



TUGAS AKHIR - TL 184834

**ANALISIS PENGARUH VARIASI MASSA LIMESTONE
TERHADAP KADAR SERTA RECOVERY Ni DAN Fe, DALAM
PROSES REDUKSI LANGSUNG BIJIH NIKEL LATERIT
MENGUNAKAN REAKTOR BED BATU BARA-LIMESTONE**

**SAFIRA FIRDAUSI
NRP. 0251164000010**

**Dosen Pembimbing
Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D
Fakhreza Abdul, S.T., M.T**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



TUGAS AKHIR – TL 184834

**ANALISIS PENGARUH VARIASI MASSA LIMESTONE
TERHADAP KADAR SERTA RECOVERY Ni DAN Fe,
DALAM PROSES REDUKSI LANGSUNG BIJIH NIKEL
LATERIT MENGGUNAKAN REAKTOR BED BATU
BARA-LIMESTONE**

**SAFIRA FIRDAUSI
NRP. 0251164000010**

Dosen Pembimbing
Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph. D.
Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 184834

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF VARIATION
LIMESTONE MASS ON THE GRADE AND RECOVERY
OF Fe AND Ni IN THE DIRECT REDUCTION PROCESS
OF NICKEL LATERITE ORE USING LIMESTONE-COAL
BED REACTOR**

**SAFIRA FIRDAUSI
NRP. 0251164000010**

Supervisors
Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph. D.
Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(This page is intentionally left blank)

**ANALISIS PENGARUH VARIASI MASSA LIMESTONE
TERHADAP KADAR SERTA RECOVERY Ni DAN Fe,
DALAM PROSES REDUKSI LANGSUNG BIJIH NIKEL
LATERIT MENGGUNAKAN REAKTOR BED BATU
BARA-LIMESTONE**

TUGAS AKHIR

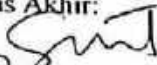

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

SAFIRA FIRDAUSI
NRP 02511640000010

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Sungging Pintowantoro Ph. D.  (Pembimbing I)
2. Fakhreza Abdul, S.T., M.T.  (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS PENGARUH VARIASI MASSA LIMESTONE
TERHADAP KADAR SERTA RECOVERY Ni DAN Fe,
DALAM PROSES REDUKSI LANGSUNG BIJIH NIKEL
LATERIT MENGGUNAKAN REAKTOR BED BATU
BARA-LIMESTONE**

Nama : Safira Firdausi
NRP : 0251164000010
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Sungging Pintowantoro, Ph. D
Pembimbing II : Fakhreza Abdul, S.T., M.T

Abstrak

Menipisnya cadangan nikel sulfida menyebabkan perlunya alternatif pengolahan nikel laterit yang optimum. Indonesia sendiri merupakan negara penghasil nikel laterit terbesar kedua dunia. Salah satu alternatif pengolahan bijih nikel yang lebih ramah lingkungan dan konsumsi energi lebih kecil adalah reduksi langsung. Penelitian ini bertujuan pada perbaikan komposisi dari material yaitu fluks limestone sehingga kadar, recovery dari Ni dan Fe serta faktor selektifitas yang didapatkan optimum. Variasi massa limestone yang dipilih adalah 16 g, 18 g, 20 g, 22 g, 24 g, dan 26 g. Proses dimulai dengan penghancuran, meshing, serta penimbangan bahan, melakukan pembuatan briket, memanaskan briket pada oven, dilanjutkan dengan pembuatan beda batu bara limestone sesuai variasi, dan dilakukan reduksi langsung dengan pre-heat 700°C selama 2 jam dan reduksi pada 1400°C selama 6 jam . Kemudian dilakukan separasi magnetik, penimbangan hasil logam, dan dilakukan analisis EDX untuk menentukan kadar serta XRD untuk mengetahui senyawa yang diperoleh, dan dilakukan perhitungan kadar, recovery, serta faktor selektivitas. Hasil perolehan kadar Fe tertinggi pada variasi massa limestone 16 gram, sebesar 87.58%. dan Ni tertinggi pada variasi massa limestone 22 gram, sebesar 18.75%, recovery Fe tertinggi pada variasi massa limestone 16gram, sebesar 28.91% dan Ni tertinggi

pada variasi massa limestone 22gram, sebesar 99.34%, dan faktor selektivitas tertinggi pada variasi massa limestone 22 gram, sebesar 9.36%.

Kata Kunci: *Reduksi Langsung, Nikel Laterit, Limestone.*

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF VARIATION
LIMESTONE MASS ON THE GRADE AND RECOVERY
OF Fe AND Ni IN THE DIRECT REDUCTION PROCESS
OF NICKEL LATERITE ORE USING LIMESTONE-COAL
BED REACTOR**

Student Name : Safira Firdausi
NRP : 0251164000010
Department : Materials and Metallurgical Engineering
Supervisor : Sungging Pintowantoro, Ph. D
Co-Supervisor : Fakhreza Abdul, S.T., M.T

Abstract

Depletion of nickel sulfide reserves causes the need for an optimum alternative processing of laterite nickel. Indonesia itself is the second largest producer of laterite nickel in the world. One alternative to nickel ore processing that is more environmentally friendly and has less energy consumption is direct reduction. This study aims to improve the composition of the material, namely flux in the form of limestone so that the optimum levels and recovery of Ni and Fe are obtained as well as the selectivity factor of the product produced accordingly. The selected limestone mass variations are 16 gr, 18 gr, 20 gr, 22 gr, 24 gr and 26 gr. The process begins with crushing, meshing, and weighing the material, making briquettes, heating the briquettes in the oven, followed by making different limestone coal variations, and doing direct reduction with pre-heat 700oC for 2 hours and reducing at 1400oC for 6 hours. Then magnetic separation, weighing of metal products, and EDX analysis to determine the levels and XRD to determine the compounds obtained, and the calculation of levels, recovery, and selectivity factors are performed. The highest yield of Fe content in the 16 gram limestone mass variation was 87.58%. and the highest Ni in the 22 gram limestone mass variation, by 18.75%, the highest Fe recovery in the 16gram limestone mass variation, by 28.91% and the highest Ni in the 22gram limestone mass variation,

by 99.34%, and the highest selectivity factor for the 22 gram limestone mass variation, amounted to 9.36%.

Keywords: *Direct Reduction, Nickel Laterite, Limestone.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Pengaruh Variasi Massa Limestone terhadap Kadar Serta Recovery Ni Dan Fe, Dalam Proses Reduksi Langsung Bijih Nikel Laterit Menggunakan Reaktor Bed Batu Bara-Limestone”. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan studi. Dengan selesainya Laporan Tugas Akhir, ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi
 2. Bapak Sungging Pintowantoro, Ph.D selaku Dosen Pembimbing dan Ketua Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material yang telah banyak memberikan arahan dan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
 3. Bapak Fakhreza Abdul, S.T. M.T selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk bimbingan, ilmu dan masukan mengenai Tugas akhir dan hal lain.
 4. Ir. Mohammad Farid, DEA selaku dosen wali penulis yang senantiasa memberikan arahan selama masa perkuliahan.
- Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pembaca. Adapun penulis meminta maaf apabila ada kesalahan.

Surabaya, 15 Januari 2020
Penulis

Safira Firdausi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Nikel	5
2.2 Nikel Laterit.....	6
2.3 Nikel Laterit Limonitik.....	9
2.4 Batu Bara	13
2.5 Limestone	15
2.6 Reduksi Langsung dengan <i>Selective Agent</i>	19
2.7 Briket Nikel Laterit.....	21
2.8 Termodinamika Reduksi Nikel Laterit	23
2.9 Kajian Penelitian Sebelumnya	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian	31
3.2 Bahan Penelitian	33
3.2.1 Bijih Nikel Laterit	33
3.2.2 Batu Bara.....	33
3.2.3 Limestone	34
3.2.4 Natrium Sulfat	35
3.2.5 Tepung Tapioka.....	35
3.2.6 Akuades.....	36

3.2.7	LPG	36
3.3	Alat Penelitian.....	36
3.3.1	Timbangan Digital.....	36
3.3.2	Ayakan.....	37
3.3.3	Thermocouple dan Thermometer Infrared	38
3.3.4	<i>Blower</i>	38
3.3.5	Alat Kompaksi.....	39
3.3.6	Crucible	39
3.3.7	Oven	40
3.3.8	Muffle Furnace	40
3.4	Metode Penelitian	41
3.4.1	Preparasi Material.....	41
3.4.2	Pembuatan Briket	42
3.4.3	Pembuatan Campuran <i>Bed</i> Batubara	42
3.4.4	Reduksi Selektif Nikel Laterit Limonitik	42
3.5	Pengujian	43
3.5.1	XRD	43
3.5.2	SEM-EDX	44
3.5.3	Analisis Proksimat.....	45
3.6	Rancangan Penelitian.....	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Karakterisasi Bahan Penelitian	51
4.1.1	Karakterisasi Bijih Nikel Laterit	51
4.1.2	Karakterisasi Batubara.....	53
4.1.3	Karakterisasi Limestone	54
4.2	Pengaruh Variasi Massa Limeston Terhadap Kadar Unsur Fe dan Ni pada Produk Hasil Proses Reduksi	55
4.3	Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Recovery Unsur Ni dan Fe pada Produk Hasil Reduksi	60
4.4	Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Faktor Selektivitas Produk Hasil Proses Reduksi	64

4.5	Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Produk Hasil Proses Reduksi	67
4.6	Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Kadar Unsur Fe dan Ni serta Fasa yang Terbentuk pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi.....	70
4.6.1	Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi.....	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan.....	77
5.2	Saran	78
DAFTAR PUSTAKA		79
LAMPIRAN.....		85
UCAPAN TERIMA KASIH.....		132
BIODATA PENULIS.....		135

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Profil Persebaran Bijih Nikel Laterit	6
Gambar 2.2	Bijih Nikel Laterit	7
Gambar 2.3	Diagram Ekstraksi Nikel Laterit	11
Gambar 2.4	<i>Limestone</i>	17
Gambar 2.5	Diagram stabilitas Fe-Ni-	18
Gambar 2.6	Na ₂ SO ₄	19
Gambar 2.7	Diagram Ellingham	23
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 3.2	Bijih Nikel Laterit	32
Gambar 3.3	Batu bara <i>sub-bituminous</i>	33
Gambar 3.4	<i>Limestone</i>	33
Gambar 3.5	Natrium sulfat	34
Gambar 3.6	Tepung Tapioka	34
Gambar 3.7	LPG	35
Gambar 3.8	Timbangan digital	36
Gambar 3.9	Ayakan	36
Gambar 3.10	<i>Thermocouple (a) Thermometer Infrared/Thermogun (b)</i>	37
Gambar 3.11	<i>Blower</i>	37
Gambar 3.12	Alat Kompaksi	38
Gambar 3.13	<i>Crucible</i>	39
Gambar 3.14	Oven	39
Gambar 3.15	<i>Muffle furnace</i>	39
Gambar 3.16	Model briket di dalam <i>crucible</i>	41
Gambar 3.17	<i>X-Ray Diffraction PAN Analytical</i>	43
Gambar 3.18	SEM-EDX	44
Gambar 4.1	Hasil Pengujian XRD Bijih Nikel Laterit	51
Gambar 4.2	Hasil Pengujian XRD <i>Limestone</i>	53
Gambar 4.3	Pengaruh Variasi Massa Limestone	

	Terhadap Kadar Unsur Ni pada Produk Hasil Proses Reduksi	55
Gambar 4.4	Pengaruh Variasi Massa Limestone terhadap Recovery Ni dan Fe pada Produk Hasil Proses Reduksi	62
Gambar 4.5	Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Faktor Selektivitas Produk Hasil Proses Reduksi	66
Gambar 4.6	Pengaruh Variasi Massa Limestone (a)16gr (b) 18gr (c) 20gr (d) 22gr (e) 24gr (f) 26gr Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Produk Hasil Proses Reduksi	69
Gambar 4.7	Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Kadar Unsur Ni pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi	72
Gambar 4.8	Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi.....	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Kelas-Kelas Batu Bara.....	10
Tabel 2.2	Mineral yang Diasosiasikan dengan <i>Limestone</i> ...	11
Tabel 3.1	Rancangan Penelitian.....	32
Tabel 3.2	Jadwal Penelitian	33
Tabel 4.1	Hasil Pengujian EDX Bijih Nikel Laterit	50
Tabel 4.2	Hasil Pengujian <i>Proximate Analysis</i> Batu Bara.....	52
Tabel 4.3	Hasil Pengujian EDX <i>Limestone</i>	53
Tabel 4.4.	Komposisi Unsur Logam Setelah Proses Reduksi	55
Tabel 4.5.	Perhitungan Massa dan <i>Recovery</i> Ni Hasil Reduksi	61
Tabel 4.6.	Perhitungan Massa dan <i>Recovery</i> Fe Hasil Reduksi	61
Tabel 4.7.	Perbandingan <i>Selectivity Factor</i> di Beberapa Penelitian	65
Tabel 4.8.	Identifikasi Fasa pada Produk Logam Hasil Proses Reduksi.....	70
Tabel 4.9.	Identifikasi Fasa pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi	76

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sejak Harry Brearley menemukan bahwa baja paduan dengan nikel dan kromium menghasilkan baja tahan karat, permintaan nikel telah melampaui laju pertumbuhan ekonomi global (Crundwell *et al.*, 2011). Tren kebutuhan nikel telah meningkat tajam terutama di Indonesia seiring dengan kebutuhan akan pembangunan infrastruktur dan industri. Oleh karena itu, dirasa perlu memenuhi kebutuhan dan permintaan pasar dengan proses pengolahan nikel yang optimum.

Nikel sendiri ditambang dari dua jenis bijih: laterit dan sulfida. Meskipun sekitar 70% dari cadangan bijih ditemukan pada bijih laterit, namun hanya sekitar 40% dari produksi nikel berasal dari laterit. Laterit sebagian besar digunakan untuk memproduksi feronikel, yang digunakan langsung dalam pembuatan baja. Laterit banyak ditemukan dan ditambang pada daerah tropis salah satunya Indonesia (Crundwell *et al.*, 2011). Indonesia sendiri merupakan negara penghasil nikel terbesar kedua dunia setelah Rusia yang memberikan sumbangan sekitar 15% dari jumlah produksi nikel dunia pada tahun 2010 (Fitrian, 2014). Sedangkan untuk nikel laterit, Indonesia sendiri menempati urutan ke 4 sebagai negara dengan potensi terbesar (12%) setelah *New Macedonia* (21%), Australia (20%) dan Filipina (17%) (Van der Ent *et al.*, 2013). Seiring semakin menyusutnya cadangan nikel sulfida, meningkatnya permintaan nikel, dan kemajuan besar dalam teknologi metalurgi, pengembangan dan pemanfaatan bijih nikel laterit lebih lanjut telah menarik perhatian besar (Macedo *et al.*, 2015).

Saat ini, terdapat beberapa metode yang umum digunakan dalam mengolah bijih nikel laterit antaralain dengan hidrometalurgi, pirometalurgi atau kombinasi dari keduanya. Bijih nikel laterit limonitik, memiliki kandungan besi dan kobalt tinggi, sedangkan kadar silikon, magnesium, dan nikel rendah, yang jauh

lebih menguntungkan menggunakan metode hidrometalurgi, seperti, *reducing roasting-ammoniac leaching*, *High Pressure Acid Leaching* (HPAL), serta *Heap Leaching* (HL). Namun sayangnya, walaupun hasil yang dihasilkan menjanjikan, proses ini dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang lumayan berat serta biaya produksi yang sangat tinggi (Wang *et al.*, 2017). Sedangkan pirometalurgi dilakukan dengan *smelting* menggunakan *blast furnace* untuk menghasilkan *nickel pig iron* dengan resiko penggunaan energi tinggi dan kualitas produk yang rendah (Zhang *et al.*, 2008). Oleh karena itu, dirasa perlu untuk menggunakan metode terobosan dengan hasil maksimal namun paling sedikit menimbulkan pencemaran lingkungan.

Metode terobosan yang dapat digunakan tidak lain adalah dengan menggunakan reduksi langsung dan selanjutnya dilakukan separasi secara fisik. Reduksi langsung turut serta menyokong konsep ramah lingkungan dan pengoptimalan efisiensi energi. Selain itu, metode ini cenderung lebih mudah dan dapat dilakukan pemilihan dalam ekstraksi peningkatan kadar nikel yang lebih dikenal sebagai reduksi selektif. Reduksi selektif adalah proses reduksi logam oksida menjadi logam menggunakan reduktor tertentu yang dilakukan pada temperatur dibawah titik lebur oksida tersebut (A. Vigés, 2011). Metode ini dipilih karena proses peningkatan kadar nikel jauh lebih mudah dan lebih cepat.

Telah banyak usaha yang dilakukan untuk mencapai hasil yang optimum, antara lain; temperatur, batu bara, fluks, *selective agent* dan masih banyak lagi. Fluks merupakan salah satu bagian yang penting dalam proses reduksi selektif, karena berperan sebagai pengikat pengotor pada proses reduksi dapat berjalan dengan baik. Oleh karena itu, dirasa perlu meneliti variasi baik jenis maupun konsentrasi dari fluks. Dari banyak jenis fluks yang pernah digunakan dan diteliti (dolomit, *limestone*, *quicklime*), salah satu jenis fluks yang dapat digunakan dan memiliki hasil paling baik dalam *recovery* Fe dan Ni adalah *limestone* (Mahendra, 2017).

Karena belum adanya studi tentang pengoptimalan komposisi jumlah fluks yang digunakan, maka dirasa perlu untuk meneliti mengenai jumlah fluks yang paling optimum, dalam hal ini fluks yang digunakan adalah *limestone*. Merujuk pada hasil penelitian sebelumnya dimana hasil reduksi dari beberapa jenis fluks yang paling baik yaitu *limestone*. Maka dalam studi ini dilakukan reduksi langsung secara karbotermik bijih nikel laterit menggunakan reaktor *bed* batubara-*limestone*, dengan variasi massa *limestone*, agar manfaat variasi massa *limestone* untuk reduksi selektif semakin berkembang demi pengoptimalan teknologi pengolahan nikel laterit baik dari segi efisiensi proses, ekonomi, maupun lingkungan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi massa fluks (*limestone*) pada proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap kadar unsur Ni dan Fe yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh variasi massa fluks (*limestone*) pada proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap *recovery* unsur Ni dan Fe yang dihasilkan?
3. Bagaimana pengaruh variasi massa fluks (*limestone*) pada proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap faktor selektivitas produk yang dihasilkan?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menganalisis masalah pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah, antara lain:

1. Komposisi bijih nikel laterit limonitik, batu bara yang digunakan diasumsikan homogen.
2. Tekanan kompaksi yang diberikan dianggap homogen.
3. Tapioka digunakan sebagai pengikat dan pengaruh dari reaksi tapioka diabaikan.
4. Permeabilitas dan porositas diasumsikan homogen.

5. Energi panas yang digunakan pada proses reduksi berasal dari *furnace*. Energi panas pembakaran batu bara tidak dipertimbangkan.
6. Temperatur di bagian luar dan bagian dalam *crucible* dianggap sama.
7. Waktu tahan saat pemanasan dianggap sama.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan paparan masalah dan latar belakang di atas, maka tujuan penelitian ini antara lain:

1. Menganalisa pengaruh variasi massa fluks (limestone) pada proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap kadar unsur Ni dan Fe.
2. Menganalisa pengaruh variasi massa fluks (limestone) pada proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap *recovery* unsur Ni dan Fe.
3. Menganalisa pengaruh variasi massa fluks (limestone) pada proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap faktor selektivitas produk yang dihasilkan?

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat yaitu untuk memberikan informasi empiris dari parameter proses terhadap variasi fluks (*limestone*) yang optimal untuk meningkatkan kadar dan *recovery* nikel dan besi pada proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik yang berasal dari Sulawesi Tenggara.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Nikel

Nikel (Ni) banyak terdapat pada batuan beku sebagai logam bebas atau sebagai kompleks dengan besi. Nikel berada pada posisi ke-dua puluh dua di antara unsur-unsur yang paling melimpah di kerak bumi (Sunderman dan Oskarsson 1991). Ahli kimia Swedia Ronstadt pada 1751 menemukan Ni dengan nomor atom 28 dan berat atom 58,71 pada kondisi oksidasi (McGrath 1995). Nikel murni sendiri merupakan logam keras berwarna putih keperakan, dan memiliki sifat-sifat yang menyebabkannya sangat diinginkan untuk dijadikan paduan dengan logam lain. Beberapa logam yang dapat dipadukan dengan nikel adalah besi, tembaga, kromium, dan seng. Paduan ini digunakan dalam pembuatan koin logam dan perhiasan dan dalam industri untuk membuat barang-barang seperti *valve* dan *heat exchanger*. Sebagian besar nikel digunakan untuk membuat stainless steel (Fay *et al.*, 2005).

Banyaknya penggunaan nikel tersebut disebabkan oleh sifat nikel yang istimewa yaitu mempunyai ketahanan terhadap serangan korosi, mempunyai kekuatan dan ketangguhan yang baik pada temperature tinggi, dan mempunyai konduktivitas panas dan listrik yang relatif rendah (INSG, 2008) Di Indonesia, diketahui potensi sumber daya nikel mencapai 1.878.550.000 ton dengan kandungan unsur nikel rata-rata 1,45%. Sebagian dari potensi sumber daya tersebut sudah ditambang dan diekspor dalam bentuk nickel matte, ferronickel ataupun bijih nikel tanpa melalui proses pengolahan dan pemurnian oleh perusahaan-perusahaan yang banyak bertumbuhan dalam dasawarsa terakhir. Data terakhir dari Badan Geologi Kementerian ESDM menunjukkan bahwa Indonesia memiliki sumber daya nikel sebesar 2.633 juta ton *ore* dengan cadangan nikel sebesar 577 juta ton *ore* yang tersebar di Sulawesi, Kalimantan, Maluku dan Papua (ESDM, 2012).

Sedangkan jenis bijih nikel sendiri terbagi dalam dua jenis bijih yaitu bijih nikel laterit, dan sulfida. Nikel laterit adalah bijih

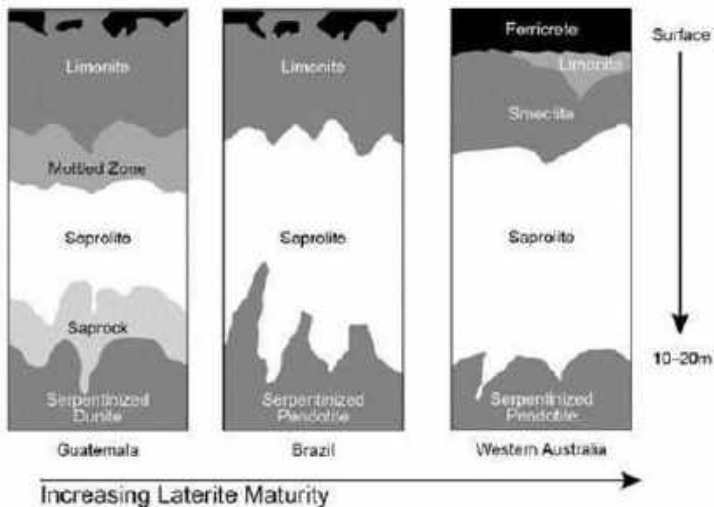
kompleks yang terbentuk akibat proses pelapukan dasar laut yang terdorong ke daratan akibat proses tektonik pada kulit bumi. Kadar nikel dari dari nikel laterit yang layak ditambang berkisar 1,3% - 2,5%. Bijih jenis nikel laterit berlimpah dan menyusun 70% dari sumberdaya nikel total di dunia. Nikel laterit ditambang dengan metode penambangan terbuka yang tersebar di daerah tropis muka bumi seperti New Caledonia, Filipina dan Indonesia (Crundwell, 2011).

Meskipun 70% dari tambang nikel berbasis bijih laterit, tetapi 60% dari produksi primer nikel berasal dari bijih sulfida. Bijih nikel laterit biasanya terdapat di daerah tropis atau sub-tropis yang mengandung zat besi dan magnesium dalam tingkat tinggi. Deposit tersebut biasanya menunjukkan lapisan yang berbeda karena kondisi cuaca. Lapisan pertama adalah lapisan yang kaya silika dan yang kedua adalah lapisan limonit didominasi oleh gutit [FeO(OH)] dan hematit (Fe₂O₃). Lapisan berikutnya adalah saprolit [(Ni, Mg) SiO₃.nH₂O)] yaitu lapisan yang kaya magnesium dan elemen basal. Lapisan terakhir adalah batuan dasar yang berubah dan tidak berubah. Antara lapisan saprolit dan limonit biasanya ada lapisan transisi yang kaya magnesium (10-20% Mg) dengan besi yang disebut serpentine [Mg₃Si₂O₅(OH)] (Yildirim, Morcali, Turan, & Yucel, 2013). Padahal menurut (Li, 1999), produksi nikel berbasis laterit lebih menguntungkan melalui pengurangan biaya produksi dan peningkatan pendapatan oleh produk. Sehingga membuat produksi nikel berbasis laterit lebih ekonomis dan kompetitif.

2.2 Nikel Laterit

Nikel laterit adalah produk residu yang berasal dari pelapukan kimia batuan kumulatif yang memiliki kandungan Ni awal primer 0,2 - 0,4%. Karakteristik dari nikel laterit, termasuk kadar dan mineralogi, dikendalikan oleh interaksi faktor iklim dan geologis (Brand, 1998). Nikel laterit sendiri terbagi lagi menjadi dua jenis bijih yaitu bijih nikel limonit – smectit, dan bijih nikel saprolitik. Bijih nikel limonit – smectit terletak di bagian paling

atas dari lapisan lapisan bijih nikel. Bijih nikel limonit - smectit sendiri dituliskan sebagai $(\text{Fe},\text{Ni})\text{OOH}$ pada reaksi kimia. Nikel limonit – smectit memiliki kadar besi yang tinggi dan MgO yang rendah akibat *leaching* MgO dan SiO_2 yang dilakukan oleh sisa tanaman dan hewan yang telah mati. Bijih nikel saprolitik terletak dibawah lapisan bijih limonit – smectit. Dalam reaksi kimia bijih ini disimbolkan sebagai $(\text{Mg}[\text{Ni},\text{Co}])_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Selain itu, nikel saprolit memiliki kadar MgO yang relatif tinggi dibanding dengan nikel limonit – smectit karena letaknya yang dalam menyebabkan proses *leaching* yang terjadi pada nikel saprolit lebih sedikit daripada nikel limonit – smectit (Crundwell, 2011).



Gambar 2.1 Profil Persebaran Bijih Nikel Laterit pada Beberapa Lokasi di Dunia (Crundwell, 2011)

Bijih nikel diklasifikasikan ke dalam tiga tipe utama berdasarkan komposisi dan mineralogi pada lapisan profilnya (Kerfoot, 2005 & Mudd, 2010):

- 1. Tipe saprolitik;** atau yang biasa disebut sebagai *garnierite* atau *serpentine*, mengandung sedikit logam besi (Fe),

namun tinggi kandungan magnesium ($\text{Fe} < 12\%$ dan $\text{MgO} > 25\%$). Salah satu mineral paling penting yang mengandung logam nikel termasuk dalam kelompok *garnierite* berupa mineral *hydrous nickel-magnesium silicate*. Kandungan NiO di dalam mineral tersebut memberikan profil warna hijau. Berdasarkan perbandingan $(\text{Mg}+\text{Ni})/\text{Si}$, mineral tersebut dibagi menjadi tiga sub kelompok; yaitu kelompok *serpentine* dan klorit dengan perbandingan $3/2$, dan kelompok berupa tanah liat (*clays*) dengan perbandingan $3/4$.

2. **Nontronitik**; yaitu merupakan jenis menengah, dan terletak di antara jenis limonitik dan saprolitik ($12\text{-}15\%$ Fe dan $25\text{-}35\%$ atau $10\text{-}25\%$ MgO).
3. **Tipe limonitik**; yaitu salah satu tipe bijih nikel laterit yang kaya kandungan akan logam besi (Fe), tetapi habis di dalam silika dan magnesium ($15\text{-}23\%$ atau lebih tinggi dari Fe, $\text{MgO} < 10\%$). Limonit umumnya mengandung senyawa besi oksida berupa *goethite* ($\alpha\text{-FeO}\cdot\text{OH}$) sebagai konstituen yang dominan. Nikel laterit tipe limonit juga biasanya kaya kandungan kobalt (Co) dan krom (Cr). Senyawa besi oksida yang terkandung di dalam laterit memiliki struktur kristalin yang buruk dengan ukuran kristal nanometrik dan memiliki area permukaan yang besar. Karakteristik tersebut dapat mengakibatkan penyerapan ion dalam jumlah yang besar, khususnya ion Al^{3+} dari dalam tanah. Sehingga, senyawa besi oksida jarang terbentuk dalam bentuk senyawa murni di dalam laterit, karena ion tersebut dapat mengikat logam Fe (Landers, 2007).

