



TUGAS AKHIR – TL184834

**REVIEW PENGARUH TEMPERATUR TAHAN TERHADAP
PROSES KALSINASI BIJIH NIKEL LATERIT**

**MUHAMMAD FADEL DEVINTO
NRP. 0251164000044**

**Dosen Pembimbing
Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.
Fakhreza Abdul, S.T., M.T.**

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



TUGAS AKHIR – TL 184834

**REVIEW PENGARUH TEMPERATUR TAHAN
TERHADAP PROSES KALSINASI BIJIH NIKEL
LATERIT**

MUHAMMAD FADEL DEVINTO
NRP. 0251164000044

Dosen Pembimbing
Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.
Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 184834

**REVIEW THE EFFECT OF HOLDING TEMPERATURE
ON THE CALCINATION PROCESS OF LATERITE
NICKEL ORE**

MUHAMMAD FADEL DEVINTO
NRP. 0251164000044

Supervisors
Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.
Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

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

(This page is intentionally left blank)

**REVIEW PENGARUH TEMPERATUR TAHAN
TERHADAP PROSES KALSINASI BIJIH NIKEL
LATERIT**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MUHAMMAD FADEL DEVINTO

NRP 02511640000044

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. (Pembimbing I)
2. Fakhreza Abdul, S.T., M.T. (Pembimbing II)



**SURABAYA
Agustus 2020**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

REVIEW PENGARUH TEMPERATUR TAHAN TERHADAP PROSES KALSINASI BIJIH NIKEL LATERIT

Nama : Muhammad Fadel Devinto
NRP : 0251164000044
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.
Pembimbing II : Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

Abstrak

Bijih nikel laterit adalah sumber daya alam yang sangat berpotensi di Indonesia yang biasa diolah menjadi feronikel. Pada proses pengolahan feronikel, terdapat proses kalsinasi yang bertujuan untuk menghilangkan kadar air dari bijih nikel laterit dan terjadinya reduksi awal. Proses kalsinasi memiliki banyak faktor, salah satunya temperatur tahan. Temperatur tahan ini mempengaruhi hasil dari produk kalsinasi bijih nikel laterit. Pada tinjauan literatur ini dilakukan analisis pengaruh temperatur tahan terhadap proses transformasi fasa dan perolehan kadar Ni. Pada tinjauan literatur ini diharapkan dapat memberikan tinjauan tentang hasil analisis pengaruh temperatur tahan dalam proses kalsinasi bijih nikel laterit serta dapat memberikan rekomendasi temperatur tahan yang digunakan untuk pengoptimalan kinerja pada ranah industri feronikel. Pada review ini didapatkan temperatur optimal pada temperatur tahan 1000°C dengan kadar Ni sebesar 2,27%. Temperatur awal mulai terjadinya transformasi fasa pada bijih nikel laterit untuk Fe sekitar 275°C dan untuk Ni sekitar 500°C. Terjadinya transformasi goethite menjadi hematite antara 300°C-350°C. Terjadinya transformasi hematite menjadi magnetite antara 850°C-1000°C. Dalam review ini, temperatur tahan 1000°C lebih optimal karena telah terjadi transformasi fasa yang kompleks dan mendapatkan kadar Ni yang lebih tinggi.

Kata Kunci: *Nikel, Kalsinasi, Temperatur Tahan, Kadar Ni, Transformasi Fasa*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

REVIEW THE EFFECT OF HOLDING TEMPERATURE ON THE CALCINATION PROCESS OF LATERITE NICKEL ORE

Student Name : Muhammad Fadel Devinto
NRP : 0251164000044
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.
Co-Supervisor : Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

Abstract

Laterite nickel ore is a potential natural resource in Indonesia which is usually processed into ferronickel. In the process of ferronickel processing, there is a calcination process which aims to eliminate the moisture content of the laterite nickel ore and the initial reduction occurs. The calcination process has many factors, one them is holding temperature. This holding temperature affects the result of the calcined laterite nickel ore product. In this literature review, an analysis of the effect of holding temperature was carried out on the phase transformation process and the acquisition of Ni content. This literature review is expected to provide an overview of the results of the analysis of the effect of resistant temperature in the calcination process of laterite nickel ore and to provide recommendations for holding temperature used to optimize performance in the ferronickel industry. From this review, the optimal holding temperature is obtained at 1000°C with Ni level of 2.27%. Initial temperature began to occur at the phase transformation of laterite nickel ore for Fe around 275°C and for Ni around 500°C. The transformation of goethite into hematite between 300°C-350°C. The transformation of hematite into magnetite between 850°C-1000°C. In this review, a holding temperature at 1000°C is more optimal because of the complex phase transformation and obtaining a higher Ni level.

Keywords: *Nickel, Calcination, Holding Temperature, Ni levels, Phase Transformation*

(this page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan ke hadirat Allah SWT berkat rahmat dan karunia-Nya penelitian Tugas Akhir dapat terlaksanakan dengan baik dan dapat selesai tepat pada waktunya. Tujuan dari penyusunan Laporan Tugas Akhir adalah untuk memenuhi salah satu syarat akademis yang wajib dipenuhi dalam kuliah program studi Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS Surabaya. Untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir.
2. Kedua orang tua, kakak, serta seluruh keluarga besar yang senantiasa mendukung dan mendoakan penulis.
3. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Material & Metalurgi FTIRS-ITS.
4. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing 1 tugas akhir. Dengan bimbingan dan arahannya serta memberikan banyak masukan, kritik, dan saran bagi penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Bapak Fakhreza Abdul, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing 2 tugas akhir yang telah memberikan banyak masukan, kritik, dan saran bagi penulis.

Penulis menyadari penyusunan laporan ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca.

Surabaya, 6 Agustus 2020
Penulis



Muhammad Fadel Devinto

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Studi Literatur.....	3
1.4 Manfaat Studi Literatur.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Batu Bara	5
2.1.1 Klasifikasi Batu Bara	6
2.1.2 Penyalaan Batu Bara dan Reaksi Pembakaran Batu Bara	8
2.2 Nikel	9
2.3 Nikel Laterit.....	11
2.4 Teknologi Pengolahan Bijih Nikel Laterit.....	13
2.4.1 Ekstraksi Bijih Nikel Laterit Saprolit.....	14
2.4.2 Ekstraksi Bijih Nikel Laterit Limonit.....	17
2.5 Kalsinasi	18
2.6 Rotary Kiln	19
2.7 Termodinamika Kalsinasi	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir	25
3.2 Bahan Penelitian	27
3.2.1 Bijih Nikel Laterit	27
3.2.2 Batu Bara.....	27
3.3 Alat Penelitian.....	27
3.3.1 Rotary Kiln.....	28

3.4	Pengujian Karakterisasi.....	28
3.4.1	X-Ray Diffraction (XRD).....	29
3.4.2	X-Ray Fluorescence (XRF).....	30
3.4.3	Scanning Electron Microscope (SEM).....	31
3.4.4	Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)	32
3.4.5	Analisis Thermogravimetri (TGA).....	32
3.4.6	Analisis Proksimat.....	33
3.5	Metode Penelitian	36
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		
4.1	Analisis Data.....	41
4.2	Pembahasan.....	58
4.2.1	Pengaruh Temperatur Tahan Terhadap Transformasi Fasa	58
4.2.2	Pengaruh Temperatur Tahan Terhadap Kadar Ni	87
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	93
5.2	Saran	93
DAFTAR PUSTAKA		95
UCAPAN TERIMA KASIH.....		101
BIODATA PENULIS		103

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi nikel ore.....	11
Gambar 2.2	Profil pelapukan pada bijih nikel laterit	12
Gambar 2.3	Pengolahan bijih nikel laterit saprolit.....	15
Gambar 2.4	Pengolahan bijih nikel laterit limonit	17
Gambar 2.5	<i>Rotary Kiln</i>	20
Gambar 2.6	Tampak dalam rotary kiln	21
Gambar 2.7	Diagram Ellingham	23
Gambar 3.1	Diagram Alir.....	26
Gambar 3.2	Bijih nikel laterit saprolit (A) limonit (B)	27
Gambar 3.3	Batu bara <i>Sub-Bituminous</i>	27
Gambar 3.4	<i>Rotary Kiln</i>	28
Gambar 3.5	Instrumen XRD	30
Gambar 3.6	Instrumen XRF	31
Gambar 3.7	Instrumen SEM.....	31
Gambar 3.8	Gambaran skematis analisis TGA	33
Gambar 4.1	Hasil analisis XRD Bijih A dari Evia oleh Zevgolis.....	42
Gambar 4.2	Hasil analisis XRD Bijih B dari Lokrida oleh Zevgolis.....	42
Gambar 4.3	Hasil analisis XRD Bijih C dari Kastoria oleh Zevgolis.....	43
Gambar 4.4	Hasil analisis XRD awal bijih nikel laterit oleh Huang.....	44
Gambar 4.5	Hasil analisis XRD bijih nikel laterit awal oleh Keskindilic.....	45
Gambar 4.6	Hasil analisis XRD bijih nikel laterit awal oleh Xu	47
Gambar 4.7	Hasil analisis XRD bijih nikel laterit limonit awal oleh Prasetyo.....	48
Gambar 4.8	(a) Hasil analisis SEM bijih nikel laterit limonit awal (b) Hasil mapping bijih nikel laterit limonit awal oleh Prasetyo	49

Gambar 4.9	Hasil analisis XRD bijih nikel laterit saprolit awal dari Pomalaa oleh Setiawan	51
Gambar 4.10	Hasil analisis SEM bijih nikel laterit saprolit awal dari Pomalaa oleh Setiawan	52
Gambar 4.11	Hasil mapping bijih nikel laterit saprolit awal dari Pomalaa oleh Setiawan.....	53
Gambar 4.12	Hasil analisis XRD Bijih A dari Evia oleh Zevgolis	59
Gambar 4.13	Hasil analisis XRD Bijih C dari Kastoria oleh Zevgolis	59
Gambar 4.14	Hasil analisis XRD Bijih A dari Evia dan Bijih C Kastoria oleh Zevgolis	60
Gambar 4.15	Hasil analisis thermal Bijih A dari Evia oleh Zevgolis	61
Gambar 4.16	Hasil analisis thermal Bijih B dari Lokrida oleh Zevgolis	61
Gambar 4.17	Hasil analisis thermal Bijih C dari Kastoria oleh Zevgolis	62
Gambar 4.18	Hasil TG/DTA bijih nikel laterit oleh Huang	63
Gambar 4.19	Hasil analisis XRD bijih nikel laterit oleh Keskindalic.....	65
Gambar 4.20	TGA/DTA Bijih 1 dari Indonesia oleh Rizov.....	67
Gambar 4.21	TGA/DTA Bijih 2 dari Indonesia oleh Rizov.....	67
Gambar 4.22	TGA/DTA Bijih 3 dari Filipina oleh Rizov.....	68
Gambar 4.23	TGA/DTA Bijih 4 dari Filipina oleh Rizov.....	68
Gambar 4.24	TGA/DTA Bijih 5 dari Turkey oleh Rizov.....	69
Gambar 4.25	TGA/DTA Bijih 6 dari Turkey oleh Rizov.....	69
Gambar 4.26	TGA/DTA Bijih 7 dari Albania oleh Rizov.....	70
Gambar 4.27	TGA/DTA Bijih 8 dari Albania oleh Rizov.....	70
Gambar 4.28	TGA/DTA Bijih 9 MK oleh Rizov	71
Gambar 4.29	Hasil analisis TG/DTG bijih nikel laterit oleh Xu	73
Gambar 4.30	Hasil analisis XRD pada 600°C, 800°C, dan 1000°C oleh Xu.....	74
Gambar 4.31	Hasil analisis XRD oleh Prasetyo.....	75

Gambar 4.32	Hasil analisis SEM (a) sampel awal (b) sampel hasil kalsinasi 600°C (c) sampel hasil kalsinasi 800°C (d) sampel hasil kalsinasi 1000°C oleh Prasetyo	77
Gambar 4.33	Hasil mapping (a) sampel awal (b) sampel hasil kalsinasi 600°C (c) sampel hasil kalsinasi 800°C (d) sampel hasil kalsinasi 1000°C dari oleh Prastyo	78
Gambar 4.34	Perbandingan difraktogram hasil kalsinasi 600°C, 800°C, dan 1000°C dari Pomalaa oleh Setiawan	80
Gambar 4.35	Hasil analisis SEM (a) 600°C (b) 800°C (c) 1000°C dari Pomalaa oleh Setiawan.....	81
Gambar 4.36	Diagram kesetimbangan Boudouard	91
Gambar 4.37	Grafik kadar Ni.....	91

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan atom di dalam batu bara.....	6
Tabel 2.2	Klasifikasi bahan bakar fosil padat.....	6
Tabel 3.1	Referensi penelitian	37
Tabel 4.1	Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal oleh Zevgolis	41
Tabel 4.2	Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal oleh Huang	43
Tabel 4.3	Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal oleh Rizov	46
Tabel 4.4	Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal oleh Xu	46
Tabel 4.5	Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal dari Pomalaa oleh Setiawan.....	52
Tabel 4.6	Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal Halmahera oleh Prasetyo.....	54
Tabel 4.7	Hasil analisis proksimat batu bara oleh Prasetyo	54
Tabel 4.8	Hasil analisis XRF bijih nikel laterit awal Halmahera oleh Prasetyo.....	55
Tabel 4.9	Hasil analisis proksimat oleh Prasetyo	55
Tabel 4.10	Hasil analisis XRF bijih nikel laterit oleh Subagja	56
Tabel 4.11	Hasil analisis proksimat batu bara oleh Subagja	56
Tabel 4.12	Hasil analisis XRF bijih nikel laterit awal oleh Mayangsari	57
Tabel 4.13	Hasil analisis proksimat batu bara oleh Mayangsari	58
Tabel 4.14	Hasil variasi transformasi fasa.....	84
Tabel 4.15	Hasil analisis produk kadar Ni dari Halmahera oleh Prasetyo	87
Tabel 4.16	Hasil analisis produk kadar Ni dari Halmahera oleh Prasetyo	88

Tabel 4.17	Hasil analisis produk kadar Ni oleh Subagja	89
Tabel 4.18	Hasil analisis produk kadar Ni oleh Mayangsari	89
Tabel 4.19	Variasi dan kadar Ni jurnal pembahasan yang digunakan.....	90

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Praktik dalam dunia industri saat ini, kita menyadari bahwa kehidupan di era sekarang bergantung dengan keberadaan logam terutama logam seperti nikel, aluminium, besi, dan baja. Logam-logam tersebut digunakan dalam berbagai macam alat dan merupakan bahan baku utama bagi banyak industri. Nikel adalah unsur paduan utama dari besi tahan karat dan mengalami pertumbuhan yang sangat pesat seiring dengan peningkatan permintaan besi tahan karat tersebut. Saat ini lebih dari 65% nikel digunakan dalam industri besi tahan karat dan sekitar 12% digunakan dalam manufaktur paduan super atau paduan bukan besi (Moskalyk, 2002). Nikel telah diidentifikasi sebagai unsur sejak tahun 1751 oleh Alex Cronstedt. Pengaplikasian pertama pada nikel yaitu pada tahun 1820 di Eropa dalam paduan nikel, tembaga, dan seng yang disebut German silver. Juga pada tahun 1857 di Amerika Serikat memperkenalkan uang koin satu cent terbuat dari paduan copper-nikel. Pertumbuhan nikel menjadi komoditas kebutuhan logam di abad 20, karena nikel juga telah diaplikasikan sebagai *stainless steel*. Pertumbuhan ini berlanjut pada abad 21 yang didorong dengan industrialisasi yang cepat di India dan China (Crundwell, dkk 2011).

Pada saat ini cadangan bijih nikel sulfida di dunia semakin menipis, sehingga produksi menggunakan bijih nikel laterit untuk mendapatkan nikel semakin digencarkan. Sehingga pembuatan nikel menggunakan bijih nikel laterit belum optimal dan masih perlu pengembangan sehingga dapat diperoleh potensi maksimal dari bijih nikel laterit (Jungah, dkk 2010). Nikel banyak digunakan dalam bentuk logam murni atau sebagai paduan feronikel dengan kandungan besi yang bervariasi (Li, dkk 2012). Nikel juga memiliki sifat konduktivitas panas dan listrik yang rendah, kekuatan yang baik, ketangguhan pada temperatur tinggi, serta memiliki ketahanan korosi dan oksidasi yang baik (Rhamdhani,

2009). Salah satu metode untuk mengolah nikel yaitu *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF) digunakan untuk menghasilkan feronikel dan nikel-matte. Proses ini diawali dengan pengeringan kandungan pada bijih nikel laterit melalui proses *pretreatment* dan selanjutnya masuk ke tahap kalsinasi (*pre-reduksi*) (Setiawan I. , 2016).

Kalsinasi adalah suatu proses yang bertujuan untuk menghilangkan kadar air yang ada di dalam bijih nikel. Selain itu, pada proses kalsinasi terjadi reaksi-reaksi yang terbentuk secara langsung dan tidak langsung. Proses kalsinasi sangat penting karena proses kalsinasi adalah langkah awal dalam proses pembentukan feronikel (Crundwell, dkk 2011). Bijih nikel laterit merupakan hasil proses pelapukan dan pengkayaan batuan mafik/ultramafic di daerah tropis. Oleh karena itu, komposisi kimia dan mineraloginya berbeda antara satu endapan dengan endapan lainnya (Dalvi, 2004).

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada *review* ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh temperatur tahan terhadap transformasi fasa pada kalsinasi bijih nikel laterit?
2. Bagaimana pengaruh temperatur tahan terhadap kadar Ni produk hasil kalsinasi bijih nikel laterit?

1.3 Tujuan Studi Literatur

Tujuan penelitian pada *review* jurnal ini adalah :

1. Menganalisa pengaruh temperatur tahan terhadap transformasi fasa pada kalsinasi bijih nikel laterit.
2. Menganalisa pengaruh temperatur tahan terhadap kadar Ni produk hasil kalsinasi bijih nikel laterit.

1.4 Manfaat Studi Literatur

Hasil *review papers* ini diharapkan dapat memberikan pengalaman bagi penulis untuk menerapkan dan menambah wawasan dari teori dan ilmu yang telah diterima selama perkuliahan. Dapat memperluas pengetahuan mengenai pengaruh temperatur tahan terhadap transformasi fasa dan kadar nikel dari produk hasil kalsinasi bijih nikel laterit. Penulisan yang dilakukan diharapkan dapat memberikan informasi untuk peneliti lainnya terutama dalam bidang kalsinasi bijih nikel laterit.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batu Bara

Batu bara adalah bahan bakar padat yang telah lama diketahui dan digunakan. Batu bara memiliki peluang paling besar untuk menggantikan peran minyak bumi sebagai sumber energi utama dalam negeri. Batu bara adalah bahan bakar yang berasal dari fosil tanaman yang tertimbun selama puluhan bahkan ribuan tahun yang lalu, yang mengalami proses alamiah berupa pelapukan dan degradasi oleh jamur, bakteri, dan oksidasi. Batu bara berasal dari hasil suatu proses dekomposisi yang telah berlangsung ribuan tahun terhadap tumpukan bahan tumbuhan. Dekomposisi tanaman ini terjadi karena proses biologi dengan mikroba (*peatification*) serta metamorfosa dengan tekanan dan pemanasan (*coalification*). Proses perubahan berturut-turut sesuai dengan waktu, membentuk gambut, lignit, sub-bituminous, bituminous, dan antrasit. Batu bara bukan merupakan campuran homogeny dari unsur-unsur kimia, seperti karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), sulfur (S), nitrogen (N), dan unsur-unsur *minor* lainnya melainkan terdiri dari maseral organik dan kristal mineral anorganik.

Perubahan yang kemudian terjadi dalam kandungan bahan disebabkan oleh kombinasi antara suhu, tekanan, dan waktu mengakibatkan kenaikan jumlah karbon dan penurunan jumlah hidrogen dan oksigen. Perbandingan atom di dalam batu bara ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan atom di dalam batu bara
(Hawaria, 2000)

Ranking Batu bara	Perbandingan Atom				
	C	H	O	N	S
Antrasit	100	50	2-5	1-2	$1/2 - 1$
Bituminus	100	70	4-8	1-2	$1/2 - 1$
Sub Bituminus	100	80	10-20	1-2	$1/2 - 1$
Lignit	100	80	20-25	1-2	$1/2 - 1$

Perbandingan atom hidrogen/karbon mengalami penurunan dengan kenaikan *ranking*. Hal yang sama, perbandingan atom oksigen/karbon mengalami penurunan dengan kenaikan *ranking*.

Jika dianggap proses akhir perubahan bentuk dari tumbuh-tumbuhan adalah terbentuknya karbon, maka kenaikan kandungan karbon ditunjukkan dalam tingkatan dimana batu bara yang tingkatannya lebih rendah dan antrasit mengandung lebih banyak hidrogen dan oksigen, yaitu bituminous, sub-bituminous, dan lignit. Klasifikasi bahan bakar fosil padat ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Klasifikasi bahan bakar fosil padat
(Hawaria, 2000)

Jenis Bahan Bakar Padat	Kadar air (%) berat	Nilai Panas (kkal/kg)
Gambut	70-75	± 1600
Lignit	35-40	4500-4600
Sub Bituminus	± 10	5700-6400
Bituminus	± 3	± 8450

2.1.1 Klasifikasi Batu Bara

Secara umum batu bara diklasifikasikan menurut *ranking*, dari lignit sampai antrasit, berdasarkan analisis proksimat, analisis ultimat, dan analisis nilai kalornya. Klasifikasi *ranking* batu bara, antara lain: ASTM (*American Society of Testing Material*), ISO

Internasional Organization for Standarization, German DIN System, JIS (*Japan Industrial Standar*).

Klasifikasi batu bara berdasarkan tingkatan dapat ditunjukkan oleh umur batu bara, yang meliputi :

1. Gambut

Gambut sebenarnya bukan merupakan batu bara tetapi merupakan produk awal dan akhir proses *coalification* yaitu proses koncersi bahan tanaman menjadi batu bara. Warnanya bertingkat dari coklat muda hingga mendekati hitam. Tingkatan warna ini sering terlihat dari lapisan atas gambut sampai bawah.

Jenis yang lebih gelap warnanya terlihat lebih tebal dan menunjukkan bukti adanya bagian-bagian dari tumbuhan yang tersisa dibandingkan jenis yang lebih muda warnanya. Kandungan air pada gambut sangat tinggi sekitar 90%. Jika dikeringkan di udara kandungan airnya akan menjadi 30%. Kandungan oksigen yang tinggi menyebabkan nilai kalori yang dihasilkan menjadi rendah.

2. Lignit

Lignit merupakan transisi dari gambut ke batu bara,yaitu tingkatan yang paling rendah dari batu bara sebenarnya. Warnanya coklat kehitaman dan memperlihatkan sambungan bergaris yang mempunyai tekstur seperti kayu. Jenis ini mempunyai kandungan air yang tinggi dan nilai kalor yang rendah. Karena kandungan *volatile matter*nya yang tinggi, lignit sangat mudah terbakar, dan sering terjadi pembakaran spontan ketika penyimpanannya.

3. Sub-Bituminous

Batu bara jenis ini adalah peralihan antara batu bara jenis lignit dan batu bara jenis bituminous. Batu bara jenis ini sulit dibedakan dengan batu bara bituminous. Mempunyai warna hitam, serta mempunyai kandungan air, *volatile matter*, dan oksigen yang tinggi. Batu bara jenis ini memiliki kandungan karbon yang rendah.

4. Bituminous

Batu bara bituminous berupa padatan pejal yang bergaris dan berwarna hitam gelap. Batu bara jenis ini memiliki kandungan air yang rendah, sedangkan kandungan *volatile matter*nya bervariasi dari sedang hingga tinggi, serta batu bara jenis ini memiliki kandungan nilai kalor yang tinggi.

5. Antrasit

Batu bara jenis ini mempunyai kandungan *volatile matter* yang rendah dan hamper seluruhnya berupa karbon tetap sehingga berwarna hitam. Diantara batu bara lainnya, antrasit merupakan batu bara berjenis keras dan tajam.

