

**EKSTRAKSI LOGAM BESI DARI RESIDU BAUKSIT
DENGAN METODE REDUKSI LANGSUNG DAN
PEMISAHAN MAGNETIK MENGGUNAKAN
ADITIF BORAKS ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh

Muhammad Chair Hanif
3334210086

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON-BANTEN**

2026

LEMBAR PENGESAHAN

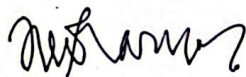
**EKSTRAKSI LOGAM BESI DARI RESIDU BAUKSIT
DENGAN METODE REDUKSI LANGSUNG DAN
PEMISAHAN MAGNETIK MENGGUNAKAN
ADITIF BORAKS ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

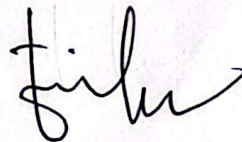
Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh :

Pembimbing I



Dr. Didied Haryono, S.T., M.T.
NIP. 196705302002121001

Pembimbing II



Fika Rofiek Mufakhir, S.T., M.T.
NIP. 198304052008011008

LEMBAR PERSETUJUAN

**EKSTRAKSI LOGAM BESI DARI RESIDUBAUKSIT
DENGAN METODE REDUKSI LANGSUNG DAN
PEMISAHAN MAGNETIK MENGGUNAKAN
ADITIF BORAKS ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)**

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

Muhammad Chair Hanif

3334210086

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal

15 Januari 2026

Susunan Dewan Penguji

Penguji I : Dr. Didied Haryono, S.T., M.T.
Penguji II : Fika Rofiek Mufakhir, S.T., M.T.
Penguji III : Dr. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si.

Tanda Tangan



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



Prof. Ir. Agus Pramono, S.T., M.T., Ph.D.Tech.
NIP. 197608182008011012

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut :

Judul : Ekstraksi Logam Besi dari Residu Bauksit dengan
Metode Reduksi Langsung dan Pemisahan Magnetik
Menggunakan Aditif Boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)

Nama Mahasiswa : Muhammad Chair Hanif

NIM : 3334210086

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 26 Januari 2026



Muhammad Chair Hanif
NIM. 3334210086

ABSTRAK

Residu bauksit merupakan limbah padat hasil proses *Bayer* pada pengolahan bijih bauksit menjadi alumina yang memiliki sifat sangat basa dan berpotensi mencemari lingkungan. Produksi residu bauksit di Indonesia mencapai 1,95 juta ton dari hasil pemurnian alumina yang mencapai 1,3 juta ton pada tahun 2024. Komposisi utama residu bauksit didominasi oleh senyawa besi oksida, khususnya hematit (Fe_2O_3) dan goetit ($\text{FeO}(\text{OH})$), dengan kadar Fe mencapai 29–42%. Kandungan besi yang tinggi tersebut menjadikan residu bauksit berpotensi besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber bahan baku sekunder bagi industri besi dan baja sehingga tidak hanya dapat mengurangi ketergantungan terhadap bijih besi primer, tetapi juga membantu mengurangi dampak lingkungan akibat penimbunan limbah residu bauksit. Pada penelitian ini, untuk mengekstraksi logam besi dari residu bauksit dilakukan proses reduksi langsung menggunakan arang cangkang sawit sebagai reduktor dan batu kapur sebagai bahan pembentuk *slag*. Proses reduksi dilakukan pada variasi temperatur (1050°C , 1150°C , 1250°C , dan 1350°C), variasi basisitas (0,8; 0,95; 1,1; dan 1,25), variasi jenis aditif (CaF_2 , Na_2CO_3 , H_3BO_3 , dan $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), dan variasi wt% boraks (0%, 2%, 4%, dan 6%) dengan waktu reduksi 60 menit pada rasio karbon/oksida besi dalam residu bauksit (C/O) 1,17. Hasil reduksi kemudian dipisahkan secara magnetik dengan intensitas medan magnet 2400 Gauss. Karakterisasi dilakukan menggunakan titrasi, XRD, XRF, dan FESEM-EDS untuk mengetahui kadar Fe total, derajat metalisasi Fe, dan perolehan Fe, serta menganalisis fasa dan morfologi hasil reduksi langsung dan pemisahan magnetik. Metode reduksi langsung dan pemisahan magnetik pada kondisi optimum yaitu rasio C/O 1,17; waktu reduksi 60 menit; temperatur reduksi 1350°C ; basisitas 1,1 dan ukuran partikel pemisahan magnetik $75\ \mu\text{m}$ menghasilkan kadar Fe total 94,55%; derajat metalisasi Fe 96,37%; dan perolehan Fe 96,27%. Berdasarkan analisis fasa dan morfologi, terbentuk urutan transformasi $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$, dengan partikel Fe metalik yang lebih homogen dan berukuran lebih dari $50\ \mu\text{m}$ pada kondisi terbaik. Fasa utama dalam konsentrat Fe adalah besi logam (Fe), magnetit (Fe_3O_4), dan terbentuknya austenit ($\gamma\text{-Fe}$). Sementara dalam *tailing* ditemukan bahwa sebagian besar SiO_2 dan oksida lain dalam pelet masuk ke dalam *slag* dan membentuk fasa amorf setelah reduksi, serta terdapat sebagian magnetit (Fe_3O_4) yang masih tersisa dalam *slag*, sedangkan besi yang tidak tereduksi terdapat dalam bentuk fayalit (Fe_2SiO_4). Logam Fe yang dihasilkan dapat bermanfaat dalam bidang otomotif, konstruksi, serta energi dan manufaktur mesin.

Kata Kunci: Besi, Boraks, Pemisahan Magnetik, Reduksi Langsung, Residu Bauksit.

ABSTRACT

Bauxite residue is a solid waste generated from the Bayer process during the conversion of bauxite ore into alumina, characterized by high alkalinity and significant potential for environmental contamination. In Indonesia, bauxite residue production reached approximately 1.95 million tons in 2024, corresponding to alumina production of 1.3 million tons. The residue is primarily composed of iron oxide compounds, predominantly hematite (Fe_2O_3) and goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$). This study investigates the extraction of iron from bauxite residue through a direct reduction process using palm shell charcoal as a reducing agent and limestone as a Slag-forming material. The reduction experiments were conducted under varying temperatures (1050°C , 1150°C , 1250°C , and 1350°C), basicity ratios (0.8, 0.95, 1.1, and 1.25), additive types (CaF_2 , Na_2CO_3 , H_3BO_3 , and $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), and borax contents (0%, 2%, 4%, and 6 wt%), with a constant reduction time of 60 minutes and a carbon-to-iron oxide ratio (C/O) of 1.17. The reduced products were subsequently separated using magnetic separation at a magnetic field intensity of 2400 Gauss. Under optimum conditions—C/O ratio of 1.17, reduction time of 60 minutes, reduction temperature of 1350°C , basicity of 1.1, and magnetic separation particle size of $74\ \mu\text{m}$ —the process achieved a total iron content of 94.55%, an iron metallization degree of 96.37%, and an iron recovery of 96.27%. Phase and morphological analyses revealed that the metallic iron particles formed under optimal conditions were more homogeneous, with sizes exceeding $50\ \mu\text{m}$. The dominant phases in the iron concentrate consisted of metallic iron (Fe), magnetite (Fe_3O_4), and austenitic iron ($\gamma\text{-Fe}$). In contrast, the Tailings indicated that most SiO_2 and other oxides were incorporated into the Slag and transformed into an amorphous phase after reduction, with residual magnetite (Fe_3O_4) remaining in the Slag, while unreduced iron was present primarily as fayalite (Fe_2SiO_4). The recovered iron metal demonstrates strong potential for applications in the automotive, construction, energy, and machinery manufacturing sectors.

Keywords: Iron, borax, magnetic separation, direct reduction, bauxite residue.

KATA PENGANTAR

Penulis mengucapkan puji dan syukur kepada Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis mampu untuk menyelesaikan skripsi dengan judul “Ekstraksi Logam Besi dari Residu Bauksit dengan Metode Reduksi Langsung dan Pemisahan Magnetik Menggunakan Aditif Boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)”. Penulisan skripsi ini disusun untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari proses penulisan skripsi ini banyak dibantu oleh beberapa pihak, maka penulis mengucapkan rasa terima kasih dengan tulus kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Agus Pramono, S.T., M.T., Ph.D Tech selaku Ketua Jurusan dan Ibu Andinnie Juniarsih, S.T., M.T. selaku Koordinator Skripsi Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
2. Bapak Dr. Didied Haryono S.T., M.T. selaku pembimbing I dan Bapak Fika Rofiek Mufakhir, S.T., M.T. selaku pembimbing II, serta Ibu Ir. Soesaptri Oediyani, S.T., M.T. yang senantiasa memberikan saran, kritik, bimbingan, semangat, dan motivasi kepada penulis untuk mengerjakan skripsi ini.
3. Bapak Nova Chairno dan Ibu Rosda selaku orang tua penulis serta kakak dan adik penulis yang telah memberikan doa, semangat, dan dukungan kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
4. Seluruh sivitas Pusat Riset Teknologi Mineral BRIN – Lampung Selatan yang telah banyak membantu selama pelaksanaan penelitian.

5. Teman-Teman Penelitian di Lampung yang selalu membantu dan menghibur penulis selama masa penelitian.
6. Teman-teman *No Rules*, teman-teman Teknik Metalurgi 2021 serta pihak pihak lainnya yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat kekurangan. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik serta saran yang membangun dari berbagai pihak agar skripsi ini menjadi lebih baik. Harapan penulis semoga skripsi ini dapat membantu dan bermanfaat bagi rekan-rekan mahasiswa maupun pihak-pihak lain yang memerlukannya sebagai bahan kajian dan studi maupun sumber referensi.

Cilegon, 26 Januari 2026



Muhammad Chair Hanif

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	ixx
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xxivv
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Sistematika Penulisan	8
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Residu Bauksit	10
2.2 Arang Cangkang Sawit	15
2.3 Batu Kapur	17
2.4 Metode Ekstraksi Logam Besi dari Residu Bauksit	20

2.5 Termodinamika Reduksi Besi	22
2.6 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Reduksi Oksida Besi	26

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu, Lokasi, dan Tempat Penelitian.....	30
3.2 Alat dan Bahan.....	30
3.2.1 Alat-Alat yang Digunakan.....	30
3.2.2 Bahan-Bahan yang Digunakan.....	32
3.3 Diagram Alir Penelitian	33
3.4 Prosedur Penelitian	35
3.4.1 Preparasi Bahan Utama	35
3.4.2 Pembuatan Pelet	37
3.4.3 Reduksi Langsung	38
3.4.4 Pemisahan Magnetik	39
3.4.5 Karakterisasi	41

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Awal Bahan Baku.....	53
4.1.1 Residu Bauksit.....	53
4.1.2 Arang Cangkang Sawit.....	57
4.1.3 Batu Kapur	58
4.2 Mekanisme Proses Reduksi Oksida Besi.....	59
4.3 Pengaruh Variasi Temperatur Reduksi Langsung	61
4.4 Pengaruh Variasi Basisitas	67
4.5 Pengaruh Variasi Jenis Aditif.....	68

4.6 Pengaruh Variasi Wt% Boraks.....	71
4.7 Analisa Fasa Mineral pada Hasil Reduksi, Konsentrat, dan <i>Tailing</i>	73
4.8 Pengaruh Boraks terhadap Morfologi pada Hasil Reduksi.....	75
4.9 Analisa Morfologi pada Konsentrat dan <i>Tailing</i>	78
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	81
5.2 Saran	82
DAFTAR PUSTAKA.....	83
Lampiran A. Contoh Perhitungan.....	92
Lampiran B. Data Penelitian	103
Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan	117