Sehingga, dirasa perlu untuk mengetahui profil bijih dari tambang karena pengaruhnya yang sangat penting adanya terhadap proses pengolahan nikel laterit, karena perbedaan jenis bijih akan menyebabkan cara yang berbeda untuk mengolah bijih tersebut baik hidrometalurgi maupun pirometalurgi (Crundwell, 2011).



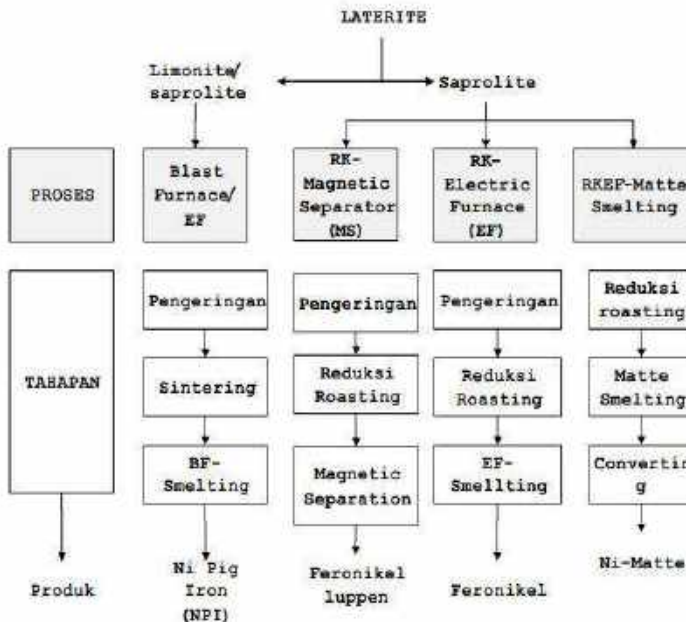
Gambar 2.2 Bijih Nikel Laterit

2.3 Nikel Laterit Limonitik

Mineral limonit dengan rumus senyawa $(\text{Fe},\text{Ni})\text{O}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ merupakan jenis laterit berbasis oksida yang paling dekat dengan permukaan dan tersebar pada daerah tropis maupun subtropis di sekitar garis katulistiwa. Bijih limonit mengandung banyak besi hidroksida dalam bentuk *goethite* ($\text{FeO}.\text{OH}$) sehingga komposisi besi sangat dominan mencapai 40-60% sedangkan nikel biasanya hanya berkisar pada angka 0,5-1,7% (Pickles *et al.*, 2014). Tidak hanya itu, laterit limonitik juga terasosiasi dengan dengan mineral silikat dan magnesium oksida yang mengantarkan pada rumitnya mineralogi sehingga sulit dibenefikasi secara fisik. Kompleksitas struktur dalam limonit dapat dijelaskan melalui proses pembentukannya. Proses diawali dengan pelapukan batuan peridotit yang mengandung mineral besi, magnesium, silikat dan $\pm 0,3\%$ nikel. Unsur-unsur dalam mineral tersebut kemudian

bereaksi dengan air tanah dan membentuk unsur terlarut dan koloid silikat. Besi dengan cepat teroksidasi membentuk goetit dan hematit dan tetap berada di sekitar permukaan, sedangkan besi, nikel, magnesium dan silika meresap ke bawah membentuk deposit laterit dalam suasana asam. Ketika larutan-larutan tersebut dinetralkan oleh proses-proses alamiah, maka terbentuk endapan silikat dan magnesium dalam bentuk oksida maupun silikat terhidrasi. Beramaan dengan itu, nikel dalam bentuk ion Ni^{2+} menjadi bagian deposit dengan melakukan substitusi Mg^{2+} dan Fe^{2+} pada beberapa posisi dalam kisi kristal sebagai substituen isomorf (Keerfot, 2012 dan Li *et al.*, 2013).

Pengolahan metalurgi dari nikel laterit limonit dapat dibagi menjadi dua proses yaitu pirometalurgi dan hidrometalurgi. Pemilihan proses yang akan digunakan ini dipengaruhi oleh kandungan pada bijih, peningkatan kandungan yang terbatas, teknologi pengolahan yang kompleks, kondisi geografis, dan kebutuhan infrastruktur, seperti; pembangkit listrik, pelabuhan, infrastruktur jalan .



Gambar 2.3. Diagram Ekstraksi Nikel Laterit (Iwan, 2016) fasilitas pengolahan *slag* (Filipe, 2013).

Berdasarkan Gambar 2.3., proses ekstraksi nikel laterit diantaranya yaitu sebagai berikut:

1. Pembuatan Feronikel

Pembuatan feronikel dilakukan melalui dua rangkaian proses utama yaitu reduksi dalam tungku putar (*rotary kiln*, RK) dan peleburan dalam tungku listrik (*electric furnace*, EF). Dari hasil peleburan diperoleh feronikel (*crude ferronickel*) dengan kandungan 15-25% Ni) yang selanjutnya dimurnikan pada proses pemurnian dengan *oxygen blowing* untuk menghilangkan unsur pengotor. Hasil proses pemurnian dituang menjadi balok feronikel (*ferronickel ingot*) atau digranulasi menjadi butir-butir feronikel (*ferronickel shots*), dengan kadar nikel di atas 30%.

2. Pembuatan *Ni Matte*

Mate nikel dibuat secara komersial pertama kali di Kaledonia Baru dengan menggunakan *blast furnace* sebagai tanur peleburan dan gipsum sebagai sumber belerang sekaligus sebagai bahan fluks. Tetapi dewasa ini, pembuatan mate dari bijih oksida dilakukan dengan menggunakan tanur putar dan tanur listrik. Dimana mate yang dihasilkan mengandung $\pm 30 - 35\%$ nikel, $10 - 15\%$ belerang, dan sisanya besi, dimasukkan ke dalam *converter* untuk menghilangkan/mengurangi sebagian besar kadar besi. Hasil akhir berupa mate yang mengandung $\pm 77\%$ nikel, 21% belerang, serta kobal dan besi masing-masing $\pm 1\%$.

3. Pembuatan *Nickel Pig iron (NPI)*

Nickel pig iron adalah logam besi wantah dengan kandungan Ni sekitar 5-10% Ni yang merupakan hasil dari proses peleburan bijih nikel kadar rendah di bawah 1,8% Ni. Pada saat ini, NPI dihasilkan dari proses peleburan bijih nikel kadar rendah dengan menggunakan tungku tegak, *blast furnace*. Proses ini melalui tahapan *sintering* dan peleburan dalam tungku tegak.

4. Pembuatan Feronikel *Luppen* atau *Sponge Nikel*

Sponge Nikel ini, dapat dibuat dari nikel laterit dengan melalui proses pengeringan pada temperatur $400-600^{\circ}\text{C}$, kemudian direduksi dalam *rotary kiln* dengan batu bara yang rendah sulfur dan fosfor sebagai fluks. Temperatur reduksi kira-kira pada temperatur 1200°C . Produk *sponge* nikel ini mengandung kira-kira 4% Ni. Selanjutnya, dapat dilakukan peleburan dengan menggunakan tungku listrik (Siti, 2013).

United States Geological Survey (2011) menunjukkan fakta hanya 40% produksi nikel global dihasilkan dari sumbangsih deposit oksida laterit, sedangkan 60% sisanya diolah dari deposit sulfida. Penyebabnya tidak lain karena rendahnya kadar nikel dalam laterit (1-2,5%) dan kompleksitas proses produksi serta pemurniannya (Farrokhpay *et al*, 2018). Kondisi tersebut tentu membuat persediaan bijih nikel sulfida terkuras sehingga

pengembangan teknologi pengolahan nikel laterit menjadi fokus perhatian banyak teknokrat demi tercapainya produksi yang lebih efektif dan efisien. Sehingga diharapkan nikel laterit terutama limonitik karena kadarnya yang masih bisa ditingkatkan serta metode ekstraksinya yang cenderung dapat dilakukan secara bertingkat, mulai dari pirometalurgi dan dapat dilanjutkan dengan hidrometalurgi untuk peningkatan kadar nikel secara optimum.

2.4 Batu Bara

Batu bara merupakan bahan bakar yang berasal dari tumbuhan dan hewan yang telah melapuk sejak zaman pra-sejarah sehingga mengalami berbagai proses alamiah. Meskipun menghasilkan emisi karbondioksida yang tinggi, batu bara tetap menjadi pilihan utama untuk berbagai proses produksi dalam industri karena harganya yang relatif murah. Kualitas dari batu bara dalam aplikasinya sebagai bahan bakar ditentukan oleh beberapa faktor seperti usia deposit, tipe vegetasi tempat batu bara tersebut terkubur dan juga temperatur dan tekanan di sekitar vegetasi (Breeze, 2015).

Batu bara diklasifikasikan berdasarkan kadar karbon dan kadar air di dalam batu bara tersebut. Batu bara kelas tinggi memiliki kadar karbon tinggi dan kadar air rendah, batu bara kelas rendah sebaliknya. Kelas kelas dari batu bara terdiri atas:

1. *Anthracite* adalah batu bara kelas terbaik, dengan kandungan karbon mencapai 92% dry content. *Anthracite* memiliki kadar air dan material volatile yang rendah sehingga saat dibakar menghasilkan polusi yang relatif sedikit dibanding batu bara jenis lain. Selain itu karena kadar karbonnya yang tinggi densitas energinya lebih tinggi daripada batu bara jenis lain di angka 32 – 33 MJ/kg.
2. *Bituminous* merupakan batu bara dengan jumlah yang paling melimpah. *Bituminous* memiliki kadar karbon antara 76% - 86%, kadar air 8% - 18%, dan material volatile 14%-46%. Batu bara ini sangat mudah terbakar terutama dalam kondisi

telah dihaluskan dan digiling, sehingga amat cocok untuk aplikasi pembangkit tenaga.

3. Batu bara *sub-Bituminous* adalah batu bara dengan kadar karbon 70% - 86%, lebih rendah dari dua jenis batu bara sebelumnya, kadar air 18% - 38%, lebih tinggi daripada dua jenis batu bara sebelumnya, dan material volatile 42% - 53%. Batu bara kelas ini sangat mudah terbakar sehingga cocok digunakan sebagai bahan bakar untuk pembangkit tenaga. Selain beberapa kualitas diatas, batu bara *sub-Bituminous* memiliki kadar sulfur yang rendah sehingga relatif lebih ramah lingkungan.
4. *Lignite* merupakan kelas terakhir dari batu bara yang digunakan pada pembangkit, kadar karbonnya 65% - 70%, dan kadar air 35% - 50%.
5. *Peat* adalah tipe dari *lignite* yang tidak terkonsolidasi, ditemukan dekat permukaan, dan terkadang disebut sebagai batu bara coklat. *Peat* memiliki kadar karbon paling rendah dibanding kelas yang lain yaitu <60% sedangkan kadar air yang tinggi yaitu 75%.

Tabel 2.1 Perbandingan Kelas-Kelas Batu Bara

<i>Coal</i>	<i>Dry, Carbon Content (%)</i>	<i>Moisture Content Before Drying (%)</i>	<i>Dry, Volatile Content (%)</i>	<i>Heat Content (MJ/kg)</i>
<i>Anthracite</i>	86 – 92	7 – 10	3 – 14	32 – 33
<i>Bituminous coal</i>	76 – 86	8 – 18	14 – 46	23 – 33
<i>Sub-bituminous coal</i>	70 – 76	18 – 38	42 – 53	18 – 23
<i>Lignite</i>	65 – 70	35 – 55	53 – 63	17 – 18
<i>Peat</i>	<60	75	63 – 69	15

Menurut Breeze, (2015), Indonesia merupakan salah satu eksportir batu bara terbesar di dunia dengan total produksi sebesar 489 juta ton pada tahun 2013, karena harganya yang ekonomis dan proses produksi sampai ke pemakaian yang relatif lebih mudah dibanding alternatif energi yang lain menjadikan batu bara pilihan yang baik, meskipun batu bara memiliki densitas energi yang lebih kecil dibanding gas alam dan minyak mentah sehingga diperlukan penggunaan dalam jumlah yang lebih banyak untuk hasil yang sama dalam menghidupi industri di Indonesia.

2.5 Limestone

Limestone merupakan jenis batuan endapan yang komposisi utamanya adalah kalsium karbonat (CaCO_3) dalam bentuk mineral utama berupa *calcite*. Mineral lain yang juga terasosiasi dengan *limestone* antara lain *aragonite*, *magnesite*, *dolomite*, *ankerite* dan *siderite* yang memiliki sistem kristal dan pembentukan berbeda-beda berdasarkan penelitian dari Kalasova *et al.*, (2018), sebagaimana terlihat pada Tabel 2.2. Perbedaan tersebut diakibatkan oleh pembentukan *limestone* di berbagai lingkungan

cekung sedimen, sehingga berbeda dari berbagai segi yang berujung pada perbedaan karakteristik ketika dilakukan pembakaran serta respon saat bereaksi dengan asam.

Tabel 2.2 Mineral yang Diasosiasikan dengan *Limestone* (Shelley, 2015)

<i>Mineral</i>	<i>Formula</i>	<i>Crystal System</i>	<i>Occurrence</i>
<i>Aragonite</i>	CaCO_3	<i>Orthorhombic</i>	<i>Some shells and mud, unstable during burial</i>
<i>Calcite</i>	CaCO_3	<i>Hexagonal</i>	<i>Some shells and mud, relatively stable during burial</i>
<i>Magnesite</i>	MgCO_3	<i>Hexagonal</i>	<i>Rare surface mineral</i>
<i>Dolomite</i>	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	<i>Hexagonal</i>	<i>Rarely at the surface, more common as a subsurface replacement</i>
<i>Ankerite</i>	$\text{Ca}(\text{MgFe})(\text{CO}_3)_2$	<i>Hexagonal</i>	<i>A rare cement</i>
<i>Siderite</i>	FeCO_3	<i>Hexagonal</i>	<i>As oolites and cement</i>

Limestone memegang peranan penting dalam perekonomian karena *limestone* dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. Fungsi pertamanya adalah sebagai pengatur kadar pH di tanah pertanian yang bersifat asam karena *limestone* mengandung kapur yang bersifat basa. Kedua *Limestone* berguna sebagai material agregat bangunan yang baik. Serta yang terpenting *Limestone* berguna sebagai fluks. (Shelley, 2015). Kandungan kalsium karbonat akan terdekomposisi menjadi kalsium oksida dan karbon dioksida pada suhu 750°C menurut reaksi:



Gas karbon dioksida selanjutnya akan tereduksi menjadi karbon monoksida yang merupakan reduktor kuat untuk mereduksi bijih besi maupun nikel menjadi bentuk logamnya (Noviyanti, 2015).

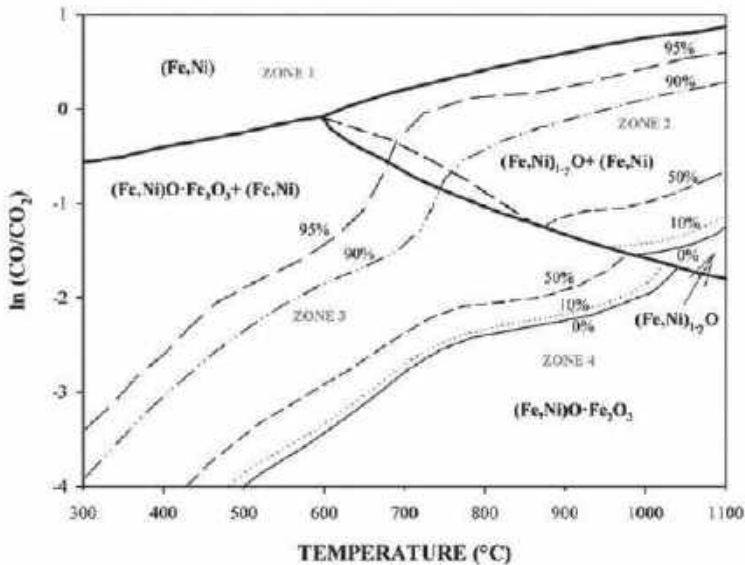


Gambar 2.4 *Limestone*

Penambahan fluks dimaksudkan untuk meningkatkan produksi gas reduktan karbonmonoksida melalui reaksi antara karbon dari batu bara dan karbondioksida hasil dekomposisi fluks. Tambahan karbonmonoksida tersebut akan meningkatkan potensial reduksi (CO/CO_2) sehingga meningkatkan *recovery* Ni. Terjaganya potensial reduksi dapat berakhir pada tercapainya reduksi optimal oksida-oksida Fe dan Ni untuk membentuk logam. Khusus dalam studi reduksi langsung, tujuan lain pemberian karbonmonoksida sekunder dari fluks adalah agar tercapainya reduksi yang memungkinkan produk memiliki kadar Ni setinggi-tingginya dan kadar Fe menengah (Pintowantoro dan Abdul, 2019).

Jika dikaitkan dengan dengan diagram stabilitas Fe-Ni-O pada Gambar 2.5, maka tugas utama fluks adalah untuk

memastikan bahwa kondisi reduksi tetap berada pada Zona II, zona dimana proses reduksi selektif berlangsung optimal (Pintowantoro dan Abdul, 2019). Pada zona II, produk reduksi dapat berupa $(\text{Fe,Ni})_{(1-y)}\text{O} + (\text{Fe,Ni})$, dimana masih terdapat senyawa berupa oksida Fe dan Ni. Kontrol reduksi pada zona II akan mendorong tercapainya kadar Ni menengah dengan *recovery* tinggi, juga kadar Fe yang tidak terlalu rendah. Pengaplikasian temperatur yang lebih tinggi pada penelitian ini (1400°C), secara kualitatif akan meningkatkan laju reaksi reduksi dibanding zona yang lain.



Gambar 2.5 Diagram stabilitas Fe-Ni-O (Hallet, 1997 dan Elliott dkk., 2016)

Selain itu, fluks *limestone* juga berkontribusi menghasilkan produk dekomposisi berupa kalsium oksida (CaO). Terlibatnya CaO dalam proses reduksi dapat mempromosikan reduksi Ni dan Fe serta dapat mengoptimasi kondisi dinamis dari bijih nikel laterit. Kondisi yang dimaksud tidak lain adalah masifnya

agregasi Ni dan Fe sehingga ukuran partikel masing-masing logam menjadi lebih besar. Hal inilah yang berujung pada peningkatan kadar Ni dan Fe karena kemudahan saat separasi magnetik (Wang dkk., 2017).

2.6 Reduksi Langsung dengan *Selective Agent*

Reduksi oksida logam oleh karbon monoksida dan hidrogen dengan pembentukan CO₂ dan H₂O sebagai produk akhir disebut reduksi tidak langsung. Sedangkan, reduksi oleh karbon dengan pembentukan CO sebagai produk akhir disebut reduksi langsung (Babich A., 2015). Sedangkan dalam proses pembuatan besi, reduksi langsung didefinisikan sebagai proses apa pun di mana besi logam diproduksi oleh reduksi bijih besi pada suhu di bawah titik leleh besi. Produk dari proses ini disebut *Direct Reduced Iron* (DRI) (C.L. Nassaralla, 2001).

Proses reduksi langsung merupakan proses pembuatan besi yang menghindari fasa cair. Proses ini merupakan pengembangan dari teknologi *blast furnace*. Sebagai teknologi pembuatan besi yang paling tua, *blast furnace* memiliki beberapa kelemahan, yakni:

1. Temperatur proses sangat tinggi (>1500°C) untuk melelehkan besi.
2. Konsumsi energi yang sangat tinggi, dikarenakan untuk mencapai temperatur tinggi.
3. Penggunaan kokas yang harganya relatif mahal dan dalam jumlah banyak.

Berdasarkan uraian di atas, kita dapat mengetahui bahwa dari segi energi, proses reduksi besi dengan *blast furnace* sangatlah boros. Hal ini berbeda dengan proses reduksi langsung, dimana konsumsi energi lebih kecil dan bahan baku tidak menggunakan kokas tetapi batu bara dan gas alam yang relatif lebih murah. (Komarudin, 2008)

Salah satu metode yang potensial dan strategis untuk mengekstraksi bijih laterit berkadar rendah adalah reduksi langsung dengan *selective agent*. Reaksi ini terjadi pada suhu yang

tidak terlalu tinggi bila dibandingkan dengan *blast furnace* dan produknya berupa paduan feronikel yang kemudian dapat dipisahkan melalui separasi magnetik, *leaching*, maupun metode-metode lainnya. Tujuan dari metode ini adalah untuk membentuk feronikel berkadar nikel tinggi yang dapat dengan mudah diproses lebih lanjut menggunakan teknologi dan metode yang telah tersedia serta untuk mereduksi jumlah bijih yang digunakan sehingga biaya menjadi lebih sedikit. Efektifitas reduksi sangat bergantung pada efisiensi separasi dalam memperoleh feronikel dari bijih yang telah tereduksi. Sementara itu, efisiensi separasi juga merupakan fungsi kadar nikel, *recovery* nikel dan ukuran partikel feronikel yang terbentuk. Umumnya, partikel dengan butir yang lebih besar lebih mudah dipisahkan melalui berbagai jenis metode berdasarkan densitas maupun secara magnetic (Li *et al.*, 2012).

Reduksi dengan aditif untuk mendapatkan konsentrat feronikel dengan kadar nikel tinggi baru-baru ini menjadi topik penelitian yang populer (Cao *et al.*, 2010). *Selective Agent* berfungsi untuk meningkatkan temperatur dan waktu reduksi telah menunjukkan hasil pada peningkatan ukuran partikel ferronickel (Elliot, 2015 & Zhu, 2012). Penambahan sulfur dan *fluxing agents*, seperti Natrium Sulfida (Na_2SO_4) juga dapat meningkatkan ukuran partikel feronikel yang terbentuk (Setiawan, 2016).



Gambar 2.6 Na_2SO_4

Menurut hasil percobaan Jiang *et al.*, (2013) dengan aditif yang berbeda, Na₂O meningkatkan pemulihan nikel, dan S secara signifikan mempengaruhi peningkatan kadar nikel. Penambahan Na₂SO₄ bertujuan untuk meningkatkan selektivitas Ni dengan cara menurunkan kadar komponen yang tidak diinginkan. Na₂SO₄ akan terurai menjadi natrium yang dapat mengikat silikat, sedangkan Fe bereaksi dengan S membentuk FeS. Natrium silikat dan FeS merupakan komponen bukan magnet yang ikut menjadi *tailing* (residu) pada pemisahan magnetik, sehingga selektivitas Ni pada konsentrat meningkat. Selain itu dengan adanya fasa FeS dan natrium silikat yang mempunyai titik leleh rendah akan melarutkan partikel-partikel logam dan mempercepat proses perpindahan massa partikel logam sehingga memacu pembentukan dan pertumbuhan partikel logam (Li, 2012).

2.7 Briket Nikel Laterit

Salah satu feed material pada reduksi selektif pada penelitian kali ini adalah fluks. Fluks berguna untuk menjaga tingkat basisitas slag agar reduksi dapat berjalan dengan baik. Akan tetapi, jika fluks tersebut langsung dimasukkan dalam maka akan membutuhkan banyak energi untuk menaikkan temperatur fluks tersebut. Sehingga, fluks akan lebih baik ditambahkan saat proses persiapan material. Oleh karena itu diperlukan suatu proses penggumpalan (aglomerasi). Proses aglomerasi menjadikan ore laterit limonit yang berupa tanah digumpalkan yang telah dicampur dengan batubara serta fluks dengan komposisi tertentu.

Proses aglomerasi yang digunakan berupa pembriketan. Teknologi pembuatan briket banyak diaplikasikan untuk optimalisasi penggunaan batu bara sebagai bahan bakar. Hal ini dilatar belakangi oleh keresahan akibat tingginya polusi gas-gas karbondioksida dan sulfur dioksida hasil pembakaran langsung batu bara. Briket dianggap sebagai salah satu solusi untuk menciptakan sistem pembakaran yang lebih ramah lingkungan sekaligus meningkatkan efisiensi dan efektifitas batu bara sebagai sumber energi (Wang dan Li, 2011).

Campuran dari laterit, batu bara, dan fluks dikompresi dalam suatu cetakan dengan bentuk tertentu, dengan komposisi tambahan berupa kanji yang berfungsi sebagai zat pengikat. Kanji digunakan sebagai pengikat (*binder*) pada briket untuk; meningkatkan kekuatan *green* briket sebelum proses *roasting*, mengurangi tingkat degradasi briket saat transportasi dan *handling*. Karena berfungsi untuk keperluan sebelum proses *roasting*, binder tidak boleh memberikan efek negatif pada proses *roasting*. Kanji dipilih sebagai *binder* karena kanji berasal dari zat organik, yang akan terbakar habis saat pemanasan. Menurut Li (2012), perlu ditambahkan bahan tambahan berupa natrium sulfat untuk mekanisme *selective reduction* pada Ni. Secara spesifik pembriketan dibagi menjadi briket dingin dan briket panas. Briket dingin hanya dilakukan pada temperatur kamar, sedangkan briket panas dilakukan proses kalsinasi hingga temperatur di atas 1000°C hingga dibawah temperatur lelehnya. Proses kalsinasi dilakukan dalam proses *roasting*.

Sedangkan menurut Crundwel, (2011) proses pembriketan yang dilakukan berupa briket panas, hal ini dilakukan untuk memperoleh komposisi kimia briket laterit yang sesuai. Proses pembriketan panas sendiri harus mencakup:

1. Menghilangkan sisa kadar air pada ore (untuk menghindari terjadinya ledakan pada mini blast furnace).
2. Mereduksi sekitar seperempat nikel dalam ore menjadi nikel metal.
3. Mereduksi mineral Fe^{3+} menjadi mineral Fe^{2+} dengan kadar tinggi dan sekitar 5 % dari besi menjadi besi metal.
4. Menambah batu bara dengan cukup, sehingga kadar mineral yang tersisa untuk reduksi tahap akhir.

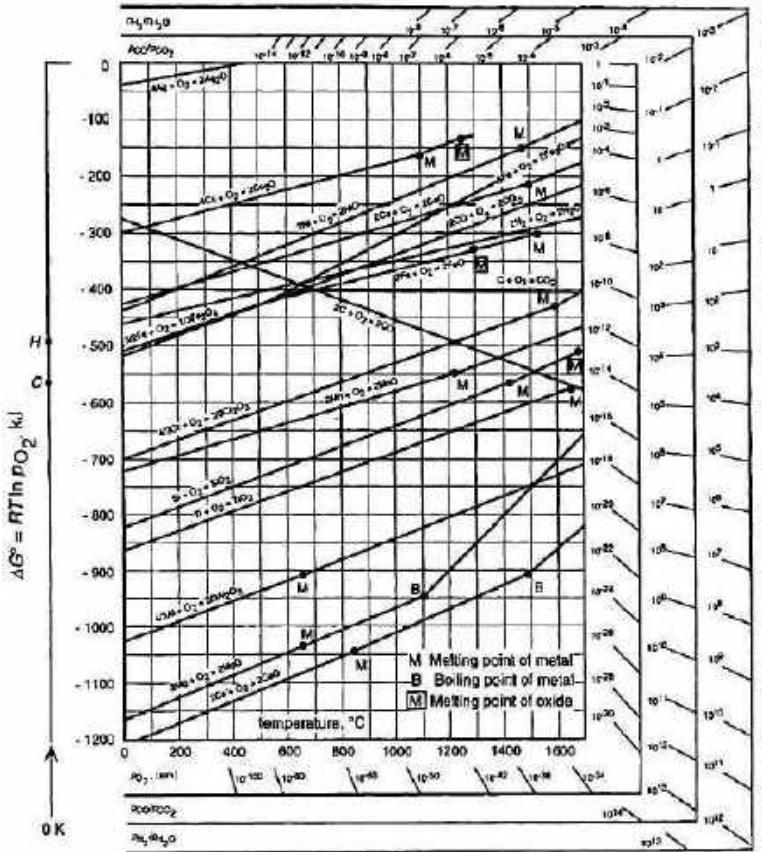
Bentuk briket yang digunakan berupa bentuk bantal (*pillow*) dipilih dengan maksud tertentu. Jika dibandingkan dengan briket berbentuk bola yang memiliki keseragaman tegangan di seluruh permukaannya. Namun briket dengan bentuk bola akan cukup sulit dibuat karena keterbatasan alat yang ada, proses pelepasan briket bola dari alat pembentuk briket atau cetakan akan sulit dilakukan.

Maka briket bebentuk bantal lebih mudah dibuat dengan menggunakan alat yang sudah umum digunakan. Briket bentuk bantal dengan volume yang sama memiliki tebal penambang kecil dan luas permukaan yang lebih besar dibanding dengan bentuk bola. Hal tersebut akan meningkatkan *heat flux* saat proses pemanasan. *Heat flux* yang besar akan meningkatkan *heat transfer* sehingga tingkat keberhasilan reduksi yang terjadi juga akan semakin besar.

