium Silicate	0,000	0,278	Mg2 Si O4
	00-011-0273	1	Magnesium Silicate	0,000	0,393	Mg Si O3
	00-047-1417	-	Iron Nickel	-	-	(Fe , Ni)
	00-003-1017	-	Iron Nickel	-	-	Fe Ni
	00-018-0646	-	Iron Nickel	-	-	Fe Ni
	96-901-6803	-	Magnetite	-	-	Fe24.00 O32.00
	01-075-1610	-	Iron Oxide	-	-	Fe3 O4
	00-024-0072	-	Iron Oxide	-	-	Fe2 O3
	01-079-1741	-	Iron Oxide	-	-	Fe2 O3

3. Hasil XRD Produk Penambahan 10% Na₂SO₄



Peak List :

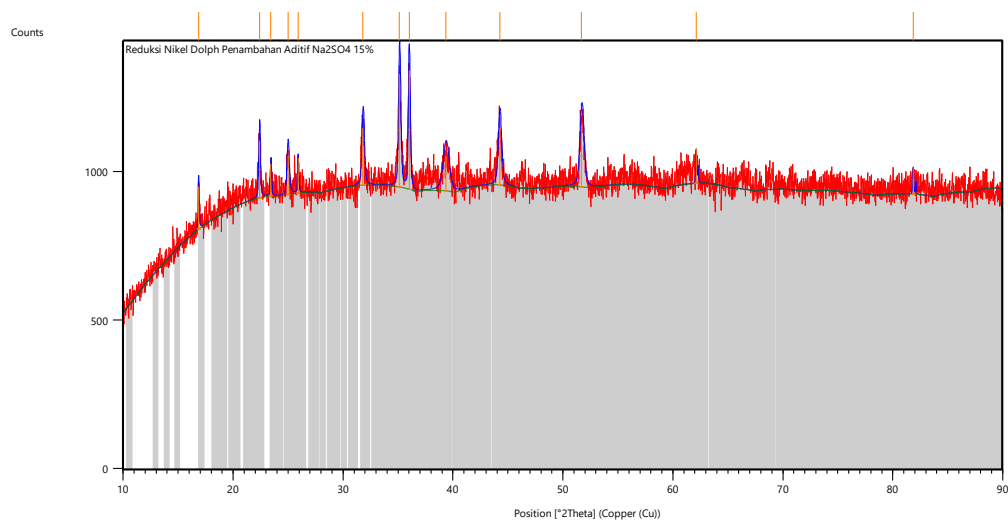
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
21,5771	94,22	0,4723	4,11858	18,12
22,5662	174,73	0,2362	3,94025	33,61
23,7403	100,17	0,0900	3,74487	19,27
25,1352	159,38	0,0900	3,54012	30,66
26,3649	160,37	0,0900	3,37772	30,85
28,0718	118,85	0,0900	3,17610	22,86
29,3624	97,28	0,0900	3,03937	18,71
30,7499	95,87	0,3149	2,90772	18,44
32,0271	161,05	0,2362	2,79462	30,98
35,4222	276,48	0,0900	2,53207	53,18
36,2440	484,81	0,0900	2,47652	93,26
39,7352	184,54	0,0900	2,26660	35,50
43,3555	293,61	0,1968	2,08708	56,48
44,2791	519,86	0,3149	2,04567	100,00
50,6110	139,65	0,3149	1,80359	26,86
51,8528	161,45	0,2362	1,76328	31,06
62,3939	155,87	0,0900	1,48712	29,98
64,2765	138,23	0,0900	1,44803	26,59
82,0078	123,69	0,0900	1,17404	23,79

Pattern List :

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
	00-047-1417	18	Iron Nickel	0,000	0,446	(Fe, Ni)
	00-003-1044	13	Iron Nickel	0,000	0,288	Fe Ni
	00-012-0736	4	Iron Nickel	0,000	0,176	(Ni, Fe)
	96-901-3482	37	Iron	0,000	0,804	Fe2.00
	96-901-5331	25	Iron	0,000	0,702	Fe4.00
	96-901-3475	20	Iron	0,000	0,553	Fe2.00
	96-901-3035	18	Nickel	0,000	0,375	Ni4.00

01-089-7129	1	Nickel	0,000	0,735	Ni
96-901-6811	21	Magnetite	0,000	0,820	Fe ₂₄ O ₃₂
00-003-0863	15	Iron Oxide	0,000	0,511	Fe ₃ O ₄
01-076-1849	13	Iron Oxide	0,000	0,334	Fe ₃ O ₄
00-039-1346	2	Iron Oxide	0,000	2,608	Fe ₂ O ₃
01-076-1821	0	Iron Oxide	0,000	0,904	Fe ₂ O ₃
00-025-1402	1	Iron Oxide	0,000	2,758	Fe ₂ O ₃
01-089-0690	3	Iron Oxide	0,000	1,212	Fe O
01-077-2355	3	Iron Oxide	0,000	0,355	Fe O
01-089-4076	1	Iron Sulfide	0,000	0,096	Fe S
00-001-1247	2	Iron Sulfide	0,000	0,176	Fe S
00-011-0273	2	Magnesium Silicate	0,000	0,104	Mg Si O ₃
00-022-0714	-	Magnesium Silicate	-	-	Mg Si O ₃
01-082-1235	-	Silicon Oxide	-	-	Si O ₂
01-089-3435	-	Silicon Oxide	-	-	Si O ₂

4. Hasil XRD Produk Penambahan 15% Na₂SO₄



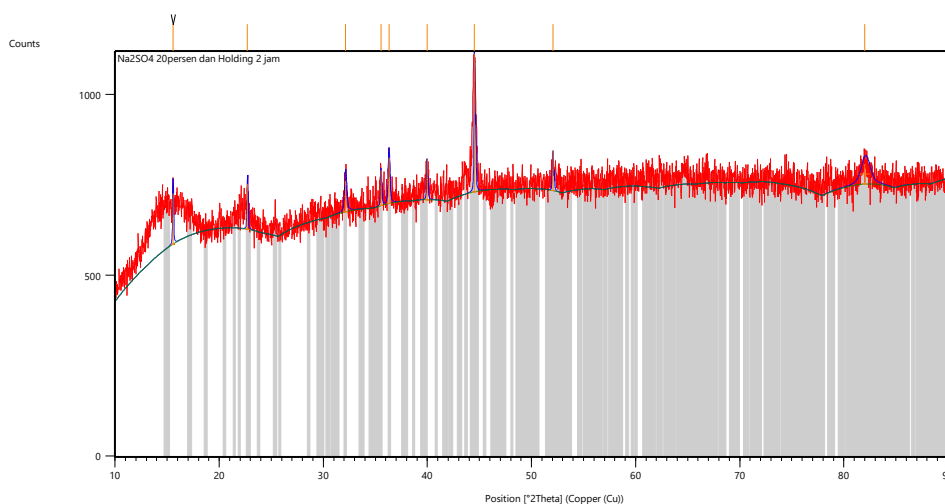
Peak List :

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
16,8562	142,69	0,0900	5,25558	35,63
22,3995	194,46	0,1574	3,96920	48,56
23,4318	108,76	0,0900	3,79348	27,16
24,9883	131,47	0,2362	3,56354	32,83
25,8974	117,91	0,0900	3,43763	29,45
31,8153	193,49	0,2362	2,81274	48,32
35,1258	381,26	0,1968	2,55486	95,21
36,0065	400,42	0,1574	2,49437	100,00
39,3575	115,79	0,6298	2,28937	28,92
44,2404	190,76	0,3149	2,04737	47,64
51,6983	207,71	0,3936	1,76819	51,87
62,1244	119,69	0,0900	1,49292	29,89
81,8591	87,13	0,0900	1,17579	21,76

Pattern List :

01-074-0816	1	Silicate Magnesium	0,000	2,170	Mg Si O3
00-011-0273	1	Silicate Magnesium	0,000	3,253	Mg Si O3
01-076-1806	1	Silicate Magnesium	0,000	1,921	Mg Si O3
01-089-3433	9	Silicate Silicon	0,000	0,279	Si O2
01-082-1406	4	Oxide Silicon	0,000	0,175	Si O2
01-074-1886	4	Oxide Iron Oxide	0,000	0,718	Fe O
01-075-1550	3	Iron Oxide	0,000	0,687	Fe O
01-088-2359	4	Iron Oxide	0,000	0,961	Fe2 O3
01-084-0310	2	Iron Oxide	0,000	0,478	Fe2 O3
01-089-0688	2	Iron Oxide	0,000	0,323	Fe3 O4
01-076-0957	0	Iron Oxide	0,000	2,148	Fe3 O4
01-074-1909	0	Iron Oxide	0,000	2,634	Fe3 O4
00-038-0419	30	Iron Nickel	0,000	0,516	Fe Ni3
03-065-3244	16	Iron Nickel	0,000	0,210	Fe Ni3
01-088-1715	41	Nickel Iron	0,000	0,498	Ni3 Fe
96-901-3482	31	Iron	0,000	0,398	Fe2.00
01-085-1410	-	Iron	-	-	Fe
01-087-0712	-	Nickel	-	-	Ni
96-901-2995	-	Nickel	-	-	Ni4.00
96-901-2965	-	Nickel	-	-	Ni4.00

5. Hasil XRD Produk Penambahan 20% Na₂SO₄



Peak List :

