



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 141584

REDUKSI LANGSUNG BIJIH NIKEL LATERIT LIMONITIK DENGAN VARIASI RASIO BATU BARA DAN DOLOMIT PADA REAKTOR *BED* BATU BARA-DOLOMIT

Anisya Purnamasari

NRP 0251144000024

Dosen Pembimbing

Sungging Pintowantoro, Ph.D.

Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

Departemen Teknik Material

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2018



TUGAS AKHIR - TL141584

REDUKSI LANGSUNG BIJIH NIKEL LATERIT LIMONITIK DENGAN VARIASI RASIO BATU BARA DAN DOLOMIT PADA REAKTOR *BED* BATU BARA-DOLOMIT

Anisya Purnamasari
NRP 0251144000024

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

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

DIRECT REDUCTION OF NICKEL LATERITE LIMONITIC ORE WITH THE VARIATION OF RATIO COAL AND DOLOMITES IN COAL- DOLOMITES BED REACTOR

Anisya Purnamasari
NRP 0251144000024

Advisor :
Sungging Pintowantoro, Ph.D.
Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF MATERIAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya
2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**REDUKSI LANGSUNG BIJIH NIKEL LATERIT
LIMONITIK DENGAN VARIASI RASIO BATU BARA
DAN DOLOMIT PADA REAKTOR *BED* BATU BARA-
DOLOMIT**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Metalurgi Ekstraksi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ANISYA PURNEMASARI
NRP. 0251144000024

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :
Sungging Pintowantoro, Ph.D (Pembimbing I)
Fakhreza Abdul S.T., M.T. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

REDUKSI LANGSUNG BIJIH NIKEL LATERIT LIMONITIK DENGAN VARIASI RASIO BATU BARA DAN DOLOMIT PADA REAKTOR *BED* BATU BARA-DOLOMIT

Nama Mahasiswa : Anisya Purnamasari
NRP : 02511440000024
Departemen : Teknik Material
Dosen Pembimbing I : Sungging Pintowantoro, Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

ABSTRAK

Cadangan nikel sulfida yang terus menipis menyebabkan pengembangan pengolahan pada jenis laterit diperlukan guna memenuhi kebutuhan. Pengolahan nikel laterit menggunakan gas CO sebagai pereduksi pada reduksi langsung terbukti efektif. Penelitian ini dilakukan dengan mereduksi bijih nikel laterit limonitik dengan kadar Ni 1,25%. Adapun pembuatan briket dengan campuran bijih nikel laterit limonitik, batu bara, Na₂SO₄ dan tepung tapioka yang nantinya dimasukkan ke dalam crucible bed bersama dengan penambahan batu bara dan dolomit (di luar briket) yang kemudian direduksi pada temperatur 1400°C dengan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,19; 1,48 dan 2,09. Pengujian EDX, XRD dan SEM dilakukan untuk mengetahui kadar Ni dan Fe hasil reduksi, fasa-fasa yang terbentuk dan morfologi pada hasil proses reduksi. Dari hasil reduksi didapatkan peningkatan kadar Ni tertinggi didapat dengan rasio 1,48 dengan peningkatan sebesar 11,49%, serta recovery Ni tertinggi diperoleh rasio 2,09 sebesar 99,10%. Sedangkan, peningkatan kadar Fe tertinggi sebesar 13,29% dari rasio 1,48 dan recovery Fe paling tinggi didapat dengan rasio 2,09 sebesar 14,24%.

Kata Kunci : Nikel Laterit Limonitik, Reduksi Langsung, Rasio Batu Bara/Dolomit, Kadar CO/CO₂

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DIRECT REDUCTION OF NICKEL LATERITE LIMONITIC ORE WITH THE VARIATION OF RATIO COAL AND DOLOMITES IN COAL- DOLOMITES BED REACTOR

Name : Anisya Purnamasari
NRP : 02511440000024
Department : Material Engineering
Advisor 1 : Sungging Pintowantoro, Ph.D
Advisor 2 : Fakhreza Abdul, S.T., M.T

ABSTRACT

Nickel sulfide reserves which keeps thinning causes the development of processing on this type of laterite required to meet needs. Nickel laterite processing using gas CO as reducing agent in the direct reduction proved effective. This research was conducted with the reduction of nickel laterite limonitic ores with 1.25% Ni. As for making briquettes with a mixed nickel laterite limonitic, coal, Na₂SO₄ and tapioca flour which was later incorporated into the crucible bed along with the addition of coal and dolomites (outside of briquettes) which is then reduced at temperatures 1400°C with variation ratio of coal and dolomite 1,19; 1,48 and 2,09. EDX test, XRD test and SEM test is carried out to find out the grade of Ni and Fe reduction results, phases that are formed and morphology on the results of the process of reduction. From the results obtained by the reduction of elevated grades of the highest Ni with ratio 1,48 with an increase of 11,49%, as well as the recovery of Ni highest ratio 2,09 with result 99,10%. Meanwhile, increased grades of Fe highest of 13,29% from the ratio 1,48 and recovery Fe highest gained with ratio 2,09 by 14,24%.

Keywords : *Nickel Laterite Limonitic, Direct Reduction, Ratio of Coal/Dolomite, Grades of CO/CO₂*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, tidak lupa shalawat serta salam penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis diberi kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir. Tugas Akhir ditujukan untuk memenuhi mata kuliah wajib yang harus diambil oleh mahasiswa Departemen Teknik Material Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), penulis telah menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “**Reduksi Langsung Bijih Nikel Laterit Limonitik Dengan Variasi Rasio Batu Bara Dan Dolomit Pada Reaktor *Bed* Batu Bara-Dolomit**”. Penulis ingin berterima kasih juga kepada :

1. Allah SWT atas karunia, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan lancar.
2. Kedua Orang Tua, yang telah mendukung secara moril maupun materil serta doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan, keselamatan dan kelancaran anaknya dalam menempuh studi.
3. Saudara penulis Utari Rachmawati A., Utami Rachmawati A., Fitria Sembayu A. dan Oktafianis Mudahatmadja yang telah memberikan doa, perhatian, dukungan, dan semangat dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI-ITS.
5. Bapak Sungging Pintowantoro, Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bekal yang sangat bermanfaat.
6. Bapak Fakhreza Abdul, S.T., M.T. selaku dosen Pembimbing 2 yang telah memberikan banyak ilmu.
7. Bapak Dr. Sigit Tri Wicaksono, S.Si, M.Si. Selaku dosen wali yang sangat mengayomi.
8. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material FTI-ITS.

9. Sahabat-sahabat terbaik saya Thalyta Rizkha Pradipta, Zahra Luthfiah Setiawan, Prita Meilyvia Devalini, Annisa Nur Amalia dan Clarissa Changraini yang selalu memberikan canda dan tawa baik suka maupun duka.
10. Sahabat yang selalu ada Qithrin Labiba, Heru Fatkhurohmat, Dedi Setiawan dan Shochibul Ma'arif.
11. Teman-teman Lab. Pengolahan Material yang telah membantu tugas akhir saya selama 1 semester khususnya kepada Prita, Tommi, Luki, Abrar, Treshna, Isrouf, Habiyoso, Opik dan Hendy yang sudah banyak memberi saran serta ilmu untuk tugas akhir saya.
12. Kakak Tingkat Lab. Pengolahan Material yang telah membantu tugas akhir saya selama 1 semester khususnya kepada Mas Ridwan, Mas Adin, Mas Bima dan Mas Hamzah yang sudah memberikan banyak saran serta ilmu untuk tugas akhir saya.
13. Keluarga MT 16 yang banyak memberikan saya pengalaman berharga selama di Departemen Teknik Material.
14. Dan seluruh pihak yang telah memberikan partisipasi dalam tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan laporan ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik yang membangun dari pembaca demi perbaikan dan kemajuan bersama.

Surabaya, 22 Desember 2017

Penulis,
Anisya Purnamasari

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Reaktor <i>Bed</i>	7
2.2 Bijih Nikel	8
2.3 Bijih Nikel Laterit	9
2.4 Proses Pengolahan Bijih Nikel Laterit	14
2.5 Batu Bara	16
2.6 Dolomit	17
2.7 <i>Selective Agent</i>	19
2.8 Aglomerasi Nikel Laterit Limonitik	20
2.9 Reduksi Nikel Laterit Limonitik	22
2.10 Termodinamika Reduksi Nikel Laterit Limonitik	26
2.11 Kinetika Reduksi <i>Ore</i>	30
2.12 Kajian Penelitian Sebelumnya	32

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian	37
-----------------------------------	----

3.2	Bahan Penelitian	39
3.3	Peralatan Penelitian	42
3.4	Pelaksanaan Penelitian	48
3.5	Pengujian Penelitian	50
3.6	Neraca Massa Briket Nikel Laterit Limonitik	56
3.7	Rancangan Penelitian	59

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1	Karakterisasi <i>Raw Material</i>	61
4.2	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Fe dan Ni pada Produk Hasil Proses Reduksi.....	66
4.3	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap <i>Recovery</i> dari Unsur Fe dan Ni pada Produk Hasil Proses Reduksi	75
4.4	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Faktor Selektivitas Hasil Produk Hasil Proses Reduksi	81
4.5	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Produk Hasil Proses Reduksi	83
4.6	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Fe dan Ni serta Fasa yang Terbentuk pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi	87
4.7	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Morfologi pada Produk Hasil Proses Reduksi	94

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	97
5.2	Saran	97

DAFTAR PUSTAKA xxiii
LAMPIRAN
BIODATA PENULIS

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	<i>Fluidized Bed Reactor</i>	7
Gambar 2.2.	Perbandingan Antara Bijih Nikel Sulfida dan laterit	9
Gambar 2.3.	Distribusi Pesebaran Bijih Nikel Laterit di Dunia Berdasarkan Jumlah Kandungan Nikelnya	10
Gambar 2.4.	Profil Laterit pada Daerah Beriklim Kering dan Lembab	11
Gambar 2.5.	Profil Nikel Laterit	12
Gambar 2.6.	Diagram Ekstraksi Nikel Laterit	14
Gambar 2.7.	Batu Bara	17
Gambar 2.8.	Dolomit.....	19
Gambar 2.9.	Natrium Sulfat.....	20
Gambar 2.10.	Bentuk Briket	21
Gambar 2.11.	Diagram <i>Boudouard</i>	23
Gambar 2.12.	Diagram <i>Ellingham</i>	27
Gambar 2.13.	Garis Besar Mekanisme Reduksi untuk Mineral Berpori.....	31
Gambar 2.14.	Diagram Keseimbangan Fe-Ni-O untuk <i>Goethite</i> yang mengandung 1,2% Ni	36
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian	38
Gambar 3.2.	Bijih Nikel Laterit Limonitik	39
Gambar 3.3.	Batu Bara	40
Gambar 3.4.	Dolomit.....	40
Gambar 3.5.	Natrium Sulfat	41
Gambar 3.6.	Tepung Tapioka	41
Gambar 3.7.	LPG.....	42
Gambar 3.8.	Alat Kompaksi	43
Gambar 3.9.	<i>Muffle Furnace</i>	44
Gambar 3.10.	<i>Crucible</i>	44
Gambar 3.11.	Timbangan Digital	45

Gambar 3.12.	Ayakan.....	46
Gambar 3.13.	<i>Thermocouple</i>	46
Gambar 3.14.	<i>Blower</i>	47
Gambar 3.15.	<i>Oven</i>	47
Gambar 3.16.	Skematik Posisi Briket di Dalam <i>Crucible</i>	49
Gambar 3.17.	XRD <i>PAN Analytical</i>	51
Gambar 3.18.	SEM-EDX.....	52
Gambar 4.1.	Hasil Pengujian XRD Bijih Nikel Laterit Limonitik	62
Gambar 4.2.	Hasil Pengujian XRD Dolomit	66
Gambar 4.3.	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Ni pada Produk Hasil Proses Reduksi	68
Gambar 4.4.	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Fe pada Produk Hasil Proses Reduksi	72
Gambar 4.5.	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap <i>Recovery</i> dari Unsur Nikel pada Produk Hasil Proses Reduksi	76
Gambar 4.6.	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap <i>Recovery</i> dari Unsur Besi pada Produk Hasil Proses Reduksi	79
Gambar 4.7.	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Faktor Selektivitas Produk Hasil Proses Reduksi	82
Gambar 4.8.	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Produk Hasil Proses Reduksi	84
Gambar 4.9.	Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Ni pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi	87

Gambar 4.10. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Fe pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi	89
Gambar 4.11. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi	91
Gambar 4.12. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Morfologi pada Produk Hasil Proses Reduksi	95

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Target Proses Reduksi Nikel Laterit Limonitik	57
Tabel 3.2.	Perbandingan Komposisi Briket.....	57
Tabel 3.3.	Kadar Fe dan Ni pada Briket Sebelum Reduksi	58
Tabel 3.4.	Nilai Kadar CO/CO ₂ Pada Atmosfir Reduksi....	58
Tabel 3.5.	Rancangan Penelitian.....	59
Tabel 3.6.	Jadwal Penelitian	59
Tabel 4.1.	Hasil Pengujian EDX Bijih Nikel Laterit Limonitik	61
Tabel 4.2.	Identifikasi Fasa Bijih Nikel Laterit Limonitik	63
Tabel 4.3.	Hasil Pengujian <i>Proximate Analysis</i> Batu Bara	64
Tabel 4.4.	Hasil Pengujian EDX Dolomit.....	65
Tabel 4.5.	Komposisi Unsur Logam Setelah Proses Reduksi	67
Tabel 4.6.	Perhitungan Massa dan <i>Recovery</i> Ni Hasil Reduksi	76
Tabel 4.7.	Perhitungan Massa dan <i>Recovery</i> Fe Hasil Reduksi	79
Tabel 4.8.	Perbandingan <i>Selectivity Factor</i> di Beberapa Penelitian	81
Tabel 4.9.	Identifikasi Fasa pada Produk Logam Hasil Proses Reduksi.....	85
Tabel 4.10.	Identifikasi Fasa pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi.....	92

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara di dunia yang memiliki bahan tambang melimpah. Bahan tambang tersebut merupakan kekayaan bangsa yang harus dimanfaatkan secara optimal untuk meningkatkan kesejahteraan rakyat. Namun faktanya pemanfaatannya saat ini belum optimal, beberapa komoditi tambang diekspor tanpa pengolahan maksimal dan tanpa ada peningkatan nilai tambah maksimal (ESDM, 2012). Maka dari itu, pemerintah mengeluarkan Peraturan Menteri ESDM No. 01 tahun 2014 tentang peningkatan nilai tambah mineral melalui kegiatan pengolahan dan pemurnian mineral di dalam negeri, maka diharapkan Indonesia mampu mengolah dan memanfaatkan sumber daya alam yang dimiliki secara maksimal sehingga kebutuhan dalam negeri dapat tercapai tanpa adanya ketergantungan terhadap negara lain, terutama produksi nikel (Yopy, 2014).

Nikel merupakan unsur paduan utama dari *stainless steel*, dan mengalami pertumbuhan yang sangat cepat seiring dengan peningkatan permintaan *stainless steel*. Saat ini lebih dari 65% nikel digunakan dalam industri *stainless steel*, dan sekitar 12% digunakan dalam industri manufaktur *super alloy* atau *non-ferrous alloy* (Moskalyk, 2002 & Johnson, 2005). Banyaknya penggunaan nikel tersebut disebabkan oleh sifat nikel yang istimewa yaitu mempunyai ketahanan korosi yang baik, mempunyai kekuatan dan ketangguhan yang baik pada temperatur tinggi, dan mempunyai konduktivitas panas dan listrik yang relatif rendah (INSG, 2008).

Ditambah, permintaan nikel dunia terus naik seiring dengan kenaikan permintaan baja, dengan peningkatan permintaan nikel dunia dekade terakhir naik dari 1.104.000 ton pada tahun 2001, menjadi 1.572.000 ton pada tahun 2011, atau tingkat pertumbuhan tahunan rata-rata 4,2%. Pertumbuhan permintaan sebesar 3,2% pertahun terjadi dari 2005 sampai dengan 2010,



penurunan pertumbuhan ini karena krisis global pada tahun 2008. Namun kenaikan dalam empat tahun terakhir mencapai lebih dari 5%, hal ini didorong oleh permintaan yang sangat besar di Asia Timur dan Asia Selatan, terutama Cina untuk dapat memproduksi baja yang saat ini mengkonsumsi sekitar 44% nikel dunia.

Dilihat dari segi potensi cadangan, Indonesia menempati urutan ke-enam dengan potensi cadangan nikel sebesar 5% dari total seluruh cadangan nikel di dunia (Iwan, 2016). Dimana berdasarkan data terakhir dari Badan Geologi Kementerian ESDM dapat diketahui bahwa sumber daya nikel yang dimiliki Indonesia diperkirakan mencapai 2.633 juta ton *ore* dengan cadangan nikel sebesar 577 juta ton *ore* yang tersebar di Sulawesi, Kalimantan, Maluku dan Papua (ESDM, 2012).

Berdasarkan pembentukannya, bijih nikel diklasifikasikan menjadi dua, yaitu sulfida dan oksida (atau biasa disebut laterit). Dimana bila dilihat dari cadangan bijih nikel di dunia, sekitar 70% merupakan laterit dan 30% adalah sulfida, sedangkan produksi nikel dunia sebesar 60% berasal dari sulfida dan sisanya berasal dari laterit (Norgate, 2011). Hal tersebut mengakibatkan jumlah total cadangan nikel dunia dari bijih sulfida akan semakin berkurang akibat eksplorasi terus menerus (Tambunan, 2012). Maka dari itu penelitian dan pengembangan pada jenis laterit sangat diperlukan sehubungan dengan adanya penurunan cadangan nikel sulfida (Iwan, 2016).

Menurut Cartman (2010) dan Rhamdhani (2009), pengolahan bijih nikel laterit dibagi menjadi dua jenis yaitu dengan cara pirometalurgi (kadar nikel tinggi atau saprolit) dan hidrometalurgi (kadar nikel rendah atau limonit). Namun, saat ini diketahui bahwa pengolahan nikel laterit khususnya limonit berbasis hidrometalurgi dengan *ammonia leaching* atau HPL (*high pressure leaching*) menggunakan asam sulfat dapat menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan serta dapat meningkatkan biaya produksi (Wahyu, 2016). Selain itu, pada hidrometalurgi membutuhkan waktu pengekstraksian yang relatif lama (Putu, 2012). Sehingga kini, pengolahan nikel laterit



khususnya limonit menggunakan pirometalurgi mulai dilakukan penelitian guna mencapai kadar nikel yang optimal.

Adapun proses pirometalurgi bijih nikel laterit secara komersial saat ini yaitu menggunakan *rotary kiln-electric furnace* (RKEF) dan *blast furnace*. Di dalam bijih nikel laterit, kandungan air dan kandungan pengotornya sangat tinggi (khususnya bijih laterit kadar rendah), akibatnya proses pirometalurgi menggunakan RKEF dan *blast furnace* membutuhkan energi yang besar (Nuryadi, 2015). Sehingga untuk meminimalisir energi yang dikeluarkan maka perlu dilakukan peningkatan kadar pada saat proses reduksi sebelum memasuki RKEF ataupun *blast furnace*.

Secara umum proses reduksi dibagi menjadi dua metode, yaitu metode reduksi langsung dan reduksi tidak langsung. Dimana menurut Iwan (2016), proses yang mempunyai efisiensi energi paling tinggi yaitu *direct reduction* dikarenakan pada reduksi tidak langsung dibutuhkan energi yang sangat tinggi (Yopy, 2014). Pada penelitian ini, sebelum memasuki proses reduksi, terlebih dahulu perlu diperhatikan adanya proses aglomerasi (pembriketan) pada bijih nikel laterit. Hal tersebut bertujuan agar interaksi antara bijih nikel laterit dengan bahan reduktor batubara dan bahan aditif berlangsung lebih baik sehingga proses reduksi nikel oksida dan reaksi pembentukan besi sulfida berlangsung lebih efektif, dengan demikian proses reduksi selektif nikel laterit dapat berlangsung lebih baik. Selanjutnya dilakukan proses reduksi langsung dengan menggunakan *muffle furnace* dimana bertujuan mereduksi Fe_2O_3 dan NiO pada mineral *goethite* setelah mengalami dehidroksilasi (pelepasan uap air) pada temperatur tertentu sehingga menghasilkan Fe dan Ni metal. Kemudian dilakukan pemisahan magnetik guna meningkatkan kadar Ni.

Dari beberapa hasil penelitian didapatkan bahwa proses reduksi pada bijih nikel laterit dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya kondisi atmosfer proses reduksi, komposisi bahan baku dan penambahan bahan aditif (Rudy S., 2016). Pada kondisi



atmosfir proses reduksi dipengaruhi oleh perbandingan kandungan gas CO dan CO₂ yang didapatkan dari batubara dan dolomit. Penambahan batu bara dan dolomit dalam *crucible (bed)* dilakukan untuk mengontrol kandungan gas CO dan CO₂. Maka dari itu, diperlukan komposisi yang tepat dalam penambahan batu bara dan dolomit sehingga didapatkan rasio kandungan CO dan CO₂ yang sesuai dan didapatkan peningkatan kadar nikel optimal. Nantinya, kadar nikel yang optimal tersebut akan mempermudah proses peningkatan nikel selanjutnya.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi rasio batu bara dan dolomit pada *bed* batu bara-dolomit dalam proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap kadar unsur Ni dan Fe yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh variasi rasio batu bara dan dolomit pada *bed* batu bara-dolomit dalam proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap *recovery* logam nikel dan besi?
3. Bagaimana pengaruh variasi rasio batu bara dan dolomit pada *bed* batu bara-dolomit dalam proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap morfologi produk hasil reduksi?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Jenis dan komposisi bijih laterit, batu bara, dan fluks yang digunakan diasumsikan sama dan homogen.
2. Tekanan kompaksi yang diberikan dianggap homogen.
3. Kanji digunakan sebagai pengikat dan pengaruh dari reaksi kanji 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 dan waktu tahan saat pemanasan diasumsikan sama.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisa pengaruh variasi rasio batu bara dan dolomit pada *bed* batu bara-dolomit dalam proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap kadar unsur Ni dan Fe yang dihasilkan.
2. Menganalisa pengaruh variasi rasio batu bara dan dolomit pada *bed* batu bara-dolomit dalam proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap *recovery* logam nikel dan besi.
3. Menganalisa pengaruh variasi rasio batu bara dan dolomit pada *bed* batu bara-dolomit dalam proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik terhadap morfologi produk hasil reduksi.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat yaitu untuk memberikan informasi empiris dari parameter proses (variasi rasio batu bara dan dolomit) yang tepat sehingga meningkatkan kadar Ni dan Fe yang optimal pada proses reduksi langsung bijih nikel laterit limonitik sehingga meningkatkan keekonomisan proses pengolahan selanjutnya.

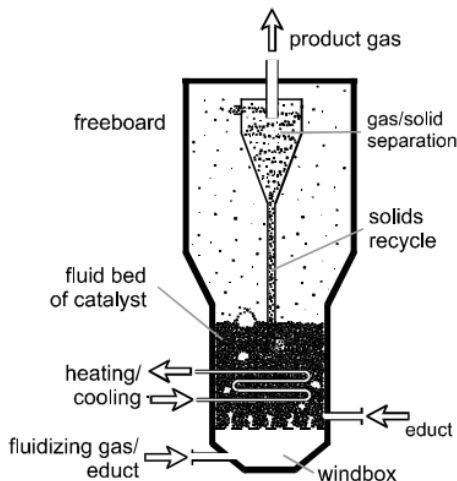


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Reaktor *Bed*

Proses reaksi kimia memerlukan kesesuaian reaktor agar reaksi berlangsung cepat dan konversi optimum pada suatu kondisi operasi. Misalnya, reaksi heterogen antara gas dan padatan dibedakan atas dasar pengontakan, yaitu *fixed bed reactor* dan *fluidized bed reactor*. *Fixed bed reactor* tersusun oleh tumpukan padatan tetap selama reaksi berlangsung. Sedangkan, pada *fluidized bed reactor* padatan difluidisasi sehingga padatan bergerak seiring dengan gerakan fluida seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. (Sunu, 2014).



Gambar 2.1. *Fluidized Bed Reactor* (Joachim, 2003)

Dalam operasinya, *fluidized bed reactor* memiliki keunggulan salah satunya yaitu kontak antara fasa gas dan *solid* lebih efisien dibandingkan dengan reaktor lainnya. Hal tersebut dikarenakan partikel *fluidized* memiliki dimensi yang sangat kecil sehingga jauh lebih mungkin untuk menghadapi keterbatasan



perpindahan massa pada laju reaksi dalam sistem ini dibandingkan *fixed bed reactor*. Selain itu, temperatur yang merata dapat dipertahankan diseluruh *fluidized bed reactor* sehingga perpindahan panas antara fasa gas dan *solid* di area antarmuka menjadi sangat tinggi dan meningkatkan selektivitas (Hill, 1977).

2.2. Bijih Nikel

Nikel adalah unsur paduan utama dari *stainless steel*, dan mengalami pertumbuhan yang sangat cepat seiringan dengan peningkatan permintaan *stainless steel*. Saat ini lebih dari 65% nikel digunakan dalam industri *stainless steel*, dan sekitar 12% digunakan dalam industri manufaktur *super alloy* atau *non-ferrous alloy* (Moskalyk, 2002 & Johnson, 2008). Banyaknya penggunaan nikel tersebut disebabkan oleh sifat nikel yang istimewa yaitu mempunyai ketahanan terhadap serangan korosi, mempunyai kekuatan dan ketangguhan yang baik pada temperatur tinggi, dan mempunyai konduktivitas panas dan listrik yang relatif rendah (INSG, 2008)

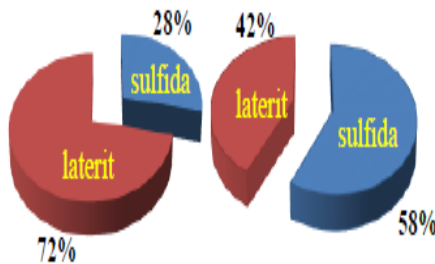
Di Indonesia, diketahui potensi sumber daya nikel mencapai 1.878.550.000 ton dengan kandungan unsur nikel rata-rata 1,45%. Sebagian dari potensi sumber daya tersebut sudah ditambang dan diekspor dalam bentuk *nickel matte*, *ferronickel* ataupun bijih nikel tanpa melalui proses pengolahan dan pemurnian 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).

Berdasarkan pembentukannya, bijih nikel diklasifikasikan menjadi dua, yaitu sulfida dan laterit. Jenis sulfida terbentuk ribuan meter dibawah permukaan bumi oleh reaksi sulfur dengan batuan yang mengandung nikel dengan kadar antara 0,5-8,0% Ni. Sedangkan jenis laterit terbentuk dalam waktu yang lama sebagai



hasil pelapukan batuan yang mengandung nikel dan menghasilkan nikel yang terdeposit lagi pada pembentukan oksida atau silikat dengan kadar 1,0-2,0% Ni (Kirk, 1998).

Dari total cadangan bijih nikel di dunia, yang telah diketahui, terkandung dalam tipe deposit laterit (sekitar 72%) yang ditemukan terutama di daerah tropis seperti Indonesia, Kuba, Kaledonia Baru, Filipina dan Australia. Sisanya sebesar 28% adalah tipe deposit sulfida terutama terdapat di Kanada dan Rusia seperti yang tunjukkan pada Gambar 2.2. Walaupun mayoritas sumber nikel dunia yang diketahui terkandung dalam laterit, produksi nikel dari sulfida lebih dominan, karena kadar nikel yang lebih tinggi dan pengolahan yang lebih mudah dibandingkan dengan tipe deposit laterit (INSG, 2008). Hal tersebut mengakibatkan jumlah total cadangan nikel dunia dari bijih sulfida akan semakin berkurang akibat eksplorasi terus menerus (Tambunan, 2012). Maka dari itu penelitian dan pengembangan pada jenis laterit sangat diperlukan sehubungan dengan adanya penurunan cadangan nikel sulfida (Iwan, 2016).



Gambar 2.2. Perbandingan Antara Bijih Nikel Sulfida dan Laterit: (a) Cadangan Bijih Nikel, (b) Produksi Nikel Dunia (ESDM, 2014)

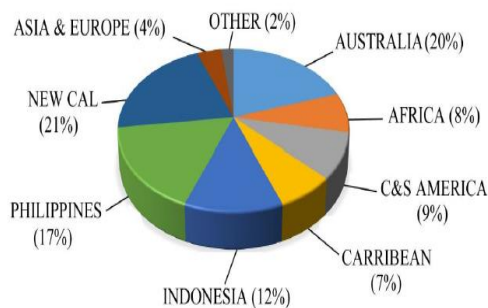
2.3. Bijih Nikel Laterit

Bijih nikel jenis laterit dihasilkan melalui proses pelapukan batuan *ultramafic* dalam waktu yang sangat panjang di bawah temperatur yang cukup tinggi (Connah, 1960). Melalui proses



pelapukan, magnesium, besi, nikel, dan silika koloid mengalami proses *leaching* dari bebatuan (*rocks*) oleh air tanah yang mengandung karbondioksida. Bagian utama dari besi secara cepat teroksidasi di daerah kontak dengan udara, dan mengendap sebagai presipitat *goethite* dan *hematite*. Nikel dan magnesium terlarut, dan silika koloid, meresap ke bawah hingga larutan asamnya ternetralkan bereaksi dengan batu dan tanah. Pada titik ini, material tersebut akan mengendap sebagai *hydrated magnesium silicates* (Kerfoot, 2005 & Warner, 2006).

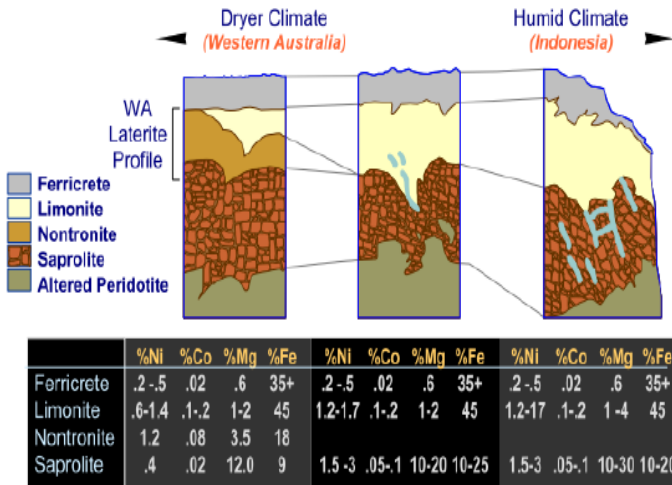
Kedalaman profil bijih laterit biasanya berada pada kedalaman 6 sampai 15 meter dari permukaan (Connah, 1960). Di beberapa tempat, kedalaman profilnya bisa mencapai kedalaman hingga 60 meter di bawah permukaan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Nahon dan Trady (1992), laju proses laterisasi berlangsung sebanyak 22 mm per 1000 tahun. Dan oleh sebab itu, proses terbentuknya deposit bijih laterit di dalam kulit bumi dapat berlangsung hingga lebih dari satu juta tahun. Karena profil bijih nikel laterit tersebut bersifat dangkal dan berada pada lokasi/area yang sangat luas, penambangan bijih laterit dilakukan menggunakan bijih laterit dilakukan menggunakan metode *open-cut* (Mudd, 2010). Gambar 2.3. menunjukkan distribusi persebaran bijih laterit diseluruh dunia.