2.8 Termodinamika Reduksi Nikel Laterit

Diagram Ellingham adalah diagram yang menyajikan data – data termodinamika suatu logam yang mengalami proses pembentukan oksida, sulfida, dan klorida. Diagram tersebut dibentuk dari plot ΔG° (perubahan energi bebas Gibbs) pada temperature (T) tertentu. Secara umum diagram Ellingham memiliki empat kegunaan utama, antara lain

1. Untuk menentukan tingkat kemudahan reduksi suatu logam oksida menjadi logam.
2. Untuk menentukan tekanan parsial oksigen pada temperatur tertentu agar logam oksida dapat tereduksi.
3. Untuk menentukan rasio karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) pada temperature tertentu agar logam oksida dapat tereduksi.
4. Untuk menentukan rasio hidrogen (H) dan karbon dioksida pada temperatur tertentu agar logam oksida dapat tereduksi.



Gambar 2.7 Diagram Ellingham (Stratton, 2013)

Posisi garis dari suatu reaksi pada diagram Ellingham menunjukkan kestabilan oksida sebagai fungsi dari temperature. Reaksi yang berada pada bagian atas diagram adalah logam yang bersifat mulia dan oksida dari logam ini bersifat tidak stabil dan mudah tereduksi. Semakin kebawah posisi kondisi dari reaksi akan berkebalikan dengan garis reaksi di bagian atas. Sehingga penentuan apakah suatu logam dapat mereduksi oksida logam lain

ditentukan oleh posisi garis antara logam dan oksida logam tersebut. Apabila posisi oksida logam yang akan direduksi berada diatas garis logam pereduksi maka reaksi reduksi dapat berjalan (Stratton, 2013)

Energi Gibbs adalah suatu ukuran dari penggerak yang dapat suatu reaksi terjadi. Persamaan energi Gibbs adalah sebagai berikut:

$$\Delta G = -T \cdot \Delta S + \Delta H \quad (2.2)$$

Dimana:

ΔG = perubahan energi Gibbs (J)

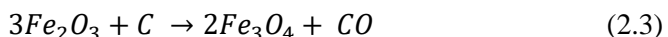
ΔH = perubahan entalpi reaksi (J)

ΔS = perubahan entropi reaksi (J/K)

T = temperatur absolut reaksi (K)

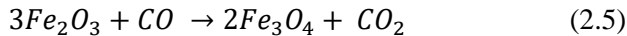
ΔG yang bernilai negatif menunjukkan bahwa suatu reaksi dapat terjadi secara spontan tanpa energi dari luar. Sementara itu reaksi yang memiliki ΔG positif menunjukkan reaksi tersebut tidak akan terjadi secara spontan. Entalpi adalah besaran dari energi yang dilepaskan ketika suatu reaksi berlangsung (panas dari suatu reaksi). Jika entalpinya bernilai negatif maka reaksi tersebut melepaskan energi (eksotermik), sedangkan jika bernilai positif maka reaksi tersebut membutuhkan energi (endotermik). Entropi adalah ukuran dari derajat ketidakteraturan suatu reaksi. Padatan memiliki bentuk yang teratur, cairan memiliki bentuk yang kurang teratur dan gas memiliki ketidakteraturan yang tinggi.

Dalam proses reduksi langsung laterit nikel limonitik, reaksi fasa solid berawal dari interaksi karbon dan limonit membentuk reduktor karbonmonoksida, sebagaimana disajikan dalam persamaan berikut:

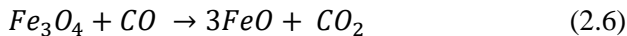


Reaksi kemudian berlanjut akibat terbentuknya gas intermediet sebagai produk reaksi reduksi dan reaksi *Boudouard* (reaksi *feed carbon* dengan karbondioksida membentuk karbonmonoksida). Reaksi reduksi laterit terbagi menjadi tiga tahap yakni reduksi oksida besi, reduksi nikel oksida dan gasifikasi karbon. Mekanisme reduksi komponen oksida besi dibagi menjadi 3 tahap:

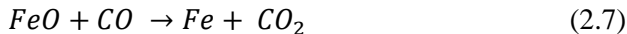
Tahap I: Reduksi hematit menjadi magnetit



Tahap II: Reduksi magnetit menjadi wustit

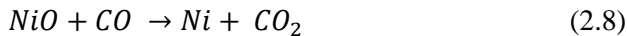


Tahap III: Reduksi wustit menjadi logam besi



(Zevgolis *et al.*, 2010)

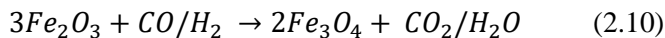
Reduksi nikel yang terjadi dalam satu tahap reaksi:

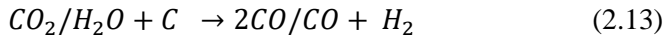
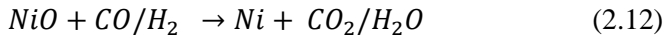
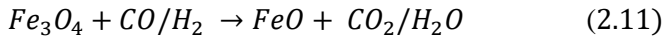


Gasifikasi karbon terjadi melalui reaksi *Boudouard*:

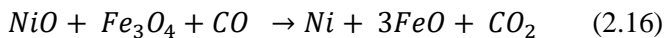
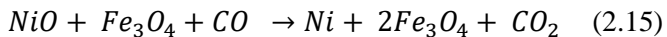


Berdasarkan penelitian Wang *et al.*, (1997), pada suhu lebih dari 700°C hidrokarbon mulai terpecah menjadi hidrogen dan karbon. Produk reaksi karbonmonoksida, hidrogen dan karbon dapat berperan sebagai reduktor bijih laterit dan reaksinya disajikan sebagai berikut:

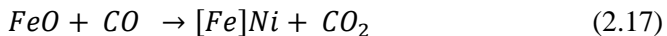




Diasumsikan bahwa dalam dehidroksilasi goethite, mineral oksida membentuk trevorite ($NiO \cdot Fe_2O_3$) dengan mekanisme sebagai berikut:

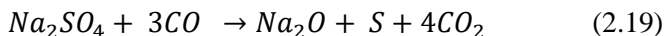
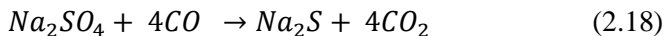


Tiga reaksi di atas menggambarkan bahwa reduksi selektif nikel dapat dimaksimalkan dengan mengontrol terjadinya reaksi-reaksi tersebut sebab reduksi besi oksida menjadi logam besi terhambat. Sebaliknya, produk nikel terus terbentuk sehingga kadar dapat ditingkatkan (Antola *et al.*, 1995). Reduksi selanjutnya dari wustit menjadi besi metalik terjadi:

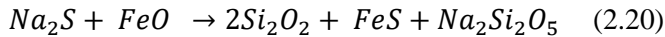


Berdasarkan kondisi percobaan, proses reduksi dari (2.16) dan (2.17) akan sulit terjadi (Olli 1995). Menurut Jiang (2013) mekanisme *selective reduction* dari nikel terjadi sesuai reaksi berikut:

Terjadi dekomposisi termal dan reduksi natrium sulfat.



Pengikatan Fe membentuk FeS ,



Menurut Novianti (2015), kandungan kalsium karbonat akan terdekomposisi menjadi kalsium oksida dan karbon dioksida pada suhu 750°C menurut reaksi:



2.9 Kajian Penelitian Sebelumnya

Sebagai mana kita tahu, bahwa tren penelitian mengenai reduksi langsung bijih nikel sedang meningkat pada satu dekade terakhir. Fokus riset semakin bervariasi mulai dari material yang dibutuhkan hingga mekanismenya, antara lain seperti; variasi reduktor, aditif, kontrol temperatur, waktu reduksi, bahkan analisis kinetika dan termodinamika dari proses reduksi yang dilakukan. Penelitian-penelitian yang diuraikan di bawah ini cenderung membahas fluks serta reduktor sesuai dengan topik penelitian yang diangkat.

Mulanya, Watanabe *et al.*, (1986) meneliti mengenai reduksi langsung bijih nikel sebagai alternatif yang lebih ekonomis untuk produksi *stainless steel* setelah perang dunia kedua. Hasil dari penelitian mereka menunjukkan bahwa *crude* fero-nikel dapat diproduksi dengan harga produksi yang rendah setelah dilakukan *pre-treatment* pada bahan mentah. Kemudian, banyaknya aplikasi dari produk reduksi langsung juga membuat metode ini mulai diperhatikan.

Banyaknya *raw material* yang digunakan dalam briket serta reduktor untuk metode reduksi langsung membuat semakin banyak penelitian terutama mengenai variasi material yang digunakan. Seperti Li *et al.*, (2012) yang melakukan reduksi langsung bijih laterit dengan aditif Na_2SO_4 . Proses *roasting* dilakukan pada suhu 1100°C selama 60 menit dengan massa aditif 20% berat yang diikuti dengan separasi magnetik. Produk paduan feronikel memiliki kadar nikel dan besi masing-masing 9,48% dan 79,3%

dengan *recovery* 83,01% dan 56,36%. Selama proses reduksi laterit dengan keberadaan Na_2SO_4 di atas temperature 800°C, reduksi besi tidak terhambat oleh terbentuknya fayalit atau forsterit dan mayoritas pelepasan besi berasal dari silikat. Peningkatan kadar nikel dapat disimpulkan terjadi akibat pembentukan FeS sehingga menekan pembentukan logam besi.

Kemudian, Abdul *et al.*, (2018) melakukan reduksi langsung nikel laterit limonitik dengan variasi temperature 1200°C, 1300°C dan 1400°C dengan fluks dolomit yang terasosiasi dalam *bed* batubara. Temperatur optimum yang diperoleh suhu 1400°C dengan kadar nikel produk mencapai 4,68% dan *recovery* 86,75%, sedangkan kadar besi mencapai 67,68%. Persentasi *recovery* besi terbaik didapatkan pada temperature 1200°C sebesar 89,41%. Morfologi produk feronikel terbaik didapatkan pada reduksi pada suhu 1400°C.

Penelitian lebih luas mengenai variasi fluks yang digunakan dalam proses reduksi langsung dilakukan oleh Anggarda (2017), yang menggunakan beberapa variasi, antara lain; dolomit, gypsum, dan kerang hijau. Hasil dari penelitian ini menunjukkan penggunaan berbagai jenis fluks juga mempengaruhi dari morfologi yang terbentuk pada briket. Apabila dilihat dari segi permeabilitas fluks kerang hijau memiliki permeabilitas yang paling baik bila dibandingkan fluks dolomit dan gypsum. Sedangkan dari segi peningkatan kadar Ni dan Fe yang paling tinggi dan segi permeabilitas yang paling baik, maka fluks yang paling optimal adalah fluks kerang hijau juga.

Sedangkan pada penelitian Mahendra (2017), melakukan penelitian perbandingan antara *quicklime*, *limestone*, dan dolomit dalam reduksi langsung pada *muffle furnace*. Berdasarkan hasil dari peningkatan kadar Ni sebesar 2,01%, penurunan kadar Fe sebesar 8,05%, sifat porositas dan permeabilitas, dan juga uji ketahanan briket terhadap benturan (*Shatter Index*) bahwa fluks yang paling baik adalah fluks *limestone*.

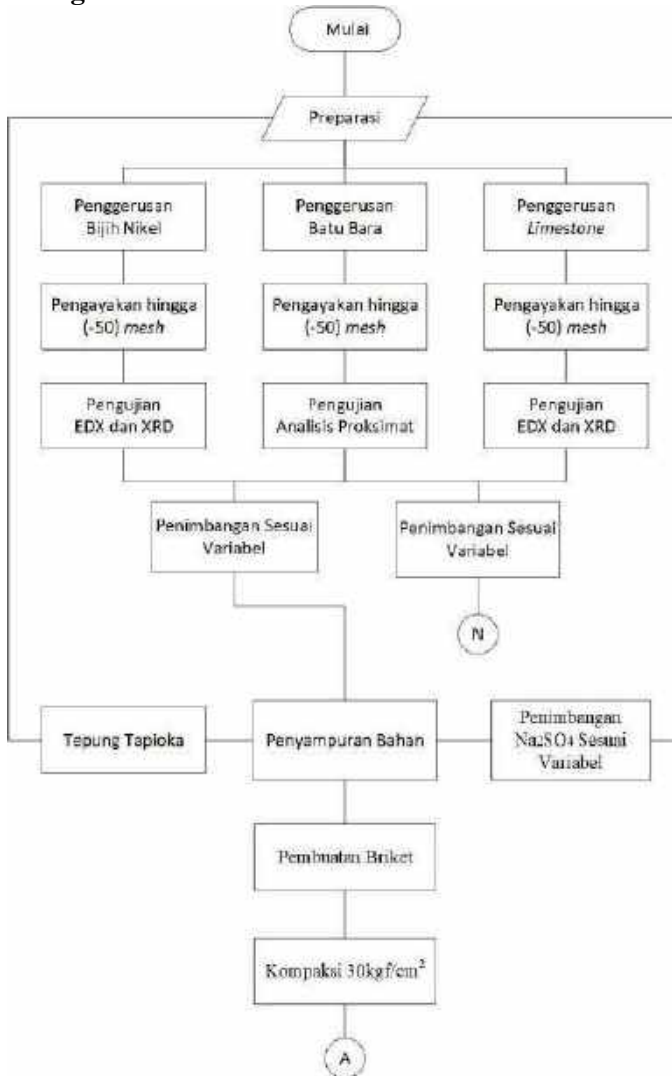
Selain variasi jenis fluks, Purnamasari (2018), juga telah melakukan penelitian mengenai Reduksi langsung bijih nikel

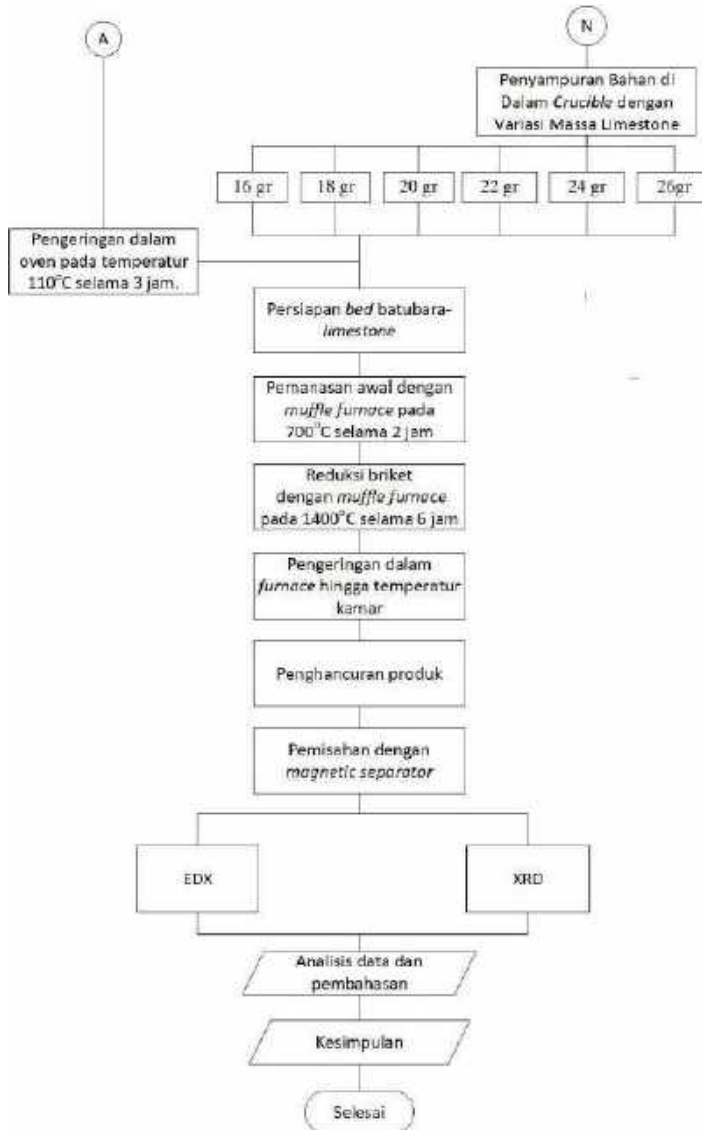
laterit limonitik dengan variasi rasio batu bara dan dolomit pada reaktor *bed* batu bara-dolomit. Didapatkan hasil Penggunaan variasi rasio batu bara dan dolomit mempengaruhi kadar Fe dan Ni pada produk hasil proses reduksi. Peningkatan kadar Ni tertinggi didapatkan saat briket direduksi dengan rasio batu bara dan dolomit 1,48, dengan peningkatan kadar Ni sebesar 11,49%. Selain itu, penggunaan variasi rasio batu bara dan dolomit mempengaruhi *recovery* Fe dan Ni pada produk hasil proses reduksi. *Recovery* Ni paling tinggi didapat dengan rasio batu bara dan dolomit 2,09 yaitu sebesar 99,10%.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian kali ini akan berfokus dengan massa limestone yang digunakan dengan tinjauan bahwa pada penelitian sebelumnya menunjukkan hasil yang baik ada pada fluks *limestone*, namun belum ditemukan komposisi utamanya massa yang optimum.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan Penelitian

Bahan – bahan yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain:

3.2.1 Bijih Nikel Laterit

Bijih nikel yang digunakan dalam penelitian ini adalah bijih nikel laterit, yang berasal dari daerah Sulawesi Tenggara. Bijih nikel dihancurkan terlebih dahulu kemudian diayak hingga berukuran (-50) mesh. Bijih nikel laterit yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Bijih Nikel Laterit

3.2.2 Batu Bara

Batu bara yang digunakan sebagai bahan bakar dalam penelitian ini adalah batu bara sub-bituminous dari Binuang, Kalimantan Selatan. Batu bara juga dihancurkan terlebih dahulu kemudian diayak hingga ukuran <50 mesh. Batu bara yang akan digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 Batu bara sub-bituminous

3.2.3 Limestone

Limestone digunakan sebagai fluks dalam penelitian ini. *Limestone* yang digunakan berasal dari Sulawesi Tenggara. *Limestone* terlebih dahulu dihancurkan hingga ukuran <50 mesh. *Limestone* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 Limestone

3.2.4 Natrium Sulfat

Natrium sulfat (Na_2SO_4) digunakan dalam penelitian ini sebagai agen *selective reduction* pada bijih nikel laterit. Natrium sulfat yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Natrium sulfat

3.2.5 Tepung Tapioka

Tepung tapioka digunakan sebagai binder untuk menyatukan seluruh komponen dalam pembuatan briket. Tepung tapioka ditunjukkan oleh Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Tepung Tapioka

3.2.6 Akuades

Akuades digunakan dalam pembuatan briket, untuk melarutkan tepung tapioka yang berfungsi sebagai binder.

3.2.7 LPG

LPG digunakan dalam penelitian sebagai sumber bahan bakar pada proses reduksi bijih nikel laterit di dalam muffle furnace. LPG yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 LPG

3.3 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain:

3.3.1 Timbangan Digital

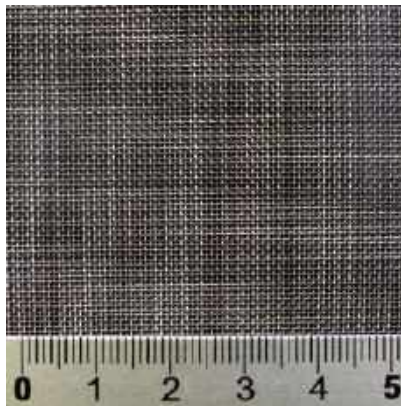
Timbangan digital digunakan dalam penelitian ini untuk menimbang bahan baku yang akan digunakan yakni bijih nikel laterite limonitik, batu bara, *limestone* dan aditif yang digunakan. Timbangan digital yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Timbangan digital

3.3.2 Ayakan

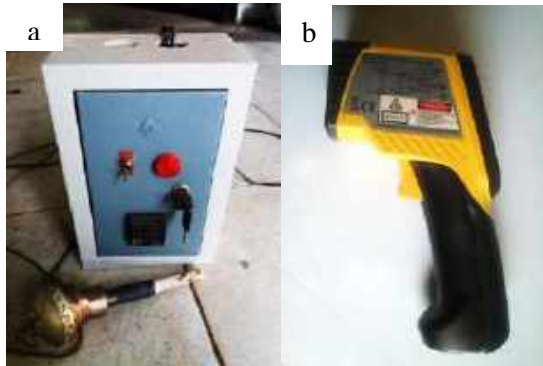
Ayakan digunakan dalam penelitian ini untuk mendapatkan ukuran butir dari bahan baku yang akan digunakan. Ayakan yang digunakan berukuran <50 mesh dan ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Ayakan (dokumentasi pribadi)

3.3.3 Thermocouple dan Thermometer Infrared

Thermocouple dan *Thermometer Infrared* adalah alat yang digunakan untuk sebagai pengukur temperatur saat proses reduksi bijih nikel laterit menjadi *crude ferronickel* sedang berlangsung. Gambar dari kedua alat tersebut ditampilkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 *Thermocouple (a) Thermometer Infrared/Thermogun (b)*

3.3.4 Blower

Merupakan alat yang digunakan untuk menyuplai udara ke dalam *Mini Blast Furnace*. *Blower* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 *Blower*

3.3.5 Alat Kompaksi

Alat kompaksi digunakan untuk membentuk campuran semua komponen menjadi briket *pillow* yang digunakan dalam proses reduksi. Alat kompaksi ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Alat Kompaksi

3.3.6 Crucible

Crucible digunakan sebagai wadah penyimpanan briket bijih dalam proses reduksi. *Crucible* juga diisi dengan *bed* batu bara-*limestone*. Dimensi *crucible* berbahan platina ini sebagai berikut:

Diameter atas= 13 cm

Diameter bawah= 10 cm

Tinggi= 17 cm

Tebal= 2,5 cm



Gambar 3.13 *Crucible*

3.3.7 Oven

Oven digunakan untuk mengeringkan briket yang telah dikompaksi agar terbebas dari *moisture content*. Oven ditunjukkan Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Oven

3.3.8 Muffle Furnace

Muffle furnace digunakan untuk proses reduksi bijih limonitik dalam temperatur sangat tinggi. Dimensi *muffle furnace* sebagai berikut:

Diameter= 36 cm
Tinggi= 64 cm
Tebal= 7 cm



Gambar 3.15 *Muffle furnace* (Dokumentasi pribadi)

3.4 Metode Penelitian

Berikut adalah langkah-langkah dalam melakukan penelitian reduksi langsung:

3.4.1 Preparasi Material

Langkah – langkah yang dilakukan pada proses preparasi material yaitu:

1. Bijih nikel laterit limonitik, batu bara, dan *limestone* dihancurkan kemudian diayak hingga ukuran di bawah 50 *mesh*.
2. Dilakukan pengujian EDX dan XRD pada bijih nikel laterit Na_2SO_4 , dan *limestone*.
3. Dilakukan analisis proksimat pada batubara.

3.4.2 Pembuatan Briket

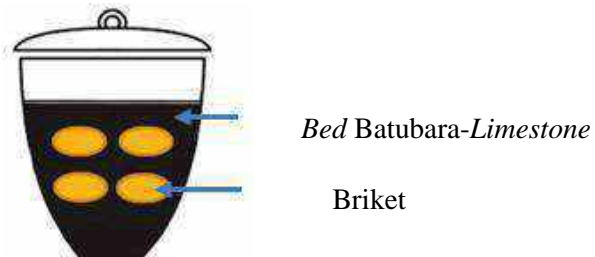
Bijih nikel laterit limonitik hasil ayakan dicampur dengan serbuk batu bara dengan komposisi sesuai perhitungan lalu ditambahkan aditif natrium sulfat. Campuran kemudian disatukan dengan binder larutan tepung tapioka yang telah dicampurkan 100 mL air kemudian dididihkan lalu diaduk rata. Campuran kemudian dibentuk menjadi briket jenis *pillow* menggunakan alat kompaksi dengan tekanan 30 kgf/cm². Briket yang terbentuk dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 3 jam. Briket dibuat sebanyak 4 buah untuk sekali proses reduksi.

3.4.3 Pembuatan Campuran *Bed Batubara*

Batu bara dan *limestone* yang telah diayak ditimbang dengan variasi 16 : 18 : 20 : 22 : 24 : 26 gram. Kedua material kemudian dicampurkan secara merata dan dimasukkan ke dalam *crucible*.

3.4.4 Reduksi Selektif Nikel Laterit Limonitik

Briket yang telah dikeringkan dimasukkan kedalam *crucible* yang bagian dasarnya telah dimasukkan campuran batubara-*limestone* sebagai lapisan *bed* bagian bawah. Briket ditutup kembali dengan batu bara-*limestone* untuk membentuk lapisan *bed* atas sehingga seperti keadaan terkubur seperti Gambar 3.17.



Gambar 3.16 Model briket di dalam *crucible*

Briket diberi pemanasan awal di dalam *muffle furnace* pada temperatur 700°C selama 2 jam dengan *heat rate* 10°C/menit. Pemanasan dilanjutkan hingga suhu 1400°C dengan *heat rate* 10°C/menit kemudian ditahan selama 6 jam. Briket yang telah direduksi didinginkan dalam dibiarkan mendingin di dalam *muffle furnace* hingga mencapai temperatur kamar kemudian dikeluarkan untuk dipreparasi sebelum diuji menggunakan EDX dan XRD.

3.4.5 Recovery

Setelah mencapai temperatur kamar, dilakukan pengambilan hasil dari reduksi langsung, dan dilakukan separasi magnetik hasil dikategorikan menjadi 3 berupa logam yang tertarik magnet, serbuk yang tertarik magnet, serta produk lain yang tidak tertarik magnet. Kemudian dihitung *recovery* Ni dan Fe untuk setiap variasi.

3.5 Pengujian

Berikut adalah beberapa pengujian yang akan dilakukan untuk menganalisis:

3.5.1 XRD

Evaluasi struktur kristal dan senyawa secara kualitatif dilakukan pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dari sampel hasil reduksi dengan menggunakan alat XRD PAN Analytical. Sinar X merupakan radiasi elektromagnetik yang memiliki energi tinggi sekitar 200 eV sampai 1 MeV. Sinar-X dihasilkan oleh interaksi antara berkas elektron eksternal dengan elektron pada kulit atom. Spektrum sinar X memiliki panjang gelombang 10^{-3} - 10 nm, berfrekuensi 1017 - 1020 Hz dan memiliki energi 103 - 106 eV. Panjang gelombang sinar-X memiliki orde yang sama dengan jarak antar atom sehingga dapat digunakan sebagai sumber difraksi kristal. XRD digunakan untuk menentukan ukuran kristal, regangan kisi, komposisi kimia dan keadaan lain yang memiliki

orde yang sama. Alat yang digunakan untuk uji XRD PAN *Analytical* ditunjukkan seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 3.17 X-Ray Diffraction PAN *Analytical*

3.5.2 SEM-EDX

SEM merupakan instrumen mikroskop electron yang didesain untuk mengamati topografi dan morfologi permukaan material padat. SEM dapat dilengkapi dengan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* atau EDX yang digunakan untuk menganalisa elemen atau karakteristik kimia dari suatu sampel. Prinsip kerja dari alat ini adalah metode spektroskopi, dimana elektron ditembakkan pada permukaan sampel, yang kemudian akan memancarkan X-Ray. Energi tiap-tiap *photon* X-Ray menunjukkan karakteristik masing-masing unsur yang akan ditangkap oleh detektor EDX, kemudian secara otomatis akan menunjukkan puncak-puncak dalam distribusi energi sesuai dengan unsur yang terdeteksi. Hasil yang didapatkan dari pengujian EDX adalah berupa grafik energi (KeV) dengan *counts*. Dari data grafik

tersebut kita bisa melihat unsur-unsur yang terkandung di dalam suatu sampel beserta persentasenya. Alat yang digunakan untuk uji EDX ditunjukkan seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 3.18 SEM-EDX

3.5.3 Analisis Proksimat

Kandungan arang seperti kadar *moisture*, *volatile matter*, *ash*, dan *fixed carbon* diketahui dengan pengujian analisis proksimat. Standar pengujian yang dilakukan yaitu ASTM D 3172-02 (*Fixed Carbon*), ASTM D 3173-02 (*Moisture*), ASTM D 3174-02 (*Ash*), dan ASTM D 3175-02 (*Volatile matter*).

1. Moisture

Analisa kadar moisture dalam arang dilakukan dengan metode ASTM D 3173-02. Sampel yang digunakan dihaluskan hingga 250 μm .

Bahan:

- a. Udara kering

- b. Pengering, seperti kalsium sulfat anhidrat (0,004 mg/L), silika gel, magnesium perklorat (0,0005 mg/L), dan asam sulfat (0,003 mg/L)

Alat: Oven Pengering

Prosedur:

- Sampel dikeringkan dalam pengering selama 15 menit hingga 30 menit dan ditimbang.
- Sampel diambil seberat 1 g dan diletakkan dalam kapsul kemudian ditutup dan ditimbang.
- Kapsul diletakkan dalam oven yang telah dipanaskan (104°C – 110°C). Oven ditutup dan dipanaskan selama 1 jam. Sampel dikeluarkan dari oven dan dinginkan dengan pengering. Kapsul ditimbang segera bila telah mencapai temperatur ruangan.
- Dilakukan penghitungan

Perhitungan:

$$\text{Moisture (\%)} = \left(\frac{A-B}{A} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Dimana,

A = berat sampel yang digunakan (gram)

B = berat sampel setelah pemanasan (gram)

2. ***Volatile Matter***

Analisa kadar *volatile matter* dalam arang dilakukan dengan standar ASTM D3175-02. Sampel yang digunakan dihaluskan hingga 250 µm.