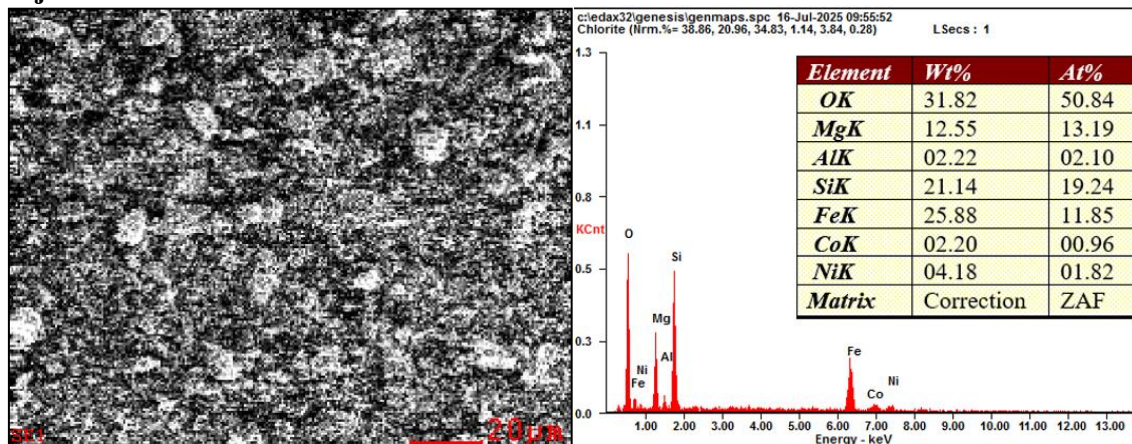
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
15,5627	140,33	0,0900	5,68934	36,67
22,7117	125,37	0,0900	3,91209	32,76
32,1275	85,73	0,2362	2,78611	22,40
35,5358	97,83	0,0900	2,52423	25,57
36,2946	127,36	0,1574	2,47523	33,28
39,9533	112,65	0,0900	2,25473	29,44
44,5199	382,65	0,0900	2,03347	100,00
52,0412	112,64	0,0900	1,75589	29,44
82,0308	55,34	0,9446	1,17474	14,46

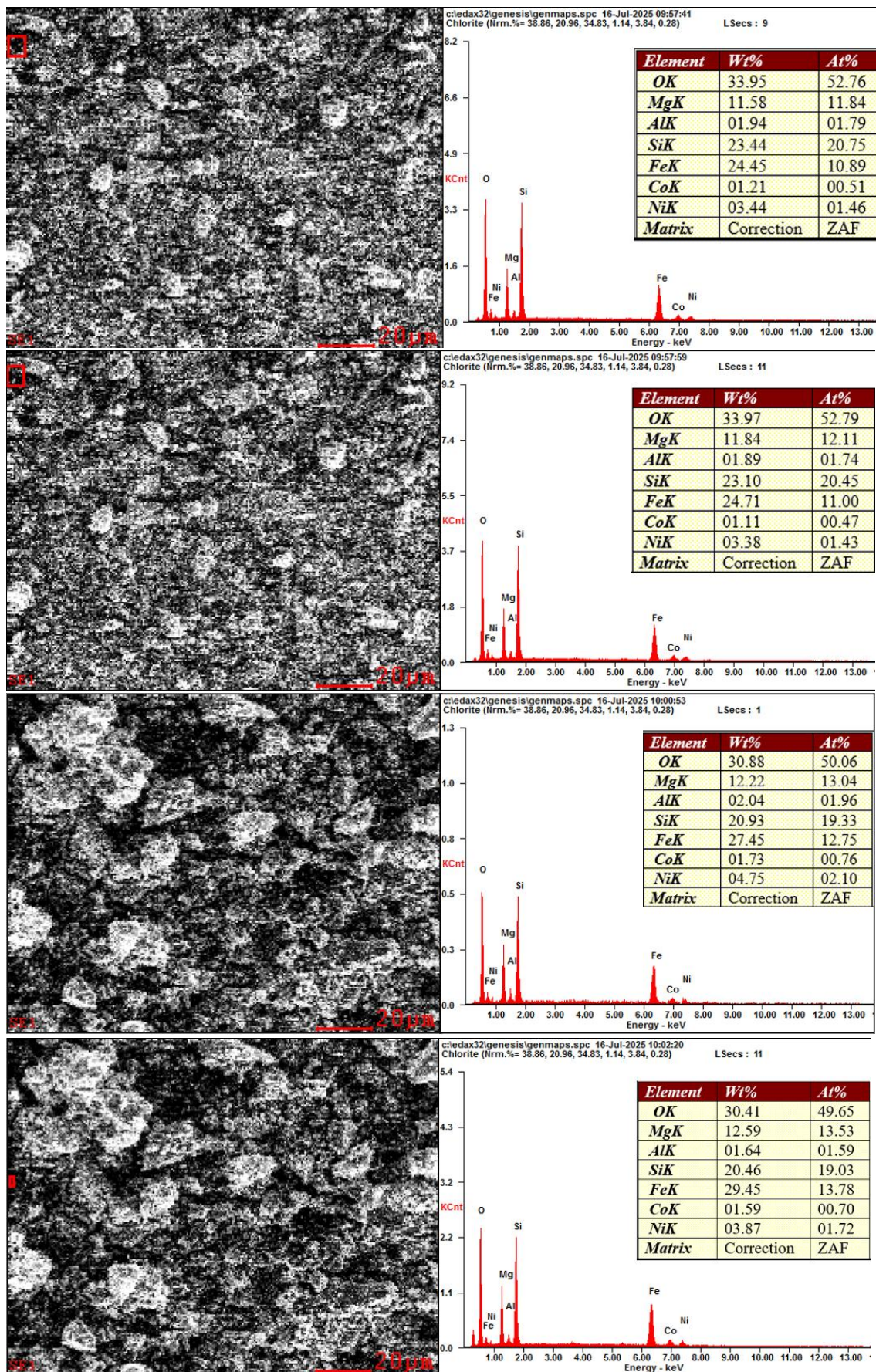
Pattern List :

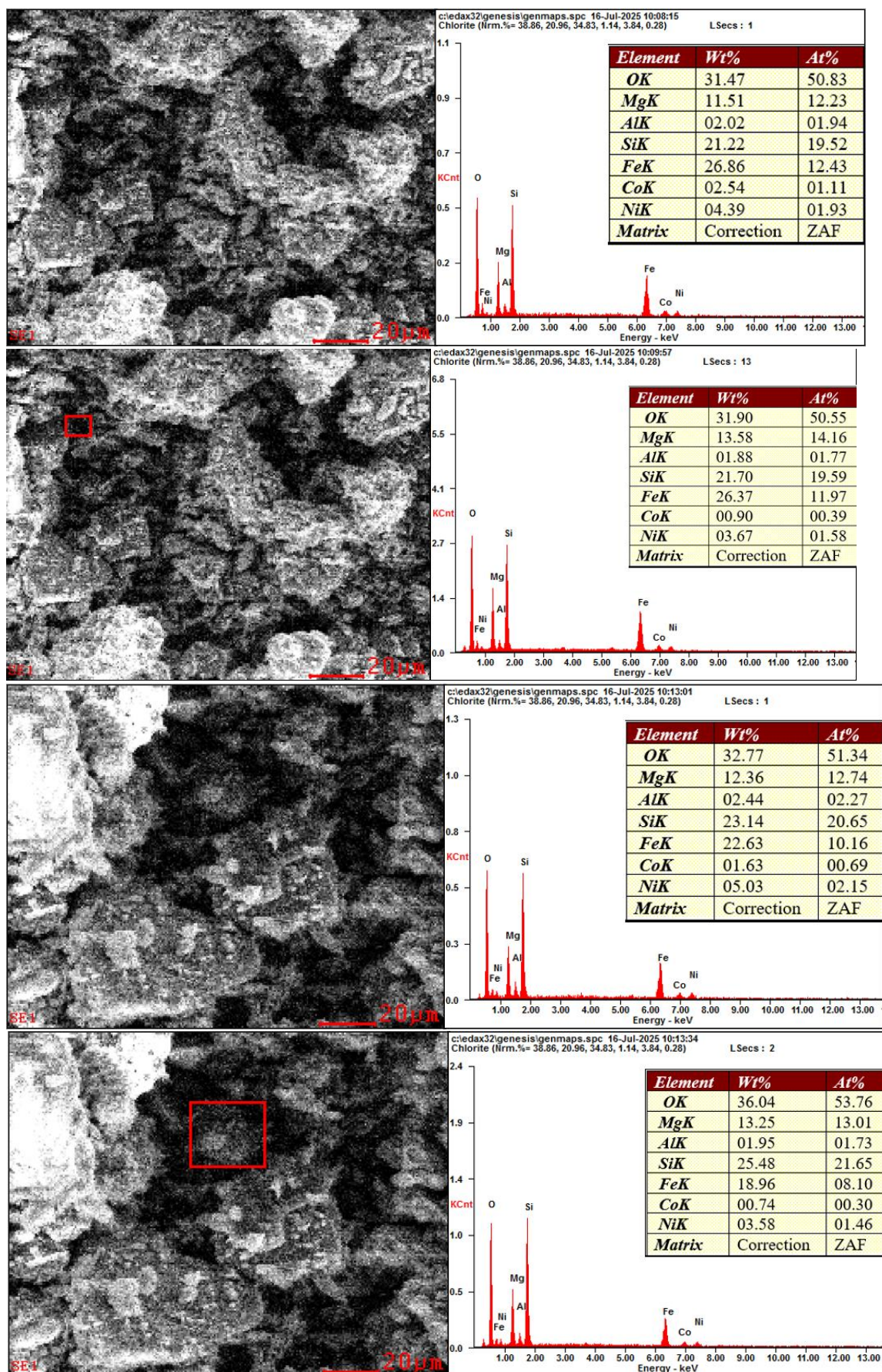
Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
	01-089-6268	14	Iron Sulfide	0,000	0,935	Fe S
	01-075-2377	0	Iron Sulfide	0,000	2,702	Fe.91 S
	96-900-7652	0	Troilite	0,000	2,042	Fe12.00 S12.00
	00-037-0477	0	Iron Sulfide	0,000	4,127	Fe S
	96-901-3482	5	Iron	0,000	0,217	Fe2.00
	96-900-0659	6	Iron	0,000	0,307	Fe2.00
	96-901-4288	3	Iron	0,000	0,280	Fe4.00
	96-900-0658	17	Iron	0,000	0,537	Fe2.00
	96-901-5938	12	Iron	0,000	0,691	Fe4.00
	03-065-4899	19	Iron	0,000	0,542	Fe
	96-901-5973	9	Iron	0,000	0,491	Fe4.00
	00-050-1275	2	Iron	0,000	1,205	Fe
	96-901-2428	21	Nickel	0,000	0,841	Ni4.00
	96-901-2992	10	Nickel	0,000	0,455	Ni4.00
	96-901-2966	21	Nickel	0,000	0,841	Ni4.00
	96-901-2993	10	Nickel	0,000	0,455	Ni4.00
	96-901-2967	21	Nickel	0,000	0,841	Ni4.00
	00-003-1044	35	Iron Nickel	0,000	0,745	Fe Ni
	00-037-0474	19	Iron Nickel	0,000	0,627	(Fe , Ni)
	01-071-1082	-	Magnesium Silicate	-	-	Mg2 Si O4
	01-080-0568	-	Magnesium Silicon Oxide	-	-	Mg Si O3
	00-033-0664	-	Iron Oxide	-	-	Fe2 O3
	03-065-7752	-	Iron Nickel	-	-	Fe19 Ni
	00-024-0072	-	Iron Oxide	-	-	Fe2 O3
	01-079-2178	-	Iron Oxide	-	-	Fe.916 O
	01-079-2180	-	Iron Oxide	-	-	Fe.911 O