2.1.2 Penyalaan Batu Bara dan Reaksi Pembakaran Batu Bara

Secara umum penyalaan (*ignition*) dapat dijelaskan sebagai proses untuk memperoleh reaksi bahan bakar dan pengoksida secara berkelanjutan. Penyalaan sering diidentifikasi sebagai nyala yang tampak. Namun reaksi dapat berlangsung sangat lambat pada temperatur yang rendah tanpa nyala yang tampak. Dalam gas *Inert* atau reaktif yang panas, batu bara akan bereaksi di bagian dalam sehingga melunak dan terdevolatilisasi karena meningkatnya temperatur partikel. Pada prosesnya akan dilepas gas dan tar. Gas dan tar yang dilepaskan dapat pula menyala dalam lingkungan pengoksida. Penyalaan sering dikarakterisasikan dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur tertentu atau untuk menjadikan nyala tampak.

Reaksi pembakaran batu bara biasanya dibagi menjadi 3, yaitu :

1. Pengeringan

Pengeringan merupakan tahap awal proses pembakaran batu bara. Dalam proses ini batu bara mengalami proses kenaikan temperatur yang akan mengakibatkan menguapnya kadar air yang berada pada permukaan batu bara tersebut, sedangkan kadar air yang berada di dalam akan menguap melalui pori-pori batu bara tersebut.

2. Devotilisasi

Devotilisasi adalah proses batu bara mulai mengalami dekomposisi setelah terjadi pengeringan. Proses dekomposisi merupakan peristiwa pecahnya ikatan kimia secara thermal dan *volatile matter* (yang merupakan hasil proses devotilisasi) keluar dari partikel.

Siklus reaksi ini berlangsung ketika batu bara dipanaskan dalam lingkungan *inert* atau oksida, partikel dapat melunak dan mengalami transformasi internal. Air yang ada di dalam batu bara akan dilepaskan lebih dahulu dengan meningkatkan temperatur. Kemudian dilepaskan gas dari senyawa hidrokarbon berat seperti air.

Tingkat pirolisa ini berlangsung sangat cepat tergantung pada ukuran dan jenis batu bara serta kondisi temperatur. Residu yang kaya dengan karbon dan sedikit kandungan hidrogen dan oksigennya namun masih mengandung nitrogen dan sulphur serta kebanyakan bahan mineral disebut "*char*". Devotilisasi berlangsung sangat cepat pada temperatur tinggi $\pm 1300^{\circ}\text{C}$.

3. Pembakaran Arang

Sisa dari pirolis adalah arang (fix carbon) dan sedikit abu (Hawaria, 2000).

2.2 Nikel

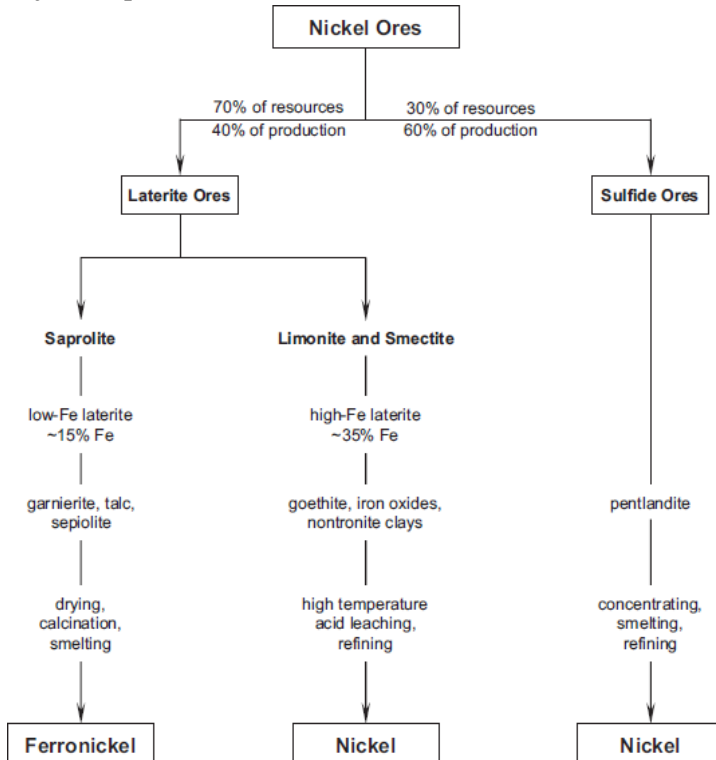
Nikel (nomor atom 28; nomor massa 56,6934) termasuk dalam golongan VIII B dalam tabel periodik unsur bersama besi dan kobalt dan dikenal dengan sebutan "Tiga Serangkai", sehingga sifat ketiganya cenderung mirip. Konfigurasi elektron kulit terluar dari unsur nikel adalah $3d^8 4s^2$ yang membuat valensinya $+2$. Karakteristik fisik dari logam dengan densitas $8,92 \text{ g/cm}^3$ ini antara lain memiliki temperatur lebur sebesar 1455°C dan titik didih $\pm 2915^{\circ}\text{C}$ (Polyakov, 2013). Logam ini banyak dimanfaatkan dalam industri untuk memproduksi jenis material baru, transformasi kimia, baja tahan karat dan baterai. Industri baja tahan karat masih menjadi produk yang paling banyak memanfaatkan nikel hingga saat ini, dimana jumlahnya mencapai 65% total produksi nikel dunia (Zhu, dkk 2018). Variasi baterai untuk kendaraan berbasis

listrik memang banyak memanfaatkan nikel sebagai bahan baku katodanya, seperti baterai jenis katoda *nickel manganese cobalt* (NMC) dan *nickel cobalt aluminium* (NCA) (Miao, dkk 2019). Nikel diperoleh secara komersial dari pentlandite dan pirotit di Kawasan Sudbury Ontario, yang menghasilkan 30% kebutuhan nikel dunia dan deposit lainnya dapat ditemukan di daerah Australia, Cuba, Indonesia dan Keledonia Baru. Nikel digunakan secara luas untuk produksi stainless steel ($\pm 58\%$), paduan logam berbasis nikel ($\pm 14\%$), pengecoran dan paduan baja ($\pm 9\%$), *electroplating* ($\pm 9\%$) dan baterai ($\pm 5\%$) (Mudd, 2009).

Secara alamiah, nikel terbentuk dalam wujud bijih sulfida dan laterit (oksida) (Morcali, 2017). Bijih sulfida terletak pada permukaan yang dalam sehingga membutuhkan sumber daya yang cukup mumpuni untuk mendapatkannya. Contoh bijih nikel sulfida yaitu *pentlandite* ($[\text{Fe},\text{Ni}]_9\text{S}_8$), *pyrrhotite* (Fe_7S_8), *chalcopyrite* (CuFeS_2). Disisi lain, laterit letaknya dekat dengan permukaan yang terbentuk sebagai dampak dari pelapukan batuan ultramafik berkadungan tinggi akan besi dan magnesium sehingga lebih mudah untuk mendapatkannya (Khoo, Nawshad, Geoff, Robbie, & Sankar, 2016). Contoh bijih laterit yaitu limonit dan saprolit (Rodrigues, 2017).

Nikel pada umumnya terbagi dua yaitu laterit dan sulfida. Cadangan bijih nikel laterit di dunia ini lebih besar daripada bijih nikel sulfida, dimana bijih nikel laterit memiliki cadangan sebesar 70% dari total cadangan bijih nikel di dunia. Walaupun demikian, produksi nikel di dunia didominasi oleh bijih nikel sulfida, dimana produksi nikel dari bijih nikel sulfida menyumbang 60% dari total

produksi nikel dunia (Crundwell, dkk 2011). Klasifikasi nikel *ore* ditunjukkan pada Gambar 2.1.

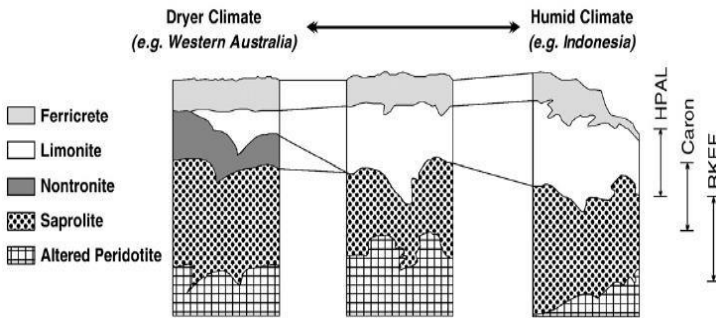


Gambar 2.1 Klasifikasi nikel ore
(Crundwell, dkk 2011)

2.3 Nikel Laterit

Laterit memiliki kandungan nikel yang berkisar antara 0,4wt%-4 wt% yang dipengaruhi oleh kondisi mineralogi dari bijih. Biasanya, kandungan nikel dalam laterit tergabung dengan *goethite*, *hematite*, *ferrihydrite* dan *serpentine* (Al-Khribash, 2020). Hanya 40% produksi nikel dunia berasal dari bijih ini, terlepas dari cadangannya yang mencapai 70% cadangan nikel dunia. Penyebabnya adalah pengolahan nikel dari bijih ini

membutuhkan proses yang kompleks dan cenderung sulit karena kandungan nikelnya yang terdistribusi merata dalam kisi molecular partikel yang terkandung di dalamnya (Pintowantoro, dkk 2018). Indonesia sendiri diprediksi memiliki cadangan laterit sebanyak 1,8 juta ton dengan kadar nikel rata-rata sebesar 1,45% (Febriana, 2020). Profil pelapukan pada bijih nikel laterit ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Profil pelapukan pada bijih nikel laterit
(Mudd, 2009)

Nikel laterit memiliki dua klasifikasi berdasarkan komposisi dari bijih nikel laterit. Yaitu *saprolite* dan *limonite*. Ore *saprolite* memiliki besi dengan kadar rendah sekitar <15% dan konten MgO yang tinggi sekitar 70%. Kadar pada ore *saprolite* biasanya ketika ditambang terletak di bawah lapisan *limonite* yang mana semakin dalam galian maka konten MgO makin tinggi. Mineral yang dapat ditemukan pada *saprolite* seperti *magnesium hydroxysilicates* yang terdiri dari *chysotile* $Mg_3Si_2O_5(OH)$. Sedangkan ore *limonite* memiliki konten besi yang tinggi berkisar pada 40%-60% dan konten MgO sebesar 3% (Crundwell, dkk 2011). Kadar *limonite* memiliki rumus senyawa $(Fe,Ni)O(OH) \cdot nH_2O$ merupakan jenis laterit berbasis oksida yang paling dekat dengan permukaan dan tersebar pada daerah tropis maupun sub-tropis di sekitar garis katulistiwa. Bijih *limonite* mengandung banyak besi hidroksida dalam bentuk *goethite* $(FeO.OH)$. Laterit limonitik juga terasosiasi dengan mineral silikat dan magnesium oksida yang mengantarkan

pada rumitnya mineralogi sehingga sulit dibenefikasi secara fisik (Pickles, 2014). Namun antara bijih nikel *saprolite* dan *limonite* memiliki kadar nikel sebesar 1.3%-2.5% (Crundwell, dkk 2011).

Laterit sendiri akan memiliki 2 rute proses yaitu proses *smelting* untuk memproduksi *feronikel* dan proses *leaching* serta *refining* untuk memproduksi nikel metal. *Saprolite* memiliki alasan kenapa harus di proses *smelting* yaitu :

1. *Saprolite* memiliki konten besi yang kecil sekitar 15% sehingga menghasilkan produk *feronikel* (20%-30%Ni).
2. *Saprolite* memiliki MgO yang tinggi sehingga jika di *leaching* akan menghasilkan asam sulfat yang berlebih.

Limonite harus di proses *leaching* karena :

1. *Goethite* di *limonite* larut efisien di asam sulfat panas, jika suhunya cukup tinggi besi yang merupakan kandungan *limonite* sekitar (40%-60%) mengendap sebagai *hematite* atau *jarosit*.
2. *Limonite* memiliki kandungan MgO yang rendah sekitar 3% di *ore*, yang berarti konsumsi asam sulfat rendah.

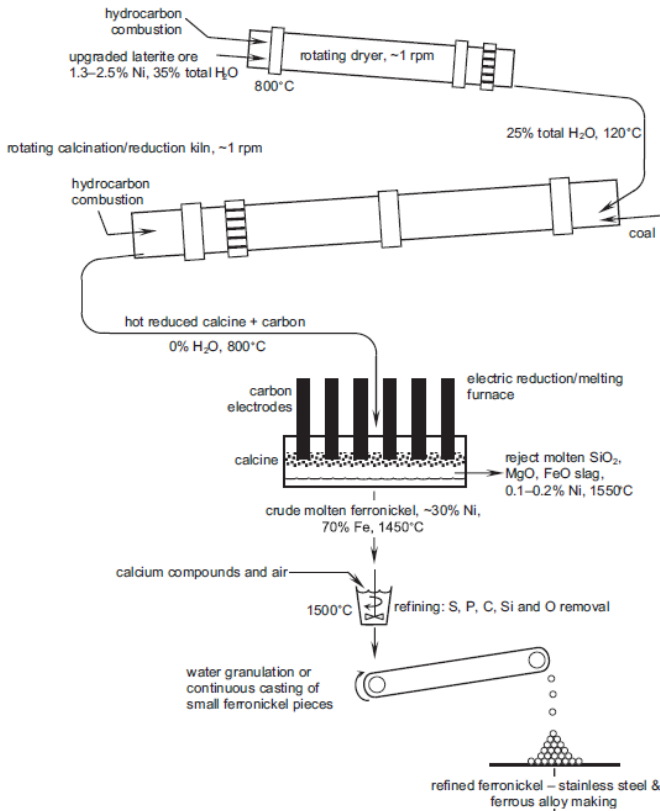
2.4 Teknologi Pengolahan Bijih Nikel Laterit

Pengolahan laterit dapat dilakukan secara pirometalurgi dan hidrometalurgi tetapi efektifitas dari prosesnya dipengaruhi oleh karakteristik mineral dan komposisi kimia dari bijih yang diolah (Sufriadin, 2011). Secara pirometalurgi, teknologi yang telah digunakan industry untuk mengolah laterit selama ini yaitu *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF), *Blast Furnace* dan Reduksi Langsung. Namun pengolahan laterit secara pirometalurgi hanya menguntungkan bila memproses bijih yang memiliki kadar nikel > 1,8wt% karena menimbang kebutuhan energinya yang besar (Setiawan I. , 2016). Oleh karena itu, mengolah laterit dengan pirometalurgi lebih cocok untuk saprolit. Hidrometalurgi sendiri cenderung lebih digemari untuk mengolah limonit. Penyebabnya adalah metode memiliki selektivitas yang lebih tinggi karena dapat memisahkan nikel yang terdistribusi pada mineral-mineral penyusun limonit (Li G. , 2018). Jenis-jenis bijih nikel laterit

tersebut adalah bijih nikel laterit saprolit dan bijih nikel laterit limonit:

2.4.1 Ekstraksi Bijih Nikel Laterit Saprolit

Bijih nikel laterit saprolit diolah dengan tujuan untuk memproduksi feronikel. Feronikel adalah hasil dari proses setelah bijih nikel mendapatkan proses *smelting* dengan komposisi target kadar nikel feronikel adalah 30%. Feronikel akan diaplikasikan sebagai bahan campuran *alloy* untuk pembuatan *stainless steel*. Adapun proses pengolahan ekstraksi pada bijih nikel laterit saprolit ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Pengolahan bijih nikel laterit saprolit (Crundwell, dkk 2011)

Setelah bijih nikel laterit saprolit ditambang, bijih nikel tersebut masih mengandung kadar nikel yang rendah yaitu sekitar 1.3%-2.5% Ni. Saprolit haruslah ditingkatkan atau *upgrading* kadarnya dengan cara 1. *Crushing* 2. Memisahkan partikel mineral yang kaya-nikel, lunak, berkepadatan rendah dari batuan prekursor yang besar, keras, padat, tanpa-nikel, tidak-berserat, serta produk-produk samping, seperti kuarsa. Target dari *upgrading* dengan kadar nikel 3%. *feed* dari proses *upgrading* tersebut biasanya dalam keadaan basah dan lembab (1.5%-3% Ni).

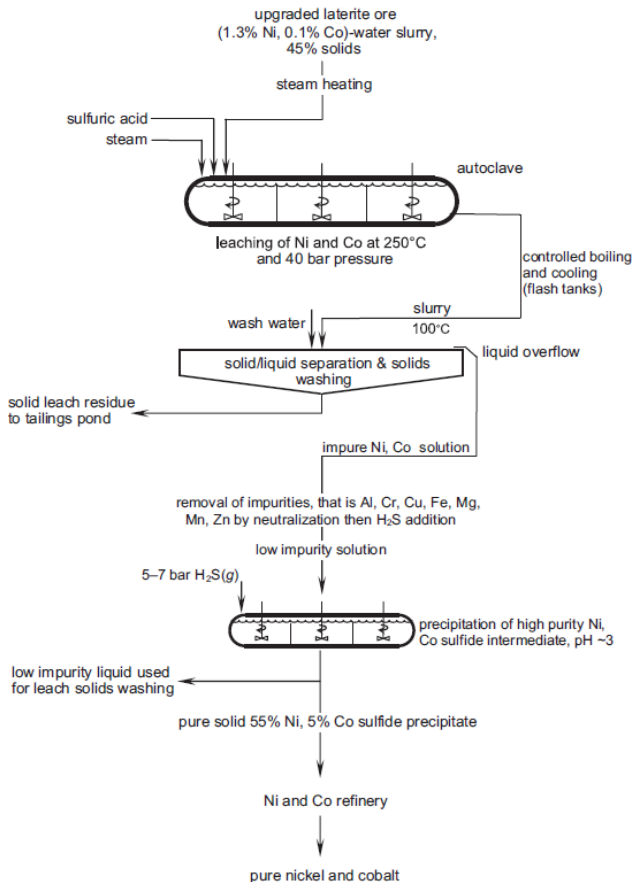
Setelah itu *feed* tersebut akan di *dewatering* atau biasa disebut pengeringan di *rotary kiln* dengan diameter 4m dan panjang 30m. *Kiln* tersebut dipanaskan dengan *coal*, fuel oil atau gas alam. Tujuan dari *dewatering* adalah mengurangi 22% air dari *feed* tersebut. *Feed* kering tersebut dikirim langsung ke proses selanjutnya yaitu ke *calcination kilns* dengan diameter 5m dan panjang 100m serta reduksi dengan reduktor karbon berupa batu bara di temperatur 800°C dengan tujuan memastikan *feed* tersebut kering 100% serta memastikan jumlah karbon cukup pada saat reduksi di proses *smelting* selanjutnya.

Selanjutnya *feed* ini dilakukan proses *smelting* ke dalam *furnace* yang berbentuk lingkaran dengan diameter 15m-20m, *feed* tersebut dicampur dengan reduktor berupa batu bara dan *fluks* berupa *limestone* serta ditingkatkan temperatur sampai diatas 1600°C. Pada proses *smelting* akan menghasilkan residu/sisa yang disebut *slag* berupa lelehan SiO_2 , MgO , FeO dan kadar nikel yang sangat kecil 0.1%-0.2% Ni. Lelehan *fluks* dan lelehan feronikel bersifat *immiscible* sehingga bisa dipisahkan dengan instrument *furnace* yang namanya *taphole* karena memanfaatkan perbedaan densitas yang mana *fluks* lebih ringan dari pada lelehan feronikel.

Hasil dari Feronikel yaitu dengan target kadar nikel 20%-40% Ni. Pada tahap ini sebenarnya produk sudah bisa disebut sebagai feronikel namun belum bisa diterima dipasar karena adanya *impurities* yang tak diinginkan. Melalui proses *refining* yaitu dimana molten feronikel tersebut ditembakkan udara dan senyawa kalsium sehingga kandungan fosfor, sulfur, karbon, silika, dan oksigen yang tersisa terikat ke senyawa kalsium dan dapat dipisahkan dari feronikel (Crundwell, dkk 2011).

2.4.2 Ekstraksi Bijih Nikel Laterit Limonit

Ore limonit biasanya dileaching dengan asam sulfat di temperatur 250°C dengan tekanan 40 bar. Pada temperatur tersebut Fe akan mengendap menjadi *hematite*. Proses ekstraksi bijih nikel laterit limonit terdapat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pengolahan bijih nikel laterit limonit (Crundwell, dkk 2011)

Prinsip ekstraksi *leaching* dikarenakan ore limonit memiliki kandungan Fe yang tinggi dan kadar MgO yang rendah. Proses

diawali dengan pemanasan bijih limonit berupa *slurry* (45% Padatan). *Slurry* tersebut dimasukkan ke *autoclave* dengan asam sulfur dan uap panas pada temperatur 250°C dan dengan tekanan 40 bar. Dengan keadaan tersebut nikel akan larut dalam asam. Asam yang mengandung nikel tersebut akan keluar dari *tank* namun padatan yang tak larut akan berada dibawah *tank* yang akan dibuang ke kolam *tailing*. Namun campuran yang berisi nikel tersebut harus ditekan jumlah pengotornya dengan cara menambahkan H₂S sehingga kadar Al, Cr, Cu, Fe, Mg, Zn akan turun. Larutan yang sudah memiliki *purities* nikel akan dipresipitasi dalam bentuk nikel sulfida pH 3, serta memasukkan kedalam *autoclave* yang diisikan gas H₂S dengan tekanan 5 – 7 bar.

Hasil dari proses presipitasi adalah padatan presepitasi nikel sulfida dengan kadar nikel 55% nikel dan cobalt 5%. Presipitat ini kemudian akan di *refining* menjadi nikel murni proses tersebut biasanya disebut dengan istilah HPAL (*High Pressure Acid Leaching*) (Crundwell, dkk 2011). Bijih nikel laterit limonit bukan hanya diolah secara hidrometalurgi saja, bisa gabungan antra hidrometalurgi dan pirometalurgi yang biasa disebut *The Caron Proses* setelah bijih dikeringkan sekaligus direduksi pada suhu ±700°C, logam akan diekstrak melalui *leaching* dalam lingkungan ammonia bertemperatur tinggi dengan umpan berupa larutan kaya kandungan logam (Dalvi, 2004).

2.5 Kalsinasi

Kalsinisasi, menurut Crundwell pada tahun 2011 dalam buku *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals*, memiliki tujuan sebagai berikut :

- Menghilangkan sisa kandungan air pada bijih (menghindari ledakan pada tanur selama proses peleburan).
- Mereduksi sekitar ¼ bijih nikel menjadi nikel metal.
- Mereduksi sebagian besar Fe³⁺ menjadi Fe²⁺ dan sekitar 5% besi menjadi besi metal.

- Menambahkan batu bara sesuai kebutuhan sehingga tersisa dan bergabung dengan bijih saat dipindahkan ke tanur untuk proses reduksi akhir nikel dan besi.
- Menyediakan temperatur kalsin sekitar 900°C untuk tanur, sehingga meminimalisir energi yang akan digunakan.

Salah satu langkah yang utama dalam proses ekstraksi pirometalurgi bijih nikel laterit saprolit adalah proses kalsinasi dan reduksi sebagian bijih pada suhu sekitar 1000°C. Beberapa penelitian telah melakukan pengujian untuk mengetahui mekanisme reaksi yang terjadi. Penelitian ini mempelajari tentang kinetika reduksi oksida nikel dengan hidrogen pada suhu yang berbeda. Berdasarkan hasil penelitian, laju reduksi terjadi pada suhu 600°C yang dikendalikan oleh reaksi kimia tertentu pada permukaan yang bergerak (Utigard, 2005).

Menurut Li, pengujian menunjukkan bahwa peningkatan waktu dan suhu hingga 80 menit dengan suhu 1000°C yang mendorong konversi nikel menjadi logam nikel (Li, dkk 2012). Kalsinasi bijih nikel laterit dilakukan pada *rotary kiln* yang memiliki panjang hingga 185 m dan dijalankan menggunakan bahan bakar hidrokarbon atau batu bara (Walker, 2009).

Produk dari kalsinasi adalah sebagai berikut :

- Gas berdebu yang terdiri dari karbon dioksida (CO₂), air (H₂O), dan nitrogen (N) pada suhu 250°C.
- *Ore* dalam keadaan kering, sebagian tereduksi dengan batu bara yang terjadi pada suhu 900°C.

Kalsin yang panas setelah keluar dari *rotary kiln*, dituang ke dalam *electric arc furnace* (Crundwell, dkk 2011).