Alat:

- Crucible* platina dengan tutup, untuk batu bara berkapasitas 10 – 20 mL, diameter 25 – 35 mm dan tinggi 30 – 35 mm.
- Vertical electric tube furnace*.

Prosedur:

- a. Sampel seberat 1 g ditimbang lalu dimasukkan kedalam *crucible* platina, kemudian *crucible* ditutup dan dimasukkan dalam *furnace*, temperatur dijaga $950 \pm 20^\circ\text{C}$.
- b. Setelah *volatile matter* lepas yang ditunjukkan dengan hilangnya api *luminous*, tutup *crucible* diperiksa untuk dipastikan tetap tertutup.
- c. Setelah pemanasan tepat 7 menit, *crucible* dipindahkan keluar *furnace* dan didinginkan dan ditimbang.
- d. Persentase *weight loss* dikurangi persentase *moisture* sama dengan *volatile matter*.

Perhitungan:

$$\text{Weight Loss (\%)} = \left(\frac{A-B}{A} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Dimana:

A = berat sampel yang digunakan (gram)

B = berat sampel setelah pemanasan (gram)

Kemudian persen *volatile matter* dihitung

$$\text{Volatile matter (\%)} = C - D \quad (3.3)$$

Dimana:

C = *Weight Loss* (%)

D = *Moisture* (%)

3. *Ash*

Analisa kadar *ash* dalam batu bara dilakukan dengan standar ASTM D 3174-02. Sampel yang digunakan dihaluskan hingga $250 \mu\text{m}$.

Alat:

- a. *Electric muffle furnace*
- b. Kapsul porselen atau *crucible* platina
- c. Tutup *crucible*

Prosedur:

- a. Satu gram sampel dimasukkan dalam kapsul dan ditimbang dan ditutup. Kapsul diletakkan dalam furnace dingin lalu dipanaskan dengan temperatur 450 – 500°C selama 1 jam.
- b. Pemanasan sampel dilanjutkan hingga temperatur mencapai 700 – 750°C selama 1 jam kemudian ditahan hingga 2 jam.
- c. Kapsul dipindahkan keluar dari *furnace*, didinginkan dan ditimbang.

Perhitungan:

$$\text{Ash (\%)} = \left(\frac{A-B}{c} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

Dimana:

A= berat kapsul, tutup, dan *ash* (gram)

B= berat kapsul kosong dan tutup (gram)

C= berat sampel yang digunakan (gram)

4. *Fixed Carbon*

Analisa kadar fixed carbon dalam batu bara dilakukan dengan standar ASTM D 3172-02 dengan perhitungan dari data kadar *moisture*, *ash*, dan *volatile matter*.

Perhitungan:

$$\text{Fixed Carbon (\%)} = 100 - (\text{moisture} + \text{ash} + \text{volatile matter}) \quad (3.5)$$

3.6 Rancangan Penelitian

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian

Perbandingan Komposisi Komponen dengan Variasi Massa Limestone		Hasil Pengujian				
Variasi Massa <i>Limestone</i> <i>ne</i> (gr)	Rasio Komposisi (Bijih : Batu Bara : <i>Limestone</i> : Na ₂ SO ₄ : Tapioka)	ED X	XR D	Ka dar	Reco very	Selek tivitas
16	100 : 51.3 : 16 : 17 : 5	√	√	√	√	√
18	100 : 51.3 : 18 : 17 : 5	√	√	√	√	√
20	100 : 51.3 : 20 : 17 : 5	√	√	√	√	√
22	100 : 51.3 : 22 : 17 : 5	√	√	√	√	√
24	100 : 51.3 : 24 : 17 : 5	√	√	√	√	√
26	100 : 51.3 : 26 : 17 : 5	√	√	√	√	√

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Bahan Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian karakterisasi terhadap bahan-bahan yang digunakan, yaitu bijih nikel laterit, batubara, dan *limestone*.

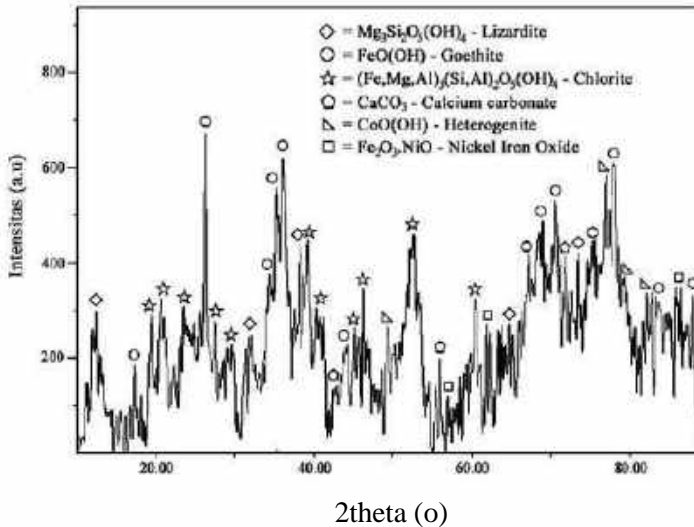
4.1.1 Karakterisasi Bijih Nikel Laterit

Bijih nikel laterit yang digunakan berasal dari Sulawesi Tenggara. Bijih nikel laterit telah diayak dengan ukuran -50 mesh atau 300 μm . Pengujian komposisi / kadar bijih nikel laterit dilakukan terhadap bijih nikel laterit hasil sampling. Pengujian tersebut menggunakan mesin EDX. Didapatkan data komposisi bijih seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian EDX Bijih Nikel Laterit

Unsur	Ni	Fe	Si	Mg	Ca	Al	Co	O
% Wt	1.59	42.01	17.78	5.91	2.36	2.5	0.29	26.89

Dari Tabel 4.1 didapatkan kadar Ni sebesar 1,59% dan Fe sebesar 42,01% yang kemudian dijadikan basis perhitungan neraca massa untuk proses reduksi bijih nikel laterit. Identifikasi fasa dari bijih nikel laterit dilakukan menggunakan mesin XRD PAN Analytical. Pengujian dilakukan dengan posisi 2θ dari 10° sampai 90° dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar 1,54056 Å. Hasil pengujian XRD dari bijih nikel laterit dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Pengujian XRD Bijih Nikel Laterit

Pengujian XRD menghasilkan peak senyawa yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 di atas. Hasil pengujian XRD dianalisa dengan menggunakan *PDF-2 Release 2011*. Dari peak tersebut dapat diketahui fasa-fasa yang terdapat pada bijih nikel laterit. Semakin tinggi *peak* yang terbentuk menandakan semakin banyaknya juga fasa yang terdapat pada bijih tersebut, maka dari analisa peak didapatkan fasa dominan pada bijih nikel laterit adalah *goethite* ($FeOOH$). Selain itu juga terdapat fasa *lizardite* [$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$], *chlorite* [$(Fe,Mg,Al)_3(Si,Al)_2O_5(OH)_4$] dan *Nickel Iron Oxide* ($Fe_2O_3.NiO$) (Christopher P, 2019).

4.1.2 Karakterisasi Batubara

Batu bara yang digunakan berasal dari Binaung, Kalimantan Selatan. Batu bara digunakan sebagai penyedia karbon untuk menghasilkan gas reduksi berupa gas CO. Gas CO yang berasal dari reaksi *boudouard* kemudian akan mereduksi Fe_2O_3 menjadi Fe dan NiO menjadi Ni.

Pengujian *proximate analysis* dilakukan untuk mengetahui kadar *moisture*, *ash*, *volatile matter*, dan *fixed carbon*. Pengujian *proximate analysis* dilakukan berdasarkan standar ASTM D3173-02. Hasil pengujian *proximate analysis* batu bara yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian *Proximate Analysis* Batu Bara

Parameter	Hasil	Unit	Standar Pengujian
Kelembapan Total (<i>Moisture</i>)	1,8	% ar	ASTM D3302-02
Kadar Abu (<i>Ash</i>)	4,75	% ar	ASTM D3174-02
Kadar Karbon Tetap (<i>Fixed Carbon</i>)	42,35	% adb	ASTM D3175-02
Kadar Zat yang Mudah Menguap (<i>Volatile Matter</i>)	52,86	% adb	ASTM D3172-02
Nilai Kalori	7204	Cal/gr, adb	ASTM D5865-03

4.1.3 Karakterisasi Limestone

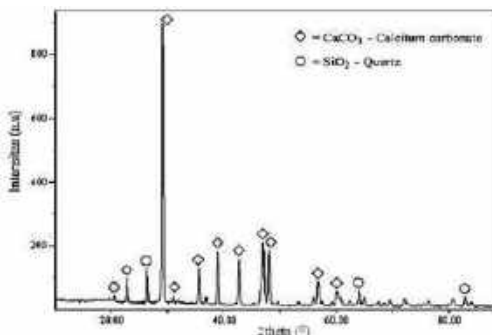
Identifikasi dari *limestone* dimulai dengan identifikasi unsur dengan pengujian EDX. Pengujian EDX dilakukan dengan alat SEM PAN Analytical milik Departemen Teknik Material ITS. Hasil Pengujian EDX dari limestone bisa dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian EDX *Limestone*

Unsur	Ca	O	Mg	Si	K	C
% wt	40-45	32-35	<1	5-8	<1	8-12

Dari Pengujian EDX di atas tampak bahwa kapur memiliki kandungan Ca yang tinggi yaitu 43,01 % dan kandungan Mg yang rendah yaitu 0,57%. Dari kandungan Ca dan Mg tersebut dapat disimpulkan bahwa kapur yang digunakan adalah *limestone* bukan dolomit. Dari segi proses aglomerasi, baik Ca yang membentuk senyawa CaCO_3 akan membantu penyediaan gas CO_2 pada proses reduksi Fe_2O_3 dan sebagai fluks agent atau pengikat pengotor.

Setelah itu, dilakukan identifikasi fasadari *limestone* menggunakan mesin XRD PAN Analytical. Pengujian dilakukan dengan posisi 2theta dari 10 sampai 90 dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar 1,54056 Å. Hasil Pengujian dari *limestone* dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil Pengujian XRD *Limestone*

Dari Gambar 4.2 diatas tampak bahwa pengujian XRD *limestone* memiliki *peak* tertinggi yaitu *calcium carbonate* atau CaCO_3 (Christoper P, 2019).

4.2 Pengaruh Variasi Massa Limestron Terhadap Kadar Unsur Fe dan Ni pada Produk Hasil Proses Reduksi

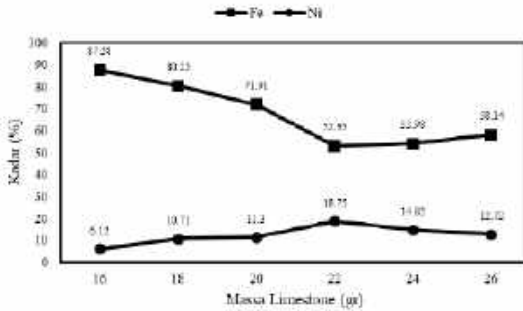
Untuk mengetahui pengaruh variasi massa *limestone* pada proses reduksi bijih nikel laterit limonitik terhadap komposisi unsur pada logam maka dilakukan proses reduksi langsung dengan variasi massa *limestone* sebesar 16 : 18 : 20 : 22 : 24 : 26. Produk logam hasil proses reduksi kemudian dilakukan pengujian EDX untuk mengetahui perubahan komposisi unsur yang terjadi setelah hasil proses reduksi. Hasil pengujian EDX unsur Fe dan Ni pada produk logam hasil proses reduksi ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Komposisi Unsur Logam Setelah Proses Reduksi

Unsur (%)	Variasi Massa Limestone						
	Bijih	16	18	20	22	24	26
<i>Fe</i>	42,01	87.58	80.23	71.91	52.95	53.98	58.14
<i>Ni</i>	1,59	06.12	10.71	11.30	18.75	14.82	12.72

Adapun penelitian yang dilakukan yaitu variasi massa *limestone* pada *bed* dalam proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik akan mempengaruhi kadar unsur Fe dan Ni pada produk dari hasil proses reduksi. Dimana reaksi reduksi kedua unsur terjadi secara berurutan dan kemudian menghasilkan produk berupa logam dengan kadar Fe dan Ni yang meningkat dari kadarnya semula pada bijih nikel laterit limonitik.

Variasi massa *limestone* pada proses reduksi briket nikel laterit limonitik dapat mempengaruhi kadar unsur Ni dan Fe pada produk logam hasil proses reduksi, sebagaimana yang ditunjukkan pada grafik peningkatan kadar nikel serta besi pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Kadar Unsur Ni pada Produk Hasil Proses Reduksi

Dari Gambar 4.3. dapat diketahui bahwa kadar awal Ni bijih nikel laterit limonitik mulanya adalah 1,59%, setelah dilakukan proses reduksi pada temperatur 1400°C dengan variasi rasio *limestone* diperoleh kadar Ni pada produk hasil proses reduksi sebesar 6,12% dengan peningkatan sebesar 4,53%. Menurut R.Elliot (2016), peningkatan kadar ini terjadi karena adanya dekomposisi dari *goethite* ($\text{FeO}(\text{OH})$) akibat terjadinya reaksi dehidroksilasi pada temperatur 300°C yang merupakan perubahan struktural yang terjadi karena rusaknya OH atau hilangnya mineral kristalin yang mengikat air. Hal tersebut terjadi secara alami pada proses reduksi sebagai efek dari pemanasan. Adanya reaksi dehidroksilasi menyebabkan terlepasnya senyawa NiO dan Fe_2O_3 pada *goethite* seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.3 (Crundwell, 2011).

Setelah terjadi dehidroksilasi kemudian senyawa NiO tereduksi menjadi Ni oleh gas CO hasil dari reaksi *Boudouard* (Persamaan 2.15). Berdasarkan diagram Ellingham, reaksi reduksi tersebut mulai terjadi pada temperatur 400°C .

Sedangkan pada hasil reduksi variasi massa *limestone* 18gr didapatkan kadar Ni sebesar 10,71% dengan peningkatan 9,12% dari kadar bijih nikel awal. Begitu pula pada hasil reduksi dengan variasi massa *limestone* 20gr, didapatkan kadar Ni sebesar 11,3%

dengan peningkatan 9.71% dari kadar nikel pada bijih. Terjadinya peningkatan kadar dari variabel sebelumnya selain diakibatkan oleh reaksi dehidroksilasi, juga karena kadar CO/CO₂ yang mencapai kesetimbangan pada zona tertentu seiring dengan bertambahnya massa limestone sehingga terjadi dekomposisi dari CaCO₃ dengan jumlah yang lebih besar.

Hal ini juga terjadi akibat kesetimbangan kinetik dari kadar CO/CO₂. Seperti pernyataan (Elliot *et al.*, 2015), bahwa kadar metalisasi dari nikel serta besi dipengaruhi oleh jumlah CO/CO₂ dengan hasil penelitian kadar yang paling optimum 90-95% metalisasi pada zona ke II. Pada variasi massa limestone 18gram dan 20gram ada pada rentang 90-95% metalisasi di zona ke II. Oleh karena itu terlihat peningkatan kadar nikel yang signifikan dibandingkan pada massa 16gr limestone.

Pada variasi massa limestone 22gr terlihat bahwa kadar nikel mencapai puncak tertinggi yaitu 18.75% dengan peningkatan 17.16% nikel dari kadar awal pada bijih. Hal ini terjadi karena semakin banyak dekomposisi CaCO₃ yang terjadi, sehingga kadar CO₂ bertambah, dan menyebabkan kesetimbangan CO/CO₂ bergeser ke rentang 90-95%, berdasarkan perhitungan terlampir dan pada bagian tengah di rentang 90-95%, dimana merupakan daerah yang kita inginkan untuk dicapai karena memiliki kadar Ni yang paling tinggi namun dengan *recovery* yang moderat.

Selain itu, sesuai dengan pernyataan pada pengaruh variasi massa limestone terhadap kadar nikel, peningkatan massa limestone pada 22gr limestone kesetimbangan CO/CO₂ berubah akibat reaksi dekomposisi CaCO₃ didalam limestone. Sehingga terjadi *selective reduction* dimana Ni lebih mungkin tereduksi dibanding Fe sehingga terjadi Kadar Ni tertinggi.

Sedangkan pada variasi massa limestone 24gr, kadar nikel yang didapatkan 14,82% dengan peningkatan sebesar 13,23% dari kadar nikel mula-mula pada bijih. Apabila dibandingkan dengan kadar nikel pada variasi massa 22gr terjadi penurunan. Hal ini diakibatkan oleh, ketika penambahan fluks terlalu banyak, ada begitu banyak fase cair yang dihasilkan karena fluks berlebih,

sehingga menyebabkan penurunan area kontak antara bijih dan reduktor. Partikel nikel dan besi menjadi sulit untuk dikumpulkan dan tumbuh. Semakin banyak partikel *fine* masuk ke *slag*, meningkatkan kesulitan pemisahan. Sehingga kadar nikel menurun (Wang *et al.*, 2017).

Pada variasi massa *limestone* 26gr, kadar nikel yang didapatkan 12,72% dengan peningkatan sebesar 11.13% dari kadar nikel mula-mula pada bijih. Namun kadar ini semakin menurun bila dibandingkan dengan dua variasi sebelumnya karena, sama seperti pada variasi 24gr. Karena penambahan *limestone* sebagai fluks yang terlalu banyak, fasa cair yang terbentuk antara reduktor dalam hal ini batu bara, dengan bijih. Sehingga menyebabkan berkurangnya luas permukaan kontak antara bijih dan reduktor. Pada akhirnya, saat sudah terlalu banyak fasa cair, unsur yang harusnya metalisasi dan berkumpul menjadi sulit untuk dikumpulkan. Hal ini juga menyebabkan, kadar nikel maupun besi yang ditemukan pada serbuk magnetik cukup besar (Wang *et al.*, 2017).

Dari Gambar 4.3., dapat diketahui pula bahwa kadar awal Fe bijih nikel laterit limonitik adalah 42.01%, setelah dilakukan proses reduksi pada temperatur 1400°C dengan variasi massa *limestone* 16gr diperoleh kadar Fe pada produk hasil proses reduksi sebesar 87.58% dengan peningkatan sebesar 45.57%. Peningkatan yang terjadi disebabkan oleh reaksi dehidroksilasi dimana terjadi karena adanya dekomposisi *goethite* (FeO(OH)) akibat reaksi dehidroksilasi pada temperatur 300oC menyebabkan terlepasnya senyawa NiO dan Fe₂O₃ pada *goethite* (FeO(OH)) (F.O.Connor, 2006). Semakin meningkatnya temperatur, reaksi *boudouard* terjadi dan membentuk gas CO sebagai pereduksi. Gas CO tersebut kemudian secara simultan mereduksi NiO dan Fe₂O₃ seperti yang ditunjukkan pada Persamaan reaksi 2.10 hingga 2.13 Selanjutnya, NiO akan tereduksi menjadi Ni dan diikuti oleh reduksi besi *hematite* (Fe₂O₃) menjadi besi *magnetite* (Fe₃O₄), dan besi *magnetite* juga akan tereduksi hingga membentuk besi wustite (FeO) dan terakhir akan tereduksi menjadi Fe (Chen, 2010).

Dengan tereduksinya Fe_2O_3 hingga menjadi Fe akan meningkatkan kadar Fe pada hasil reduksi. Selain itu, seiring dengan meningkatnya temperatur bukan hanya menyebabkan terjadinya reaksi dehidroksilasi namun juga menyebabkan menurunnya LOI (*Loss of Ignition*) dan menghilangnya *volatile matter* yang akan meningkatkan konsentrasi Fe (Kyoung, 2014).

Sedangkan pada hasil reduksi *limestone* 18gr didapatkan kadar besi sebesar 80.23%, dengan peningkatan kadar Fe sebesar 38.22% dari kadar mula-mula pada bijih serta pada hasil reduksi 20gr massa *limestone* didapatkan kadar Fe sebesar 71.91% sehingga terjadi peningkatan kadar besi dari kadar semula pada bijih sebesar 29.9%. Hal ini sesuai dengan dasar perhitungan CO/CO₂ dan diagram kesetimbangannya, didapatkan bahwa 18gr mulai masuk ke dalam zona II pada metalisasi 90-95%. Sehingga memungkinkan untuk reduksi nikel yang terjadi lebih selektif dan menyebabkan berkurangnya kadar besi (Elliot et al., 2015). Selain itu juga seiring dengan naiknya *recovery* dan kadar nikel, maka kadar dan *recovery* besi cenderung menurun (Wang et al., 2017).

Pada hasil reduksi 22gr massa *limestone* dapat dilihat bahwa kadar Fe 52.95% dan terjadi peningkatan sebesar 10.94% dari kadar Fe dalam bijih. Namun bila dibandingkan dengan variasi sebelumnya, pada 22gr massa *limestone* terjadi penurunan kadar yang signifikan. Hal ini terjadi disebabkan oleh beberapa faktor, seperti rendahnya nilai kemampuan reduksi besi *wustite* (FeO) untuk membentuk logam besi (Fe) dibandingkan dengan nilai kemampuan reduksi Nikel oksida (NiO) untuk membentuk logam Nikel (Ni), dan pembentukan senyawa *Triolite* (FeS) dalam briket tereduksi. Jadi sebagian logam Fe yang telah terbentuk, juga ikut terbuang membentuk slag (Abdul et al., 2018).

Pada hasil reduksi 24gr massa *limestone* produk reduksi menghasilkan 53.98% Fe, peningkatan yang terjadi dari kadar Fe pada bijih sebesar 11.97%. Sedangkan pada hasil reduksi 26gr massa *limestone*, menghasilkan 58.14% Fe, peningkatan juga terjadi dari kadar Fe pada bijih sebesar 16.13%. Kedua variasi ini menunjukkan sedikit peningkatan dari variasi 22gr. Hal ini terjadi

karena nikel dan besi telah terpisah sepenuhnya selama reduksi logam karena perpanjangan waktu reduksi sehingga nikel tidak dapat dibenefisiasi dengan besi oleh pemisahan magnetik. Oleh karena itu, kadar nikel menurun, dan sebaliknya kadar Fe meningkat. (Wang et al., 2017)

4.3 Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Recovery Unsur Ni dan Fe pada Produk Hasil Reduksi

Proses reduksi pada bijih nikel laterit limonitik dilakukan untuk memisahkan nikel dengan unsur atau senyawa pengotor yang tidak diinginkan. Biasanya unsur yang penting dan terkandung dalam bijih nikel laterit limonitik adalah besi dan nikel. Suatu proses dikatakan optimal jika suatu proses reduksi mendapatkan perolehan (*recovery*) logam dengan persentase tinggi, persentase perolehan ini dihitung dari massa unsur awal dibanding dengan massa unsur hasil reduksi. Pada penelitian ini menitik beratkan pada perolehan kembali (*recovery*) dari nikel dan besi dalam hasil reduksi langsung.

Untuk mengetahui perolehan (*recovery*) nikel dan besi dilakukan dengan membandingkan massa awal dengan massa akhir masing-masing unsur hasil proses reduksi. Massa unsur hasil proses reduksi yang dihitung adalah dari hasil metal dan serbuk, perhitungan massa unsur dilakukan dengan mengalikan kadar unsur dengan total massa perolehan hasil proses reduksi (logam dan serbuk). Perhitungan massa masing masing hasil reduksi ditampilkan pada Tabel 4.5., dan Tabel 4.6 sedangkan perhitungan *recovery* ditunjukkan pada Persamaan 4.2.

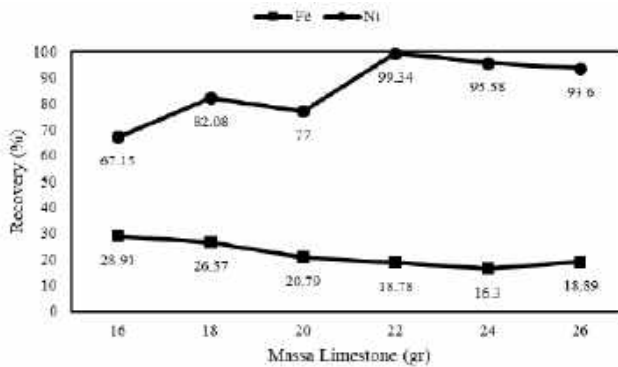
$$Recovery (Fe/Ni) = \frac{(m_{logam}) \times (\% Fe/Ni_{logam}) + (m_{serbuk}) \times (\% Fe/Ni_{serbuk})}{(massa_{bijih}) \cdot (\% Fe/Ni_{bijih})} \quad (4.2)$$

Tabel 4.5. Perhitungan Massa dan *Recovery* Ni Hasil Reduksi

Massa Lime- stone (gr)	M bijih (gr)	%Ni bijih	M logam (gr)	% Ni logam	M serbuk (gr)	% Ni serbuk
16	100	1.59	8.12	6.12	7.54	7.57
18	100	1.59	6.31	10.71	11.23	6.17
20	100	1.59	6.92	11.30	9.83	4.50
22	100	1.59	5.25	18.75	12.45	4.78
24	100	1.59	8.65	14.82	4.23	6.27
26	100	1.59	4.73	12.72	13.64	3.50

Tabel 4.6. Perhitungan Massa dan *Recovery* Fe Hasil Reduksi

Massa Lime- stone (gr)	M bijih (gr)	%Fe bijih	M logam (gr)	% Fe logam	M serbuk (gr)	% Fe serbuk
16	100	42.01	8.12	87.68	7.54	66.67
18	100	42.01	6.31	80.23	11.23	59.80
20	100	42.01	6.92	71.91	9.83	38.22
22	100	42.01	5.25	52.95	12.45	41.05
24	100	42.01	8.65	53.98	4.23	51.46
26	100	42.01	4.73	58.14	13.64	38.03



Gambar 4.4. Pengaruh Variasi Massa Limestone terhadap Recovery Ni dan Fe pada Produk Hasil Proses Reduksi

Berdasarkan Gambar 4.4., dapat diketahui bahwa pada variasi massa *limestone* 16gr dan 18gr mengalami peningkatan nilai *recovery* Ni dari 67,15% menjadi 82,08%. Adanya peningkatan tersebut disebabkan pada perhitungan variasi massa 18gr didapatkan massa dan kadar Ni pada serbuk dan metal lebih besar dibandingkan variasi massa 16gr. Hal tersebut dikarenakan adanya penambahan *limestone* sehingga massa produk yang ada lebih besar. Namun, pada variasi massa 20gr *recovery* dari nikel menurun, hal ini diakibatkan pemisahan/separsi magnetik yang kurang optimum, serta adanya nikel yang terjebak pada fasa *olivine* sehingga dapat dilihat pada sub bab 4.6., yaitu analisis kadar bagian non-magnetik, bahwa variasi massa *limestone* 20gr memiliki kadar nikel yang paling tinggi dibandingkan dengan variasi lain. Hal ini kemudian menyebabkan lebih sedikitnya kadar nikel baik pada logam maupun serbuk magnetik, sehingga *recovery* nikelnyapun menurun.

Sedangkan, pada variasi massa *limestone* 22gr, hasil yang didapatkan paling optimum hingga menyentuh 99,34%, namun tetap tidak didapatkan hasil *recovery* Ni sebesar 100% dikarenakan adanya Ni yang terbawa ke bagian non magnetik seperti yang

ditunjukkan pada sub bab 4.6. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses reduksi maupun separasi magnetik belum berjalan optimal.

Pada variasi massa *limestone* 24gr serta 26gr *recovery* nikel masih cukup tinggi, yaitu 95.58% dan 93.6% secara berurutan. Namun, terlihat penurunan *recovery* daripada variasi massa *limestone* 22gram. Hal ini terjadi karena selain proses separasi magnetik yang belum berjalan optimal, juga karena penambahan fluks yang terlalu banyak berakibat pada fasa cair yang terbentuk antara reduktor dalam hal ini batu bara, dengan bijih. Sehingga menyebabkan berkurangnya luas permukaan kontak antara bijih dan reduktor. Pada akhirnya, saat sudah terlalu banyak fasa cair, unsur yang harusnya metalisasi dan berkumpul menjadi sulit untuk dikumpulkan (Wang *et al.*, 2017). Hal inilah yang kemudian menyebabkan unsur yang diinginkan untuk tereduksi ikut ke dalam slag, dan tercampur dengan fasa cair fluks, sehingga pada saat proses separasi magnetik, tidak terdeteksi oleh magnet. Pada akhirnya, menyebabkan turunnya *recovery* dan kadar nikel yang masih cukup tinggi dalam *slag* yang dapat dilihat pada sub bab 4.6.

Berdasarkan Gambar 4.4., dapat diketahui pula bahwa pada variasi massa *limestone* dari 16gr, 18gr, 20 gr, 22gr, dan 24gr terlihat penurunan nilai *recovery* Fe dari mulai 28.91%, 26.57%, 20.79%, 18.78%, hingga 16.3%. Adanya penurunan tersebut disebabkan pada perhitungan variasi massa *limestone* kadar besi yang semakin menurun utamanya pada logam, dimana didapatkan massa dan kadar Fe pada serbuk dan metal lebih besar pada massa *limestone* 16gr dibandingkan variasi massa *limestone* yang lain. Hal tersebut dikarenakan adanya reduksi selektif yang terjadi, sehingga lebih banyak ditemukan nikel.