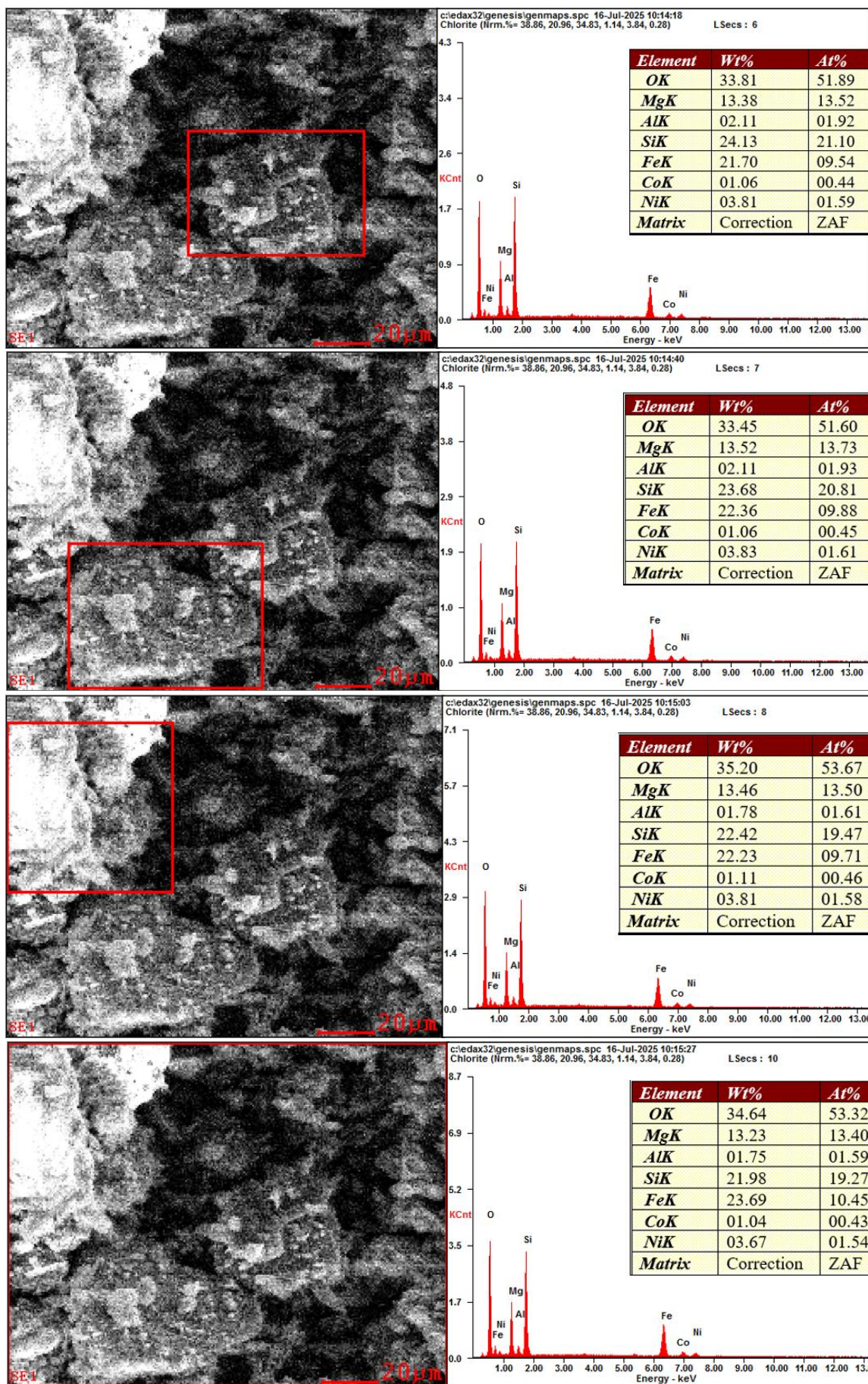
D. Hasil Pengujian SEM-EDX Produk Hasil Reduksi

1. Bijih Nikel Lateritik

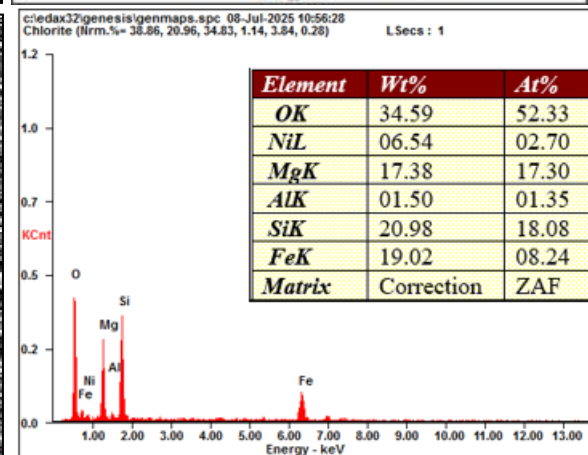
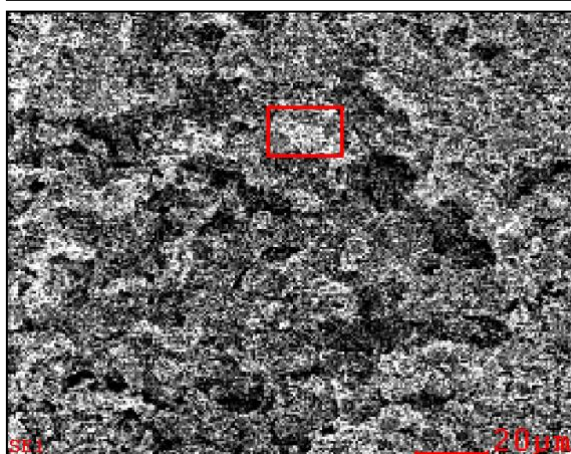
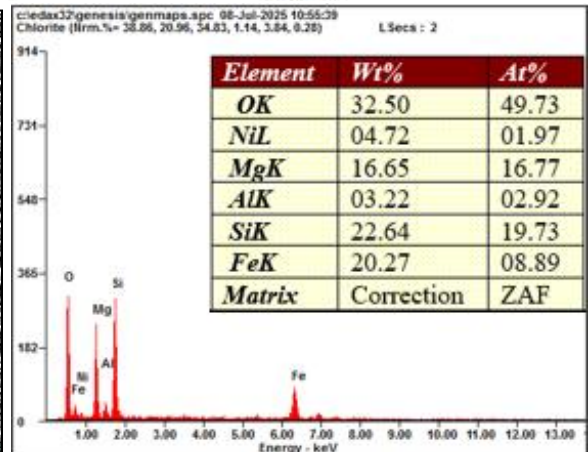
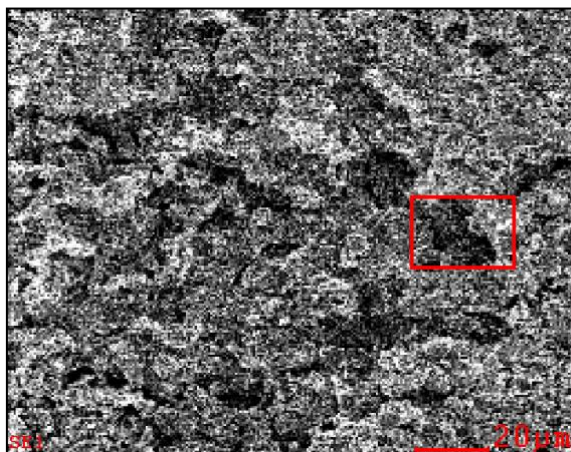
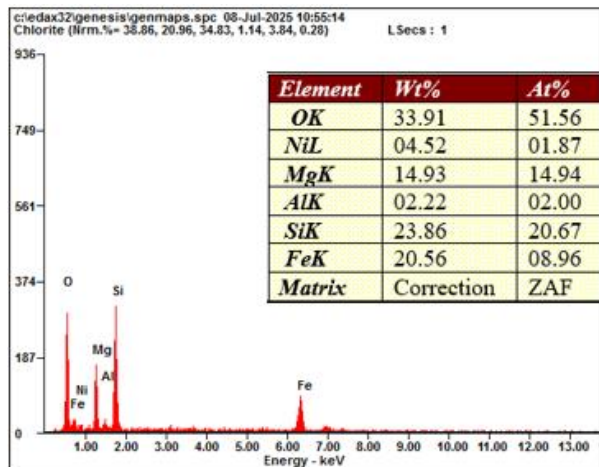
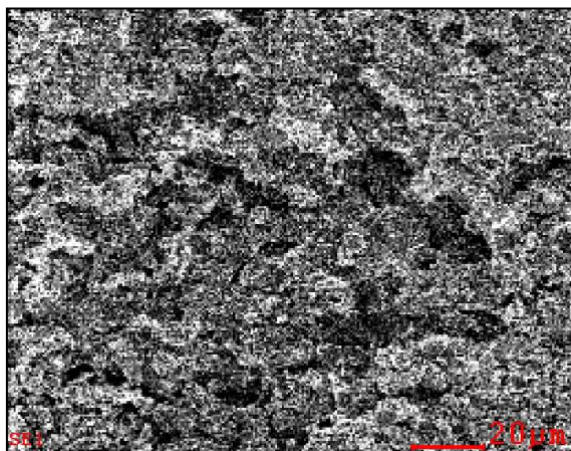