2.6 Rotary Kiln

Rotary kiln merupakan sebuah perangkat *pyroprocessing* yang digunakan untuk menaikkan material sampai pada suhu tinggi (kalsinasi) dalam suatu proses yang berkelanjutan. Material yang biasanya diproduksi menggunakan *rotary kiln* meliputi; semen, kapur, refraktori, titaniumdioksida, alumina, bijih besi, dan nikel.

Rotary kiln dilengkapi dengan *burner* yang terpasang pada ujungnya, udara panas yang dihembuskan berlawanan arah dengan laju material yang masuk untuk proses kalsinasi. Proses ini bertujuan untuk mengurangi kadar LOI (*Lost of Ignition*) $\leq 0,01$. Kadar LOI yang tinggi mengganggu kestabilan dalam *furnace* yang dapat mengakibatkan ledakan dalam *furnace* (Indriatma, 2016).

Rotary kiln memiliki bentuk yang miring dengan kemiringan 3-4% dan berputar 1-4 rev/min. Suhu material maksimal sekitar 1450°C, yang tercapai pada *burning zone*. Material di *burning zone* berupa semisolid dan memadat sempurna pada *cooling zone* (Ingham, 2011). Bagian dalam *rotary kiln* dilapisi dengan batu tahan api untuk melindungi dinding *kiln*. Batu tahan api harus bersifat tahan terhadap suhu tinggi, tahan terhadap perubahan suhu mendadak, tahan terhadap serangan kimia, tahan terhadap abrasi dan memiliki sifat *coatability* (Peray & Joseph J, 1972). Ilustrasi dari *rotary kiln* bisa dilihat pada Gambar 2.5 dan tampak dalam dari *rotary kiln* bisa dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.5 *Rotary Kiln*
(sumber : dokumentasi pribadi)



Gambar 2.6 Tampak dalam rotary kiln
(Crundwell, dkk 2011)

2.7 Termodinamika Kalsinasi

Termodinamika kesetimbangan dari suatu reaksi kimia (Potensial Gibbs) diperlukan untuk melihat variabel-variabel termodinamika yang saling berkaitan. Dari kaitan ini, pengendalian dilakukan melalui instrumen alat ukur, dipasang di reaktor (*smelter*) dan dihubungkan dengan peralatan lain (mekanik) yang kemudian melakukan perubahan keadaan sesuai dengan apa yang diharuskan agar proses berlangsung stabil. Di dalam proses pengolahan nikel berlangsung dengan stabil, proses tersebut dipengaruhi dengan beberapa faktor, diantaranya temperatur dan tekanan kesetimbangan.

- **Temperatur**

Temperatur adalah sifat fisik dari materi yang secara kuantitatif menyatakan tingkat panas atau dingin. Dalam proses pengolahan nikel, temperatur harus disesuaikan dengan tahapan-tahapan yang dilalui.

- **Tekanan Kesetimbangan**

Tekanan merupakan gaya yang bekerja pada suatu bidang per satuan luas bidang tersebut, dimana tekanan ini dapat

dihubungkan dengan temperatur. Dalam proses pengolahan nikel, hubungan tekanan dan temperatur dapat diperoleh dari persamaan energi bebas Gibbs yang bergantung pada tekanan dan temperatur, dijelaskan pada Persamaan 2.1 dan Persamaan 2.2

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2.1)$$

$$\Delta G^\circ = -RT\ln K \quad (2.2)$$

Dimana: ΔG° = perubahan energi Gibbs (J)

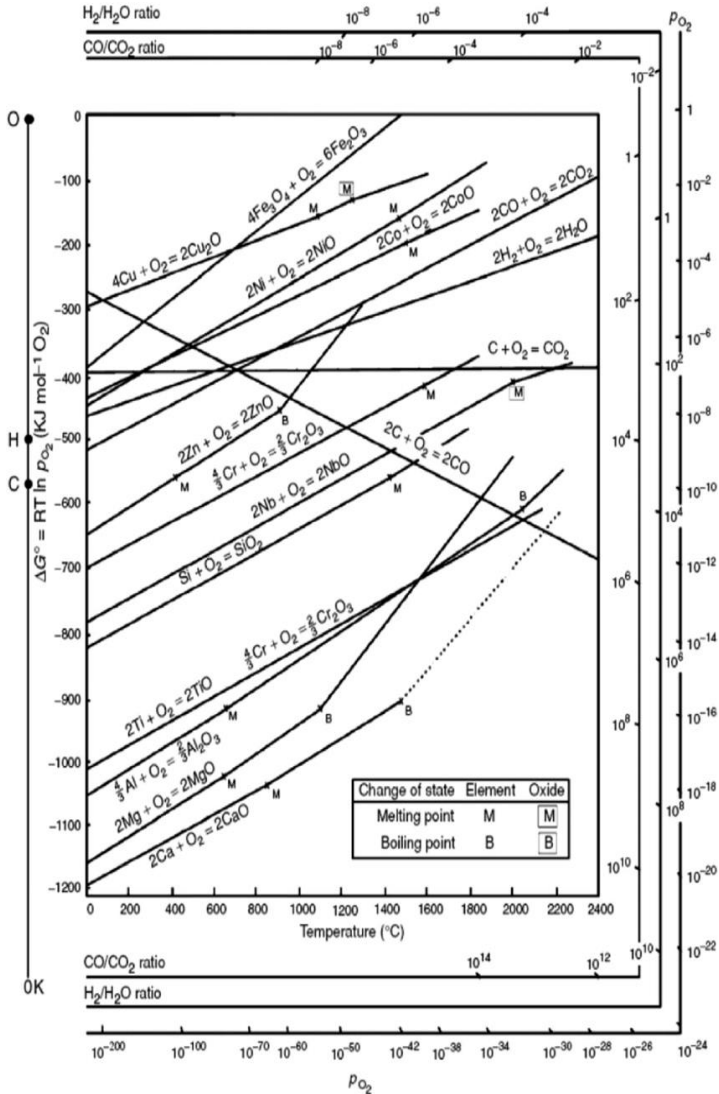
ΔH° = perubahan entalpi reaksi (J)

ΔS° = perubahan entropi reaksi (J/K)

T = temperatur absolut reaksi (K)

Dimana ΔG° adalah Standar Energi *Gibbs*, ΔH° adalah entalpi, ΔS° adalah standar perubahan entropi, K adalah konstanta equilibrium, dan n adalah nomor elektron. ΔG° dengan nilai negatif menunjukkan bahwa suatu reaksi terjadi secara spontan tanpa energi luar dan melepaskan energi atau eksotermik, serta makin stabil dalam membentuk oksida atau mudah dioksidasi sementara reaksi dengan ΔG° positif menunjukkan reaksi tak akan terjadi secara spontan dan membutuhkan energi luar atau endotermik, serta makin tak stabil dalam bentuk oksida atau mudah direduksi (Jeffes, 2001).

Termodinamika yang terjadi bisa dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Diagram Ellingham
(Eric, 2014)

Secara umum diagram Ellingham memiliki 4 kegunaan :

1. Untuk menentukan tingkat kemudahan reduksi dengan logam oksida menjadi logam.
2. Untuk menentukan tekanan parsial oksigen pada temperatur tertentu agar logam oksida dapat tereduksi.
3. Untuk menentukan rasio karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) pada temperatur tertentu agar logam oksida dapat tereduksi.
4. Untuk menentukan rasio hidrogen (H) dan karbon dioksida (CO₂) pada temperatur tertentu agar logam oksida dapat tereduksi (Stratton, 2013).

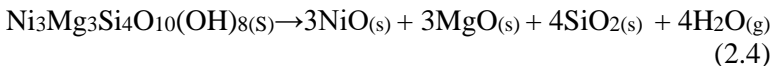
Dalam proses kalsinasi, terjadi beberapa reaksi diantaranya

Reaksi 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9

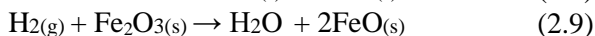
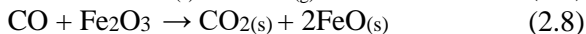
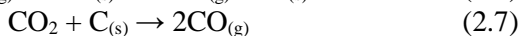
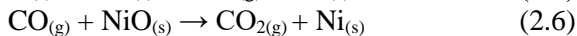
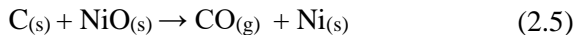
Penguapan air dalam liquid menuju gas pada temperatur 100°C.



Disosiasi dari *ore* laterit menjadi oksida dan H₂ pada temperatur 700°C.

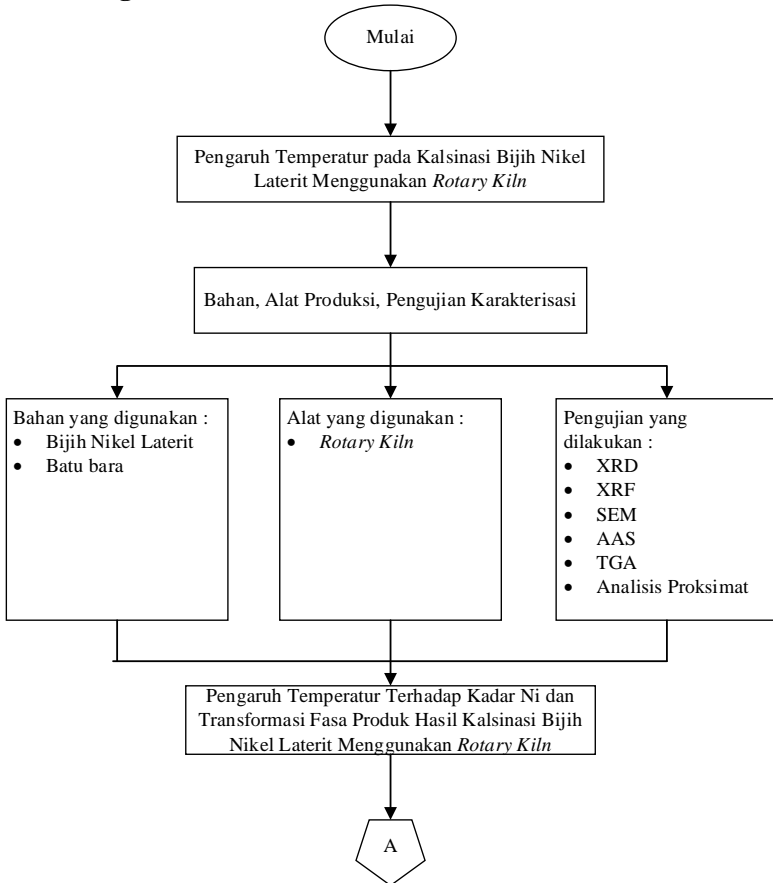


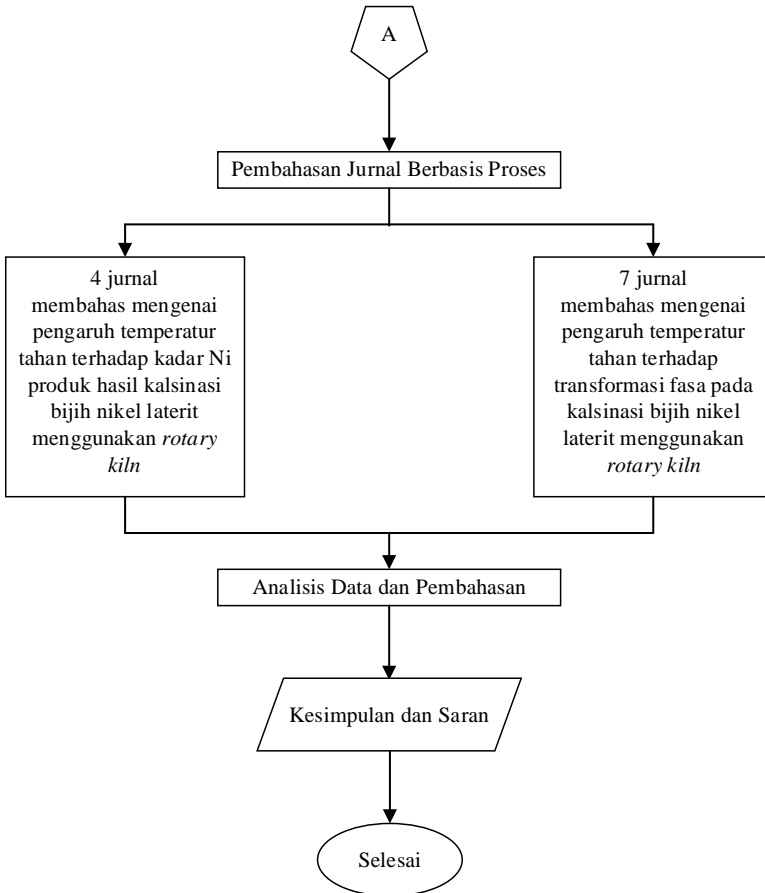
Reduksi dari hasil oksida dengan batu bara dan reduksi langsung gas pada temperatur 800°C.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



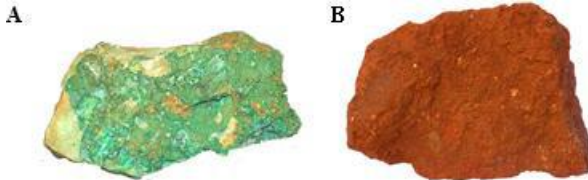
**Gambar 3.1** Diagram Alir

3.2 Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan pada penelitian-penelitian berikut antara lain :

3.2.1 Bijih Nikel Laterit

Bijih nikel laterit yang digunakan dalam penelitian ini adalah bijih nikel laterit yang berasal dari daerah Konawe Utara, Sulawesi Tenggara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Bijih nikel laterit saprolit (A) limonit (B)

3.2.2 Batu Bara

Batu bara yang digunakan sebagai bahan bakar dari *rotary kiln* dan karbon dalam penelitian ini adalah batu bara *sub-bituminous* dari Binuang, Kalimantan Selatan. Batu bara dihancurkan terlebih dahulu kemudian diayak hingga ukuran 50 *mesh* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Batu bara *Sub-Bituminous*

3.3 Alat Penelitian

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat dengan prinsip kerja yang sama. Proses kalsinasi berlangsung pada temperatur di bawah titik leleh. Beberapa alat yang digunakan sebagai berikut.

3.3.1 Rotary Kiln

Rotary kiln merupakan sebuah perangkat *pyroprocessing* yang digunakan untuk menaikkan material sampai pada suhu tinggi (kalsinasi) dalam suatu proses yang berkelanjutan. Material yang biasanya diproduksi menggunakan *rotary kiln* meliputi; semen, kapur, refraktori, titaniumdioksida, alumina, bijih besi, dan nikel. *Rotary kiln* dilengkapi dengan *burner* yang terpasang pada ujungnya, udara panas yang dihembuskan berlawanan arah dengan laju material yang masuk untuk proses kalsinasi. Proses ini bertujuan untuk mengurangi kadar LOI (*Lost of Ignition*) $\leq 0,01$. Kadar LOI yang tinggi mengganggu kestabilan dalam *furnace* yang dapat mengakibatkan ledakan dalam *furnace* (Indriatma, 2016). Tampak dari *rotary kiln* dijelaskan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 *Rotary Kiln*

Sumber gambar : dokumentasi pribadi

3.4 Pengujian Karakterisasi

Pengujian karakterisasi dilakukan terhadap semua bahan untuk mengetahui kandungan unsur. Beberapa pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.4.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengidentifikasi keberadaan suatu senyawa dengan cara mengamati pola pantulan atau pembiasan cahaya berdasarkan susunan atom pada kisi kristalnya. XRD akan menganalisis sinar X yang dihamburkan oleh sampel sebagai hasil dari tumbukan antara sinar-X dengan sampel tanpa mengalami kehilangan energi. Pengujian XRD dapat digunakan untuk beberapa kegunaan seperti mengidentifikasi struktur kristal suatu material, menganalisis reaksi kimia dan sintesis material yang berlangsung serta kemurnian suatu material. Pada prinsipnya, setiap senyawa terdiri dari susunan atom-atom dengan membentuk suatu bidang tertentu. Pola bidang tertentu itu menjadi suatu ciri khas dari suatu senyawa sehingga bila suatu senyawa ditembakkan partikel cahaya (foton) dengan sudut tertentu, maka akan tercipta pola pantulan maupun pembiasan yang khas. Kekhasan pola pantulan atau pembiasan ini yang menjadi bahan analisis kualitatif pengujian XRD untuk membedakan suatu senyawa dengan senyawa lainnya (Setiabudi A. d., 2012). Pada penelitian ini pengujian XRD digunakan untuk menganalisis senyawa yang terbentuk dari bijih nikel laterit dan produk hasil kalsinasi. Instrumen pengujian XRD yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Instrumen XRD

3.4.2 X-Ray Fluorescence (XRF)

Spektrometer XRF adalah alat uji yang digunakan untuk analisis unsur yang terkandung dalam bahan secara kualitatif maupun kuantitatif. Analisis kualitatif memberikan informasi jenis unsur yang terkandung dalam bahan yang dianalisis, yang ditunjukkan oleh adanya spektrum unsur pada energi sinar-x karakteristiknya. Sedangkan analisis kuantitatif memberikan informasi jumlah unsur yang terkandung dalam bahan yang ditunjukkan oleh ketinggian puncak spektrum (Jamaludin & Adiantoro, 2012). Instrumen pengujian XRF yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Instrumen XRF

3.4.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan instrumen yang menggunakan gelombang elektron berkekuatan tinggi untuk menguji sebuah objek berskala halus. Pengujian ini dapat menunjukkan informasi mengenai topografi, morfologi, komposisi dan kristalografi dari objek (Voutou & Stefanaki , 2008). Instrument pengujian SEM yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Instrumen SEM

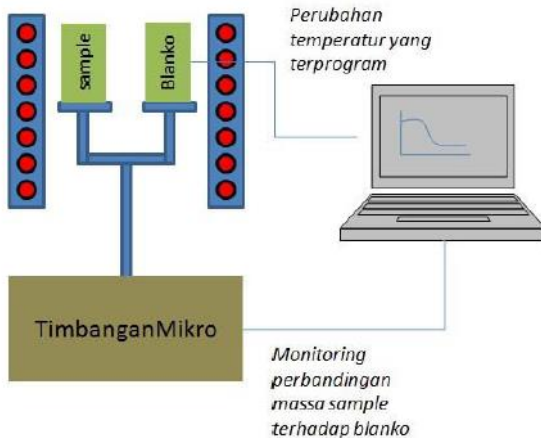
3.4.4 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

Prinsip kerja *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) berupa penyerapan gelombang dengan panjang gelombang spesifik suatu unsur. Preparasi sampel untuk karakterisasi AAS berupa liquid yang kemudian dihembuskan pada nyala api burner dengan bantuan gas bakar sehingga terbentuk aerosol. Kemudian sinar yang berasal dari lampu katoda dengan panjang gelombang sesuai dengan unsur yang diuji, akan dilewatkan melalui atom dalam nyala api sehingga elektron akan tereksitasi. Atom-atom dari sampel akan menyerap sebagian pancaran sinar dengan panjang gelombang khas, yang disebut absorpsi sedangkan yang diteruskan disebut emisi. Radiasi diteruskan pada detector melalui monokromator. Chopper dapat membedakan radiasi dari nyala api dengan sumber radiasi. Detektor akan menolak arus searah dari emisi nyala dan hanya mengukur arus bolak balik dari sumber radiasi atau sampel. Hubungan antara absorpsi dengan konsentrasi diturunkan dari hukum Lambert-Beer yang menjadi dasar dalam analisis kuantitatif.

3.4.5 Analisis Thermogravimetri (TGA)

Analisis thermogravimetri merupakan alat yang digunakan untuk menyelidiki stabilitas termal (kekuatan bahan pada suhu tertentu), stabilitas oksidatif (laju penyerapan oksigen pada bahan), serta sifat komposisi dari sampel (Kasi & Subramaniam, 2018).

Pada TGA, massa sampel yang berubah karena dekomposisi, adsorpsi, atau reaksi dimonitor sebagai fungsi temperatur. Untuk tujuan ini, dalam peralatan TGA terdapat komponen utama yang mengukur massa sampel, biasa disebut dengan *micro balance*, dan beberapa sensor suhu. Kelengkapan lain di dalam TGA adalah wadah sampel, pengatur program temperatur, dan tungku pemanas (Setiabudi, dkk 2012). Secara skematis peralatan TGA diperlihatkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Gambaran skematis analisis TGA
(Setiabudi, dkk 2012)

3.4.6 Analisis Proksimat

Analisis proksimat merupakan pengujian yang dilakukan untuk menganalisis kondisi batu bara berdasarkan kandungan air (*moisture*), abu (*ash content*), zat terbang (*volatile matter*) dan karbon padat (*fixed carbon*) yang terdapat di dalamnya. Hal ini dilakukan karena hal-hal tersebut dapat menurunkan kualitas dari batu bara (Kadir, 2016).

- *Moisture*

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

Dilakukan perhitungan sesuai Rumus 3.1 :

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

dimana,

A = berat sampel yang digunakan (gram)

B = berat sampel setelah pemanasan (gram)

- *Volatile Matter*

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

Alat :

1. *Crucible* 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. Sampel seberat 1 g ditimbang lalu dimasukkan kedalam *crucible* platina, kemudian *crucible* ditutup dan dimasukkan dalam *furnace*, temperatur dijaga ± 950°C.

2. Setelah *volatile matter* lepas yang ditunjukkan dengan hilangnya api *luminous*, tutup *crucible* diperiksa untuk dipastikan tetap tertutup.
3. Setelah pemanasan tepat 7 menit, *crucible* dipindahkan keluar *furnace* dan didinginkan dan ditimbang.
4. Persentase *weight loss* dikurangi persentase *moisture* sama dengan *volatile matter*.

Perhitungannya sesuai Rumus 3.2 :

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

dimana,

A = berat sampel yang digunakan (gram)

B = berat sampel setelah pemanasan (gram)

Kemudian persen *volatile matter* dihitung sesuai Rumus 3.3 :

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

dimana,

C = *Weight Loss* (%)

D = *Moisture* (%)

- *Ash*

Analisis 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 *crucible* platina
3. Tutup *crucible*

Prosedur :

1. Satu gram sampel dimasukkan dalam kapsul lalu ditimbang dan ditutup. Kapsul diletakkan dalam *furnace* dingin lalu dipanaskan dengan temperatur 450 – 500°C selama 1 jam.

2. Pemanasan sampel dilanjutkan hingga temperatur mencapai 700 – 750°C selama 1 jam kemudian ditahan hingga 2 jam.
3. Kapsul dipindahkan keluar dari *furnace*, didinginkan lalu ditimbang.

Perhitungannya sesuai dengan Rumus 3.4 :

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

dimana,

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

B = berat kapsul kosong dan tutup (gram)

C = berat sampel yang digunakan (gram)

- *Fixed Carbon*

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

Perhitungannya sesuai Rumus (3.5):

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

3.5 Metode Penelitian

Penelitian ini bersifat *review* beberapa penelitian mengenai kalsinasi bijih nikel laterit menggunakan *rotary kiln*. Variabel yang digunakan adalah temperatur tahan kalsinasi bijih nikel laterit. Data yang digunakan merupakan data sekunder dari penelitian yang sudah ada. Menggunakan setidaknya empat jurnal untuk dijadikan data sekunder.

Data yang digunakan memuat hasil uji karakterisasi bijih nikel laterit. Pengujian menggunakan XRD, XRF, AAS, dan SEM guna mengetahui perubahan fasa, menganalisis komposisi kimia dan unsur yang terkandung serta perubahan morfologi bijih nikel laterit setelah dilakukan kalsinasi menggunakan *rotary kiln*. Kemudian dilakukan analisis proksimat pada batu bara untuk

mengetahui *fixed carbon*. Batu bara digunakan sebagai reduktan karena mengandung karbon yang berfungsi mengikat oksigen.

Data yang didapatkan dari jurnal dianalisis apakah penelitian yang sudah dilakukan dengan variasi temperatur tahan memiliki pola yang sama.

Dari hasil analisis didapatkan kesimpulan berupa pengaruh temperatur tahan terhadap hasil kalsinasi bijih nikel laterit menggunakan *rotary kiln* berupa adanya perubahan fasa, perubahan komposisi kimia dan unsur serta perubahan morfologi pada bijih nikel laterit yang telah dilakukan kalsinasi. Kemudian kritik dan saran akan diberikan pada penelitian yang digunakan berupa opini berdasarkan teori dari referensi buku atau penelitian lainnya. Tabel 3.1 menunjukkan referensi penelitian yang digunakan pada review kali ini.