Selain itu, penurunan yang terjadi juga disebabkan karena digunakannya zat aditif dalam hal ini Na_2SO_4 . Sehingga saat meningkatnya suhu reduksi, Natrium Sulfat akan terurai menjadi Na_2O , Na_2S , dan Sulfur. Natrium (Na) akan mengikat dengan silikat, dan Sulfur (S) akan bereaksi dengan FeO untuk membentuk FeS sesuai dengan reaksi ($\text{Na}_2\text{S} + \text{FeO} \rightarrow 2\text{SiO}_2 + \text{FeS} + \text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) sehingga akan ada selektivitas reduksi dimana NiO akan berkurang

untuk membentuk logam Ni dan besi *wustite* (FeO) akan bereaksi dengan Sulfur untuk membentuk FeS. FeS adalah senyawa non-magnetik, sehingga senyawa ini tidak tertarik oleh magnet dan akan terbuang bersama *slag* pada saat proses pemisahan magnetik. Sehingga kandungan Fe akan berkurang dalam briket yang telah direduksi (Abdul *et al.*, 2018).

Selain itu, peningkatan yang tidak signifikan terjadi pada variasi massa 26gr *limestone* dimana didapatkan nilai *recovery* Fe sebesar 18.89%. Hal ini dikarenakan, walaupun memiliki kadar Fe yang lebih rendah, namun perolehan serbuk magnetik dari variasi ini memiliki massa yang lebih besar daripada variasi sebelumnya. Oleh karena itu, *recovery* Fe sedikit meningkat.

Namun secara keseluruhan, *recovery* Fe yang terjadi pada penelitian ini lebih baik dari *recovery* pada penelitian sebelumnya yang ada pada angka 14.34%. Hal tersebut dikarenakan produk reduksi pada variasi massa *limestone* 18gr, 20gr, 22gr, 24gr, dan 26gr ini berupa (Fe,Ni)_{1-y}O + (Fe,Ni) yang bila dilihat pada Gambar 2.14. berada pada zona 2 tepatnya di kadar CO/CO₂ rentang 1,50-1,59. Adapun nilai kadar CO/CO₂ didapatkan melalui perhitungan pada lampiran (R.Elliot, 2016). Hal tersebut dikarenakan oksida besi (*wustite*) yang ada produk reduksi akan tereduksi menjadi Fe sehingga nilai *recovery* Fe menjadi meningkat.

4.4 Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Faktor Selektivitas Produk Hasil Proses Reduksi

Di dalam proses reduksi bijih nikel laterit, peningkatan kadar unsur Ni dan Fe saling berpengaruh. Artinya, kadar unsur nikel akan meningkat seiring dengan menurunnya kadar unsur Fe, begitu pula sebaliknya. Sehingga dalam upaya mendapatkan kadar unsur nikel yang tinggi, peningkatan kadar unsur Fe harus dibatasi. Salah satu cara untuk dapat membatasi peningkatan kadar unsur Fe di dalam proses reduksi bijih nikel laterit adalah dengan menambahkan senyawa tambahan ke dalam briket guna meningkatkan reduksi selektif pada saat proses reduksi berlangsung. Di dalam proses reduksi, faktor selektivitas

dipengaruhi oleh atmosfer reduksi. Atmosfir reduksi yang rendah di dalam *furnace* akan semakin meningkatkan faktor selektivitas (Pickles, 2014). Perbandingan faktor selektivitas pada penelitian sebelumnya pada Tabel 4.7.

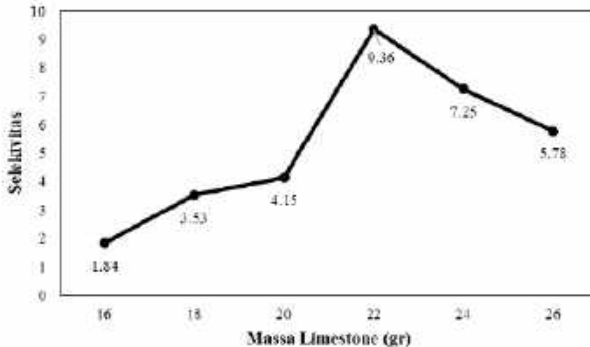
Tabel 4.7. Perbandingan *Selectivity Factor* di Beberapa Penelitian

Nama Peneliti	Redu-tan	Aditif	Waktu Reduksi	Tempera-tur Reduksi	Faktor Selekti-vitas
Chen, G.J., <i>et al.</i> (2014)	Batu Bara bio	–	30 min	1400°C	1.06
R. Elliot, <i>et al.</i> (2016)	Batu Bara- dolomit	4% wt sulfur	6 jam	1400°C	3.07
Zulfiandi (2016)	Batu Bara	–	1 jam	1400°C	1.6
Rudi, <i>et al.</i> (2016)	Batu Bara	Na ₂ SO ₄	1 jam	1000°C	1.87
R. Elliot, <i>et al.</i> (2016)	Batu Bara	Sulfur	1 jam	1000°C	1.69
Abdul F., <i>et al.</i> (2018)	Batu Bara	Na ₂ SO ₄	8 jam	1400°C	6.08
Abdul F., <i>et al.</i> (2020)	Batu Bara- dolomit	Na ₂ SO ₄	8 jam	1400°C	8.191

$$Selektivitas = \frac{(\% Fe\ awal) \times (\% Ni\ akhir)}{(\% Ni\ awal) \times (\% Fe\ akhir)} \quad (4.3)$$

Dari Tabel 4.8. didapatkan perbandingan *selectivity factor* dari beberapa penelitian sebelumnya yang telah dilakukan untuk mereduksi bijih nikel laterit. Tabel tersebut menunjukkan bahwa penggunaan bahan aditif Na₂SO₄ memiliki faktor selektivitas yang paling tinggi dibandingkan bahan aditif yang lain. Maka dari itu, pada penelitian ini digunakan bahan aditif berupa Na₂SO₄ untuk meningkatkan selektivitas Ni pada proses reduksi. Adapun pada penelitian ini, faktor selektivitas dihitung berdasarkan Persamaan rumus 4.3. Sedangkan hasil perhitungan faktor

selektivitas pada masing-masing variasi massa limestone pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Faktor Selektivitas Produk Hasil Proses Reduksi

Pada Gambar 4.5. menunjukkan pengaruh variasi massa *limestone* terhadap faktor selektivitas produk hasil proses reduksi. Dimana faktor selektivitas mengalami peningkatan dari variasi 16, 18, 20, hingga puncaknya pada 22gr, yaitu 1.84, 3.53, 4.15, 9.36, secara berurutan. Adapun faktor selektivitas tersebut menunjukkan kemampuan gas CO untuk dapat mereduksi Ni dan Fe, dimana kemampuan reduksi Ni yang semakin tinggi dengan kemampuan reduksi Fe yang semakin rendah akan meningkatkan nilai faktor selektivitas (Wahyu, 2016).

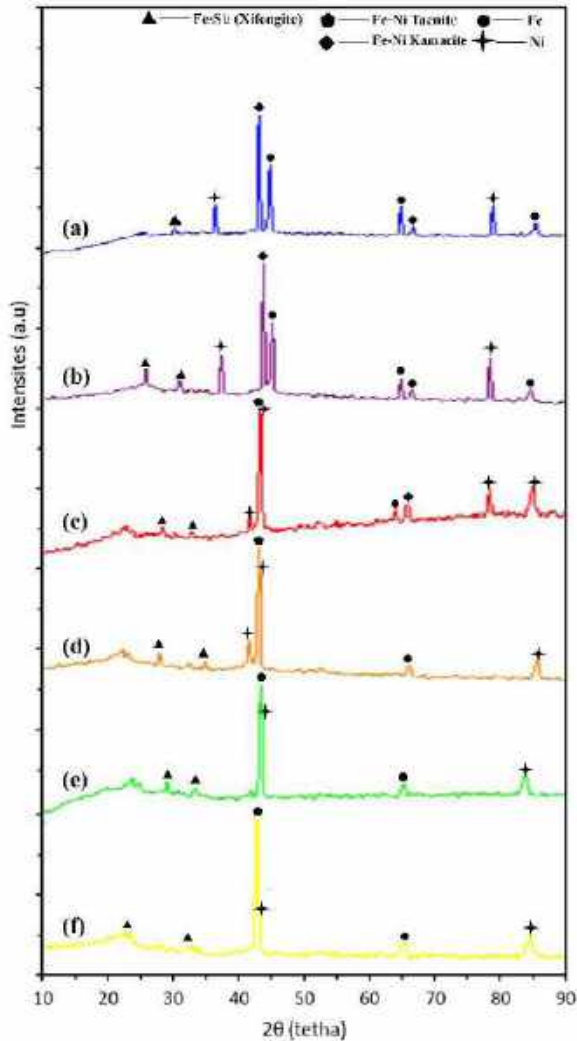
Hal ini dikarenakan sulfur dan sulfat mempromosikan reduksi selektif nikel terutama karena pembentukan FeS non-magnetik. FeS dapat dibentuk dalam tiga cara, yaitu; reaksi antara FeO dan SO₂; reaksi antara sulfur dan besi atau oksida besi; dan reaksi antara ferro oksida dan natrium sulfida. *Troilite* (besi sulfida) yang terbentuk, mempercepat agregasi dan pertumbuhan partikel paduan Ni-Fe dengan membentuk eutektik Fe-FeS yang memiliki titik leleh yang relatif rendah. Selain itu, sulfur yang ditambahkan atau dihasilkan dapat mengurangi tegangan permukaan dalam sistem, dan hal ini berkontribusi pada migrasi

dan pertumbuhan partikel feronikel. Sehingga reduksi selektif nikel lebih baik daripada besi (Wei Y., 2018).

Namun, pada 24gr serta 26gr *limestone* terjadi penurunan faktor selektivitas. Hal ini disebabkan oleh penambahan fluks yang terlalu banyak menyebabkan banyaknya fase cair yang mengurangi luas permukaan kontak bijih dan reduktor. Inilah yang kemudian menyebabkan unsur yang diinginkan untuk tereduksi ikut ke dalam slag, dan tercampur dengan fasa cair fluks, sehingga pada saat proses separasi magnetik, tidak terdeteksi oleh magnet. Pada akhirnya, menyebabkan turunnya selektivitas dan adanya kadar nikel yang masih cukup tinggi dalam *slag* (Wang *et al.*, 2014).

4.5 Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Produk Hasil Proses Reduksi

Identifikasi fasa dari hasil reduksi yaitu berupa logam dilakukan menggunakan mesin XRD PAN analytical X'Pert Hasil pengujian XRD produk logam hasil proses reduksi ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Pengaruh Variasi Massa *Limestone* (a) 16gr (b) 18gr (c) 20gr (d) 22gr (e) 24gr (f) 26gr Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Produk Hasil Proses Reduksi.

Dari Gambar 4.6. dapat diidentifikasi fasa yang terdapat pada produk logam hasil reduksi yang ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Identifikasi Fasa pada Produk Logam Hasil Proses Reduksi

Fasa	Rumus Kimia	ICDD Number
<i>Iron</i>	Fe	00-001-1262
<i>Nickel Iron (taenite)</i>	FeNi	00-003-1016
<i>Nickel Iron (kamacite)</i>	FeNi	00-003-1016
<i>Xifengite</i>	Fe ₅ Si ₃	00-038-0438
<i>Nickel</i>	Ni	00-045-1027

Berdasarkan Gambar 4.6 dan berdasarkan Tabel 4.9., dapat diketahui fasa-fasa yang terbentuk pada produk logam hasil proses reduksi dengan variasi massa limestone, didapatkan fasa *nickel iron* (FeNi) *kamacite*. Hal ini menunjukkan bahwa pada variabel ini telah terjadi reaksi reduksi dengan adanya penyedia CO₂ dari *limestone* dan karbon dari batubara yang berperan dalam pembentukan gas CO reaksi *boudouard* sebagai gas reduktor yang akan mereduksi Fe₂O₃ dan NiO menjadi Fe dan Ni. Kemudian Fe dan Ni yang telah tereduksi kemudian akan bergabung membentuk *solid solution* besi nikel metalik (Olli, 1995).

Selain FeNi *kamacite*, terbentuk juga fasa FeNi *taenite*. Perbedaan antara dua jenis fase Nikel Besi (Fe, Ni) adalah konten nikel di dalamnya. *Taenite* memiliki tingkat elemen Ni yang lebih tinggi dengan kandungan Fe yang lebih rendah. Sementara *Kamacite* memiliki tingkat elemen Fe yang lebih tinggi dengan kandungan Ni yang lebih rendah (C.M. Diaz, 1988). Fase *Kamacite* terbentuk dari hasil reduksi *Goethite* (FeOOH) dan *Lizardite* ((Mg, Ni)₃Si₂O₅(OH)₄). Sementara *Taenite* terbentuk

dari reduksi Nikel Besi Oksida (NiFe_2O_4) dengan nilai pemulihan dan kandungan nikel yang lebih tinggi (Canterford, 1975).

Pada hasil dengan variasi massa *limestone* 16 gr, 18 gr, dan 20gram. Terdapat fasa FeNi *kamacite* serta *taenite*. Sedangkan variasi massa *limestone* 22 gr, 24 gr, 26 gr hanya terdapat fasa *taenite*, sehingga sesuai dengan kadar Ni yang lebih tinggi.

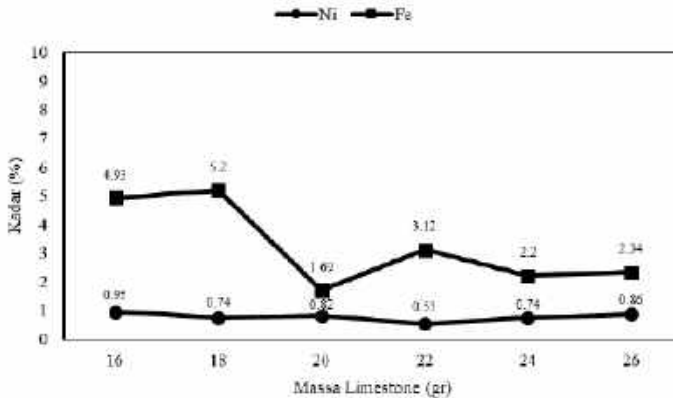
Kemudian besi dan nikel metalik yang telah terbentuk secara bertahap berkumpul dan membentuk partikel logam yang lebih besar. Namun, pada puncak 20 44,6, 64,6 serta 82,3, masih terdapat fasa *iron* (Fe). Hal tersebut menunjukkan bahwa kurangnya energi yang dibutuhkan untuk membentuk *solid solution* besi nikel metalik. fasa nikel (Ni) pada puncak tertinggi 20 41,5, 44,5, 72,14. Tingginya intensitas peak Ni menunjukkan kristalinitas logam Ni yang semakin bagus (Wahyu, 2016).

Selain itu, Pada puncak 20 31,1 didapatkan fasa *xifengite* (Fe_5Si_3). Dimana fasa tersebut hasil reaksi antara silikat dengan besi yang sudah tereduksi oleh gas CO.

4.6 Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Kadar Unsur Fe dan Ni serta Fasa yang Terbentuk pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi

Proses reduksi pada bijih nikel laterit limonitik dilakukan untuk memisahkan nikel dengan unsur atau senyawa pengotor yang tidak diinginkan. Selanjutnya, dilakukan pemisahan/sepansi magnetik dimana bagian non magnetik tidak tertarik oleh magnet. Berikut adalah analisis untuk kadar Ni dan Fe pada bagian non magnetik, agar dapat diketahui apakah seluruh produk Ni dan Fe dapat diperoleh kembali.

Variasi massa limestone pada proses reduksi briket nikel laterit limonitik akan mempengaruhi kadar unsur Ni dan Fe pada produk bagian non magnetik hasil proses reduksi yang ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Kadar Unsur Ni pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi

Pada Gambar 4.7. dapat diketahui bahwa senyawa pengotor (bagian non magnetik) yang ada masih membawa unsur penting nikel didalamnya. Hal tersebut dikarenakan kurang optimalnya gas CO untuk mereduksi keseluruhan Fe_2O_3 dan NiO . Pada variasi massa limestone secara berturut-turut didapatkan kadar Ni sebesar 0.95%, 0.74%, 0.82%, 0.53%, 0.74%, dan 0.86%.

Hasil yang fluktuatif, diakibatkan oleh pada hasil logam maupun serbuk magnetik yang memiliki kadar nikel lebih rendah, cenderung memiliki hasil dari bagian non magnetik dengan kadar nikel yang lebih tinggi. Sesuai dengan kadar serta *recovery* nikel yang tinggi pada variasi 22gr, maka pada bagian non magnetik kadar nikel terendah juga ada pada variasi 22gr.

Secara keseluruhan, kadar nikel dari bagian non magnetik berada di bawah kadar nikel mula-mula pada bijih. Masih terdapat kadar nikel pada *slag* dikarenakan pada hasil XRD bagian non magnetik pada setiap variabel didapatkan fasa *olivine*

$(\text{Mg,Ni})_2\text{SiO}_4$). Dimana fasa *olivine* tersebut menjebak nikel yang ada. Hal tersebut yang akhirnya membuat kadar dan *recovery* Ni pada logam naik.

Adapun fasa *olivine* terbentuk melalui proses dehidroksilasi fasa *lizardite* $(\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ dan proses rekristalisasi mineral silikat yang ada pada bijih nikel laterit limonitik. Selain itu, nikel akan terjebak ke dalam Mg_2SiO_4 membentuk fasa *olivine* $(\text{Mg,Ni})_2\text{SiO}_4$ (Iwan, 2014).

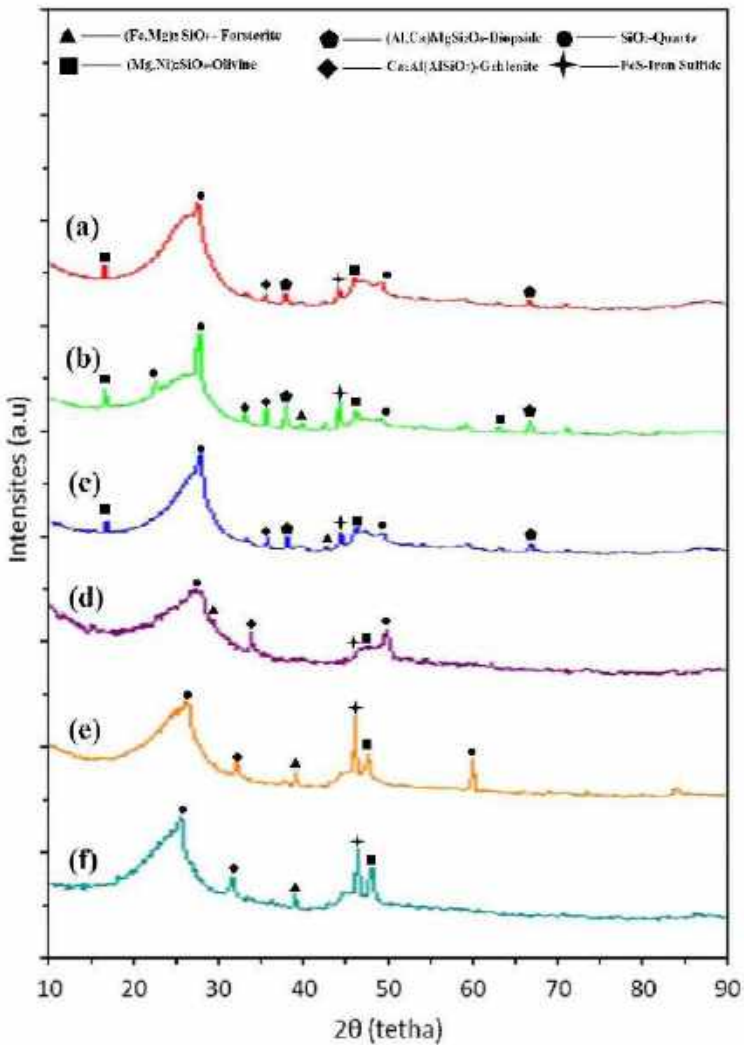
Pada Gambar 4.7. dapat diketahui pula bahwa senyawa pengotor (bagian non magnetik) yang ada masih mengandung besi. Hal tersebut dikarenakan kurang optimalnya gas CO untuk mereduksi keseluruhan Fe_2O_3 dan NiO. Pada variasi massa *limestone* secara berturut-turut didapatkan kadar Fe sebesar 4.93%, 5.2%, 1.69%, 3.12%, 2.2%, dan 2.34%. Dimana kadar Fe tersebut mengalami penurunan dibandingkan kadar Fe awal pada bijih. Hal tersebut dikarenakan pada hasil XRD bagian non magnetik pada ketiga variabel didapatkan fasa *forsterite* $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$. Dimana fasa *forsterite* tersebut menjebak besi yang ada. Hal tersebut yang akhirnya membuat kadar dan *recovery* Fe pada logam naik. Fasa *forsterite* $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ terbentuk melalui proses dehidroksilasi fasa *lizardite* $(\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ dan proses rekristalisasi mineral silikat yang ada pada bijih nikel laterit. (Li, 2011).

Selain itu, hal tersebut juga karena digunakannya Na_2SO_4 sebagai agen reduksi selektif. Dengan adanya aditif berbasis sulfur, senyawa *troilite* (FeS) terbentuk, seperti yang ditunjukkan oleh hasil analisis XRD (Gambar 4.8), di mana senyawa FeS hadir pada suhu. Na_2SO_4 tereduksi menghasilkan Na₂S. Kemudian Na₂S bereaksi dengan FeO untuk membentuk FeS.

Karena adanya fasa FeS yang merupakan fasa non-magnetik, fasa ini tidak dapat diperoleh pada saat separasi magnetik. Oleh karena itu masih ada kadar Fe pada bagian non-magnetik (Nurjaman *et al.*, 2018).

4.6.1 Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi

Identifikasi fasa dari hasil reduksi yaitu berupa logam dilakukan menggunakan mesin XRD PAN analytical X'Pert. Hasil pengujian XRD produk non magnetik hasil proses reduksi ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Pengaruh Variasi Massa Limestone Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi

Tabel 4.9. Identifikasi Fasa pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi

Fasa	Rumus Kimia	ICDD Number
<i>Olivine</i>	$(\text{Mg,Ni})_2\text{SiO}_4$	01-076-7527
<i>Iron Sulfide</i>	FeS	01-073-8127
<i>Forsterite</i>	$(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$	00-034-0189
<i>Quartz</i>	SiO_2	01-077-1060
<i>Diopside</i>	$(\text{Al,Ca})\text{MgSi}_2\text{O}_6$	00-015-0388
<i>Gehlenite</i>	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$	01-076-7527

Berdasarkan Gambar 4.9. bagian (a) dan Tabel 4.9., dapat diketahui fasa-fasa yang terbentuk pada produk bagian non magnetik hasil proses reduksi dengan variasi massa *limestone*, didapatkan fasa dominan yaitu fasa *olivine* ($(\text{Mg,Ni})_2\text{SiO}_4$) pada puncak θ 17,4; 48,6, dan 62,99. Dimana fasa *olivine* terbentuk melalui proses dehidroksilasi fasa *lizardite* ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) dan proses rekristalisasi mineral silikat yang ada pada bijih nikel laterit limonitik (Li, 2011). Adapun nantinya nikel akan terjebak ke dalam Mg_2SiO_4 membentuk fasa *olivine* ($(\text{Mg,Ni})_2\text{SiO}_4$) (Iwan, 2014)

Selain itu, terbentuk juga fasa *forsterite* ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) pada puncak θ 17,4 dan 62,9. Dimana mekanisme pembentukan yang terjadi sama halnya dengan pembentukan fasa *olivine*, namun yang terjebak ialah Fe bukan Ni (Iwan, 2014).

Pada puncak θ 35,7 dan 65,7 diidentifikasi sebagai fasa *diopside* ($(\text{Al,Ca})\text{MgSi}_2\text{O}_6$). Dimana fasa ini kemungkinan merupakan hasil reaksi antara CaO hasil dekomposisi *limestone* seperti dengan Al_2O_3 dan hasil dari reaksi dehidroksilasi fasa *lizardite* yaitu Mg_2SiO_4 .

Didapatkan fasa *gehlenite* ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$) pada puncak θ 31,3; 36,8; dan 47,7. Pembentukan fasa *gehlenite* kemungkinan merupakan hasil reaksi antara CaO hasil dekomposisi *limestone* dengan SiO_2 dan Al_2O_3 (Harabi, 2017).

Terbentuk juga fase FeS, yang berasal dari mekanisme *selective reduction* nikel yang terjadi (Jiang, 2013). Mulai dari terjadi dekomposisi termal dan reduksi natrium sulfat serta pengikatan Fe membentuk FeS

Sedangkan teridentifikasi fasa *quartz* (SiO_2), yang berasal dari senyawa yang banyak ditemui dalam bahan tambang/galian yang berupa mineral silika (SiO_2) (Della, 2002). Selain itu, fasa SiO_2 juga didapatkan dari hasil dehidroksilasi fasa *lizardite*.