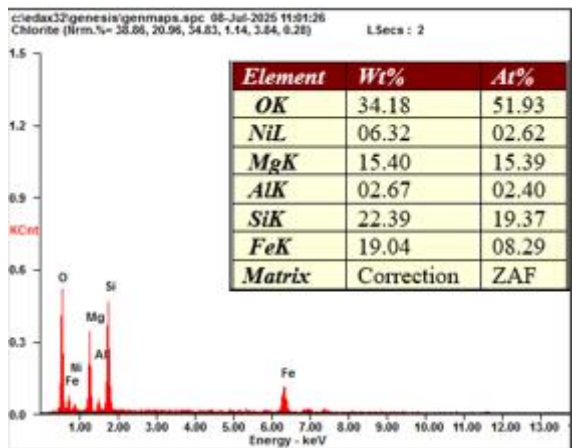
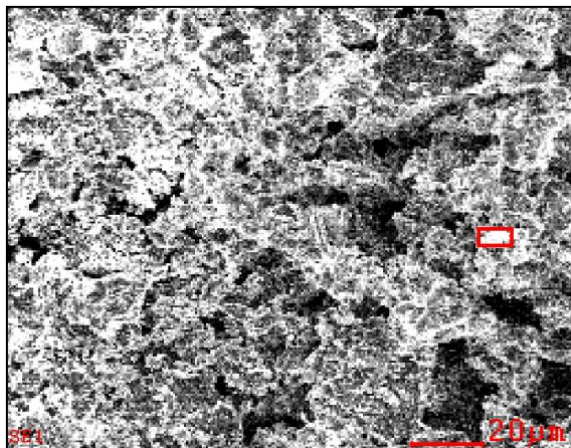
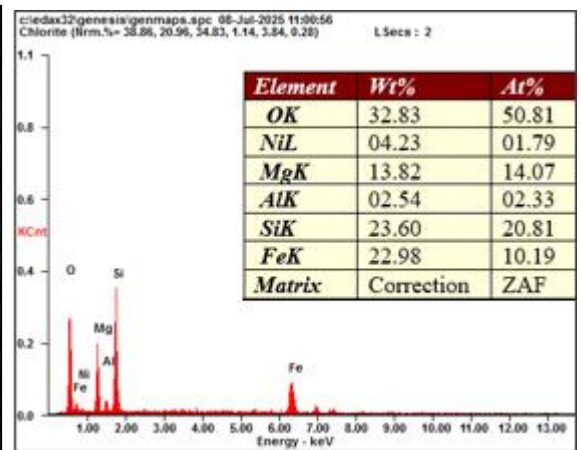
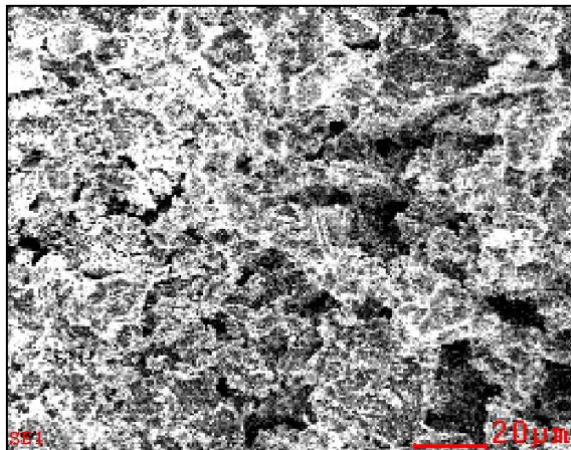
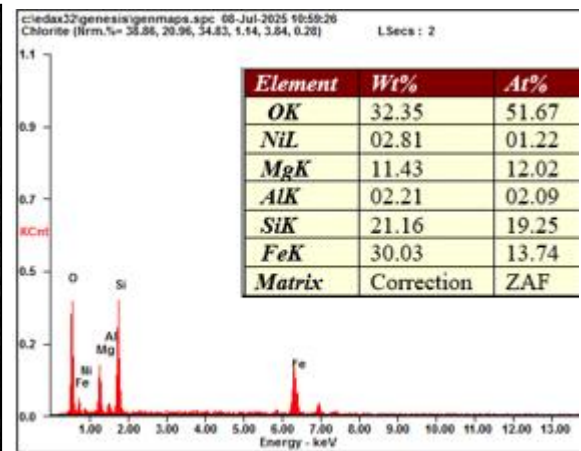
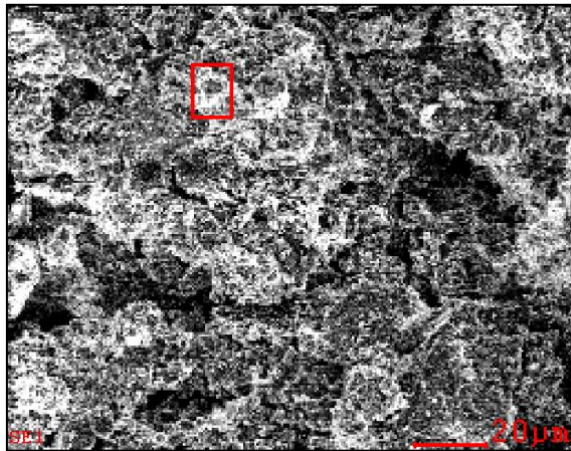
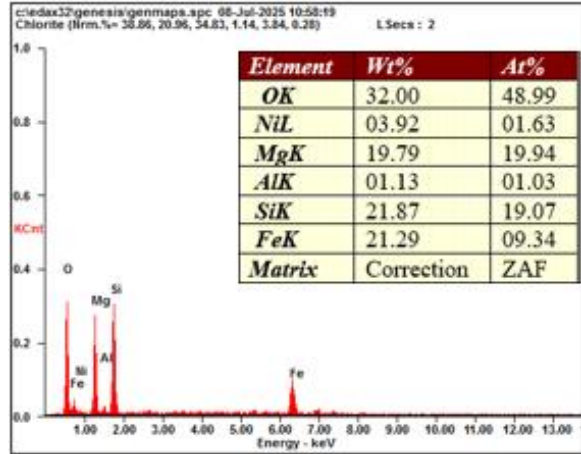
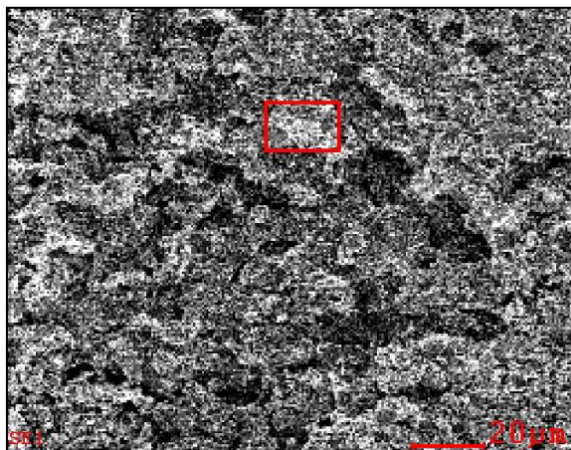