Tabel 3.1 Referensi penelitian

No	Tahun	Nama Jurnal	Judul	Penulis
1	2009	J Therm Anal Calorim	Phase Transformations of Nickelferous Laterites During Preheating and Reduction With Carbon Monoxide	Emmanuel N. Zevgolis, Charalabos Zografidis, Theodora Perraki, dan Eamonn .D
2	2011	Journal of Mining and Metallurgy	Phase Transformation of Nickel Laterite Ore During Dehydration	X.Lv dan Q. Huang
3	2012	The Journal of The	Calcination Characteristics of	E. Keskinilic,

		Southern African Institute of Mining and Metallurgy	Laterite Ore From the Central Region of Anatolia	S. Pournaderi, A. Geveci, dan Y.A. Topkaya
4	2012	Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy	Phase Transformations From Goethite to Hematite and Thermal Decomposition in Various Nickelferous Laterite Ores	B. Rizov
5	2013	Shanghai Key Laboratory of Modern Metallurgy and Materials Processing	The Study on the Mineral Phase Transformations and Thermodynamics of Laterite Ores Calcination	Yu Ling Xu, Song Chen, Shu Qiang Guo, Yu Yang Bian, Wei Zhong Ding, dan DingSheng Tan
6	2016	Seminar Nasional Metalurgi dan Material IX	Proses Kalsinasi Terhadap Bijih Nikel Laterit Jenis Limonit Pada Temperatur 600°C, 800°C, dan 1000°C	Agus Budi Prasetyo, Wahyu Mayangsari, dan Lindasari
7	2016	Puslit Metalurgi	Analisis XRD dan SEM	Agus Budi Prasetyo,

		dan Material LIPI	Terhadap Hasil Kalsinasi Pada Bijih Nikel Laterit Jenis Saproilit	Iwan Setiawan, dan Meyta
8	2011	Pusat Penelitian Metalurgi LIPI	Peningkatan Kadar Nikel (Ni) dan Besi (Fe) Dari Bijih Nikel Laterit Untuk Bahan Baku Nickel Containing Pig Iron (NCPI/NPI)	Agus Budi Prasetyo dan Puguh Prasetyo
9	2014	Pusat Penelitian Metalurgi - LIPI	Optimasi Proses Reduksi Bijih Nikel Laterit Jenis Limonit Sebagai Bahan Baku NPI (Nickel Pig Iron)	Agus Budi P, F. Firdiyono, dan Eni Febriana
10	2015	Prosiding Seminar Material Metalurgi	Pengaruh Temperatur dan Waktu Kalsinasi, Serta Penambahan Batu bara dan Na_2SO_4 Terhadap Peningkatan Kadar Ni Dalam	Rudi Subagja, Agus Budi Prasetyo, dan Wahyu Mayangsari

			Bijih Nikel Laterit	
11	2016	Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI	Proses Kalsinasi Bijih Nikel Laterit Menggunakan Zat Aditif CaSO_4	Wahyu Mayangsari dan Agus Budi P.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

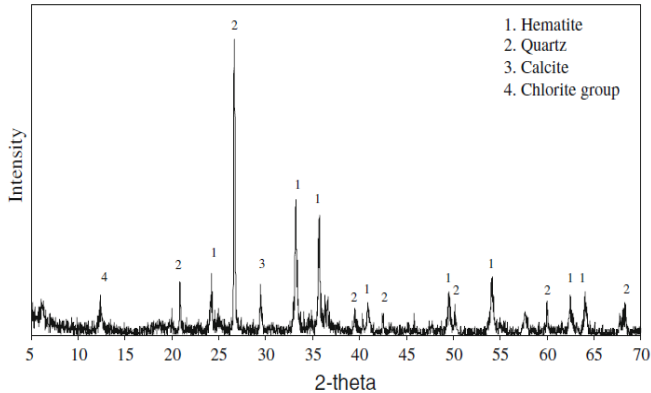
Pada *review* ini menggunakan data sekunder dari sebelas jurnal penelitian yang sudah dilakukan terkait bagaimana pengaruh temperatur tahanan terhadap transformasi fasa produk hasil kalsinasi bijih nikel laterit menggunakan *rotary kiln* dan pengaruh temperatur tahanan terhadap hasil kadar Ni produk hasil kalsinasi bijih nikel laterit menggunakan *rotary kiln*.

Pada jurnal pertama, penelitian dilakukan oleh Emmanuel N. Zevgolis, dkk (2009) melakukan penelitian tentang transformasi fasa nikel laterit pada pemanasan awal dan reduksi dengan karbon monoksida. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi mineralogi dan transformasi fasa bijih nikel laterit dari Yunani selama pemanasan awal dan dilakukannya reduksi menggunakan carbon monoksida. Pada awal pengujian, bijih dikelompokkan menjadi tiga kelompok yaitu: bijih pulau Evia (Bijih A), bijih Lokrida (Bijih B), dan bijih Kastoria (Bijih C). Ketiga sampel ini dilakukan analisis AAS untuk mengetahui kadar dari masing-masing senyawa yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

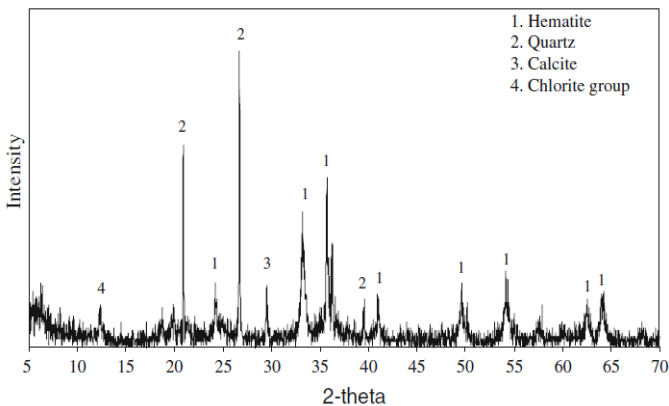
Tabel 4.1 Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal oleh Zevgolis (Zevgolis, 2009)

Komponen	Bijih A (%)	Bijih B (%)	Bijih C (%)
Fe ₂ O ₃	37,1	47,7	26
NiO	1,23	1,02	1,5
SiO ₂	32,8	23	36,7
CaO	2,9	2,4	6
MgO	3,5	3	11,9
Al ₂ O ₃	5,2	10,4	1,1
Cr ₂ O ₃	2,6	2,2	1,1
Mn ₃ O ₄	0,3	0,4	0,5

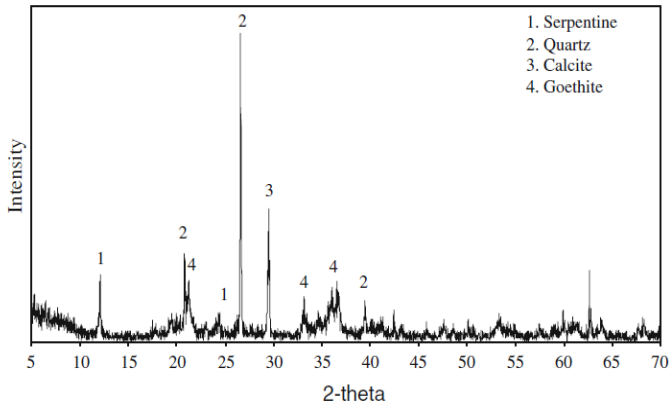
Bijih nikel laterit awal dilakukan analisis menggunakan XRD, TG/DTG, dan DTA. Hasil analisis XRD masing-masing kelompok bijih ditunjukkan pada Gambar 4.1, Gambar 4.2, dan Gambar 4.3.



Gambar 4.1 Hasil analisis XRD Bijih A dari Evia oleh Zevgolis (Zevgolis, 2009)



Gambar 4.2 Hasil analisis XRD Bijih B dari Lokrida oleh Zevgolis (Zevgolis, 2009)



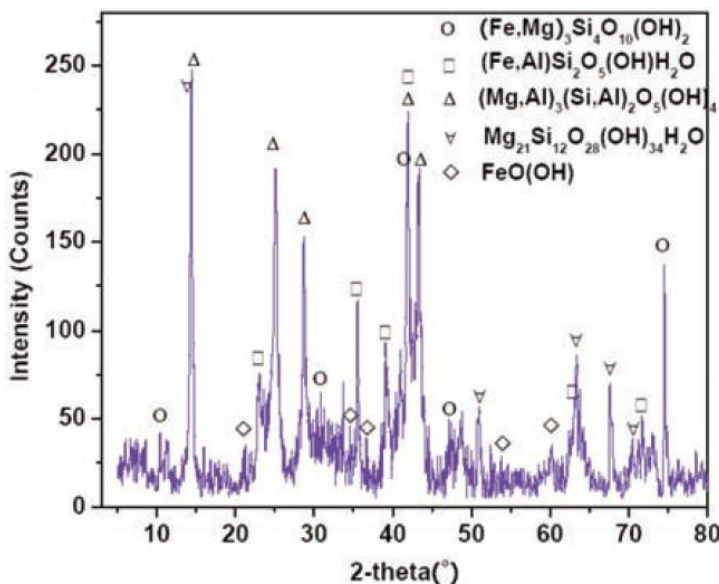
Gambar 4.3 Hasil analisis XRD Bijih C dari Kastoria oleh Zevgolis (Zevgolis, 2009)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 terdiri dari fasa *hematite* (Fe_2O_3), *quartz* (SiO_2), dan *calcite* (CaCO_3). Fasa yang paling banyak terkandung Ni adalah *chlorite* $[(\text{Mg},\text{Ni},\text{Fe},\text{Al})_6(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8]$. Pada Gambar 4.3 terdapat fasa *goethite* $[\text{FeO}(\text{OH})]$ dan fasa utama yang mengandung Ni adalah *serpentine* $[(\text{Mg},\text{Fe},\text{Ni})_6\text{Si}_4\text{O}_{12}(\text{OH})_6]$.

Pada jurnal kedua, penelitian dilakukan oleh Q. Huang dan X. Lv (2011) melakukan penelitian tentang transformasi fasa nikel laterit selama dehidrasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi mineralogi dan transformasi fasa dari bijih nikel laterit selama dehidrasi. Untuk mengetahui komposisi kimia dari bijih nikel laterit, dilakukan pengujian menggunakan AAS. Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian TG dan XRD. Hasil dari uji AAS ditunjukkan pada Tabel 4.2 Dan hasil analisis XRD awal ditunjukkan pada Gambar 4.4.

Tabel 4.2 Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal oleh Huang (Huang & Lv, 2011)

Cr_2O_3	SiO_2	P	Fe	Al_2O_3	CaO	MgO	Ni
1,93	30,35	0,01	20,78	1,8	0,19	19	1,31

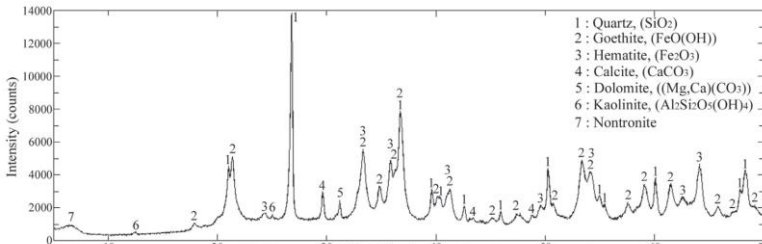


Gambar 4.4 Hasil analisis XRD awal bijih nikel laterit oleh Huang (Huang & Lv, 2011)

Pola XRD pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa bijih ini adalah bijih nikel laterit jenis saprolit yang mengandung mineral Mg silikat dan Mg.Fe dalam jumlah dominan. Dalam bijih nikel laterit saprolit, Ni terbentuk oleh Mg silikat. Spesies mineral yang ada mengandung banyak air kristal dan gugus hidroksil.

Pada jurnal ketiga, penelitian dilakukan oleh Keskinilic, dkk (2012) melakukan penelitian karakteristik kalsinasi bijih laterit dari wilayah Anatolia Tengah. Dalam penelitian ini, karakteristik kalsinasi bijih nikel laterit menggunakan bijih yang berasal dari wilayah Anatolia Tengah. Pada bijih nikel laterit sebelum proses kalsinasi, dilakukan pengujian awal dengan mengkarakterisasi bijih menggunakan XRD untuk mengetahui fasa apa saja yang terdapat di dalam bijih nikel laterit. Hasil analisis bijih nikel laterit awal menggunakan XRD akan ditunjukkan pada Gambar 4.5. Pada penelitian ini, proses kalsinasi dilakukan dengan variasi temperatur

tahan 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, dan 800°C. Pola dari hasil XRD awal pada Gambar 4.5 dilakukan pengujian menggunakan difraktometer Rigaku SA-HF3. Hasil dari penelitian ini kemudian dianalisis menggunakan XRD.



Gambar 4.5 Hasil analisis XRD bijih nikel laterit awal oleh Keskinkilic (Keskinkilic, 2012)

Pola XRD pada Gambar 4.5 menggunakan difraktometer Rigaku SH-3. Fasa yang dominan dan memiliki intensitas yang tinggi yaitu fasa *quartz* (SiO_2) dan *goethite* [$\text{FeO}(\text{OH})$], ada juga sejumlah besar fasa *calcite* (CaCO_3) dan *hematite* (Fe_2O_3). Selain itu, terdapat dua puncak terendah yaitu *nontronite* dan *kaolinite* [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$].

Pada jurnal keempat, penelitian dilakukan oleh B. Rizov (2012) melakukan penelitian tentang evaluasi transformasi fasa dari *goethite* ke *hematite* dan dekomposisi termal dari bijih nikel laterit. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi dan membandingkan efek dari transformasi termal dan kinetika dekomposisi dari berbagai jenis bijih nikel laterit dengan menggunakan analisis termogravimetri. Mengingat komposisi mineralogis dari bijih ini, kinetika didasarkan pada studi tentang reaksi dehidroksilasi *goethite*. Sembilan sampel yang berbeda dari bijih nikel laterit diambil untuk dilakukan analisis. Bijih 1 (Indonesia-Saprolit), bijih 2 (Indonesia-Limonit), bijih 3 (Filipina-Saprolit), bijih 4 (Filipina-Limonit), bijih 5 (Turkey-Bandirma), bijih 6 (Turkey-Toros), bijih 7 (Albania Kelas A), bijih 8 (Albania Kelas B), dan bijih 9 (MK-Rzanovo). Semua sampel digiling dan dikeringkan dengan vakum untuk dilakukan uji komposisi kimia

menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS). Data hasil pengujian AAS ditunjukkan pada Tabel 4.3.

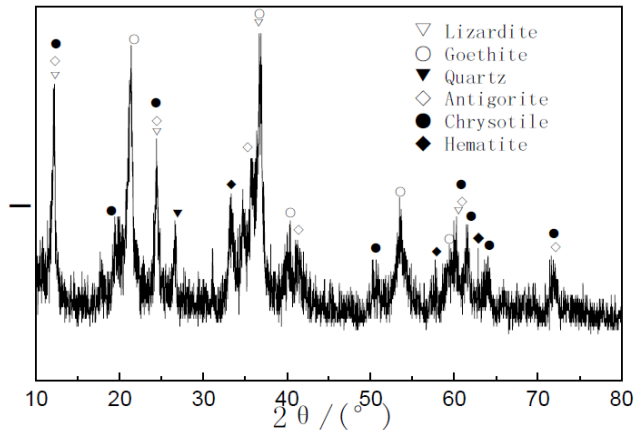
Tabel 4.3 Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal oleh Rizov (Rizov, 2012)

Komponen	Bijih 1 (%)	Bijih 2 (%)	Bijih 3 (%)	Bijih 4 (%)	Bijih 5 (%)	Bijih 6 (%)	Bijih 7 (%)	Bijih 8 (%)	Bijih 9 (%)
Fe	13-16	25-35	13-16	25-35	25-35	25-35	20-30	35-45	25-33
Ni	2	2	2	2	1,2-2	1,2-2	0,8-1,2	0,8-1,2	0,8-1,1
Cr	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	3	3	1,5
CaO	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	3	3	3,3
MgO	20-22	10-13	20-22	10-13	2-5	2-5	2-5	2-5	12-16
Al ₂ O ₃	2	2	2	2	2,9	2,9	2,9	2,9	1,9
SiO ₂	40-44	25-35	40-44	25-35	35-45	35-45	35-45	5-15	33

Pada jurnal kelima, penelitian dilakukan oleh Xu, dkk (2013) melakukan penelitian tentang studi transformasi fasa mineral dan termodinamika kalsinasi bijih nikel laterit. Bijih nikel laterit yang digunakan berasal dari daerah di Indonesia. Pada penelitian ini, bijih nikel laterit yang belum diberi perlakuan dilakukan analisis AAS untuk mengetahui komposisi kimia yang ada pada bijih nikel laterit yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan dilakukan analisis XRD untuk mengetahui fasa apa saja yang ada di dalam bijih nikel laterit yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.

Tabel 4.4 Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal oleh Xu (Xu, dkk 2013)

Komponen	Fe	Ni	SiO ₂	Co	Cr	MgO	Ca O	Mn O	Al ₂ O ₃
(%)	18,99	1,39	30,11	0,097	0,86	28,83	0,56	0,41	1,79

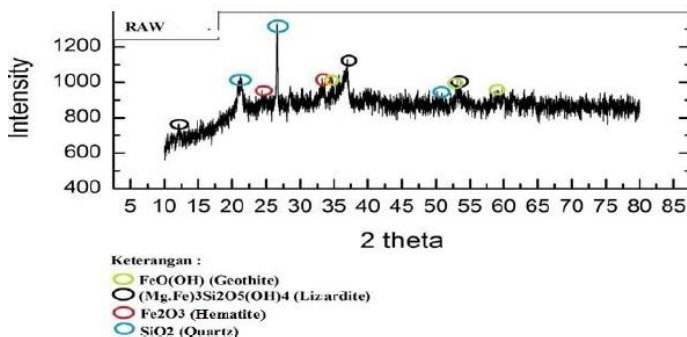


Gambar 4.6 Hasil analisis XRD bijih nikel laterit awal oleh Xu (Xu, dkk 2013)

Pada hasil analisis XRD Gambar 4.6 terlihat bahwa fasa yang muncul yaitu *lizardite* $[(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4]$, *goethite* $[FeO(OH)]$, *hematite* (Fe_2O_3) , *quartz* (SiO_2) , *antigorite* $[Mg_{3-x}(Si_2O_5)(OH)_{4-2x}]$, dan *chrysotile* $[Mg_3Si_2O_5(OH)_4]$. Pada hasil ini, tidak terlihat senyawa Ni karena senyawa Ni masih dalam amorf, atau kandungan kristalnya masih rendah sehingga tidak terdeteksi.

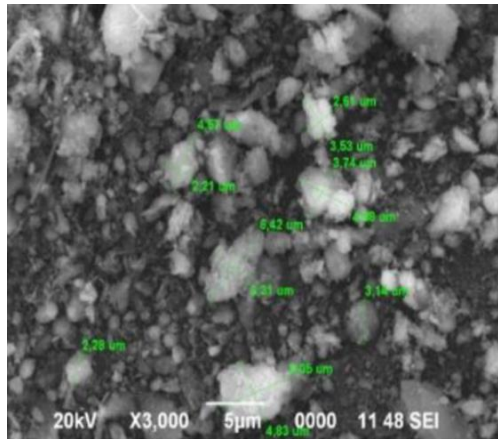
Pada jurnal keenam, penelitian dilakukan oleh Agus Budi Prasetyo, dkk (2016) melakukan penelitian proses kalsinasi terhadap bijih nikel laterit jenis limonit pada temperatur tahan $600^\circ C$, $800^\circ C$, dan $1000^\circ C$. Pada bijih nikel laterit limonit sebelum proses kalsinasi, dilakukan pengujian awal dengan mengkarakterisasi bijih menggunakan XRD dan SEM untuk mengetahui fasa yang terdapat di dalam bijih serta untuk mengetahui morfologi yang belum diberikan perlakuan. Hasil analisis awal bijih nikel laterit limonit menggunakan XRD akan ditunjukkan dalam Gambar 4.7 dan hasil analisis awal bijih nikel laterit limonit menggunakan SEM akan ditunjukkan dalam Gambar 4.8. Sebelum dilakukan kalsinasi, bijih nikel laterit limonit terlebih dahulu dilakukan proses pengeringan dan bijih nikel laterit limonit.

Sampel dimasukkan ke dalam oven dengan temperatur 110°C selama 6 jam. Tahap selanjutnya yaitu digerus menjadi serbuk dengan ukuran kurang lebih 100 mesh . Proses kalsinasi dilakukan pada variasi temperatur tahan 600°C , 800°C , dan 1000°C . Hasil dari

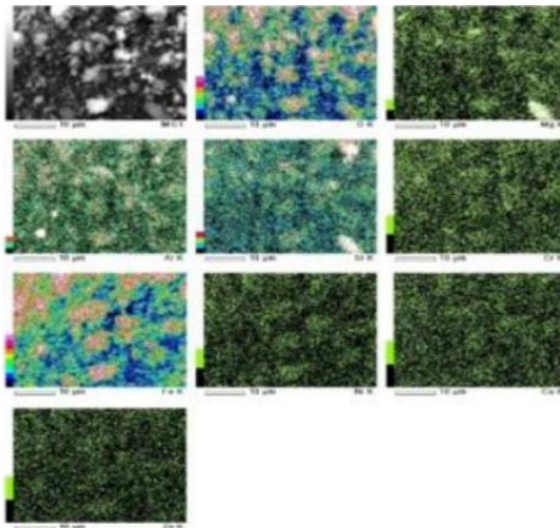


Gambar 4.7 Hasil analisis XRD bijih nikel laterit limonit awal oleh Prasetyo penelitian ini kemudian dianalisis menggunakan XRD dan SEM. (Prasetyo, dkk 2016)

Berdasarkan standar LPF (*Linus Puling File*) No. 2080021, *peak-peak* yang terbentuk merupakan fasa *lizardite* [(Mg,Fe)₃Si₂O₅(OH)₄], *quartz* (SiO₂), *hematite* (Fe₂O₃) dan *goethite* [FeO(OH)]. Difraktogram pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa *quartz* (SiO₂) merupakan fasa mineral yang intensitasnya paling tinggi, sedangkan Fe tersebar di beberapa *peak* dalam bentuk *lizardite*, *hematite* dan *goethite* sehingga dapat dikatakan bahwa fasa Fe merupakan fasa mineral dominan dalam bijih nikel laterit limonit.



(a)

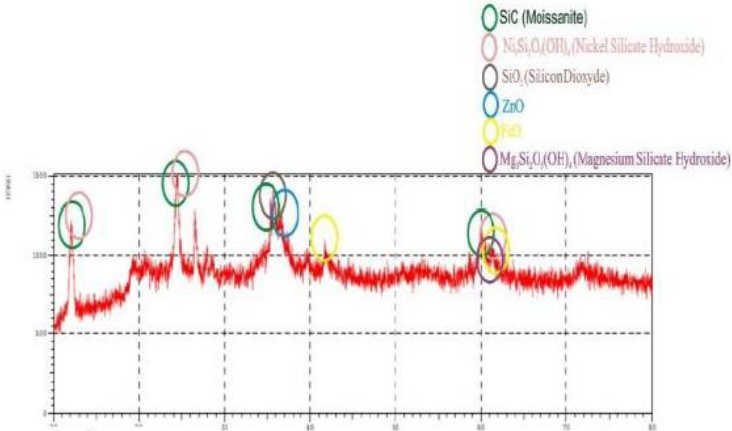


(b)

Gambar 4.8 (a) Hasil analisis SEM bijih nikel laterit limonit awal (b) Hasil maping bijih nikel laterit limonit awal oleh Prasetyo (Prasetyo, dkk 2016)

Analisis bijih nikel laterit limonit awal dengan menggunakan SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi bijih limonit yang belum diberi perlakuan. Hasil pengamatan analisis SEM pada Gambar 4.8(a) menunjukkan bahwa adanya variasi ukuran butiran sampel antara 2,5-6,5 μm . Hasil *mapping* pada Gambar 4.8(b) menunjukkan bahwa secara kualitatif besi merupakan logam paling dominan yang tersebar dalam bijih nikel laterit limonit. Terlihat pula persebaran O, Si dan Al yang cukup tinggi dalam bijih nikel laterit limonit tersebut. Persebaran logam Fe, O, Al dan Si ini membentuk fasa *lizardite* $[(\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$, *quartz* (SiO_2), *hematite* (Fe_2O_3) dan *goethite* $[\text{FeO}(\text{OH})]$ seperti yang ditunjukkan dalam analisis XRD. Selain logam-logam yang disebutkan di atas, terlihat pula persebaran logam lain seperti Cr, Ni, Mg, Cu, Zn namun dalam konsentrasi rendah yang ditunjukkan oleh indikator warna disebelah kiri *mapping* masing-masing unsur.