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Residu Bauksit Berbagai Dunia	13
Tabel 2. 2 Mineralogi dan Komposisi Kimia Residu Bauksit di PT. Indonesia Chemical Alumina, Tayan, Kalimantan Barat [2]	14
Tabel 3. 1 Alat-Alat Karakterisasi yang Digunakan Dalam Penelitian	30
Tabel 3. 2 Alat-Alat Proses yang Digunakan Dalam Penelitian	31
Tabel 3. 3 Alat-Alat Pendukung yang Digunakan Dalam Penelitian	31
Tabel 3. 4 Bahan-Bahan yang Digunakan Dalam Penelitian.....	32
Tabel 4. 1 Hasil Karakterisasi ICP-MS Residu Bauksit	53
Tabel 4. 2 Hasil Karakterisasi XRF Unsur Dalam Residu Bauksit	54
Tabel 4. 3 Hasil Analisis Proksimat Arang Cangkang Sawit.....	57
Tabel 4. 4 Hasil Karakterisasi XRF Batu Kapur	58
Tabel 4. 5 Reaksi-Reaksi yang Terjadi Selama Proses Reduksi Langsung	66
Tabel 4. 6 Hasil EDS <i>Point</i> pada Peoduk Reduksi Langsung	77
Tabel 4. 7 Hasil EDS Spektrum pada Residu Bauksit dan <i>Tailing</i>	70
Tabel A. 1 Reaksi Reduksi FeO(OH) Menjadi Fe Tahap I	93
Tabel A. 2 Reaksi Reduksi FeO(OH) Menjadi Fe Tahap II.....	93
Tabel A. 3 Reaksi Reduksi FeO(OH) Menjadi Fe Tahap III	94
Tabel A. 4 Reaksi Reduksi FeO(OH) Menjadi Fe Tahap IV	95
Tabel A. 5 Reaksi Reduksi Bertahap Fe ₂ O ₃ Menjadi Fe Tahap I	95
Tabel A. 6 Reaksi Reduksi Bertahap Fe ₂ O ₃ Menjadi Fe Tahap II.....	96
Tabel A. 7 Reaksi Reduksi Bertahap Fe ₂ O ₃ Menjadi Fe Tahap III.....	97

Tabel B. 1 Data Termodinamika Okisda Besi Menjadi Fe Metal.....	103
Tabel B. 2 Data Termodinamika Pembentukan Oksida Pengotor	107107
Tabel B. 3 Data Termodinamika Reduksi Lanjutan dari Oksida Pengotor.....	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kolam Penampungan Residu Bauksit	11
Gambar 2. 2 Arang Cangkang Sawit	16
Gambar 2. 3 Batu Kapur	18
Gambar 2. 4 Diagram Ellingham	24
Gambar 2. 5 Diagram Baur-Glaessner	25
Gambar 2. 6 Pengaruh Temperatur Reduksi Terhadap Perolehan Fe dan Kadar Fe Total.....	27
Gambar 2.7 Pengaruh Temperatur Reduksi Terhadap Laju Metalisasi.....	27
Gambar 2.8 Pengaruh Basisitas terhadap Perolehan Fe dan Kadar Fe Total	28
Gambar 2.9 Pengaruh Jenis Aditif Terhadap (a) Laju Metalisasi dan (b) Perolehan Fe dan Kadar Fe Total	29
Gambar 2.10 Pengaruh Penambahan Dosis Boraks Terhadap (a) Laju Metalisasi dan (b) Perolehan Fe dan Kadar Fe Total	29
Gambar 3.1 Diagram Alir Preparasi Bahan.....	33
Gambar 3. 2 Diagram Alir Proses Reduksi Langsung dan Pemisahan Magnetik	35
Gambar 3. 3 Proses (a) Penggerusan dan (b) Pengayakan	36
Gambar 3. 4 Proses (a) Homogenisasi dan (b) <i>sampling</i>	37
Gambar 3. 5 Hasil Pembuatan Pelet	37
Gambar 3. 6 Proses Reduksi Langsung.....	38
Gambar 3. 7 Pelet Hasil Reduksi Langsung	39
Gambar 3. 8 Proses Pemisahan Magnetik Basah	40

Gambar 3. 9 Alat Uji ICP-MS	41
Gambar 3. 10 Alat Uji XRD	42
Gambar 3. 11 Alat Uji XRF	43
Gambar 3. 12 Preparasi Sampel (a) Proses <i>Mounting</i> dan (b) Proses <i>Polishing</i>	44
Gambar 3. 13 Alat Uji FESEM-EDS	44
Gambar 3. 14 Sampel Hasil Analisa Proksimat: (a) Kadar Air, (b) Kadar Abu, dan (c) Zat Terbang	48
Gambar 3. 15 Proses Uji Fe Total Sebelum dan Sesudah Proses Titration	50
Gambar 3. 16 Proses Uji Fe Metal Sebelum dan Sesudah Proses Titration	52
Gambar 4. 1 Hasil Karakterisasi XRD Residu Bauksit Kalimantan Barat	55
Gambar 4. 2 SEM Residu Bauksit (a) Morfologi dan (b) EDS <i>Mapping</i>	56
Gambar 4. 3 Hasil Karakterisasi XRD Batu Kapur	59
Gambar 4. 4 Mekanisme Proses Reduksi Besi Oksida dari Residu Bauksit	61
Gambar 4. 5 Pengaruh Temperatur Reduksi Terhadap Kadar Fe Total, Derajat Metalisasi, dan Perolehan Fe	62
Gambar 4. 6 Termodinamika Reaksi (a) Reduksi Oksida Besi, (b) Oksida Besi dengan Oksida Pengotor dan (c) Reduksi Lanjutan	65
Gambar 4. 7 Pengaruh Temperatur Reduksi Terhadap Kadar Fe Total, Derajat Metalisasi, dan Perolehan Fe	68
Gambar 4. 8 Pengaruh Jenis Aditif Terhadap (a) Derajat Metalisasi, serta (b) Kadar Fe Total dan Perolehan Fe	69
Gambar 4. 9 Pengaruh wt% Boraks Terhadap Derajat Metalisasi, Kadar Fe Total dan Perolehan Fe	71
Gambar 4. 10 Hasil Karakterisasi XRD pada Hasil Reduksi, Konsentrat, dan <i>Tailing</i>	77

Gambar 4. 11 Morfologi SEM dan EDS <i>Mapping</i> pada Produk Reduksi Langsung (a) Tanpa Aditif dan (b) Boraks 2 wt%	79
Gambar 4. 12 Morfologi SEM dan EDS <i>Mapping</i> pada (a) Konsentrat dan (b) <i>Tailing</i>	79
Gambar C. 1 <i>Autotitrator</i>	117
Gambar C. 2 <i>Davis Tube</i>	117
Gambar C. 3 <i>Disc Mill</i>	117
Gambar C. 4 <i>Divider Sampling</i>	117
Gambar C. 5 <i>Hot Plate</i>	117
Gambar C. 6 <i>Muffle Furnace</i>	117
Gambar C. 7 <i>Oven</i>	117
Gambar C. 8 <i>Sieve Shaker</i>	117
Gambar C. 9 <i>V-Homogenizer</i>	118
Gambar C. 10 Ayakan 200# dan 300#	118
Gambar C. 11 Baskom Kotak	118
Gambar C. 12 Bata Tahan Api	118
Gambar C. 13 Batang Pengambil Stirrer Bar	118
Gambar C. 14 Botol Semprot	118
Gambar C. 15 Cawan Keramik 50 ml	118
Gambar C. 16 Corong	119
Gambar C. 17 Desikator	119
Gambar C. 18 Erlenmeyer 250 ml	119
Gambar C. 19 <i>Face Shield</i>	119
Gambar C. 20 Gelas Beker 100 ml dan 300 ml	119

Gambar C. 21 Kertas Saring.....	119
Gambar C. 22 Kertas Timbang.....	119
Gambar C. 23 Krusibel Grafit	119
Gambar C. 24 Kuas	120
Gambar C. 25 Labu Ukur 100 ml dan 1000 ml.....	120
Gambar C. 26 Media Pendingin	120
Gambar C. 27 Mesin Polishing Grinding	120
Gambar C. 28 <i>Mounting Cup</i>	120
Gambar C. 29 Neraca Digital	120
Gambar C. 30 Palu	120
Gambar C. 31 Pipet <i>Pump</i>	120
Gambar C. 32 Pipet Tetes.....	121
Gambar C. 33 Pipet Ukur 2 ml.....	121
Gambar C. 34 Piring Keramik.....	121
Gambar C. 35 Sarung Tangan	121
Gambar C. 36 <i>Shield Quartz</i>	121
Gambar C. 37 Spatula	121
Gambar C. 38 <i>Stirrer Bar</i>	121
Gambar C. 39 Tang Krusibel.....	121
Gambar C. 40 Arang Cangkang Sawit	122
Gambar C. 41 Batu Kapur.....	122
Gambar C. 42 Residu Bauksit	122
Gambar C. 43 Asam Borat (H_3BO_3).....	122

Gambar C. 44 Asam Fosfat	122
Gambar C. 45 Asam Klorida	122
Gambar C. 46 Asam Sulfida.....	122
Gambar C. 47 <i>Barium Diphenylamine Sulphonate Indicator</i>	123
Gambar C. 48 Besi (III) Klorida Hexahidrat.....	123
Gambar C. 49 Boraks	123
Gambar C. 50 <i>Clarocit Liquid</i>	123
Gambar C. 51 <i>Clarocit Powder</i>	123
Gambar C. 52 Kalium Dikromat	123
Gambar C. 53 Kalsium Fluorida	123
Gambar C. 54 Merkuri (II) Klorida.....	123
Gambar C. 55 Natrium Karbonat	124
Gambar C. 56 Natrium Sulfat.....	124
Gambar C. 57 Timah (II) Klorida.....	124
Gambar C. 58 Hasil Reduksi Langsung	124
Gambar C. 59 Konsentrat	124
Gambar C. 60 <i>Tailing</i>	124

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Residu bauksit merupakan limbah proses *Bayer* pada ekstraksi aluminium. Sekitar 175 juta ton residu bauksit dihasilkan tiap tahunnya di seluruh dunia dan diperkirakan akumulasi residu bauksit mencapai 4 miliar ton pada tahun 2023 [1]. Sekitar 1,5 ton residu bauksit dihasilkan untuk setiap 1 ton alumina yang diproduksi [2]. Menurut data dari U.S. *Geology Survey, Mineral Commodity Summaries* 2025, Indonesia memproduksi 1,3 juta ton alumina pada tahun 2024 [3]. Artinya, terdapat sekitar 1,95 juta ton residu bauksit dihasilkan pada tahun 2024. Residu bauksit umumnya memiliki komposisi mineral yang kompleks, seperti hematit [Fe_2O_3], goetit [$\alpha\text{-FeO(OH)}$], boehmit [$\gamma\text{-AlO(OH)}$], kuarsa [SiO_2], sodalit [$\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$], anatas [TiO_2], dan gipsum [$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$], dengan sedikit kalsit [CaCO_3], dan gibsit [Al(OH)_3] [4]. Residu bauksit yang diperoleh dari PT. Indonesia Chemical Alumina memiliki komposisi kimia Fe_2O_3 29–42%, SiO_2 12–24%, TiO_2 1-2%, Na_2O 7-13%, dan mineral lainnya berkisar 10-22% [5].

Di sisi lain, residu bauksit memiliki dampak yang buruk terhadap lingkungan dengan alkalinitas yang tinggi sekitar pH 11 – 13 [6]. Kandungan alkali dalam residu bauksit dapat meresap ke dalam tanah yang mengakibatkan kontaminasi air dan tanah. Selain itu, debu yang terbentuk dari abu merah yang terpapar dapat dibawa angin dan mencemari atmosfer. Pada akhirnya, ini mencemari kehidupan

manusia, hewan, dan tumbuhan, serta lingkungan secara keseluruhan [7]. Melihat berbagai dampak negatif akibat limbah residu bauksit yang kurang tepat, maka upaya pengurangan residu bauksit menjadi sangat penting dan mendesak. Pemanfaatan residu bauksit merupakan salah satu solusi untuk mengurangi dampak lingkungan dan risiko terkait penimbunan residu bauksit.