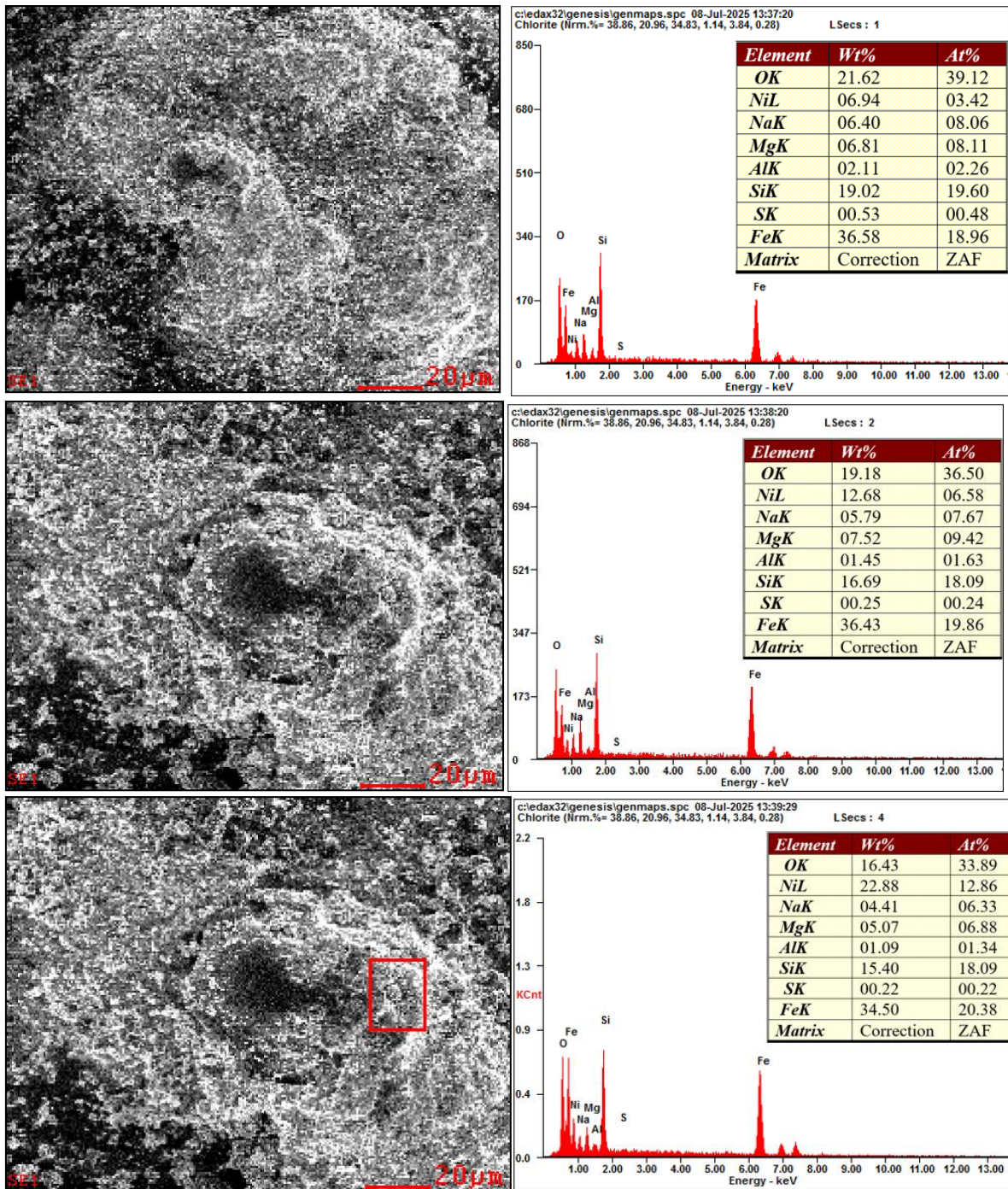


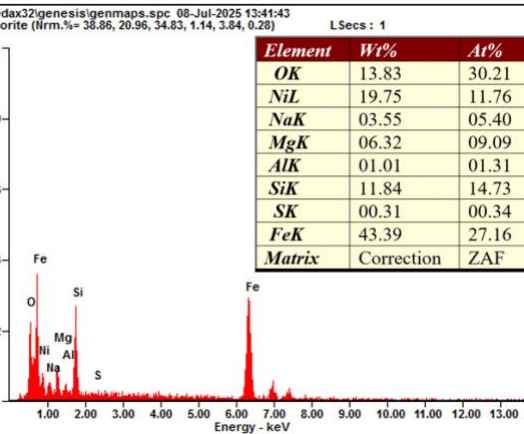
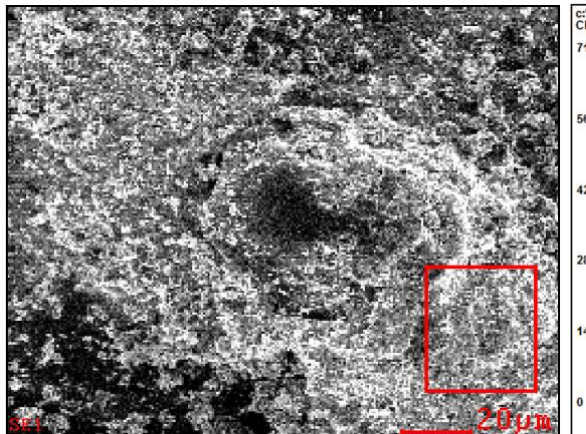
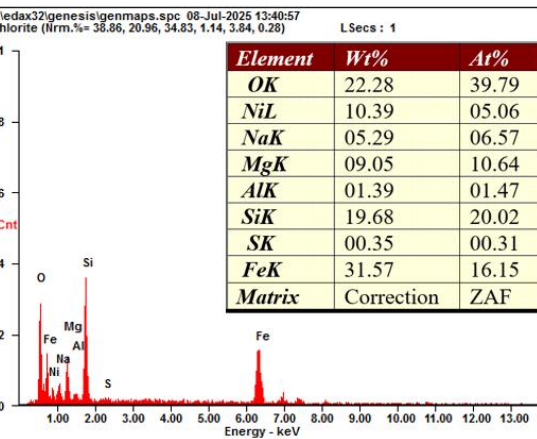
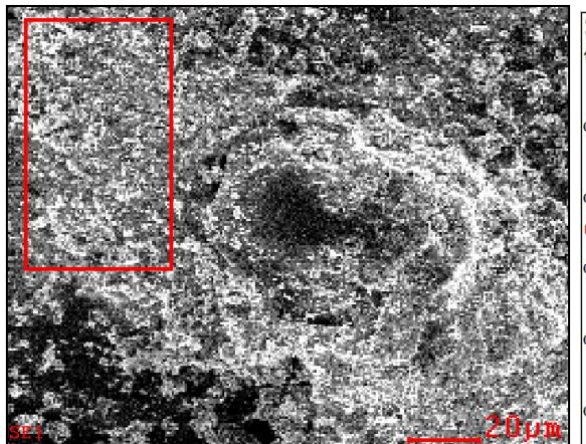
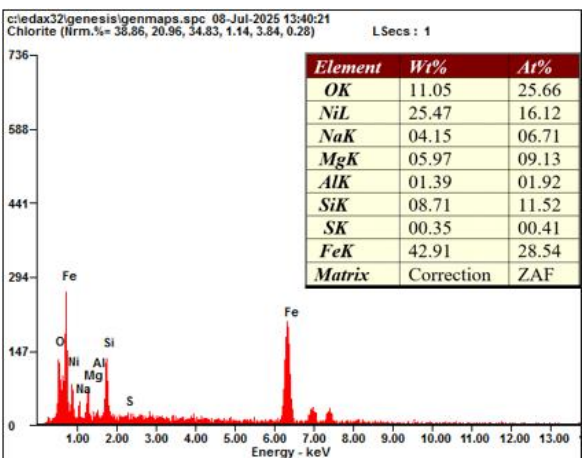
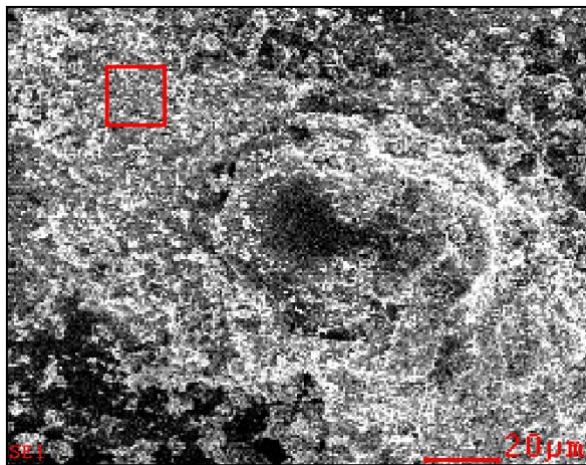
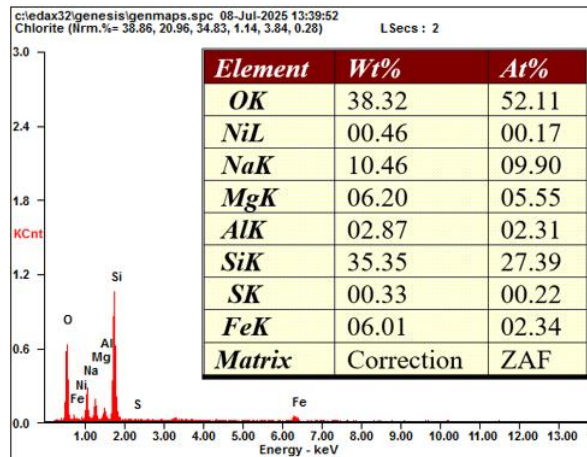
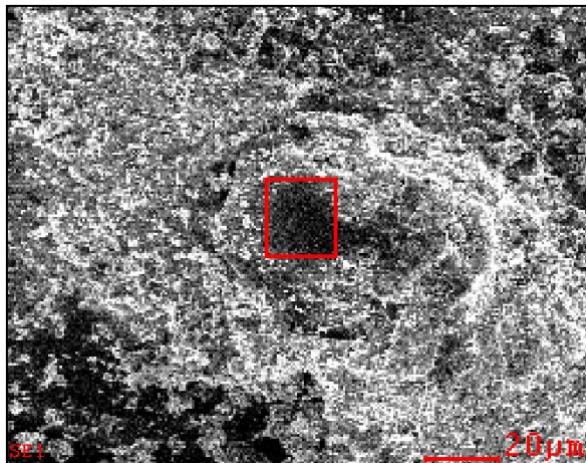
2. Penambahan 0% Na₂SO₄ dan Waktu Tahan 0 Jam

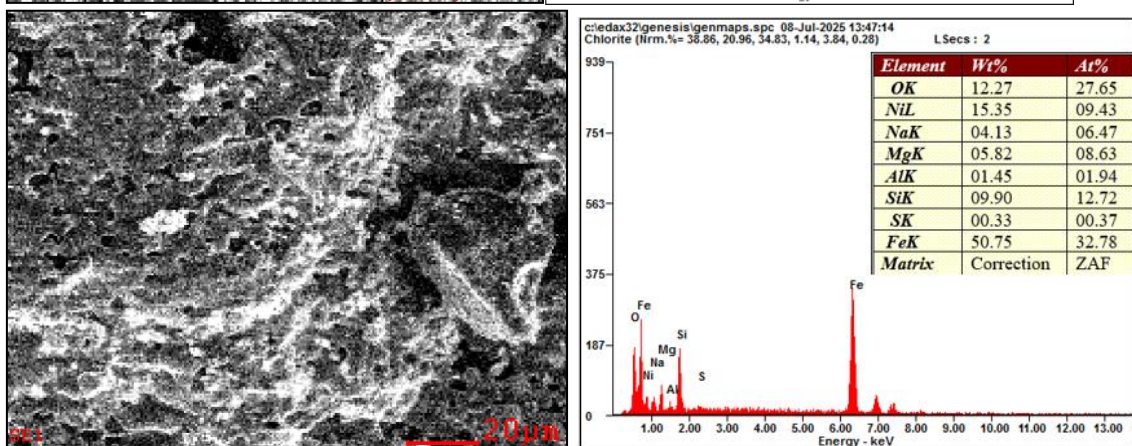
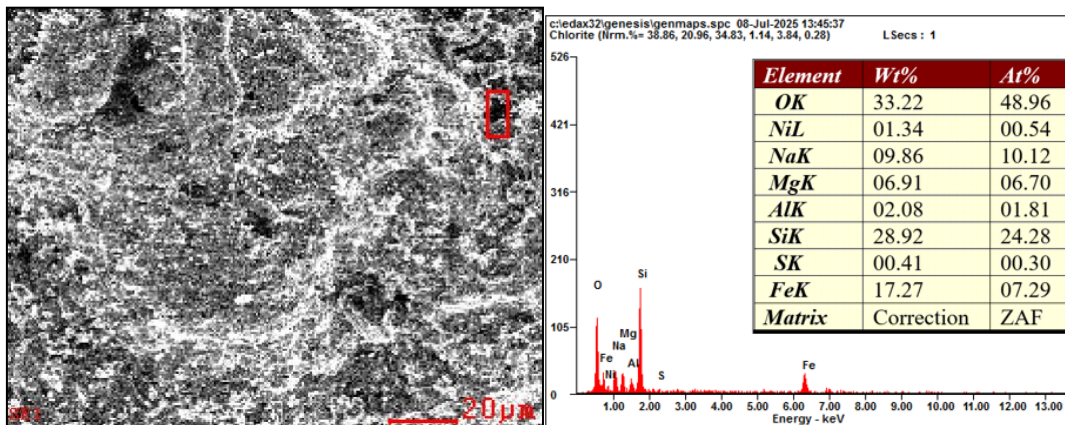
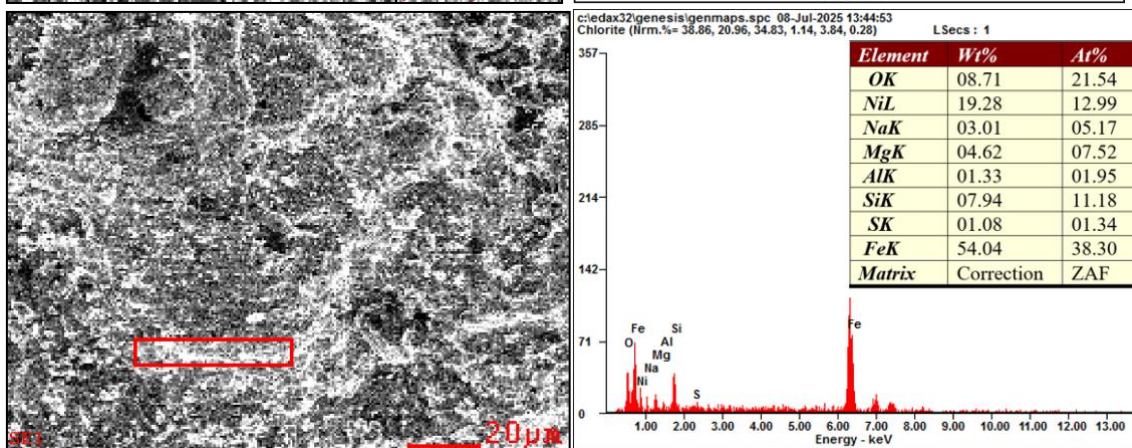
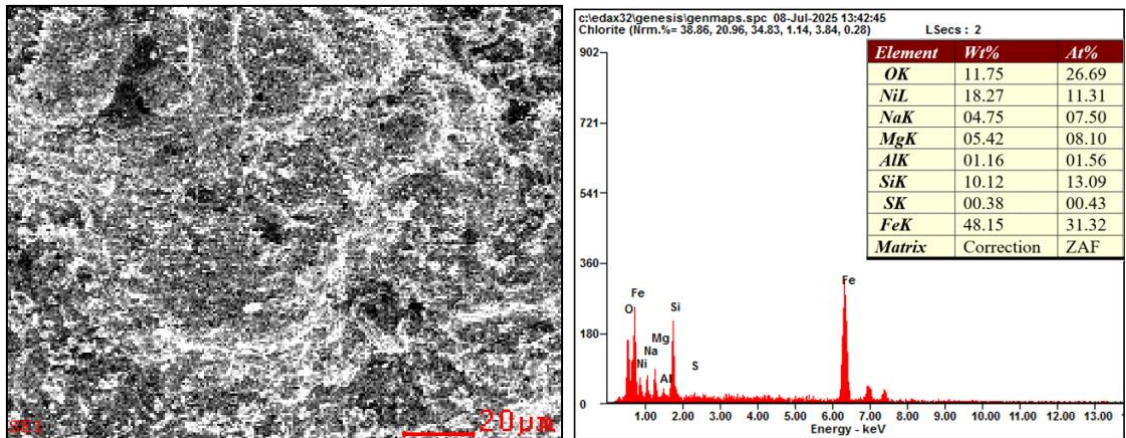