Gambar 2.3. Distribusi Persebaran Bijih Nikel Laterit di Dunia Berdasarkan Jumlah Kandungan Nikelnya (Dalvi, 2004)



Bijih nikel laterit memiliki struktur berlapis, disebabkan oleh sifat dari proses laterisasinya itu sendiri. Lapisan-lapisan yang terbentuk pada profil laterit tidak terpisah sebagai zona yang berbeda, namun terdapat gradasi diantara lapisan tersebut sehingga masih dapat dibedakan (Kerfoot, 2005 & Diaz, 1988).



Gambar 2.4. Profil Laterit pada Daerah Beriklim Kering dan Lembab (Kerfoot, 2005)

Komposisi kimia dan mineralogi dari masing-masing *layer* pada profil laterit pun sangat berbeda, terutama berkenaan dengan kandungan dan rasio berat dari SiO_2 atau MgO , Fe/Ni serta kadar air (Diaz, 1988). Secara sederhana, profil bijih nikel laterit digambarkan pada gambar di bawah berikut. Kompleksitas profil laterit dan tingkat ketebalan dari masing-masing lapisan dapat bervariasi dari berbagai deposit bijih nikel diseluruh dunia, tergantung pada komposisi dan struktur batuan induk, (Connah, 1960) serta bergantung pada iklim daerah (Dalvi, 2004).



Schematic Laterite Profile	Common Name	Approximate Analysis (%)					Extractive Procedure
		Ni	Co	Fe	MgO	Cr ₂ O ₃	
	Hematitic Cap/ Red Limonite	<0.8	<0.1	>50	<0.5	>1	Overburden to Stockpile
	Nickeliferous Limonite/ Yellow Limonite	0.8 to 1.5	0.1 to 0.2	40 to 50	0.5 to 5	2 to 5	Hydrometallurgy
	Transition	1.5 to 1.8	0.02 to	25 to 40	5 to 15	1 to	Hydrometallurgy or Pyrometallurgy
	Saprolite/ Garnierite/ Serpentine	1.8 to 3		10 to 25	15 to 35		2
	Fresh Rock	0.3	0.01 to 0.02	5	35 to 45	0.2 to 1	Left in situ

Gambar 2.5. Profil Nikel Laterit (Kerfoot, 2005)

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

1. **Tipe limonitik;** yaitu salah satu tipe bijih nikel laterit yang kaya kandungan akan logam besi (Fe), tetapi habis di dalam silika dan magnesium (15-23% atau lebih tinggi dari Fe, 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).

2. **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 $3/4$.

3. **Nontronitik**; yaitu merupakan jenis menengah, dan terletak di antara jenis limonitik dan saprolitik (12-15% Fe dan 25-35% atau 10-25% MgO)

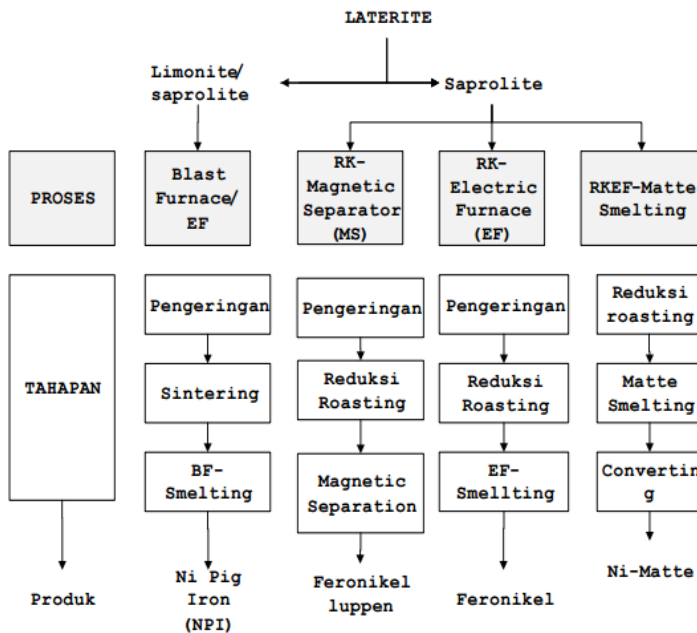
Nikel laterit terdiri dari partikel fasa campuran dan tunggal dari berbagai ukuran. Partikel bijih laterit memiliki struktur yang kompleks berupa campuran butir halus, *intergrowth*, berbentuk seperti vena/seperti pelat, berpori, dan memiliki struktur mikro yang padat serta mineralogi laterit yang juga bersifat heterogen (Rhamdhani, 2009).

Berdasarkan beberapa penelitian, didapatkan bahwa nikel laterit diprediksi akan mendominasi produksi nikel dalam waktu dekat di masa yang akan datang. Ada banyak alasan yang menjadikan bahwa nikel laterit akan mendominasi produksi nikel, antara lain dalam hal ketersediaan, biaya penambangan yang lebih rendah, efek terhadap lingkungan yang lebih sedikit, serta faktor teknologi yang membuat produksi menjadi lebih menguntungkan (Shoubao Li, 1999).



2.4. Proses Pengolahan Bijih Nikel Laterit

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 dan fasilitas pengolahan *slag* (Filipe, 2013).



Gambar 2.6. Diagram Ekstraksi Nikel Laterit (Iwan, 2016)

Berdasarkan Gambar 2.6., 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 Mate

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 flux. 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 EAF (Siti, 2013).

2.5. Batu Bara

Batu bara adalah salah satu bahan bakar fosil. Pengertian umumnya adalah batuan sedimen yang dapat terbakar, terbentuk dari endapan organik, utamanya adalah sisa-sisa tumbuhan dan terbentuk melalui proses pematubaraan. Unsur-unsur utamanya terdiri dari karbon, hidrogen dan oksigen. Batu bara juga adalah batuan organik yang memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang kompleks yang dapat ditemui dalam berbagai bentuk. Analisis unsur memberikan rumus formula empiris seperti $C_{137}H_{97}O_9NS$ untuk bituminus dan $C_{240}H_{90}O_4NS$ untuk antrasit.

Berdasarkan tingkat proses pembentukannya yang dikontrol oleh tekanan, panas dan waktu, batu bara umumnya dibagi dalam lima kelas : antrasit, bituminus, sub-bituminus, lignit dan gambut.

1. Antrasit adalah kelas batu bara tertinggi, dengan warna hitam berkilauan (luster) metalik, mengandung antara 86% - 98% unsur karbon (C) dengan kadar air kurang dari 8%.
2. Bituminus mengandung 68 - 86% unsur karbon (C) dan berkadar air 8-10% dari beratnya. Kelas batu bara yang paling banyak ditambang di Australia.
3. Sub-bituminus mengandung sedikit karbon dan banyak air, dan oleh karenanya menjadi sumber panas yang kurang efisien dibandingkan dengan bituminus.
4. Lignit atau batu bara coklat adalah batu bara yang sangat lunak yang mengandung air 35-75% dari beratnya.
5. Gambut, berpori dan memiliki kadar air di atas 75% serta nilai kalori yang paling rendah

Menurut C. F. K. Diessel (1992) pembentukan batubara diawali dengan proses biokimia, kemudian diikuti oleh proses geokimia dan fisika, proses yang kedua ini sangat berpengaruh terhadap peringkat batubara "*coal rank*", yaitu perubahan jenis mulai dari gambut ke lignit, bituminous, sampai antrasit. Faktor



yang sangat berperan didalam proses kedua tersebut adalah temperatur, tekanan, dan waktu.

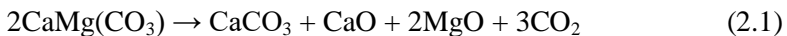


Gambar 2.7. Batu Bara (id.wikipedia.org)

2.6. Dolomit

Dolomit merupakan bahan alam yang banyak terdapat di Indonesia. Dolomit merupakan salah satu batuan sedimen yang banyak ditemui (Noviyanti dkk, 2015). Senyawa yang ada pada dolomit yaitu gabungan antara kalsium karbonat dengan magnesium karbonat [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$].

Dolomit akan terdekomposisi termal secara langsung membentuk CaCO_3 dan CO_2 disertai dengan pembentukan MgO pada temperatur antara $700\text{ }^\circ\text{C}$ hingga $750\text{ }^\circ\text{C}$. Dimana reaksi yang terjadi yaitu:

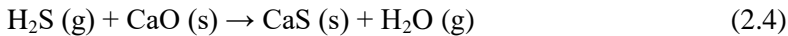


Pada temperatur yang lebih tinggi, CaCO_3 akan mulai terdekomposisi meskipun masih terdapat dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Reaksi dekomposisi dolomit dan CaCO_3 akan berlangsung secara spontan yang terdiri dari 2 reaksi, yaitu:



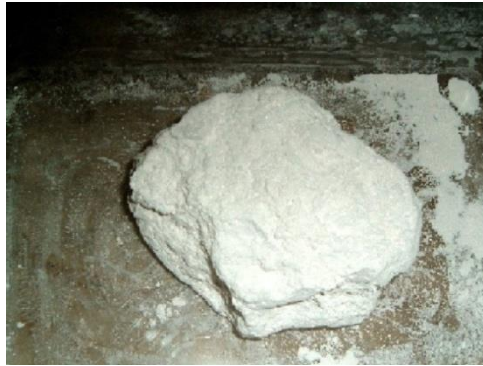
Reaksi tersebut akan berlangsung secara spontan pada temperatur 780 – 785 °C serta terdekomposisi secara keseluruhan pada temperatur 950 – 960 °C (Philip Engler, dkk. 1988).

Dalam penelitian ini dolomit yang digunakan berperan sebagai penyedia gas CO₂ dalam proses reduksi. Gas CO₂ ini berguna untuk reaksi pembentukan gas CO (Reaksi *Boudouard*). Gas CO₂ diperoleh dari reaksi dekomposisi dolomit dan CaCO₃. Selain itu dolomit juga berperan sebagai *flux agent* atau pengikat pengotor. Dolomit dapat berperan dalam proses desulfurisasi batubara pada *range* temperatur 870 – 1037 °C (Spencer, 1985), dengan reaksi:



Peningkatan kadar Ni cenderung lebih rendah dari reduksi menggunakan *flux* jenis lain karena adanya MgO yang terbentuk dari dekomposisi termal pada dolomit.

Dimana MgO akan menyebabkan fasa Fe₃O₄ tidak dapat menjadi fasa *liquid* pada temperatur reduksi. Disisi lain, fasa *liquid* yang sedikit dapat meningkatkan *solid* difusi, *solid* difusi yang diharapkan yaitu Ni dapat bersubstitusi dengan atom Fe ke dalam Fe₃O₄. Karena itu dengan adanya MgO dapat menurunkan kadar Ni (Fan, Min, Tao, Li-shun, & Xu-Ling, 2010)



Gambar 2.8. Dolomit (batugamping.com)

2.7. *Selective Agent*

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 akan meningkatkan ukuran partikel *ferronickel* yang terbentuk (Harris, 2012). Penambahan Na_2SO_4 bertujuan untuk meningkatkan selektifitas Ni dengan menurunkan kadar komponen yang tidak diinginkan. Na_2SO_4 akan terurai menjadi natrium yang dapat mengikat silikat dan Fe bereaksi dengan S membentuk FeS. Natrium silikat dan FeS merupakan komponen bukan magnet yang terikat menjadi *tailing* pada pemisahan magnetik, sehingga selektivitas Ni pada konsentrat meningkat. Selain itu 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 pertumbuhan partikel logam (Li, 2012).



Gambar 2.9. Natrium Sulfat (id.wikipedia.org)

2.8. Aglomerasi Nikel Laterit Limonitik

Pada penelitian ini, *Mini Blast Furnace (MBF)* nantinya akan dipilih untuk digunakan sebagai reaktor karena pada proses menggunakan MBF telah mencakup hampir semua proses pada pirometalurgi, mulai dari proses pengeringan, proses kalsinasi dan reduksi, dan proses *smelting*. Dengan beberapa proses telah terintegrasi menjadi satu alat yaitu MBF sehingga akan lebih menghemat konsumsi energi dan juga waktu yang membuatnya lebih efisien dan ekonomis.

Salah satu feed material pada reaktor *Mini Blast Furnace* adalah fluks. Fluks berguna untuk menjaga tingkat basisitas *slag* agar proses pengolahan / *smelting* dapat berjalan dengan baik. Akan tetapi, jika fluks tersebut langsung dimasukkan dalam *mini blast furnace* maka akan membutuhkan banyak energi untuk menaikkan temperatur fluks tadi. Sehingga, fluks akan lebih baik ditambahkan saat proses persiapan material / *roasting* sebelum masuk ke dalam *mini blast furnace*. Oleh karena itu diperlukan suatu proses penggumpalan (aglomerasi) yang dilanjutkan dengan proses *roasting*.

Proses aglomerasi menjadikan *ore* laterit limonit yang berupa tanah digumpalkan yang telah dicampur dengan batubara serta fluks dengan komposisi tertentu. Sehingga *burden material*



hasil aglomerasi akan sesuai untuk proses pada *mini blast furnace*.

Proses aglomerasi yang digunakan berupa pembriketan. 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*) briket untuk meningkatkan kekuatan *green* biket sebelum proses *roasting*, mengurangi tingkat degradasi briket saat transportasi dan *handling*. Karena hanya untuk keperluan sebelum proses *roasting*, *binder* tidak boleh memberikan efek negatif pada proses *roasting*. Kanji dipilih sebagai *binder* karena kanji merupakan 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 diatas 1000 °C hingga dibawah temperatur lelehnya. Proses kalsinasi dilakukan dalam proses *roasting*.



Gambar 2.10. Bentuk Briket (arstaeco.com)

Proses pembriketan yang dilakukan berupa briket panas, hal ini dilakukan untuk memperoleh komposisi kimia briket laterit yang sesuai dengan proses produksi NPI (*Nickel Pig Iron*) pada



mini blast furnace. Proses pembriketan panas harus mencakup (Crundwell, 2011):

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 pada *mini blast furnace*.

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 sulit dibuat karena keterbatasan alat yang ada, proses pelepasan briket bola dari alat biket atau cetakan akan sulit dilakukan. Maka briket bebentuk bantal lebih mudah dibuat dengan menggunakan alat yang sudah komersial. 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 reduksi yang terjadi juga akan semakin besar.

2.9. Reduksi Nikel Laterit Limonitik

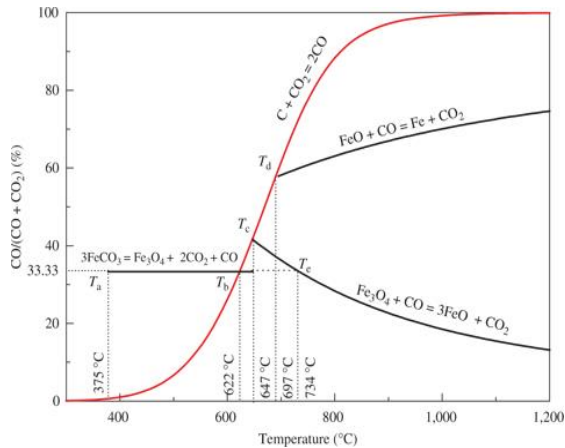
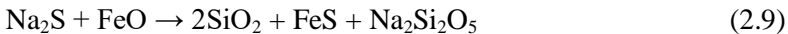
Pada proses pembakaran batubara didalam *furnace*, batubara akan bereaksi dengan gas CO_2 menjadi gas CO . Perubahan bentuk dari *fixed* karbon C menjadi CO ini dinamakan reaksi *boudouard*. Gaussner-Bourdouard telah membuat suatu diagram yang menggambarkan kesetimbangan antara *hematite*, *magnetite*, *wustite*, *fixed carbon*, gas CO , serta gas CO_2 . Diagram ini merupakan dasar untuk reduksi langsung dengan karbon padat. Selain itu kita juga mampu mengetahui kadar CO ketika terbentuk



senyawa seperti Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO dan lainnya. Pada diagram *boudouard* terdapat kesetimbangan besi oksida dengan campuran gas CO/CO_2 seperti yang ditunjukkan pada persamaan dibawah ini:



Selain itu berikut adalah reaksi *selective reduction* dimana terjadi pengikatan Fe yang akan membentuk FeS.



Gambar 2.11. Diagram *Boudouard* (de gruyter.com)

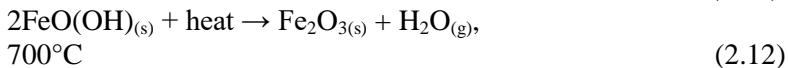
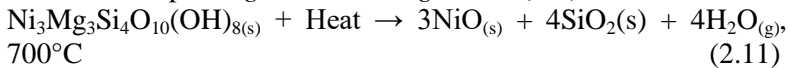
Pada daerah disebelah kanan garis kesetimbangan *boudouard*, gas CO lebih stabil, sehingga gas CO_2 akan mengalami reaksi *boudouard* yang membentuk gas CO. Sedangkan pada daerah disebelah kiri garis kesetimbangan



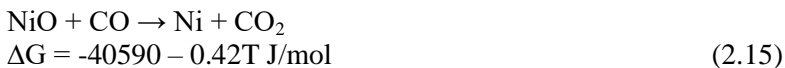
boudouard, gas CO₂ akan lebih stabil sehingga gas CO yang ada akan terurai menjadi CO₂. Fenomena inilah yang merupakan reaksi *boudouard* adalah reaksi yang endotermik sehingga membutuhkan temperatur tinggi untuk berjalan. Dari diagram tersebut terlihat bahwa pada keadaan standar, Fe baru dapat terbentuk dengan kadar CO sekitar 60%. Persentase CO itu sendiri dipengaruhi oleh kadar karbon pada sampel dan kadar oksigen pada lingkungan.

Diagram *boudouard* digunakan sebagai alat untuk memprediksi pembentukan senyawa-senyawa saat terjadi proses reduksi. Misal contohnya, jika karbon yang digunakan sebesar 8%, 16%, 24% dan 32% yang berasal dari briket batubara dengan temperatur reduksinya yaitu 1250°C. Dari sini dapat diprediksi bahwa senyawa yang terbentuk pada daerah temperatur seperti Fe₂O₃, Fe₃O₄, dan NiO. Berikut adalah reaksi yang terjadi pada proses reduksi nikel laterit bijih limonit:

- Dekomposisi *garnierite* dan *goethite (ore)*



- Reduksi reduksi NiO dan Fe₂O₃:





Gas CO juga perlu dipertimbangkan sebagai agen reduktor, karena gas CO berasal dari batu bara, sehingga diperlukan perhitungan kebutuhan komposisi batu bara yang sesuai. Apabila ketersediaan batu bara tidak memadai maka reaksi tidak berjalan optimal karena gas CO juga kurang untuk mereduksi mineral nikel dan besi yang ada (Tyroler & Landolt, 1998).

Selain termasuknya gas CO dalam proses reduksi, *burden material* harus memiliki standar yang baik dan sesuai dengan kebutuhan reduksi. Karakteristik *burden material* yang sesuai pada proses *blast furnace* diantaranya:

- Kandungan oksigen, semakin sedikit kandungan oksigen yang dihilangkan saat aglomerasi, akan semakin efisien proses di *blast furnace*.
- Fasa yang terbentuk dari *burden material*. Standar fasa yang terbentuk pada *nickel ore sinter* umumnya berupa : Magnetit, *Calcium Ferrite*, *Fayalite*, *Olivines* (Gupta, 2010).
- Permeabilitas, kontak antara gas reduktor dengan *burden ore* sangat penting dalam proses di *blast furnace*. Untuk optimasi kontak antara gas reduktor dengan *burden material* perlu adanya permeabilitas dari *burden material*. Permeabilitas semakin tinggi akan semakin baik. Permeabilitas dipengaruhi oleh jumlah pori dari *burden ore*. Dimana semakin banyak pori pada *burden ore* maka akan semakin luas permukaan dari *burden ore* yang akan berinteraksi dengan gas reduktor.
- Ukuran *burden material*, ukuran minimal dari *burden material* pada *blast furnace* yaitu 5 mm. Ukuran minimal ini didapat dari *shatter index*. *Shatter Index* merupakan nilai ketahanan suatu *burden material* yang dijatuhkan dari ketinggian 2 meter (Bhavan & Marg, 1981).
- Komposisi kimia, meliputi basisitas, Al_2O_3 dan MgO yang berperan penting dalam proses.
- Sifat metalurgi, meliputi:



❖ *Cold strength*, merupakan ketahanan *burden material* terhadap degradasi selama transportasi dan *handling*.

❖ Reduksi-disintegrasi, merupakan efek dari tahap reduksi awal dan kesesuaian pada zona *stack* dalam *blast furnace*.

Sifat *softening* dan *melting*, penting pada pembentukan zona kohesif dan zona *melting* pada *blast furnace* (Geerdes, Toxopeus, & Vliet, 2009).

2.10. Termodinamika Reduksi Nikel Laterit Limonitik

Diagram *ellingham* merupakan diagram yang berisi energi bebas suatu reaksi yang diplot ke dalam suatu grafik dengan parameter energi bebas terhadap temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. Pada diagram *ellingham*, logam yang aktif secara kimia memiliki energi bebas yang paling tinggi (negatif) dalam membentuk oksida terletak pada diagram di bagian paling bawah. Sedangkan untuk logam yang memiliki energi bebas terkecil (positif) dalam membentuk oksida terletak pada diagram di bagian paling atas. Besar nilai energi bebas (ΔG°) untuk reaksi oksidasi merupakan ukuran afinitas kimia suatu logam terhadap oksigen. Semakin negatif nilai ΔG° suatu logam menunjukkan logam tersebut semakin stabil dalam bentuk oksida. Persamaan dari energi bebas Gibbs ialah:

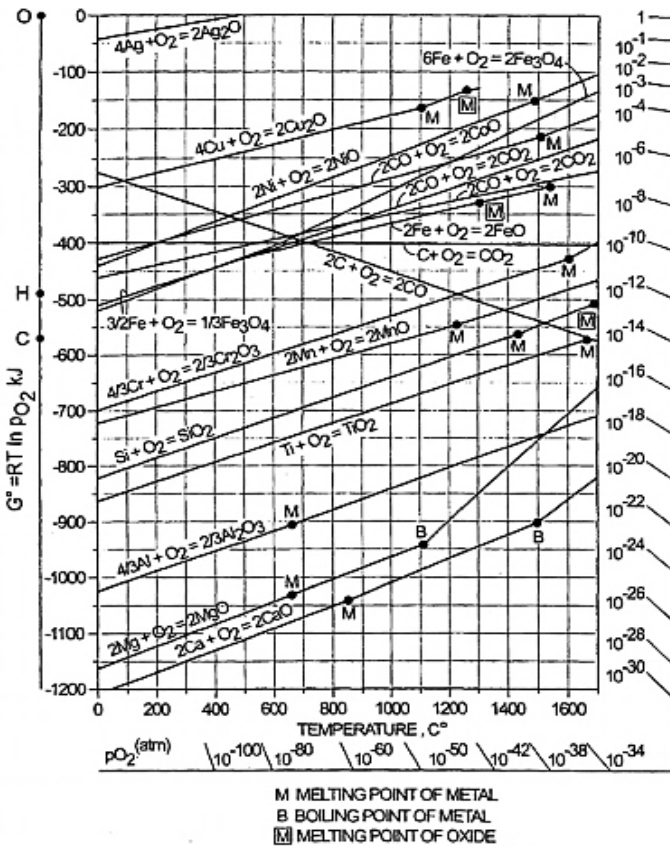
$$\Delta G = -T (\Delta S + \Delta H) \quad (2.19)$$

Dari diagram *ellingham* pada Gambar 2.12. dapat diketahui temperatur minimal yang dibutuhkan agar terjadi reaksi tersebut terjadi. Hal tersebut dapat ditunjukkan oleh perpotongan antara kurva oksida dan garis pembentukan CO. Termodinamika hanya dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu reaksi dapat berjalan spontan atau tidak pada temperatur tertentu berdasarkan energi bebas yang dimiliki. Namun tidak dapat digunakan untuk menentukan laju reaksi. Perpotongan antara garis reaksi oksida



dan reduksi secara termodinamika menunjukkan bahwa reaksi tersebut berjalan pada temperatur tertentu.

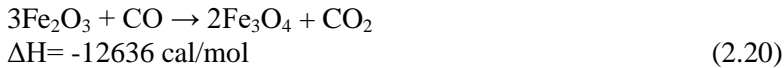
Klasifikasi reaksi reduksi suatu bijih mineral berdasarkan *reducing agent* dikemukakan oleh *metallurgist* Prancis bernama Jacques Assenfratz pada tahun 1812 (Andronov, 2007). Dia membuktikan secara pengujian bahwa reduksi bijih besi terjadi dalam 2 cara, yaitu: kontak antara bijih dan arang atau interaksi dengan gas reduktor.



Gambar 2.12. Diagram Ellingham (Ross, 1980)



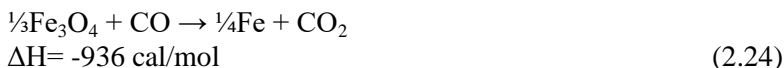
Dalam proses berdasarkan batu bara, gas reduktor utama adalah CO. Tiga reaksi reduksi dan entalpi reaksi pada 25 °C dari mineral besi dalam laterit dapat dituliskan sebagai berikut:



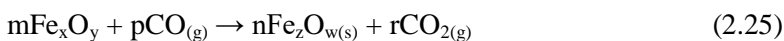
Ketika wustit bertemu dengan silikat akan membentuk fasa fayalit, seperti reaksi:



Entalpi reaksi pada 25 °C dapat diketahui dari entalpi pembentukan. Reaksi (2.20) dan (2.22), mempunyai entalpi negatif, yang berarti reaksi eksotermik dan reaksi (2.21) mempunyai entalpi positif, berarti reaksi endotermik dan membutuhkan energi. Karena wustit metastabil di bawah 570°C, Fe₃O₄ dapat direduksi dalam satu langkah menjadi besi metalik, tanpa melewati reaksi wustit.



Dalam sistem *solid* dan reduktor berfasa gas, seluruh reaksi selama reduksi bijih besi dapat terjadi dalam dua langkah (Chatterjee, 1988): reduksi mineral besi dan gasifikasi karbon.



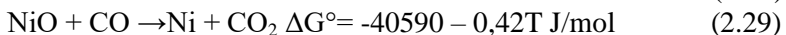
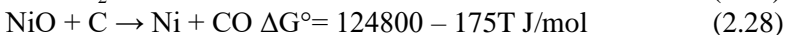
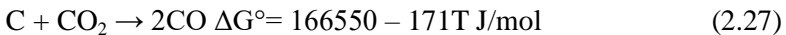


Dalam reaksi *boudouard*, ketika karbon dioksida bereaksi dengan karbon membentuk karbon monoksida, 1 volume karbon dioksida menghasilkan 2 volume karbon monoksida pada tekanan konstan. Jika dalam volume konstan, reaksi Akan meningkatkan temperatur. Jika tekanan meningkatkan, maka kesetimbangan sistem karbon oksigen Akan bergeser untuk melepas tekanan. Oleh karena itu untuk menjaga rasio CO/CO_2 tetap sama pada tekanan tinggi, temperatur harus ditingkatkan.

Dilihat dari diagram *ellingham*, reaksi reduksi NiO oleh CO mulai terjadi pada temperatur 440 °C. Sedangkan reaksi reduksi Fe_2O_3 dengan gas CO mterjadi pada tempetarur 650 °C. Namun kedua reaksi reduksi ini belum akan terjadi pada temperatur tersebut oleh gas CO karena reaksi *boudouard* baru terjadi pada temperatur diatas 900 °C.

Menurut Li (2011), reaksi reduksi nikel dari laterit terjadi pada metode deoksidasi *solid-state*, reduktor gas dan padat keduanya digunakan. Proses reduksi nikel Ni dipengaruhi oleh temperatur, waktu reduksi, kadar CO, kadar karbon dan kadar CaO.

Reaksi utama dari nikel oksida menjadi nikel metalik adalah:

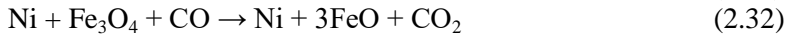
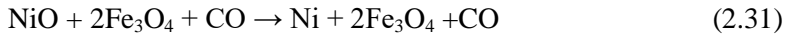


Dari diagram Ellingham (Gambar 2.12.), temperatur terendah pada tekanan atmosfer terjadinya reduksi NiO oleh *fixed carbon* pada temperatur 440 °C. Kurva energi Gibbs standar dari pembentukan NiO adalah lebih dari CO_2 , dan energi bebas Gibbs standar dari reaksi (2.28) bernilai negatif pada tekanan atmosfer. Sehingga NiO dengan mudah tereduksi dengan CO (Li, 2011).

Faktanya, *ore* nikel laterit merupakan *ore* yang kompleks, termsuk di dalamnya berupa senyawa NiO, Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , dll, sehingga reaksi-reaksi lain pun secara simultan terjadi pada



proses reduksi, Berdasarkan reduksi dari *trevorite*, $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, yang lebih mudah terjadi reduksi nikel oksida menjadi nikel metalik dimulai dengan:



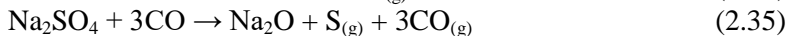
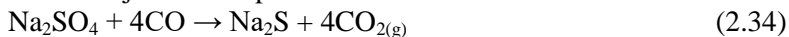
Reduksi selanjutnya dari wustit menjadi besi metalik terjadi:



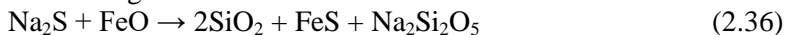
Berdasarkan kondisi percobaan, proses reduksi dari (2.32) dan (2.33) akan sulit terjadi (Olli 1995).

Menurut Jiang (2013) mekanisme *selective reduction* dari nikel terjadi sesuai reaksi berikut:

- Terjadi dekomposisi termal dan reduksi natrium sulfat



- Pengikatan Fe membentuk FeS



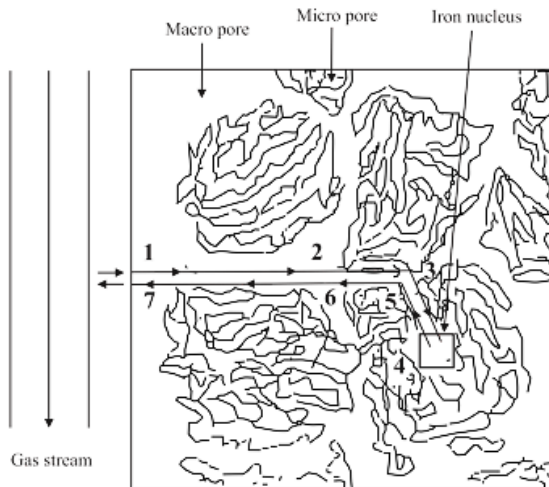
2.11. Kinetika Reduksi Ore

Untuk mengetahui bagaimana terbentuknya mineral ketika terjadi reaksi reduksi, kita perlu memahami mengenai kinetika reaksi bijih laterit. Kinetika reaksi reduksi bijih mineral adalah kecepatan mineral oksida untuk bertransformasi menjadi logam metalik dengan melepaskan oksigen. Kecepatan reaksi reduksi bijih mineral ditentukan oleh tinggi rendahnya kemampuan bijih mineral tersebut untuk direduksi yang dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu ukuran partikel, bentuk dan distribusi ukuran



partikel, bobot jenis, *porosity*, struktur kristal, serta komposisi kimia (Ross, 1980). Kinetika reduksi menggunakan reduktor batu bara dipengaruhi oleh kombinasi beberapa mekanisme, yaitu perpindahan panas, perpindahan massa oleh konveksi, difusi fase gas, serta reaksi kimia dengan gasifikasi karbon. El-Geassy (2007) menjelaskan bahwa ada banyak faktor yang mempengaruhi reduksi mineral oksida seperti komposisi bahan baku, basisitas, komposisi gas, dan temperatur reduksi. Pengaruh komposisi gas terjadi pada perubahan volume dari mineral oksida pada temperatur 800 – 1100 °C.