4.7 Hasil Penelitian

Dari uraian di atas, hasil dari penelitian yang dapat digaris bawahi adalah:

1. Faktor selektivitas tertinggi dibandingkan penelitian lain.
2. Adanya dekomposisi CaCO_3 , dimana terjadi kesetimbangan pada kadar CO/CO_2 , sehingga mencapai zona dimana kadar nikel tinggi dan *recovery* moderat.
3. *Limestone* saat berdekomposisi berupa CaO dan CO_2 dimana CaO merupakan oksida yang sulit tereduksi, sehingga tidak mengganggu jalannya proses reduksi, berbeda dengan fluks lain yang mengandung oksida selain CaO . Serta CO_2 yang dapat membantu mengkondisikan atmosfer reduksi.
4. Didapatkan massa penggunaan *limestone* yang paling optimum 22 gram atau 122.22% dari kebutuhan *limestone* semula yaitu 18 gram.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa data yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kadar Ni pada variasi massa *limestone* 16 gram, 18 gram, 20gram, 22gram, 24gram, berturut-turut adalah 6.12%, 10.71%, 11.3%, 18.75%,14.82%, 12.72%. Sehingga kadar tertinggi Ni ada pada variasi massa *limestone* 22 gram, sebesar 18.75%. Sedangkan, kadar Fe pada variasi massa *limestone* 16 gram, 18 gram, 20gram, 22gram, 24gram, 26gram, berturut-turut 87.58%, 58.14%, 71.91%, 52.95%, 53.98%, dan 58.14%. Sehingga kadar tertinggi Fe ada pada variasi massa *limestone* 16 gram, sebesar 87.58%.
2. Recovery Ni pada variasi massa *limestone* 16 gram, 18 gram, 20gram, 22gram, 24gram, 26gram, berturut-turut adalah 67.15%, 82.08%, 77%, 99.34%, 95.58%, dan 93.6%. Sehingga recovery Ni tertinggi ada pada variasi massa *limestone* 22gram, sebesar 99.34%. Sedangkan recovery Fe pada variasi massa *limestone* 16 gram, 18 gram, 20gram, 22gram, 24gram, 26gram, berturut-turut adalah 28.91%, 26.57%, 20.79%, 18.78%, 16.3%, dan 18.89%. Sehingga recovery Fe tertinggi ada pada variasi massa *limestone* 16gram, sebesar 28.91%.
3. Faktor selektivitas produk yang dihasilkan pada variasi massa *limestone* 16 gram, 18 gram, 20 gram, 22 gram, 24 gram, 26 gram, berturut-turut adalah 1.84, 3.53, 4.15, 9.36, 7.25, dan 5.78. Sehingga faktor selektivitas tertinggi ada pada variasi massa *limestone* 22 gram, sebesar 9.36%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian-penelitian selanjutnya antara lain:

1. Melakukan penelitian reduksi langsung bijih nikel laterit dengan mengubah perbandingan ore, batubara, dan *limestone* dengan variasi yang berbeda
2. Melakukan penelitian lanjutan dengan proses *smelting* dari produk hasil benefisiasi proses reduksi langsung bijih nikel laterit.
3. Melakukan penelitian selanjutnya mengenai ferronikel untuk mengembangkan proses pengolahan bijih nikel di Indonesia.
4. Melakukan penelitian selanjutnya mengenai reduksi langsung bijih nikel laterit dengan memanfaatkan aditif berbasis alam sehingga lebih ramah lingkungan serta ekonomis.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Vignes. (2011) **Extractive Metallurgy 2: Metallurgical Reaction Processes**, Wiley-ISTE
- 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 Laterit Limonitik Nickel Ore by Coal-bed Method", **AIP Conference Proceeding**, Vol 1945, hal. 1-9.
- Anggarda, Dio Yoshitaka (2017) "Studi Pengaruh Variasi Jenis Fluks Dalam Proses Aglomerasi Bijih Nikel Laterit Terhadap Kadar Ni Dan Fe Serta Morfologi Aglomerat Sebagai Bahan Umpan Mini Blast Furnace." **Skripsi S1**, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Antola, O., Holappa, L., & Paschen, P. (1995). "Nickel Ore Reduction by Hydrogen and Carbon Monoxide Containing Gases". **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, 15(1-4), 169–179.
doi:10.1080/08827509508914195
- Brand, N.W, Butt, C.R.M., Elias, M. (1998) "Nickel Laterite : classification and features.", **AGSO Journal of Australian Gology & Geophysics** Vol. 17, No. 4, pp. 81- 88.
- Breeze, P. (2015). **An Introduction to Coal-Fired Power Generation. Coal-Fired Generation**, 1–7. doi:10.1016/b978-0-12-804006-5.00001-0
- Cao, C., Xue, Z., Duan, H., (2016), "Making Ferronickel From Laterite Nickel Ore By Coal-Based-Self-Reduction And High Temperature Melting Process", **International Journal of Nonferrous Metallurgy**, Vol 5, hal. 9-15.
- Crundwell, Frank & Moats, Michael & Ramachandran, V. & Robinson, Tim & Davenport,. (2011). **Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals**. 10.1016/C2009-0-63541-8.
- Elliot, R., Rodrigues, F., Pickles, C.A., Peacey, J., (2015), "A Two-Stage Thermal Upgrading Process For Nickeliferous

-
- Limonitik Laterite Ores”. **The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science**, Vol 54, hal. 1-11.
- Fay, Mike et al., (2005) “Toxicological Profile For Nickel” **U.S. Department Of Health And Human Services Washington, US Public Health Service Agency**
- Filipe, F., Ramalho, A., Loureiro, A., Guilemany, J. M., Torrell, M., & Cavaleiro, A. (2013). “Influence of nanostructured ZrO₂ additions on the wear resistance of Ni-based alloy coatings deposited.”, **APS process. Wear**, 303(1-2), 591–601. doi:10.1016/j.wear.2013.04.012
- 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. doi:10.1016/j.minpro.2013.04.005
- Kerfoot, D. G. E. (2005). **Nickel. In Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim**, Germany: Wiley-VCH.
- Kyoung, J., Nunna, V. R. M., Hapugoda, S., Nguyen, A. V., & Bruckard, W. J. (2014). “Chemical And Mineral Transformation Of A Low Grade Goethite Ore By Dehydroxylation, Reduction Roasting And Magnetic Separation.” **Minerals Engineering**, 60, 14–22.
- Landers, M. and Gilkes, R.J. (2007) “Dehydroxylation And Dissolution Of Nickeliferous Goethite In New Caledonian Lateritic Ore”. **Applied Clay Science**, 35, 162172.
- Li, S., 1999, —”Study Of Nickeliferous Laterite Reduction”, Thesis, McMaster University.
- Li, G., Shi, R., Rao, M., Jiang, T., Zhang, Y., (2012), “Beneficiation Of Nickeliferous Laterite By Reduction Roasting In The Presence Of Sodium Sulfate”, **Miner. Eng.**, Vol 32, hal. 19–26.
- Macedo, Fernando & Bresolin, Joana & Santos, Elcio & Furlan, Felipe & Da Silva, Wilson & Polacco, Joseph & Lavres Junior, Jose. (2016). “Nickel Availability in Soil as
-

- Influenced by Liming and Its Role in Soybean Nitrogen Metabolism.” **Frontiers in Plant Science**. 7. 10.3389/fpls.2016.01358.
- Mahendra, Muhammad Rifqi (2017) “Analisa Pengaruh Variasi Jenis Fluks (Dolomit, Limestone, Quicklime) Dalam Proses Aglomerasi Bijih Nikel Limonit Terhadap Kadar Ni dan Fe Serta Morfologi Aglomerat Sebagai Bahan Umpan Mini Blast Furnace.” **Skripsi S1**, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Man Jiang, Tichang Sun, Zhiguo Liu, Jue Kou, Na Liu, Shiyuan Zhang., (2013), “Mechanism of sodium sulfate in promoting selective reduction of nickel laterite ore during reduction roasting process”, **International Journal of Mineral Processing**, Vol 123, hal. 32–38.
- McGrath SP (1995) Alloway BJ (ed) “Heavy metals in soils.”, **Blackie Academic and Professional**, London, pp 152–174
- Mudd, G. (2010). “Global Trends And Issues In Nickel Mining: Sulfides Versus Laterites.Ore” **Geol. Rev.** 38, 9–26
- Noviyanti, Jasruddin, dan Eko Hadi Sujiono. (2015). “Karakterisasi Kalsium Karbonat dari Batu Kapur Kelurahan Tellu Limpoe Kecamatan Suppa”, **Skripsi S1** Makassar: Universitas Negeri Makassar
- Purnamasari, Anisya (2018) “Reduksi Langsung Bijih Nikel Laterit Limonitik dengan Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit pada Reaktor Bed Batu Bara-Dolomit.” **Skripsi S1**, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Pickles, C.A., J. Forster, R. Elliott., (2014), “Thermodynamic Analysis Of The Carbothermic Reduction Roasting Of A Nickeliferous Limonitik Laterite Ore,” **Minerals Engineering**, Vol 65, hal. 33–40.
- Setiawan, Iwan. (2014). “Karakteristik Nikel Laterit Indonesia pada Pemanasan dari 600°C Sampai dengan 1000°C” Tangerang. **Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI**.

-
- Setiawan, Iwan. (2016). “Pengolahan Nikel Laterit Secara Pirometalurgi”. **Tangerang. Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI.**
- Shelley, R.C., (2015), “**Sedimentary Rocks/Limestones**”. London. Imperial College of London.
- Siti, F. Soekarsono, Prihandini Iman (2013) “Pelepasan Ion Nikel Pada Braket Stainless Steel Baru Dan Daur Ulang Dalam Saliva Buatan. Yogyakarta,”, **Skripsi S1** Fakultas Kedokteran Gigi, Universitas Gadjah Mada.
- Stratton, P. (2013). “Ellingham Diagrams – Their Use And Misuse.” **International Heat Treatment and Surface Engineering**. 7. 70-73.
10.1179/1749514813Z.00000000053.
- Sunderman, W.F.Jr. and Oskarsson, A. (1991) “**Nickel. In: E. Merian, Ed., Metals and Their Compounds in the Environment**”, VCH, Weinheim, 1101-1126.
- Van der Ent, A., Baker, A.J.M., Van Balgooy, M.M.J., Tjoa, A., (2013), “Ultramafic Nickel Laterites In Indonesia (Sulawesi, Halmahera): Mining, Nickel Hyperaccumulators And Opportunities For Phytomining”, **Journal of Geochemical Exploration**. Vol 128, hal 72-79.
- Wang J, Li Y., (2011), “**Clean And Highly Efficient Utilization Of Coal**”, Bull Chin Acad Sci, Vol 25, hal. 56–8.
- Wang, Z., Chu, M., Liu, Z., Wang, H., Zhao, W., & Gao, L. (2017). “Preparing Ferro-Nickel Alloy from Low-Grade Laterite Nickel Ore Based on Metallized Reduction–Magnetic Separation”. **Metals**, 7(8), 313.
- Watanabe, T., Ono, S., Arai, H., & Matsumori, T. (1987). “Direct Reduction Of Garnierite Ore For Production Of Ferro-Nickel With A Rotary Kiln At Nippon Yakin Kogyo Co., Ltd., Oheyama Works”. **International Journal of Mineral Processing**, 19(1-4), 173–187. doi:10.1016/0301-7516(87)90039-1
- Yildirim, H., Morcali, H., Turan, A. and Yucel, O. (2013) “Nickel Pig Iron Production from Lateritic Nickel Ores. Proceedings
-

-
- of the Thirteenth International Ferroalloys” **Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry**, Almaty, 9-13 June 2013, 237-244.
- Zevgolis, Emmanouil & Zografidis, C. & Perraki, Theodora & Devlin, Eamonn. (2010). “Phase Transformations Of Nickeliferous Laterites During Preheating And Reduction With Carbon Monoxide.” **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. 100. 133-139. 10.1007/s10973-009-0198-x.
- Zhang, Y.; Zhou, Y.; Zhaoyi, L.Z., (2008), “Technical Analysis Of Producing Low Ni Pig Iron With Laterite In A Blast Furnace, Baosteel Tech. Res.”, **Metallurgy** Vol 2,hal. 36–40.
- Zhu, D.Q., Cui, Y., Vining, K., Hapugoda, S., Douglas, J., Pan, J., Zheng, G.L., (2012), “Upgrading Low Nickel Content Laterite Ores Using Selective Reduction Followed By Magnetic Separation”, **Int. J. Miner. Process**, Vol 106–109, hal. 1–7.

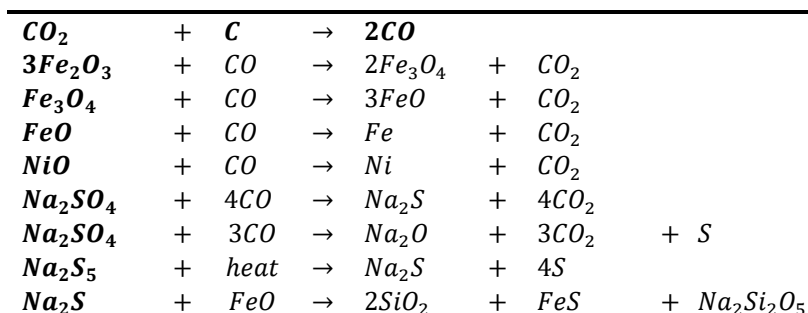
(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

A. Perhitungan Kebutuhan Massa

Persamaan Stoikiometri Kebutuhan Komponen dalam Briket tanpa Aditif

Massa komponen-komponen dalam briket ditentukan melalui perhitungan berdasarkan karakteristik reaksi setiap senyawa. Tipe reaksi yang terjadi adalah reduksi, dekomposisi dan *Boudouard* dan persamaan-persamaan yang diperhitungkan terjadi disajikan sebagai berikut:



Data yang dibutuhkan untuk perhitungan komposisi material:

1. Bijih Nikel Laterit Limonitik

Data pengujian komposisi bijih laterit limonitik dalam persentase berat hasil EDX disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 1. Hasil EDX Nikel Laterit

Unsur	Ni	Fe	Si	Mg	Ca	Al	Cr	O
% Wt	1.59	42.01	17.78	5.91	2.36	2.5	1.29	25.89

Data pengujian XRD, mineral-mineral dalam laterit yang mendukung perhitungan adalah hematite (Fe_2O_3) dan nikel oksida (NiO), sehingga komposisi kedua senyawa tersebut dapat ditentukan:

- Berat hematite (Fe_2O_3)

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

$$\% \text{ Wt } \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{159,69}{111,69} \times 42,01 = 60,0642\%$$

- Berat nikel oksida (NiO)

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

$$\% \text{ Wt } \text{NiO} = \frac{74,6934}{8,6934} \times 1,59 = 2,0234\%$$

Jika diasumsikan bahwa bijih yang digunakan memiliki berat 100 gram, maka terdapat Fe_2O_3 sebanyak 60,0642 gram dan NiO seberat 2,0234 gram. Kemudian dilakukan perhitungan mol kedua oksida tersebut:

- Mol hematite (Fe_2O_3)

$$\text{Mol } \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{\text{Massa } \text{Fe}_2\text{O}_3}{Mr \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

$$\text{Mol } \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{60,0642}{159,69} = 0,3761 \text{ mol}$$

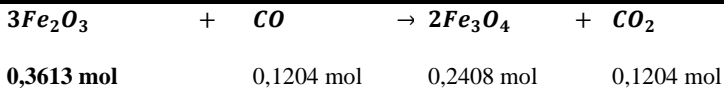
- Mol nikel oksida (NiO)

$$\text{Mol } \text{NiO} = \frac{\text{Massa } \text{NiO}}{Mr \text{ NiO}}$$

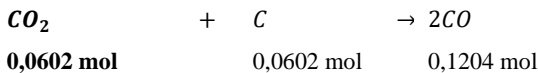
$$\text{Mol NiO} = \frac{2,0234}{74,6934} = 0,027 \text{ mol}$$

Berdasarkan target reduksi pada Tabel 3.1, maka dapat ditentukan jumlah mol gas CO yang dibutuhkan dalam proses reduksi. Kebutuhan mol C juga dapat ditentukan karena C yang akan bereaksi dengan CO₂ menjadi reduktor CO. Perhitungannya sebagai berikut:

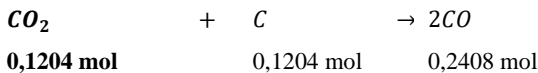
a. Reaksi (1)



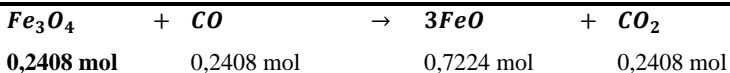
Reaksi *Boudouard*



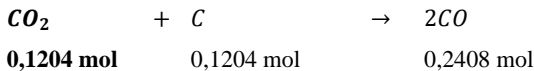
Reaksi CO₂ hasil reaksi (1) dengan C



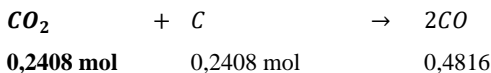
b. Reaksi (2)

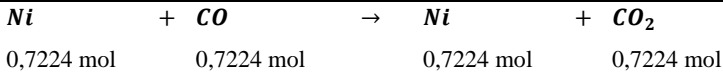
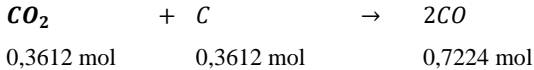
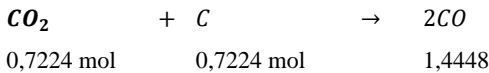
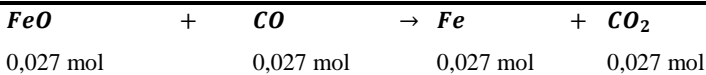
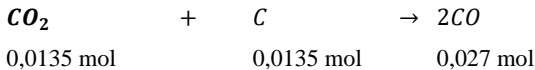
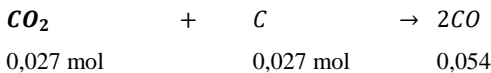


Reaksi *Boudouard*



Reaksi CO₂ hasil reaksi (2) dengan C



c. Reaksi (3)**Reaksi Boudouard****Reaksi CO₂ hasil reaksi (3) dengan C****d. Reaksi (4)****Reaksi Boudouard****Reaksi CO₂ hasil reaksi (4) dengan C****1. Batu bara**

Analisis proksimat menunjukkan bahwa kadar *fixed carbon* adalah 61,8%. Berdasarkan reaksi-reaksi C di atas, maka dapat dihitung kebutuhan batu bara sebelum penambahan fluks dan aditif berdasarkan total mol C yang terlibat sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Total mol karbon} &= 0,0602 + 0,1204 + 0,1204 + 0,2408 + \\
 & 0,3612 + 0,7224 + 0,0135 + 0,027 \\
 &= 1,6659 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

$$\text{Massa C yang dibutuhkan} = \text{Total mol C} \times \text{Ar C}$$

Massa batu bara yang dibutuhkan

$$= 1,6659 \text{ mol} \times 12,0116 \text{ g/mol} = 20,01 \text{ gram}$$

$$\text{Massa batu bara yang dibutuhkan} = \frac{100}{61,8} \times \text{Massa C}$$

$$\text{Massa batu bara yang dibutuhkan} = \frac{100}{61,8} \times 20,01 \text{ g}$$

$$\text{Massa batu bara yang dibutuhkan} = 32,362 \text{ g} = 33 \text{ gram}$$

2. Limestone

Limestone digunakan sebagai fluks dalam proses reduksi yang bertindak sebagai *supplier* CO₂ yang kemudian akan direduksi oleh C untuk membentuk reduktor CO. Hasil karakterisasi komposisi awal *limestone* sebagai berikut:

Tabel 2. EDX *Limestone*

No.	Elemen	Rumus Kimia	Komposisi (%)
1.	Calcium	Ca	43.01
2.	Magnesium	Mg	0.57
3.	Silicon	Si	6.51
4.	Aluminium	Al	2.43
5.	Oksigen	O	33.93

Berdasarkan reaksi dekomposisi *limestone*, $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, koefisien reaksi seluruh reaktan dan produk sama sehingga jumlah mol yang terlibat juga sama.

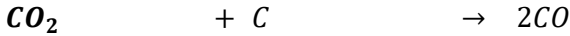
Kebutuhan *limestone* dapat dihitung melalui sisa mol CO₂ yang terbentuk dari reaksi (1) sampai (4).

$$\text{Sisa mol CO}_2 = 0,3548 \text{ mol}$$



0,3548 mol 0,3548 mol 0,3548 mol

Reaksi Boudouard



0.1774 mol 0.1774 mol 0,3548 mol

Dari persamaan reaksi di atas, dipahami bahwa terdapat sisa 0,27765 mol CO₂ sehingga juga dibutuhkan C sebanyak 0,27765 mol untuk mereduksinya menjadi CO. Dari persamaan itu pula dapat dihitung kebutuhan *limestone* dan batu bara tambahan setelah penambahan *limestone*:

Massa limestone yang dibutuhkan

$$\begin{aligned} &= \text{Total mol } CaCO_3 \times Mr \text{ } CaCO_3 \\ &= 0,1774 \text{ mol} \times 100,0869 \text{ g/mol} \\ &= 17,75 \text{ gram} = 18 \text{ gram (pembulatan)} \end{aligned}$$

Massa C tambahan karena penambahan fluks

$$\begin{aligned} &= \text{Total mol } C \times Ar \text{ } C \\ &= 0,1774 \text{ mol} \times 12,0116 \frac{\text{gram}}{\text{mol}} \\ &= 2,7344 \text{ gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa batu bara tambahan} &= \frac{100}{61,8} \times \text{Massa } C \\ &= \frac{100}{61,8} \times 2,7344 \\ &= 4,4 \text{ gram} \\ &= 5 \text{ gram (pembulatan)} \end{aligned}$$

3. Tepung Tapioka

Kebutuhan tepung tapioka dihitung sebesar 3% dari total campuran komponen bijih nikel laterit limonitik, *limestone* dan batu bara. Total massa ke 3 komponen adalah:

$$Total\ Massa = 100gr + 18gr + 38gr = 156gr$$

$$Tapioka = 3\% \times 156\ gr = 4,7gr = 5\ gr$$

2. Aditif Na_2SO_4

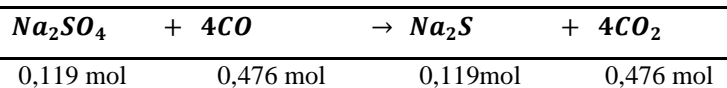
Penambahan aditif natrium sulfat dihitung 10% dari jumlah total massa briket tanpa aditif (bijih nikel laterit, limestone, batu bara, dan tapioka). Total massa ke 4 komponen adalah:

$$Total\ Massa = 100gr + 18gr + 38gr + 5gr = 161gr$$

$$Massa\ Na_2SO_4 = 10\% \times 161\ gr = 16.1 = 17gr$$

$$Mol\ Na_2SO_4 = \frac{Massa}{MR\ Na_2SO_4} = \frac{17}{142} = 0.119\ mol$$

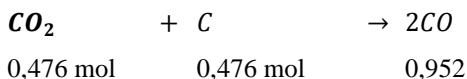
Perhitungan kebutuhan batubara tambahan disesuaikan dengan reaksi dekomposisi Na_2SO_4 disajikan sebagai berikut:



Reaksi Boudouard



Reaksi CO_2 hasil reaksi sebelumnya dengan C



$$Massa\ C\ tambahan\ karena\ penambahan\ aditif \\ = Total\ mol\ C \times Ar\ C$$

$$= 0,714 \text{ mol} \times 12,0116 \frac{\text{gram}}{\text{mol}}$$

$$= 8,57 \text{ gram}$$

$$\text{Massa batu bara tambahan} = \frac{100}{61,8} \times \text{Massa C}$$

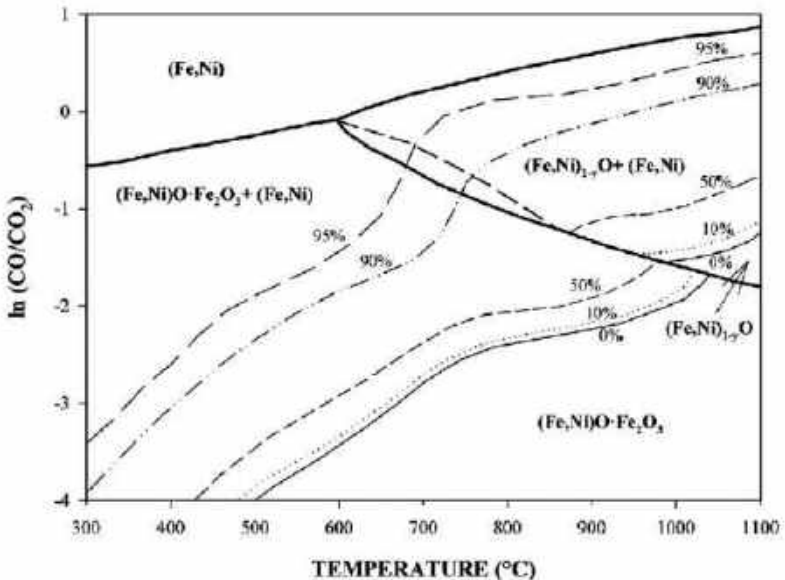
$$= \frac{100}{61,8} \times 8,57$$

$$= 13,8 \text{ gram}$$

Jadi, perbandingan komposisi bijih laterit limonitik, *limestone*, batu bara, Na_2SO_4 dan tepung tapioka dalam briket yaitu

$$\mathbf{100 : 18 : 51,8 : 17 : 5.}$$

B. Perhitungan CO/CO₂



Berdasarkan diagram kesetimbangan Fe-Ni-O untuk *goethite*, diketahui bahwa rasio CO/CO₂ sangat mempengaruhi proses reduksi karbotermik (Pickles *et al.*, 2016). Dimana didalamnya terdapat 4 zona yang dapat digunakan dalam memprediksi produk reduksi sesuai dengan rasio CO/CO₂ berbanding temperatur yang ada. Dari 4 zona tersebut, didapatkan bahwa pada zona 2 merupakan zona yang paling cocok sebagai acuan produksi dikarenakan produknya memiliki *grade* nikel yang moderat dan *recovery* nikel yang tinggi serta laju reaksi yang lebih cepat dibandingkan zona lainnya. Adapun produk hasil reaksi berupa (Fe,Ni)_{1-y}O + (Fe,Ni). Sehingga, pada penelitian ini berfokus kepada pencapaian zona 2 dengan metalisasi sebesar 90-95%.

a. Perhitungan CO/CO₂ 18gr

a. Total mol CO

$$= 0,2408 + 0,4816 + 1,4448 + 0,054 + 0 + 0,952 = 3,1732 \text{ mol}$$

b. Total mol CO₂ = 0,1204 + 0,2408 + 0,7224 + 0,027 + 0,1774 + 0,476 = 1.764 mol

$$\text{Rasio} = \frac{3.1732}{1.764} = 1.79886621315 \text{ ssa}$$

c. Didapatkan ln CO/CO₂ untuk perhitungan sesuai dengan neraca massa: ln (1,799) = 0.587 yang berada pada daerah II dengan metalisasi di atas 95%.

b. Perhitungan CO/CO₂ 16gr

a. Massa limestone = 16gr maka,

$$\text{MasMol CaCO}_3 = \frac{\text{Massa CaCO}_3}{\text{MR CaCO}_3} = \frac{16 \text{ gr}}{100,0869 \text{ gr/mol}} = 0.1599 \text{ mol}$$

Sehingga sesuai reaksi dekomposisi CaCO₃ maka CO₂ yang terbentuk = mol CaCO₃, 0.1599 mol

b. Total mol CO

$$= 0,2408 + 0,4816 + 1,4448 + 0,054 + 0 + 0,952 = 3.1732 \text{ mol}$$

c. Total mol CO₂ = 0,1204 + 0,2408 + 0,7224 + 0,027 + 0,1599 + 0,476 = 1.7465 mol

$$\text{d. Rasio CO/CO}_2 = \frac{3.1732}{1.7465} = 1.817 \text{ sa}$$

ln CO/CO₂ = ln (1.817) = 0.597, yang berada pada daerah II dengan metalisasi di atas 95%.

c. Perhitungan CO/CO₂ 20gr

- a. Massa limestone=18gr maka,

$$\begin{aligned} \text{MasMol } CaCO_3 &= \frac{\text{Massa } CaCO_3}{MR \text{ } CaCO_3} = \frac{20 \text{ gr}}{100,0869 \text{ gr/mol}} \\ &= 0,1998 \text{ mol} \end{aligned}$$

Sehingga sesuai reaksi dekomposisi $CaCO_3$ maka CO_2 yang terbentuk=mol $CaCO_3$, 0.1998 mol

- b. Total mol CO

$$= 0,2408 + 0,4816 + 1,4448 + 0,054 + 0 + 0,952 = 3.1732 \text{ mol}$$

- c. Total mol CO_2 = 0,1204 + 0,2408 + 0,7224 + 0,027 + 0,1998 + 0,476 = 1.7864 mol

- d. **Rasio** $CO/CO_2 = \frac{3.1732}{1.7864} = 1,776sa$

$\ln CO/CO_2 = \ln (1,796) = 0.57$, yang berada pada daerah II dengan metalisasi di di antara 90-95%

d. Perhitungan CO/CO_2 22gr

- a. Massa limestone=18gr maka,

$$\begin{aligned} \text{MasMol } CaCO_3 &= \frac{\text{Massa } CaCO_3}{MR \text{ } CaCO_3} = \frac{22 \text{ gr}}{100,0869 \text{ gr/mol}} \\ &= 0,2198 \text{ mol} \end{aligned}$$

Sehingga sesuai reaksi dekomposisi $CaCO_3$ maka CO_2 yang terbentuk=mol $CaCO_3$, 0.2198 mol

- b. Total mol CO

$$= 0,2408 + 0,4816 + 1,4448 + 0,054 + 0 + 0,952 = 3.1732 \text{ mol}$$

- c. Total mol CO_2 = 0,1204 + 0,2408 + 0,7224 + 0,027 + 0,2198 + 0,476 = 1.7864 mol

- d. **Rasio** $CO/CO_2 = \frac{3.1732}{1.7864} = 1,776sa$

$\ln CO/CO_2 = \ln (1,776) = 0.574$, yang berada pada daerah II dengan metalisasi di di antara 90-95%.

e. Perhitungan CO/CO_2 24gr

a. Massa limestone=18gr maka,

$$\text{MasMol CaCO}_3 = \frac{\text{Massa CaCO}_3}{\text{MR CaCO}_3} = \frac{24 \text{ gr}}{100,0869 \text{ gr/mol}}$$

$$= 0,2398 \text{ mol}$$

Sehingga sesuai reaksi dekomposisi CaCO₃ maka CO₂ yang terbentuk=mol CaCO₃, 0.2198 mol

b. Total mol CO

$$= 0,2408 + 0,4816 + 1,4448 + 0,054 + 0 + 0,952 = 3.1732 \text{ mol}$$

c. Total mol CO₂= 0,1204 + 0,2408 + 0,7224 + 0,027 + 0,2198+ 0,476 = 1.8064 mol

d. **Rasio** CO/CO₂ = $\frac{3.1732}{1.8064} = 1,756sa$

ln CO/CO₂ = ln (1,756) = 0.563, yang berada pada daerah II dengan metalisasi di di antara 90-95%.

f. Perhitungan CO/CO₂ 26gr

a. Massa limestone=18gr maka,

$$\text{MasMol CaCO}_3 = \frac{\text{Massa CaCO}_3}{\text{MR CaCO}_3} = \frac{26 \text{ gr}}{100,0869 \text{ gr/mol}}$$

$$= 0,2598 \text{ mol}$$

Sehingga sesuai reaksi dekomposisi CaCO₃ maka CO₂ yang terbentuk=mol CaCO₃, 0.2198 mol

b. Total mol CO

$$= 0,2408 + 0,4816 + 1,4448 + 0,054 + 0 + 0,952 = 3.1732 \text{ mol}$$

c. Total mol CO₂= 0,1204 + 0,2408 + 0,7224 + 0,027 + 0,2198+ 0,476 = 1.8264 mol

d. **Rasio** $\frac{CO}{CO_2} = \frac{3.1732}{1.8264} = 1,737sa$

ln CO/CO₂ = ln (1,737) = 0.552, yang berada pada daerah II dengan metalisasi di di antara 90-95%.