Pemanfaatan logam besi yang terkandung dalam residu bauksit berpotensi besar sebagai sumber bahan baku sekunder bagi industri besi dan baja di Indonesia. Hal ini menjadi sangat relevan mengingat kebutuhan baja nasional yang terus meningkat dari tahun ke tahun. Pada tahun 2020, konsumsi baja nasional tercatat sebesar 15 juta ton dan mengalami kenaikan menjadi 18,3 juta ton pada tahun 2024 [8]. Tren ini diproyeksikan akan terus berlanjut, di mana Indonesian Iron & Steel Industry Association (IISIA) memperkirakan kebutuhan baja akan mencapai 19,3 juta ton pada tahun 2025 [9] dan meningkat drastis hingga 100 juta ton pada tahun 2045 [10]. Kondisi ini menciptakan peluang yang sangat strategis bagi produsen besi dan baja dalam negeri untuk meningkatkan kapasitas produksinya. Namun, hingga saat ini, sebagian besar produsen masih mengandalkan impor bahan baku seperti bijih besi (*pellet*) karena keterbatasan pasokan domestik serta belum optimalnya penguasaan teknologi pengolahan bahan baku alternatif [11]. Dalam hal ini, residu bauksit berpotensi sebagai sumber besi alternatif. Pemanfaatan residu bauksit tidak hanya dapat membantu mengurangi ketergantungan impor bahan baku, tetapi juga meningkatkan kemandirian dan produktivitas industri besi dan baja nasional secara keseluruhan.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan metode ekstraksi besi dalam bentuk logam dari residu bauksit. Beberapa pendekatan yang telah dikaji antara lain mencakup metode *carbothermic roasting*, *reduction roasting*, dan *reductive smelting*. Masing-masing metode ini bertujuan untuk mengubah senyawa besi dalam residu bauksit menjadi bentuk logam melalui proses reduksi, dengan memanfaatkan karakteristik termal dan kimiawi dari residu bauksit. Berdasarkan penelitian Wang *et al.* (2020) melalui proses *smelting reduction* pada residu bauksit dengan penambahan CaO sebagai fluks untuk mengatur basisitas *slag*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada basisitas optimum sebesar 0,9 dan temperatur 1600°C, kadar Fe dalam pig iron mencapai 94,06% dengan perolehan Fe sebesar 80,16%. Meskipun kadar Fe dalam *pig iron* tinggi, masih terdapat kandungan unsur pengotor yang relatif besar yaitu 0,006% sulfur dan 0,38% fosfor akibat penggunaan kokas, serta penggunaan temperatur yang tinggi 1600°C menunjukkan konsumsi energi yang besar. Pendekatan berbeda ditunjukkan oleh Xiao *et al.*, (2022) ekstraksi logam Fe dari residu bauksit dengan metode reduksi dan pemisahan magnetik menggunakan variasi dosis reduktor, dosis CaO, temperatur dan waktu reduksi, kondisi optimal yang didapatkan yaitu dosis reduktor 25%, dosis CaO 20%, dan temperatur reduksi 1100°C selama 45 menit dengan ukuran partikel 0,04 mm dan intensitas medan magnet 0,24 T dihasilkan Fe total sebesar 81,22% dan perolehan Fe sebesar 92,60%.

Penelitian lebih lanjut, Grudinsky *et al.* (2021) melakukan studi mengenai ekstraksi besi dari residu bauksit melalui *carbothermic reduction* ini mengenai ekstraksi besi dari residu bauksit melalui *carbothermic reduction* yang

dikombinasikan dengan penambahan aditif berupa garam alkali seperti Na_2CO_3 , K_2CO_3 , Na_2SO_4 , dan K_2SO_4 . Penambahan aditif ini dapat meningkatkan efisiensi ekstraksi Fe. Namun, penggunaan aditif sulfat menyebabkan terbentuknya FeS dan CaS , yang mengakibatkan kadar sulfur yang tinggi dalam konsentrat Fe yaitu sebesar 1,29%. Pada penelitian Hu et al. (2023) melakukan studi terhadap pengaruh penambahan beberapa jenis aditif, seperti Na_2CO_3 , CaF_2 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (boraks) dan H_3BO_3 terhadap proses reduksi dan pemisahan magnetik mineral pasir pantai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan boraks sebesar 3% memberikan efek paling signifikan, yaitu meningkatkan laju metalisasi Fe hingga 95,64%, menghasilkan kadar Fe dan perolehan Fe masing-masing sebesar 86,23% dan 98,10%, serta menghasilkan butiran logam Fe hingga berukuran 50 μm .

Dalam proses reduksi oksida logam, pemilihan reduktor yang efisien dan ramah lingkungan menjadi aspek penting dalam menunjang keberhasilan proses metalurgi. Selama ini, reduktor seperti batubara dan kokas banyak digunakan karena memiliki *fixed carbon* yang tinggi dan kemampuan reduksinya yang baik. Namun, kedua bahan tersebut bersifat tidak terbarukan dan berkontribusi terhadap emisi karbon yang tinggi. Sebagai alternatif, arang cangkang sawit (*palm kernel shell charcoal*) menunjukkan potensi besar sebagai reduktor karena berasal dari limbah biomassa pertanian yang melimpah di Indonesia dan memiliki kandungan *fixed carbon* yang kompetitif. Menurut Musa et al. (2019), arang cangkang sawit mengandung *fixed carbon* sekitar 70–80%, yang sebanding dengan kokas metalurgi. Selain itu, penelitian oleh Harahap et al. (2020) dalam *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara* menunjukkan bahwa arang cangkang sawit memiliki nilai kalor

tinggi dan kandungan *fixed carbon* mencapai 75,24%, sehingga arang cangkang sawit dapat dijadikan sebagai pengganti reduktor fosil. Oleh karena itu, pemanfaatan arang cangkang sawit tidak hanya mendukung efisiensi proses reduksi, tetapi juga berkontribusi terhadap praktik industri yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan mereduksi langsung residu bauksit menggunakan gas CO sebagai hasil reaksi antara arang cangkang sawit dengan batu kapur sebagai fluks yang setelahnya akan dilakukan penambahan zat aditif. Penelitian ini berfokus pada pengaruh berbagai kondisi reduksi langsung, yaitu temperatur reduksi langsung, basisitas dalam pelet, serta penambahan zat aditif dari jenis aditif terbaik terhadap total kandungan besi dan perolehan besi, serta analisis perubahan fasa dan ukuran struktur mikro yang terjadi. Berbagai kondisi ini dibuat untuk mendapatkan kondisi yang optimal dalam perolehan besi. Hasilnya dapat memberikan pemanfaatan residu bauksit sebagai sumber besi sekunder.

1.2 Identifikasi Masalah

Kandungan logam terbesar di dalam residu bauksit adalah besi dalam bentuk Fe_2O_3 (hematit) dan $\text{FeO}(\text{OH})$ (goetit) yaitu 20-42%. Pemanfaatan residu bauksit ini dapat berpotensi sebagai sumber bahan baku sekunder industri besi dan baja, namun pemanfaatannya di Indonesia masih sangat terbatas. Tingginya alkalinitas dan kompleksitas komposisi mineral residu bauksit menjadi tantangan dalam proses pemisahan dan reduksi logam Fe secara efisien. Di sisi lain, penggunaan reduktor berbasis fosil seperti batubara menimbulkan isu keberlanjutan, sehingga

dibutuhkan alternatif reduktor berbasis biomassa seperti arang cangkang sawit yang memiliki kandungan karbon diatas 70%. Ekstraksi besi melalui proses metalurgi dengan metode reduksi langsung dan pemisahan magnetik masih terus dikembangkan untuk mendapatkan hasil yang maksimal. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan kondisi yang bervariasi dari parameter reduksi langsung, seperti temperatur reduksi langsung, basisitas, dan jenis aditif aditif, serta penambahan persen berat aditif untuk mendapatkan total kandungan besi, derajat metalisasi Fe, dan nilai perolehan besi yang optimal.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh temperatur reduksi langsung, basisitas, jenis aditif, dan persen berat aditif terhadap kadar Fe total, derajat metalisasi Fe, dan perolehan Fe, serta menganalisis fasa dan ukuran morfologi hasil reduksi langsung dan pemisahan magnetik dari hasil yang terbaik.

1.4 Batasan Masalah

Batasan Masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bahan baku yang digunakan adalah residu bauksit dari Kalimantan Barat, arang cangkang sawit, dan batu kapur.
2. Sampel dilakukan proses *grinding* menggunakan *disc mill* dan *sieve shaker* menggunakan ukuran ayakan 200#.
3. Sampel dilakukan pencampuran dan pembuatan pelet menggunakan air sebagai pengikat dengan kondisi sebagai berikut:

a. Variabel Bebas:

Basisitas = 0,8; 0,95; 1,1; dan 1,25.

Jenis aditif = $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , CaF_2 , dan H_3BO_3 .

Persen massa aditif = 0%, 2%, 4%, dan 6%.

4. Proses pengeringan dilakukan dalam *oven* dengan kondisi sebagai berikut:

a. Variabel Tetap

Temperatur = 120°C

Waktu = 240 menit

5. Proses reduksi langsung dilakukan di dalam *muffle furnace* dengan kondisi sebagai berikut:

a. Variabel Tetap:

Waktu = 60 menit

rasio C/O = 1,17

b. Variabel Bebas

Temperatur = 1050, 1150, 1250, dan 1350°C.

6. Karakterisasi

a. XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk mengetahui senyawa dalam residu bauksit, pelet hasil reduksi langsung, serta konsentrat dan *tailing* hasil pemisahan magnetik.

b. XRF (*X-Ray Fluorescence*) untuk mengetahui komposisi kimia dalam residu bauksit dan batu kapur.

- c. FESEM-EDS (*Field Emission Scanning Electron Microscopy Energi Dispersion Spectroscopy*) untuk melihat morfologi permukaan dan ukuran struktur mikro logam besi yang terbentuk.
 - d. ICP – MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) untuk mengetahui kadar Logam Tanah Jarang (LTJ) dalam residu bauksit.
 - e. Analisa Proksimat untuk mengetahui kandungan dalam arang cangkang sawit seperti kadar air, kadar zat terbang, kadar abu, dan kadar karbon.
 - f. Uji derajat metalisasi Fe dengan sampel yang digunakan adalah sampel hasil reduksi langsung untuk menentukan kadar Fe metal yang terbentuk pada sampel setelah dilakukan proses reduksi.
7. Penelitian dilakukan di Pusat Riset Teknologi Mineral Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) — Lampung, Tanjung Bintang, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan skripsi ini terdiri dari lima bab utama, daftar pustaka, dan lampiran-lampiran untuk melengkapi isi laporan skripsi. Pada Bab I Pendahuluan berisikan latar belakang penelitian ekstraksi besi dari residu bauksit, serta dilengkapi dengan identifikasi masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Dalam Bab II Tinjauan Pustaka berisikan teori-teori dasar yang menunjang penelitian ini, seperti residu bauksit, arang cangkang sawit, batu kapur, reduksi langsung, termodinamika reduksi oksida besi, dan faktor-faktor yang

mempengaruhi reduksi langsung. Bab III Metode Penelitian berisikan, diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, serta prosedur penelitian. Bab IV Hasil Dan Pembahasan berisikan, hasil dari keseluruhan proses penelitian yang dilakukan, data pengamatan yang berupa grafik, tabel, dan gambar yang membahas setiap pengaruh variabel terhadap hasil reduksi langsung yang dihasilkan. Bab V Kesimpulan dan Saran berisikan, rangkuman keseluruhan penelitian yang mengacu pada tujuan penelitian yang telah dituliskan terlebih dahulu pada bab sebelumnya dan saran perbaikan untuk penelitian selanjutnya. Setelah itu, terdapat daftar pustaka yang berisikan literatur-literatur yang digunakan dalam pembuatan laporan Skripsi. Terakhir terdapat lampiran yang berisikan perhitungan stoikiometri, data termodinamika, dan gambar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Residu Bauksit