Pada jurnal ketujuh, penelitian dilakukan oleh Iwan Setiawan, dkk (2016) melakukan penelitian karakteristik terhadap hasil kalsinasi pada bijih nikel laterit saprolit. Pada bijih nikel laterit saprolit sebelum proses kalsinasi, dilakukan pengujian awal menggunakan XRD dan SEM. Hasil analisis awal bijih nikel laterit saprolit menggunakan XRD akan ditunjukkan dalam Gambar 4.9 dan hasil analisis bijih nikel laterit saprolit menggunakan SEM akan ditunjukkan dalam Gambar 4.10. Pada tahap preparasi, dilakukan proses pengeringan, pengerusan, dan pengayakan. Bijih yang berbentuk bongkahan dilakukan proses pengeringan (*drying*). Sampel dimasukkan ke dalam oven dengan temperatur 100°C selama 7 jam. Bijih nikel laterit saprolit selanjutnya digerus dengan menggunakan *diskmill* untuk mendapatkan ukuran 100 *mesh*. Selanjutnya dilakukan kalsinasi dengan variasi temperatur 600°C , 800°C , dan 1000°C . Hasil dari pengujian ini kemudian dianalisis menggunakan XRD dan SEM. Bijih nikel laterit saprolit yang digunakan berasal dari Pomalaa, Sulawesi Tenggara.



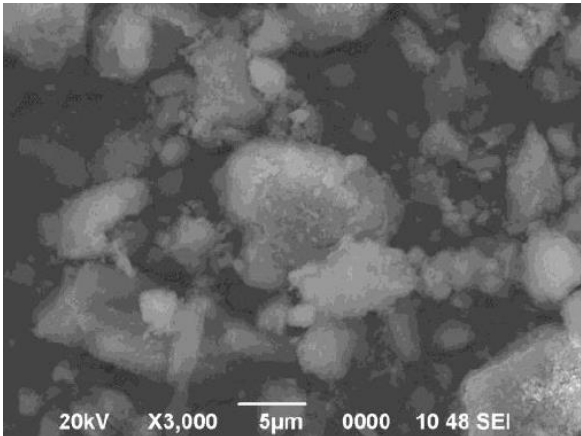
Gambar 4.9 Hasil analisis XRD bijih nikel laterit saprolit awal dari Pomalaa oleh Setiawan (Setiawan, dkk 2016)

Dari difraktogram pada Gambar 4.9 terlihat bahwa fasa yang terbentuk adalah *moissanite* (SiC), *nickel silicate hydroxide* [$\text{Ni}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$], *magnesium silicate hydroxide* [$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$], *silicon dioxide* (SiO_2), *zinc oxide* (ZnO) dan *iron oxide* (FeO). Itu adalah senyawa dominan yang terkandung pada bijih nikel laterit saprolit awal. Menurut standar LPF (Linus Pauling File) No. 2080021, terlihat bahwa senyawa dominan adalah *moissanite* (SiC) dan *nickel silicate hydroxide* [$\text{Ni}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] terlihat dari tinggi *peak* terbesar menunjukkan senyawa itu. Adapula senyawa lain yang terkandung namun tidak terlalu dominan seperti *magnesium silicate hydroxide* [$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$], *silicon dioxide* (SiO_2), *zinc oxide* (ZnO) dan *iron oxide* (FeO). Karakterisasi mineralogi bijih nikel laterit saprolit awal secara kuantitatif dilakukan dengan menganalisis kadar Fe dan Ni menggunakan AAS dijelaskan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal dari Pomalaa oleh Setiawan (Setiawan, dkk 2016)

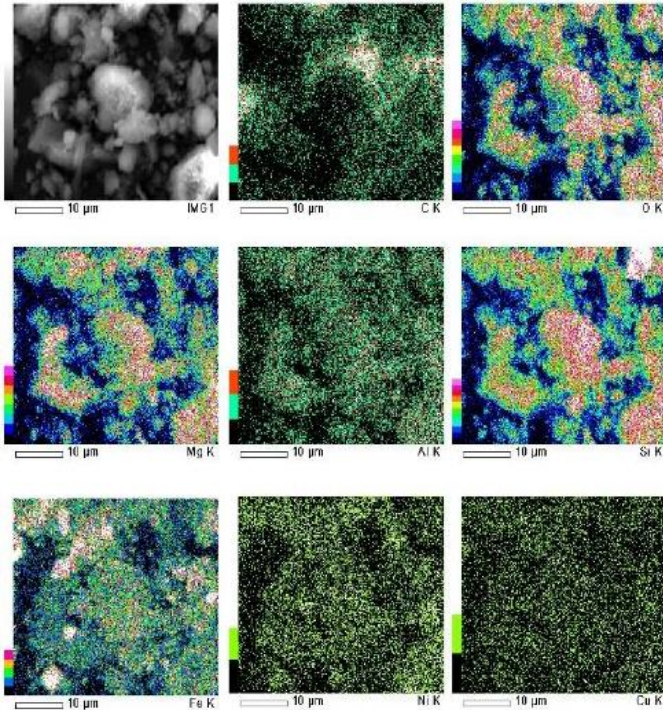
Nama unsur	Kadar (%)
Ni	1,4838
Fe	8,648

Menurut (Mubarok, 2016) kadar besi dalam bijih nikel laterit saprolit sebesar 10-15% sedangkan kadar nikel adalah 1,5-2%. Perolehan yang didapat tidak menyerupai literatur karena sampel yang digunakan berada pada kondisi dan lingkungan yang berbeda.



Gambar 4.10 Hasil analisis SEM bijih nikel laterit saprolit awal dari Pomalaa oleh Setiawan (Setiawan, dkk 2016)

Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa besar ukuran butir pada hasil analisis SEM menunjukkan hasil tidak homogen. Ukurannya masih belum seragam, hal ini dikarenakan pada waktu penggerusan dilakukan secara manual.



Gambar 4.11 Hasil mapping bijih nikel laterit saprolit awal dari Pomalaa oleh Setiawan (Setiawan, dkk 2016)

Pada Gambar 4.11 terlihat pola *mapping* yang terdeteksi, dimana warna mengkilat dengan warna merah menunjukkan bahwa keberadaan unsur cukup tinggi. Terlihat bahwa unsur yang dominan adalah O, Si, dan Mg. Persebaran unsur O, Si, dan Mg sangat merata pada penampang butir. Persebaran unsur lain yang ada seperti C, Ni, dan Cu akan tetapi tidak dominan, karena unsur tersebut diindikasikan memiliki kadar yang rendah jika dibandingkan dengan unsur O, Si, dan Mg. Hasil analisis SEM dicocokkan dengan XRD menunjukkan keterkaitan yang baik terlihat dari senyawa yang terbentuk seperti *magnesium silicate*

hydroxide [$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$], *silicon dioxide* (SiO_2), dan *iron oxide* (FeO).

Pada jurnal kedelapan, penelitian dilakukan oleh Agus Budi Prasetyo dan Puguh Prasetyo (2011) melakukan penelitian kalsinasi bijih nikel laterit dari Sangaji Halmahera untuk bahan baku pembuatan *Nickel Containing Pig Iron* (NCPI/NPI). Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana terjadi peningkatan kadar Ni dan Fe dari bijih nikel laterit dengan kadar 1,27% Ni dan 9,44% Fe. Selanjutnya dilakukan proses kalsinasi dengan variasi temperatur tahan 900°C , 950°C , 1000°C , dan 1100°C . Setelah itu, kalsin hasil reduksi dipisahkan menggunakan *magnetic separator*. Pada bijih nikel laterit dilakukan analisis AAS untuk mengetahui unsur dan kadar yang terkandung di dalam bijih nikel laterit yang akan ditunjukkan dalam Tabel 4.6 serta dilakukan analisis proksimat untuk mengetahui karbon tetap dari batu bara yang akan ditunjukkan dalam Tabel 4.7.

Tabel 4.6 Hasil analisis AAS bijih nikel laterit awal Halmahera oleh Prasetyo (Prasetyo, 2011)

Parameter (%)	Fe	Ni	Co	Cr	Mg	Ca
Laterit	9,44	1,27	0,017	0,022	17,45	0,024

Tabel 4.7 Hasil analisis proksimat batu bara oleh Prasetyo (Prasetyo, 2011)

Komponen	<i>Moisture Content</i>	<i>Ash</i>	<i>Volatile Matter</i>	<i>Fixed Carbon</i>
%	9,85	13,46	43,31	33,39

Dari hasil analisis AAS yang ditunjukkan pada Tabel 4.6 dapat dilihat bahwa senyawa yang dominan penyusun nikel laterit adalah magnesium dan besi. Kadar Ni awal dalam bijih nikel laterit yang digunakan yaitu 1,27%. Sedangkan hasil dari analisis proksimat batu bara yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.7 dimana batu bara dari daerah Dong Dang Kalimantan Timur

mempunyai kandungan *fixed carbon* 33,39% dan *volatile matter* 43,31%.

Pada jurnal kesembilan, penelitian dilakukan oleh Agus Budi Prasetyo, dkk (2014) melakukan penelitian tentang pengoptimalan proses reduksi bijih nikel laterit jenis limonit sebagai bahan baku *Nickel Containing Pig Iron* (NCPI/NPI) yang berasal dari Sangaji, Halmahera. Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana terjadi peningkatan kadar Ni. Selanjutnya dilakukan proses kalsinasi dengan variasi temperatur tahan 900°C, 950°C, 1000°C, dan 1100°C. Setelah itu, kalsin hasil reduksi dipisahkan menggunakan *magnetic separator*. Pada bijih nikel laterit dilakukan analisis XRF untuk mengetahui unsur dan kadar yang terkandung di dalam bijih nikel laterit yang akan ditunjukkan dalam Tabel 4.8 serta dilakukan analisis proksimat untuk mengetahui karbon tetap dari batu bara yang akan ditunjukkan dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.8 Hasil analisis XRF bijih nikel laterit awal Halmahera oleh Prasetyo
(P, Firdiyono, & Febriana, 2014)

Oksi	Fe ₂	SiO ₂	Al ₂	Cr ₂	Mn	Ni	Co	Mg	Ca
da	O ₃		O ₃	O ₃	O	O	O	O	O
(%)	69,5 5	14, 84	4,63	1,56	1,4	1,4 2	0,2	3,0 4	0,1 2

Tabel 4.9 Hasil analisis proksimat oleh Prasetyo
(P, Firdiyono, & Febriana, 2014)

<i>Fixed Carbon</i>	<i>Volatile Matter</i>	<i>Ash</i>	<i>Moisture</i>
33,4%	43,3%	13,5%	9,85%

Dari hasil analisis XRF yang ditunjukkan pada Tabel 4.8 dapat dilihat bahwa kadar NiO awal dalam bijih nikel laterit yang digunakan yaitu 1,42%. Sedangkan hasil dari analisis proksimat batu bara yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.9 dimana batu bara mempunyai kandungan *fixed carbon* 33,4% dan *volatile matter* 43,3%.

Pada jurnal kesepuluh, penelitian dilakukan oleh Rudi Subagja, dkk (2015) melakukan penelitian terkait pengaruh temperatur tahan dan waktu kalsinasi serta penambahan batu bara dan natrium sulfat terhadap peningkatan kadar Ni dalam bijih nikel laterit dengan cara kalsinasi dalam *muffle furnace*, yang dilanjutkan dengan proses pemisahan menggunakan magnet (*magnetic separator*) terhadap hasil kalsin dari proses kalsinasi. Pada bijih nikel laterit dilakukan analisis XRF untuk mengetahui senyawa yang ada di dalam bijih nikel laterit dan mengetahui kadarnya yang akan ditunjukkan dalam Tabel 4.10 serta dilakukan analisis proksimat pada batu bara untuk mengetahui nilai dari *fixed carbon* yang akan ditunjukkan dalam Tabel 4.11. Sebelum dilakukan kalsinasi, bijih nikel laterit dikeringkan dalam oven pada temperatur 100°C selama 7 jam sehingga diperoleh bijih nikel laterit dengan kadar air di bawah 5%. Bijih yang telah kering dicampur dengan batu bara dan natrium sulfat untuk selanjutnya digerus dalam *ball mill* dengan menggunakan bola bola alumina sehingga diperoleh campuran bijih dengan batu bara yang mempunyai ukuran lebih kecil dari 100 *mesh*. Campuran bijih, batu bara, dan natrium sulfat kemudian dilakukan proses kalsinasi. Variabel temperatur tahan yang digunakan pada penelitian ini adalah 800°C, 900°C, 1000°C, dan 1100°C. Kalsin yang dihasilkan kemudian digerus bersama air dalam *ball mill* untuk selanjutnya dilakukan pemisahan menggunakan magnet (*magnetic separator*).

Tabel 4.10 Hasil analisis XRF bijih nikel laterit oleh Subagja (Subagja, dkk 2015)

Senyawa	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO	MgO	CaO
%	69,55	14,84	4,63	1,56	1,4	1,42	3,04	0,12

Tabel 4.11 Hasil analisis proksimat batu bara oleh Subagja (Subagja, dkk 2015)

Komponen	Moisture Content	Ash	Volatile Matter	Fixed Carbon
%	14,4	14,39	36,26	36,92

Bahan baku yang digunakan dalam percobaan ini terdiri dari bijih nikel laterit, batu bara, dan natrium sulfat. Hasil analisis XRF bijih nikel laterit yang digunakan diperlihatkan pada Tabel 4.10 dimana senyawa dominan penyusun bijih nikel laterit adalah besi oksida dan silikat. Kadar Ni awal dalam bijih nikel laterit yang digunakan yaitu 1,42% dan masih banyak unsur lain yang terkandung seperti aluminium oksida, kromium oksida, mangan dioksida, magnesium oksida, dan kalsium oksida. Sedangkan hasil dari analisis proksimat batu bara yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.11 dimana batu bara ini mempunyai kandungan *fixed carbon* 36,92% dan *volatile matter* 36,26%.

Pada jurnal kesebelas, penelitian dilakukan oleh Mayangsari (2016) melakukan penelitian proses kalsinasi bijih nikel laterit menggunakan zat aditif CaSO_4 yang bertujuan untuk mengetahui kondisi optimum akhir kadar bijih nikel laterit. Preparasi bijih nikel laterit dilakukan dengan pemanasan bijih dalam oven, pengecilan ukuran, dan pengayakan untuk mendapatkan bijih dengan ukuran 100 *mesh*. Kemudian dilakukan pencampuran bijih nikel laterit dengan reduktor batu bara dan aditif. Campuran bijih nikel laterit kemudian dikalsinasi pada variasi temperatur tahan 800°C, 900°C, 1000°C, dan 1100°C. Sebelum dilakukan kalsinasi, bijih nikel laterit dilakukan pengujian unsurnya menggunakan XRF yang ditunjukkan pada Tabel 4.12 serta dilakukan analisis proksimat untuk mengetahui nilai *fixed carbon* dari batu bara yang ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.12 Hasil analisis XRF bijih nikel laterit awal oleh Mayangsari (Mayangsari, 2016)

Senyawa	Kadar (%)	Senyawa	Kadar (%)
Ni	1,11	SiO_2	14,48
Fe	48,68	Al_2O_3	4,63
MnO	1,4	CoO	0,2
MgO	3,04	Cr_2O_3	1,56
CaO	0,12	Lainnya	3,55

Tabel 4.13 Hasil analisis proksimat batu bara oleh Mayangsari
(Mayangsari, 2016)

<i>Volatile Matter</i> (%)	<i>Ash</i> (%)	<i>Fixed Carbon</i> (%)	<i>Sulphur</i>	<i>Moisture Content</i>
36,26	14,39	36,92	0,91	14,4

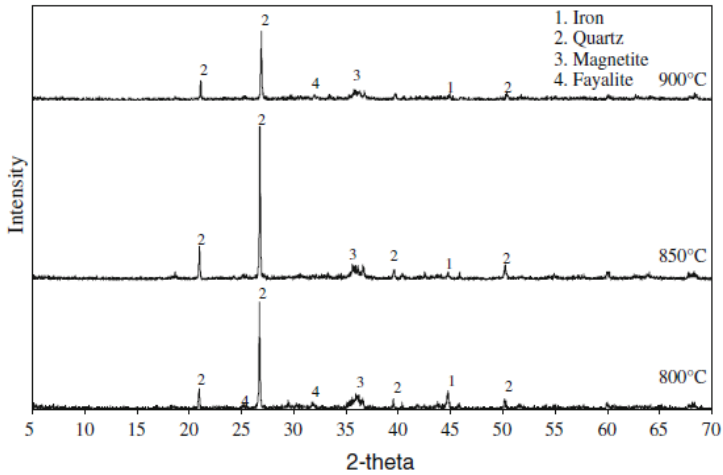
Bahan baku yang digunakan dalam percobaan ini terdiri dari bijih nikel laterit, batu bara, dan CaSO_4 . Hasil analisis XRF bijih nikel laterit yang digunakan diperlihatkan pada Tabel 4.12 dimana senyawa yang dominan penyusun bijih nikel laterit adalah besi oksida dan silikat. Kadar Ni awal dalam bijih nikel laterit yang digunakan yaitu 1,11% dan masih banyak unsur lain yang terkandung. Sedangkan hasil dari analisis proksimat batu bara yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.13 dimana batu bara ini mempunyai kandungan *fixed carbon* 36,92% dan *volatile matter* 36,26%.

4.2 Pembahasan

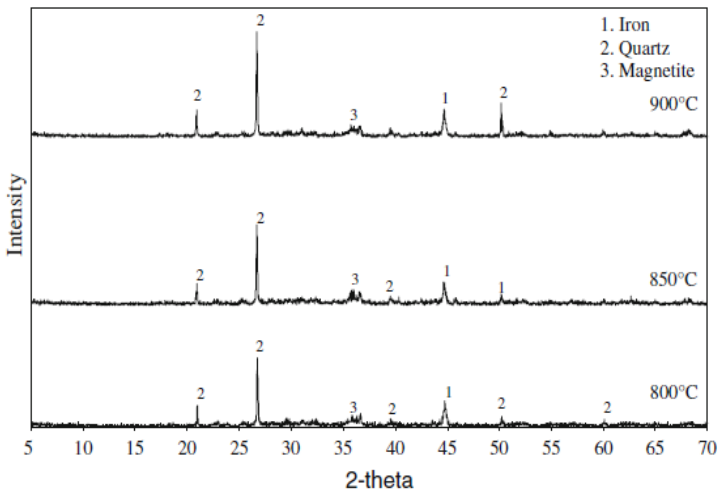
Hasil percobaan dari setiap jurnal ini ditunjukkan dalam Tabel 4.18 dan Tabel 4.19 dimana data yang diambil merupakan hasil dari penelitian yang dilakukan dari masing-masing jurnal. Parameter yang mempengaruhi nilai ini yaitu transformasi fasa yang terjadi pada produk hasil kalsinasi bijih nikel laterit dan nilai kadar Ni dari hasil kalsinasi bijih nikel laterit.

4.2.1 Pengaruh Temperatur Tahan Terhadap Transformasi Fasa

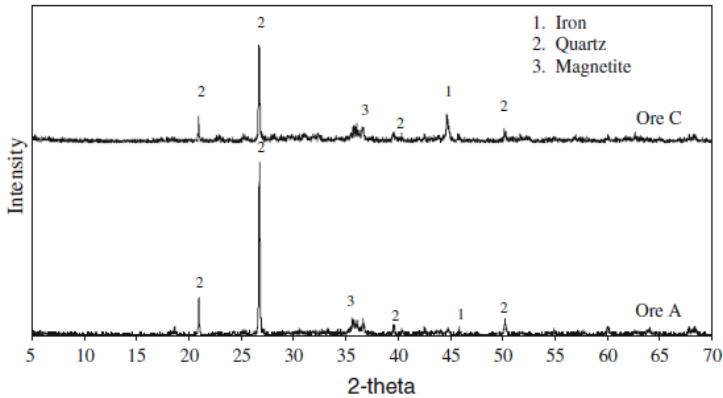
Zevgolis, dkk (2009) melakukan penelitian tentang transformasi fasa nikel laterit pada pemanasan awal dan reduksi dengan karbon monoksida. Hasil analisis menggunakan XRD pada masing-masing bijih setelah diberikan perlakuan ditunjukkan pada Gambar 4.12, Gambar 4.13, dan Gambar 4.14.



Gambar 4.12 Hasil analisis XRD Biji A dari Evia oleh Zevgolis (Zevgolis, 2009)

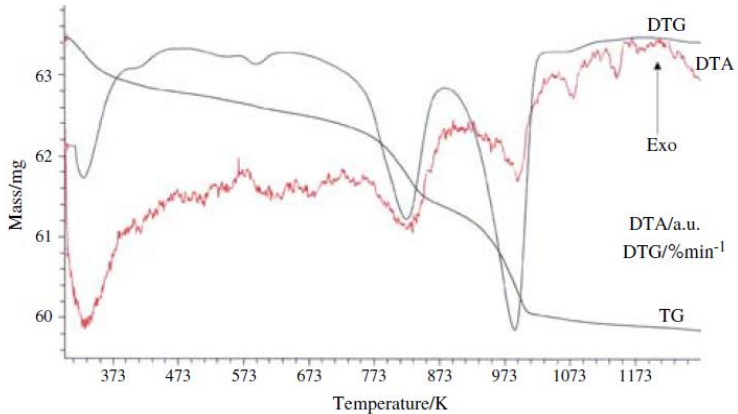


Gambar 4.13 Hasil analisis XRD Biji C dari Kastoria oleh Zevgolis (Zevgolis, 2009)

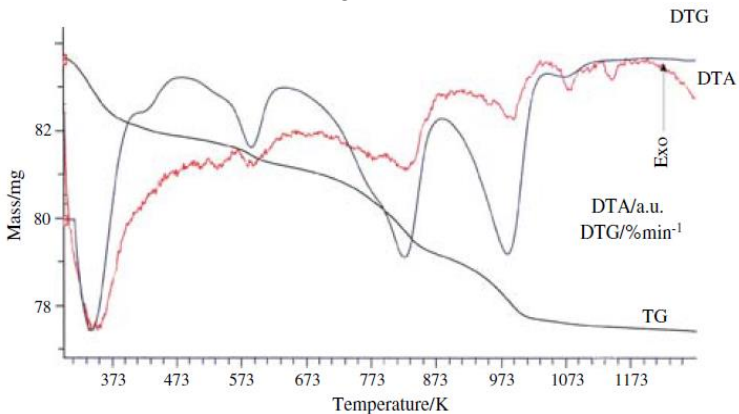


Gambar 4.14 Hasil analisis XRD Bijih A dari Evia dan Bijih C Kastoria oleh Zevgolis (Zevgolis, 2009)

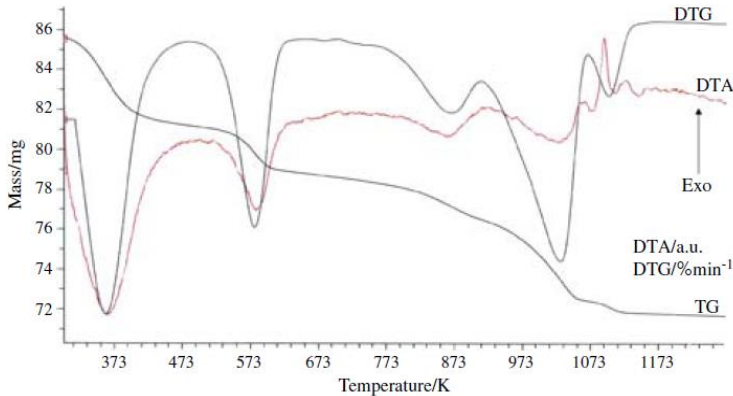
Pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13, hasil analisis XRD dari Bijih A dan Bijih C, pada temperatur tahan 800°C, 850°C, dan 900°C terdapat fasa *quartz* (SiO₂), *magnetite* (Fe₃O₄), dan besi metalik (Fe), adalah fasa mineral yang umum terbentuk pada sampel Bijih A dan Bijih C yang tereduksi. Disebutkan juga bahwa *calcite* (CaCO₃) tidak tampak pada temperatur tahan 800°C, karena dekomposisi *thermal* menjadi CaO dan CO₂ pada 850°C. Pada 850°C di Gambar 4.14, terlihat bahwa kandungan logam besi pada Bijih C jauh lebih tinggi daripada Bijih A dan hal ini juga terlihat pada temperatur tahan yang lainnya. Hasil ini sesuai dengan hasil analisis AAS pada Tabel 4.1 dari Bijih A dan Bijih C. Pada Gambar 4.14, terlihat fasa *fayalite* (2FeO.SiO₂) dari hasil reduksi pada Bijih A. Adanya fasa *fayalite* berasal dari dekomposisi *thermal chlorite*.