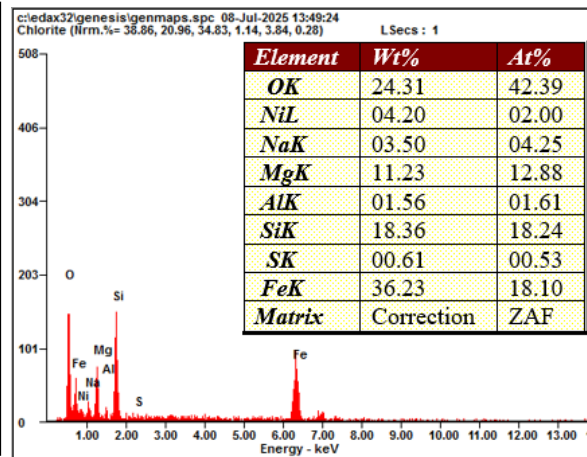
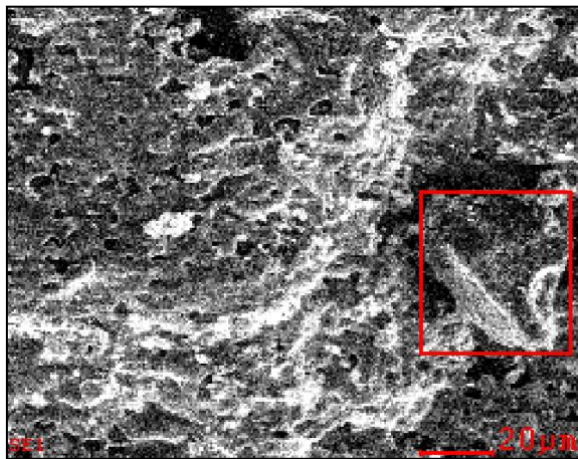
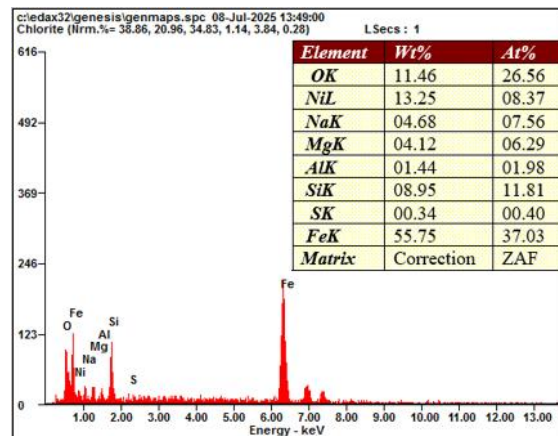
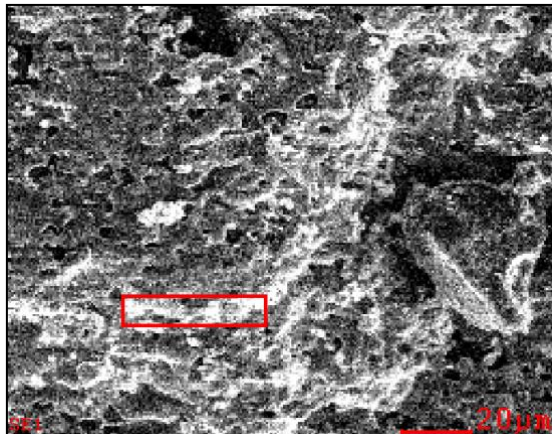
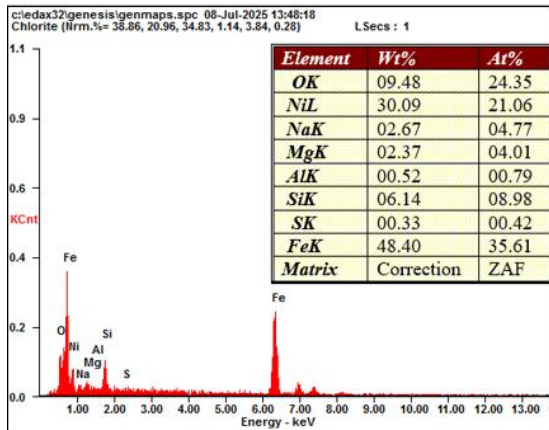
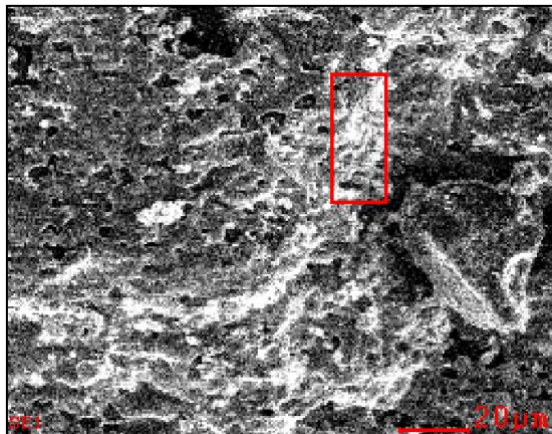


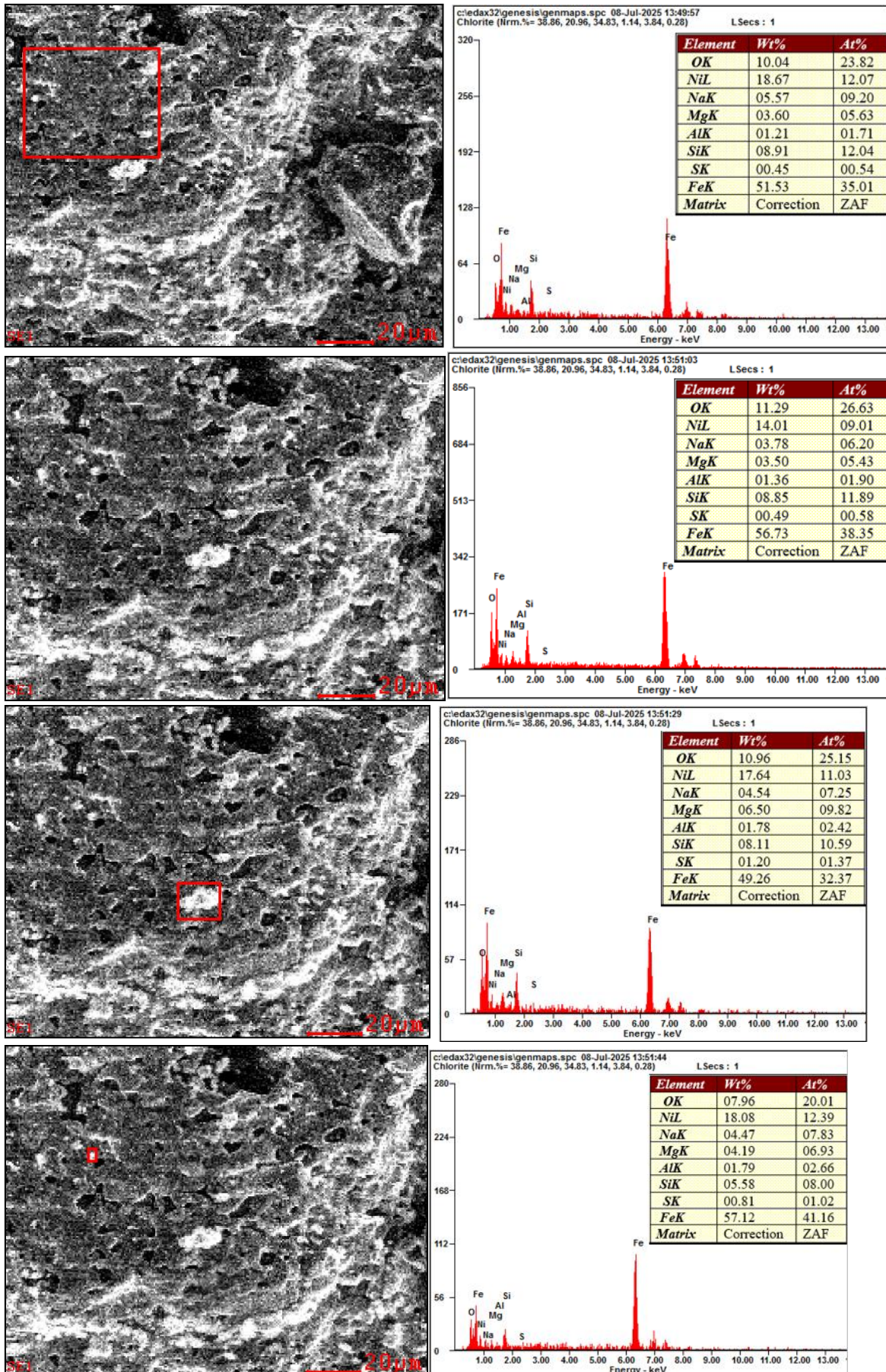
3. Penambahan 10% Na₂SO₄ dan Waktu Tahan 2 Jam