Proses *Bayer* menghasilkan limbah yang dikenal sebagai *red mud* atau *bauxite residues* (residu bauksit) dengan warna merah-kecokelatan dengan jumlah yang besar. Residu bauksit merupakan residu dari ekstraksi alumina dalam pengolahan bauksit. Rata-rata untuk setiap 1 ton alumina yang diproduksi, dihasilkan 1,23 ton residu bauksit. Jumlah residu bauksit yang dihasilkan dapat bervariasi antara 0,55 ton hingga 2,21 ton, tergantung pada jenis bauksit yang digunakan dan metode produksi yang diterapkan [12]. Pada tahun 2023, dihasilkan 177,3 juta ton residu bauksit di dunia, sementara produksi alumina mencapai 141,8 juta ton dengan perkiraan jumlah sebesar 4 miliar ton pada tahun 2023 [13]. Residu bauksit biasa disimpan dalam bentuk seperti kolam yang dapat dilihat pada Gambar 2.1. Residu bauksit yang memiliki sifat sangat basa tidak sepenuhnya aman untuk tanah, meskipun sifat basa sering kali dianggap menguntungkan karena mampu meningkatkan pH tanah dari 3,83 menjadi 5,60-6,29 [14]. Namun, alkalinitas yang tinggi (pH 10 – 13) dari residu bauksit dapat menyebabkan dampak negatif terhadap tanah, baik secara fisik, kimia, maupun biologis [15]. Dampak yang ditimbulkan dari residu bauksit terhadap tanah, yaitu dapat merusak struktur agregasi tanah. Partikel tanah dapat terurai yang mengurangi stabilitas struktur tanah. Hal ini dapat memengaruhi kemampuan tanah untuk menyimpan air dan udara yang menjadi faktor penting bagi pertumbuhan tanaman [16]. Selain itu, pH tinggi juga dapat

menyebabkan kelarutan unsur hara tertentu, seperti fosfor, menjadi rendah sehingga tidak tersedia untuk tanaman. Sebaliknya, elemen yang beracun seperti natrium dan aluminium dapat meningkat, sehingga mengganggu pertumbuhan tanaman [17].



Gambar 2. 1 Kolam Penampungan Residu Bauksit [18]

Residu bauksit dapat dimanfaatkan untuk bahan bangunan seperti semen, batu bata, genteng, dan keramik kaca. Produksi bahan bangunan dalam jumlah besar dapat menghilangkan masalah pembuangan residu bauksit [19]. Di sisi lain, residu bauksit juga dapat digunakan sebagai katalis untuk hidrogenasi dan oksidasi hidrokarbon. Penggunaan residu bauksit sebagai katalis dapat menjadi alternatif yang baik dan dapat dikomersialkan. Katalis dari residu bauksit memiliki potensial yang menarik untuk banyak reaksi karena memiliki kandungan besi dalam bentuk oksida Fe_2O_3 , luas permukaan yang mencapai $86\text{--}96\text{ m}^2/\text{g}$ [20], ketahanan sintering (material tidak mudah meleleh, menggumpal, atau kehilangan porositas), dan ketahanan terhadap racun (SO_2 dan H_2S) yang dapat menutupi area aktif katalis yang mengakibatkan penurunan aktivitas katalis, serta biaya yang rendah. Selain itu, besi oksida sebagai komponen logam terbesar dalam residu bauksit berpotensi diekstraksi dan dimanfaatkan sebagai sumber bahan baku besi atau material

berbasis besi, seperti baja dan paduan logam lainnya hingga teknologi material maju seperti nanopartikel magnetik. Mengingat residu bauksit adalah limbah dan ketersediaannya melimpah, ditemukan aplikasi baru untuk residu bauksit sebagai koagulan dan adsorben untuk pengolahan air dan gas serta katalis untuk beberapa proses industri, seperti industri pengolahan limbah air, industri petrokimia, dan industri pengolahan limbah gas [21].

Residu bauksit merupakan material kompleks dengan variasi mineral dan unsur kimia yang bergantung pada asal bauksit, metode pengolahan (proses *Bayer*), dan lokasi tambang. Studi mineralogi dan kimia residu bauksit dari berbagai lokasi di dunia menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam kadar Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Na_2O , dan TiO_2 , serta kandungan logam tanah jarang (LTJ) yang ditunjukkan pada Tabel 2.1. Komposisi Fe_2O_3 tertinggi ditemukan pada residu bauksit asal Yunani yang mencapai 44,6%. Hal ini sesuai dengan karakteristik residu bauksit Yunani yang umumnya memiliki kadar Fe_2O_3 tinggi, yaitu lebih dari 40% [13]. Residu bauksit asal India umumnya mengandung unsur Fe dan Ti dalam jumlah dominan, sedangkan kandungan Si relatif rendah, yaitu kurang dari 10% [13]. Sementara itu, residu bauksit asal Iran memiliki kandungan CaO tertinggi, diikuti oleh Al_2O_3 , SiO_2 , dan Na_2O . Perbedaan utama residu bauksit Iran dibandingkan daerah lain adalah kadar Fe_2O_3 yang rendah, yakni kurang dari 25%, sehingga warnanya cenderung cokelat muda [22]. Menurut C. Sun dan rekan (2019), residu bauksit dari Yunnan dan China memiliki kadar SiO_2 rendah dengan kisaran 8,4–15,9%; Fe_2O_3 1,5–37%; Al_2O_3 6,4–31%; TiO_2 0,05–7%; CaO sangat tinggi yaitu 2,2–48,4%; serta Na_2O 2,3–16,2% [13]. Adapun residu bauksit dari Indonesia, sebagian besar mengandung sekitar 38,5% Fe dalam bentuk hematit [23].

Residu bauksit mengandung mineral hematit (Fe_2O_3), goetit ($\text{FeO}(\text{OH})$), anatase (TiO_2), kuarsa (SiO_2), gipsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), kaolinit $[(\text{Al}_2)(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4]$, dan kalsit (CaCO_3) serta mineral *desilification* yang terbentuk selama pengolahan bauksit seperti sodalit ($\text{Na}_8\text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{24}\text{Cl}_2$) dan kankrinit ($\text{Na}_6\text{Ca}_2\text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{24}(\text{CO}_3)_2$) [24]. Komposisi utama residu bauksit secara umum mengandung komposisi kimia, yaitu 7-49% Fe_2O_3 ; 11-22,6% Al_2O_3 ; 3,5-16% % TiO_2 ; 6,4% SiO_2 ; dan 0,02-0,27% LTJ dengan logam kritikal seperti Sc, Ce, La, Y, Nd, dan Th [23]. Tabel 2.2 menunjukkan mineralogi dan komposisi kimia residu bauksit pada PT Indonesia Chemical Alumina, Tayan, Kalimantan Barat.

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Residu Bauksit Berbagai Dunia ([23],[25], [26], [27], [28], [29])

No.	Komposisi	Lokasi Residu Bauksit					
		Indonesia	China	Iran	Russia	India	Yunani
1.	Fe_2O_3 (%)	38,50	28,37	23,35	42,10	44,60	36,70
2.	SiO_2 (%)	14,70	13,70	14,70	9,40	10,20	8,10
3.	Al_2O_3 (%)	19,22	17,17	16,45	12,7	23,60	22,60
4.	CaO (%)	2,61	16,33	21	7,8	2,1	11,2
5.	Na_2O (%)	7,54	6,86	3,5	4,8	10,2	2,5
6.	TiO_2 (%)	2,52	4,4	4	4,3	15,6	5,7
7.	Sc (ppm)	33,73	158	69,04	86,5	121	48
8.	Ce (ppm)	54,86	842	396,6	507,5	98	368
9.	La (ppm)	5,74	416	123,6	234,4	58	114
10.	Y (ppm)	2,46	400	42	145,4	26	76

Tabel 2.1 Lanjutan

No.	Komposisi	Lokasi Residu Bauksit					
		Indonesia	China	Iran	Russia	India	Yunani
11.	Nd (ppm)	3.27	-	80,49	222,4	99	39
12.	Pr (ppm)	12,74	-	28,8	-	-	28
13.	Sm (ppm)	3,52	-	10	42,6	21	-

Tabel 2. 2 Mineralogi dan Komposisi Kimia Residu Bauksit di PT. Indonesia Chemical Alumina, Tayan, Kalimantan Barat [2]

Mineralogi	Kadar (%)	Komposisi	Kadar (%)	Komposisi	Kadar (ppm)
Kuarsa	6,1	Fe ₂ O ₃	34,69	Sc	67
Kritobalit	5,1	SiO ₂	23,25	Ce	21,3
Hematit	10,3	Al ₂ O ₃	16,41	La	10,2
Sodalit	73,5	CaO	1,84	Y	4
<i>Cryptohalite</i>	4,9	Na ₂ O	8,5	Nd	11,2
		TiO ₂	2,669	Pr	2,77

Potensi manfaat residu bauksit sangat besar karena memiliki banyak mineral-mineral berharga, namun efisiensinya bergantung pada kemajuan teknologi pemrosesan untuk memisahkan elemen-elemen bernilai tanpa menghasilkan dampak lingkungan yang buruk. Meski memiliki kandungan mineral yang berharga, pemanfaatan residu bauksit juga mempunyai beberapa tantangan dan kekurangan. Tekstur residu bauksit yang sangat halus dengan ukuran partikel rata-rata di bawah 150 mikron menyulitkan proses pemisahan dan pengolahan mineralnya. Selain itu,

tingginya kadar air dalam residu bauksit (sekitar 30-40%) menambah kompleksitas dalam penanganan dan transportasinya [30]. Tantangan lain yang perlu diperhatikan adalah proses ekstraksi mineral berharga dari residu bauksit memerlukan teknologi khusus yang tidak sederhana. Dibutuhkan serangkaian proses seperti pengaturan pH, pemisahan magnetik, ekstraksi kimia, baik proses pirometalurgi atau pun hidrometalurgi yang membutuhkan biaya besar dan keahlian teknis yang memadai. Kompleksitas mineralogi residu bauksit dengan berbagai senyawa yang saling berikatan juga menyebabkan efisiensi perolehan mineral yang tidak selalu optimal [31]. Meski demikian, seiring perkembangan teknologi dan meningkatnya kebutuhan akan mineral-mineral strategis, pemanfaatan residu bauksit tetap menjadi fokus penelitian dan pengembangan di berbagai negara. Inovasi teknologi pengolahan terus dikembangkan untuk mengatasi tantangan dalam pemanfaatan residu bauksit. Selain itu, pengelolaan yang ramah lingkungan semakin diutamakan agar dampak negatif bisa dikurangi dan manfaat ekonominya dapat dimaksimalkan.

2.2 Arang Cangkang Sawit

Kelapa sawit menjadi salah satu komoditas unggulan sektor perkebunan dan industri nasional yang perkembangannya sangat pesat. Cangkang kelapa sawit merupakan salah satu biomassa yang banyak ditemukan dan tersedia. Ketersediaan biomassa ini terbilang cukup melimpah di Indonesia yang memiliki wilayah perkebunan sawit yang cukup luas. Data Direktorat Jenderal Perkebunan mencatat jika area tanaman perkebunan kelapa sawit pada tahun 2025 mencapai 16,83 juta hektar [32]. Pengolahan kelapa sawit tidak hanya menghasilkan minyak mentah (CPO), tetapi juga menghasilkan limbah dalam jumlah besar. Setiap ton kelapa sawit yang diolah dapat menghasilkan sekitar 23% tandan kosong, 6,5% cangkang,

4% lumpur sawit, 13% serabut, dan 50% limbah cair [33]. Tandan kosong dan cangkang kelapa sawit masih memiliki kandungan selulosa, lignin, hemiselulosa. Cangkang sawit termasuk bahan berlignoselulosa berkadar karbon tinggi dan memiliki massa jenis lebih besar dari pada massa jenis kayu sebesar 1,4 g/ml. Semakin besar massa jenis bahan baku, daya serap arang aktif yang dihasilkan akan semakin besar sehingga baik untuk dijadikan arang aktif [34]. Di samping itu cangkang kelapa sawit memiliki nilai kalor yang tinggi dibandingkan tandan kosong dan serabut, yaitu sebesar 5.656 kalori/gram [35].