Gambar 4.15 Hasil analisis thermal Bijih A dari Evia oleh Zevgolis (Zevgolis, 2009)



Gambar 4.16 Hasil analisis thermal Bijih B dari Lokrida oleh Zevgolis (Zevgolis, 2009)

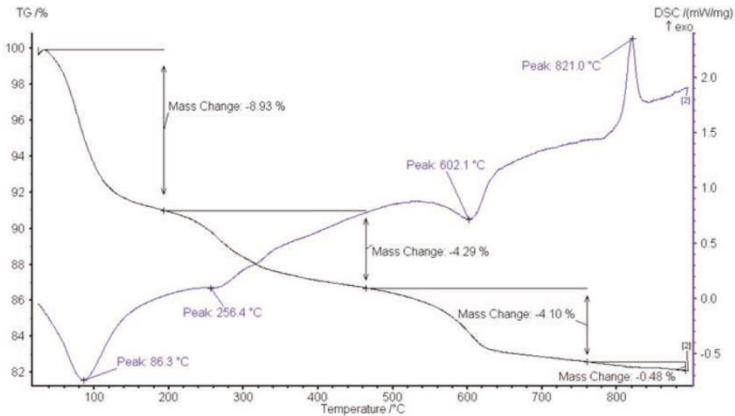


Gambar 4.17 Hasil analisis thermal Bijih C dari Kastoria oleh Zevgolis (Zevgolis, 2009)

Empat efek termal utama terlihat pada Bijih C yang ditunjukkan pada Gambar 4.17. Pada Gambar 4.17 menunjukkan empat puncak intens pada sekitar 100°C, 300°C, 600°C, dan 800°C dengan kehilangan massa 0,6%, 2,67%, 1,96%, dan 2,165. Puncak endotermik pertama sekitar 100°C sesuai dengan eliminasi air yang diserap. Puncak endotermik kedua sekitar 310°C sesuai dengan proses dehidroksilasi dari *goethite* menjadi *hematite*. Puncak endotermik ketiga sekitar 600°C mulai terjadi transformasi dari *hematite* menjadi *magnetite* dan juga puncak eksotermik sekitar 830°C. Puncak eksotermik pada 830°C dikaitkan dengan proses rekristalisasi. Puncak endotermik keempat sekitar 780°C yang dikaitkan dengan dekomposisi *calcite*.

Karena adanya *chlorit* dalam Bijih A dan B, puncak endotermik sekitar 550°C yang ditunjukkan pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16. Selain itu, ukuran partikel *calcite* yang lebih kecil pada Bijih A dan Bijih B menggeser puncak endotermik yang sesuai dengan dekomposisi *calcite* ke temperatur tahanan yang lebih rendah.

Q. Huang dan X. Lv (2011) melakukan penelitian tentang transformasi fasa nikel laterit selama dehidrasi. Hasil pengujian menggunakan TG/DTA ditunjukkan pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Hasil TG/DTA bijih nikel laterit oleh Huang (Huang & Lv, 2011)

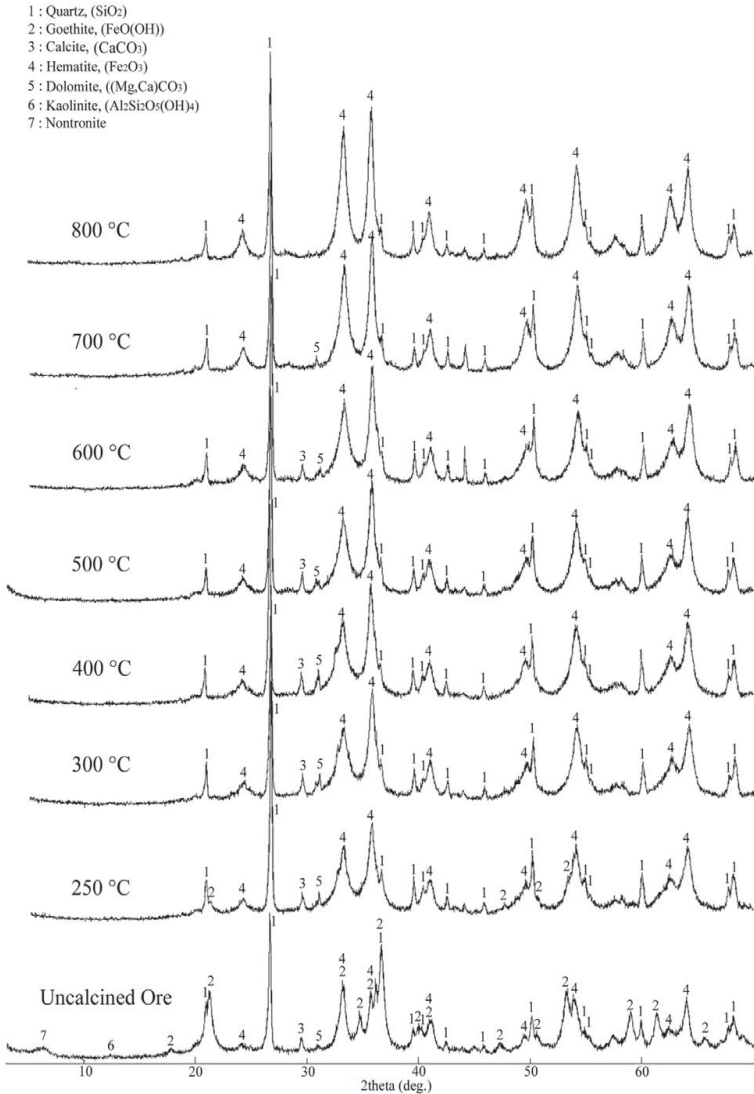
Pada hasil uji TG/DTA yang ditunjukkan Gambar 4.18, ada tiga reaksi endotermik yang jelas dan satu eksotermik. Yang pertama terjadi pada 86,3°C yang ditandai dengan kehilangan air bebas. Yang kedua pada 256,4°C karena penguapan air kristal. Yang ketiga pada 602,1°C yang disebabkan oleh hilangnya gugus hidroksil. Selain itu, ada juga reaksi endotermik kecil di sekitar 310°C karena sejumlah kecil fasa *goethite* [Fe(OH)] kehilangan air kristal. Reaksi eksotermik terjadi pada 821°C karena dekomposisi silikat.

Pada hasil TG/DTA terjadi hilangnya hidroksil dari *chlorite* $(\text{Fe,Mg,Al})_3(\text{Si,Al})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ dimulai dari 602°C dan selesai pada 760°C. *Chlorite* kemudian didekomposisi menjadi MgO dan SiO₂ pada 821°C. Semua air kristal dari fasa *serpentine* $\text{Mg}_{21}\text{Si}_2\text{O}_{28}(\text{OH})_{34}\text{H}_2\text{O}$ hilang diatas 480°C membentuk $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, dan hidroksil hilang pada 600°C dan 700°C. Reaksi $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ terbentuk dan terdekomposisi pada 795°C. Fasa

gramenite ($\text{Fe,AlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})\text{H}_2\text{O}$) kehilangan air kristal pada 143°C dan kehilangan hidroksil pada $480\text{-}510^\circ\text{C}$. *Goethite* kehilangan air kristal pada 309°C .

Kombinasi analisis XRD dan uji TG/DTA menunjukkan bahwa *chlorite* dan *serpentine* adalah fasa mineral utama dan fasa *goethite* serta $(\text{Fe,Mg})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ adalah fasa yang minor.

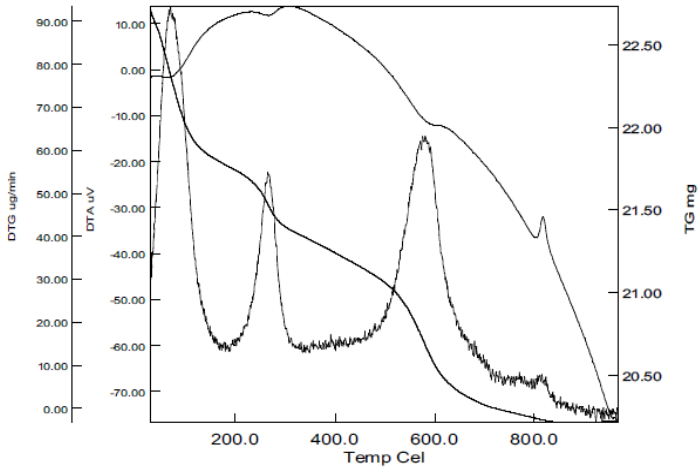
Keskinkilic, dkk (2012) melakukan penelitian proses kalsinasi terhadap bijih nikel laterit yang berasal dari wilayah Anatolia Tengah. Proses kalsinasi dilakukan dengan variasi temperatur tahan 250°C , 300°C , 400°C , 500°C , 600°C , 700°C , dan 800°C . Hasil dari kalsinasi kemudian dilakukan analisis menggunakan XRD. Analisis menggunakan XRD dilakukan untuk mengetahui adanya perubahan fasa di dalam bijih nikel laterit yang telah dilakukan kalsinasi. Hasil analisis XRD diperoleh *peak-peak* yang ditunjukkan pada Gambar 4.19.



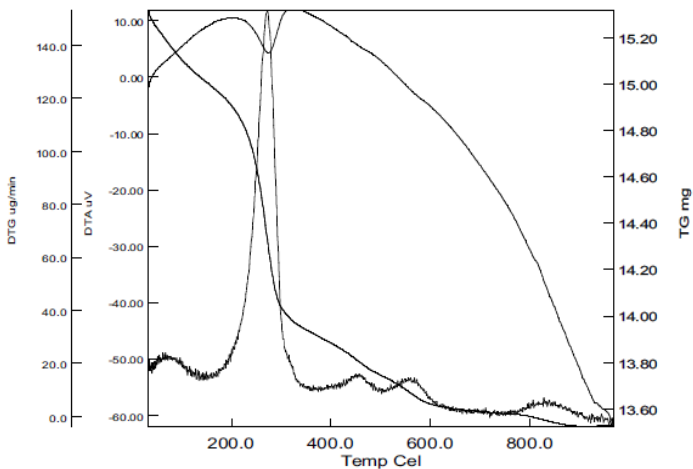
Gambar 4.19 Hasil analisis XRD bijih nikel laterit oleh Keskinilic (Keskinilic, 2012)

Pola difraksi dari sampel yang diuji ditunjukkan pada Gambar 4.19 bersama dengan pola dari bijih yang tidak dilakukan proses kalsinasi. Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa bijih yang tidak dilakukan proses kalsinasi Sebagian besar terdiri dari fasa *quartz* (SiO_2) dan *goethite* [$\text{FeO}(\text{OH})$]. Dapat dilihat bahwa sebagian besar *goethite* berubah menjadi *hematite* (Fe_2O_3) pada temperatur tahan 250°C , dan transformasi antara *goethite* dengan *hematite* telah selesai terjadi pada temperatur tahan 300°C . Pada temperatur tahan 300°C - 500°C tidak terjadi transformasi fasa yang signifikan. Perbandingan diagram XRD dari bijih nikel laterit yang dilakukan proses kalsinasi dalam interval 600°C - 800°C menunjukkan bahwa *calcite* (CaCO_2) perlahan-lahan menghilang dan tidak muncul lagi pada temperatur tahan 700°C karena terurai. Biasanya, *calcite* terurai menjadi CaO dan CO_2 .

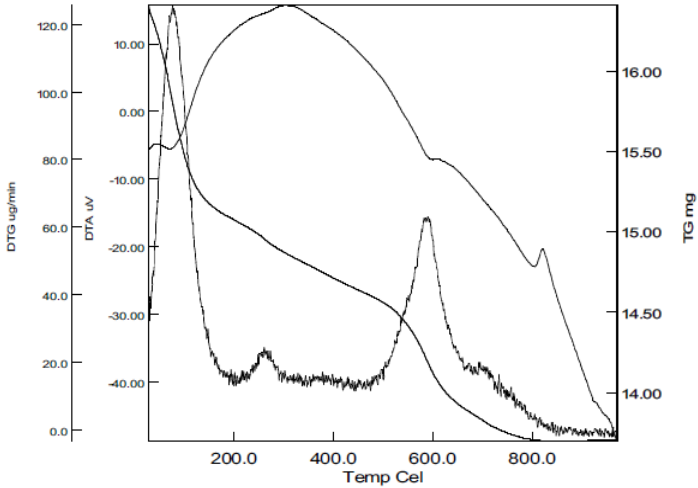
Rizov (2012) melakukan penelitian tentang evaluasi transformasi fasa dari *goethite* ke *hematite* dan dekomposisi termal dari bijih nikel laterit. Karakteristik termogram TG/DTA dari bijih nikel laterit yang diteliti ditunjukkan pada Gambar 4.20, Gambar 4.21, Gambar 4.22, Gambar 4.23, Gambar 4.24, Gambar 4.25, Gambar 4.26, Gambar 4.27, dan Gambar 4.28. Secara umum, untuk semua sampel yang diteliti dilakukan pengelompokan lima temperatur tahan untuk dianalisa yaitu: T-1 (50 - 100°C), T-2 (150 - 300°C), T-3 (400 - 600°C), T-4 (600 - 750°C), dan T-5 (750 - 850°C).



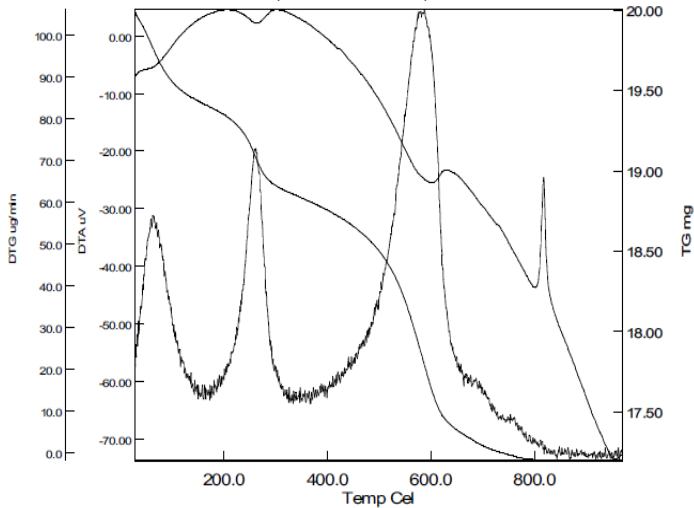
Gambar 4.20 TGA/DTA Biji 1 dari Indonesia oleh Rizov (Rizov, 2012)



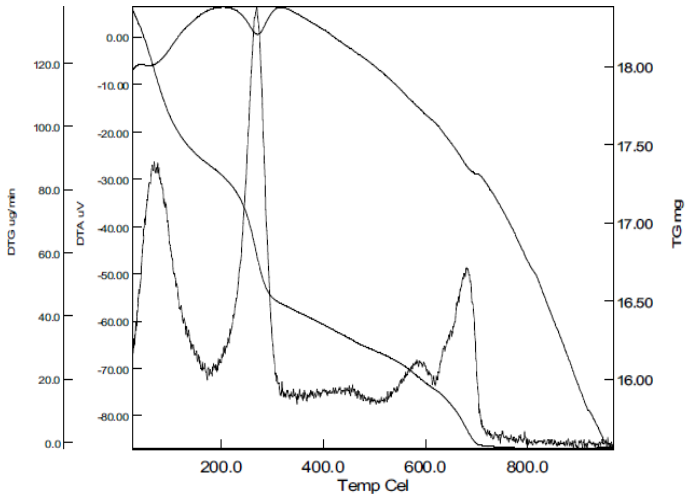
Gambar 4.21 TGA/DTA Biji 2 dari Indonesia oleh Rizov (Rizov, 2012)



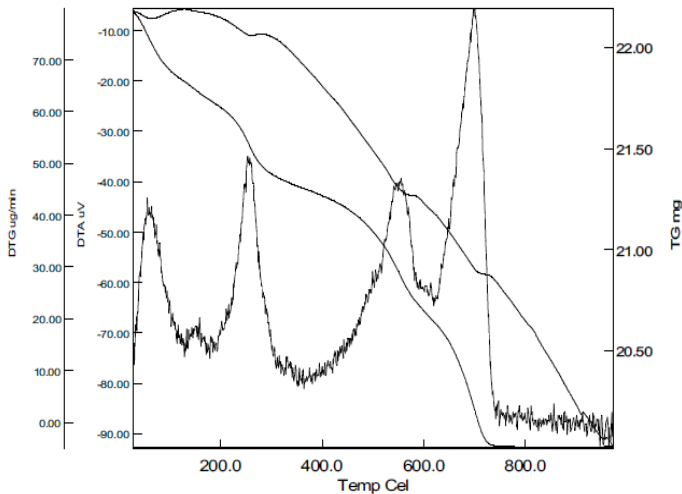
Gambar 4.22 TGA/DTA Biji 3 dari Filipina oleh Rizov (Rizov, 2012)



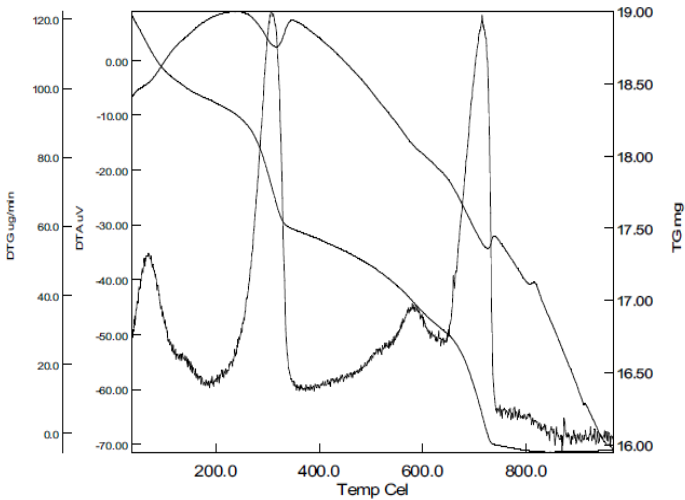
Gambar 4.23 TGA/DTA Biji 4 dari Filipina oleh Rizov (Rizov, 2012)



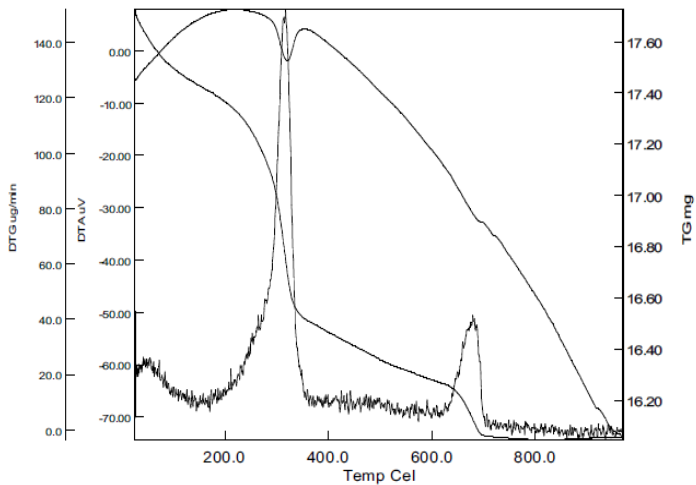
Gambar 4.24 TGA/DTA Bijih 5 dari Turkey oleh Rizov (Rizov, 2012)



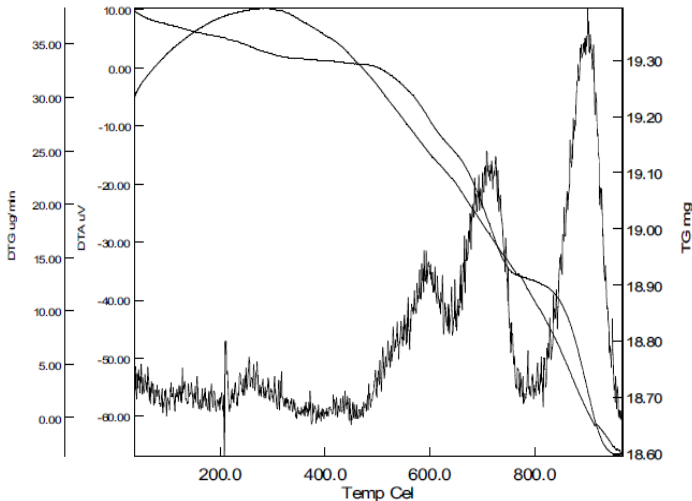
Gambar 4.25 TGA/DTA Bijih 6 dari Turkey oleh Rizov (Rizov, 2012)



Gambar 4.26 TGA/DTA Bijih 7 dari Albania oleh Rizov (Rizov, 2012)



Gambar 4.27 TGA/DTA Bijih 8 dari Albania oleh Rizov (Rizov, 2012)



Gambar 4.28 TGA/DTA Bijih 9 MK oleh Rizov (Rizov, 2012)

Kurva DTG dari Bijih 1 pada Gambar 4.20 menunjukkan empat puncak intens sekitar 70°C , 260°C , 580°C , dan 800°C dengan kehilangan massa masing-masing sebesar 1,77%, 4,93%, 7,82%, dan 13%. Kurva DTA dari Bijih 1 menunjukkan tiga endotermik dan 1 puncak eksotermik.

Puncak DTG pertama pada 70°C terjadi kehilangan air yang diserap. Air dalam bijih nikel laterit dibagi dalam air bebas, air kristal, dan gugus hidroksil. Selama proses pemanasan, kisaran suhu untuk pergerakan kembali air bebas adalah 25°C - 140°C , untuk air kristal adalah 200°C - 480°C , dan untuk kelompok hidroksil adalah 500°C - 800°C .

Puncak DTG kedua pada 260°C untuk Bijih 1 sesuai dengan hilangnya massa kristal. Puncak DTG yang kuat ada di wilayah 290°C - 355°C disebabkan oleh dehidroksilasi *goethite* yang kurang terkristalisasi yang ditransformasikan menjadi *hematite*.

Puncak DTG ketiga pada 560°C - 580°C terjadi penghapusan gugus hidroksil. Untuk sampel Bijih 2 dan Bijih 5 dua puncak DTG

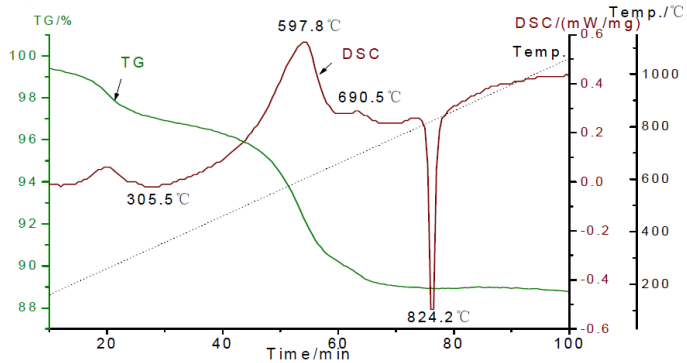
terlihat pada wilayah 400°C-600°C keduanya terkait dengan penghapusan gugus hidroksil.

Puncak DTG keempat yang kuat di wilayah 690°C-715°C (pada 680°C untuk Bijih 8, pada 700°C untuk Bijih 6, pada 710°C untuk Bijih 9, dan pada 715°C untuk Bijih 7) terjadi dehidroksilasi lengkap.

Puncak DTG pada temperatur tahan di atas 800°C, hanya terlihat pada Bijih 2 pada 830°C dan untuk Bijih 9 pada 895°C. Hal ini dikaitkan dengan terjadinya transformasi pada serpentin nikel.