Bijih mineral dapat dianggap tersusun atas butiran-butiran. Celah diantara butiran-butiran dikenal sebagai pori makro dan pori yang lebih kecil dikenal sebagai pori mikro. Mekanisme reduksi ore mineral bertahap melalui langkah-langkah sebagai berikut dan diilustrasikan Gambar 2.13. (Bogdandy, Von and Engell 1971).



Gambar 2.13. Garis Besar Mekanisme Reduksi untuk Mineral Berpori (Bogdandy, Von and Engell 1971).



Dimana:

1. Difusi gas reduktor melewati lapisan batas butir.
2. Difusi gas reduktor melalui pori-pori makro pada bijih besi.
3. Difusi gas reduktor melalui pori-pori mikro menuju posisi reaksi.
4. Reaksi pada batas fasa.
5. Difusi gas hasil reaksi reduksi melalui pori-pori mikro.
6. Difusi gas hasil reaksi reduksi melalui pori-pori makro.

Dari semua mekanisme reduksi, langkah-langkah yang mendasar dalam reduksi bijih mineral, diantaranya (Takuda, Yoshikoshi, & Ohtano, 1973) :

1. Perpindahan panas dalam reaksi antarmuka.
2. Perpindahan massa antara gas dan permukaan padat oksida, yang meliputi difusi gas reduktor kedalam permukaan *solid* atau gas hasil reduksi keluar dari permukaan.
3. Perpindahan massa antara permukaan oksida dan reaksi antarmuka internal melalui lapisan hasil reduksi, yang dipengaruhi oleh:
 - Difusi solid melalui oksida rendah
 - Difusi solid melalui lapisan logam metal
 - Difusi antar partikel gas reduktor atau gas hasil reduksi.
4. Reaksi kimia penghilangan oksigen pada permukaan antarmuka.
5. Pengintian dan pertumbuhan fasa logam metalik.

2.12. Kajian Penelitian Sebelumnya

Beberapa kegiatan penelitian untuk meningkatkan kadar nikel dalam laterit limonit telah dilakukan beberapa peneliti terdahulu. Wahyu Mayansari dan Agus Budi Prasetyo dalam penelitiannya yang berjudul “*Proses reduksi selektif bijih nikel limonit menggunakan zat aditif $CaSO_4$* ”, telah melakukan penelitian untuk meningkatkan kadar nikel dalam nikel limonit yang mempunyai kandungan awal Ni sebesar 1,11% dan Fe 48,68% dengan penambahan $CaSO_4$ dan diikuti pemisahan



magnetik untuk mendapatkan kadar nikel. Proses reduksi selektif dilakukan pada rentang suhu 800 - 1100 °C, waktu reduksi 1 – 4 jam, serta penambahan reduktor dan aditif 5% - 20%. Dari hasil penelitiannya diperoleh bahwa penambahan CaSO_4 pada proses reduksi selektif dapat meningkatkan kadar Ni dan menurunkan kadar Fe, namun belum memberikan kecenderungan hasil yang baik. Peningkatan kadar Ni tertinggi yang didapatkan adalah 2,44% dengan *recovery* nikel sebesar 70%. Kondisi operasi reduksi selektif yang direkomendasikan adalah suhu reduksi 1100 °C, waktu reduksi 1 jam, penambahan reduktor 10% dan penambahan aditif CaSO_4 20%.

Penelitian lainnya dilakukan oleh Rudi Subagja dan kawan-kawan dimana dalam penelitiannya yang berjudul “*Peningkatan kadar nikel dalam laterit jenis limonit dengan cara peletasi, pemanggangan reduksi, dan pemisahan magnet campuran bijih, batu bara, dan Na_2SO_4* ”, telah melakukan penelitian untuk meningkatkan kadar nikel dalam laterit kadar rendah yang memiliki kandungan awal NiO sebesar 1,42% dan Fe_2O_3 sebesar 69,55% dengan cara pemanggangan bijih nikel laterit limonit dengan komposisi 10% Na_2SO_4 dan 10% batu bara pada temperatur 500°C selama 1 jam kemudian dilanjutkan dengan proses pemisahan magnet dalam media air terhadap hasil reduksi yang dihasilkannya. Hasil penelitiannya memperlihatkan bahwa kadar nikel dalam bijih dapat ditingkatkan dari 1,42% menjadi 1,51% pada temperatur reduksi 800°C, kemudian menjadi 1,46% pada temperatur reduksi 900°C, dan menjadi 1,62% pada temperatur reduksi 1000°C, serta menjadi 1,60% pada temperatur 1100°C.

Penelitian lainnya yaitu dilakukan oleh Zulfaidi Zulhan dan Ian Gibranata dengan judul “*Direct reduction of low grade nickel laterite ore to produce ferronickel using isothermal – temperature gradient*”, yang telah melakukan percobaan untuk meningkatkan kadar nikel bijih nikel limonit menggunakan *muffle furnace* dengan kadar awal Ni sebesar 1,49% dan Fe sebesar 47,65% dimana terdapat tiga tahap untuk mendapat temperatur



isothermal pada 1400°C. Pertama-tama dilakukan pemanasan hingga temperatur 1000°C kemudian dilakukan *holding* selama 30 menit dan kemudian dinaikkan hingga temperatur 1400°C dengan *heating rate* sebesar 6.67, 8.33 and 10°C/menit. Hasil penelitiannya didapatkan bahwa pengaruh penambahan batu bara pada proses reduksi yaitu 10wt%, 20wt% dan 30wt% didapatkan bentuk *ferronickel nugget* yang lebih baik dibandingkan penambahan batu bara lainnya dikarenakan kemungkinan reduktan untuk kontak dan bereaksi dengan oksida logam di bijih lebih tinggi. Dan diketahui bahwa penambahan batubara yang meningkat, batu bara yang tidak bereaksi dalam bentuk abu juga akan meningkat dan menghalangi migrasi dan nukleasi logam. Didapatkan juga bahwa semakin lama waktu *holding* maka didapatkan hasil *recovery* nikel sebesar 53%. Berdasarkan pengamatan struktur mikro menggunakan SEM didapatkan bahwa metal mulai terbentuk pada temperatur 1333°C. Dari hasil reduksi didapatkan kadar Ni sebesar 4,3% dan Fe 86,5% dengan waktu *holding* 1 jam dan *heating* 6,67 C/min.

Bo Li dan kawan-kawan juga melakukan penelitian dengan judul “*The reduction of nickel from low-grade nickel laterite ore using a solid-state deoxidation method*”, yang telah melakukan percobaan dengan menggunakan metode deoksidasi *solid-state*. Dimana reduksi yang digunakan yaitu reduksi padat-padat. Didapatkan bahwa α Ni lebih besar dari 90% dapat diperoleh dari bijih nikel laterit menggunakan campuran CO dan CO₂ sebagai reduktan gas, dan α Ni sampai 80% dapat diperoleh dari bijih nikel laterit menggunakan antrasit sebagai reduktan padat. Dari hasil penelitian didapatkan peningkatan kadar nikel dalam feronikel yang semula 1,09% meningkat menjadi 4,5% dan didapatkan *recovery* nikel mencapai 80%.

Yan Jun Li dan kawan-kawan juga melakukan penelitian dengan judul “*Coal-based reduction mechanism of low-grade laterite ore*”, yang telah melakukan peningkatan kadar nikel menggunakan reduksi berbasis batu bara. Dimana kadar nikel awal yaitu 2,26% dan reduksi menggunakan *muffle furnace*



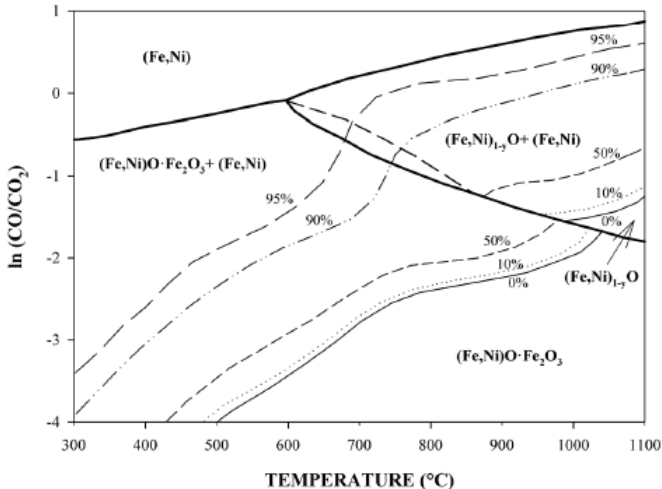
dengan laju pemanasan $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ sampai $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ dengan temperatur 1600°C . Didapatkan dari hasil penelitian bahwa waktu reduksi dan reduksi secara signifikan mempengaruhi perilaku pertumbuhan partikel logam Fe-Ni. Ukuran dan kemurnian partikel meningkat dengan meningkatnya suhu reaksi dan memperpanjang waktu reaksi. Fase logam Fe-Ni diatur dalam matriks sebagai partikel bola. Partikel yang rumit dari bijih nikel laterit diubah menjadi partikel logam dan matriks terak setelah dikurangi. Batas antara partikel logam dan matriks terak jelas; Dengan demikian, pembebasan partikel logam dapat dengan mudah dicapai.

J Yang dan kawan-kawan juga melakukan penelitian dengan judul “*Reduction of a garnieritic laterite ore by CO-CO₂ gas mixtures*”. Ditemukan bahwa kondisi reduksi yang optimal adalah suhu pada 740°C dan 60 vol% CO dalam campuran gas CO-CO₂. Laju alir gas tidak menunjukkan efek yang terlihat pada pengurangan bijih pada kisaran 350 - 1050 mL / menit. *Reducibility* nikel dan kobalt oksida menurun dengan meningkatnya suhu di atas 800°C . Logamisasi Ni, Co dan Fe meningkat dengan tekanan parsial CO; reduksi oksida besi meningkat tajam bila konsentrasi CO di atas 60 vol% yang membuat reduksi oksida nikel dan kobalt nonselektif. Formulasi Olivine, rekristalisasi dan integrasi nikel ke dalam kisi pada suhu tinggi (800°C dan di atas) membuat oksida nikel dan kobalt kurang dapat direduksi, menyebabkan penurunan hasil logam ini.

Ridwan Bagus Yuwandono melakukan penelitian dengan judul “*Analisa pengaruh variasi waktu tahan terhadap kadar Ni dan Fe serta morfologi pada proses reduksi bijih nikel laterit limonit menggunakan bed batu bara-dolomit*”, yang telah melakukan penelitian guna meningkatkan kadar nikel dengan menggunakan penambahan batu bara dan dolomit dalam *crucible* sehingga kandungan CO-CO₂ pada atmosfer dapat dikontrol. Adapun variasi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu waktu tahan dalam proses reduksi yaitu 4, 6 dan 8 jam. Dimana dari hasil reduksi didapatkan peningkatan kadar Ni tertinggi didapat dengan



waktu tahan 8 jam dengan peningkatan 5,84% dan *recovery* Ni yang paling tinggi didapatkan dengan waktu tahan 6 jam sebesar 88,51%.

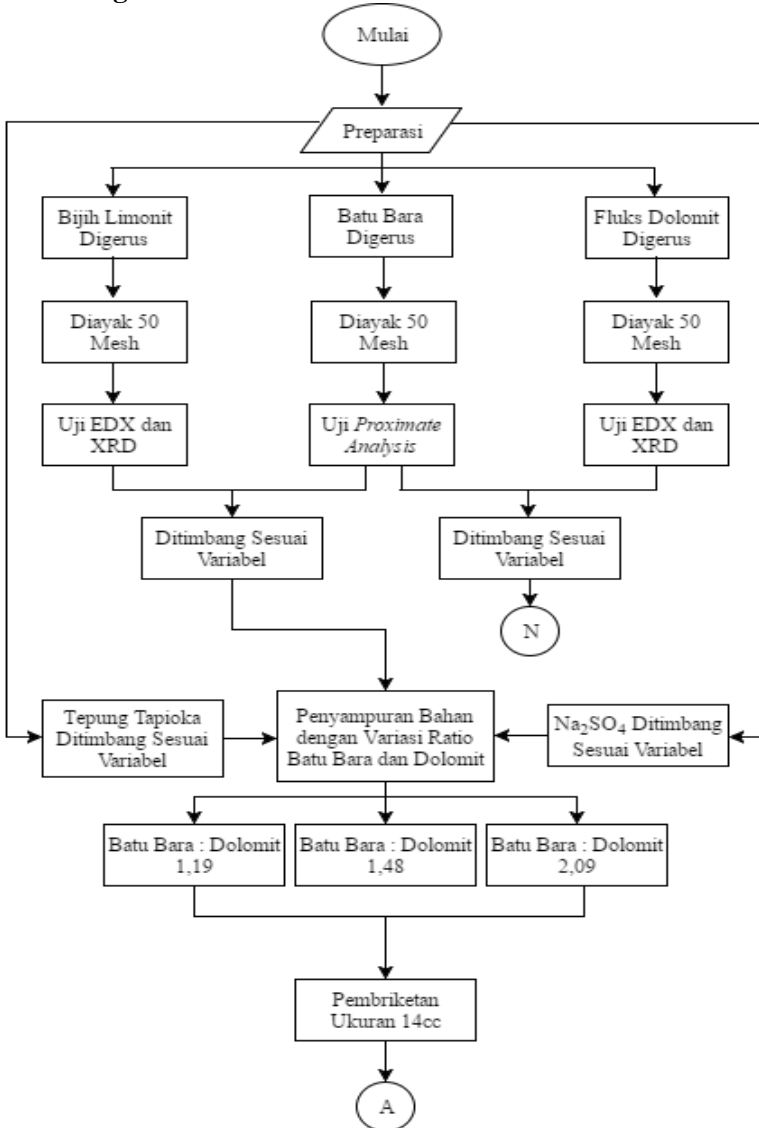


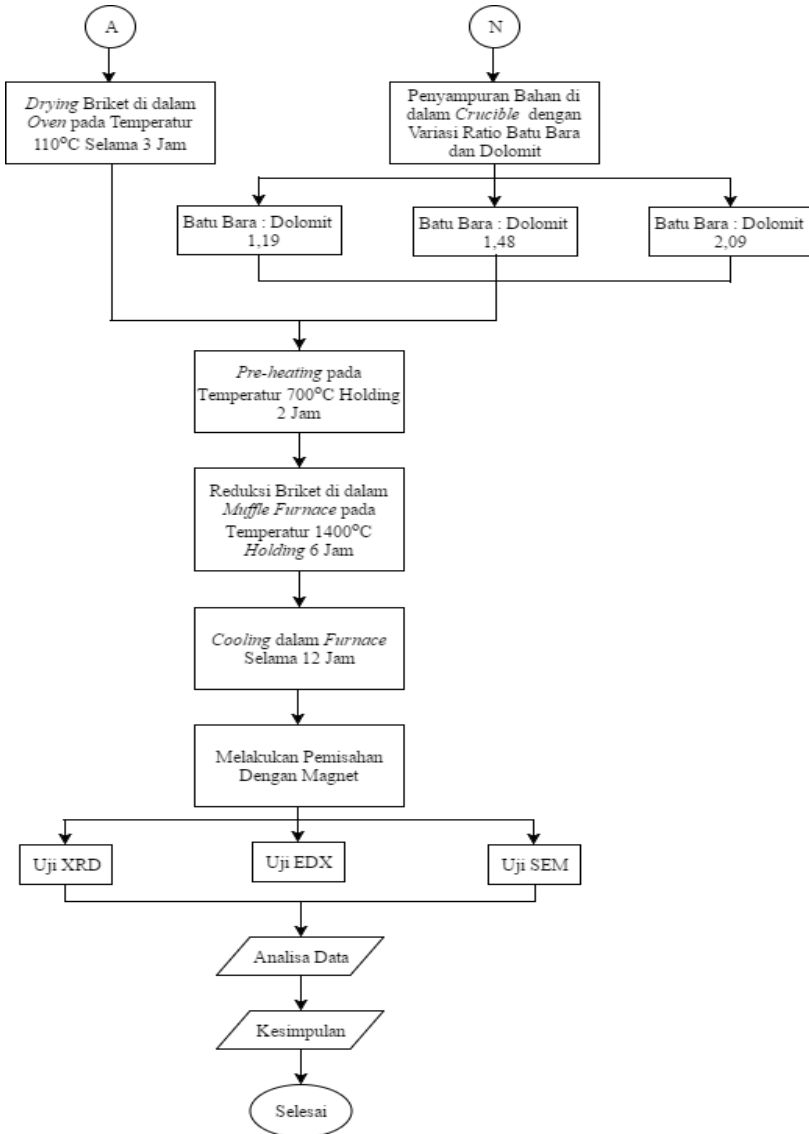
Gambar 2.14. Diagram kesetimbangan Fe-Ni-O untuk *goethite* yang mengandung 1,2% Ni (Hallet, 1997)

R. Elliott dan kawan-kawan juga melakukan penelitian dengan judul “*Thermodynamics of the Reduction Roasting of Nickeliferous Laterite Ores*”, dimana didapatkan bahwasanya pembentukan feronikel dari bijih limonit memiliki diagram kesetimbangan Fe-Ni-O dengan sumbu x berperan sebagai $\ln(\text{CO}/\text{CO}_2)$ dan sumbu y merupakan temperatur. Dari diagram tersebut kemudian dibagi menjadi 4 zona pembentukan hasil reduksi dimana 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 $(\text{Fe,Ni})_{1-y}\text{O} + (\text{Fe,Ni})$. Selain itu juga penggunaan temperatur tinggi yang menyebabkan laju rekasinya juga semakin cepat dan meningkatkan produktivitas.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian



Pada Gambar 3.1., alur penelitian ini dimulai dengan preparasi bahan dan karakterisasi *raw material*. Kemudian dilanjutkan dengan proses aglomerasi dan proses reduksi langsung. Hasil produk proses reduksi dilakukan pemisahan dengan magnet dan dilakukan pengujian XRD, SEM dan EDX. Selanjutnya, dilakukan analisa data pada hasil pengujian.

3.2. Bahan Penelitian

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

3.2.1. Bijih Nikel

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



Gambar 3.2. Bijih Nikel Laterit Limonitik

3.2.2. Batu Bara

Batu bara yang digunakan dalam penelitian ini yaitu batu bara dengan jenis *sub-bituminus* dari Binuang, Kalimantan Selatan. Batu bara ini juga dihancurkan terlebih dahulu kemudian



diayak hingga berukuran 50 *mesh*. Batu bara yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Batu Bara

3.2.3. Dolomit

Dolomit yang digunakan dihancurkan terlebih dahulu kemudian diayak hingga berukuran 50 *mesh*. Dolomit yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.4.

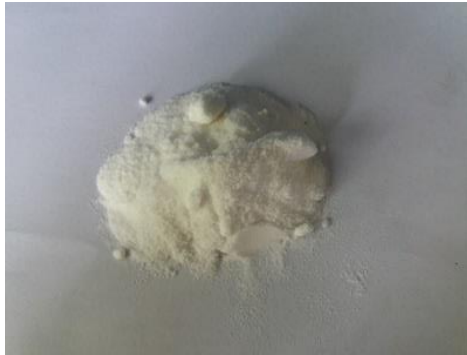


Gambar 3.4. Dolomit



3.2.4. Natrium Sulfat

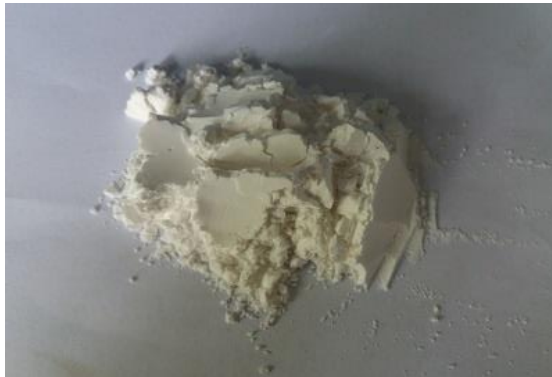
Natrium sulfat (Na_2SO_4) digunakan dalam penelitian ini sebagai agen *selective reduction* pada bijih nikel laterit limonitik. Natrium sulfat yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Serbuk Natrium Sulfat

3.2.5. Tepung Tapioka

Tepung tapioka digunakan dalam penelitian ini sebagai pengikat (*binder*) dalam pembuatan briket. Tepung tapioka yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Tepung Tapioka



3.2.6. Air

Air digunakan dalam pembuatan briket. Air yang digunakan yaitu aquades.

3.2.7. LPG

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



Gambar 3.7. LPG

3.3. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain :

3.3.1. Alat Kompaksi

Alat kompaksi berfungsi untuk membentuk campuran bahan menjadi briket yang berbentuk bantal (*pillow*). Alat kompaksi yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.8. Briket dibuat dengan menggunakan bahan baku berupa bijih nikel laterit limonitik, batubara, fluks, natrium sulfat, dan tepung tapioka.



Volume hasil briket yaitu 14 cm^3 dan dimensi briket adalah sebagai berikut :

Panjang : 4,3 cm
Lebar : 3,4 cm
Tebal : 1,65 cm



Gambar 3.8. Alat Kompaksi

3.3.2. Muffle Furnace

Proses reduksi dilakukan dengan menggunakan *muffle furnace*. *Muffle Furnace* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.9. Dimensi *muffle furnace* yang digunakan adalah sebagai berikut :

Panjang : 48 cm
Lebar : 85 cm
Tinggi : 64 cm
Tebal batu tahan api : 7 cm



Gambar 3.9. *Muffle Furnace*

3.3.3. *Crucible*



Gambar 3.10. *Crucible*

Di dalam penelitian ini, *crucible* digunakan sebagai media tempat terjadinya reduksi briket nikel laterit limonitik yang tertimbun di dalam *bed* batu bara. *Crucible* yang digunakan



ditunjukkan pada Gambar 3.10. Dimensi *crucible* yang digunakan adalah sebagai berikut :

Diameter atas	: 13 cm
Diameter bawah	: 10 cm
Tinggi	: 17 cm
Tebal	: 2,5 cm

3.3.4. Timbangan Digital

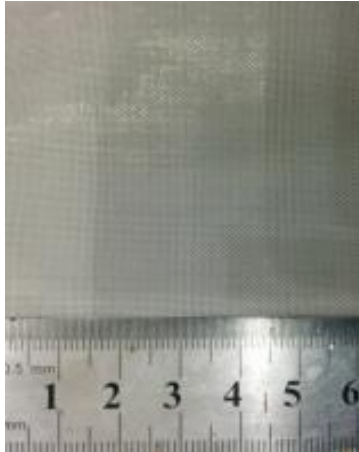
Timbangan digital digunakan untuk menimbang bahan baku yang akan digunakan sebagai bahan campuran untuk pembuatan briket dan pembuatan *bed* batu bara. Timbangan digital yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11. Timbangan Digital

3.3.5. Ayakan

Ayakan digunakan untuk mendapatkan ukuran butir dari bahan baku yang digunakan sebagai bahan campuran pembuatan briket. Ayakan yang digunakan berukuran 50 *mesh*. Ayakan yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12. Ayakan

3.3.6. Thermocouple

Thermocouple digunakan untuk mengetahui temperatur di dalam *muffle furnace* saat proses reduksi. *Thermocouple* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13. *Thermocouple*



3.3.7. Blower

Blower digunakan untuk meniupkan udara luar ke dalam *muffle furnace*. *Blower* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14. *Blower*

3.3.8. Oven

Oven digunakan untuk mengeringkan briket hasil kompaksi dan menghilangkan *moisture content*. *Oven* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15. *Oven*



3.4. Pelaksanaan Penelitian

3.4.1. Persiapan Material

Langkah – langkah yang dilakukan pada proses preparasi material yaitu :

1. Bijih nikel laterit limonitik, batu bara, dan dolomit ditumbuk dan dilakukan pengayakan dengan ukuran sebesar 50 *mesh*.
2. Bijih nikel laterit limonitik dan dolomit dilakukan pengujian EDX dan XRD.
3. Batu bara dilakukan pengujian *proximate analysis*.
4. Pembuatan briket nikel laterit limonitik.
 - a. Bijih nikel laterit limonitik, batu bara dan natrium sulfat yang telah dilakukan pengayakan, kemudian ditimbang dengan menggunakan timbangan digital sesuai dengan perbandingan komposisi yang ada.
 - b. Bijih nikel laterit limonitik hasil penimbangan, kemudian dicampurkan dengan batu bara dan natrium sulfat.
 - c. Tepung tapioka dicampurkan dengan air sebanyak 100 mL dan dipanaskan dalam air mendidih hingga sedikit mengental.
 - d. Campuran dari bijih nikel laterit limonitik, batu bara, dan natrium sulfat ditambahkan dengan tepung tapioka yang telah sedikit mengental dan diaduk hingga merata.
 - e. Campuran dibentuk menjadi briket *pillow* dengan alat kompaksi dengan tekanan 30 kgf/cm². Dalam satu kali proses aglomerasi dibutuhkan 4 buah briket.
 - f. Briket hasil kompaksi dikeringkan dengan menggunakan *oven* terlebih dahulu selama 3 jam pada temperatur 110 °C.
5. Pembuatan campuran *bed* batu bara.
 - a. Batu bara dan dolomit yang telah dilakukan pengayakan, kemudian ditimbang dengan



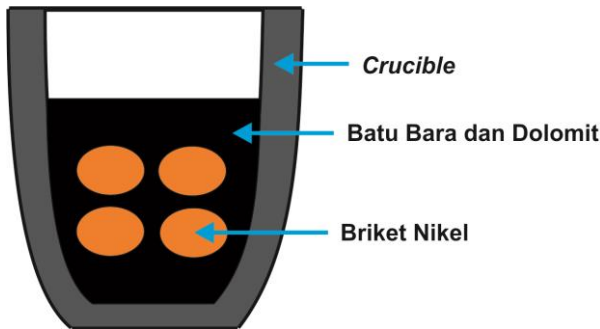
menggunakan timbangan digital sesuai dengan variasi rasio batu bara dan dolomit (1,19; 1,48 dan 2,09)

- b. Batu bara dan dolomit hasil penimbangan kemudian dicampurkan hingga merata.

3.4.2. Proses Reduksi Langsung

Langkah – langkah yang dilakukan dalam proses reduksi langsung yaitu :

1. Briket yang telah dikeringkan, dimasukkan ke dalam *crucible* yang di bagian dasarnya telah dimasukkan sejumlah campuran batu bara dan dolomit sebagai lapisan *bed* bagian dasar.
2. Briket ditutup kembali menggunakan campuran batu bara dan dolomit yang sama membentuk lapisan *bed* bagian atas, dan seterusnya hingga membentuk tumpukan batu bara + dolomit dengan briket seperti pada Gambar 3.16. berikut untuk dilakukan proses reduksi di dalam *muffle furnace*.



Gambar 3.16. Skematik Posisi Briket di Dalam *Crucible*

3. Pemanasan awal di *muffle furnace* dilakukan pada temperatur 700°C dengan *heat rate* 10°C / menit, kemudian dilakukan *holding* selama 2 jam.



4. Pemanasan selanjutnya ditingkatkan hingga mencapai temperatur 1400°C dengan *heat rate* $10^{\circ}\text{C} / \text{menit}$, kemudian dilakukan *holding* selama 6 jam.
5. Briket hasil reduksi didinginkan di dalam *muffle furnace* hingga mencapai temperatur kamar.
6. Setelah proses reduksi selesai, setiap sampel dikeluarkan dari *muffle furnace*.
7. Briket hasil reduksi selanjutnya akan dilakukan proses pengujian SEM, XRD dan EDX.

3.5. Pengujian Penelitian

3.5.1. Preparasi Bahan Pengujian

Adapun preparasi bahan pengujian yang dilakukan yaitu sebagai berikut.

1. Hasil dari proses reduksi langsung berupa logam dan serbuk.
2. Pada bentuk logam, preparasi bahan pengujian yaitu dengan meratakan permukaan logam dengan menggunakan kikir serta memiliki kriteria ketebalan maksimal sebesar 4 mm.
3. Pada bentuk serbuk, preparasi bahan pengujian yaitu dengan melakukan pengayakan sebesar 200 *mesh*.
4. Bila sudah dilakukan preparasi bahan pengujian maka dilanjutkan ke proses pengujian yaitu dengan menggunakan XRD, EDX dan SEM.

3.5.2. X-Ray Diffraction (XRD)

Untuk mengetahui struktur kristal dan senyawa secara kualitatif yang terdapat pada bahan baku yang digunakan diuji dengan alat XRD seperti pada Gambar 3.17. Dalam pengujian XRD sampel yang akan diuji sebelumnya harus sudah dihancurkan terlebih dahulu hingga berukuran 200 *mesh*. Sinar X merupakan radiasi elektromagnetik yang memiliki energi tinggi sekitar 200 eV hingga 1 MeV. Sinar X dihasilkan oleh interaksi antara berkas elektron eksternal dengan elektron pada kulit atom.



Spektrum sinar X memiliki panjang gelombang $10^{-1} - 10$ nm, berfrekuensi 1017 – 1020 Hz dan memiliki energi $10^3 - 10^6$ 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 sama.



Gambar 3.11. XRD PAN Analytical

3.5.3. Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk menyelidiki permukaan dari objek *solid* secara langsung. SEM memiliki kemampuan untuk mengetahui topografi, morfologi dari suatu sampel yang diuji. Alat uji SEM-EDX yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.18.



Gambar 3.12. SEM-EDX

3.5.4. Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy atau EDX adalah suatu teknik yang digunakan untuk menganalisa elemen atau karakterisasi 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 *energy (KeV)* dengan *counts*. Dari data grafik tersebut kita bisa melihat unsur – unsur apa saja yang terkandung di dalam suatu sampel. Serta dengan pengujian EDX, didapatkan pula persentase dari suatu unsur yang terkandung di dalam suatu sampel.

3.5.5. Proximate Analysis

Untuk mengetahui kandungan batu bara seperti kadar *moisture*, *volatile matter*, *ash*, dan *fixed carbon* dapat dilakukan pengujian *proximate analysis*. 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*).

3.5.5.1. *Moisture*

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

Bahan :

1. Udara kering
2. 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 :

1. Oven Pengering

Prosedur :

1. Meringinkan sampel dalam pengering selama 15 menit hingga 30 menit dan ditimbang. Mengambil sampel seberat 1 g dan diletakkan dalam kapsul, tutup kapsul dan timbang.
2. Meletakkan kapsul dalam *oven* yang telah dipanaskan (104°C – 110°C). Tutup *oven* dan panaskan selama 1 jam. Buka *oven* dan dinginkan dengan pengering. Timbang segera kapsul bila telah mencapai temperatur ruangan.
3. Menghitung hasil analisa.

Perhitungan :

$$\text{Moisture, \%} = [(A - B) / A] \times 100 \quad (3.1)$$

Dimana,

A = berat sampel yang digunakan (gram)

B = berat sampel setelah pemanasan (gram)



3.5.5.2. *Volatile Matter*

Analisa kadar *volatile matter* dalam batu bara dilakukan dengan standar ASTM D 3175-02. Sampel yang digunakan dihaluskan hingga 250 μm .

Alat :

1. Krusibel platina dengan tutup, untuk batu bara berkapasitas 10 – 20 mL, diameter 25 – 35 mm. Dan tinggi 30 – 35 mm.
2. *Vertical electric tube furnace*.