Gambar 2. 2 Arang Cangkang Sawit [36]

Pada Gambar 2.2 arang cangkang sawit biasanya dibuat menggunakan proses karbonisasi. Karbonisasi merupakan metode atau teknologi untuk mengubah bahan organik menjadi karbon atau arang. Karbonisasi dilakukan dengan membakar bahan organik untuk menghilangkan kandungan air dan material-material lain yang tidak dibutuhkan seperti hidrogen dan oksigen atau material yang menguap. Proses karbonisasi biasanya terjadi pada temperatur 400–600 °C menghasilkan tar, asam *pyroligneus* dan gas mudah terbakar sebagai hasil samping produk [36]. Gas dan zat-zat yang dihasilkan selama proses ini berasal dari dekomposisi termal bahan organik.

Untuk memastikan arang cangkang sawit layak digunakan sebagai reduktor, yaitu perlu dilakukan analisa proksimat dapat dilakukan dengan pengujian sifat fisika, kimia, dan daya serap arang aktif yang mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SN1) 06-3730-1995 tentang syarat mutu dan pengujian arang aktif. Berdasarkan SNI 06-3730-1995, arang aktif berbentuk serbuk yang berkualitas baik memiliki kadar air maksimal sebesar 15%, kadar zat terbang maksimal 25%, kadar abu maksimal 10% dan kadar karbon minimal 65%.

Pada Tahun 2010, *Japan Consulting Institute* membuat langkah terobosan untuk mencari alternatif bahan bakar lain yang ramah lingkungan bahkan dengan harga yang lebih murah. Riset yang mereka lakukan menunjukkan bahwa arang cangkang sawit terbukti menjadi reduktor yang lebih baik dari kokas ketika dicoba di tanur busur listrik. Sebagai energi tambahan di tanur busur listrik, arang cangkang sawit lebih unggul dari kokas. Hal ini disebabkan karena arang cangkang sawit mengandung sulfur dan abu yang rendah, di samping itu nilai kalorinya lebih tinggi dari kokas. Gas CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran arang tidaklah termasuk kategori *Green House Gas*, sehingga penggunaan arang cangkang sawit bisa diusulkan sebagai bahan untuk mendapatkan kadar karbon yang bisa diperjual belikan [37].

2.3 Batu Kapur

Di Indonesia, batu gamping sering disebut juga dengan istilah batu kapur, sedangkan istilah lainnya disebut dengan *limestone*. Batu kapur merupakan batuan sedimen yang terbentuk dari akumulasi butiran karbonat organik dan anorganik, seperti cangkang, koral, dan mikroorganisme, yang mengalami sementasi di dasar

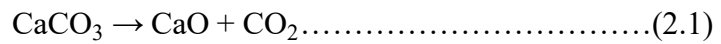
laut. Jenis-jenis batu kapur bervariasi, termasuk kapur bioklastik yang berpori rendah dan marmer yang memiliki kristalinitas tinggi. Sifat fisika batu kapur meliputi porositas, kepadatan, dan tekstur kristal yang dapat memengaruhi proses kalsinasi [38]. Batu kapur memiliki warna putih, putih kekuningan, abu-abu hingga hitam yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. Warna batu kapur juga bergantung dari campuran yang ada dalam batu kapur tersebut. Batu kapur murni yang hanya terdiri dari kalsit (CaCO_3) cenderung berwarna putih. Namun, jika ada campuran seperti oksida besi cenderung berwarna oranye, warna cokelat berasal dari mineral *goethite*, serta warna abu-abu dan putih berasal dari kandungan fosil seperti cangkang hewan laut, karang, foraminifera, dan kokolitofor [39]. Berat jenis batu kapur berkisar 2,6 - 2,8 gr/cm^3 , dalam keadaan murni dengan bentuk kristal kalsit (CaCO_3), sedangkan berat volume batu kapur berkisar 1,7 – 2,6 gr/cm^3 [40].



Gambar 2. 3 Batu Kapur [41]

Dalam industri logam dan metalurgi, batu kapur berperan penting dalam proses pemurnian logam dengan menurunkan titik lebur bijih dan dapat mengikat pengotor. Selain itu, batu kapur juga meningkatkan efisiensi peleburan logam dengan mengurangi konsumsi energi serta mempermudah pengendalian *slag* selama proses reduksi. Batu kapur, yang sebagian besar terdiri dari mineral

kalsium karbonat (CaCO_3) sekitar 95%, dapat diubah menjadi kalsium oksida (CaO) melalui proses kalsinasi, yang memudahkan dekomposisi CaCO_3 menjadi CaO dan gas CO_2 . Persamaan reaksi dekomposisi CaCO_3 dituliskan sebagai berikut:



Proses dekomposisi CaCO_3 terjadi secara spontan pada temperatur sekitar 750°C dan terurai menjadi CaO dan CO_2 . Proses kalsinasi juga memengaruhi komposisi elemen dalam CaCO_3 , dengan elemen seperti kalium, silikon, natrium, dan aluminium yang terkandung dalam jumlah kurang dari 5% dalam batu kapur cenderung menurun kadarnya, sementara kandungan kalsium meningkat seiring dengan temperatur. Batu kapur secara umum mengandung lebih dari 90% kalsium karbonat (CaCO_3), sedangkan elemen minor seperti natrium, kalium, dan silikon dapat ditemukan dalam jumlah kurang dari 5% dalam bentuk mineral pengotor seperti feldspar dan silikat [42]. Kalsium oksida memiliki nilai ekonomis yang tinggi dengan harga sekitar Rp1.000/kg, tergantung pada kemurnian dan penggunaannya, serta reaktivitas yang tinggi untuk berbagai aplikasi industri seperti bahan penyerap gas asam, fluks metalurgi, dan pembuatan semen [43].

Kalsium oksida (CaO) memiliki peran penting dalam proses reduksi, terutama dalam industri peleburan logam seperti besi dan baja. Salah satu fungsi utama CaO adalah sebagai fluks, yang berfungsi untuk mengikat dan menghilangkan kotoran atau *impurities* yang terdapat dalam bahan baku, seperti silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3). Ketika CaO ditambahkan pada temperatur tinggi dalam tanur, CaO bereaksi dengan senyawa pengotor ini membentuk *slag*, yang merupakan lapisan *slag* cair. *Slag* ini berada di atas logam cair dan dapat dengan mudah dipisahkan dari produk logam yang diinginkan. Selain itu, CaO juga membantu dalam

menurunkan titik lebur *slag*, sehingga proses pemurnian logam menjadi lebih efisien, karena temperatur yang diperlukan menjadi lebih rendah dibandingkan tanpa penggunaan fluks. Proses ini juga meningkatkan fluiditas *slag*, yang mempercepat pergerakan dan pemisahan impurities, sehingga mengoptimalkan efisiensi waktu dalam produksi logam [44]. Dengan demikian, CaO tidak hanya meningkatkan kemurnian logam yang dihasilkan, tetapi juga membantu dalam mengurangi konsumsi energi dalam proses reduksi [45].

2.4 Metode Ekstraksi Logam Besi dari Residu Bauksit

Metode ekstraksi logam besi dari residu bauksit diawali dengan metode pemisahan magnetik. Metode ini memanfaatkan perbedaan sifat kemagnetan antara mineral besi (hematit, magnetit) dan mineral pengotor (non-magnetik) seperti silika atau alumina. Residu bauksit biasanya digerus hingga ukuran $<100\ \mu\text{m}$ lalu diproses dengan magnetik separator berintensitas sedang hingga tinggi (10.000–18.000 Gauss). Hasil penelitian Huang dan Peng (2011) menunjukkan bahwa produk magnetik yang dihasilkan memiliki kadar Fe total (TFe) sekitar 54% dengan perolehan Fe 28–35%. Meskipun proses ini sederhana dan ramah lingkungan, efisiensinya masih rendah akibat keterikatan mineral Fe di dalam matriks silikat [46]. Kemudian metode ekstraksi logam besi dari residu bauksit dikembangkan yaitu dilakukan proses *carbothermic reduction* terlebih dahulu sebelum dilakukan proses magnetik untuk dapat meningkatkan hasil perolehan Fe. Metode *carbothermic reduction* ini dilakukan dengan cara mencampurkan residu bauksit dengan reduktan karbon (seperti batubara, kokas, arang, atau grafit) dan direduksi pada temperatur tinggi (900–1200 °C). Reaksi reduksi mengubah hematit (Fe_2O_3) menjadi magnetit (Fe_3O_4) atau logam besi.

Metode *carbothermic reduction* telah dikembangkan melalui beberapa pendekatan seperti *smelting reduction* [47], *microwave reduction* [48], dan *suspension roasting* [49]. Proses *smelting reduction* dilakukan dengan temperatur tinggi ($>1600^{\circ}$) untuk mencapai titik leleh besi dan terak sehingga dapat terpisahkan berdasarkan densitas. Produk utama dari metode ini adalah *pig iron* dengan kadar Fe mencapai 91–97%, dan perolehan Fe berkisar 70–89% [50]. Selain itu, residu bauksit juga dapat diolah menggunakan metode *microwave reduction* yaitu gelombang mikro sebagai sumber panas menunjukkan hasil yang menjanjikan karena pemanasan terjadi secara volumetrik dan cepat. Proses ini memungkinkan terbentuknya fasa ferit dalam waktu singkat serta meningkatkan efisiensi gasifikasi karbon, yang menghasilkan tingkat reduksi lebih baik dengan konsumsi energi dan reduktan yang lebih rendah [48]. Sementara pada teknologi *suspension roasting* bekerja dengan prinsip pemanasan cepat, reduksi gas, dan transformasi fasa besi dalam kondisi tersuspensi, sehingga oksida besi dapat diubah menjadi bentuk magnetik dan selanjutnya dipisahkan secara magnetik [49]

Selain reduksi, residu bauksit dapat diolah menggunakan metode *selective flocculation*. Reagen flokulasi menempel secara selektif pada bijih besi dan menghasilkan flok dengan ukuran partikel yang lebih besar dalam suspensi mineral. Partikel-partikel yang lebih besar ini tenggelam ke dasar tangki pengental lebih cepat dan dapat dipisahkan. Pada penelitian Huang, et al., (2016) menunjukkan bahwa oksida besi diflokulasi dari residu bauksit menggunakan berbagai flokulan humik yang berasal dari batu bara coklat. Uji coba ini menghasilkan perolehan Fe 86% dan kadar Fe 61%.. Kesulitan dalam proses *dewatering* melalui *filtering* atau *thickening* dapat mendorong proses hidrometalurgi menjadi rute yang menjanjikan

untuk perolehan besi. Pada penelitian Zhang et al. (2020) menggunakan HCl dengan tambahan NaH_2PO_4 untuk mengendapkan besi secara selektif dengan efisiensi 95,9%. Selain itu, pelindian menggunakan asam oksalat ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) menghasilkan efisiensi pelindian 94,15% dan memungkinkan regenerasi asam. Dengan pengaturan pH menggunakan CaCO_3 , proses ini dapat meningkatkan selektivitas terhadap Fe [51]. Secara keseluruhan, besi dalam residu bauksit dapat diekstraksi secara efektif menggunakan metode pirometalurgi maupun hidrometalurgi. Pemisahan besi menjadi pendekatan paling menjanjikan dalam mengurangi dampak limbah residu bauksit.