C. Perhitungan Recovery Nikel

Massa Limestone (gr)	M bijih (gr)	%Ni bijih	M logam (gr)	% Ni logam	M serbuk (gr)	% Ni serbuk
16	100	1.59	8.12	6.12	7.54	7.57
18	100	1.59	6.31	10.71	11.23	6.17
20	100	1.59	6.92	11.30	9.83	4.50
22	100	1.59	5.25	18.75	12.45	4.78
24	100	1.59	8.65	14.82	4.23	6.27
26	100	1.59	4.73	12.72	13.64	3.50

$$\text{Recovery Ni} = \frac{(m \text{ logam})x(\% \text{ Ni pada logam}) + (m \text{ serbuk})x(\% \text{ Ni pada serbuk})}{(\text{massa bijih}) \cdot (\% \text{ Ni pada bijih})} \times 100\%$$

a. Massa Limestone 16gr

$$\text{Recovery Ni} = \frac{(8.12)x(6.12\%) + (7.54)x(7.57\%)}{(100) \cdot (1.59\%)} \times 100\% \\ = 67.15233\%$$

b. Massa Limestone 18gr

$$\text{Recovery Ni} = \frac{(6.31)x(10.71\%) + (11.23)x(6.17\%)}{(100) \cdot (1.59\%)} \times 100\% \\ = 82.08434\%$$

c. Massa Limestone 20gr

$$\text{Recovery Ni} = \frac{(6.92)x(11.3\%) + (9.83)x(4.5\%)}{(100) \cdot (1.59\%)} \times 100\% \\ = 77.00063\%$$

d. Massa Limestone 22gr

$$\text{Recovery Ni} = \frac{(5.25)x(18.75\%) + (12.45)x(4.78\%)}{(100) \cdot (1.59\%)} \times 100\% \\ = 99.33868\%$$

e. Massa Limestone 24gr

$$\text{Recovery Ni} = \frac{(8.65)x(14.82\%) + (4.32)x(6.27\%)}{(100) \cdot (1.59\%)} \times 100\% \\ = 95.57585\%$$

f. Massa Limestone 26gr

$$\text{Recovery Ni} = \frac{(4.73)x(12.72\%) + (13.64)x(3.5\%)}{(100) \cdot (1.59\%)} \times 100\% \\ = 93.60101\%$$

D. Perhitungan Recovery Besi

Massa Limestone (gr)	M bijih (gr)	%Fe bijih	M logam (gr)	% Fe logam	M serbuk (gr)	% Fe serbuk
16	100	42.01	8.12	87.68	7.54	66.67
18	100	42.01	6.31	80.23	11.23	59.80
20	100	42.01	6.92	71.91	9.83	38.22
22	100	42.01	5.25	52.95	12.45	41.05
24	100	42.01	8.65	53.98	4.23	51.46
26	100	42.01	4.73	58.14	13.64	38.03

$$\text{Recovery Fe} = \frac{(m \text{ logam})x(\% \text{ Fe pada logam}) + (m \text{ serbuk})x(\% \text{ Fe pada serbuk})}{(\text{massa bijih}).(\% \text{ Fe pada bijih})} \times 100\%$$

a. Massa Limestone 16gr

$$\text{Recovery Fe} = \frac{(8.12)x(87.68\%) + (7.54)x(66.67\%)}{(100).(42.01\%)} \times 100\% = 28.91\%$$

b. Massa Limestone 18gr

$$\text{Recovery Fe} = \frac{(6.31)x(80.23\%) + (11.23)x(59.80\%)}{(100).(42.01\%)} \times 100\% = 26.57\%$$

c. Massa Limestone 20gr

$$\text{Recovery Fe} = \frac{(6.92)x(71.91\%) + (9.83)x(38.22\%)}{(100).(42.01\%)} \times 100\% = 20.79\%$$

d. Massa Limestone 22gr

$$\text{Recovery Fe} = \frac{(5.25)x(52.95\%) + (12.45)x(41.05\%)}{(100).(42.01\%)} \times 100\% = 18.78\%$$

e. Massa Limestone 24gr

$$\text{Recovery Fe} = \frac{(8.65)x(53.98\%) + (4.23)x(51.46\%)}{(100).(42.01\%)} \times 100\% = 16.3\%$$

f. Massa Limestone 26gr

$$\text{Recovery Fe} = \frac{(4.73)x(58.14\%) + (13.64)x(38.03\%)}{(100).(42.01\%)} \times 100\% = 18.89\%$$

F. Faktor Selektivitas

%Wt Fe ore	%Wt Ni logam	%Wt Ni ore	%Wt Fe logam
42.01%	6.12%	1.59%	87.58%
42.01%	10.71%	1.59%	80.23%
42.01%	11.30%	1.59%	71.91%
42.01%	18.75%	1.59%	52.95%
42.01%	14.82%	1.59%	53.98%
42.01%	12.72%	1.59%	58.14%

$$Selektivitas = \frac{(\% Fe\ awal) \times (\% Ni\ akhir)}{(\% Ni\ awal) \times (\% Fe\ akhir)}$$

a. Massa Limestone 16gr

$$Selektivitas = \frac{(42.01\%) \times (6.12\%)}{(1.59\%) \times (87.58\%)} = 1.84$$

b. Massa Limestone 18gr

$$Selektivitas = \frac{(42.01\%) \times (10.71\%)}{(1.59\%) \times (80.23\%)} = 3.53$$

c. Massa Limestone 20gr

$$Selektivitas = \frac{(42.01\%) \times (11.30\%)}{(1.59\%) \times (71.91\%)} = 4.15$$

d. Massa Limestone 22gr

$$Selektivitas = \frac{(42.01\%) \times (18.75\%)}{(1.59\%) \times (52.95\%)} = 9.36$$

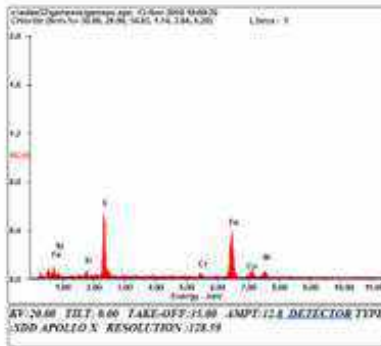
e. Massa Limestone 24gr

$$Selektivitas = \frac{(42.01\%) \times (14.82\%)}{(1.59\%) \times (53.98\%)} = 7.25$$

f. Massa Limestone 26gr

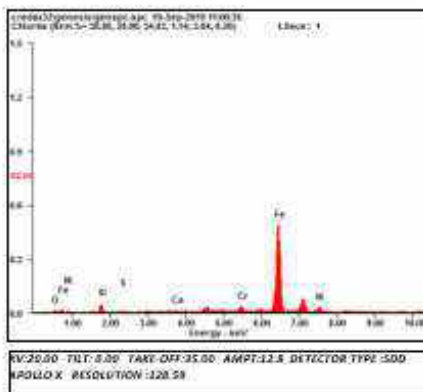
$$\begin{aligned} \textit{Selektivitas} &= \frac{(42.01\%)x(12.72\%)}{(1.59\%)x(58.14\%)} \\ &= 5.78 \end{aligned}$$

G. Hasil Pengujian EDX



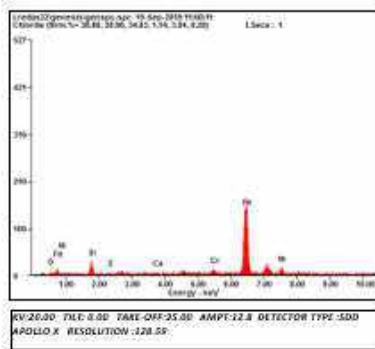
Element	Wt %	At %
SiK	02.02	03.40
S K	22.40	33.04
CrK	02.66	02.42
FeK	58.14	49.24
CoK	02.06	01.66
NiK	12.72	10.24

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC TABLE -DEFAULT



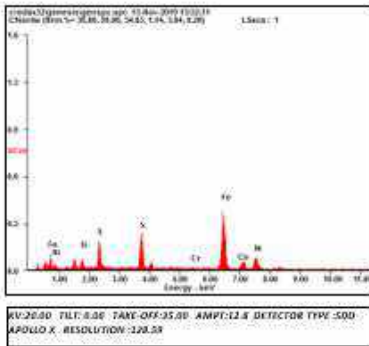
Element	Wt %	At %
O K	00.37	01.25
SiK	02.76	05.29
S K	00.29	00.49
CaK	00.30	00.40
CrK	02.58	02.67
FeK	87.58	84.30
NiK	06.12	05.60

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC TABLE -DEFAULT



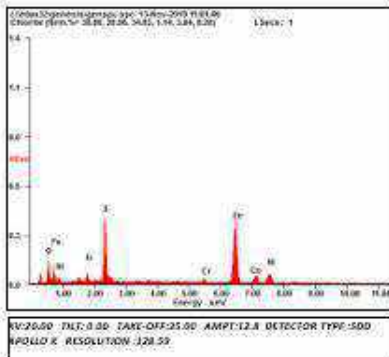
Element	Wt %	At %
O	00.91	02.97
Si	03.03	09.33
S	00.15	00.24
Ca	00.68	00.89
Cr	02.28	02.28
Fe	80.23	74.79
Ni	10.71	09.50

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC TABLE: DEFAULT



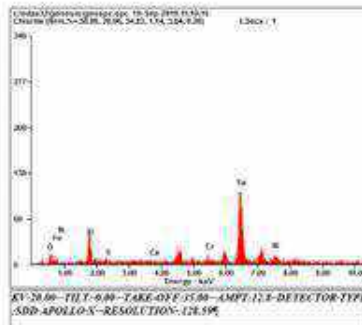
Element	Wt %	At %
Si	03.78	06.61
S	07.34	11.25
Ca	14.02	17.18
Cr	00.72	00.68
Fe	52.95	46.37
Ni	02.44	02.03
Ni	18.75	15.68

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC TABLE: DEFAULT



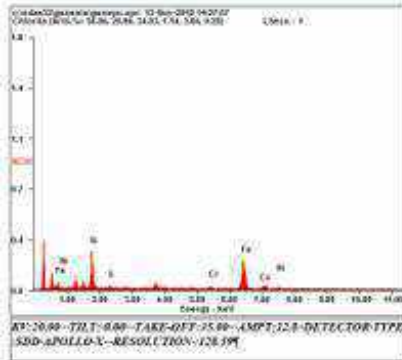
Element	Wt.%	At.%
O	09.04	23.20
Si	02.50	03.65
S	15.87	20.31
Cr	02.00	01.58
Fe	53.98	39.66
Co	01.79	01.24
Ni	14.82	10.36

EDAX ZAF QUANTIFICATION - STANDARDLESS SEC TABLE - DEFAULT



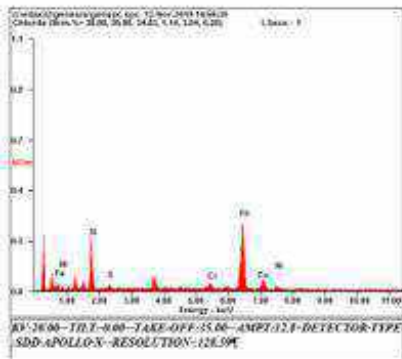
Element	Wt.%	At.%
O	02.51	07.49
Si	09.99	17.01
S	00.78	01.17
Ca	01.02	01.21
Cr	02.59	02.30
Fe	71.91	61.60
Ni	11.30	09.21

EDAX ZAF QUANTIFICATION - STANDARDLESS SEC TABLE - DEFAULT



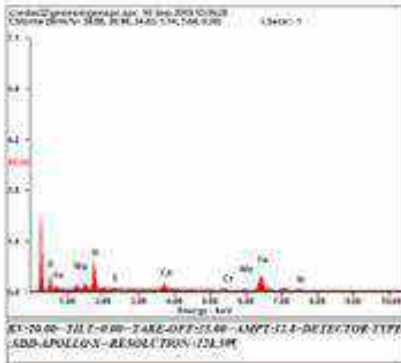
Elemento	Wt.%	At.%
-SiKα	24.57%	39.00%
-SKα	01.72%	02.40%
-CrKα	03.14%	02.70%
-FeKα	59.80%	47.74%
-CoKα	04.59%	03.48%
-NiKα	06.17%	04.69%

EDX ZAF QUANTIFICATION - STANDARDLESS-SEC
TABLE - DEFAULT



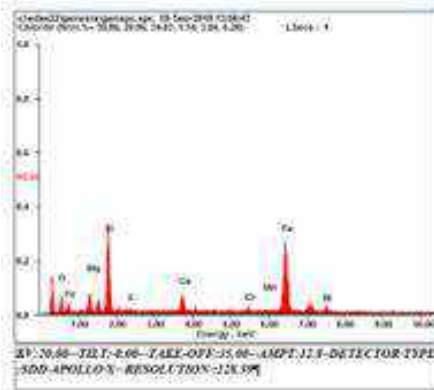
Elemento	Wt.%	At.%
-SiKα	17.02%	28.75%
-SKα	01.59%	02.35%
-CrKα	03.38%	03.08%
-FeKα	66.67%	56.65%
-CoKα	03.77%	03.04%
-NiKα	07.57%	06.12%

EDX ZAF QUANTIFICATION - STANDARDLESS-SEC
TABLE - DEFAULT



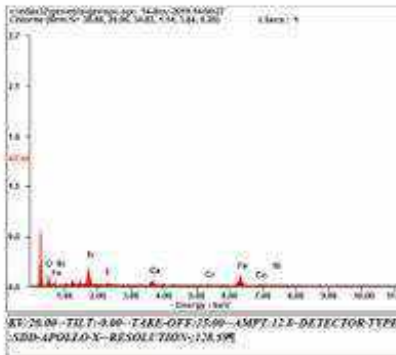
Element	Wt-%	At-%
O Kα	19.59	38.33
Mg Kα	05.83	07.51
Si Kα	19.79	22.04
S Kα	00.64	00.63
Ca Kα	05.49	04.29
Cr Kα	01.95	01.17
Mn Kα	00.88	00.50
Fe Kα	41.05	23.00
Ni Kα	04.78	02.55

EDS-CAF QUANTIFICATION- STANDARDLESS-SEC-TABLE-DEFAULT



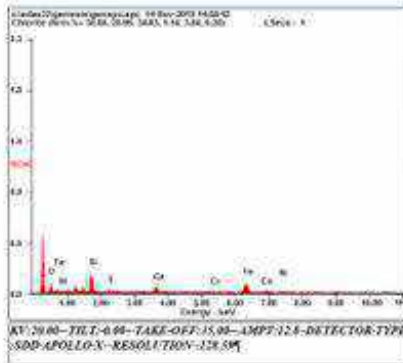
Element	Wt-%	At-%
O Kα	07.51	17.77
Mg Kα	06.10	09.51
Si Kα	18.89	25.48
S Kα	00.51	00.60
Ca Kα	04.67	04.42
Cr Kα	02.56	01.86
Mn Kα	02.03	01.40
Fe Kα	51.46	34.91
Ni Kα	06.27	04.05

EDS-CAF QUANTIFICATION- STANDARDLESS-SEC-TABLE-DEFAULT



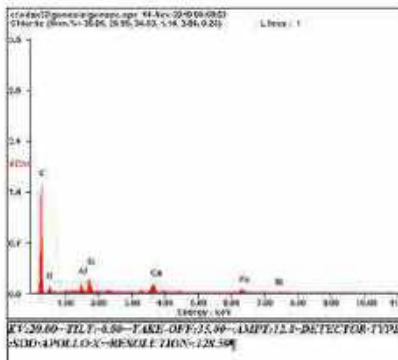
Elemento	Wt.%	At.%
O-K	23.17	44.25
Si-K	20.38	22.17
S-K	02.80	02.67
Ca-K	07.62	05.81
Cr-K	01.92	01.13
Fe-K	38.22	20.91
Co-K	01.39	00.72
Ni-K	04.50	02.34

EDS ZAF QUANTIFICATION—STANDARDLESS—SEC
TABLE—DEFAULTS



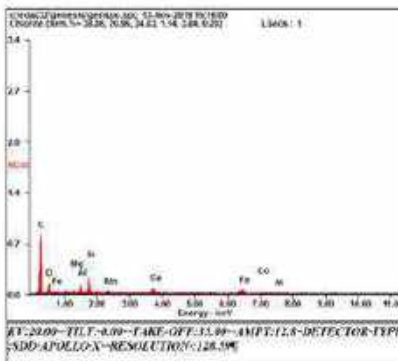
Elemento	Wt.%	At.%
O-K	20.92	40.98
Si-K	21.56	24.05
S-K	01.85	01.81
Ca-K	09.09	07.11
Cr-K	02.35	01.42
Fe-K	38.03	21.34
Co-K	02.70	01.43
Ni-K	03.50	01.87

EDS ZAF QUANTIFICATION—STANDARDLESS—SEC
TABLE—DEFAULTS



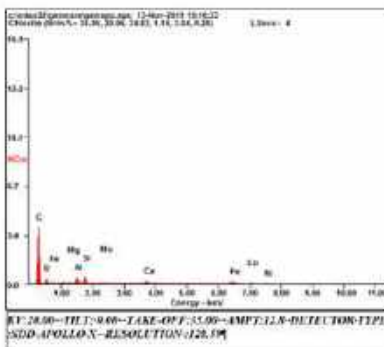
Element	Wt-%	At-%
C-K	70.15	82.98
O-K	10.68	09.48
Al-K	03.33	01.76
Si-K	05.02	02.54
Ca-K	04.94	01.75
Fe-K	04.93	01.25
Ni-K	00.95	00.23

EDAXAP-01 ANTIFERATION-STDANDARDLESS-SEC-TABLE-DEF-ULY1



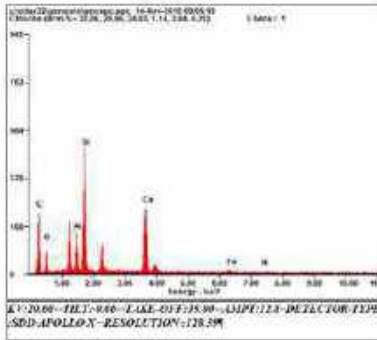
Element	Wt-%	At-%
C-K	54.36	70.88
O-K	18.04	17.67
Mg-K	01.41	00.91
Al-K	03.85	02.23
Si-K	06.75	03.77
Mo-L	01.78	00.29
Ca-K	03.59	01.40
Fe-K	08.97	02.52
Co-K	00.60	00.16
Ni-K	00.63	00.17

EDAXAP-02 ANTIFERATION-STDANDARDLESS-SEC-TABLE-DEF-ULY1



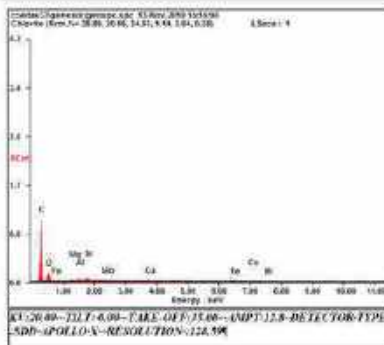
Element	Wt-%	At-%
C-K	65.68	79.14
O-K	14.47	13.09
Mg-K	00.99	00.59
Al-K	03.94	02.11
Si-K	04.48	02.31
Mo-L	01.65	00.25
Ca-K	02.46	00.89
Fe-K	05.20	01.35
Co-K	00.40	00.10
Ni-K	00.74	00.18

EDAXAP-03 QUANTIFICATION-STDANDARDLESS-SEC-TABLE-DEF-ULY1



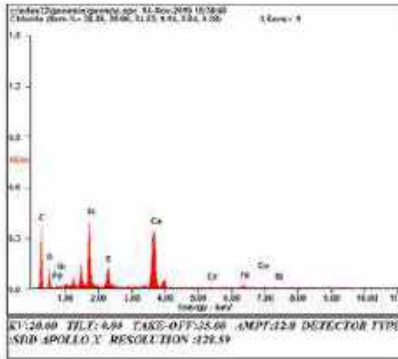
Element	Wt.%	At.%
C	29.73	46.97
O	20.59	24.43
Al	05.25	03.69
Si	21.13	14.28
Ca	20.36	09.64
Fe	02.20	00.75
Ni	00.74	00.24

EDAX EAF QUANTIFICATION - STANDARDLESS-SEC-TABLE - DEFAULT



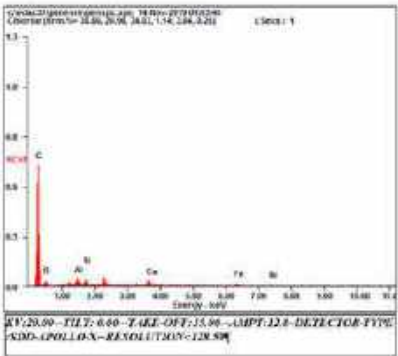
Element	Wt.%	At.%
C	63.15	73.19
O	26.45	23.02
Mg	00.60	00.34
Al	01.42	00.73
Si	02.43	01.20
Mn	01.17	00.17
Ca	01.77	00.61
Fe	01.69	00.42
Co	00.50	00.12
Ni	00.82	00.19

EDAX EAF QUANTIFICATION - STANDARDLESS-SEC-TABLE - DEFAULT



Element	Wt %	At %
C K	14.92	53.44
O K	20.43	23.47
Si K	13.30	08.70
S K	04.68	02.68
Ca K	22.70	10.41
Cr K	00.39	00.14
Fe K	02.34	00.77
Co K	00.39	00.12
Ni K	00.86	00.27

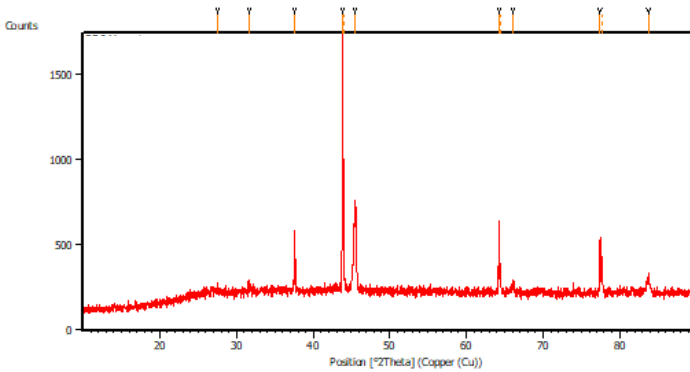
EDS ZAF QUANTIFICATION- STANDARDLESS-SEC TABLE-DEFAULT



Element	Wt %	At %
C K	74.97	85.21
O K	11.26	09.61
Al K	02.88	01.46
Si K	02.56	01.24
Ca K	04.68	01.60
Fe K	03.12	00.76
Ni K	00.53	00.12

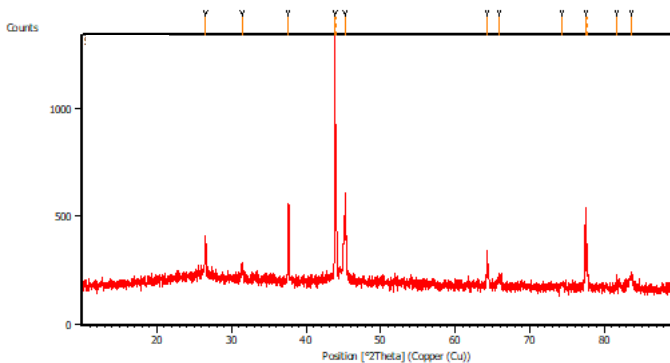
EDS ZAF QUANTIFICATION- STANDARDLESS-SEC TABLE-DEFAULT

H. Hasil Pengujian XRD



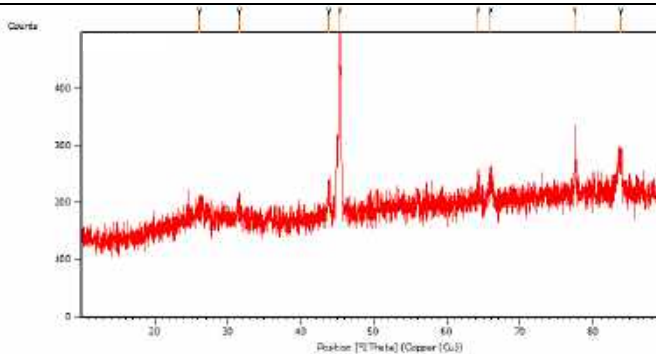
Peak List: (Bookmark: 3)

Pos. [$^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
26.5143	36.64	0.2007	3.24185	2.43
35.6270	45.17	0.2676	2.82906	3.00
37.5533	361.99	0.0669	2.39511	24.01
43.4223	1507.87	0.0816	2.06421	100.00
43.9502	733.57	0.0612	2.06362	48.65
44.4667	489.74	0.0816	1.99331	32.48
64.4886	420.28	0.0816	1.44779	27.87
64.5750	169.58	0.1020	1.44764	11.25
66.1635	51.51	0.4896	1.41123	3.42
78.0692	310.71	0.1020	1.23107	20.61
77.7147	208.90	0.0612	1.23085	13.85
82.3242	68.04	0.4080	1.15428	4.51



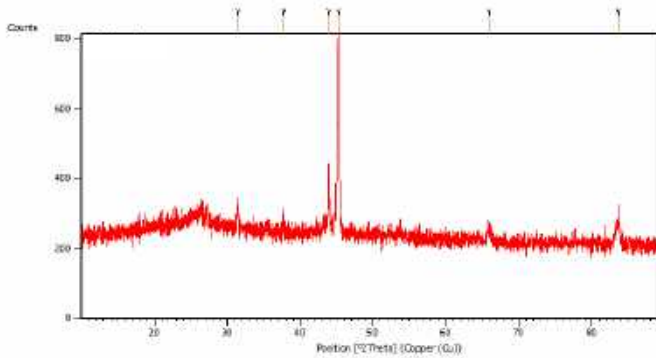
Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2 θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2 θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
26.5151	169.33	0.0836	3.36171	15.00
32.6023	57.10	0.2007	2.84878	5.06
39.2259	355.47	0.0836	2.39066	31.49
43.8860	1128.91	0.1020	2.06136	100.00
44.0141	591.85	0.0612	2.06077	32.43
45.2145	365.58	0.1836	2.00383	32.38
64.3216	161.13	0.1020	1.44712	14.27
65.9254	38.99	0.4896	1.41575	3.45
74.3402	13.00	0.3264	1.27494	1.15
77.5011	368.47	0.0816	1.23065	32.64
77.7338	201.98	0.1020	1.23059	17.89
81.7249	49.86	0.1224	1.17739	4.42
83.6640	63.16	0.4896	1.15496	5.59



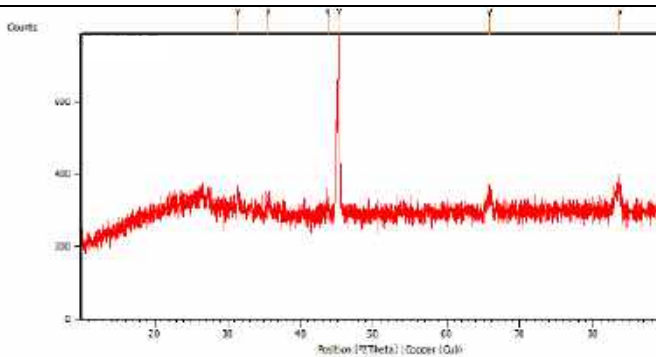
Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2 θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2 θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
26.4039	30.29	0.1004	3.41373	9.60
30.5628	21.00	0.4015	2.83466	6.65
41.5487	43.22	0.2007	2.06474	13.70
44.5463	315.54	0.1338	1.99997	100.00
44.5913	50.19	0.1004	1.44893	15.91
64.6594	35.77	0.4015	1.41627	11.34
65.0936	108.03	0.1020	1.23075	34.24
85.7921	63.83	0.4015	1.15448	20.23



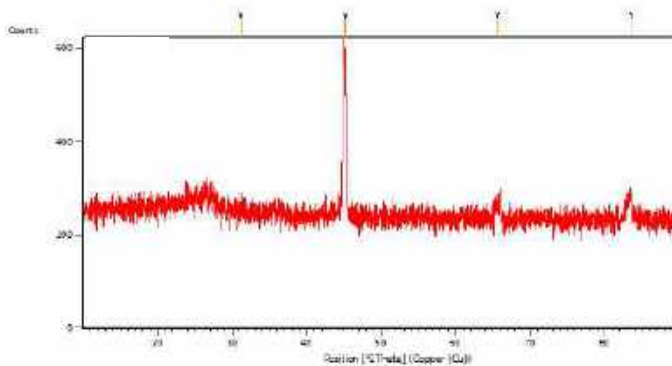
Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
26.4225	67.68	0.2342	2.84700	12.87
32.7318	32.50	0.4015	2.38419	6.18
41.5718	196.36	0.0612	2.06200	37.35
44.5881	525.75	0.0836	2.00241	100.00
64.6201	-41.87	0.5353	1.41702	7.96
85.7520	87.79	0.2676	1.15605	16.70



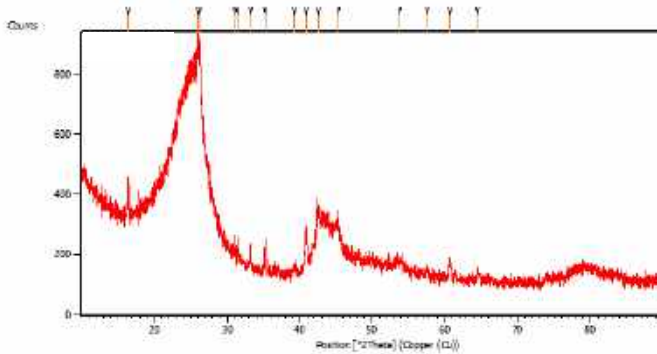
Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
26.4682	49.07	0.2007	2.84297	10.33
32.6869	15.30	0.5353	2.52969	3.22
41.4766	29.81	0.4015	2.06797	6.23
43.4501	475.29	0.1171	2.00400	100.00
64.6837	42.15	0.5353	1.41772	8.87
85.7416	77.96	0.2342	1.15617	16.40