Prosedur :

1. Menimbang sampel seberat 1 g dalam krusibel platina, tutup krusibel dan masukkan dalam *furnace*, temperatur dijaga $950 \pm 20^\circ\text{C}$.
2. Setelah *volatile matter* lepas, yang ditunjukkan dengan hilangnya api *luminous*, periksa tutup krusibel masih tertutup.
3. Setelah pemanasan tepat 7 menit, pindahkan krusibel keluar *furnace* dan didinginkan.
4. Timbang ketika dingin
5. Presentasi *weight loss* dikurangi presentasi *moisture* sama dengan *volatile matter*.

Perhitungan :

$$\text{Weight Loss, \%} = [(A - B) / A] \times 100 \quad (3.2)$$

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* (%)



3.5.4.3. Ash

Analisa kadar *ash* dalam batu bara dilakukan dengan standar ASTM D 3174-02. Sampel yang digunakan dihaluskan hingga 250 μm .

Alat :

1. *Electric muffle furnace*
2. Kapsul porselen atau krusibel platina
3. Tutup krusibel

Prosedur :

1. Memasukkan 1 g sampel dalam kapsul dan ditimbang dan tutup. Letakkan kapsul dalam *furnace* dingin. Panaskan dengan temperatur 450 – 500°C selama 1 jam.
2. Memanaskan sampel hingga temperatur mencapai 700–750°C selama 1 jam. Kemudian lanjutkan pemanasan hingga 2 jam.
3. Pindahkan kapsul keluar dari *furnace*, didinginkan dan timbang.

Perhitungan :

$$\text{Ash, \%} = [(A - B) / C] \times 100 \quad (3.4)$$

Dimana,

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

B = berat kapsul kosong dan tutup (gram)

C = berat sampel yang digunakan (gram)

3.5.4.4. 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*.

$$\text{Fixed Carbon, \%} = 100\% - [\text{moisture (\%)} + \text{ash (\%)} + \text{volatilematter (\%)}] \quad (3.5)$$



3.6. Neraca Massa Briket Nikel Laterit Limonitik

Sebelum dilakukan proses aglomerasi dan reduksi, terlebih dahulu dilakukan perhitungan terhadap massa bahan (neraca massa) terhadap komposisi bahan di dalam briket. Perhitungan ini berpengaruh pada keberhasilan proses aglomerasi dan reduksi berupa morfologi maupun komposisi yang dihasilkan. Adapun bahan yang digunakan adalah bijih nikel laterit limonitik, batu bara, dolomit, natrium sulfat, dan tepung tapioka. Perhitungan untuk masing-masing massa bahan tersebut dilakukan dengan memperhatikan perilaku termal senyawa penyusunnya pada temperatur 1400 °C.

Komposisi massa batu bara dihitung berdasarkan kebutuhan gas CO, sesuai reaksi *boudouard*, sebagai agen reduktor untuk mereduksi Fe_2O_3 dan NiO. Batu bara juga diperlukan untuk kebutuhan gas CO sebagai agen reduksi dekomposisi Na_2SO_4 . Kebutuhan natrium sulfat (Na_2SO_4) ditentukan dari 10% massa total briket setelah dihitung neraca massa yang didapat dari bijih nikel laterit, batubara, dan fluks (Jiang, et al. 2013). Penambahan natrium sulfat ke dalam briket diharapkan dapat meningkatkan proses reduksi selektif (*selective reduction*) nikel oksida menjadi nikel metal dengan cara menekan pembentukan besi metal di dalam proses reduksi. Kebutuhan dolomit ditentukan berdasarkan kebutuhan gas CO_2 yang diperlukan sebagai pembentuk gas reduktor sebagai gas pereduksi. Sedangkan kebutuhan tepung tapioka sebagai pengikat briket sesuai dengan kebutuhan.

Desain target proses aglomerasi briket ditentukan pada Tabel 3.1. yaitu sebagai berikut.



Tabel 3.1. Target Proses Reduksi Nikel Laterit Limonitik

Target	Keterangan	Nilai	Satuan
Reaksi Reduksi	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$	100	Persen (%)
	$\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$	100	Persen (%)
	$\text{NiO} \rightarrow \text{Ni}$	100	Persen (%)
	$\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$	100	Persen (%)
Reaksi Pengikat	Tepung Tapioka	3	Persen (%)

Berdasarkan target proses reduksi briket tersebut, maka dilakukan perhitungan komposisi dengan neraca massa dengan ditentukan sebagai basis adalah bijih nikel laterit limonitik sehingga diperoleh perbandingan komposisi *ore* : batu bara : dolomit : natrium sulfat : tepung tapioka untuk masing-masing variabel ditunjukkan pada Tabel 3.2. yaitu sebagai berikut.

Tabel 3.2. Perbandingan Komposisi Briket

Variabel	Bijih	Batu	Dolomit	Na_2SO_4	Tepung	Massa
Rasio Batu	Nikel	Bara	(gram)	(gram)	tapioka	Total
Bara :	(gram)	(gram)			(gram)	(gram)
Dolomit						
1,19	100	27,07	22,84	14,42	4,24	168,57
1,48	100	68,36	46,20	14,42	4,24	233,22
2,09	100	47,71	22,84	14,42	4,24	189,21

Setelah dilakukan penimbangan sesuai dengan perbandingan komposisi diatas, bahan-bahan tersebut selanjutnya dicampurkan dan dipadatkan membentuk briket *pillow* dengan ukuran 14 cc menggunakan alat kompaksi dengan 30 kgf/cm^2 .

Dengan dilakukannya pencampuran bijih nikel dengan bahan tambahan diatas, kadar unsur nikel dan unsur besi di dalam *crucible* pun akan berubah. Jika sebelum dicampurkan, kadar unsur nikel dan besi di dalam bijih adalah 1,25 % dan 55,37 %, maka setelah dicampurkan, kadar unsur-unsur tersebut akan berubah sesuai pada Tabel 3.3. yaitu sebagai berikut.



Tabel 3.3. Kadar Fe dan Ni pada Briket Sebelum Reduksi

Variabel Rasio Batu Bara : Dolomit	Massa Campuran Total	Fe		Ni	
		Massa (gram)	%	Massa (gram)	%
1,19	168,57	39,87	55,37	0,90	1,25
1,48	233,22	44,30	55,37	1	1,25
2,09	189,21	42,08	55,37	0,95	1,25

Kemudian, banyaknya batu bara dan dolomit yang digunakan sebagai *bed* pada proses reduksi ditentukan berdasarkan kebutuhan gas CO yang digunakan untuk mereduksi briket pada masing-masing variabel sesuai perhitungan neraca massa. Komposisi batu bara dan dolomit yang digunakan sebagai *bed* pada penelitian ini antara lain berturut-turut sebesar (1,19; 1,48 dan 2,09).

Adapun pada penelitian ini, kadar gas CO/CO₂ pada atmosfer reduksi menjadi parameter dalam penentuan masing-masing rasio batu bara dan dolomit. Adapun nilai kadar CO/CO₂ pada masing-masing variabel ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Nilai Kadar CO/CO₂ Pada Atmosfir Reduksi

Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit	Kadar CO/CO ₂
1,19	0,88
1,48	2,23
2,09	1,56



3.7. Rancangan Penelitian

Tabel 3.5. Rancangan Penelitian

Perbandingan Komposisi Bahan dengan Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit		Hasil Pengujian		
Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit	Rasio Komposisi*	XRD	EDX	SEM
1,19	100 : 27,07 : 22,84 ; 14,42 ; 4,24	v	v	v
1,48	100 : 68,36 : 46,20 : 14,42 : 4,24	v	v	v
2,09	100 : 47,71 : 22,84 : 14,42 : 4,24	v	v	v

*Komposisi Bahan : Ore : Batu Bara : Dolomit : Na₂SO₄ : Tepung Tapioka

Tabel 3.6. Jadwal Penelitian

Kegiatan	September		Oktober				November				Desember			
	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Preparasi alat dan sampel														
Pengujian Bahan														
Pembriketan dan Proses Reduksi														
Pengujian Hasil Reduksi														
Analisis Data dan Pembahasan														



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Karakterisasi *Raw Material*

Dalam penelitian ini terdapat tiga bahan baku antara lain bijih nikel laterit limonitik, batu bara dan dolomit. Bijih nikel laterit limonitik berfungsi sebagai *raw material* utama (*raw material* yang akan diambil logam Ni-nya). Disisi lain, batu bara berfungsi sebagai reduktan sedangkan dolomit sebagai penyedia gas CO₂ untuk reaksi *boudouard* yang ditunjukkan pada reaksi 4.1.



4.1.1. Karakterisasi Bijih Nikel Laterit Limonitik

Identifikasi komposisi atau kadar unsur dari bijih nikel laterit limonitik menggunakan mesin SEM-EDX *PAN analytical X'Pert* Departemen Teknik Material ITS. Pada penelitian ini menggunakan bijih nikel laterit limonitik yang berasal dari Sulawesi Tenggara. Sebelum dilakukan pengujian, bijih nikel laterit limonitik telah diayak dengan ayakan 50 *mesh* atau 300 μm . Hasil pengujian EDX pada bijih nikel laterit limonitik ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil Pengujian EDX Bijih Nikel Laterit Limonitik

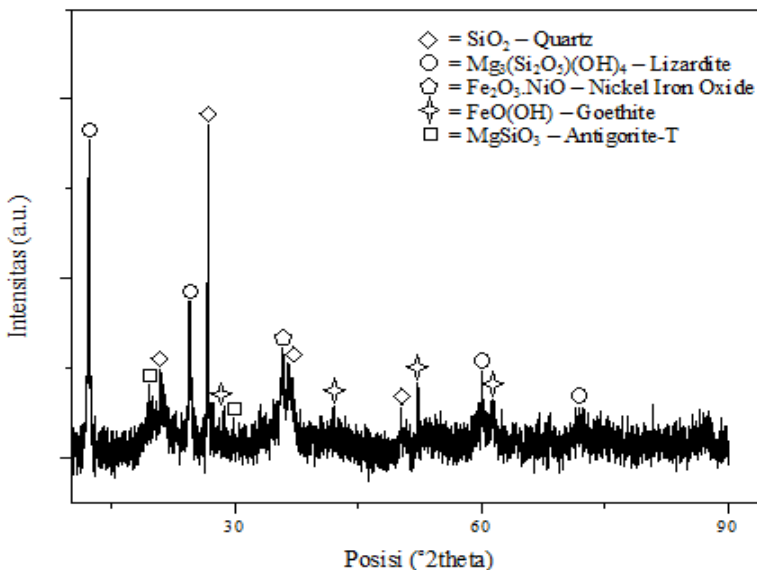
Unsur	Ni	Fe	Si	Mg	Ca	Al	Cr	Mn	Co
%wt	1,25	55,37	1,94	0,42	0,46	5,04	1,54	0,88	1,62

Dari hasil pengujian EDX pada Tabel 4.1., dapat diketahui kadar unsur Ni sebesar 1,25% dan Fe sebesar 55,37%. Dari data tersebut didapatkan rasio Fe : Ni sebesar 44,296 : 1. Rasio ini menunjukkan kemungkinan *grade* Ni pada produk hasil reduksi dan menunjukkan reduksi selektif Ni. Dimana



penambahan agen selektivitas berpengaruh terhadap peningkatan kadar nikel (Ikhwanul, 2017).

Selain itu dilakukan juga karakterisasi XRD untuk mengidentifikasi fasa dari bijih bikel laterit limonitik. Pengujian XRD dilakukan menggunakan mesin XRD *PAN analytical X'Pert* Departemen Teknik Material ITS. Pengujian dilakukan dengan posisi 2θ dari 10° sampai 90° dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar $1,54056 \text{ \AA}$. Sampel yang digunakan pada pengujian XRD menggunakan hasil *sampling* yang sama dengan pengujian EDX. Hasil pengujian XRD pada bijih nikel laterit limonitik dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Hasil Pengujian XRD Bijih Nikel Laterit Limonitik

Hasil pengujian XRD dianalisa dengan menggunakan *Match!3* dimana didapatkan hasil berupa *peak* senyawa yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. diatas. Dari *peak* tersebut dapat



diketahui fasa-fasa yang terdapat pada bijih nikel laterit limonitik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Identifikasi Fasa Bijih Nikel Laterit Limonitik

Fasa	Rumus Kimia	PDF Number
<i>Quartz</i>	SiO_2	96-230-0371
<i>Lizardite</i>	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	96-900-1639
<i>Nickel Iron Oxide</i>	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{NiO}$	96-591-0065
<i>Goethite</i>	$\text{FeO}(\text{OH})$	96-100-9074
<i>Antigorite-T</i>	MgSiO_3	96-100-8768
		96-901-6234

Pada Tabel 4.2. didapatkan hasil analisa *peak* pada bijih nikel laterit limonitik dengan fasa dominan yaitu *quartz* (SiO_2). Selain itu juga terdapat fasa *lizardite* ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), *nickel iron oxide* ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{NiO}$), *goethite* ($\text{FeO}(\text{OH})$) dan *antigorite-T* (MgSiO_3). Mineral silika merupakan senyawa yang banyak ditemui dalam bahan tambang/galian yang berupa mineral silika (SiO_2) (Della, 2002). Selain itu, terdapat juga fasa *goethite* yang secara umum merupakan fasa dominan pada bijih nikel limonitik dimana nikel yang terkandung pada struktur *goethite* membentuk *solid solution* dengan besi oksida (Fe_2O_3) (Habasyi, 1997).

4.1.2. Karakterisasi Batu Bara

Batu bara yang digunakan berasal dari Binuang, Kalimantan Selatan. Pada penelitian ini 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 4.3.

Tabel 4.3. 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</i> <i>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

Batu bara ini memiliki nilai kalori yang cukup tinggi, yaitu 7204 kal/gr dan kadar karbon 42,35%. Sehingga dapat dikategorikan sebagai batu bara golongan sub-bituminus. Hasil dari *proximate analysis* diatas digunakan untuk perhitungan neraca massa yang digunakan untuk menghitung kebutuhan dolomit, batu bara, natrium sulfat dan tepung tapioka untuk proses reduksi.

4.1.3. Karakterisasi Dolomit

Identifikasi komposisi atau kadar unsur dari dolomit menggunakan mesin SEM-EDX *PAN analytical X'Pert*



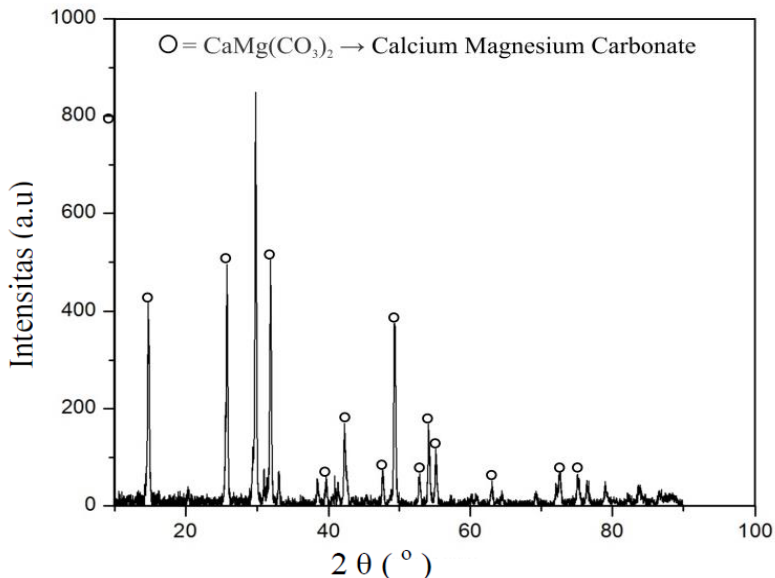
Departemen Teknik Material ITS. Pada penelitian ini menggunakan batu kapur berupa dolomit yang berasal dari Gresik. Sebelum dilakukan pengujian, dolomit telah diayak dengan ayakan 50 *mesh* atau 300 μm . Hasil pengujian EDX pada dolomit ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Hasil Pengujian EDX Dolomit

No.	Elemen	Rumus Kimia	Komposisi (%)
1.	Kalsium	Ca	18,015
2.	Magnesium	Mg	14,30
3.	Karbon	C	12,6215
4.	Oksigen	O	55,0635

Hasil pengujian EDX diatas tampak bahwa batu kapur memiliki kadar Mg yang cukup tinggi, yaitu 14,30%. Dari kadar Mg tersebut dapat disimpulkan bahwa batu kapur yang digunakan ialah *dolostone* atau dolomit bukan *limestone* (Pettijohn, 1957). Dari segi proses aglomerasi, baik Mg maupun Ca yang membentuk senyawa $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ akan membantu proses dengan cara menyediakan gas CO_2 untuk penyediaan gas reduktor proses reduksi seperti yang ditunjukkan pada reaksi 2.2.

Selain itu juga dilakukan pengujian XRD untuk mengidentifikasi fasa dari dolomit. Pengujian XRD menggunakan mesin XRD *PAN analytical X'Pert* Departemen Teknik Material ITS. Pengujian dilakukan dengan posisi 2θ dari 10° sampai 90° dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar 1,54056 Å. Sampel yang digunakan pada pengujian XRD menggunakan hasil *sampling* yang sama dengan pengujian EDX. Hasil pengujian XRD pada dolomit dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Hasil Pengujian XRD Dolomit

Hasil pengujian XRD dianalisa dengan menggunakan *Match!3* dimana didapatkan hasil berupa *peak* senyawa yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. diatas. Dari *peak* tersebut dapat diketahui fasa dalam sampel yaitu dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

4.2. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Fe dan Ni pada Produk Hasil Proses Reduksi

Untuk mengetahui pengaruh variasi rasio batu bara dan dolomit pada proses reduksi bijih nikel laterit limonitik terhadap komposisi unsur pada logam maka dilakukan proses reduksi langsung dengan variasi rasio batu bara : dolomit sebesar 1,19; 1,48 dan 2,09. Produk logam hasil proses reduksi kemudian dilakukan pengujian EDX untuk mengetahui perubahan



komposisi unsur yang terjadi setelah hasil proses reduksi. Hasil pengujian EDX pada produk logam hasil proses reduksi ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Komposisi Unsur Logam Setelah Proses Reduksi

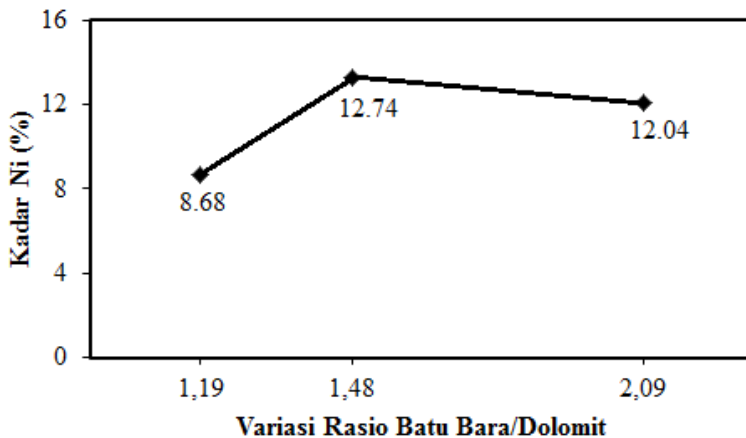
Unsur (%)	Variabel Rasio Batu Bara : Dolomit			
	Briket Awal	1,19	1,48	2,09
Fe	55,37	58,27	68,66	65,11
Ni	1,25	8,68	12,74	12,04
Mg	0,42	5,1	2,52	0,8
Na	-	3,87	1,82	0,79
Ca	0,46	3,41	2,27	1,21
Al	5,04	4,12	1,42	1,34
Si	1,94	13,34	2,88	3,87
Cr	1,54	-	0,86	2,37
S	-	-	6,12	12,48
Mo	-	1,54	-	-
Co	1,62	1,69	-	-
P	-	-	0,90	-
K	-	-	0,56	-
Mn	0,88	-	-	-

Adapun variasi rasio batu bara dan dolomit pada proses reduksi briket nikel laterit limonitik akan mempengaruhi kadar unsur Fe dan Ni pada produk hasil proses reduksi. Dimana reaksi reduksi keduanya terjadi secara berurutan dan kemudian menghasilkan produk berupa logam.



4.2.1. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Ni pada Produk Hasil Proses Reduksi

Variasi rasio batu bara dan dolomit pada proses reduksi briket nikel laterit limonitik akan mempengaruhi kadar unsur Ni pada produk logam hasil proses reduksi yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.

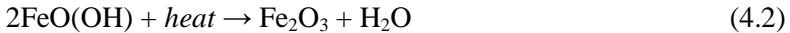


Gambar 4.3. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Ni pada Produk Hasil Proses Reduksi

Dari Gambar 4.3. dapat diketahui bahwa kadar awal Ni bijih nikel laterit limonitik adalah 1,25%, setelah dilakukan proses reduksi pada temperatur 1400°C dengan variasi rasio batu bara dan dolomit yaitu 1,19 diperoleh kadar Ni pada produk hasil proses reduksi sebesar 8,68% dengan peningkatan sebesar 7,43%. Peningkatan ini terjadi karena adanya dekomposisi *goethite* ($\text{FeO}(\text{OH})$) akibat reaksi dehidroksilasi pada temperatur 300°C yang merupakan perubahan struktural yang terjadi karena rusaknya struktur 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*



(FeO(OH)). Dehidroksilasi juga dapat menyebabkan peningkatan luas permukaan spesifik karena pemutusan air yang terikat secara kimia yang mengakibatkan terbukanya struktur mineral *goethite* sehingga nikel dapat terbebas (F.O.Connor, 2006). Adapun reaksi dehidroksilasi *goethite* ditunjukkan pada Persamaan reaksi 4.2 (R.Elliot, 2016).



Setelah itu, dengan semakin meningkatnya temperatur menyebabkan terjadinya reaksi *boudouard*, yang menghasilkan gas CO sebagai akibat reaksi dari karbon (C) dan karbon dioksida (CO₂) seperti yang ditunjukkan pada Persamaan reaksi 4.3 (Li, 2013).



Gas CO yang terbentuk ini kemudian akan mereduksi Fe₂O₃ dan NiO yang masih berikatan menjadi Fe dan Ni. Dilihat dari diagram *ellingham*, reaksi reduksi NiO oleh gas CO mulai terjadi pada temperatur 440°C. Sedangkan reaksi reduksi Fe₂O₃ dengan gas CO terjadi pada temperatur 650°C. Namun kedua reaksi reduksi tersebut belum akan terjadi pada temperatur tersebut oleh gas CO dikarenakan reaksi *boudouard* baru akan terjadi pada temperatur diatas 900°C. Adapun tahapan reaksi pada proses reduksi ditunjukkan pada Persamaan reaksi 4.4 sampai 4.7 (Yopy, 2014)



Dikarenakan *ore* nikel yang kompleks menyebabkan reaksi reduksi terjadi secara simultan dimulai dari NiO menjadi Ni kemudian Fe₂O₃ menjadi Fe₃O₄ dan selanjutnya tereduksi menjadi FeO dan terakhir terbentuk Fe. Dengan tereduksinya NiO



menjadi Ni akan meningkatkan kadar Ni pada hasil reduksi. Adapun nantinya hasil reduksi akan berada dalam bentuk *solid solution* FeNi.

Pada hasil reduksi dengan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 didapatkan kadar nikel paling tinggi yaitu sebesar 12,74% dengan peningkatan sebesar 11,49% dari kadar awal. Terjadi peningkatan kadar nikel dari variabel sebelumnya selain disebabkan adanya reaksi dehidroksilasi, kadar CO/CO₂ juga menjadi parameter. Berdasarkan perhitungan, dengan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,19 didapatkan kadar CO/CO₂ sebesar 0,88 sedangkan pada variabel ini didapatkan kadar CO/CO₂ sebesar 2,23. Adanya peningkatan kadar CO/CO₂ tersebut dikarenakan adanya penambahan jumlah batu bara dan dolomit. Dimana penambahan batu bara dan dolomit pada variabel ini paling banyak dibandingkan dua variabel lainnya. Adanya penambahan batu bara dan dolomit tersebut maka akan menyebabkan volume gas CO menjadi bertambah dan menyebabkan kondisi atmosfer menjadi sangat reduktif. Berdasarkan Gambar 2.14., variabel ini pada temperatur 1400°C menempati zona 1 dimana produk reduksi berupa Fe,Ni. Kondisi atmosfer reduktif menyebabkan banyaknya senyawa NiO tereduksi menjadi Ni. Namun, kondisi atmosfer yang sangat reduktif juga akan menyebabkan banyak oksida Fe tereduksi menjadi logam sehingga kadar Ni akan menurun atau lebih rendah daripada yang seharusnya (R.Elliot, 2016). Maka dari itu, pada variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09 dengan kadar gas CO/CO₂ sebesar 1,56 (zona 2) tidak mengalami perbedaan kadar Ni yang signifikan.

Pada hasil reduksi dengan variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09 didapatkan kadar nikel adalah sebesar 12,04% dengan peningkatan sebesar 10,79% dari kadar awal. Terjadinya penurunan pada variabel ini disebabkan kadar CO/CO₂ yang juga mengalami penurunan dibandingkan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48. Berdasarkan perhitungan, dengan rasio batu bara dan dolomit sebesar 2,09 didapatkan kadar CO/CO₂ sebesar 1,56.

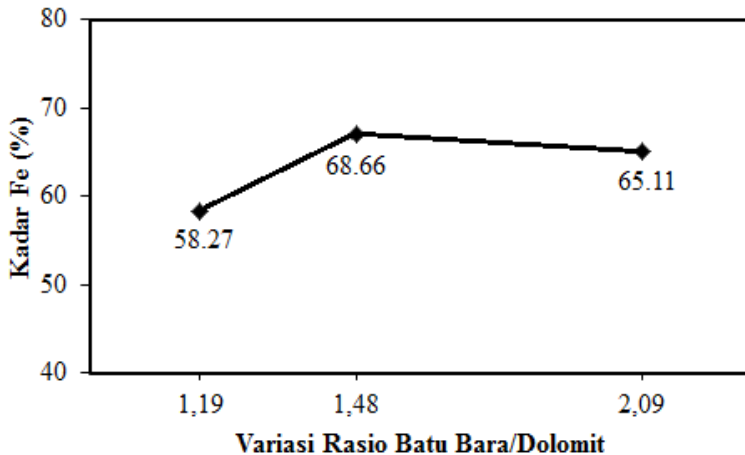


Adanya penurunan kadar CO/CO₂ dibandingkan variabel sebelumnya disebabkan jumlah penambahan batu bara dan dolomit yang lebih sedikit sehingga menyebabkan volume gas CO yang terbentuk juga semakin berkurang pada atmosfer reduksi. Hal tersebut mengakibatkan berkurangnya reduksi NiO menjadi Ni sehingga kadar Ni menjadi turun. Berdasarkan Gambar 2.14., variabel ini pada temperatur 1400°C menempati zona 2. Dimana pada zona 2 didapatkan produk reduksi berupa (Fe,Ni)_{1-y}O + (Fe,Ni). Adapun senyawa oksida besi dan nikel pada zona ini merupakan oksida tahap akhir dari proses reduksi. Sehingga bila dibandingkan dengan produk reduksi pada zona 3, kandungan Ni pada produk reduksi di zona 2 lebih tinggi. Maka dari itu, zona 2 ini menghasilkan *grade* Ni yang moderat dibandingkan dengan dua variabel lainnya (R.Elliot, 2016).

Selain itu, terjadinya penurunan pada variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09 ini juga disebabkan oleh terbentuknya fasa *olivine* ((Mg,Ni)₂SiO₄) pada analisa XRD bagian non magnetik hasil proses reduksi yang terdapat pada sub bab 4.6. Adanya fasa tersebut menunjukkan rendahnya kemampuan reduksi oleh gas CO sehingga menyebabkan Ni terjebak didalam senyawa *olivine* dan menyebabkan kadar Ni menjadi turun (Filipe, 2017).

4.2.2. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Fe pada Produk Hasil Proses Reduksi

Variasi rasio batu bara dan dolomit pada proses reduksi briket nikel laterit limonitik akan mempengaruhi kadar unsur Fe pada produk logam hasil proses reduksi yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Fe pada Produk Hasil Proses Reduksi

Dari Gambar 4.4., dapat diketahui bahwa kadar awal Fe bijih nikel laterit limonitik adalah 55,37%, setelah dilakukan proses reduksi pada temperatur 1400°C dengan variasi rasio batu bara dan dolomit yaitu 1,19 diperoleh kadar Fe pada produk hasil proses reduksi sebesar 58,27% dengan peningkatan sebesar 2,9%. Peningkatan yang terjadi disebabkan oleh reaksi dehidroksilasi dimana terjadi karena adanya dekomposisi *goethite* ($\text{FeO}(\text{OH})$) akibat reaksi dehidroksilasi pada temperatur 300°C menyebabkan terlepasnya senyawa NiO dan Fe_2O_3 pada *goethite* ($\text{FeO}(\text{OH})$) (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 Fe_2O_3 seperti yang ditunjukkan pada Persamaan reaksi 4.4 sampai 4.7. Selanjutnya, NiO akan tereduksi menjadi Ni dan diikuti oleh reduksi besi *hematite* (Fe_2O_3) menjadi besi *magnetite* (Fe_3O_4), 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).

Pada hasil reduksi dengan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 didapatkan kadar Fe paling tinggi yaitu sebesar 68,66% dengan peningkatan sebesar 13,29% dari kadar awal. Besarnya peningkatan kadar Fe dari variabel sebelumnya disebabkan oleh penambahan jumlah batu bara dan dolomit. Dimana penambahan batu bara dan dolomit pada variabel ini paling banyak dibandingkan dua variabel lainnya sehingga mengakibatkan kadar CO/CO₂ semakin bertambah dan menciptakan volume gas CO semakin banyak pada atmosfer reduksi. Semakin banyak volume gas CO yang terbentuk menyebabkan atmosfer reduksi semakin baik sehingga bukan hanya mereduksi lebih banyak NiO menjadi Ni tetapi juga akan mereduksi lebih banyak 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). Berdasarkan perhitungan, kadar CO/CO₂ pada variabel ini yaitu 2,23. Dimana dengan semakin besar jumlah persen reduktor yang digunakan maka akan semakin tinggi konsentrasi yang dihasilkan (Ikhwanul, 2017). Berdasarkan Gambar 2.14., variabel ini pada temperatur 1400°C menempati zona 1 dimana produk reduksi berupa Fe,Ni. Kondisi atmosfer reduktif menyebabkan banyaknya senyawa besi oksida mulai dari Fe₂O₃ yang tereduksi menjadi Fe₃O₄ kemudian menjadi FeO dan terakhir menjadi Fe (logam). (R.Elliot, 2016). Maka dari itu didapatkan peningkatan kadar Fe secara signifikan dibandingkan variabel sebelumnya.