2.5 Termodinamika Reduksi Besi

Diagram Ellingham adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara energi bebas Gibbs (ΔG°) dan temperatur dalam reaksi oksidasi logam. Logam yang lebih reaktif secara kimia (yang lebih stabil sebagai oksida) memiliki nilai ΔG° yang sangat negatif, sehingga terletak di bagian bawah diagram. Sebaliknya, logam yang kurang reaktif memiliki ΔG° yang lebih positif, berada di bagian atas diagram. Semakin negatif ΔG° suatu logam, semakin stabil oksidanya. Diagram ini juga digunakan untuk menentukan temperatur minimum yang diperlukan untuk memulai reaksi reduksi logam dari oksidanya. ΔG° yang bernilai negatif menunjukkan bahwa suatu reaksi dapat terjadi secara spontan tanpa energi dari luar. Sebaliknya, logam yang kurang reaktif memiliki ΔG° lebih positif di bagian atas. Semakin negatif nilai ΔG° , semakin stabil oksida tersebut. Diagram ini juga membantu menentukan temperatur minimum yang dibutuhkan untuk memulai reaksi reduksi logam dari oksidanya [52].

Dari diagram Ellingham pada Gambar 2.4 dapat diketahui temperatur minimal yang dibutuhkan agar reaksi dapat terjadi. Hal tersebut ditunjukkan oleh perpotongan antara kurva oksida dan garis pembentukan CO. Termodinamika hanya dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu reaksi dapat berjalan spontan atau tidak pada temperatur tertentu berdasarkan energi bebas yang dimiliki. Namun tidak dapat digunakan untuk menentukan laju reaksi. Perpotongan antara garis reaksi oksida dan reduksi secara termodinamika menunjukkan bahwa reaksi tersebut berjalan pada temperatur tertentu. Selain menggunakan diagram Ellingham, termodinamika suatu reaksi dapat ditentukan melalui perhitungan energi bebas ΔG dari reaksi tersebut dengan menggunakan ΔG^0 referensi. Energi bebas suatu reaksi juga dapat ditentukan dengan menggunakan prinsip kesetimbangan kimia:

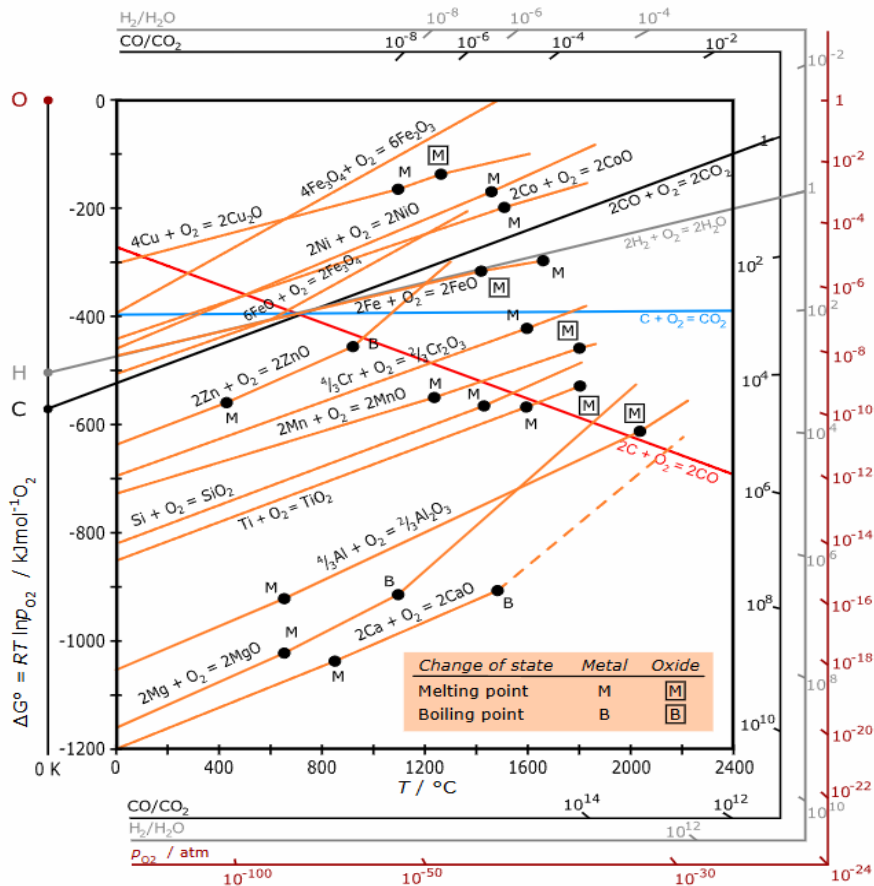


Kecepatan reaksi pereaktan sama dengan kecepatan pereaksi produk ($V_{\text{pereaktan}} = V_{\text{produk}}$). Energi bebas dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta G^0 = -RT \ln K = -RT \ln \frac{a_C \times a_D}{a_A \times a_B} \dots\dots\dots(2.3)$$

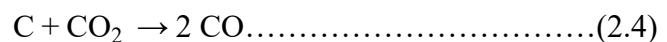
Keterangan:

- ΔG^0 = Energi bebas (cal/mol)
- R = Konstanta gas (8,314 J.mol⁻¹.K⁻¹)
- T = Temperatur (K)
- a = Aktivitas



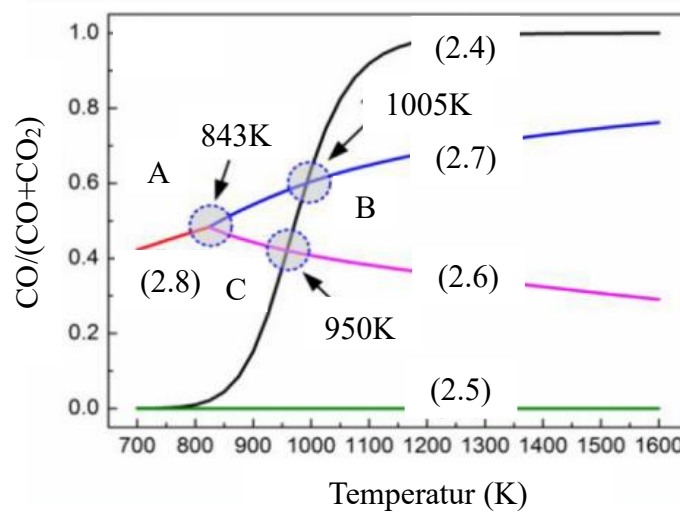
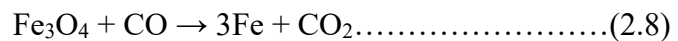
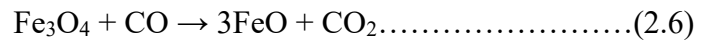
Gambar 2. 4 Diagram Ellingham [53]

Dalam proses reduksi oksida besi menggunakan karbon, reaksi utama melibatkan pembentukan gas karbon monoksida (CO) yang bertindak sebagai agen pereduksi. Reaksi karbon dengan CO₂ yang didapatkan dari proses kalsinasi CaCO₃, yang kemudian membentuk CO. Proses ini disebut reaksi *Boudouard* dengan persamaan reaksi sebagai berikut:



Reaksi ini bersifat endotermik, sehingga memerlukan temperatur tinggi untuk mempertahankan kesetimbangan ke arah pembentukan CO. Temperatur reduksi menggunakan reduktor berada di atas temperatur yang sesuai pada titik B karena adanya karbon berlebih. Oleh karena itu, oksida besi akan berubah secara berurutan

dari $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ sesuai persamaan reaksi (2.5) – (2.8). Ketika sistem mencapai kesetimbangan, besi logam pada akhirnya akan stabil [54].



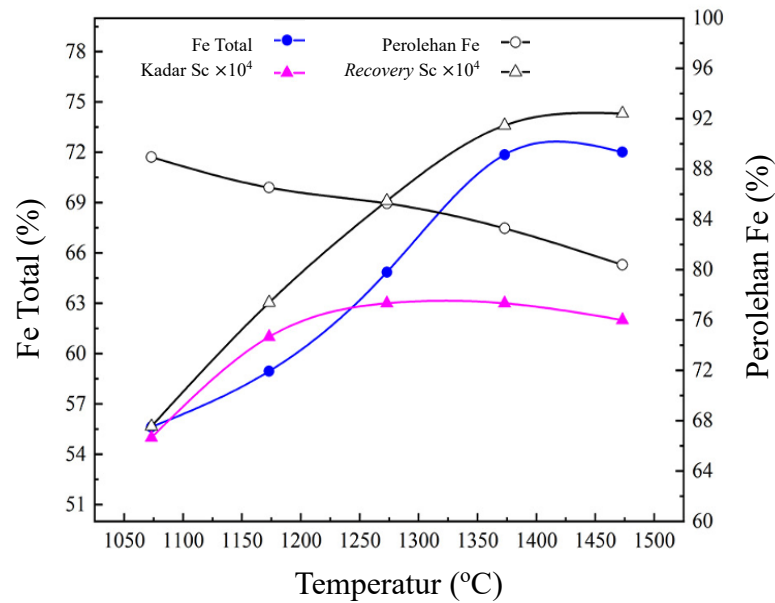
Gambar 2. 5 Diagram Baur-Glaessner [54]

Dalam proses reduksi yang sebenarnya, penentuan reaksi dapat berlangsung ke arah positif harus didasarkan pada perubahan energi bebas Gibbs dalam kondisi aktual, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5, kurva reaksi persamaan (2.5) sangat dekat dengan dasar sumbu melintang, yang mengindikasikan bahwa Fe_3O_4 dapat dengan mudah tereduksi menjadi Fe_2O_3 bahkan dengan jumlah CO yang sedikit. Kurva reaksi persamaan (2.8) dan (2.6) berpotongan di titik A pada temperatur 843 K, yang menunjukkan bahwa reduksi oksida besi tidak melalui tahap FeO ketika temperatur lebih rendah dari 843 K, sedangkan reduksi oksida besi melalui tahap FeO ketika temperatur lebih tinggi dari 843 K. Kurva gasifikasi

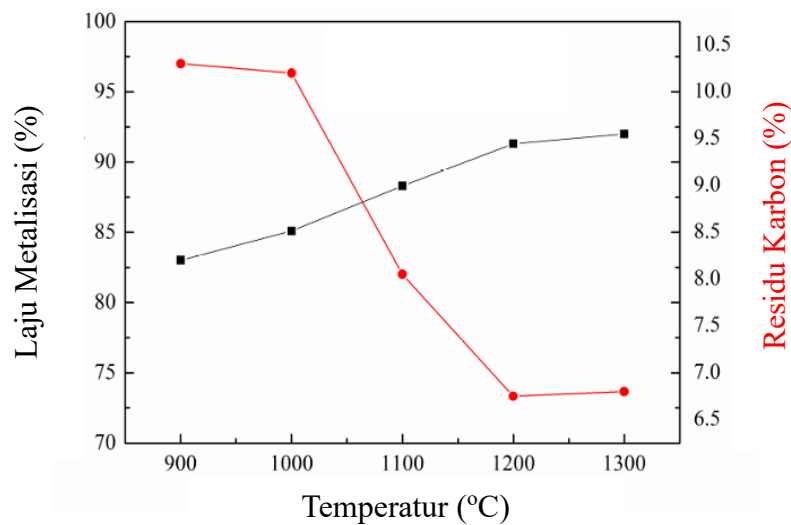
karbon persamaan (2.4) berpotongan dengan kurva dua reaksi reduksi tidak langsung di titik B dan C. Koordinat titik B adalah (0,62, 1005 K), dan 1005 K merupakan temperatur awal reaksi persamaan (2.7), sedangkan titik C berada pada koordinat (0,42, 950 K), dan 950 K merupakan temperatur awal reaksi persamaan (2.6).