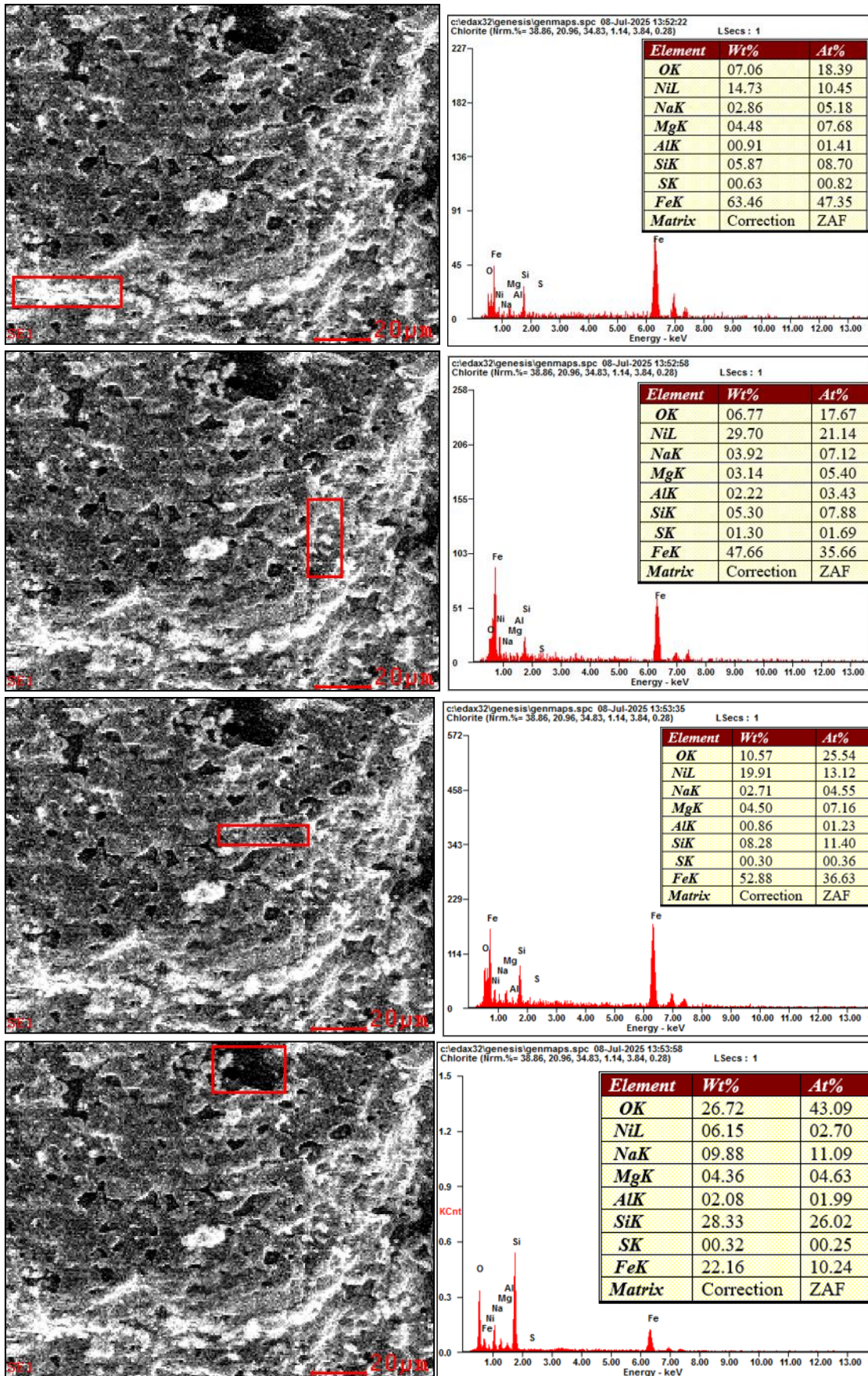


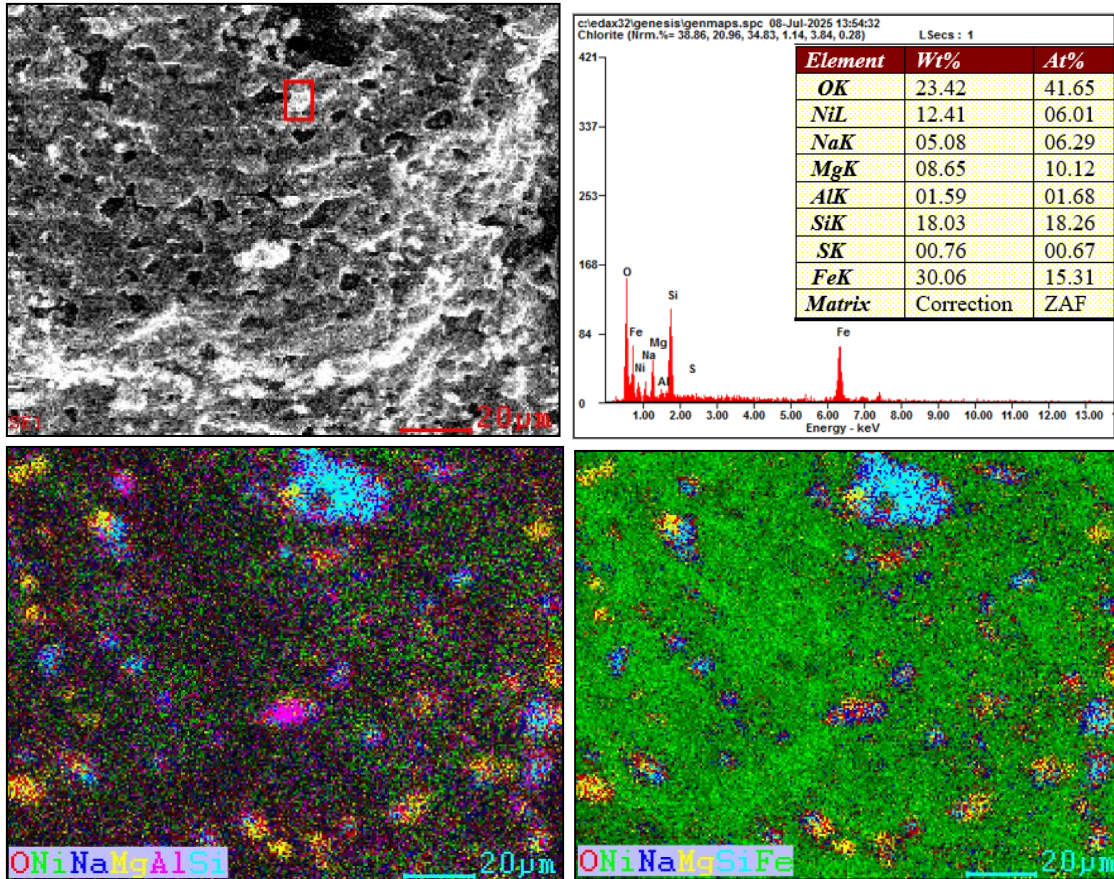












E. Hasil Perhitungan Emisi CO₂ Teoritik Proses Reduksi

Emisi CO₂ teoritik dihitung menggunakan neraca massa dan energi yang dapat dilihat di bawah ini:

Komposisi Bijih Nikel Laterit		
Fe	34,32	%
Ni	1,31	%
Mg	4,88	%
Si	14,83	%

	Persentase (%)	Massa (gr)
Fe ₂ O ₃	49,07	0,4150
NiO	1,67	0,0141
MgO	8,09	0,0684
SiO ₂	31,73	0,2684
Total	90,56	0,7659

Massa Ore	0,7659	gr
Massa Na₂SO₄	0,0851	gr

Molecular weight (Ar)	
Fe	55,845
Fe ₂ O ₃	159,69
FeO	71,844
Mg	24,305
MgO	40,304
Ni	58,6934
NiO	74,6928
Si	28,08
SiO ₂	60,08
NH ₃	17,03
H ₂ O	18,01
N ₂	28,02
Na ₂ O	61,9789
Na ₂ SO ₄	142,04
Na ₂ S	78,0452

1. Neraca Massa

Reaksi 1: $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s}) \rightarrow \text{MgSiO}_3(\text{s}) + \text{Mg}_2\text{SiO}_4(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g})$							
INPUT				OUTPUT			
	mol	Mr	massa (gram)		mol	Mr	massa (gram)
$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	0,0006	276	0,1562	MgSiO_3	0,0006	100	0,0566
				Mg_2SiO_4	0,0006	140	0,0792
				H_2O	0,0011	18	0,0204
Total massa INPUT		0,1562		Total massa OUTPUT		0,1562	