Pada hasil reduksi dengan variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09 didapatkan kadar Fe adalah sebesar 65,11% dengan peningkatan sebesar 9,74% dari kadar awal. Berdasarkan



perhitungan, dengan rasio batu bara dan dolomit sebesar 2,09 didapatkan kadar CO/CO₂ sebesar 1,56. Dari perhitungan tersebut dapat diketahui bahwa kadar CO/CO₂ mengalami penurunan dibandingkan variabel sebelumnya. Hal tersebut disebabkan jumlah penambahan batu bara yang semakin sedikit dibandingkan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 sehingga menyebabkan pembentukan gas CO juga semakin berkurang. Pembentukan gas CO yang lebih sedikit tersebut mengakibatkan reduksi Fe₂O₃ menjadi Fe juga semakin berkurang. Berdasarkan Gambar 2.14., variabel ini pada temperatur 1400°C menempati zona 2 dimana produk reduksi berupa (Fe,Ni)_{1-y}O + (Fe,Ni). Adapun senyawa oksida besi dan nikel pada zona ini merupakan oksida tahap akhir dari proses reduksi. Sehingga bila dibandingkan dengan produk reduksi pada zona 3, kandungan Fe pada produk reduksi di zona 2 lebih tinggi. Maka dari itu, zona 2 ini menghasilkan *grade* Fe yang moderat dibandingkan dengan dua variabel lainnya (R.Elliot, 2016). Adapun terbentuknya besi *wustite* (Fe_{1-y}O) pada zona 2, menunjukkan bahwa y adalah bagian dari tempat kosong ion besi terhadap kisi-kisi besi atau mol fraksi dari tempat kosong ion besi. Dengan adanya gas CO akan terjadi pengurangan oksigen yang bersamaan terbentuknya ion bervalensi 2 dalam posisi kisi normal. Pada permukaan besi oksida akan terjadi bentuk ikatan baru, dari *wustite* berupa ikatan kovalen menjadi besi metalik. Sehingga, dengan tereduksinya besi *wustite* menjadi besi metalik akan meningkatkan kadar Fe. Sedangkan di sisi lain, terjadi desorpsi dimana ion oksigen dari kisi oksida akan keluar dalam bentuk gas CO₂. Pengurangan oksigen dalam besi oksida dapat ditunjukkan dengan adanya beda konsentrasi gas CO₂ antara fasa gas dengan fasa kesetimbangan pada permukaan besi oksida (Toru, 2007).

Selain itu, terjadinya penurunan pada variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09 juga karena terbentuknya fasa *forsterite* ((Mg,Fe)₂SiO₄) pada analisa XRD bagian non magnetik hasil proses reduksi yang terdapat pada sub bab 4.6. Adanya fasa tersebut dikarenakan Fe yang telah tereduksi teroksidasi lagi



menjadi senyawa besi oksida yang akan bereaksi dengan magnesium silikat membentuk senyawa *forsterite* yang menyebabkan Fe terjebak pada pada senyawa *forstrerite*. Senyawa *forsterite* merupakan senyawa yang sulit untuk tereduksi sehingga menurunkan kandungan Fe (J.Foster dkk,2016)

4.3. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap *Recovery* dari Unsur Fe dan Ni pada Produk Hasil Proses 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, presentase perolehan ini dihitung dari massa unsur awal dibanding dengan massa unsur hasil reduksi.

4.3.1. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap *Recovery* dari Unsur Nikel pada Produk Hasil Proses Reduksi

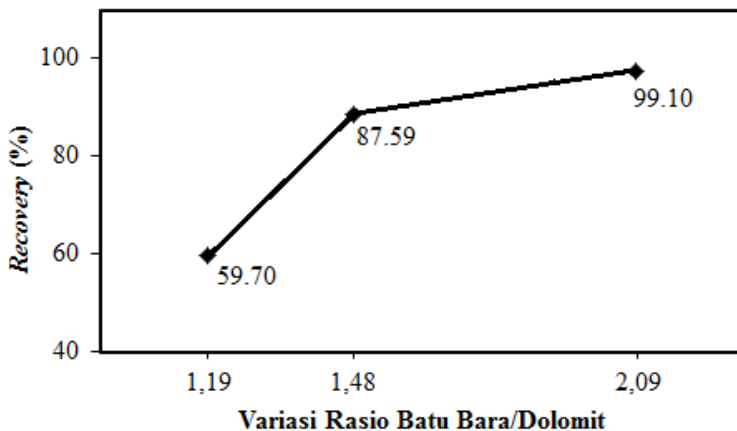
Untuk mengetahui perolehan (*recovery*) nikel dilakukan dengan membandingkan massa nikel awal dengan massa nikel hasil proses reduksi. Massa Ni hasil proses reduksi yang dihitung adalah dari hasil metal dan serbuk, perhitungan massa Ni dilakukan dengan mengalikan kadar Ni dengan total massa perolehan hasil proses reduksi (metal dan serbuk). Perhitungan massa Ni hasil reduksi ditampilkan pada Tabel 4.6., sedangkan perhitungan *recovery* Ni ditunjukkan pada Persamaan 4.8.



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

Batu Bara : Dolomit	Wo Ni (gr)	Wt Serbuk Total (gr)	Wt Metal Total (gr)	%Ni Metal	%Ni Serbuk	Wt Ni (gr)
1,19	0,9	20,941	0,690	8,68	2,28	0,537
1,48	1	16,216	3,604	12,74	2,57	0,876
2,09	0,95	22,030	1,690	12,04	3,35	0,941

$$\% \text{ Recovery Ni} = \frac{\text{Massa Ni Akhir Hasil Reduksi}}{\text{Massa Ni Awal Briket}} \times 100\% \quad (4.8)$$



Gambar 4.5. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap *Recovery* dari Unsur Nikel pada Produk Hasil Proses Reduksi

Berdasarkan Gambar 4.5., dapat diketahui bahwa pada variasi rasio batu bara dan dolomit sebesar 1,19 dan 1,48 mengalami peningkatan nilai *recovery* Ni dari 59,70% menjadi 87,59%. Adanya peningkatan tersebut disebabkan pada perhitungan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 didapatkan massa dan kadar Ni pada serbuk dan metal lebih besar dibandingkan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,19. Hal



tersebut dikarenakan adanya penambahan batu bara dan dolomit sehingga massa produk yang ada lebih besar. Selain itu, adanya peningkatan pembentukan volume gas CO menyebabkan lebih banyak NiO yang tereduksi menjadi Ni. Maka dari itu, dengan semakin besar jumlah persen reduktor yang digunakan maka akan semakin tinggi konsentrat yang dihasilkan (Ikhwanul, 2017). Namun, pada variasi rasio batu bara dan dolomit 1,19 dan 1,48 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 belum berjalan sempurna.

Adapun pada variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 juga mengalami peningkatan dengan nilai *recovery* Ni sebesar 99,10%. Dimana nilai *recovery* Ni pada variabel ini merupakan yang paling tinggi dibandingkan kedua variabel lainnya. Bila dilakukan perhitungan dengan rasio batu bara dan dolomit sebesar 2,09 didapatkan kadar CO/CO₂ sebesar 1,56. Dimana berdasarkan Gambar 2.14., pada temperatur 1400°C variabel ini berada pada zona 2 dimana produk reduksi berupa (Fe,Ni)_{1-y}O + (Fe,Ni). Adapun senyawa oksida besi dan nikel pada zona ini merupakan oksida tahap akhir dari proses reduksi. Sehingga bila dibandingkan dengan produk reduksi zona 3, maka produk reduksi di zona 2 mendapatkan *recovery* Ni yang lebih tinggi dibandingkan variabel sebelumnya yaitu variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 (R.Elliot, 2016). Hal tersebut dikarenakan oksida nikel yang ada produk reduksi akan tereduksi menjadi Ni sehingga nilai *recovery* Ni menjadi meningkat. Sedangkan pada variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 memiliki kadar CO/CO₂ yang lebih tinggi yaitu 2,23 dimana berdasarkan Gambar 2.14. variabel ini menempati zona 1. Pada Zona 1, produk reduksi yang dihasilkan hanya berupa Ni dan tidak terdapat oksida nikel sehingga nilai *recovery* Ni yang didapatkan tidak sebanyak yang didapatkan variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09 .



Selain itu, terjadinya peningkatan pada variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09 juga disebabkan oleh adanya fasa *iron sulfide* (FeS) pada analisa XRD bagian non magnetik hasil proses reduksi yang terdapat pada sub bab 4.6. Terbentuknya fasa *iron sulfide* (FeS) merupakan hasil reaksi antara besi dengan belerang dimana pada saat campuran bijih nikel laterit dan Na_2SO_4 dipanaskan maka, Na_2SO_4 terurai menjadi Na_2O , Na_2S dan S. Belerang yang terbentuk kemudian akan bereaksi dengan besi membentuk FeS, sedangkan Na_2O akan bereaksi dengan silikat membentuk senyawa natrium silikat yang mempunyai titik leleh rendah. Adanya fasa FeS dan natrium silikat yang mempunyai titik leleh rendah akan melarutkan partikel-partikel logam dan mempercepat proses perpindahan masa partikel logam sehingga memacu pertumbuhan pertumbuhan partikel logam. Terbentuknya ukuran partikel logam yang relatif besar akan mempermudah proses peningkatan kadar logam Ni dengan alat pemisah magnet. (Man Jiang, 2013)

4.3.2. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap *Recovery* dari Unsur Besi pada Produk Hasil Proses Reduksi

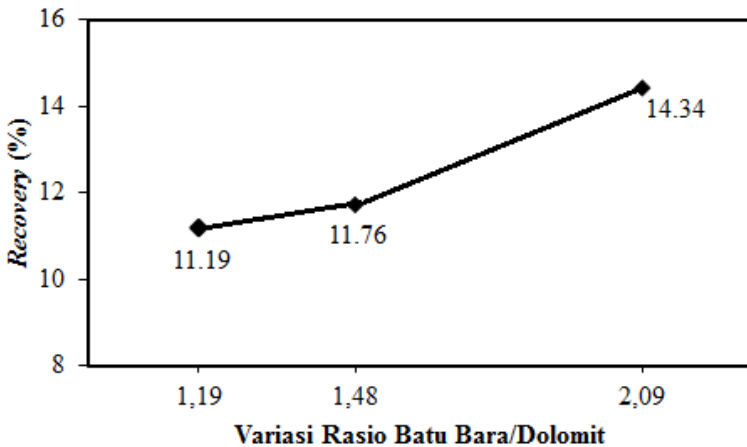
Untuk mengetahui perolehan (*recovery*) besi dilakukan dengan membandingkan massa besi awal dengan massa besi hasil proses reduksi. Massa Fe hasil proses reduksi yang dihitung adalah dari hasil metal dan serbuk, perhitungan massa Fe dilakukan dengan mengalikan kadar Fe dengan total massa perolehan hasil reduksi (metal dan serbuk). Perhitungan massa Fe hasil reduksi ditampilkan pada Tabel 4.7., sedangkan perhitungan *recovery* Fe ditunjukkan pada Persamaan 4.9.



Tabel 4.7. Perhitungan Massa dan *Recovery* Fe Hasil Reduksi

Batu Bara : Dolomit	Wo Fe (gr)	Wt Serbuk Total (gr)	Wt Metal Total (gr)	%Fe Metal	%Fe Serbuk	Wt Fe (gr)
1,19	39,866	20,941	0,690	58,27	19,39	4,462
1,48	44,296	16,216	3,604	68,66	16,86	5,209
2,09	42,081	22,030	1,890	65,11	21,80	6,033

$$\% \text{ Recovery Fe} = \frac{\text{Massa Fe Akhir Hasil Reduksi}}{\text{Massa Fe Awal Briket}} \times 100\% \quad (4.9)$$



Gambar 4.6. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap *Recovery* dari Unsur Besi pada Produk Hasil Proses Reduksi

Berdasarkan Gambar 4.6., dapat diketahui bahwa pada variasi rasio batu bara dan dolomit sebesar 1,19 dan 1,48 mengalami peningkatan nilai *recovery* Fe yang tidak terlalu signifikan dari 11,19% menjadi 11,76%. Adanya peningkatan



tersebut disebabkan pada perhitungan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 dimana didapatkan massa dan kadar Fe pada serbuk dan metal lebih besar dibandingkan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,19. Hal tersebut dikarenakan adanya penambahan batu bara dan dolomit sehingga massa yang ada lebih besar. Selain itu, adanya peningkatan pembentukan volume gas CO menyebabkan lebih banyak oksida besi yang tereduksi menjadi Fe.

Selain itu, peningkatan juga terjadi pada variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09 dimana didapatkan nilai *recovery* Fe sebesar 14,34%. Peningkatan tersebut dapat dikatakan cukup signifikan dibandingkan variabel sebelumnya dan merupakan nilai *recovery* Fe paling tinggi diantara kedua variabel lainnya. Hal tersebut dikarenakan produk reduksi pada variabel ini berupa $(\text{Fe,Ni})_{1-y}\text{O} + (\text{Fe,Ni})$ yang bila dilihat pada Gambar 2.14. berada pada zona 2 tepatnya di kadar CO/CO₂ 1,56. Adapun nilai kadar CO/CO₂ didapatkan melalui perhitungan. Adapun pada produk reduksi tersebut masih terdapat oksida besi dan nikel. Dimana oksida besi tersebut merupakan oksida tahap akhir dari proses reduksi. Sehingga bila dibandingkan dengan produk reduksi zona 3, maka produk reduksi di zona 2 mendapatkan *recovery* Fe yang lebih tinggi dibandingkan variabel sebelumnya yaitu variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 (R.Elliot, 2016). Hal tersebut dikarenakan oksida besi (*wustite*) yang ada produk reduksi akan tereduksi menjadi Fe sehingga nilai *recovery* Fe menjadi meningkat. Sedangkan pada variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 memiliki kadar CO/CO₂ yang lebih tinggi yaitu 2,23 dimana berdasarkan Gambar 2.14. variabel ini menempati zona 1. Pada Zona 1, produk reduksi yang dihasilkan hanya berupa Fe dan tidak terdapat oksida besi sehingga nilai *recovery* Fe yang didapatkan tidak sebanyak yang didapatkan variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09.



4.4. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit 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).

Tabel 4.8. Perbandingan *Selectivity Factor* di Beberapa Penelitian

Nama Peneliti	Reduktan	Aditif	Waktu Reduksi	Temperatur Reduksi	Faktor Selektivitas
Zulfiandi (2016)	Batu Bara	-	1 jam	1400°C	1,6
Rudi dkk (2016)	Batu Bara	Na ₂ SO ₄	1 jam	1000 °C	1,87
R. Elliot dkk (2016)	Batu Bara	Sulfur	1 jam	1000 °C	1,69
Hiwei dkk (2015)	Batu Bara	NaCl	30 min	1200 °C	1,25

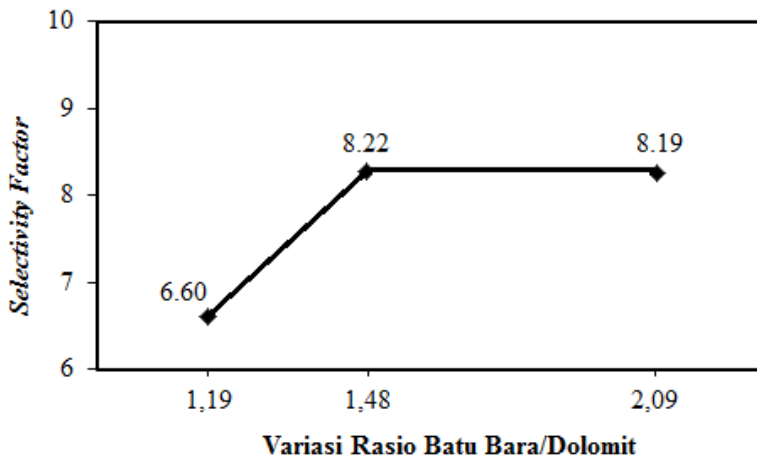
Dari Tabel 4.8. didapatkan perbandingan *selectivity factor* dari beberapa peneliti. Dimana tabel tersebut menunjukkan bahwa penggunaan bahan aditif Na₂SO₄ memiliki faktor selektivitas yang paling tinggi dibandingkan bahan aditif yang lain. Maka dari



itu, pada penelitian ini digunakan bahan aditif berupa Na_2SO_4 untuk meningkatkan selektivitas Ni pada proses reduksi.

Adapun pada penelitian ini, faktor selektivitas dihitung berdasarkan Persamaan rumus 4.10. Sedangkan hasil perhitungan faktor selektivitas pada masing-masing variasi rasio batu bara dan dolomit disajikan pada Gambar 4.7.

$$\text{Selectivity} = \frac{\% \text{Fe Awal} \times \% \text{Ni Akhir}}{\% \text{Ni Awal} \times \% \text{Fe Akhir}} \times 100\% \quad (4.10)$$



Gambar 4.7. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Faktor Selektivitas Produk Hasil Proses Reduksi

Pada Gambar 4.7. menunjukkan pengaruh variasi rasio batu bara dan dolomit terhadap faktor selektivitas produk hasil proses reduksi. Dimana faktor selektivitas mengalami peningkatan pada variasi rasio batu bara dan dolomit 1,19 dan 1,48 yaitu berturut-turut sebesar 6,60 dan 8,22. 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,

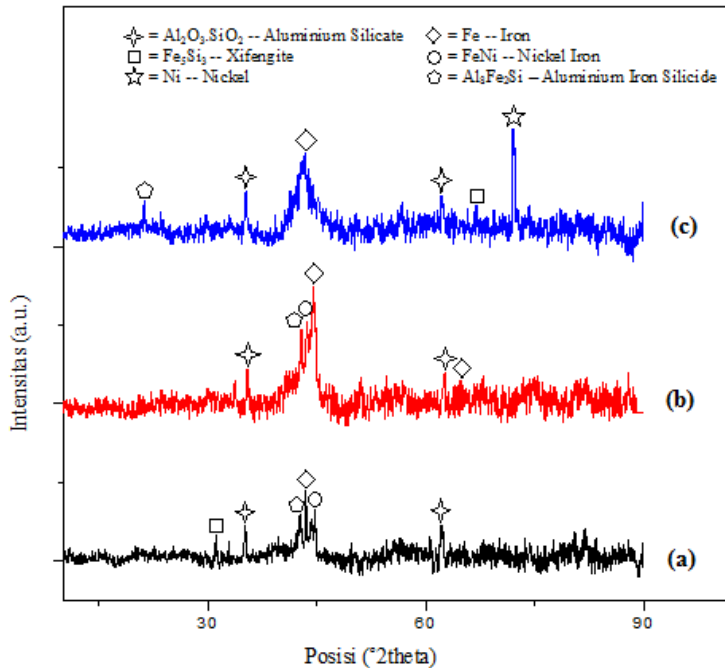


2016). Dilihat dari kadar akhir Ni pada variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 didapatkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan pada variasi rasio batu bara dan dolomit 1,19. Hal tersebut kemudian mempengaruhi nilai faktor selektivitas menjadi lebih tinggi.

Selain itu, pada variabel selanjutnya mengalami sedikit penurunan yaitu menjadi 8,19. Hal tersebut dikarenakan jumlah penambahan batu bara dan dolomit yang lebih sedikit dibandingkan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 sehingga mengakibatkan gas CO yang terbentuk menjadi lebih sedikit. Dengan terbentuknya gas CO yang sedikit mengakibatkan kemampuan reduksi Ni menjadi menurun sehingga nilai faktor selektivitas menjadi menurun.

4.5. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit 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* Departemen Teknik Material ITS. Pengujian dilakukan dengan posisi 2θ dari 10° sampai 90° dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar $1,54056 \text{ \AA}$. Adapun hasil pengujian XRD dianalisa dengan menggunakan *Match!*3. Hasil pengujian XRD produk logam hasil proses reduksi ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit (a) 1,19 (b) 1,48 (c) 2,09 Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Produk Hasil Proses Reduksi

Dari Gambar 4.8. dapat diidentifikasi fasa yang terdapat pada produk logam hasil reduksi yang ditunjukkan pada Tabel 4.9.



Tabel 4.9. Identifikasi Fasa pada Produk Logam Hasil Proses Reduksi

Fasa	Rumus Kimia	PDF Number
<i>Iron</i>	Fe	96-900-8539
		96-720-4808
		96-901-3476
<i>Nickel Iron</i>	FeNi	96-152-4200
		96-901-0018
<i>Aluminium Iron Silicide</i>	Al ₈ Fe ₂ Si	96-210-6288
		96-231-0329
<i>Aluminium Silicate</i>	Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	96-900-0713
		96-101-0925
		96-901-4495
<i>Xifengite</i>	Fe ₅ Si ₃	96-901-4495
<i>Nickel</i>	Ni	96-901-3008

Berdasarkan Gambar 4.8. bagian (a) dan Tabel 4.9., dapat diketahui fasa-fasa yang terbentuk pada produk logam hasil proses reduksi dengan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,19. Pada variabel ini didapatkan fasa *nickel iron* (FeNi) yang terletak pada puncak 2θ 44,79. Hal ini menunjukkan bahwa pada variabel ini telah terjadi reaksi reduksi dengan adanya penyedia CO₂ dari dolomit 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). Kemudian besi dan nikel metalik yang telah terbentuk secara bertahap berkumpul dan membentuk partikel logam yang lebih besar. Namun, pada puncak tertinggi 2θ 43,49 masih terdapat fasa *iron* (Fe) pada puncak 2θ 43,49. Hal tersebut menunjukkan bahwa kurangnya energi yang dibutuhkan untuk membentuk *solid solution* besi nikel metalik. Selain itu, Pada puncak 2θ 31,12 didapatkan fasa *xifengite* (Fe₅Si₃). Dimana fasa tersebut hasil reaksi antara silikat dengan besi yang sudah tereduksi oleh gas CO. Pada puncak 2θ 35,16 dan 62,29 merupakan fasa *aluminium*



silicate ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$). Fasa ini merupakan pengotor yang belum tereduksi oleh gas CO sehingga masih terikat pada metal hasil reduksi. Kemudian, pada puncak 2θ 42,73 merupakan fasa *aluminium iron silicide* ($\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$). Fasa ini merupakan kelompok dari Al-Fe-Si dimana hasil reaksi antara aluminium, besi dan silikat bergantung terhadap konsentrasi dari Fe dan Si (Basak, 2017).

Pada variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 juga masih didapatkan fasa *aluminium silicate* ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) pada puncak 2θ 35,38 dan 62,49, fasa *aluminium iron silicide* ($\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$) pada puncak 2θ 42,89. Selain itu, fasa *iron* (Fe) pada puncak 2θ 44,53 dan 64,73. Dimana fasa *iron* (Fe) merupakan puncak tertinggi pada hasil XRD. Hal tersebut menunjukkan bahwa gas CO pada atmosfir reduksi cukup untuk mereduksi Fe_2O_3 menjadi Fe. Adapun pada variabel ini juga terbentuk fasa *nickel iron* (FeNi) pada puncak 2θ 43,70 yang mengindikasikan bahwa penambahan jumlah batu bara dan dolomit yang lebih banyak pada variabel ini dibandingkan kedua variabel lainnya berpengaruh terhadap banyaknya gas CO yang terbentuk sehingga akan semakin banyak terbentuk Fe dan Ni. Kemudian Fe dan Ni yang telah tereduksi kemudian akan bergabung membentuk *solid solution* besi nikel metalik (Olli, 1995).

Pada variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09 juga didapatkan fasa *aluminium iron silicide* ($\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$), pada puncak 2θ 21,27, fasa *aluminium silicate* ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) pada puncak 2θ 35,36 dan 62,26 dan fasa *xifengite* (Fe_5Si_3) pada puncak 2θ 63,77. Adapun pada variabel ini terbentuk fasa *iron* (Fe) pada puncak 2θ 43,37 dan fasa *nickel* (Ni) pada puncak tertinggi 2θ 72,14. Tingginya intensitas *peak* Ni menunjukkan kristalinitas logam Ni yang semakin bagus (Wahyu, 2016). Dari hasil XRD tidak terbentuk fasa *Nickel Iron*, hal ini dibuktikan dengan tidak adanya puncak yang menunjukkan senyawa FeNi namun terbentuk puncak masing-masing unsur Fe dan Ni. Hal tersebut dikarenakan



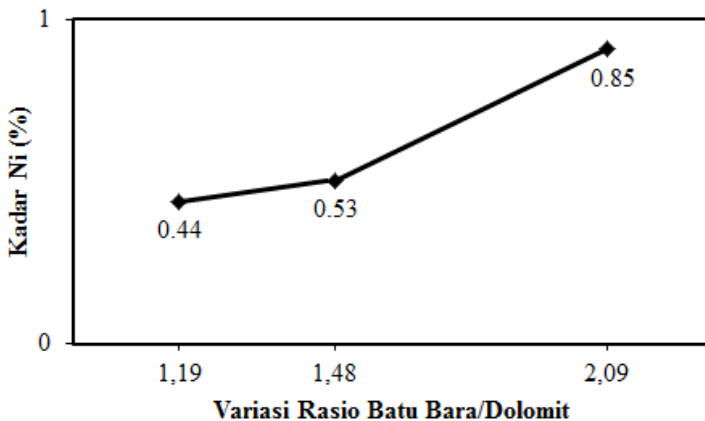
kurangnya energi yang dibutuhkan untuk membentuk *solid solution* besi nikel metalik.

4.6. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit 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 magnetik dimana bagian non magnetik tidak tertarik oleh magnet.

4.6.1. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Ni pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi

Variasi batu bara-dolomit pada proses reduksi briket nikel laterit limonitik akan mempengaruhi kadar unsur Ni pada produk bagian non magnetik hasil proses reduksi yang ditunjukkan pada Gambar 4.9.

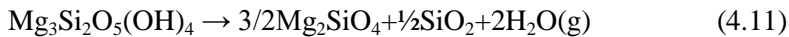


Gambar 4.9. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Ni pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi



Pada Gambar 4.9. 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 rasio batu bara dan dolomit secara berturut-turut didapatkan kadar Ni sebesar 0,44%, 0,53% dan 0,85%. Dimana kadar Ni tersebut mengalami penurunan dibandingkan kadar Ni awal. Hal tersebut dikarenakan pada hasil XRD bagian non magnetik pada ketiga variabel didapatkan fasa *olivine* ($(\text{Mg},\text{Ni})_2\text{SiO}_4$). Dimana fasa *olivine* tersebut menjebak nikel yang ada. Hal tersebut yang akhirnya membuat kadar dan *recovery* Ni pada logam naik.

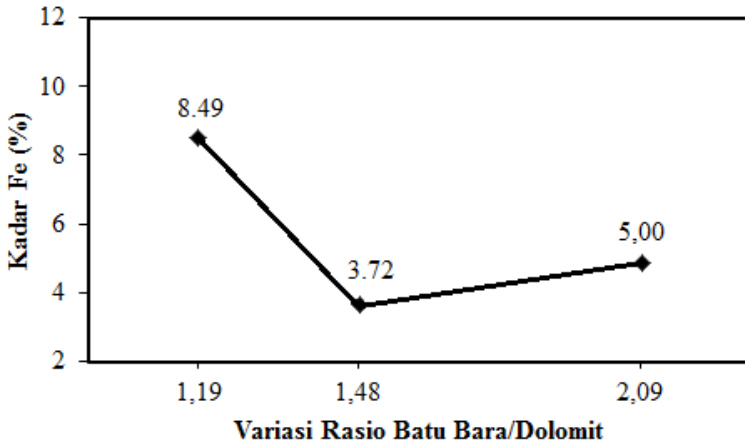
Adapun fasa *olivine* terbentuk melalui proses dehidroksilasi fasa *lizardite* ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) dan proses rekristalisasi mineral silikat yang ada pada bijih nikel laterit limonitik ditunjukkan pada Persamaan reaksi 4.11 (Li, 2011);



Adapun nantinya nikel akan terjebak ke dalam Mg_2SiO_4 membentuk fasa *olivine* ($(\text{Mg},\text{Ni})_2\text{SiO}_4$) (Iwan, 2014).

4.6.2. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Fe pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi

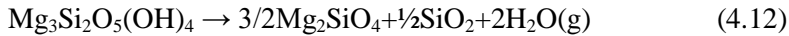
Variasi batu bara-dolomit pada proses reduksi briket nikel laterit limonitik akan mempengaruhi kadar unsur Fe pada produk bagian non magnetik hasil proses reduksi yang ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Kadar Unsur Fe pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi

Pada Gambar 4.10. dapat diketahui bahwa senyawa pengotor (bagian non magnetik) yang ada masih membawa unsur penting besi didalamnya. Hal tersebut dikarenakan kurang optimalnya gas CO untuk mereduksi keseluruhan Fe_2O_3 dan NiO. Pada variasi rasio batu bara dan dolomit secara berturut-turut didapatkan kadar Fe sebesar 8,49%, 3,72% dan 5,00%. Dimana kadar Fe tersebut mengalami penurunan dibandingkan kadar Fe awal. 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 limonitik ditunjukkan pada Persamaan reaksi 4.12 (Li, 2011);



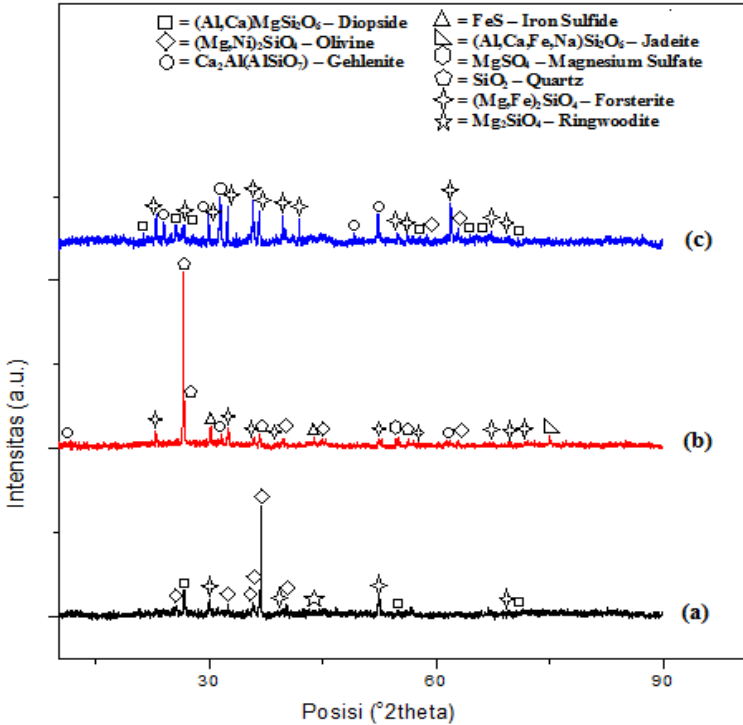
Bijih nikel laterit limonitik merupakan salah satu jenis bijih nikel yang memiliki kadar unsur Fe yang tinggi dalam bentuk fasa *goethite* sebagai fasa dominan, sehingga fasa *forsterite* tersebut terbentuk berupa larutan padat melalui proses substitusi unsur Fe dengan Mg ke dalam fasa Mg_2SiO_4 hingga membentuk fasa $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ yang memiliki kadar unsur Fe tinggi di dalam fasa, dengan sedikit kandungan unsur nikel di dalamnya (Brindley, 2009). Reaksi endotermik dehidroksilasi gugus hidroksi dari senyawa *lizardite* terjadi pada temperatur 750°C , dan diikuti dengan reaksi eksotermik pada temperatur 950°C yang merupakan rekristalisasi fasa *forsterite*. Pada temperatur 750°C , struktur dari *lizardite* dan *goethite* mengalami kerusakan, sehingga temperatur ini merupakan saat yang tepat untuk melakukan proses benefisiasi nikel karena struktur dari *lizardite* menjadi terbuka terhadap pengaruh luar (Brindley, 2009). Tetapi bila dipanaskan lebih lanjut, maka suatu reaksi endotermik yang cepat akan terjadi pada temperatur rekristalisasi *forsterite*. Dalam kaitannya dengan proses ekstraksi nikel, pada tahap ini logam nikel dan besi akan sulit untuk direduksi lebih lanjut karena fasa yang terbentuk akan menjebak logam besi dan nikel di dalamnya sehingga proses reduksi akan terhambat (Mackenzie, 2009).