2.6 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Reduksi Oksida Besi

Temperatur yang digunakan dalam proses reduksi merupakan faktor utama yang memengaruhi efisiensi reaksi reduksi. Pada temperatur yang tinggi, reaksi reduksi oksida besi menjadi lebih spontan (ΔG negatif), dapat meningkatkan laju pembentukan Fe metal. Temperatur yang optimal biasanya berada di atas 1000°C, memungkinkan tahap reduksi Fe_2O_3 menuju Fe berlangsung hingga selesai dengan pembentukan fase metalik yang dominan. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Xiao, et al., (2022) menunjukkan bahwa temperatur reduksi yang optimal pada kondisi 1100°C menghasilkan perolehan Fe dan kadar Fe total sebesar 92,96% dan 81,22%. Selain itu, penelitian yang telah dilakukan juga oleh Ning, et al., (2018) menunjukkan temperatur reduksi pada 1100°C - 1200°C menjadi kondisi yang optimal, yaitu menghasilkan laju metalisasi Fe lebih dari 88%. Hal ini temperatur reduksi besi berlangsung secara maksimal, namun dengan peningkatan temperatur lebih lanjut tidak mengalami perubahan yang signifikan dalam meningkatkan perolehan. Pengaruh temperatur reduksi terhadap perolehan Fe dan kadar Fe total dapat dilihat pada Gambar 2.6 dan pengaruh temperatur reduksi terhadap laju metalisasi Fe dapat dilihat pada Gambar 2.7.



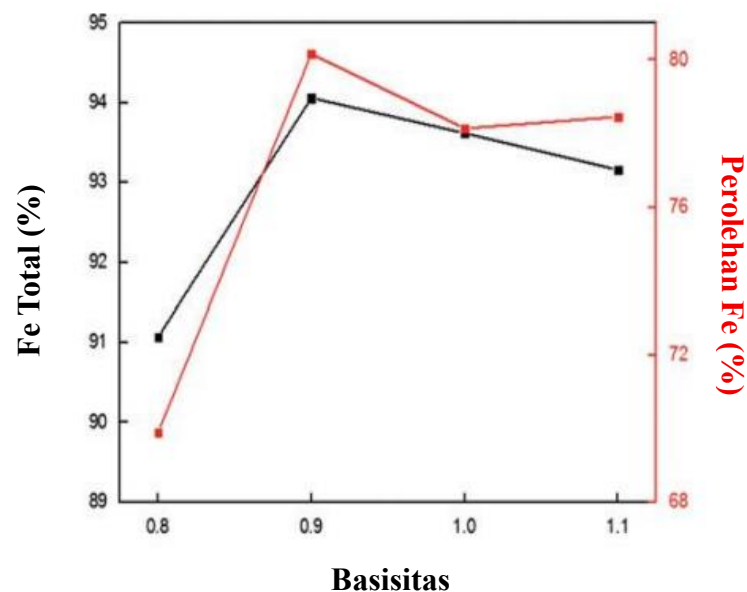
Gambar 2. 6 Pengaruh Temperatur Reduksi Terhadap Perolehan Fe dan Kadar Fe Total [55]



Gambar 2. 7 Pengaruh Temperatur Reduksi Terhadap Laju Metalisasi Fe [56]

Basisitas atau rasio CaO terhadap SiO_2 dan Al_2O_3 pada *slag* berperan dalam mengontrol sifat kimia *slag* selama proses reduksi. Basisitas berpengaruh terhadap viskositas dan kemampuan *slag* dalam mengikat pengotor. Basisitas yang optimal dapat menurunkan titik lebur *slag* dan memudahkan pemisahan Fe metal dari *slag*,

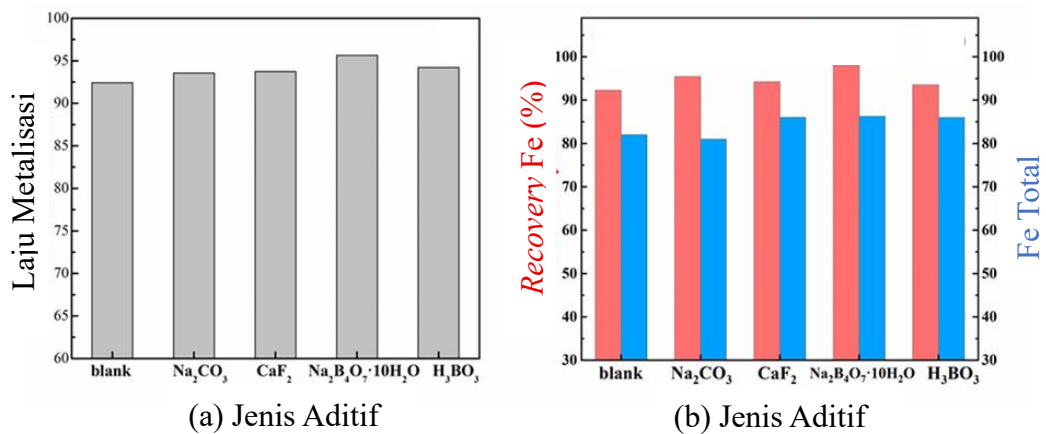
sehingga dapat meningkatkan hasil perolehan logam besi secara signifikan yang dapat dilihat pada Gambar 2.8. Pada penelitian yang dilakukan oleh Wang, et al., (2020) yang menunjukkan pada basisitas 0,9 menjadi kondisi yang optimal dengan menghasilkan perolehan Fe dan kadar Fe total masing-masing yaitu 80,16% dan 94,06%.



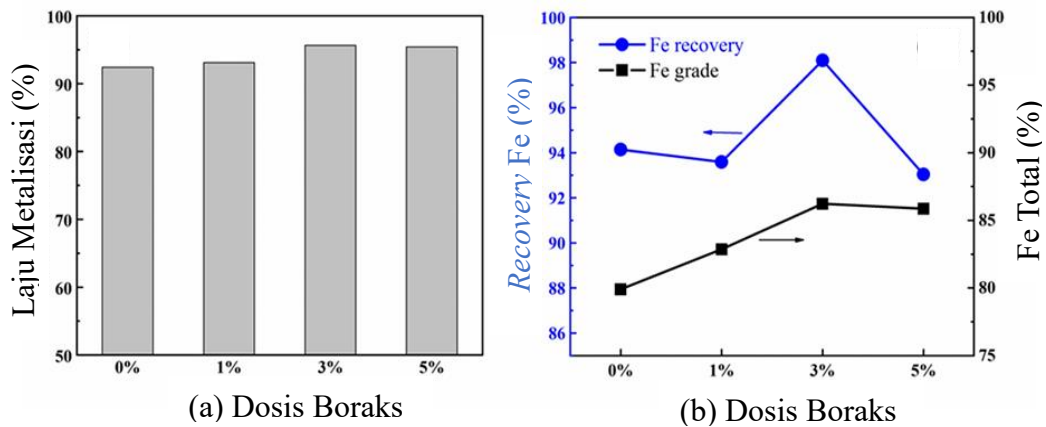
Gambar 2. 8 Pengaruh Basisitas terhadap Perolehan Fe dan Kadar Fe Total [57]

Adapun penambahan jenis aditif yang memberikan pengaruh signifikan terhadap laju metalisasi Fe, kadar Fe total, dan perolehan Fe yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Berdasarkan hasil penelitian Hu, et al., (2023) menunjukkan bahwa tanpa aditif, laju metalisasi Fe berada pada 92,42%, sedangkan penambahan boraks 3% meningkatkan nilai ini menjadi 95,64% dengan kadar Fe total dalam konsentrat mencapai 86,23% dan perolehan Fe sebesar 98,10%. Hal ini terjadi karena boraks melepaskan Na_2O pada suhu tinggi, yang bereaksi dengan senyawa silikat dan aluminat pengikat FeO, sehingga terjadi transformasi FeO menjadi Fe logam.

Namun, dengan dosis boraks >3% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, terjadi peningkatan fase cair dengan titik lebur rendah yang melapisi partikel bijih yang menghambat difusi gas reduktor, dan menurunkan laju metalisasi Fe serta perolehan Fe.



Gambar 2. 9 Pengaruh Jenis Aditif Terhadap (a) Laju Metalisasi Fe dan (b) Perolehan Fe dan Kadar Fe Total [58]



Gambar 2. 10 Pengaruh Penambahan Dosis Boraks Terhadap (a) Laju Metalisasi Fe dan (b) Perolehan Fe dan Kadar Fe Total [58]

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu, Lokasi, dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Hidro-Elektro Metalurgi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Pusat Riset Teknologi Mineral – Lampung Selatan, yang berlangsung dari bulan Januari hingga Oktober 2025

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat-Alat yang Digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian yang terdiri dari alat-alat karakterisasi, alat-alat proses, dan alat-alat pendukung selama penelitian masing-masing dapat dilihat pada Tabel 3.1, Tabel 3.2, dan Tabel 3.3.

Tabel 3. 1 Alat-Alat Karakterisasi yang Digunakan Dalam Penelitian

No.	Nama Alat
1.	<i>Orion Star T900 Series Automated Titration</i>
2.	<i>PANalytical Epsilon 4 XRF</i>
3.	<i>PANalytical X'Pert3 Powder XRD</i>
4.	<i>ThermoFischer Scientific iCAP RQplus ICP-MS</i>
5.	<i>Thermo Scientific Quattro FESEM</i>

Tabel 3. 2 Alat-Alat Proses yang Digunakan Dalam Penelitian

No.	Nama Alat	No.	Nama Alat
1.	<i>Davis Tube Tester</i> OTB-602		<i>Muffle Furnace</i> Nabertherm
2.	<i>Disc Mill Retch</i> RS 200	6.	<i>Oven</i> LDO – 250N
3.	<i>Divider Sampling</i> PT 100	7.	<i>Sieve Shaker Retch</i>
			<i>Klopfsiebmaschine</i> AS 200 tap
4.	<i>Hot Plate</i> IKA C-MAG HS 7	8.	<i>V-Shaped Laboratory Mixer</i>

Tabel 3. 3 Alat-Alat Pendukung yang Digunakan Dalam Penelitian

No.	Nama Alat	No.	Nama Alat
1.	Ayakan 200# dan 325#	14.	Krusibel Grafit
2.	Baskom Kotak	15.	Kuas
3.	Bata Tahan Api	16.	Labu Ukur 100 dan 1000 ml
4.	Batang Pengambil <i>Stirrer Bar</i>	17.	Media Pendingin
5.	Botol Semprot	18.	<i>Mesin Polishing Grinding</i>
6.	Cawan Keramik 50 ml	19.	<i>Mounting Cup</i>
7.	Corong	20.	Neraca Digital Analitik
8.	Desikator	21.	Palu
9.	Erlenmeyer 250 ml	22.	Pipet <i>Pump</i>
10.	<i>Face Shield</i>	23.	Pipet Tetes
11.	Gelas Beker 100 dan 300 ml	24.	Pipet Ukur 2 ml
12.	Kertas Saring	25.	Piring Keramik
13.	Kertas Timbang	26.	Sarung Tangan <i>Safety</i>

Tabel 3.3 Lanjutan

No.	Nama Alat	No.	Nama Alat
27.	<i>Shield Quartz</i>	29.	<i>Stirrer Bar</i>
28.	Spatula	30.	Tang Krusibel