Reaksi 2: $\text{FeOOH}(\text{s}) \rightarrow 1/2\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 1/2\text{H}_2\text{O}(\text{g})$							
INPUT				OUTPUT			
	mol	Mr	massa (gram)		mol	Mr	massa (gram)
FeOOH	0,0052	89	0,4617	Fe_2O_3	0,0026	160	0,4150
				H_2O	0,0026	18	0,0467
Total massa INPUT		0,4617		Total massa OUTPUT		0,4617	

Reaksi 3: $3\text{NiO}(\text{s}) + 2\text{NH}_3(\text{g}) \rightarrow 3\text{Ni}(\text{s}) + \text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{g})$							
INPUT				OUTPUT			
	mol	Mr	massa (gram)		mol	Mr	massa (gram)
NiO	0,0002	75	0,0141	Ni	0,0002	59	0,0111
NH_3	0,0001	17	0,0021	N_2	0,0001	28	0,0018
				H_2O	0,0002	18	0,0034
Total massa INPUT		0,0162		Total massa OUTPUT		0,0162	

Reaksi 4: $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 2\text{NH}_3(\text{g}) \rightarrow 2\text{Fe}(\text{s}) + \text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{g})$							
INPUT				OUTPUT			
	mol	Mr	massa (gram)		mol	Mr	massa (gram)
Fe_2O_3	0,0026	160	0,4150	Fe	0,0052	56	0,2905
NH_3	0,0052	17	0,0882	N_2	0,0026	28	0,0726
				H_2O	0,0078	18	0,1401
Total massa INPUT		0,5032		Total massa OUTPUT		0,5032	

Reaksi 5: $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{s}) + 8/3\text{NH}_3(\text{g}) \rightarrow \text{Na}_2\text{S}(\text{s}) + 4/3\text{N}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{g})$							
INPUT				OUTPUT			
	mol	Mr	massa (gram)		mol	Mr	massa (gram)
Na_2SO_4	0,0006	142	0,0851	Na_2S	0,0006	78	0,0467
NH_3	0,0016	17	0,0272	N_2	0,0008	28	0,0224
				H_2O	0,0024	18	0,0431
Total massa INPUT		0,1123		Total massa OUTPUT		0,1123	

	Mol	Massa (gr)
NH_3 Needed	0,0069	0,1175
Excess NH_3	0,0812	1,3825

Mass Balance					
Out Solid			Out Gas		
	Mol	Massa (gr)		Mol	Massa (gr)
Fe	0,0052	0,2905	N ₂	0,0035	0,0968
Ni	0,0002	0,0111	H ₂ O	0,0104	0,1866
MgO	0,0017	0,0684	NH ₃	0,0812	1,3825
SiO ₂	0,0045	0,2684			
Na ₂ S	0,0006	0,0467			
NH ₃	0,0812	1,3825			

	Massa (gr)
Total In	2,4
Total Out	2,4

2. Neraca Energi

Reaksi	Delta H 1173 K (J/mol)	Unsur	Delta H (J/mol)
R1	112015,4	Fe	33086,8
R2	102890,39	Ni	27365
R3	21631,8	MgO	41886,4
R4	173796	SiO ₂	34596,1
R5	117182,5	Na ₂ S	80748,4
		N ₂	27199,6
		H ₂ O	56007
		NH ₃	14074,7

NB: Diasumsikan bahwa tidak terjadi reaksi dekomposisi NH₃ --> N₂ + H₂O, Sehingga semua reaksi reduksi terjadi oleh NH₃ bukan H₂

Heat Balance	
Reaction	Heat (J)
R1	63,4046
R2	533,7472
R3	4,0666
R4	450,7861
R5	70,2270
Total	1122,2315

Sensible heat product (out dalam bentuk solid dan gas, semua produk diasumsikan keluar pada T = 1173 K, sedangkan gas keluar pada 641 K)

Unsur	Heat (J)
Fe	171,6388
Ni	5,1444
MgO	71,1275
SiO ₂	154,5294
Na ₂ S	48,3922
N ₂	93,9209
H ₂ O	580,2727
NH ₃	1142,5989
Total	2267,6248

Berdasarkan (Rong et al., 2017) diketahui pada proses reduksi bijih nikel laterit di dalam rotary kiln terdapat heat loss sebesar 27%.

Heat Loss	27%	941,704683	Joule
------------------	------------	-------------------	--------------

Selain itu, terdapat pula perubahan kalor laten dari H₂O liquid menjadi H₂O gas pada Na₂SO₄.

Kalor laten water (H ₂ O(l) --> H ₂ O(g))	40855,8	J/mol	1 kg menghasilk an >>	1459,56331	produk
Total	97,93883324	Joule			

TOTAL ENERGI	4429,4998	Joule	per	0,6851	gr-produk
	6465,135384	kJ	per	1	kg-produk
	1,79587094	kWh	per	1	kg-produk
	1	kWh	>>	1,025	kg-CO2

Fe and Ni in Produk	47%
Degree of Reduction	81,73%

Jadi, didapatkan hasil akhir perhitungan emisi CO₂ teoritik seperti di bawah ini.

Emisi	1,84	kg-CO2/kg-produk
	4,77	kg-CO2/kg-Fe and Ni in product

F. Dokumentasi



Gambar 1. Proses pengayakan bijih nikel laterit



Gambar 2. Proses pembuatan briket sampel



Gambar 3. Proses pengeringan bijih nikel laterit menggunakan oven



Gambar 4. Briket bijih nikel laterit kering diletakkan dalam *dessicator*



Gambar 5. Proses memasukkan bijih nikel laterit ke dalam *furnace*



Gambar 6. Proses pengaturan temperatur *furnace*



Gambar 7. Proses pengaturan laju alir gas nitrogen (N_2)



Gambar 8. Proses pengaturan laju alir gas ammonia (NH_3)



Gambar 9. Proses pengeluaran sampel hasil reduksi dari dalam *furnace*

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan memanjatkan puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta doa dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini. Adapun pihak-pihak yang secara khusus ingin penulis sampaikan terima kasih, yaitu:

1. Bapak Prof. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.Eng. dan Bapak Fakhreza Abdul, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing, yang telah dengan sabar meluangkan waktu, tenaga, serta memberikan arahan dan bimbingan yang sangat berharga kepada penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua penulis, Bapak Supriadi dan Ibu Minarni atas segala bentuk doa, dukungan moral, perhatian, serta kasih sayang yang senantiasa diberikan kepada penulis hingga saat ini.
3. Ketiga adik penulis, Khairah Michiko Dyah Widjaya, Atha Anindya Widyadhana, dan Nakeisha Shaki Maritza Widjaya, yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Saudara Rushdan, Pandi, dan Debo, selaku rekan dalam penyusunan Tugas Akhir, atas semangat, kerja sama, dan perjuangan bersama dalam menghadapi berbagai tantangan yang muncul selama proses penelitian berlangsung.
5. Rekan-rekan Rushdan, Rere, Pandi, Kinan, dan Nafira, sebagai bagian dari *Basic Student Resource Development* HMMT FTI ITS, atas kebersamaan, dukungan, serta peran penting dalam proses pengembangan diri penulis selama masa studi.
6. Rekan-rekan "Gerbong Maut", yang tidak dapat disebutkan satu per satu, atas kebersamaan, semangat, dan dukungan yang turut memberikan energi positif selama penulis menjalani masa penyusunan Tugas Akhir.
7. Rekan-rekan di Laboratorium Proses Pengolahan Mineral dan Material, atas kerja sama, bantuan teknis, dan semangat dalam menyelesaikan penelitian.
8. Seluruh teman angkatan MT23, atas kebersamaan dan dukungan yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan akademik penulis selama menjalani perkuliahan.
9. Tim Real Madrid, yang secara tidak langsung telah menjadi sumber hiburan dan pengurang stres, sehingga membantu penulis dalam menjaga keseimbangan mental selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
10. Seluruh pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang telah memberikan bantuan, dukungan, dan kontribusi dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Dolph Raikhan Shahrukh Ramadhan. Penulis lahir di Batam, 11 November 2003 dan merupakan anak sulung dari empat bersaudara. Riwayat pendidikan formal penulis dimulai dari SD Muhammadiyah 4 Pucang Surabaya selama enam tahun, dilanjutkan dengan pendidikan menengah pertama di SMPN 19 Surabaya selama tiga tahun, dan pendidikan menengah atas di SMAN 20 Surabaya selama tiga tahun. Penulis kemudian melanjutkan studi pada jenjang sarjana di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Pada tahun terakhir studi sarjananya, penulis terpilih sebagai penerima Beasiswa Program *Fast Track* untuk melanjutkan pendidikan pascasarjana di departemen yang sama, yakni S-2 Departemen Teknik Material dan Metalurgi, ITS. Selama menjalani pendidikan, penulis aktif dalam kegiatan akademik, yakni sebagai Asisten Dosen untuk mata kuliah Proses Manufaktur 1 dan Proses Manufaktur 2. Dalam ranah non-akademik, penulis turut berkontribusi di berbagai organisasi dan kegiatan kemahasiswaan, antara lain sebagai *Staff of Public Relation Petroleum Integrated Days 2022*, *Staff of External Relation ITS Material Advantage Chapter*, *Staff of Public Relation Society of Manufacturing Engineers*, *Expert Staff of Public Relation Ini Lho ITS 2023*, Anggota *Material Research Club*, *External Vice Project Officer Isometric 2023*, *Project Officer Asia Pacific SPE Gathering*, dan *Head of Basic Student Resource Development HMMT FTI ITS*. Selain itu, penulis juga telah memperoleh pengalaman keprofesian melalui kegiatan magang, antara lain sebagai *Process Engineer Intern* di PT Vale Indonesia pada tahun 2024 dan sebagai *Risk Based Inspection Engineer Intern* di PT Denvegraha pada tahun yang sama. Selama menempuh perjalanan akademik maupun non-akademik, penulis menunjukkan minat yang mendalam terhadap bidang Metalurgi Ekstraksi, yang menjadi landasan utama dalam pemilihan topik penelitian ini. Penulis menjalankan penelitian ini dengan harapan besar untuk dapat berkontribusi dan mengembangkan karier di bidang tersebut pada masa yang akan datang. Penulis dapat dihubungi melalui surel: dolphraikhan@gmail.com