4.6.3. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi

Identifikasi fasa dari hasil reduksi yaitu berupa bagian non magnetik dilakukan menggunakan mesin XRD *PAN analytical X'Pert* Departemen Teknik Material ITS. Pengujian dilakukan dengan posisi 2θ dari 10° sampai 90° dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar $1,54056 \text{ \AA}$. Adapun hasil pengujian XRD dianalisa dengan menggunakan *Match!3*. Hasil



pengujian XRD produk bagian non magnetik hasil proses reduksi ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit (a) 1,19 (b) 1,48 (c) 2,09 Terhadap Fasa yang Terbentuk pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi

Dari Gambar 4.11., dapat diidentifikasi fasa yang terdapat pada produk bagian non magnetik hasil reduksi yang ditunjukkan pada Tabel 4.10.



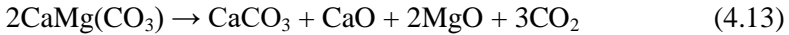
Tabel 4.10. Identifikasi Fasa pada Bagian Non Magnetik Hasil Proses Reduksi

Fasa	Rumus Kimia	PDF Number
<i>Gehlenite</i>	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$	96-900-6114
<i>Olivine</i>	$(\text{Mg},\text{Ni})_2\text{SiO}_4$	96-900-1102 96-900-2633
<i>Diopside</i>	$(\text{Al},\text{Ca})\text{MgSi}_2\text{O}_6$	96-900-5183
<i>Ringwoodite</i>	Mg_2SiO_4	96-901-4786
<i>Forsterite</i>	$(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$	96-900-1667
<i>Quartz</i>	SiO_2	96-901-1494
<i>Magnesium Sulfate</i>	MgSO_4	96-230-0130
<i>Jadeite</i>	$(\text{Al},\text{Ca},\text{Fe},\text{Na})\text{Si}_2\text{O}_6$	96-901-0328
<i>Iron Sulfide</i>	FeS	96-101-1181

Berdasarkan Gambar 4.11. bagian (a) dan Tabel 4.9., dapat diketahui fasa-fasa yang terbentuk pada produk bagian non magnetik hasil proses reduksi dengan variasi rasio batu bara dan dolomit 1,19. Pada variabel ini didapatkan fasa dominan yaitu fasa *olivine* ($(\text{Mg},\text{Ni})_2\text{SiO}_4$) pada puncak 2θ 25,70; 32,56; 35,95; 36,86; 36,97 dan 40,29. 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 ditunjukkan pada Persamaan reaksi 4.11 (Li, 2011). Adapun nantinya nikel akan terjebak ke dalam Mg_2SiO_4 membentuk fasa *olivine* ($(\text{Mg},\text{Ni})_2\text{SiO}_4$). Selain itu, terbentuk juga fasa *forsterite* ($(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$) pada puncak 2θ 30,05; 39,86; 52,58 dan 69,71. Dimana mekanisme pembentukan yang terjadi sama halnya dengan pembentukan fasa *olivine*, namun yang terjebak ialah Fe bukan Ni (Iwan, 2014). Selain itu, didapatkan juga fasa *ringwoodite* (Mg_2SiO_4) pada puncak 2θ 44,74. Dimana pembentukan fasa diakibatkan oleh reaksi dehidroksilasi pada fasa *lizardite* dalam bijih nikel limonitik yang terdekomposisi menjadi Mg_2SiO_4 , SiO_2 dan juga H_2O . Pada puncak 2θ 26,73; 56,88 dan 71,62 diidentifikasi sebagai fasa *diopside*



((Al,Ca)MgSi₂O₆). Dimana fasa ini kemungkinan merupakan hasil reaksi antara CaO hasil dekomposisi dolomit seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 4.13. dengan Al₂O₃ dan hasil dari reaksi dehidroksilasi fasa *lizardite* yaitu Mg₂SiO₄.



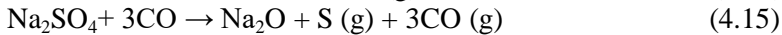
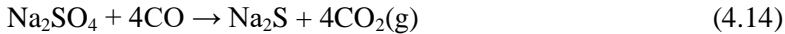
Pada variasi rasio batu bara dan dolomit 1,48 didapatkan fasa *gehlenite* (Ca₂Al(AlSiO₇)) pada puncak 2θ 23,97; 29,13; 31,39; 49,21 dan 52,29. Pembentukan fasa *gehlenite* kemungkinan merupakan hasil reaksi antara CaO hasil dekomposisi dolomit yang ditunjukkan pada Persamaan reaksi 4.13 dengan dengan SiO₂ dan Al₂O₃ (Harabi, 2017). Selain itu pada variabel ini juga terbentuk fasa *forsterite* ((Mg,Fe)₂SiO₄) sebagai fasa dominan pada puncak 2θ 22,94; 25,59; 29,85; 32,38; 35,80; 36,59; 39,73; 41,83; 54,98; 56,20; 61,94; 67,11 dan 69,54, fasa *diopside* ((Al,Ca)MgSi₂O₆) pada puncak 2θ 18,63; 24,93; 26,64; 56,91; 62,86; 65,21 dan 71,77 serta fasa *olivine* ((Mg,Ni)₂SiO₄) pada puncak 2θ 58,65 dan 62,13.

Pada variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09 didapatkan fasa *quartz* (SiO₂) pada puncak 2θ 26,46; 26,55; 36,53 dan 54,86. Adapun fasa ini merupakan senyawa yang banyak ditemui dalam bahan tambang/galian yang berupa mineral silika (SiO₂) (Della, 2002). Selain itu, fasa SiO₂ juga didapatkan dari hasil dehidroksilasi fasa *lizardite*. Selain itu, ditemukan juga fasa *jadeite* (Al,Ca,Fe,Na)Si₂O₆ pada puncak 2θ 35,82. Dimana fasa tersebut kemungkinan merupakan hasil reaksi dari dekomposisi agen selektivitas yaitu Na₂O dengan dekomposisi dari dolomit (CaO) Al₂O₃ serta substitusi unsur besi. Dimana kadar Fe dan Na pada fasa ini sedikit lebih tinggi (Shin, 2009). Pada puncak 2θ 54,59 ditemukan fasa *magnesium sulfate* (MgSO₄). Dimana fasa tersebut merupakan hasil reaksi dari dekomposisi agen selektivitas Na₂SO₄ yaitu belerang dengan dekomposisi dari dolomit yaitu MgO. Selanjutnya pada puncak 2θ 30,11 dan 43,82 ditemukan fasa FeS.

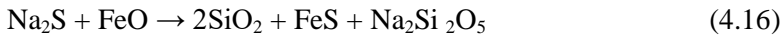


Mekanisme *selective reduction* dari nikel terjadi sesuai dengan Persamaan reaksi 4.14 sampai 4.17 (Jiang, 2013).

1. Terjadi dekomposisi termal dan reduksi natrium sulfat



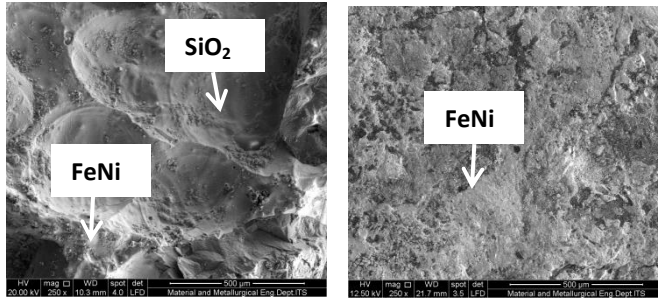
2. Pengikatan Fe membentuk FeS



Selain itu juga, sama halnya dengan variabel sebelumnya pada variabel ini juga ditemukan fasa *gehlenite* ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$) pada puncak 2θ 10,69; 31,57 dan 61,12, fasa *forsterite* ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) sebagai fasa dominan pada puncak 2θ 22,80; 32,38; 35,82; 38,94; 52,45; 56,23; 69,62; 67,13 dan 71,85, serta fasa *olivine* ($(\text{Mg,Ni})_2\text{SiO}_4$) pada puncak 2θ 44,81 dan 62,77.

4.7. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit Terhadap Morfologi pada Produk Hasil Proses Reduksi

Untuk dapat mengetahui bentuk morfologi briket hasil proses reduksi serta perilaku pembentukan logam di dalamnya, dilakukan pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada produk logam hasil proses reduksi untuk masing-masing variasi rasio batu bara dan dolomit. Pada penelitian ini, pengujian SEM dilakukan dengan perbesaran 250x untuk mengetahui bentuk aglomerat dan melakukan pengujian EDX pada *spot-spot* tertentu untuk mengetahui perilaku terbentuknya metal di dalam hasil reduksi. Adapun gambar morfologi logam pada hasil proses reduksi untuk masing-masing variasi rasio batu bara dan dolomit ditampilkan pada Gambar 4.12. di bawah.



(a)

(b)



(c)

Gambar 4.12. Pengaruh Variasi Rasio Batu Bara dan Dolomit (a) 1,19 (b) 1,48 (c) 2,09 Terhadap Morfologi pada Produk Hasil Proses Reduksi

Pada Gambar 4.12. didapatkan morfologi pada produk hasil proses reduksi berupa logam FeNi. Dimana terlihat adanya perbedaan morfologi pada ketiga variabel tersebut. Pada Gambar 4.12. (a) terdapat dua daerah yang pertama yaitu adanya bulatan-bulatan besar berwarna terang dan yang kedua daerah dengan permukaan yang rata yang berwarna keabuan. Menurut Yan Jun Li (2013), warna silver keabuan merupakan warna senyawa FeNi dan warna terang merupakan silika. Pada permukaan yang rata tersebut menandakan aglomerat yang berkumpul. Adapun hasil SEM tersebut bersesuaian dengan hasil kadar Fe dan Ni pada



logam dimana kadar Fe dan Ni pada variabel ini merupakan yang paling rendah.

Pada Gambar 4.12. (b) terlihat adanya perbedaan dibandingkan variabel sebelumnya yaitu tidak adanya bulatan – bulatan namun morfologi yang terlihat berupa permukaan yang rata dengan warna silver keabuan. Hal tersebut menandakan aglomerat FeNi sudah terbentuk dan teraglomerasi menjadi satu. Hal tersebut dibuktikan dengan hasil kadar Fe dan Ni pada variabel ini didapatkan hasil yang paling tinggi dibandingkan kedua variabel lainnya. Hal ini membuktikan bahwa dengan adanya penambahan batu bara dan dolomit maka akan semakin banyak aglomerat FeNi yang terbentuk.

Sedangkan, pada variabel 2,09 yang ditunjukkan pada Gambar 4.12. (c) terlihat permukaan rata dimana daerah tersebut diindikasikan sudah terbentuknya aglomerat FeNi. Namun, pada sisi lainnya masih terdapat adanya bulatan-bulatan pipih berwarna terang pada hasil morfologi. Hal tersebut menandakan masih ada daerah yang belum terbentuk aglomerat FeNi atau diindikasikan sebagai silika. Adapun pada hasil morfologi pada variabel ini berbeda daripada sebelumnya dikarenakan jumlah penambahan batu bara dan dolomit yang lebih sedikit dibandingkan sebelumnya sehingga berpengaruh terhadap hasil logam yang ada.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. 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%, sedangkan Peningkatan kadar Fe tertinggi didapatkan saat briket direduksi dengan rasio batu bara dan dolomit 1,48, dengan peningkatan kadar Fe sebesar 13,29%.
2. 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% , sedangkan *recovery* Fe paling tinggi didapatkan dengan rasio batu bara dan dolomit 2,09 yaitu sebesar 14,34%.
3. Dilihat dari morfologi produk hasil reduksi dengan variasi rasio batu bara dan dolomit 2,09 mempunyai morfologi yang paling baik dengan terbentuknya aglomerat FeNi secara keseluruhan.

5.2 Saran

1. Mempelajari mengenai reaktor *bed* yang digunakan dalam proses reduksi.
2. Melakukan penelitian tentang mekanisme pembentukan partikel logam selama proses reduksi.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Astuti, W., S Novita dan F Nurjaman. 2016. **Reduction Mechanism of Indonesian Limonite Ore by Solid Reducing Agents**. Lampung : LIPI.
- Bergman, R. A. 2003. **Nickel production from low-iron laterite ores: process descriptions**. CIM Bulletin., Vol. 96, (1072), pp. 127–138, 2003.
- Cao, Chang, Zhengliang Xue dan Hongjuan Duan. 2016. **Making Ferronickel From Laterite Nickel Ore by Coal-Based Self-Reduction and High Temperature Melting Process**. China : Wuhan University of Science and Technology.
- Crudwell, F. K. 2011. **Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals**. Amsterdam : Elsevier Ltd.
- Dalvi, Ashok D, W Gordon Bacon, dan Robert C Osborne. 2004. **The Past and The Future of Nickel Laterites**. Canada : Inco Limited.
- D.Q. Zhu, Y. Chui dkk. 2012. **Upgrading Low Nickel Content Laterite Ores Using Selective Reduction Followed By Magnetic Separation**. China : Central South University.
- Della, V.P., Kuhn, I, dan Hotza, D. 2002. **Rice Husk Ash as an Alternate Source for Active Silica Production**. Materials Letters. 57:818-821.
- Elliott, R., C. A. Pickles, dan J. Forster. 2016. **Thermodynamics of The Reduction Roasting of Nickeliferous Laterite Ores**. Canada : Queen's University.
- Geerdes, Maarten, Hisko Toxopeus, dan Cor Van de Vliet. 2009. **Modern Blast Furnace Ironmaking an Introduction**. Amsterdam : IOS Press BV.
- Hakim, Muhammad Ikhwanul, Andinnie J dan Iwan S. 2017. **Peningkatan Kadar Nikel Bijih Limonit Melalui Proses Reduksi Selektif Dengan Variasi Waktu dan Persen Reduktor**. Indonesia : Universitas Sultan Agung Tirtayasa.

- Henpristian, Yopy, dkk. 2014. **Pengaruh Waktu Reduksi dan Komposisi Pelet Terhadap Persen Fe Metal dan Persen Ni FeNi Spons dari Bijih Nikel Limonit Menggunakan Simulator Rotary Kiln.** Tangerang Selatan : LIPI.
- J. Foster, C.A. Pickles, R. Elliot. 2016. **Microwave Carbothermic Reduction Roasting of A Low Grade Nickelferrous Silicate Laterite Ore, Minerals Engineering.** Vol 88, pp. 18-27.
- Jiangan, Chen , Sun Tichang dan Lu Qi. 2014. **Study of The Mechanism of The Reduction Roasting of The Limonite in Jiangxi.** China : Univeristy of Science and Technology Beijing.
- Kirk, Othmer. 1998. **Encyclopedia of Chemical Technology, 4th Edition Volume 1.** USA : John Willey & Sons Inc.
- Lee,dkk. 2005. **Electrochemical Leaching Of Nickel From Low-Grade Laterite.**vol. 77, pp.263 – 268.
- Li, Bo., Hua Wang, Yonggang Wei. 2011. **The Reduction of Nickel From Low-Grade Nickel Laterite Ore Using A Solid-State Deoxidisation Method.** China : Kunming University of Science and Technology.
- Li, Yan-jun., dkk. 2013. **Coal-Based Reduction Mechanism of Low-Grade Laterite Ore.** China : Northeastern University.
- Mayangsari, Wahyu, Agus Budi Prasetyo. 2016. **Proses Reduksi Selektif Bijih Nikel Limonit Menggunakan Zat Aditif CaSO₄.** Tangerang selatan : Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI.
- Mudd, G. 2010. **Global Trends And Issues In Nickel Mining: Sulfides Versus Laterites.**Ore Geol. Rev. 38, 9–26
- Norgate, T., dan Jahanshahi, S. 2011. **Assesing The Energy And Greenhouse Gas Footprint Of Nickel Laterite Processing.** Elseiver : Mineral Engineering.
- Noviyanti, Jasruddin, dan Eko Hadi Sujiono. 2015. **Karakterisasi Kalsium Karbonat dari Batu Kapur Kelurahan Tellu Limpoe Kecamatan Suppa.** Makassar : Universitas Negeri Makassar.

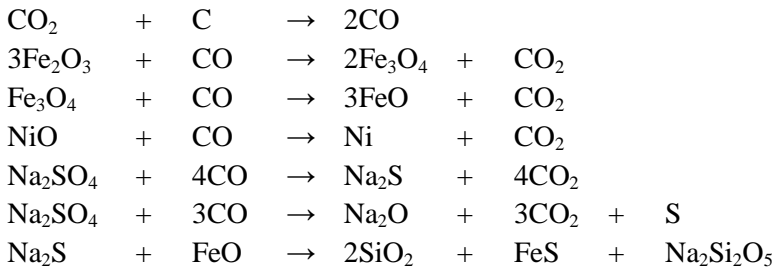
- Rhamdhani, M.A., Hayes, P.C., dan Jak, E. 2009. **Nickel laterite Part 1 – Microstructure and Phase Characterizations During Reduction Roasting and Leaching**. Miner. Process.Extr. Metall. Rev. 3., Vol. (118), pp. 129–145.
- Rodrigues, Filipe, dkk. 2017. **Factors Affecting the Upgrading of a Nickelferous Limonitic Laterite Ore by Reduction Roasting, Thermal Growth and Magnetic Separation**. Canada : Queens University.
- Subagja, Rudi., Agus Budi Prasetyo, dan Wahyu Mayang Sari. 2016. **Peningkatan Kadar Nikel Dalam Laterit Jenis Limonit dengan Cara Peletasi, Pemanggangan Reduksi dan Pemisahan Magnet Campuran Bijih, Batu Bara, dan Na₂SO₄**. Tangerang selatan : Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI.
- Supriadi. 2007. **Sistem Informasi Geografis**. Medan : USU Press
- Yang, J., G. Zhang, O. Ostrovski. 2015. **Reduction of Garnieritic Laterite Ore By CO-CO₂ Gas Mixtures**. Australia : University of New South Wales.
- Zulhan, Zulfiadi dan Ian Gibranata. 2016. **Direct Reduction of Low Grade Nickel Laterite Ore to Produce Ferronickel Using Isothermal – Temperature Gradient**. Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- Zhu, D.Q, dkk. 2012. **Upgrading Low Nickel Content Laterite Ores Using Selective Reduction Followed by Magnetic Separation**. China : Central South University.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

A. Perhitungan Stokimetri Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 1,19

Pada setiap reaksi kimia diperlukan kesetimbangan rumus molekul untuk senyawa kimia dengan persamaan stoikiometri. Pada proses reduksi laterit terdapat beberapa reaksi kimia yang terlibat, seperti reduksi, dekomposisi, reaksi *boudouard*. Persamaan reaksi yang terjadi dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :



Data yang dibutuhkan dalam perhitungan komposisi material

1. Bijih Nikel Laterit

Dari data pengujian EDX, diperoleh presentase berat elemen-elemen yang terkandung di dalam bijih nikel laterit.

Tabel 1. Hasil EDX Nikel Laterit

Unsur	Ni	Fe	Si	Mg	Ca	Al	Mn	Cr
% Wt	1.25	55.37	1.94	0.42	0.46	5.04	0.886	1.54

Dari data pengujian XRD, mineral-mineral kompleks yang terkandung dalam laterit diolah menjadi senyawa oksida, antara lain :

- Hematite (Fe_2O_3)
- Nikel oksida (NiO)

2. Batu bara

Dari data pengujian *proximate analysis (fixed carbon)* diperoleh konsentrasi 42,35 %. Dari kadar unsur dalam laterit, maka jumlah Fe_2O_3 dan NiO diketahui dengan cara sebagai berikut :

- Berat Fe_2O_3 dalam laterit

$$\begin{aligned}\% \text{Wt } \text{Fe}_2\text{O}_3 &= \frac{\text{Mr } \text{Fe}_2\text{O}_3}{2 \text{ Ar Fe}} \times \% \text{Wt Fe} \\ &= \frac{159,65}{55,84} \times 55,37\% = 79,153 \%\end{aligned}$$

- Berat NiO dalam laterit

$$\begin{aligned}\% \text{Wt } \text{NiO} &= \frac{\text{Mr } \text{NiO}}{\text{Ar Ni}} \times \% \text{Wt Ni} \\ &= \frac{74,68}{58,69} \times 1,25 \% = 1,59 \%\end{aligned}$$

Dari perhitungan diperoleh presentase Fe_2O_3 dan NiO dalam laterit. Jika diasumsikan dalam 100 gram *ore* maka diperoleh massa Fe_2O_3 dan NiO yaitu sebagai berikut.

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 79,153 \text{ gram}$$

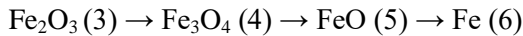
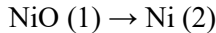
$$\text{NiO} = 1,59 \text{ gram}$$

Dari massa kedua senyawa maka diperoleh jumlah mol yang terkandung dalam laterit yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\text{Fe}_2\text{O}_3 &= \frac{\text{massa } \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Mr } \text{Fe}_2\text{O}_3} \\ &= \frac{79,153}{159,65} \\ &= 0,495 \text{ mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{NiO} &= \frac{\text{massa NiO}}{\text{Mr NiO}} \\
 &= \frac{1,59}{74,68} \\
 &= 0.021 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

Dalam penelitian ini reduksi nikel oksida dan besi oksida pada laterit bertahap seperti berikut.



Dengan target reduksi $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 = 100 \%$

reduksi $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} = 100 \%$

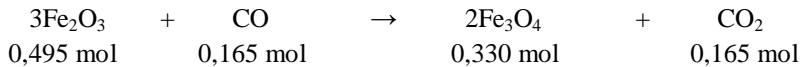
reduksi $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe} = 100 \%$

reduksi $\text{NiO} \rightarrow \text{Ni} = 100 \%$

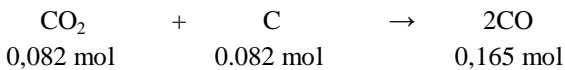
Natrium sulfat ditambahkan sebesar 10% dari massa total bahan untuk meningkatkan agregasi dari Fe-Ni.

Dari skema reaksi di atas dapat diketahui berapa mol gas CO yang dibutuhkan untuk reaksi dan berapa mol C untuk membentuk bereaksi dengan CO_2 membentuk gas CO yang harus bereaksi dengan C batu bara.

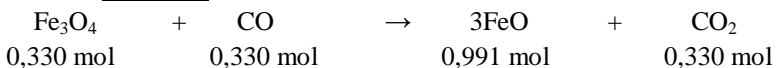
a. Reaksi 1



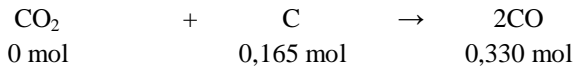
Reaksi *boudouard*



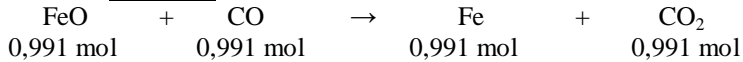
b. Reaksi 2



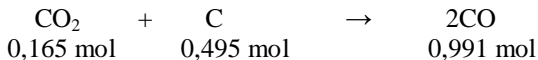
Reaksi *boudouard*



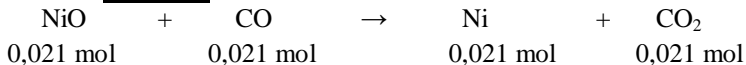
c. **Reaksi 3**



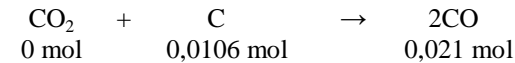
Reaksi *boudouard*



d. **Reaksi 4**



Reaksi *boudouard*



Sisa total gas $\text{CO}_2 = 1,0022 \text{ mol}$

Perhitungan Kebutuhan Batu Bara (Sebelum Penambahan

Na_2SO_4

Total mol C = $0,082 + 0,165 + 0,495 + 0,0106 = 0,7543 \text{ mol}$

Massa C yang dibutuhkan = total mol C x Ar C

$$= 0,7543 \text{ mol} \times 12,0116$$

$$= 9,0607 \text{ gram}$$

Massa batu bara yang dibutuhkan = $\frac{100}{42,35\%} \times \text{massa C}$

$$= \frac{100}{42,35\%} \times 9,0607$$

$$= 21,395 \text{ gram}$$

Pembulatan jumlah batu bara dijadikan sebesar 22 gram.

Perhitungan Kebutuhan Dolomit (Sebelum Penambahan Na₂SO₄)

Dari data pengujian EDX, diperoleh persentase berat elemen-elemen yang terkandung di dalam batu kapur yang diperoleh dari Gresik, Jawa Timur.

Tabel 2. Hasil EDX Batu Kapur

No.	Elemen	Rumus Kimia	Komposisi (%)
1.	Kalsium Oksida	CaO	25.21
2.	Magnesium Oksida	MgO	24.23

Dari data pengujian XRD, terdapat mineral – mineral lain yang terkandung dalam batu kapur adalah dolomit (CaMg(CO₃)₂).

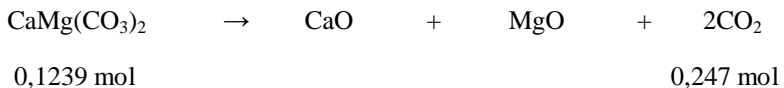
Perhitungan Kebutuhan Dolomit

Mempertimbangkan kebutuhan gas CO₂ untuk reaksi *boudouard*. Batu kapur berperan sebagai penyedia gas CO₂ untuk reaksi *boudouard* yang akan menghasilkan gas reduktor CO, maka CO₂ yang dihasilkan dari dekomposisi termal pada dolomit perlu direaksikan dengan C pada batu bara.

Perhitungan Jumlah Gas CO₂

$$\text{Total mol CO}_2 = 0,082 + 0 + 0,165 + 0 = 0,247 \text{ mol}$$

Reaksi dekomposisi termal yang terjadi pada dolomit yaitu :



$$\begin{aligned} \text{Massa dolomit} &= \text{mol} \times \text{Mr CaMg(CO}_3)_2 \\ &= 0,1239 \times 184,3482 \\ &= 22,849 \text{ gram} \end{aligned}$$

Pembulatan jumlah dolomit dijadikan sebesar 23 gram.

Perhitungan Kebutuhan Natrium Sulfat

Natrium sulfat yang ditambahkan yaitu sebesar 10% dari massa total bijih, batu bara dan dolomit yang digunakan.

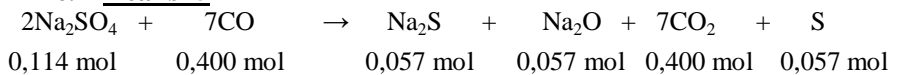
$$\begin{aligned}\text{Massa total tanpa Na}_2\text{SO}_4 &= \text{massa bijih} + \text{massa batu bara} + \\ &\quad \text{massa dolomit} \\ &= 100 \text{ gram} + 21,395 \text{ gram} + 22,849 \\ &\quad \text{gram} \\ &= 144,244 \text{ gram}\end{aligned}$$

Maka, massa Na_2SO_4 yang ditambahkan yaitu sebesar 10% dari massa total yaitu 14,42 gram.

$$\begin{aligned}\text{Mol Na}_2\text{SO}_4 &= \frac{\text{massa Na}_2\text{SO}_4}{\text{Mr Na}_2\text{SO}_4} \\ &= \frac{14,42}{126,1004} = 0,114 \text{ mol}\end{aligned}$$

Sehingga, reaksi reduksi Na_2SO_4 oleh gas CO yng terjadi yaitu sebagai berikut.

e. Reaksi 5



Reaksi *boudouard*



Sisa total gas $\text{CO}_2 = 1,2024 \text{ mol}$

Perhitungan Kebutuhan Batu Bara (Setelah Penambahan Na_2SO_4)

$$\begin{aligned}\text{Total mol C} &= 0,082 + 0,165 + 0,495 + 0,0106 + 0,200 \\ &= 0,9545 \text{ mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa C yang dibutuhkan} &= \text{total mol C} \times \text{Ar C} \\ &= 0,9545 \text{ mol} \times 12,0116 \\ &= 11,465 \text{ gram}\end{aligned}$$

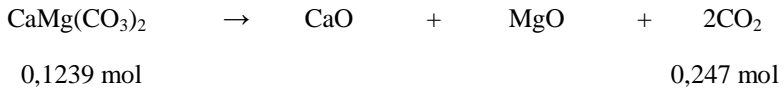
$$\begin{aligned}
 \text{Massa batu bara yang dibutuhkan} &= \frac{100}{42,35\%} \times \text{massa C} \\
 &= \frac{100}{42,35\%} \times 11,465 \\
 &= 27,07 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

Pembulatan jumlah batu bara dijadikan sebesar 28 gram.

Perhitungan Kebutuhan Dolomit (Setelah Penambahan Na₂SO₄)

$$\text{Total mol CO}_2 = 0,082 + 0 + 0,165 + 0 + 0 = 0,247 \text{ mol}$$

Reaksi dekomposisi termal yang terjadi pada dolomit yaitu :



$$\begin{aligned}
 \text{Massa dolomit} &= \text{mol} \times \text{Mr CaMg(CO}_3)_2 \\
 &= 0,1239 \times 184,3482 \\
 &= 22,84 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

Pembulatan jumlah dolomit dijadikan sebesar 23 gram.

Perhitungan Kebutuhan Kanji

Kanji yang ditambahkan sebagai pengikat sebesar 3 % dari massa campuran briket. Dengan komposisi *ore* 100 gram, batu bara 27,072 gram, natrium sulfat 14,4244 gram, maka kanji yang ditambahkan sebesar 4,24 gram

Perhitungan CO/CO₂

$$\begin{aligned}
 \text{Total mol CO} &= 0,165 + 0,330 + 0,991 + 0,021 + 0,400 \\
 &= 1,909 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Total mol CO}_2 &= 0,165 + 0,082 + 0,330 + 0 + 0,991 + 0,165 + \\
 &\quad 0,021 + 0 + 0,400 + 0 \\
 &= 2,156 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

$$\text{Rasio } \frac{CO}{CO_2} = \frac{1,909}{2,156}$$

Sehingga rasio perbandingan komposisi ore : batu bara : Na_2SO_4 : kanji yaitu 100 : 27,07 : 14,42 : 4,24.

Sehingga rasio perbandingan komposisi ore : batu bara : dolomit : Na_2SO_4 : kanji yaitu 100 : 27,07 : 22,84 : 14,42 : 4,24.

Perbandingan Batu Bara dan Dolomit

Batu Bara : Dolomit = 27,07 : 22,84

Batu Bara : Dolomit = 1,19 : 1

B. Perhitungan Stokiometri Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 2,09

Berdasarkan diagram kesetimbangan Fe-Ni-O untuk *goethite*, diketahui bahwa rasio CO/CO₂ sangat mempengaruhi proses reduksi karbotermik. 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 Ni sebesar 90-95%.

- Didapatkan $\ln \frac{CO}{CO_2} = 0,45$

$$e^{\ln \frac{CO}{CO_2}} = e^{0,45}$$

$$\frac{CO}{CO_2} = \frac{1,56}{1}$$

Dari hasil rasio CO/CO₂ tersebut maka dapat dibandingkan antara penelitian dan diagram. Rasio penelitian didapatkan dari penelitian sebelumnya (perhitungan terdapat dalam stokiometri bagian A).

Tabel 3. Perbandingan Rasio CO/CO₂

	CO	CO ₂
Penelitian	1,909	2,156
Diagram	1,56	1

Perbandingan antara rasio CO/CO₂ pada penelitian dan diagram digunakan guna mengetahui penambahan batu bara dan dolomit guna menciptakan rasio CO/CO₂ yang sesuai dengan rasio pada diagram. Adapun perhitungannya adalah sebagai berikut.