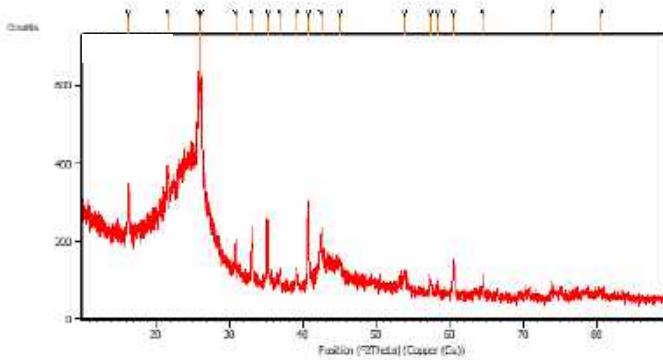
Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
32.6563	20.67	0.1004	2.87071	7.18
43.4868	288.02	0.4015	2.00666	100.00
44.6273	31.45	0.8029	1.42263	10.92
85.7090	51.79	0.2676	1.15767	17.98



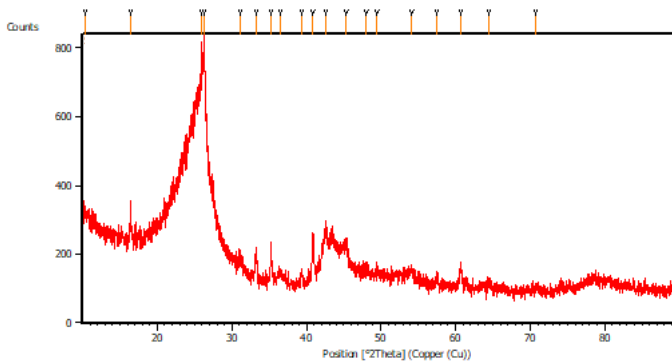
Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
17.4209	112.22	0.1673	5.39835	33.20
25.9765	321.98	0.1338	3.43018	95.27
26.6686	337.99	0.2007	3.39269	100.00
30.9954	36.23	0.2007	2.88525	10.72
31.3913	38.59	0.1004	2.84975	11.42
33.2315	71.33	0.2007	2.69603	21.10
35.7513	103.24	0.2007	2.54606	30.55
39.2838	21.68	0.4015	2.29350	6.42
40.8456	138.87	0.1338	2.20934	41.09
43.6261	184.87	0.2676	2.12584	54.70
46.9370	127.48	0.4684	2.00036	37.72
50.1630	19.47	0.8029	1.70506	5.76
57.5672	23.61	0.4015	1.60111	6.98
60.6430	56.20	0.1673	1.52706	16.63
65.7513	35.45	0.3346	1.44372	10.49



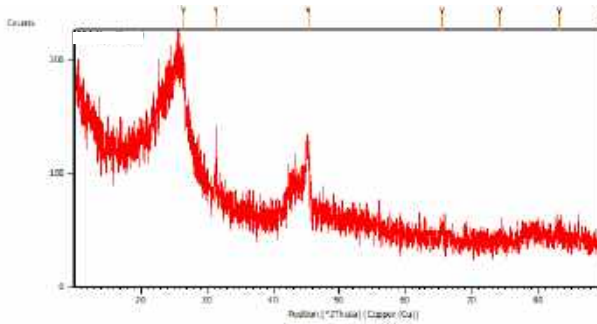
Peak List: (Bookmark: 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
17.4676	114.47	0.2007	5.44889	28.59
20.8772	72.79	0.2676	4.11837	18.18
25.8054	280.88	0.1338	3.43254	70.17
26.6319	400.31	0.1004	3.40737	100.00
31.3327	79.90	0.1171	2.89827	19.96
33.0672	127.10	0.2007	2.70906	31.73
35.1887	155.72	0.1171	2.55044	38.90
36.8379	39.01	0.2007	2.43996	9.75
39.1905	42.93	0.2676	2.29874	10.73
40.0296	184.34	0.1171	2.21536	46.05
43.6778	118.29	0.1338	2.12815	29.55
48.6609	46.59	0.3346	2.01197	11.64
50.1984	43.36	0.3346	1.69818	10.83
57.4347	36.77	0.2676	1.60448	9.18
58.3478	16.48	0.3346	1.58153	4.12
62.4337	87.85	0.2342	1.52909	21.93
65.7374	44.83	0.1004	1.44600	11.20
73.9377	19.47	0.2007	1.28165	4.86
80.6377	8.53	0.8029	1.19148	2.13



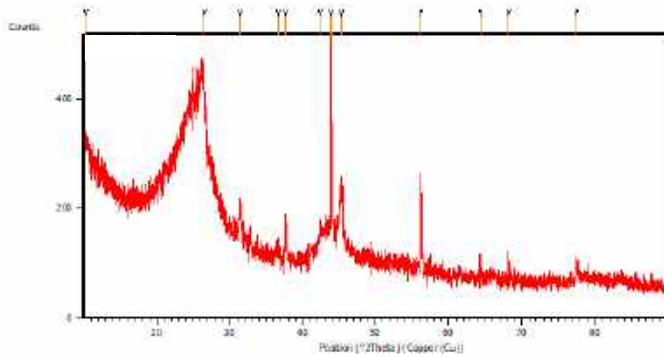
Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.2740	46.01	0.6691	8.61023	10.97
17.4399	103.82	0.1171	5.39218	24.75
25.9517	352.47	0.1338	3.43340	84.04
26.6620	419.40	0.1004	3.39353	100.00
31.0319	40.50	0.1673	2.88194	9.66
33.1950	88.61	0.1004	2.69892	21.13
35.2342	111.90	0.0836	2.54725	26.68
36.8261	28.90	0.5353	2.46659	6.89
39.7430	33.26	0.1673	2.29018	7.93
40.8534	139.42	0.2007	2.20893	33.24
43.7326	155.24	0.3346	2.12553	37.01
46.9204	111.61	0.2676	2.00105	26.61
48.0754	25.29	0.6691	1.89262	6.03
49.5215	25.26	0.4015	1.84069	6.02
50.1472	27.24	0.4015	1.69386	6.49
57.4847	30.86	0.2676	1.60321	7.36
62.9972	69.54	0.1673	1.52582	16.58
65.7464	22.55	0.2676	1.44382	5.38
70.7797	10.10	0.8029	1.33118	2.41



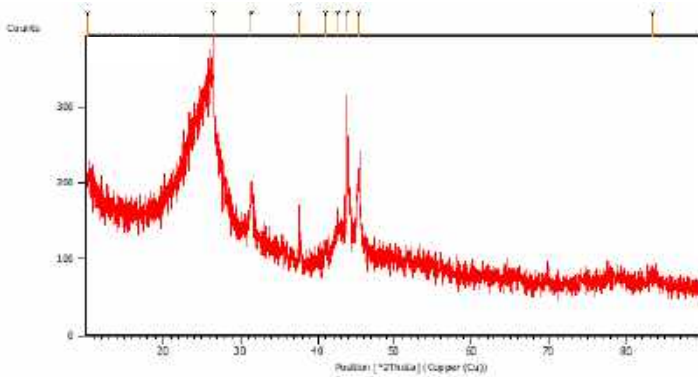
▲ **Peak List:** (Bookmark 3)

Pos. [°2 θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2 θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
26.6549	40.82	0.8029	3.38178	67.04
31.3749	60.59	0.0816	2.85121	100.00
43.7433	48.31	0.4015	2.00429	79.74
65.5430	8.21	0.6691	1.42426	13.55
74.2747	6.60	0.8029	1.27666	10.90
83.2504	6.91	0.9368	1.16060	11.41
89.4804	3.64	0.2342	1.09525	6.01



Peak List: (Bookmark 3)

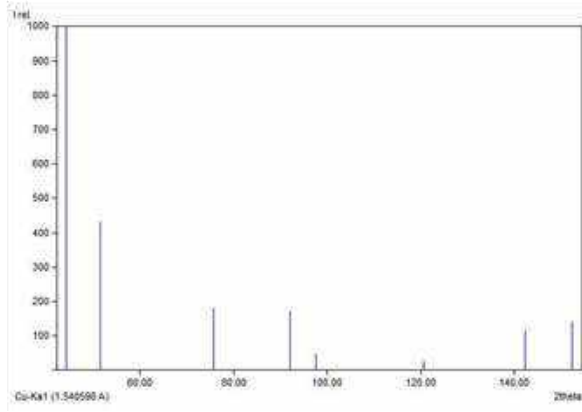
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.2953	54.69	0.8029	8.59249	13.90
26.6856	119.35	0.2007	3.36540	30.33
31.3350	57.01	0.2342	2.84590	14.49
36.5761	14.59	0.5353	2.45682	3.71
39.7683	57.86	0.1338	2.38806	14.70
42.4047	41.77	0.4015	2.13165	10.61
43.8860	393.50	0.0816	2.06137	100.00
44.0089	223.20	0.0612	2.06100	56.72
48.6366	112.40	0.3264	2.00291	28.56
56.1968	175.26	0.0816	1.63550	44.54
64.2998	13.09	0.4896	1.44756	3.33
68.1947	37.15	0.0612	1.37406	9.44
77.4854	37.80	0.1224	1.23085	9.61



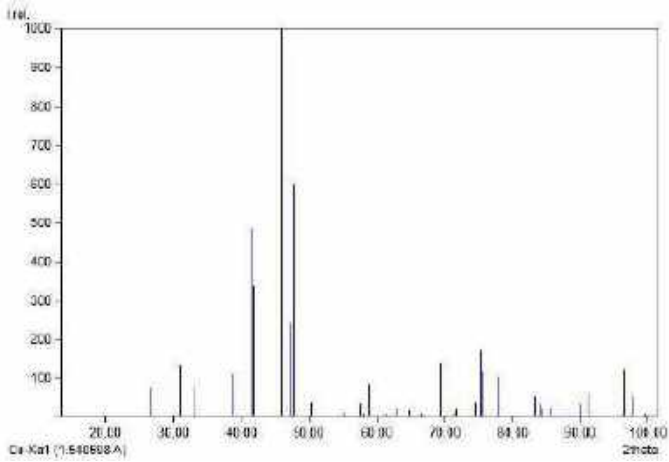
Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.2432	31.00	0.6691	8.63605	14.36
26.5921	116.48	0.5353	3.36458	53.95
31.3820	56.16	0.2676	2.84176	26.01
39.7334	74.89	0.0502	2.39020	34.69
41.0712	21.57	0.4015	2.19772	9.99
42.6008	44.03	0.5353	2.12228	20.39
43.8627	215.91	0.0836	2.06412	100.00
48.6338	104.79	0.2676	2.00030	48.54
83.4145	8.40	0.8029	1.15874	3.89

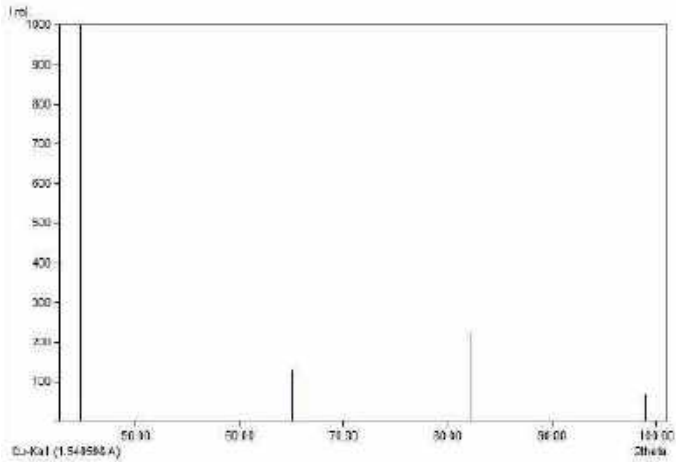
• **Nikel**



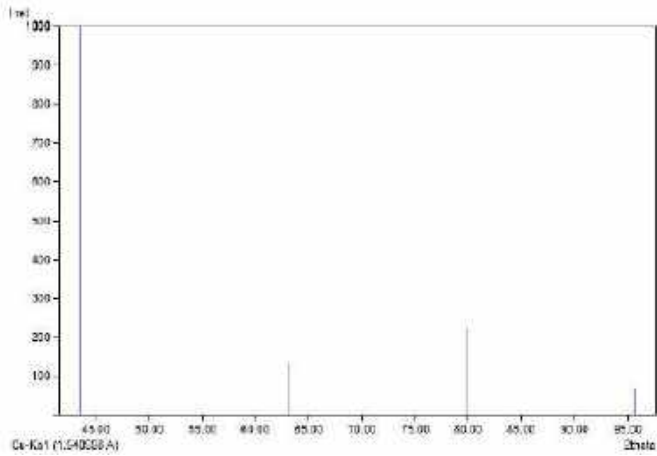
- **Xifengite**



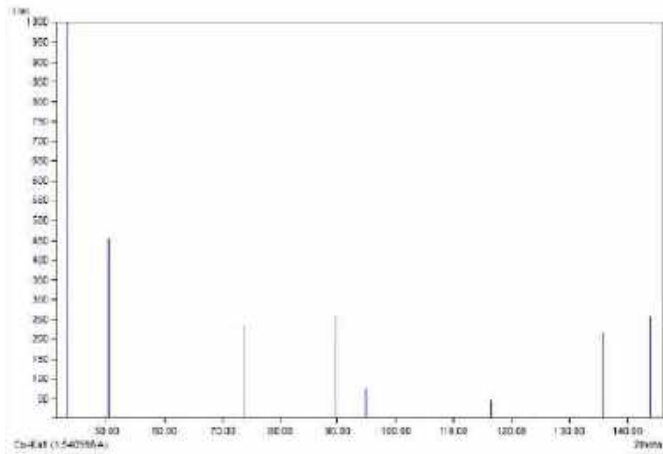
- **Nickel Iron**



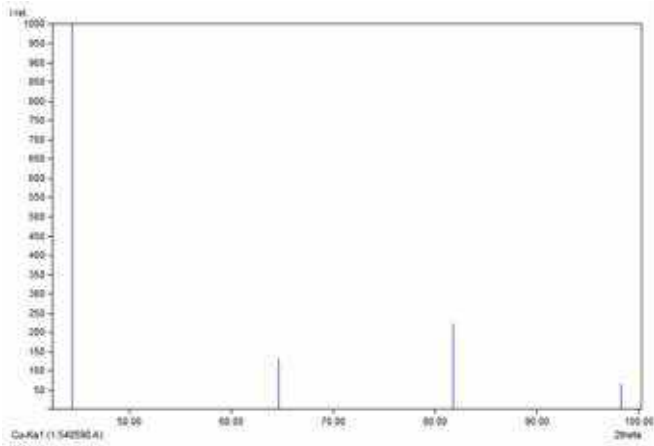
- **Iron**



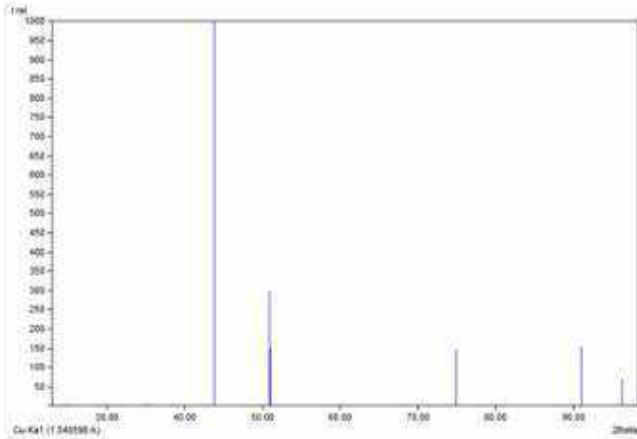
- **Iron**



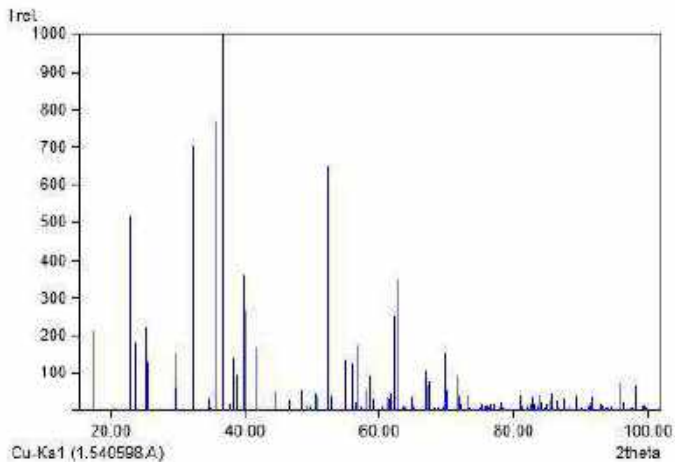
- **Iron**



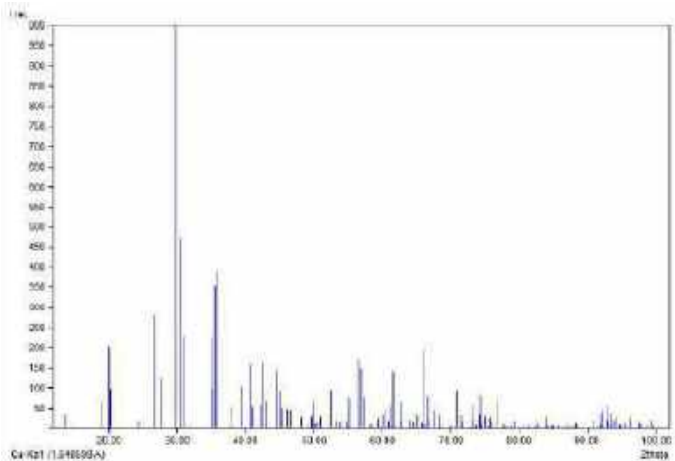
- **Nickel Iron**



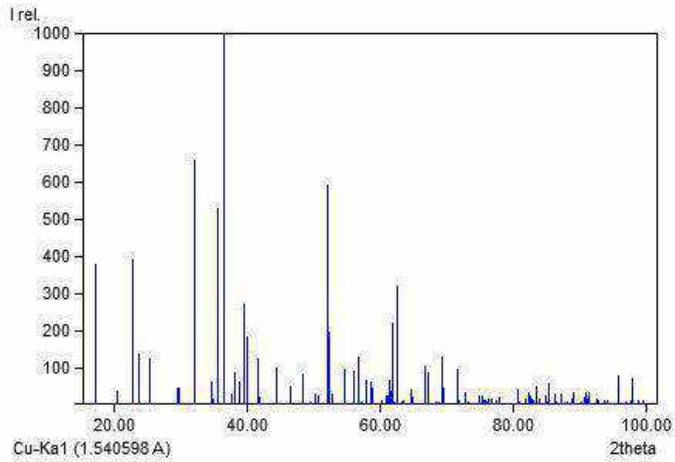
- **Forsterite**



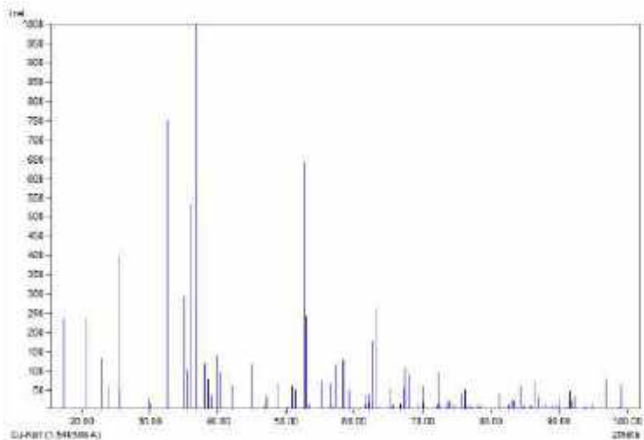
- **Diopside**



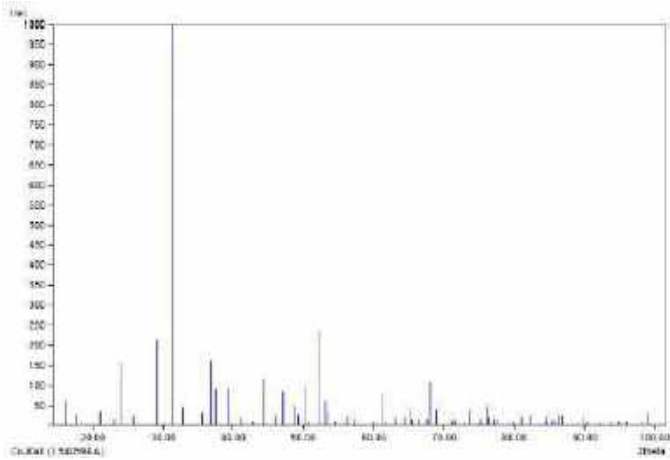
- **Olivine**



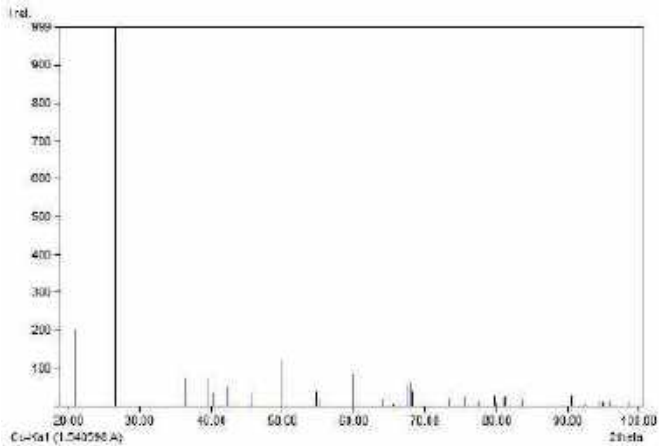
- **Olivine**



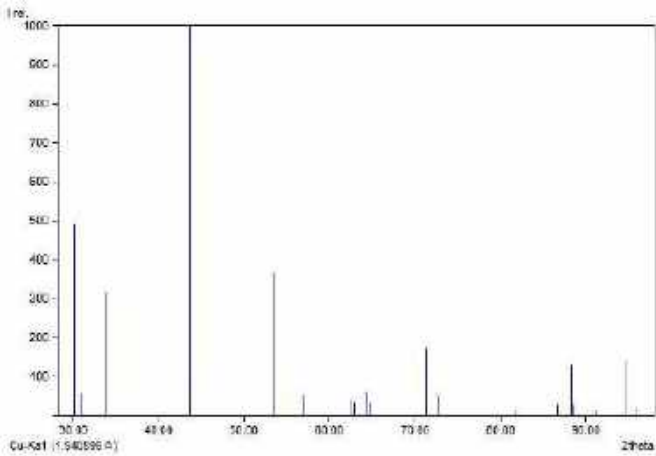
- **Gehlenite**



- **Quartz**



- **Iron Sulfide**



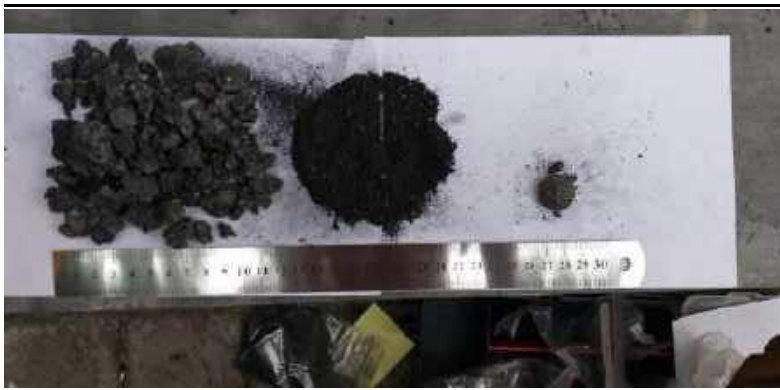
I. Dokumentasi Penelitian

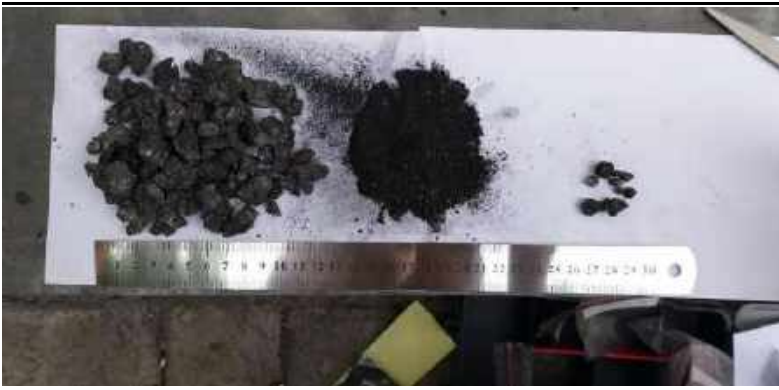












(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis curahkan kepada segenap pihak yang turut serta mendukung dan membantu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Variasi Massa Limestone terhadap Kadar Serta Recovery Ni Dan Fe, Dalam Proses Reduksi Langsung Bijih Nikel Laterit Menggunakan Reaktor Bed Batu Bara-Limestone”. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan studi. Dengan selesainya Laporan Tugas Akhir, ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada:

1. Allah SWT berkat rahmat, barokah, pertolongan dan bimbinganNya penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua, kakak, serta adik penulis yang selalu mendukung dan senantiasa mendoakan penulis agar bersemangat serta menjadi pribadi yang jauh lebih baik lagi.
3. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T, M. Eng selaku ketua Departemen Teknik Material
4. Bapak Sungging Pintowantoro, Ph.D selaku Dosen Pembimbing dan Ketua Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material yang telah banyak memberikan arahan dan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
5. Bapak Fakhreza Abdul, S.T. M.T selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk bimbingan, ilmu dan masukan mengenai Tugas akhir dan hal lain.
6. Ir. Mohammad Farid, DEA selaku dosen wali penulis yang senantiasa memberikan arahan selama masa perkuliahan.
7. Teman-teman Tugas Akhir Ekstraksi, Tetty, Kevin, Henokh, Satrio, Vito, Aim, Rizky, Iqbal, Erick, Afni, Najib, dan Naufal Fir.
8. Teman-teman Angkatan Teknik Material 2016 dan MT18 yang tidak bisa saya sebut satu persatu, terima kasih banyak atas bantuan dan kasih sayang yang diberikan kepada saya selama berkuliah di ITS.

-
9. Teman-teman fungsi serta staff Departemen Media dan Informasi HMMT FTI-ITS 18/19, yang telah mengajarkan banyak tentang kebersamaan dan keikhlasan.
 10. Teman-teman Ciwi MT18 terutama Mirfa, Ria, Rosa, dan Siti yang senantiasa menemani dan menghibur penulis.

Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pembaca. Adapun penulis meminta maaf apabila ada kesalahan.

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Jombang 13 Maret 1999, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh Pendidikan dasar di SD Islam Roushon Fikr Jombang, kemudian lanjut ke jenjang menengah SMPN 2 Jombang, dan lanjut ke pendidikan jenjang atas di SMA Darul Ulum 2 Unggulan BPPT CIS ID-113 Jombang. Lalu, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Teknik Material dan

Metalurgi FTI-ITS. Selama menempuh aktivitas perkuliahan, penulis tercatat aktif dalam keorganisasian baik di tingkat himpunan dan Institut. Penulis tercatat sebagai Staff HMMT FTI-ITS 17/18, Staff ITS MUN Club 17/18, dan Staff ITS Material Advantage Chapter. Kemudian penulis juga mengemban amanah sebagai Ketua Departemen Media dan Informasi HMMT FTI-ITS 18/19. Selain itu, penulis juga aktif mengikuti berbagai kepanitiaan, pelatihan, serta lomba tingkat nasional maupun internasional. Penulis tercatat aktif sebagai Pemandu LKMM Pra TD dan TD, juga *awardee* dari Djarum Beasiswa Plus (Beswan Djarum Angkatan 34) dan turut serta mengikuti *Character Building, Leadership Development, dan Nation Building*. Selain itu, penulis juga merupakan perwakilan terpilih dari ITS pada Nanyang Technological University MUN 2018 di Singapura dan Japan English University MUN 2018 di Jepang. Selain itu, penulis juga menjadi perwakilan regional dalam *Writing Competition* yang diadakan oleh Djarum Beasiswa Plus. Penulis juga melalui *On Job Training* di PT. GMF Aeroasia Tbk pada Januari-Februari 2019 dengan judul “Simulasi Modifikasi Desain *Track-Tiedown* Pada Struktur Lantai Pesawat Kargo Boeing 737-800 Di PT. GMF Aeroasia Tbk.” Tugas akhir yang diambil penulis yaitu dalam bidang metalurgi ekstraksi dengan judul “Analisis Pengaruh

Variasi Massa Limestone terhadap Kadar Serta Recovery Ni Dan Fe, Dalam Proses Reduksi Langsung Bijih Nikel Laterit Menggunakan Reaktor Bed Batu Bara-Limestone”. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: safirafirdausi13@gmail.com.