Penghapusan gugus hidroksil *chlorite* $(\text{Fe,Mg,Al})_3(\text{Si,Al})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ dimulai dari 600°C dan selesai pada 715°C. Kelompok *chlorite* kemudian didekomposisi menjadi MgO dan SiO₂ pada 820°C. Semua air kristal *serpentine* $\text{Mg}_{21}\text{Si}_2\text{O}_{28}(\text{OH})_{34}\text{H}_2\text{O}$ hilang diatas 480°C, membentuk $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ dan hidroksi hilang antara 580°C-700°C. Dengan reaksi ini, $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ terbentuk, kemudian terdekomposisi pada 795°C yang terlihat oleh puncak DTG yang lebih rendah dan lebih luas pada 810°C.

Xu, dkk (2013) melakukan penelitian tentang studi transformasi fasa mineral dan termodinamika kalsinasi bijih nikel laterit. Karakteristik termogram TG/DTG dari bijih nikel laterit yang diteliti ditunjukkan pada Gambar 4.29.

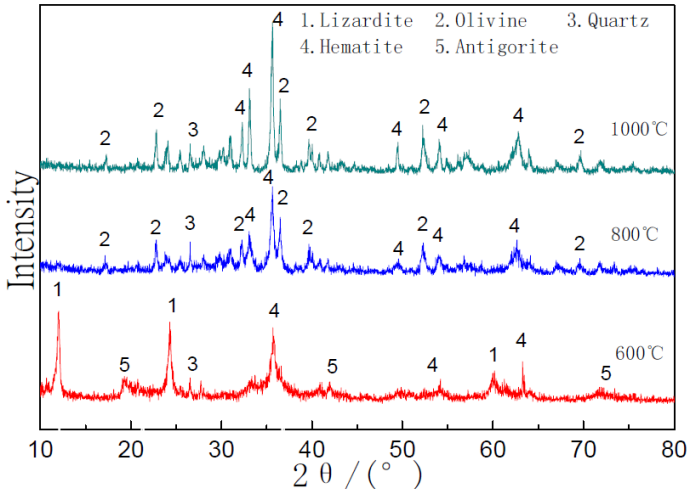


Gambar 4.29 Hasil analisis TG/DTG bijih nikel laterit oleh Xu (Xu, dkk 2013)

Dari hasil analisis TG/DTG pada Gambar 4.29, terdapat empat puncak-puncak yang intens pada sekitar 305°C, 600°C, 690°C, dan 825°C. Puncak endotermik pertama sekitar 305°C terjadi dehidroksilasi *goethite* yang dijelaskan pada persamaan berikut:



Puncak endotermik kedua sekitar 600°C dan juga puncak eksotermik sekitar 690°C disebabkan oleh dekomposisi dua jenis *serpentine* dan pembentukan amorf. Puncak eksotermik pada 825°C juga dikaitkan dengan fenomena rekristalisasi amorf yang terbentuk sebelumnya.



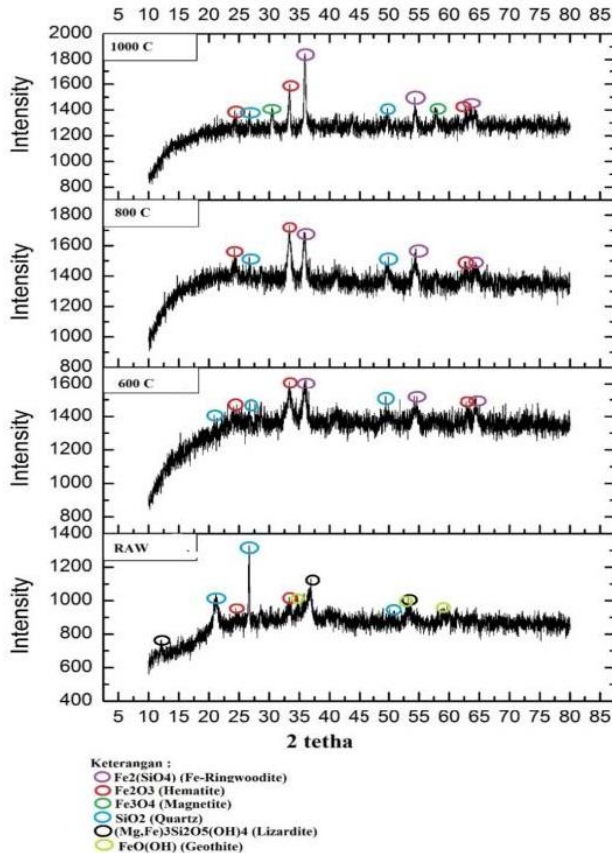
Gambar 4.30 Hasil analisis XRD pada 600°C, 800°C, dan 1000°C oleh Xu (Xu, dkk 2013)

Pada hasil analisis XRD yang ditunjukkan Gambar 4.30, dapat dipastikan bahwa terjadinya kehilangan air yang terikat pada fasa *goethite* dan terjadi pembentukan fasa *hematite*. Pada Gambar 4.30 terdapat juga dekomposisi *serpentine* dan terjadi pembentukan fasa *olivine* yang terjadi pada proses kalsinasi.

Agus Budi Prasetyo, dkk (2016) melakukan penelitian proses kalsinasi terhadap bijih nikel laterit jenis limonit. Proses kalsinasi dilakukan dengan memasukkan *crucible* selama 1 jam. Proses kalsinasi dilakukan pada variasi temperatur 600°C, 800°C, dan 1000°C. Hasil dari kalsinasi kemudian dilakukan analisis menggunakan XRD dan SEM.

- Analisis XRD

Analisis menggunakan XRD dilakukan untuk mengetahui perubahan fasa dalam bijih nikel laterit limonit yang terjadi setelah dilakukan kalsinasi. Hasil analisis XRD diperoleh difraktogram yang ditunjukkan pada Gambar 4.31.



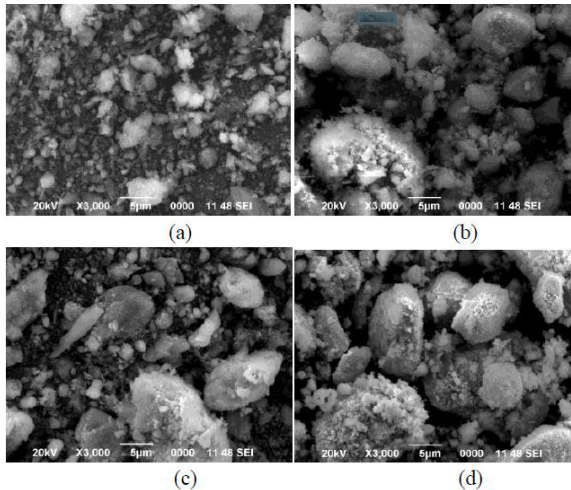
Gambar 4.31 Hasil analisis XRD oleh Prasetyo (Prasetyo, dkk 2016)

Difraktogram pada Gambar 4.31 menunjukkan adanya perubahan *peak-peak* dalam bijih nikel laterit limonit. Setelah dilakukan kalsinasi, *peak-peak* fasa *quartz* mengalami penurunan intensitas, baik pada sampel hasil kalsinasi 600°C, 800°C, maupun 1000°C. Berbeda untuk fasa *hematite*, dimana *peak-peak* fasa *hematite* mengalami kenaikan intensitas setelah dilakukan proses kalsinasi. Selain itu, terdapat *peak-peak* yang hilang maupun muncul pada sampel hasil kalsinasi, dimana pada bijih nikel laterit

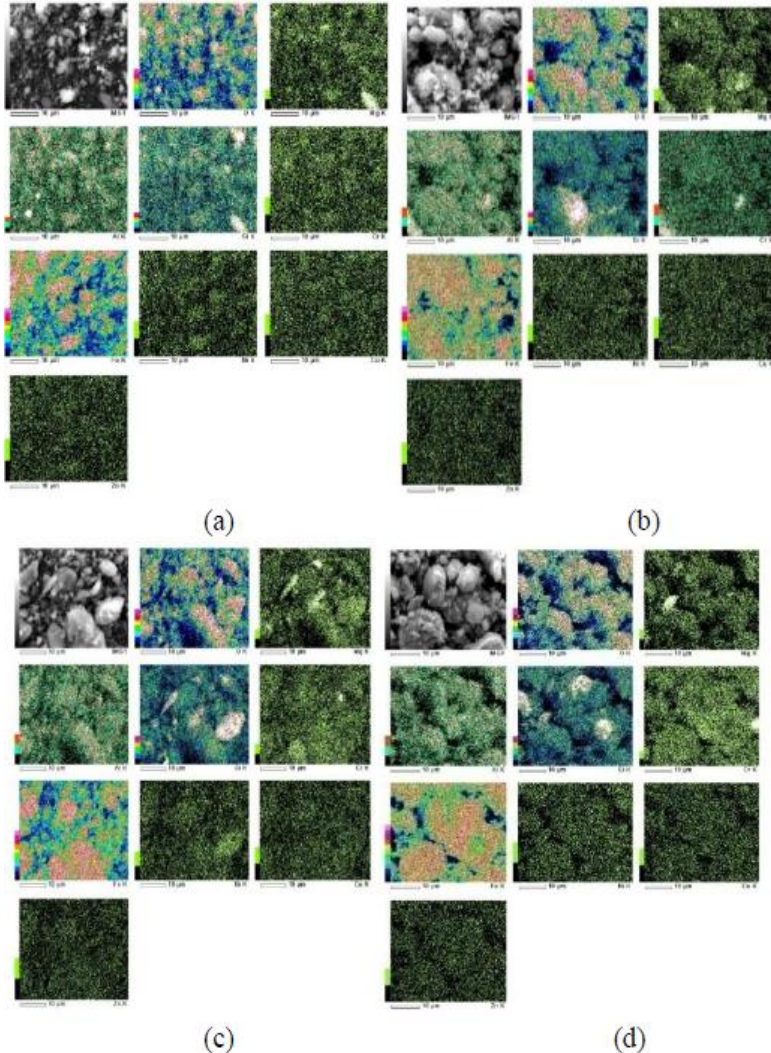
limonit yang semula memiliki fasa *lizardite* dan *goethite*, setelah dilakukan kalsinasi *peak-peak* fasa tersebut tidak nampak lagi pada difraktogram. *Peak-peak* baru yang terbentuk pada sampel hasil kalsinasi menunjukkan adanya fasa *Fe-ringwoodite* dan *magnetite*. *Goethite* tidak nampak pada hasil kalsinasi temperatur 600°C - 1000°C, hal tersebut disebabkan karena *goethite* kehilangan air kristal dengan adanya pemanasan sehingga terbentuk *hematite*, dimana intensitasnya meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur kalsinasi hingga 800°C, pada temperatur kalsinasi 1000°C intensitasnya turun diikuti dengan terbentuknya *magnetite*. Sedangkan *lizardite* akan terdekomposisi pada temperatur lebih dari 600°C, Fe hasil dekomposisi *lizardite* berasosiasi dengan *quartz* membentuk fasa *Fe-ringwoodite*, dimana fasa tersebut meningkat dengan meningkatnya temperatur kalsinasi yang disertai penurunan intensitas *quartz*. Fasa *Fe-ringwoodite* dan *hematite* merupakan fasa dominan yang terbentuk dalam sampel hasil kalsinasi. Terlihat pada Gambar 4.31, fasa *Fe-ringwoodite* dan *hematite* memiliki intensitas yang hampir sama pada sampel hasil kalsinasi pada temperatur 600°C dan 800°C, sedangkan untuk sampel kalsinasi pada temperatur 1000°C, *Fe-ringwoodite* lebih dominan dibanding dengan fasa *hematite*.

- Analisis SEM

Analisis SEM dilakukan untuk mengetahui perubahan morfologi dalam bijih nikel laterit limonit setelah dilakukan kalsinasi. Hasil analisis SEM beserta *mappingnya* ditunjukkan dalam Gambar 4.32 dan Gambar 4.33.



Gambar 4.32 Hasil analisis SEM (a) sampel awal (b) sampel hasil kalsinasi 600°C (c) sampel hasil kalsinasi 800°C (d) sampel hasil kalsinasi 1000°C oleh Prasetyo (Prasetyo, dkk 2016)



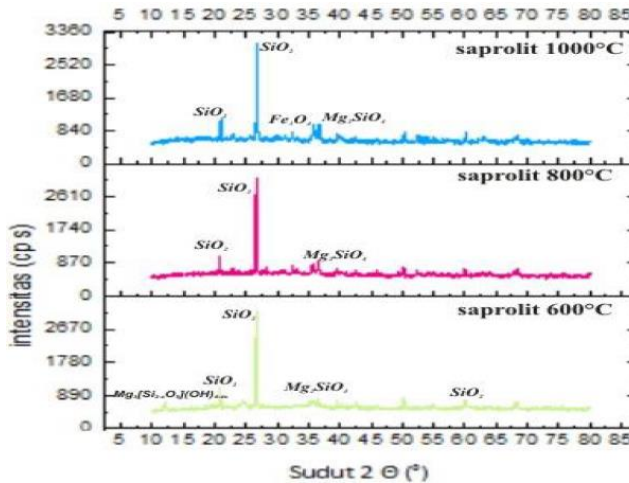
Gambar 4.33 Hasil mapping (a) sampel awal (b) sampel hasil kalsinasi 600°C (c) sampel hasil kalsinasi 800°C (d) sampel hasil kalsinasi 1000°C dari oleh Prastyo (Prasetyo, dkk 2016)

Hasil analisis SEM dengan perbesaran 3000 kali untuk masing-masing sampel ditunjukkan pada Gambar 4.32 yang menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan morfologi dari bijih nikel laterit limonit awal dengan setelah dilakukan kalsinasi pada temperatur 600°C, 800°C, dan 1000°C. Dapat dilihat bahwa proses kalsinasi menyebabkan ukuran partikel bijih nikel laterit limonit bertambah besar. Proses kalsinasi terhadap bijih nikel laterit limonit meningkatkan kemampuan agregasi partikel dalam bijih nikel laterit limonit sehingga menyebabkan bertambah besarnya ukuran partikel tersebut. Hasil *mapping* bijih nikel laterit limonit pada Gambar 4.33 menunjukkan persebaran logam dalam bijih nikel laterit. Berdasarkan hasil *mapping* tersebut, terlihat bahwa tidak terjadi perubahan terhadap kelimpahan dan persebaran logam-logam dalam bijih nikel laterit limonit setelah dilakukan kalsinasi, hal tersebut dikarenakan pemanasan tidak mampu menghilangkan kandungan logam dalam bijih nikel laterit limonit melainkan hanya merubah fasa mineral seperti yang dijelaskan dalam analisis XRD. Gambar 4.33 menunjukkan bahwa besi merupakan logam paling dominan yang tersebar dalam bijih nikel laterit limonit baik pada sampel awal maupun sampel hasil kalsinasi pada temperatur 600°C, 800°C, dan 1000°C. Terlihat pula persebaran O, Si, dan Al yang cukup tinggi dalam bijih nikel laterit limonit tersebut. Persebaran logam-logam lain yaitu Cr, Ni, Mg, Cu, dan Zn juga terlihat namun dalam konsentrasi yang rendah.

Iwan Setiawan, dkk (2016) melakukan penelitian proses kalsinasi terhadap bijih nikel laterit jenis limonit. Bijih yang berbentuk bongkahan dilakukan proses pengeringan (*drying*). Sampel dimasukkan ke dalam oven dengan temperatur 100°C selama 7 jam. Selanjutnya proses kalsinasi dilakukan dengan variabel temperatur 600°C, 800°C, dan 1000°C selama 1 jam. Hasil dari kalsinasi kemudian dilakukan analisis menggunakan XRD dan SEM.

- Analisis XRD

Hasil analisis XRD diperoleh perbandingan difraktogram dari ketiga sampel hasil kalsinasi ditunjukkan pada Gambar 4.34.

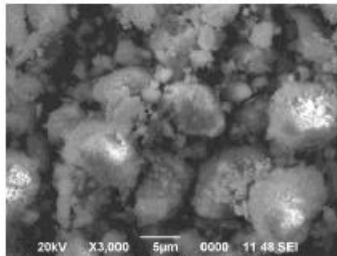


Gambar 4.34 Perbandingan difraktogram hasil kalsinasi 600°C, 800°C, dan 1000°C dari Pomalaa oleh Setiawan (Setiawan, dkk 2016)

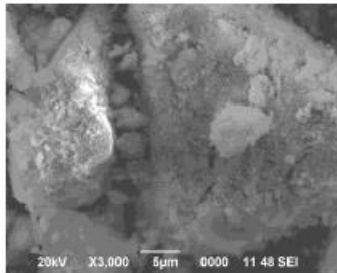
Pada temperatur 600°C, senyawa yang terlihat pada difraktogram adalah SiO₂, *fosterite* (Mg₂SiO₄), dan Mg₃[Si_{2-x}O₅](OH)_{4-x}. Temperatur 800°C menunjukkan adanya senyawa SiO₂ dan *fosterite* (Mg₂SiO₄). Temperatur 1000°C menunjukkan adanya SiO₂, *fosterite* (Mg₂SiO₄) dan Fe₂O₃. Bijih nikel laterit saprolit hasil kalsinasi terbentuk fasa Ni dan Fe metalik yang terperangkap dalam senyawa kompleks *fosterite* (Mg₂SiO₄), hal ini disebabkan karena ukuran jari-jari Ni (135 ppm) dan Fe (140 ppm) yang ukurannya lebih kecil dari Mg (160 ppm), jadi keduanya terdifusi ke dalam *fosterite* membentuk *solid substituent solution*

- Analisis SEM

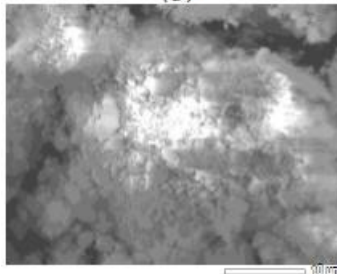
Hasil analisis SEM bijih nikel laterit saprolit ditunjukkan pada Gambar 4.35.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.35 Hasil analisis SEM (a) 600°C (b) 800°C (c) 1000°C dari Pomalaa oleh Setiawan (Setiawan, dkk 2016)

Hasil analisis SEM yang telah dilakukan dapat memberikan persebaran unsur yang terkandung dalam bijih nikel laterit saprolit hasil kalsinasi Gambar 4.35(a) adalah bentuk morfologi dari bijih nikel laterit saprolit hasil kalsinasi temperatur 600°C. Dari pola *mapping*nya, fase mengkilat ditunjukkan pada kelimpahan unsur O,

Mg, Si, dan Fe, unsur lain yang keberadaannya minor disini adalah C, Al, dan Ni. Bentuk morfologi bijih nikel laterit saprolit hasil kalsinasi tempeartur 800°C terlihat pada Gambar 4.35(b). Berdasarkan pola *mapping*nya, fase mengkilat terlihat pada kelimpahan unsur O, Fe, Si, dan Mg yang cukup dominan, sedangkan unsur minornya adalah C, Ni, dan Cu. Bijih nikel laterit saprolite hasil kalsinasi tempeartur 1000°C terlihat pada Gambar 4.35(c). Pola *mapping* menunjukkan fase mengkilat terdapat pada kelimpahan O, Mg, Si, dan Fe. Unsur lain yang minor adalah Ni. Apabila dibandingkan dengan hasil SEM pada bijih nikel laterit saprolit awal pada Gambar 4.10 terlihat perbedaan yang sangat jelas, bahwa sampel hasil kalsinasi terlihat ketika semakin tinggi temperatur maka penampakan permukaan morfologi hasil SEM akan semakin terbentuk rongga-rongga yang semakin besar. Dari Gambar 4.35 dapat diketahui bahwa dengan meningkatnya tempeartur kalsinasi, ukuran partikel metal semakin besar. Hal tersebut sesuai dengan hasil analisis XRD dimana semakin tinggi temperatur maka intensitas metalisasi juga semakin tinggi.

Pada Diagram Ellingham yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, dapat diketahui bahwa temperatur minimal yang dibutuhkan agar dapat terjadi suatu reaksi, dimana temperatur awal Fe memulai reaksi dengan CO pada 275°C dan temperatur awal Ni memulai reaksi dengan CO pada 500°C. Hal tersebut dapat ditunjukkan oleh perpotongan antara kurva oksida dan garis pembentukan CO (Ross, 1980). Pada setiap penelitian yang dilakukan oleh (Keskinilic 2012), (Prasetyo 2016), (Setiawan 2016), (Zevgolis 2009), (Q. Huang 2011), (Rizov 2012), dan (Xu, et al 2013) menjelaskan bahwa hasil dari setiap penelitian menunjukkan hasil yang sama dengan teori yang ada.

Transformasi fasa *goethite* menjadi *hematite* terjadi dengan meningkatnya suhu kalsinasi, puncak *goethite* benar-benar hilang pada 430°C (Kim, et al., 2010). Pada penelitian (Keskinilic 2012) pada temperatur 300°C transformasi antara *goethite* dengan *hematite* telah selesai, hal ini sesuai dengan teori yang dijelaskan. Pada penelitian (Rizov 2012) juga mengatakan bahwa pada

temperatur 290°C-350°C dehidroksilasi *goethite* yang ditransformasikan menjadi *hematite*, serta pada penelitian (Xu, et al 2013) mengatakan bahwa puncak endotermik pertama terjadi pada 305°C dimana terjadi dehidroksilasi *goethite*.

Diagram kesetimbangan Boudouard yang ditunjukkan pada Gambar 4.36 menggambarkan kesetimbangan antara besi, *hematite*, *magnetite*, *wustite*, karbon padat, karbon monoksida, dan karbon dioksida sehingga diagram ini dapat dijadikan teori dasar dari proses kalsinasi bijih nikel laterit menggunakan karbon. Pada diagram Boudouard tampak bahwa senyawa yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh perbandingan antara CO/CO₂ dan temperatur operasi.

Hal penting yang dapat diperhatikan pada kesetimbangan Boudouard adalah antara garis kesetimbangan *wustit*/Fe dan garis kesetimbangan Boudouard berpotongan pada temperatur 700°C. Hal tersebut menunjukkan bahwa temperatur minimum yang dibutuhkan untuk mereduksi *wustit* menjadi Fe adalah 700°C. Antara garis kesetimbangan *magnetit*/*wustit* dan garis kesetimbangan Boudouard berpotongan pada temperatur 650°C. Hal tersebut menunjukkan bahwa temperatur minimum yang dibutuhkan untuk mereduksi *magnetit* menjadi *wustit* adalah 650°C. Sangat tidak mungkin reaksi dapat berjalan di bawah temperatur minimum karena karbon monoksida akan terurai menjadi karbon dioksida (Stephenson & Smaier, 1980). Pada penelitian (Prasetyo 2016) mengatakan bahwa terbentuknya fasa *magnetite* dimulai pada 800°C ketika intensitas *hematite* meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur kalsinasi hingga 1000°C menyebabkan intensitas *hematite* menurun diikuti dengan terbentuknya *magnetite*. Pada penelitian (Zevgolis 2009) juga mengatakan hal yang sama dimana transformasi dari *hematite* menjadi *hematite* dimulai pada temperatur 850°C.