- Diasumsikan : variabel tetap yaitu CO₂
Maka dapat diketahui Kebutuhan CO = $\frac{1,56}{1} \times 2,156$
Kebutuhan CO = 3,364 mol
- Dengan kebutuhan CO yang lebih tinggi dibandingkan kandungan CO pada penelitian maka dari itu perlu ditambahkan CO yaitu sebagai berikut.
Penambahan CO = 3,364 – 1,909 = 1,455 mol
- Dalam penambahan CO maka perlu dibentuk reaksi *boudouard*. Dikarenakan sisa CO₂ sebelumnya sejumlah 1,202 mol maka tidak dibutuhkan dolomit tambahan. Reaksi *boudouard* yaitu sebagai berikut.

$$\begin{array}{ccccccc} \text{C} & + & \text{CO}_2 & \rightarrow & 2\text{CO} \\ 0,727 \text{ mol} & & 0 \text{ mol} & & 1,455 \text{ mol} \end{array}$$
- Dimana masih menyisakan CO₂ sebesar :
Sisa CO₂ = 1,202-0,727 = 0,474 mol

- Dari reaksi *boudouard* diatas didapatkan bahwa perlu ditambahkan konsumsi C. Hal tersebut mengakibatkan terjadinya penambahan batu bara yaitu sebesar :

Penambahan massa batu bara

$$= \frac{100}{42,35\%} \times (\text{total mol C} \times \text{Ar C})$$

$$= \frac{100}{42,35\%} \times (0,727 \times 12,0116)$$

$$= 20,644 \text{ gram}$$

Maka dari itu pada rasio $\text{CO}/\text{CO}_2 = 1,56 : 1$ didapatkan komposisi batu bara dan dolomit sebesar :

$$\text{Massa batu bara} = 27,07 + 20,644 = 47,71 \text{ gram}$$

$$\text{Massa dolomit} = 22,84 \text{ gram}$$

Sehingga rasio perbandingan komposisi ore : batu bara : Na_2SO_4 : kanji yaitu 100 : 47,71 : 14,42 : 4,24.

Sehingga rasio perbandingan komposisi ore : batu bara : dolomit : Na_2SO_4 : kanji yaitu 100 : 47,71 : 22,84 : 14,42 : 4,24.

Perbandingan Batu Bara dan Dolomit

$$\text{Batu Bara} : \text{Dolomit} = 47,71 : 22,84$$

$$\text{Batu Bara} : \text{Dolomit} = 2,09 : 1$$

C. Perhitungan Stokiometri Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 1,48

Dari kedua rasio CO/CO_2 yang didapatkan maka diperlukan satu variabel lagi yang berguna dalam penentuan rasio CO/CO_2 yang sesuai. Dikarenakan pada rasio CO/CO_2 penelitian dihasilkan CO sekitar 0,88 dan pada diagram 1,56 maka

diperlukan batas atas rasio CO/CO₂. Sehingga *output* nya nanti didapatkan apakah rasio CO/CO₂ pada jurnal sesuai atau tidak dan apakah bila kadar CO dibawah atau diatas rasio 1,56 akan didapatkan hasil nikel yang lebih optimal. Untuk penentuan variabel ketiga yaitu sebagai berikut:

- $\frac{CO}{CO_2}$ variabel 3 = $\frac{1,56}{1} - \frac{0,88}{1} = \frac{0,67}{1}$
- $\frac{CO}{CO_2}$ variabel 3 = $\frac{1,56}{1} + \frac{0,67}{1} = \frac{2,23}{1}$

Dari hasil rasio CO/CO₂ tersebut maka dapat dibandingkan antara penelitian dan variabel ketiga. Rasio penelitian didapatkan dari penelitian sebelumnya (perhitungan terdapat dalam stokiometri bagian A).

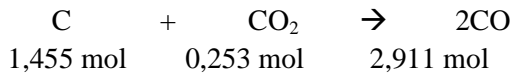
Tabel 4. Perbandingan Rasio CO/CO₂

	CO	CO ₂
Penelitian	1,909	2,156
Variabel 3	2,23	1

Perbandingan antara rasio CO/CO₂ pada penelitian dan variabel 3 digunakan guna mengetahui penambahan batu bara dan dolomit guna menciptakan rasio CO/CO₂ yang sesuai dengan rasio pada diagram. Adapun perhitungannya adalah sebagai berikut.

- Diasumsikan : variabel tetap yaitu CO₂
Maka dapat diketahui Kebutuhan CO = $\frac{2,23}{1} \times 2,156$
Kebutuhan CO = 4,820 mol
- Dengan kebutuhan CO yang lebih tinggi dibandingkan kandungan CO pada penelitian maka dari itu perlu ditambahkan CO yaitu sebagai berikut.
Penambahan CO = 4,820 – 1,909 = 2,911 mol

- Dalam penambahan CO maka perlu dibentuk reaksi *boudouard*. Sebelumnya masih terdapat sisa CO₂ sejumlah 1,202 mol namun dikarenakan CO₂ yang perlu dibentuk lebih besar maka perlu ditambahkan CO₂. Reaksi *boudouard* yaitu sebagai berikut.

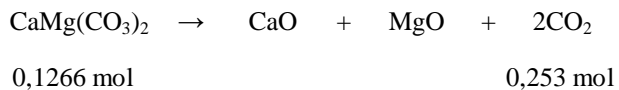


- Dimana sisa CO₂ yaitu :
Sisa CO₂ = 0 mol
- Dari reaksi *boudouard* diatas didapatkan bahwa perlu ditambahkan konsumsi C. Hal tersebut mengakibatkan terjadinya penambahan batu bara yaitu sebesar :

Penambahan massa batu bara

$$\begin{aligned} &= \frac{100}{42,35\%} \times (\text{total mol C} \times \text{Ar C}) \\ &= \frac{100}{42,35\%} \times (1,455 \times 12,0116) \\ &= 41,289 \text{ gram} \end{aligned}$$

- Pada penambahan dolomit
Total mol CO₂ = 0,253 mol
Reaksi dekomposisi termal yang terjadi pada dolomit yaitu :



$$\begin{aligned} \text{Massa dolomit} &= \text{mol} \times \text{Mr CaMg}(\text{CO}_3)_2 \\ &= 0,1266 \times 184,3482 \\ &= 23,35 \text{ gram} \end{aligned}$$

Maka dari itu pada rasio CO/CO₂ = 2,23 : 1 didapatkan komposisi batu bara dan dolomit sebesar :

$$\text{Massa batu bara} = 27,07 + 41,28 = 68,36 \text{ gram}$$

Massa dolomit = 22,84 + 23,35 = 46,20 gram

Sehingga rasio perbandingan komposisi ore : batu bara :

Na₂SO₄ : kanji yaitu 100 : 68,36 : 14,42 : 4,24.

Sehingga rasio perbandingan komposisi ore : batu bara :

dolomit : Na₂SO₄ : kanji yaitu 100 : 68,36 : 46,20 : 14,42 : 4,24.

Perbandingan Batu Bara dan Dolomit

Batu Bara : Dolomit = 68,36 : 46,20

Batu Bara : Dolomit = 1,48 : 1

D. Perhitungan Nilai *Recovery* dari Unsur Besi dan Nikel pada Produk Hasil Proses Reduksi

a. Perhitungan Nilai *Recovery* dari Unsur Nikel pada Produk Hasil Proses Reduksi

Tabel 5. Perhitungan Massa dan *Recovery* Ni Hasil Reduksi

Batu Bara : Dolomit	Wo Ni (gr)	Wt Serbuk Total (gr)	Wt Metal Total (gr)	%Ni Metal	%Ni Serbuk	Wt Ni (gr)
1,19	0,9	20,941	0,690	8,68	2,28	0,537
1,48	1	16,216	3,604	12,74	2,57	0,876
2,09	0,95	22,030	1,690	12,04	3,35	0,941

• **Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 1,19**

$$\% Recovery Ni = \frac{Massa Ni Akhir Hasil Reduksi}{Massa Ni Awal Briket} \times 100\%$$

$$\% Recovery Ni = \frac{0,537}{0,9} \times 100\%$$

$$\% Recovery Ni = 59,70\%$$

- **Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 1,48**

$$\% \text{ Recovery Ni} = \frac{\text{Massa Ni Akhir Hasil Reduksi}}{\text{Massa Ni Awal Briket}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Recovery Ni} = \frac{0,876}{1} \times 100\%$$

$$\% \text{ Recovery Ni} = 87,59\%$$

- **Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 2,09**

$$\% \text{ Recovery Ni} = \frac{\text{Massa Ni Akhir Hasil Reduksi}}{\text{Massa Ni Awal Briket}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Recovery Ni} = \frac{0,941}{0,95} \times 100\%$$

$$\% \text{ Recovery Ni} = 99,10\%$$

b. Perhitungan Nilai Recovery dari Unsur Besi pada Produk Hasil Proses Reduksi

Tabel 6. Perhitungan Massa dan Recovery Fe Hasil Reduksi

Batu Bara : Dolomit	Wo Fe (gr)	Wt Serbuk Total (gr)	Wt Metal Total (gr)	%Fe Metal	%Fe Serbuk	Wt Fe (gr)
1,19	39,866	20,941	0,690	58,27	19,39	4,462
1,48	44,296	16,216	3,604	68,66	16,86	5,209
2,09	42,081	22,030	1,890	65,11	21,80	6,033

- **Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 1,19**

$$\% \text{ Recovery Fe} = \frac{\text{Massa Fe Akhir Hasil Reduksi}}{\text{Massa Fe Awal Briket}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Recovery Fe} = \frac{4,462}{39,866} \times 100\%$$

$$\% \text{ Recovery Fe} = 11,19\%$$

- **Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 1,48**

$$\% \text{ Recovery Fe} = \frac{\text{Massa Fe Akhir Hasil Reduksi}}{\text{Massa Fe Awal Briket}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Recovery Fe} = \frac{5,209}{44,296} \times 100\%$$

$$\% \text{ Recovery Fe} = 11,76\%$$

- **Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 2,09**

$$\% \text{ Recovery Fe} = \frac{\text{Massa Fe Akhir Hasil Reduksi}}{\text{Massa Fe Awal Briket}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Recovery Fe} = \frac{6,033}{42,081} \times 100\%$$

$$\% \text{ Recovery Fe} = 14,34\%$$

E. Perhitungan Faktor Selektivitas Produk Hasil Proses Reduksi

Tabel 7. Kadar Fe dan Ni Hasil Proses Reduksi

Batu Bara : Dolomit	%Fe awal	%Ni awal	%Fe akhir	%Ni akhir
1,19	55,37	1,25	58,27	8,68
1,48	55,37	1,25	68,66	12,74
2,09	55,37	1,25	65,11	12,04

- **a. Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 1,19**

$$\text{Selectivity} = \frac{\% \text{ Fe Awal} \times \% \text{ Ni Akhir}}{\% \text{ Ni Awal} \times \% \text{ Fe Akhir}} \times 100\%$$

$$\text{Selectivity} = \frac{55,37 \times 8,68}{1,25 \times 58,27} \times 100\%$$

$$\text{Selectivity} = 6,60\%$$

b. Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 1,48

$$\text{Selectivity} = \frac{\% Fe \text{ Awal} \times \% Ni \text{ Akhir}}{\% Ni \text{ Awal} \times \% Fe \text{ Akhir}} \times 100\%$$

$$\text{Selectivity} = \frac{55,37 \times 12,74}{1,25 \times 68,66} \times 100\%$$

$$\text{Selectivity} = 8,22\%$$

c. Variasi Rasio Batu Bara : Dolomit = 2,09

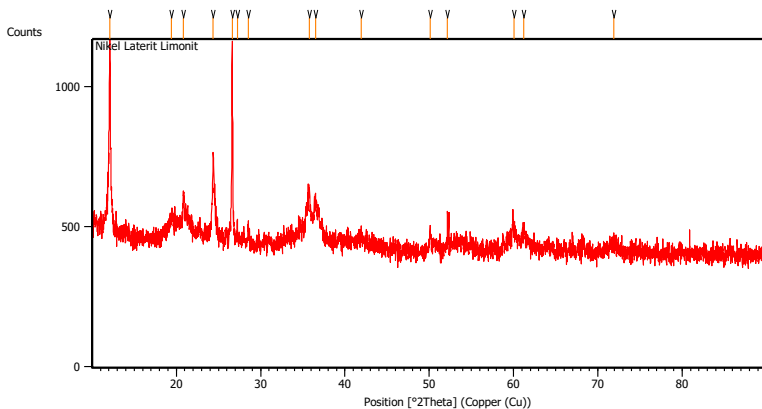
$$\text{Selectivity} = \frac{\% Fe \text{ Awal} \times \% Ni \text{ Akhir}}{\% Ni \text{ Awal} \times \% Fe \text{ Akhir}} \times 100\%$$

$$\text{Selectivity} = \frac{55,37 \times 12,04}{1,25 \times 65,11} \times 100\%$$

$$\text{Selectivity} = 8,19\%$$

F. Hasil Pengujian XRD

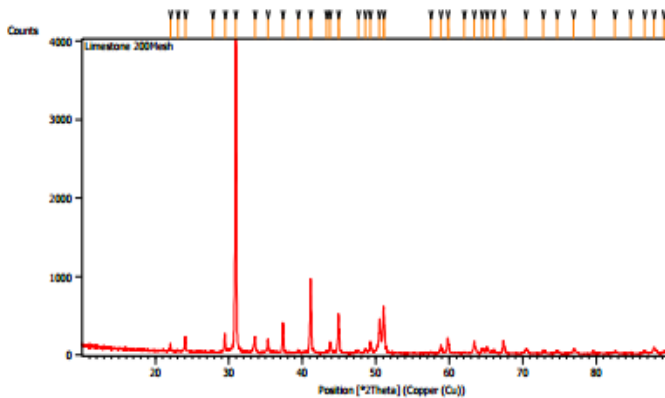
a. Hasil Uji XRD Bijih Nikel Limonitik



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.1258	630.85	0.1004	7.29917	88.44
19.4162	65.79	0.4015	4.57179	9.22
20.8482	145.01	0.1338	4.26090	20.33
24.3605	291.88	0.1171	3.65394	40.92
26.6197	713.28	0.1004	3.34874	100.00
27.2271	65.69	0.1004	3.27539	9.21
28.5675	57.86	0.2007	3.12469	8.11
35.7514	170.74	0.1673	2.51158	23.94
36.4958	136.80	0.2007	2.46204	19.18
41.9307	25.76	0.8029	2.15464	3.61
50.1224	73.88	0.2007	1.82002	10.36
52.1804	108.19	0.0612	1.75153	15.17
60.0402	75.77	0.4015	1.54094	10.62
61.2220	55.80	0.3346	1.51400	7.82
71.9204	22.61	0.8029	1.31285	3.17

b. Hasil Uji XRD Dolomit

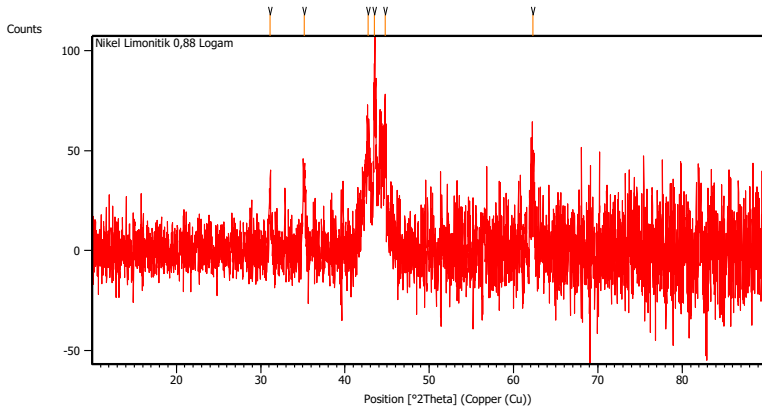


Peak List :

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
22.0253	96.98	0.0836	4.03577	2.41
23.0640	20.57	0.2007	3.85633	0.51
24.0750	194.18	0.0669	3.69663	4.82
27.8354	10.58	0.2007	3.20519	0.26
29.4675	241.94	0.1171	3.03127	6.01
30.9404	4025.23	0.1004	2.89025	100.00
33.5214	198.52	0.0836	2.67338	4.93

35.2988	170.14	0.1004	2.54274	4.23
37.3602	380.36	0.0836	2.40704	9.45
39.4620	31.78	0.1338	2.28355	0.79
41.1198	943.84	0.1224	2.19342	23.45
41.2406	491.06	0.0612	2.19271	12.20
43.2661	21.03	0.1632	2.08945	0.52
43.7884	142.23	0.0816	2.06573	3.53
44.9227	494.58	0.1020	2.01617	12.29
45.0616	260.36	0.0612	2.01528	6.47
47.5962	35.20	0.1632	1.90897	0.87
48.5714	49.76	0.1224	1.87290	1.24
49.2485	133.08	0.0816	1.84872	3.31
50.4901	387.48	0.1428	1.80613	9.63
51.0620	566.64	0.1224	1.78724	14.08
51.2255	338.04	0.0612	1.78634	8.40
57.5178	15.27	0.2448	1.60104	0.38
58.8791	102.10	0.1224	1.56723	2.54
59.8041	196.15	0.1428	1.54518	4.87
59.9851	116.90	0.0612	1.54477	2.90
62.0630	12.17	0.4896	1.49425	0.30
63.4062	153.55	0.1020	1.46579	3.81
64.4703	62.17	0.1632	1.44414	1.54
65.1337	66.92	0.2448	1.43103	1.66
66.0429	53.28	0.1632	1.41351	1.32
67.3645	172.51	0.1428	1.38896	4.29
67.6030	82.52	0.1224	1.38808	2.05
70.4225	45.24	0.2448	1.33595	1.12
72.8225	38.38	0.1224	1.29772	0.95
74.6692	43.69	0.2856	1.27014	1.09
76.9099	47.27	0.2040	1.23862	1.17
79.6817	30.40	0.1632	1.20236	0.76
82.5618	31.60	0.3264	1.16756	0.79
84.6788	9.42	0.9792	1.14369	0.23
86.5982	28.35	0.1632	1.12320	0.70
87.8726	83.43	0.2856	1.11017	2.07
89.2212	28.87	0.4080	1.09685	0.72

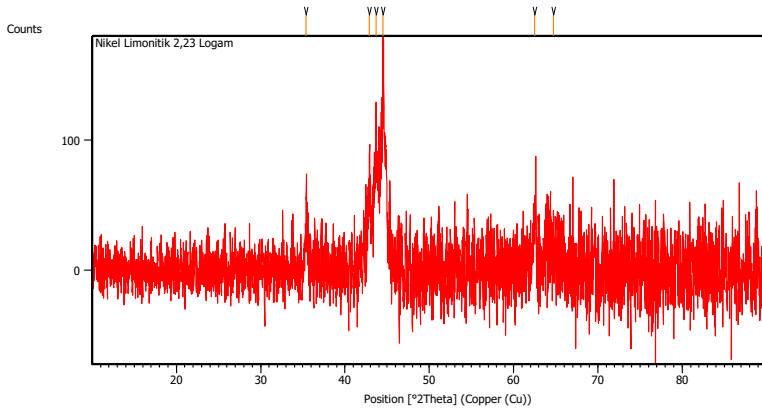
**c. Hasil Uji XRD Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
1,19 : 1 (Logam)**



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
31.1274	33.15	0.1673	2.87332	39.11
35.1623	34.55	0.2676	2.55230	40.76
42.7362	52.46	0.4015	2.11588	61.88
43.4964	84.77	0.1673	2.08064	100.00
44.7975	54.73	0.2007	2.02319	64.56
62.2990	34.93	0.5353	1.49039	41.21

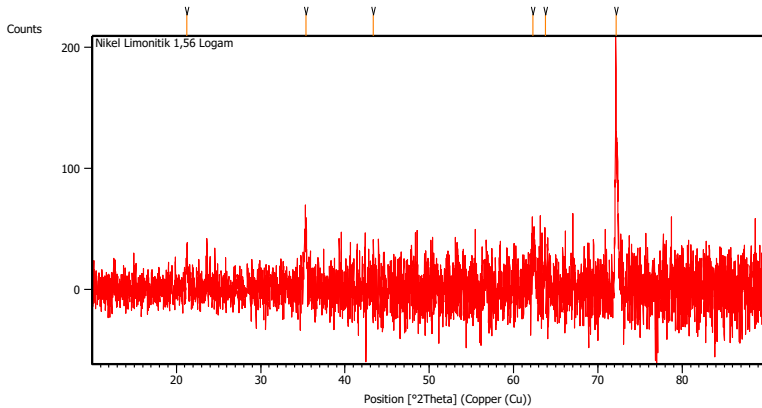
**d. Hasil Uji XRD Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
1,48 : 1 (Logam)**



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
35.3883	42.84	0.2007	2.53651	30.18
42.8927	75.29	0.2007	2.10852	53.04
43.7032	93.55	0.3346	2.07128	65.90
44.5344	141.95	0.2676	2.03453	100.00
62.4924	42.95	0.4015	1.48624	30.26
64.7357	45.87	0.1171	1.44005	32.32

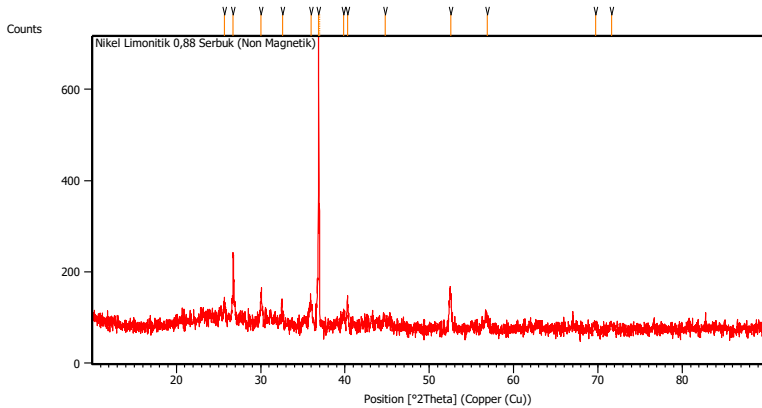
**e. Hasil Uji XRD Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
2,09 : 1 (Logam)**



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
21.2707	29.51	0.2007	4.17721	15.88
35.3673	42.73	0.2007	2.53797	23.00
43.3759	47.90	0.6691	2.08614	25.78
62.2655	34.34	0.4015	1.49111	18.48
63.7710	7.55	0.2342	1.45949	4.06
72.1405	185.81	0.0816	1.30830	100.00

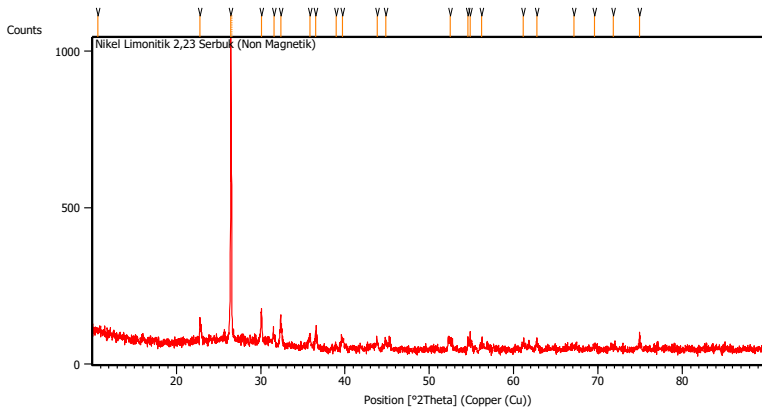
**f. Hasil Uji XRD Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
1,19 : 1 (Bagian Non Magnetik)**



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.7016	36.03	0.2007	3.46625	5.66
26.7380	137.66	0.0669	3.33419	21.61
30.0570	68.19	0.1338	2.97315	10.70
32.5696	30.79	0.2007	2.74930	4.83
35.9514	55.83	0.2676	2.49807	8.76
36.8675	637.09	0.0612	2.43605	100.00
36.9706	254.22	0.0408	2.43553	39.90
39.8626	29.10	0.2448	2.25965	4.57
40.2901	62.47	0.1632	2.23665	9.81
44.7497	18.58	0.3264	2.02356	2.92
52.5803	68.62	0.3264	1.73915	10.77
56.8804	24.27	0.8160	1.61745	3.81
69.7133	15.79	0.4896	1.34779	2.48
71.6222	11.46	0.9792	1.31649	1.80

**g. Hasil Uji XRD Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
1,48 : 1 (Bagian Non Magnetik)**

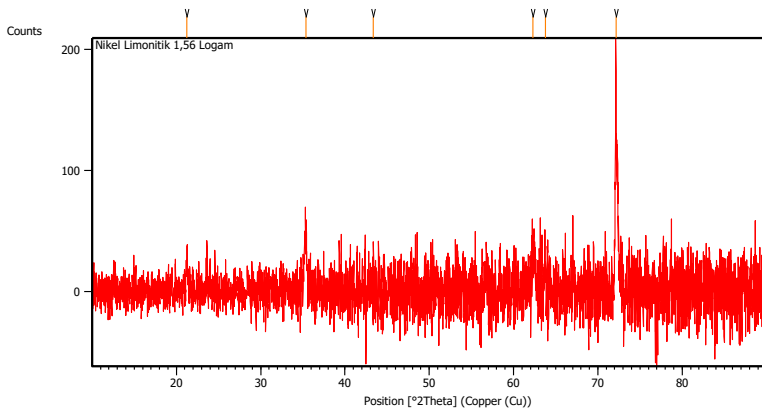


Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.6924	12.85	0.8029	8.27418	1.32
22.8029	75.38	0.0502	3.89988	7.76
26.4688	971.86	0.0612	3.36470	100.00
26.5506	486.50	0.0408	3.36285	50.06
30.1142	96.64	0.1428	2.96518	9.94
31.5710	27.82	0.3264	2.83160	2.86
32.3867	97.49	0.0612	2.76212	10.03
35.8291	40.10	0.2448	2.50424	4.13
36.5382	39.31	0.2448	2.45725	4.04
38.9470	14.03	0.3264	2.31064	1.44
39.6872	33.95	0.4080	2.26923	3.49
43.8290	22.77	0.2448	2.06391	2.34
44.8158	27.85	0.2448	2.02073	2.87
52.4569	27.16	0.6528	1.74295	2.80
54.5932	40.40	0.1224	1.67969	4.16
54.8649	60.80	0.0612	1.67201	6.26

56.2361	17.86	0.3264	1.63445	1.84
61.1222	21.14	0.2448	1.51497	2.18
62.7769	21.28	0.2448	1.47896	2.19
67.1340	10.29	0.9792	1.39317	1.06
69.6292	13.53	0.4896	1.34922	1.39
71.8540	6.34	0.8160	1.31281	0.65
74.9230	41.39	0.1224	1.26646	4.26

h. Hasil Uji XRD Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit 2,09 : 1 (Bagian Non Magnetik)

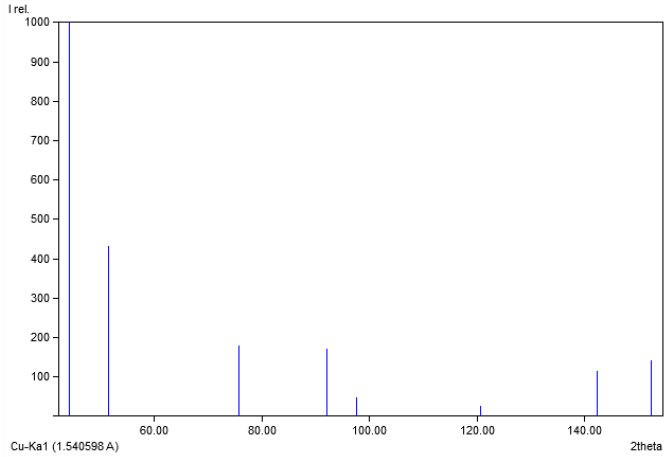


Peak List:

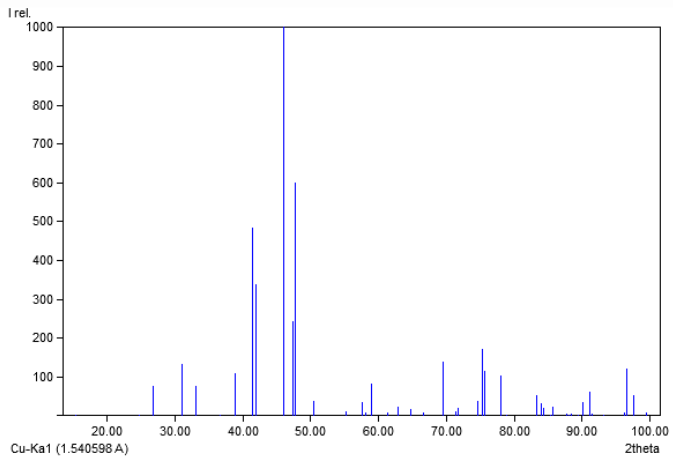
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
21.2707	29.51	0.2007	4.17721	15.88
35.3673	42.73	0.2007	2.53797	23.00
43.3759	47.90	0.6691	2.08614	25.78
62.2655	34.34	0.4015	1.49111	18.48
63.7710	7.55	0.2342	1.45949	4.06
72.1405	185.81	0.0816	1.30830	100.00

G. JCPDS Card

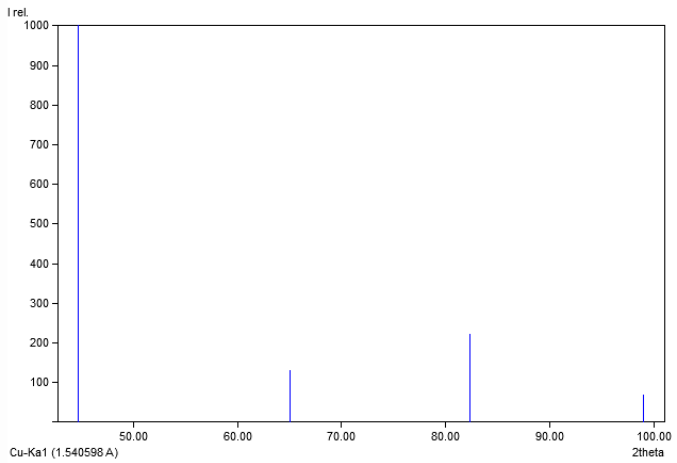
a. 96-901-3008 (Nickel)



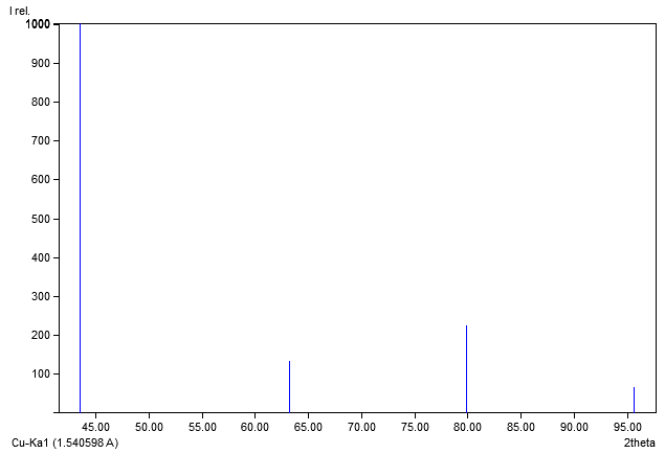
b. 96-901-4495 (Xifengite)