Tabel 4.14 Hasil variasi transformasi fasa

No	T(°C)	Reaksi	Keterangan	Penulis	Tahun
1	310°C dan 600°C	$2\text{FeO}(\text{OH}) \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ dan $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	Terjadi transformasi awal pada 310°C yaitu <i>goethite</i> menjadi <i>hematite</i> dan pada 600°C terjadi transformasi <i>hematite</i> menjadi <i>magnetite</i>	Zevgolis	2009
2	480°C 600°C 715°C	$\text{Mg}_{21}\text{Si}_2\text{O}_{28}(\text{OH})_{34}\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Semua air kristal pada fasa <i>serpentine</i> hilang diatas 480°C membentuk $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Reaksi $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ terbentuk dan terdekomposisi pada 795°C. Penghapusan gugus hidroksil <i>chlorite</i> dimulai dari 600°C dan selesai pada 715°C	Q. Huang	2011
3	250°C - 300°C	$2\text{FeO}(\text{OH}) \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Sebagian besar <i>goethite</i> [$\text{FeO}(\text{OH})$] berubah menjadi <i>hematite</i> (Fe_2O_3)	E. Keskinik ilic	2011

4	<p>480°C 580°C 700°C 795°C 820°C</p>	<p>$Mg_{21}Si_2O_{28}(OH)_{34}H_2O$ → $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$</p>	<p>Semua air kristal pada fasa <i>serpentine</i> hilang diatas 480°C, membentuk $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ dan hidroksi hilang antara 580°C-700°C. Reaksi $Mg_3Si_2O_7$ terbentuk, dan terdekomposisi pada 795°C. <i>Chlorite</i> didekomposisi menjadi MgO dan SiO₂ pada 820°C</p>	Rizov	2012
5	<p>305°C</p>	<p>$2FeO(OH) \rightarrow Fe_2O_3 + H_2O$</p>	<p>Puncak pertama pada 305°C terjadi dehidroksilasi <i>goethite</i>. Puncak endotermik kedua sekitar 600°C dan juga puncak eksotermik sekitar 690°C disebabkan oleh dekomposisi dua jenis <i>serpentine</i> dan pembentukan amorf. Puncak</p>	Xu, dkk	2013

			eksotermik pada 825°C juga dikaitkan dengan fenomena rekristalisasi amorf		
6	800°C - 1000°C C	3Fe ₂ O ₃ + CO → 2Fe ₃ O ₄ + CO ₂	<i>Goethite</i> kehilangan kristal hingga terbentuk <i>hematite</i> , dimana intensitasnya meningkat seiring meningkatnya temperatur. Pada temperatur 1000°C <i>hematite</i> turun seiring dengan terbentuknya <i>magnetite</i>	Prasetyo	2016
7		Mg ₂ SiO ₄	Terbentuk fasa Ni dan Fe metalik yang terperangkap dalam senyawa kompleks <i>fosterite</i> (Mg ₂ SiO ₄), hal ini disebabkan karena ukuran jari-jari Ni (135 ppm) dan Fe	Setiawan	2016

(140 ppm)
yang
ukurannya
lebih kecil dari
Mg (160 ppm),
jadi keduanya
terdifusi ke
dalam *fosterite*

4.2.2 Pengaruh Temperatur Tahap Terhadap Kadar Ni

Agus Budi Prasetyo dan Puguuh Prasetyo (2011) melakukan penelitian terkait kalsinasi bijih nikel laterit. Temperatur pun menjadi hal yang diperhatikan karena semakin tinggi temperatur maka akan membutuhkan kalori yang tinggi sehingga efisiensi akan berkurang. Bijih nikel laterit yang digunakan pada penelitian ini memiliki kandungan Ni awal sebesar 1,27%. Variabel temperatur yang digunakan adalah 900°C, 950°C, 1000°C, dan 1100°C dengan menggunakan variabel tetap jumlah reduktor batu bara sebesar 10% dan waktu pemanggangan selama 1 jam. Pada percobaan ini, menggunakan batu bara dengan kandungan *fixed carbon* sebesar 33,39%. Setelah dilakukan percobaan sesuai variasi, didapatkan hasil seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.15 di bawah:

Tabel 4.15 Hasil analisis produk kadar Ni dari Halmahera oleh Prasetyo (Prasetyo, 2011)

Temperatur (°C)	% Kadar dalam kalsin	
	%Ni	%Fe
900	1,44	15,69
950	1,70	16,71
1000	1,95	13,19
1100	1,86	19,05

Pada proses kalsinasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil pada Tabel 4.15. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada kalsinasi bijih nikel laterit, diperoleh hasil kadar Ni tertinggi pada temperatur 1000°C dengan jumlah 1,95%.

Agus Budi Prasetyo, dkk (2014) melakukan penelitian tentang pengoptimalan proses reduksi bijih nikel laterit jenis limonit sebagai bahan baku *Nickel Containing Pig Iron* (NCPI/NPI) yang berasal dari Sangaji, Halmahera. Pengaruh temperatur terhadap proses peningkatan kadar nikel dalam bijih nikel laterit dilakukan dengan menggunakan campuran bijih yang telah dicampur dengan 2% binder dan 15% batu bara. Campuran bijih, binder dan batu bara kemudian dikalsinasi dengan variabel temperatur 900°C, 950°C, 1000°C, dan 1100°C selama 1 jam. Pada percobaan ini, menggunakan batu bara dengan kandungan *fixed carbon* sebesar 33,4%. Setelah dilakukan percobaan sesuai variasi, didapatkan hasil seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.16 di bawah:

Tabel 4.16 Hasil analisis produk kadar Ni dari Halmahera oleh Prasetyo

(P, Firdiyono, & Febriana, 2014)

Temperatur kalsinasi (°C)	Kandungan Ni dalam kalsin (%)
900	1,87
950	1,98
1000	2,27
1100	2,20

Pada proses kalsinasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil pada Tabel 4.16. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada kalsinasi bijih nikel laterit, diperoleh hasil kadar Ni tertinggi pada temperatur 1000°C dengan jumlah 2,27%.

Rudi Subagja, dkk (2015) melakukan penelitian terkait kalsinasi bijih nikel laterit. Pengaruh temperatur terhadap proses peningkatan kadar nikel dalam bijih nikel laterit dilakukan dengan menggunakan campuran bijih yang telah dicampur dengan 10% Na₂SO₄ dan 10% batu bara. Campuran bijih, Na₂SO₄, dan batu bara kemudian dikalsinasi dengan variabel temperatur 800°C, 900°C, 1000°C, dan 1100°C selama 1 jam. Pada percobaan ini, menggunakan batu bara dengan kandungan *fixed carbon* sebesar

36,92%. Setelah dilakukan percobaan sesuai variasi, didapatkan hasil seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.17 di bawah:

Tabel 4.17 Hasil analisis produk kadar Ni oleh Subagja
(Subagja, dkk 2015)

Temperatur kalsinasi (°C)	Kandungan Ni dan Fe dalam kalsin	
	%Ni	%Fe
800	1,20	42,67
900	1,25	44,38
1000	1,43	46,98
1100	1,31	48,58

Pada proses kalsinasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil pada Tabel 4.17. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada kalsinasi bijih nikel laterit, diperoleh hasil kadar Ni tertinggi pada temperatur 1000°C dengan jumlah 1,43%.

Mayangsari (2015) melakukan penelitian terkait kalsinasi bijih nikel laterit. Pengaruh temperatur tahan terhadap proses peningkatan kadar nikel dalam bijih nikel laterit dilakukan dengan menggunakan campuran bijih yang telah dicampur dengan 5 gram CaSO₄ dan 5 gram batu bara. Campuran bijih, CaSO₄, dan batu bara kemudian dikalsinasi dengan variabel temperatur 800°C, 900°C, 1000°C, dan 1100°C selama 1 jam. Pada percobaan ini, menggunakan batu bara dengan kandungan *fixed carbon* sebesar 36,92%. Setelah dilakukan percobaan sesuai variasi, didapatkan hasil seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.18 di bawah:

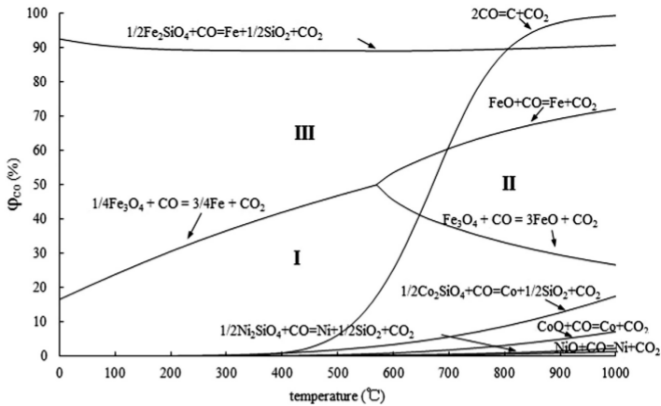
Tabel 4.18 Hasil analisis produk kadar Ni oleh Mayangsari
(Mayangsari, 2016)

Temperatur kalsinasi (°C)	Kandungan Ni dalam kalsin (%)
800	1,14
900	1,20
1000	1,27
1100	1,23

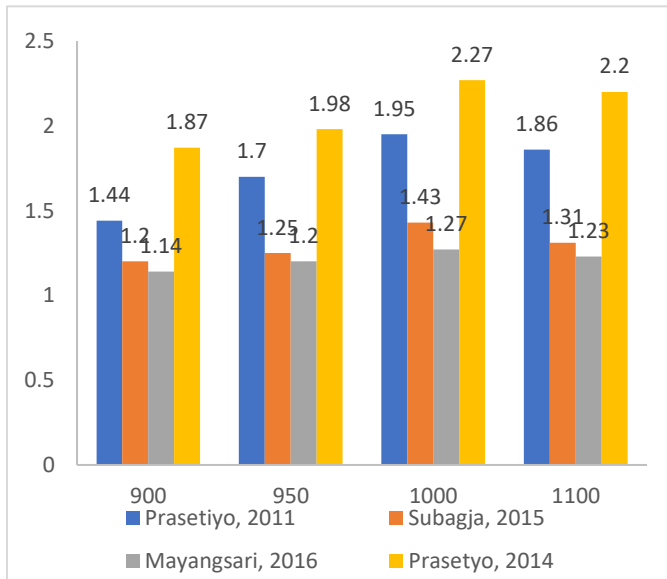
Pada proses kalsinasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil pada Tabel 4.18. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada kalsinasi bijih nikel laterit, diperoleh hasil kadar Ni tertinggi pada temperatur 1000°C dengan jumlah 2,27%.

Tabel 4.19 Variasi dan kadar Ni jurnal pembahasan yang digunakan

Jurnal	Variabel (°C)	Kadar Ni (%)
Prasetiyo, 2011	900	1,44
	950	1,70
	1000	1,95
	1100	1,86
Prasetyo, 2014	900	1,87
	950	1,98
	1000	2,27
	1100	2,20
Subagja, 2015	800	1,20
	900	1,25
	1000	1,43
	1100	1,31
Mayangsari, 2016	800	1,14
	900	1,20
	1000	1,27
	1100	1,23



Gambar 4.36 Diagram kesetimbangan Boudouard (Stephenson & Smaler, 1980)



Gambar 4.37 Grafik kadar Ni

Pada Tabel 4.19 merupakan hasil dari pengaruh temperatur tahan terhadap kadar Ni pada masing-masing jurnal. Dari hasil

penelitian tersebut, diperoleh grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.37. Pada Gambar 4.36 menunjukkan diagram kesetimbangan Boudouard yang menunjukkan garis kesetimbangan yang memotong senyawa pembentukan nikel. Jika dilihat dari garis kesetimbangan Boudouard, pada temperatur 1000°C akan terdapat 100% gas CO. Kemudian apabila temperatur diturunkan, maka kesetimbangan tersebut tidak akan tercapai sehingga terjadi penguraian dari gas CO menjadi CO₂ dan C (Stephenson & Smailer, 1980). Hasil dari penelitian yang sudah dilakukan sesuai dengan teori yang ada. Penelitian yang dilakukan (Prasetyo 2011), menunjukkan pada temperatur 1000°C memiliki kadar Ni paling tinggi sebesar 1,95% jika dibandingkan pada temperatur 900°C yang memiliki kadar paling rendah sebesar 1,44%. Hasil yang sama diperoleh dari penelitian (Prasetyo 2014), menunjukkan pada temperatur 1000°C memiliki kadar Ni paling tinggi sebesar 2,27% dan pada temperatur 900°C memiliki kadar Ni paling rendah sebesar 1,87%. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Subagja 2015) dan (Mayangsari 2016) mendapatkan hasil yang sama dengan teori bahwa pada saat temperatur 1000°C akan terdapat 100% gas CO sehingga menghasilkan kadar Ni yang tinggi. Meski menggunakan temperatur yang sama pada masing-masing jurnal, terdapat hasil yang berbeda. Hal ini dikarenakan kandungan awal dari Ni yang digunakan pada masing-masing jurnal berbeda.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data sekunder dan analisis data yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Temperatur awal mulai terjadinya transformasi fasa pada bijih nikel laterit untuk Fe sekitar 275°C dan untuk Ni sekitar 500°C. Terjadinya transformasi *goethite* [FeO(OH)] menjadi *hematite* Fe₂O₃ antara 300°C-350°C. Terjadinya transformasi *hematite* (Fe₂O₃) menjadi *magnetite* (Fe₃O₄) antara 850°C-1000°C.
2. Hasil kalsinasi bijih nikel laterit paling baik didapatkan pada kalsinasi bijih nikel laterit dengan temperatur 1000°C dan didapatkan kadar Ni sebesar 2,27%.

5.2 Saran

Pada *review* jurnal yang akan datang, terdapat saran yang perlu diperhatikan dan dipertimbangkan sebagai berikut:

1. Melakukan *review* penelitian terkait pengaruh variasi jenis waktu tahan pada proses kalsinasi bijih nikel laterit menggunakan *rotary kiln*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul, F., Pintowantoro, S., Kawigraha, A., & Nursiddiq, A. (2018). Effects of Reduction Temperature to Ni and Fe Content and The Morphology of Agglomerate of Reduced Laterit Limonitic Nickel Ore by Coal-bed-Method.
- Al-Khribash, S. (2020). Genesis and Mineralogical Classification of Ni-Laterites Oman Mountains. 199-212.
- Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramachandran, V., Robinson, T. G., & Davenport, W. G. (2011). *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt, and Platinum-Group Metals*.
- Dalvi, A. B. (2004). The Past and the Future of Nickel Laterites.
- Eric, R. H. (2014). Production of Ferroalloys.
- Febriana, E. (2020). Effect of Sulfur Addition to Nickel Recovery of Laterite Ore. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 14-20.
- Hawaria. (2000). Pengaruh Volatile Matter (Zat Terbang) Briket Batubara Pada Pembakarannya.
- Huang, Q., & Ly, X. (2011). Phase Transformation of Nickel Laterite Ore During Dehydration. *Journal of Mining and Metallurgy*, 45-51.
- Indriatma. (2016). Analisa perpindahan panas dalam rotary kiln.
- Ingham, J. (2011). *Geomaterials under the microscope*.
- Jamaludin, A., & Adiantoro, D. (2012). Analisis Kerusakan X-Ray Fluorescence (XRF). *Pengolaan Instalasi Nuklir (PIN)*, 9-10.
- Jeffes, J. (2001). Ellingham Diagram. *Encyclopedia of Material: Science and Technology (Second Edition)*, 2751-2753.
- Jungah, K., Gjergi, Hideaki, T., Katsunori, O., Seiji, M., & Toyohisa, F. (2010). Calcination of Low-Grade Laterite for Concentration of Ni by Magnetic Separation.
- Kadir, A. R. (2016). Analisis Proksimat Terhadap Kualitas Batubara Di Kecamatan Tanah Grogot Kabupaten Paser Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Geomine*, 4, 118-122.
- Kasi, N., & Subramaniam. (2018). Encyclopedia of Polymer Science and Technology.

-
- Keskinkilic, E. (2012). Calcination Characteristics of Laterite Ores From the Central region of Anatolia. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 877-882.
- Khoo, Nawshad, Geoff, Robbie, & Sankar. (2016). A Life Cycle Assesment Of A New Laterite Processing Technology. 1-16.
- Kim, J., Dodbiba, G., Tanno, H., Okaya, K., Matsuo, S., & Fujita, T. (2010). Calcination of Low-grade Laterite for Concentration of Ni by Magnetic Separation. *Mineral Engineering*, 282-288.
- Li, G. (2018). Selective Leaching Of Nickel And Cobalt From Limonitic Laterite Using Phosphoric Acid; An Alternative For Value-Added Processing Of Laterite. *Journal of Cleaner Production*, 620-626.
- Li, G., Shi, T., Rao, M., Jiang, T., & Zhang, Y. (2012). Benefication of Nickeliferous Laterite by Reduction Roasting in The Presence of Sodium Sulfate.
- Mayangsari, W. (2016). Proses Kalsinasi Bijih Nikel Limonit Menggunakan Zat Aditif CaSO₄. *Pusat Penelitian Metalurgi dan Material - LIPI*.
- Miao, Y., Hynan, P., Jouanne, A., & Yokochi. (2019). Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements Energies. 1-20.
- Morcali, M., Khajavi, L., & Dreisinger, D. (2017). Extraction of Nikel and Cobalt From Nickelferous Limonitic Laterite Ore Using Borax Containing Slags. 1-21.
- Moskalyk, R. (2002). Nickel laterite processing and electrowinning practice.
- Mubarok, Z. (2016). Bioleaching Nikel Dari Bijih Limonit Pulau Gag Menggunakan Bakteri Mixotrof. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batu bara*, 69-79.
- Mudd, G. M. (2009). Nickel Sulfide Versus Laterite : The Hard Sustainability Challenge Remains.
-

-
- P, A. B., Firdiyono, F., & Febriana, E. (2014). Optimasi Proses Reduksi Bijih Nikel Laterit Jenis Limonit Sebagai Bahan Baku NPI (Nickel Pig Iron). *Pusat Penelitian Metalurgi - LIPI*, 9-16.
- Peray, K. E., & Joseph J, W. (1972). *The rotary cement kiln*.
- Pickles. (2014). Heterogeneity and plasticity in the development of language: a 17-year follow-up of children referred early for possible autism.
- Polyakov, P. (2013). *Production of Aluminium with low temperature fluoride melts*.
- Prasetyo, A. B. (2011). Peningkatan Kadar Nikel (Ni) dan Besi (Fe) Dari Bijih Nikel Laterit Untuk Bahan Baku Nickel Containing Pig Iron (NCPI/NPI). *Pusat Penelitian Metalurgi LIPI*, 125-130.
- Prasetyo, A. B., Mayangsari, W., & Lindasari. (2016). Proses Kalsinasi Terhadap Bijih Nikel Laterit Pada Temperatur 600, 800, dan 1000.
- Rhamdhani, M. H. (2009). Microstructure and Phase Characterizations During Reduction and Leaching.
- Rizov, B. (2012). Phase Transformations From Goethite to Hematite and Thermal Decomposition in Variuos Nickelferous Laterite Ores. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 207-210.
- Rodrigues. (2017). Factors Affecting the Upgrading of Nickleferous Limonitic Laterite Ore by Reduction Roasting, Thermal Growth and Magnetic Separation. 1-21.
- Ross, H. (1980). Direct Reduction Iron Technology and Economics of Productions and Use. Dalam "*Physical Chemistry: Part 1 Thermodynamics*". USA: The Iron and Steel Society of AIME.
- Setiabudi, A. d. (2012). *Karakterisasi Material: Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia*. Bandung: UPI PRESS.
- Setiabudi, A., Hardian, R., & Muzakir, A. (2012). *Karakterisasi Material; Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian*
-

-
- Kimia*. Bandung: Gedung Penerbitan dan Percetakan Universitas Pendidikan Indonesia.
- Setiawan, I. (2016). Pengolahan Nikel Laterit Secara Pirometalurgi: Kini dan Penelitian Kedepan. *Jurnal UMJ*, 1.
- Setiawan, I., Prasetyo, A. B., & Meyta. (2016). Analisis XRD dan SEM Terhadap Hasil Kalsinasi Pada Bijih Nikel Laterit Jenis Saprolit. *Puslit Metalurgi dan Material LIPI*.
- Stephenson, R., & Smailer, R. (1980). Direct Reduced Iron Technology and Economics of Production and Use. *The Iron & Steel Society, AIME*.
- Stratton, P. (2013). Ellingham diagrams – their use and misuse. *International Heat Treatment and Surface Engineering*.
- Subagja, R., Prasetyo, A. B., & Mayangsari, W. (2015). Pengaruh Temperatur dan Waktu Kalsinasi, Serta Penambahan Batu bara dan Na₂SO₄ Terhadap Peningkatan Kadar Ni Dalam Bijih Nikel Laterit. *Prosiding Seminar Material Metalurgi*.
- Sufriadin. (2011). Study on Mineralogy and Chemistry of The Saprolitic Nickel Ores From Soroako, Sulawesi, Indonesia: Implication For The Lateritic Ore Processing. *Journal of South East Asian Applied Geology*, 23-33.
- Utigard, T. (2005). Gaseous Reduction of Laterites Ore.
- Voutou, B., & Stefanaki, E.-C. (2008). *Electron Microscopy: The Basics*. Thessaloniki: Physics of Advanced Materials Winter School.
- Walker. (2009). Nickel laterite rotary kiln-electric furnace plant of the future.
- Xu, Y. L., Chen, S., Guo, S. Q., Bian, Y. Y., Ding, W. Z., & Tan, D. (2013). The Study on the Mineral Phase Transformations and Thermodynamics of Laterite Ores Calcination. *Shanghai Key Laboratory of Modern Metallurgy and Materials Processing*, 250-254.
-

-
- Zevgolis, E. N. (2009). Phase Transformations of Nickelferous Laterites During Preheating and Reduction With Carbon Monoxide. *J Therm Anal Calorim*, 133-139.
- Zhu, Zheng, Zhu, Pan, Li, AN, & Liu. (2018). Utilization of Limonitic Nickel Laterite to Produce Ferronickel Concentrate by The Selective Reduction-Magnetic Separation Process. 1-11.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis merasa dalam Menyusun Laporan Tugas Akhir ini masih menemui beberapa kesulitan, sehingga menyadari penulis bahwa penulisan laporan ini masih jauh dari sempurna dan masih banyak kekurangan-kekurangan lainnya. Menyadari pembuatan laporan ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga yang selalu mendoakan dan mendukung penulis yaitu, Bunda Rita Triana, Ayah Renosyah, dan Kakak Denisha Dwani Amalia. Berkat bantuan material, moral, dan doa sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan lancar.
2. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS atas ilmu dan ajarannya yang membuat penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir
3. Radite Surya Gumelar selaku rekan penulis dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir dan teman-teman dari Laboratorium Ekstraksi yang telah banyak membantu penulis dalam berbagi motivasi, wawasan, dan bimbingan dalam ilmu ekstraksi.
4. Seluruh mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi terkhusus keluarga besar MT18 yang sudah memberikan dukungan sebesar-besarnya kepada penulis.
5. Teman-teman dari BSO Minat Bakat yang telah memberi banyak pembelajaran serta selalu menciptakan lingkungan yang membangun selama perkuliahan.
6. Fadhel MYF dan Bagas Mulyajati yang selalu menemani penulis dalam keadaan apapun dan bersedia menjadi wadah ketika penulis merasa kebingungan dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir dan menjadi tempat untuk curhat ketika memiliki masalah yang lainnya.
7. Dheanisa Nofia, S.Ked. yang selalu ada mulai dari awal berlangsungnya seminar proposal hingga saat ini terus-menerus

memberikan dukungan, doa, dan motivasi kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini.

8. Teman-teman Squad (Ojik, Hadist, Loan, Arik, Kaet, Dani, Taufik, Selly, Getryn, Rhanty, Nabila, Nindy, dan Vania) yang selalu menampung aspirasi penulis setiap masa liburan maupun kuliah dan tidak henti-hentinya memberikan semangat kepada penulis.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Padang pada tanggal 28 Februari 1998, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal dasar di SDIT Adzkia Padang. Lalu melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 8 Padang, dan pendidikan menengah akhir di SMA Negeri 1 Padang. Penulis melanjutkan pendidikan Strata 1 di Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS pada tahun 2016-2020. Saat menempuh pendidikan Strata 1, penulis aktif di berbagai kegiatan baik akademik maupun non-akademik. Penulis tercatat pernah menjadi Grader Laboratorium Pengolahan Mineral selama 4 bulan pada tahun 2019-2020. Penulis juga aktif di dalam beberapa organisasi ITS antara lain: Staff Divisi *Public Relation* ITS *Material Advantage Chapter*, Bendahara BSO Minat Bakat 2018-2019. Penulis juga aktif dalam beberapa pelatihan di ITS, antara lain: LKMM Pra-TD, BMS, dan PKTI-TD. Penulis juga memiliki pengalaman kerja praktik di PT. Aneka Tambang UBPN (Unit Bisnis Pertambangan Nikel) Pomalaa, Sulawesi Tenggara pada bulan Juli-Agustus 2019 dengan mengambil judul penelitian “Evaluasi Pembakaran Pada *Rotary Kiln* 3 PT. Aneka Tambang UBPN Sultra”. Tugas akhir yang diambil penulis yaitu bidang Ekstraksi dengan judul ”**Review Pengaruh Temperatur Tahan Terhadap Proses Kalsinasi Bijih Nikel Laterit**”. Penulis dapat dihubungi melalui nomor 08116692500 atau melalui email fadeldevintoo@yahoo.co.id.