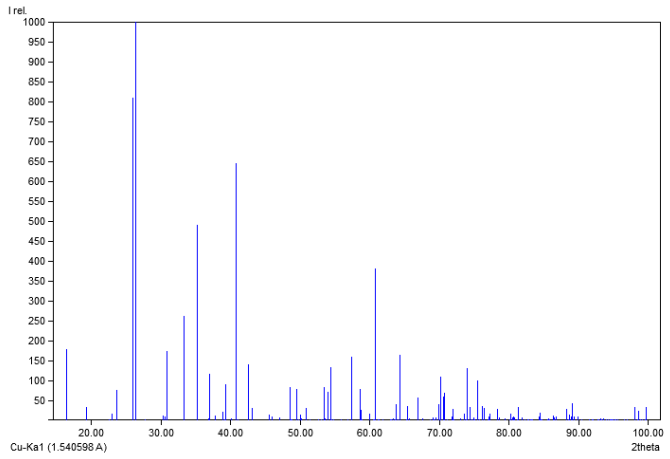
c. 96-152-4200 (Nickel Iron)



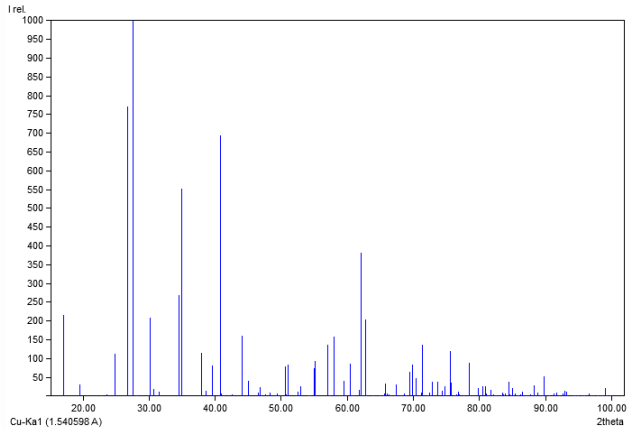
d. 96-900-8539 (Iron)



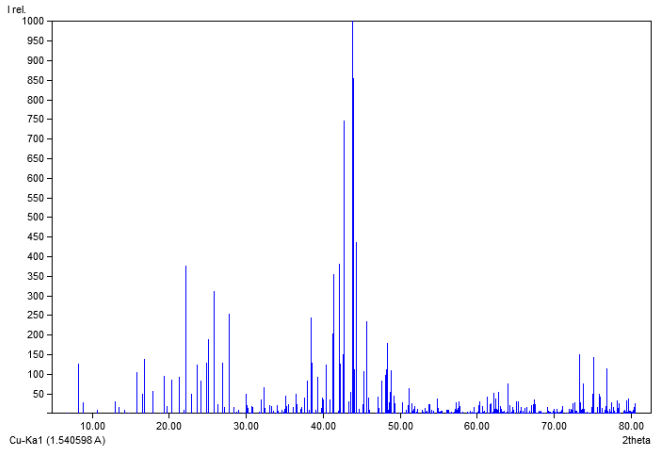
e. 96-900-0713 (Aluminium Silicate)



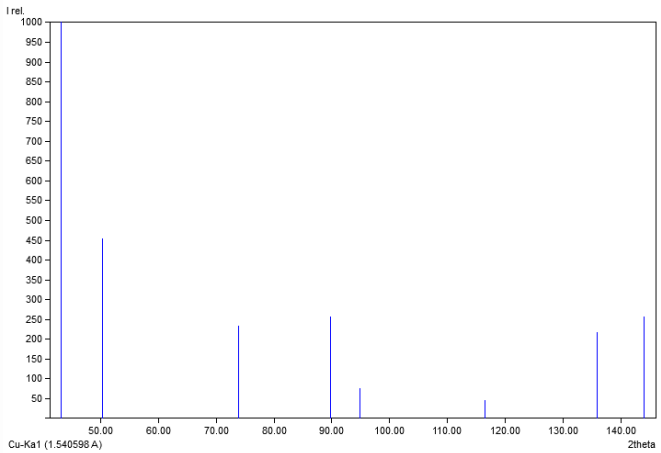
f. 96-231-0329 (Aluminium Silicate)



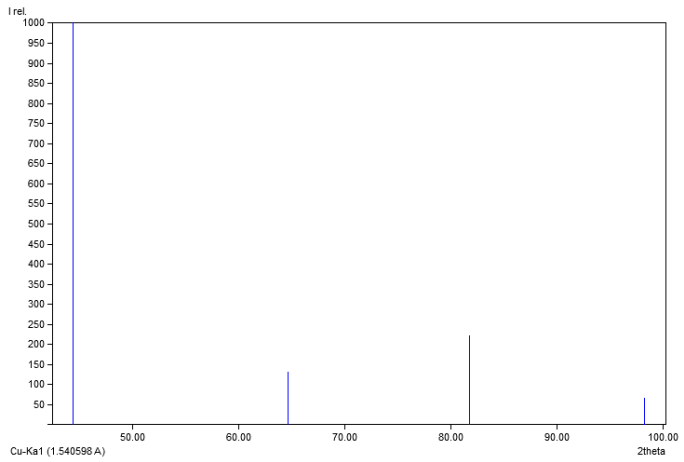
g. 96-210-6288 (Aluminium Iron Silicide)



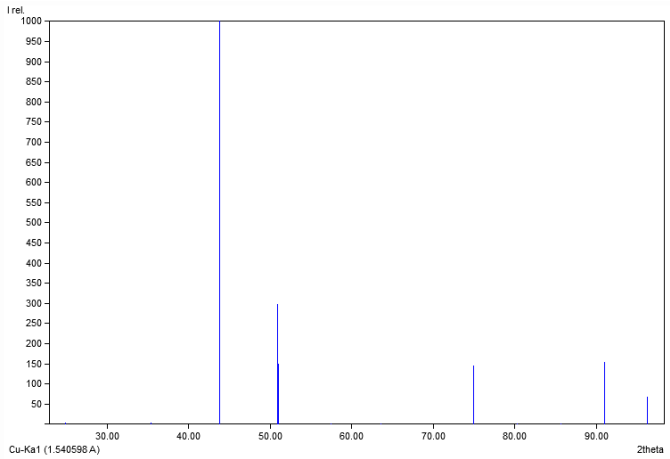
h. 96-720-4808 (Iron)



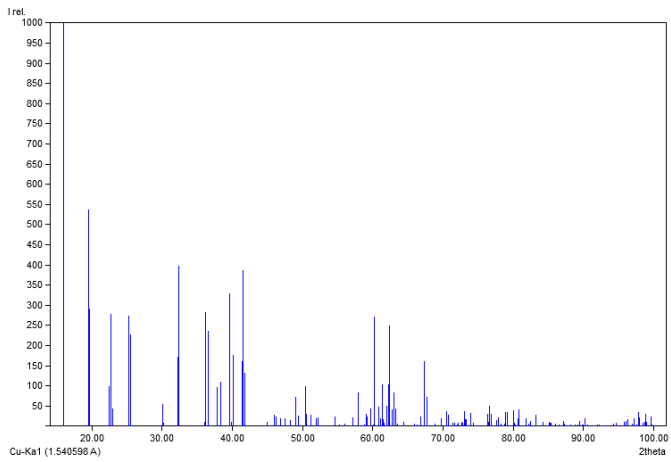
i. 96-901-3476 (Iron)



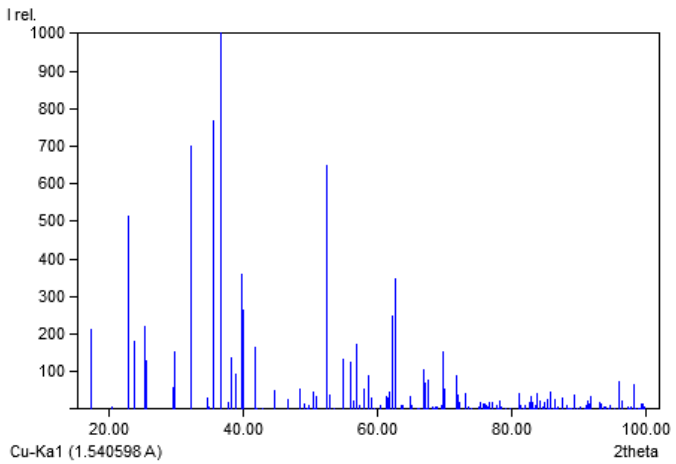
j. 96-901-0018 (Nickel Iron)



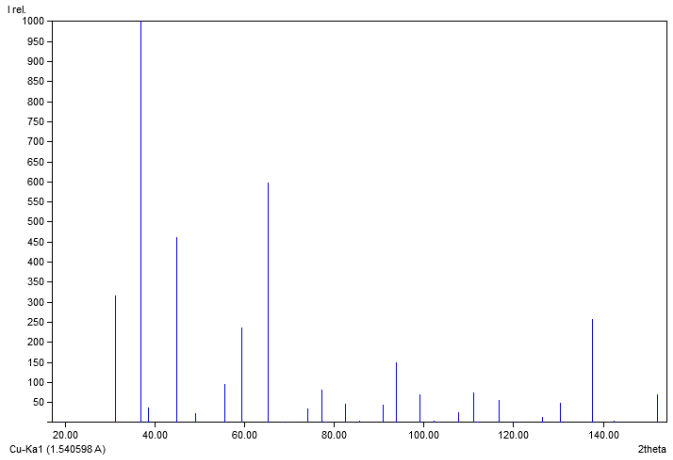
k. 96-101-0925 (Aluminium Silicate)



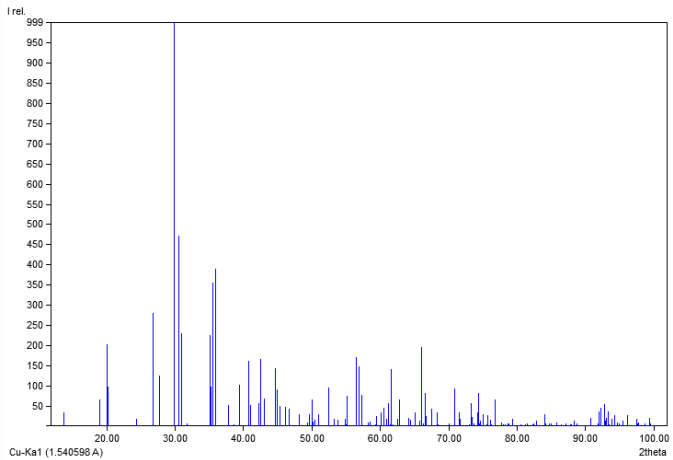
l. 96-900-1667 (Forsterite)



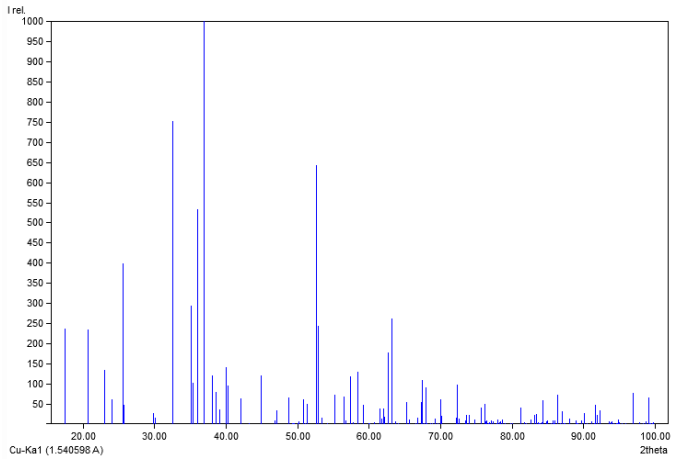
m. 96-901-4786 (Ringwoodite)



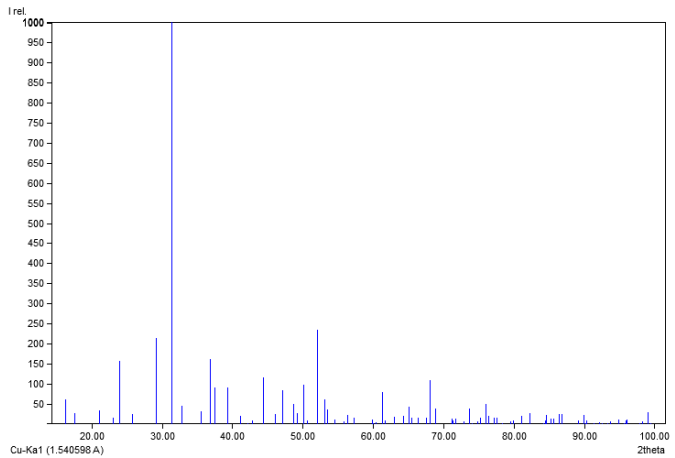
n. 96-900-5183 (Diopside)



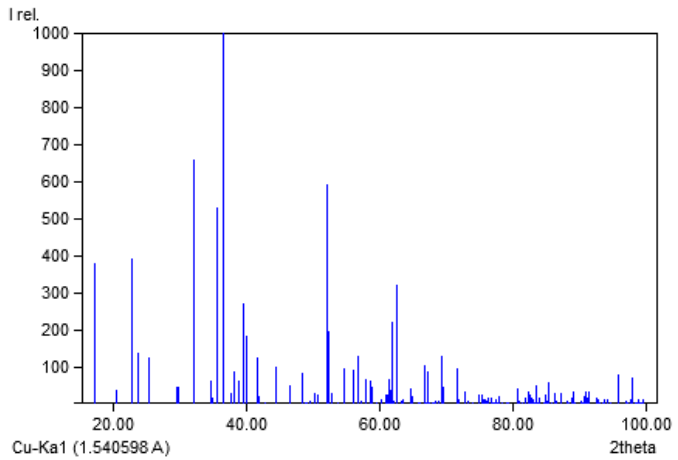
o. 96-900-1102 (Olivine)



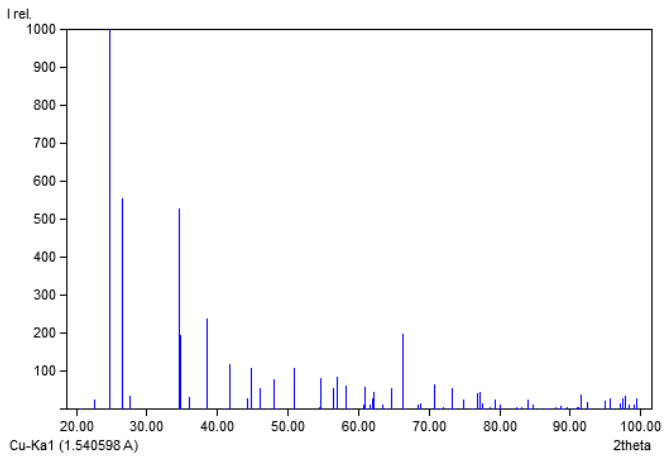
p. 96-900-6114 (Gehlenite)



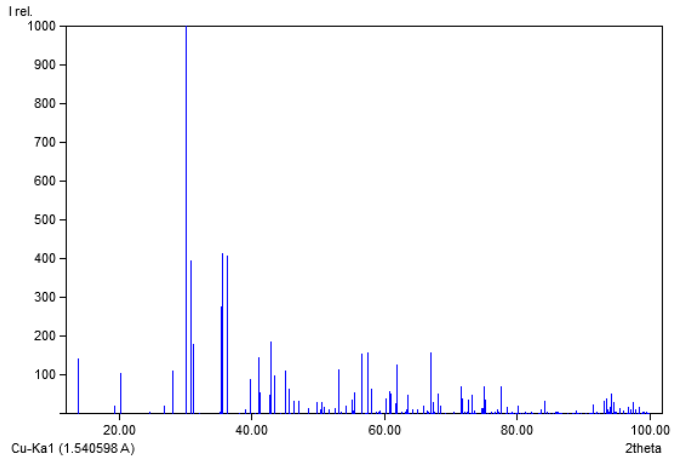
q. 96-900-2633 (Olivine)



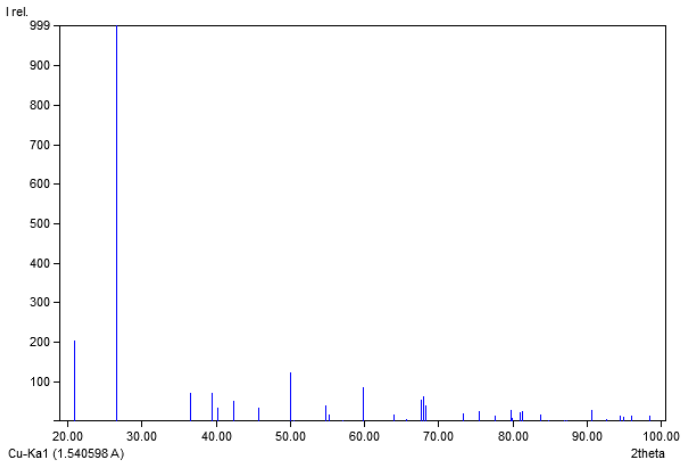
r. 96-230-0130 (Magnesium Sulfate)



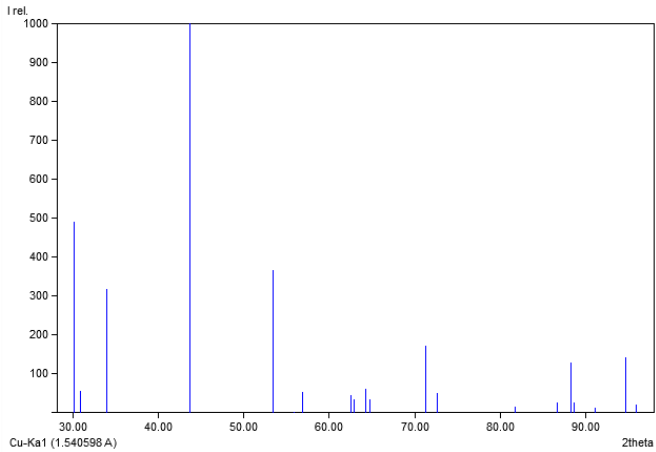
s. 96-901-0328 (Jadeite)



t. 96-901-1494 (Quartz)

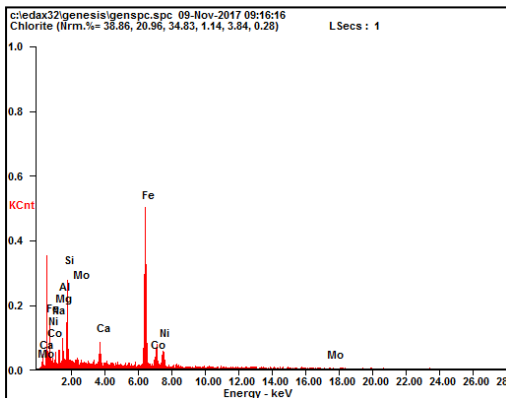


u. 96-101-1181 (Iron Sulfide)



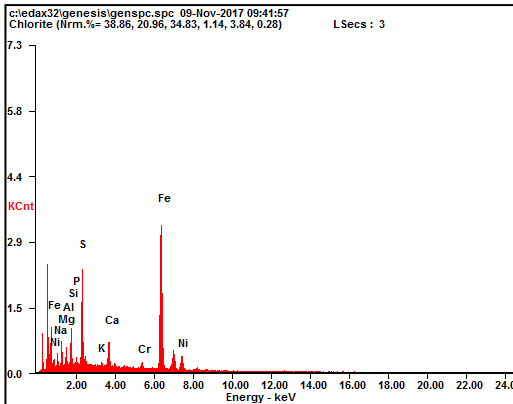
H. Hasil Pengujian EDX

a. Hasil Uji EDX Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit 1,19 : 1 (Logam)



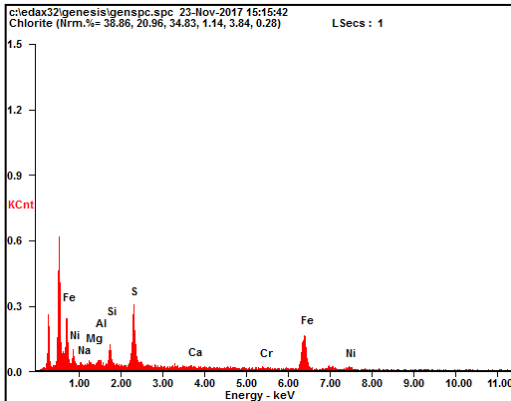
<i>Element</i>	<i>Wt %</i>	<i>At %</i>
<i>NaK</i>	03.87	07.24
<i>MgK</i>	05.10	08.98
<i>AlK</i>	04.12	06.54
<i>SiK</i>	13.34	20.33
<i>MoL</i>	01.54	00.69
<i>CaK</i>	03.40	03.64
<i>FeK</i>	58.26	44.91
<i>CoK</i>	01.68	01.23
<i>NiK</i>	08.67	06.42

**b. Hasil Uji EDX Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
1,48 : 1 (Logam)**



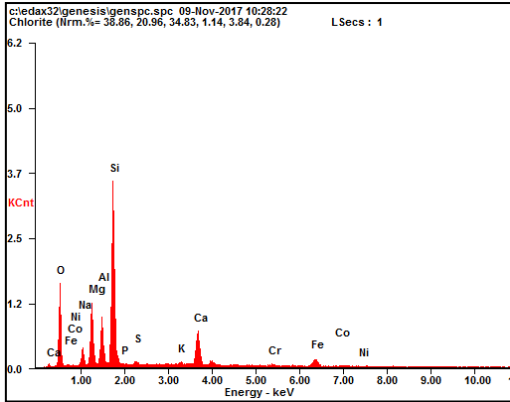
<i>Element</i>	<i>Wt %</i>	<i>At %</i>
<i>NaK</i>	01.82	03.63
<i>MgK</i>	02.52	04.61
<i>AlK</i>	01.42	02.38
<i>SiK</i>	02.88	04.57
<i>P K</i>	00.90	01.26
<i>S K</i>	06.12	08.47
<i>KK</i>	00.56	00.62
<i>CaK</i>	02.27	02.50
<i>CrK</i>	00.86	00.76
<i>FeK</i>	68.66	61.22
<i>NiK</i>	12.74	10.94

**c. Hasil Uji EDX Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
2,09 : 1 (Logam)**



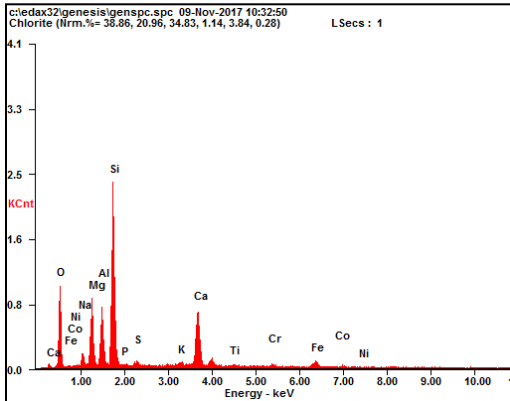
<i>Element</i>	<i>Wt %</i>	<i>At %</i>
<i>NaK</i>	00.79	01.65
<i>MgK</i>	00.80	01.57
<i>AlK</i>	01.34	02.37
<i>SiK</i>	03.87	06.59
<i>S K</i>	12.48	18.62
<i>CaK</i>	01.21	01.45
<i>CrK</i>	02.37	02.18
<i>FeK</i>	65.11	55.77
<i>NiK</i>	12.04	09.81

**d. Hasil Uji EDX Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
1,19 : 1 (Bagian Non Magnetik)**



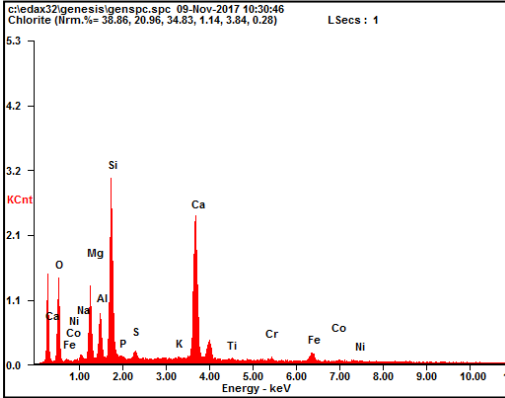
<i>Element</i>	<i>Wt %</i>	<i>At %</i>
<i>O K</i>	29.01	43.30
<i>NaK</i>	04.13	04.30
<i>MgK</i>	11.73	11.53
<i>AlK</i>	06.88	06.08
<i>SiK</i>	30.35	25.78
<i>PK</i>	00.15	00.12
<i>SK</i>	00.59	00.45
<i>KK</i>	00.71	00.44
<i>CaK</i>	06.19	03.67
<i>CrK</i>	00.83	00.38
<i>FeK</i>	08.49	03.65
<i>CoK</i>	00.57	00.24
<i>NiK</i>	00.44	00.18

**e. Hasil Uji EDX Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
1,48 : 1 (Bagian Non Magnetik)**



<i>Element</i>	<i>Wt %</i>	<i>At %</i>
<i>OK</i>	31.39	46.382
<i>NaK</i>	02.15	02.21
<i>MgK</i>	10.00	09.72
<i>AlK</i>	08.36	07.33
<i>SiK</i>	27.15	22.85
<i>PK</i>	00.09	00.07
<i>SK</i>	00.68	00.50
<i>KK</i>	00.72	00.43
<i>CaK</i>	13.35	07.87
<i>TiK</i>	00.68	00.34
<i>CrK</i>	00.81	00.37
<i>FeK</i>	03.72	01.58
<i>CoK</i>	00.40	00.16
<i>NiK</i>	00.53	00.22

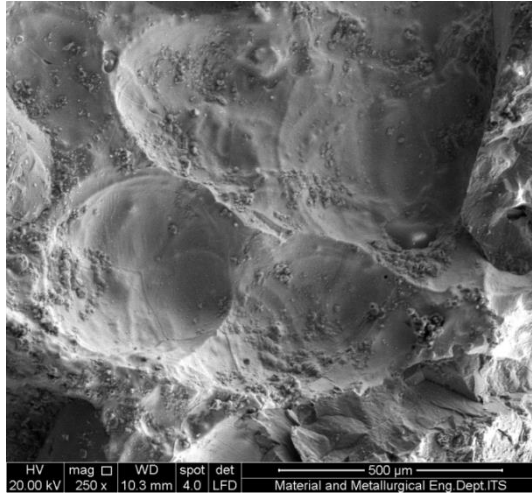
**f. Hasil Uji EDX Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
2,09 : 1 (Bagian Non Magnetik)**



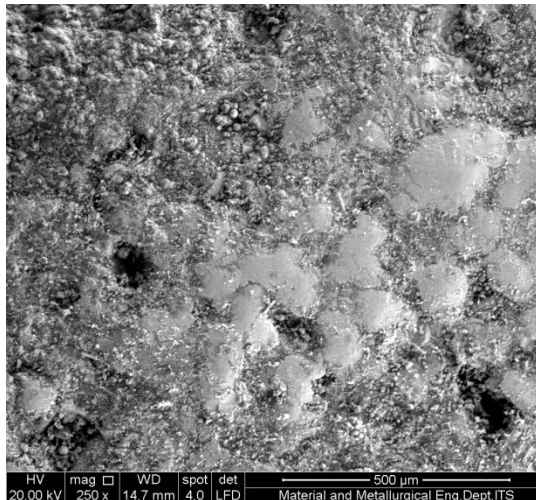
<i>Element</i>	<i>Wt %</i>	<i>At %</i>
<i>OK</i>	30.16	45.83
<i>NaK</i>	01.69	01.77
<i>MgK</i>	09.32	09.31
<i>AlK</i>	06.91	06.20
<i>SiK</i>	24.93	21.49
<i>PK</i>	00.31	00.24
<i>SK</i>	00.87	00.67
<i>KK</i>	00.65	00.40
<i>CaK</i>	17.31	10.64
<i>TiK</i>	00.68	00.34
<i>CrK</i>	00.91	00.43
<i>FeK</i>	05.00	02.17
<i>CoK</i>	00.43	00.18
<i>NiK</i>	00.85	00.36

I. Hasil Pengujian SEM

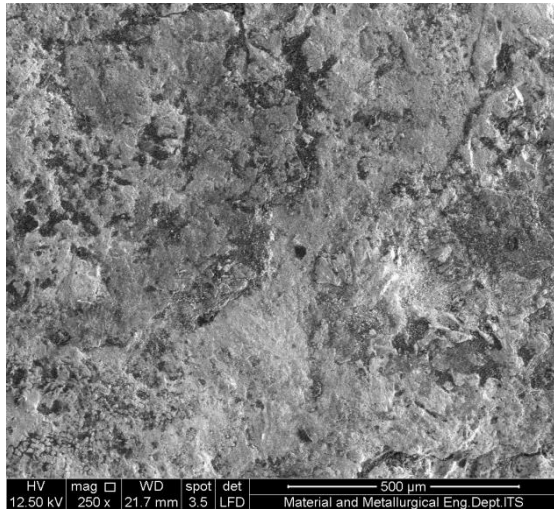
a. Hasil Uji SEM Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit 1,19 : 1 (Logam)



b. Hasil Uji SEM Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit 1,48 : 1 (Logam)



**c. Hasil Uji SEM Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
2,09 : 1 (Logam)**



J. Foto Dokumentasi



Gambar Proses Penimbangan



Gambar Proses Kompaksi



Gambar Proses *Drying*



Gambar Penambahan Batu Bara dan Dolomit pada *bed*



Gambar Proses Reduksi

K. Gambar Hasil Reduksi

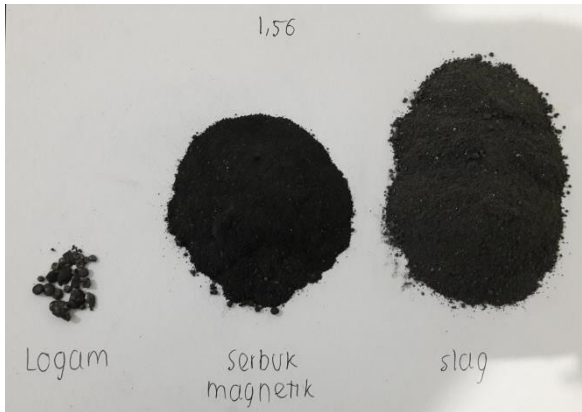
**a. Hasil Reduksi Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
1,19 : 1**



**b. Hasil Reduksi Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
1,48 : 1**



c. Hasil Reduksi Variasi Rasio Batu Bara-Dolomit
2,09 : 1



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Tangerang 24 Maret 1997, merupakan anak pertama dari 4 bersaudara dari pasangan M. Anwar Djoharatmadja dan Mahmudah. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Tadika Puri, SDN 05 Petukangan Selatan, SMPN 177 Jakarta dan SMAN 70 Jakarta. Saat ini penulis melanjutkan studinya melalui jalur SNMPTN di Departemen Teknik Material, Institut Teknologi Sepuluh

Nopember, Surabaya pada tahun 2014 dan terdaftar dengan NRP 2714100024. Di Departemen Teknik Material penulis melakukan penelitian Tugas Akhir bidang studi Ekstraksi, pada Laboratorium Pengolahan Material dengan judul tugas akhir **“Reduksi Langsung Bijih Nikel Laterit Limonitik Dengan Variasi Rasio Batu Bara Dan Dolomit Pada Reaktor *Bed* Batu Bara-Dolomit”**. Selama berkuliah, penulis aktif mengikuti organisasi HMMT FTI-ITS, Kepanitiaan Gerigi, Kepanitiaan Ini Lho ITS!, Komisi Pemilihan Umum dalam Pemilihan Presiden BEM ITS dan Kepanitiaan Kesma *Expo*. Nomor telepon penulis yang dapat dihubungi 085776651231 dengan alamat email anisya_purnamasari@yahoo.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)