3.2.2 Bahan-Bahan yang Digunakan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel

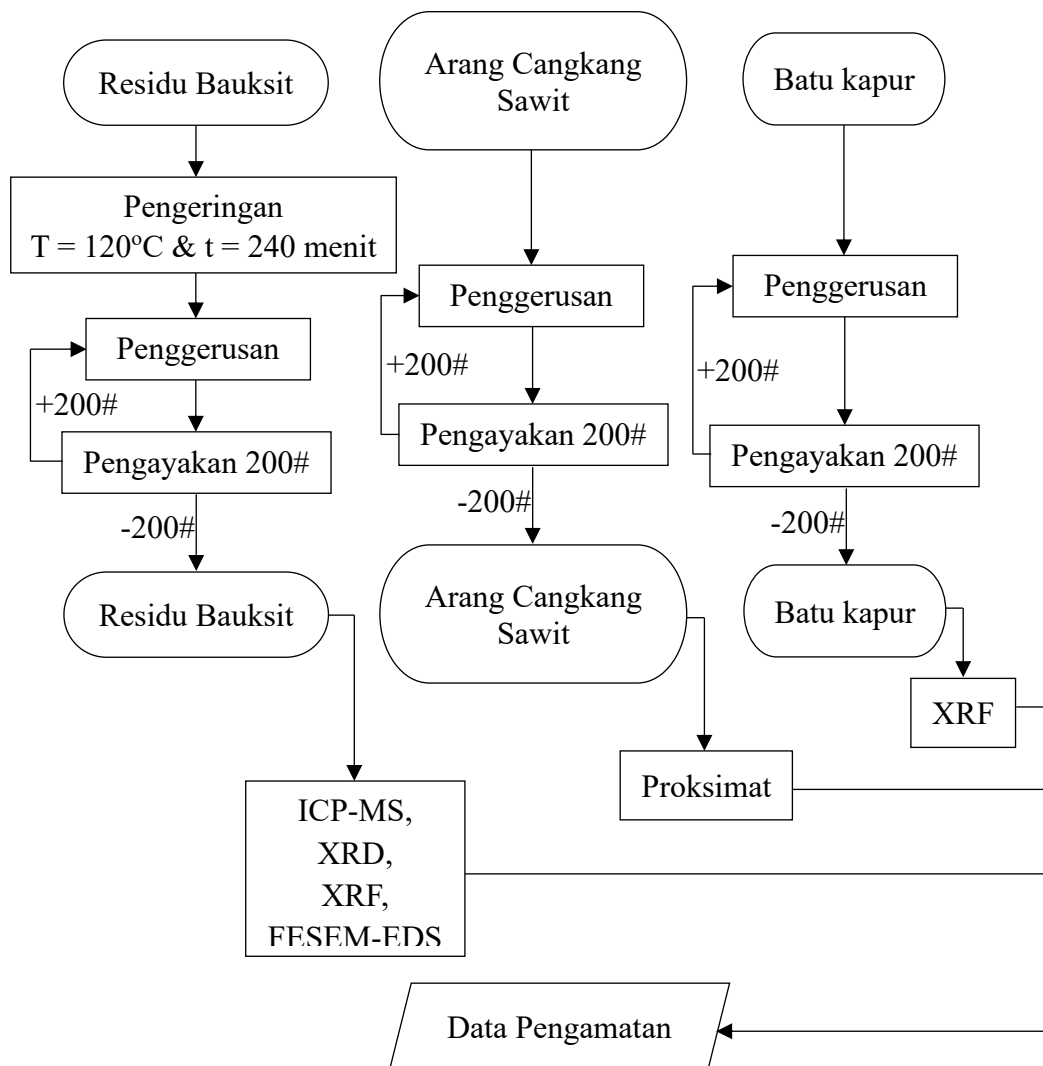
3.4.

Tabel 3. 4 Bahan-Bahan yang Digunakan Dalam Penelitian

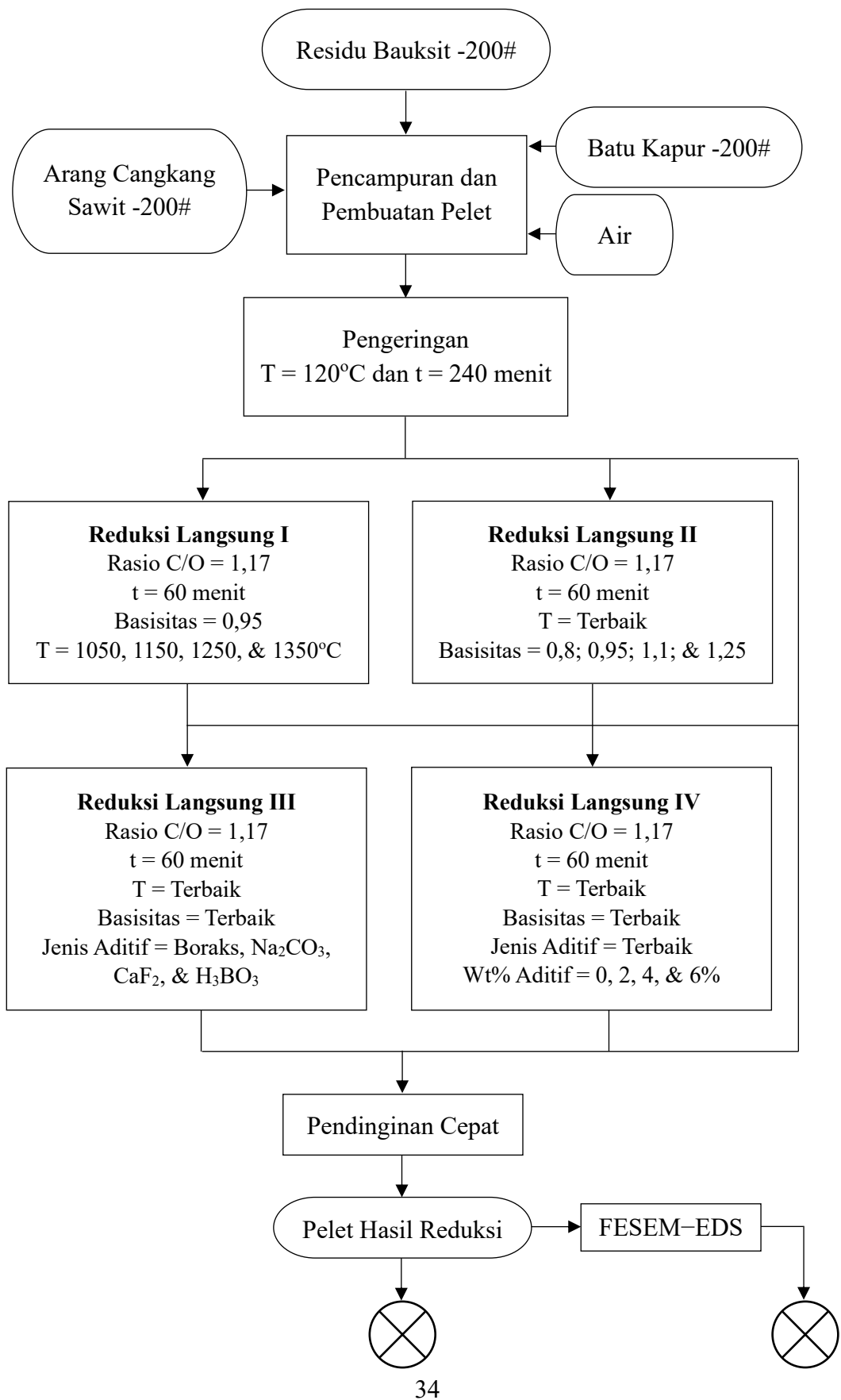
No.	Nama Bahan	No.	Nama Bahan
1.	Amplas	11.	Besi (III) Klorida Hexahidrat (FeCl_3), $6\text{H}_2\text{O}$)
2.	Aquades	12.	<i>Clarocit Powder</i>
3.	Arang Cangkang Sawit	13.	<i>Clarocit Liquid</i>
4.	Asam Borat (H_3BO_3)	14.	Kalium Dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
5.	Asam Fosfat (H_3PO_4) 85%	15.	Kalsium Fluorida (CaF_2)
6.	Asam Klorida (HCl) 37%	16.	Merkuri (II) Klorida (HgCl_2)
7.	Asam Sulfat (H_2SO_4) 98%	17.	Natrium Karbonat (Na_2CO_3)
8.	<i>Barium Diphenylamine Sulphonate Indicator</i>	18.	Natrium Sulfat (NaSO_4)
9.	Batu Kapur	19.	Residu Bauksit
10.	Boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	20.	Timah (II) Klorida (SnCl_2)

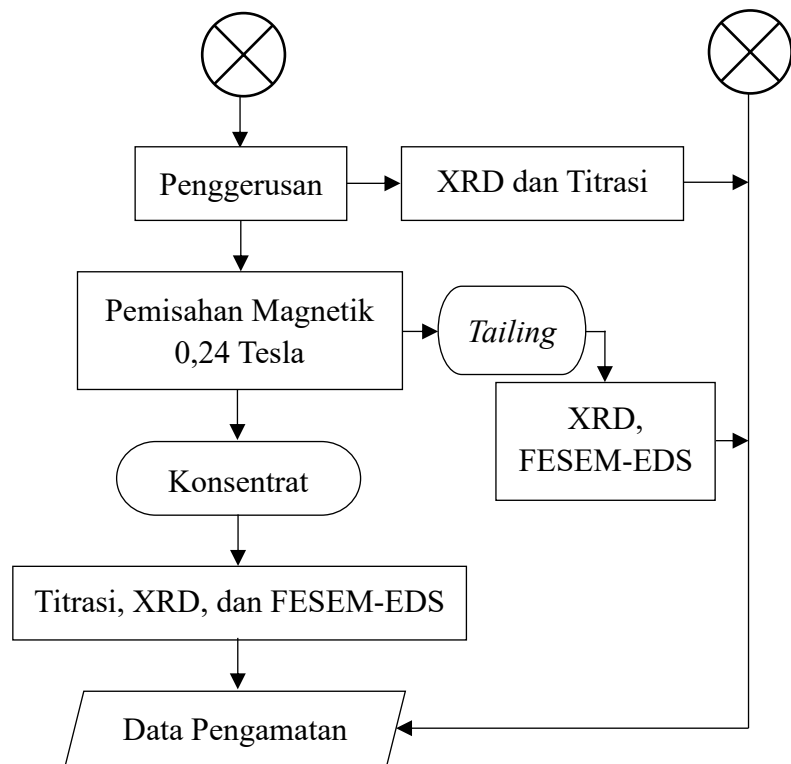
3.3 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ekstraksi logam besi dari residu bauksit dengan proses reduksi langsung dan pemisahan magnetik. Proses reduksi langsung dilakukan dengan memvariasikan temperatur reduksi langsung, basisitas, jenis aditif, dan persen berat aditif. Diagram alir prosedur penelitian yang dilakukan ini terbagi menjadi dua tahapan, yaitu preparasi bahan, proses reduksi langsung dan pemisahan magnetik yang dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Preparasi Bahan





Gambar 3. 2 Diagram Alir Proses Reduksi Langsung dan Pemisahan Magnetik

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Preparasi Bahan Utama

Bahan utama yang digunakan terdiri dari residu bauksit, arang cangkang sawit dan batu kapur. Residu bauksit dikeringkan menggunakan *oven* pada temperatur 120°C selama 240 menit. Residu bauksit yang telah kering, arang cangkang sawit, dan batu kapur dilakukan proses penggerusan untuk mereduksi ukuran partikel menggunakan *disc mill* dan dilanjutkan proses pengayakan menggunakan alat *sieve shaker* dan ayakan ukuran 200# sehingga diperoleh ukuran yang seragam yaitu -200#. Proses penggerusan dan pengayakan pada residu bauksit, arang cangkang sawit, dan batu kapur dapat dilihat pada Gambar 3.3.



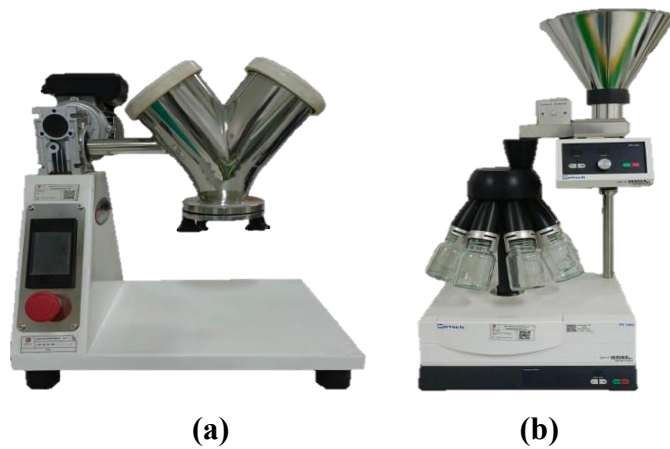
(a)



(b)

Gambar 3. 3 Proses (a) Penggerusan dan (b) Pengayakan

Setelah didapatkan serbuk residu bauksit dan batu kapur dengan ukuran -200#, masing-masing serbuk residu bauksit dan batu kapur dihomogenisasi secara terpisah menggunakan *V-Shaped Laboratory Mixer* selama 5 menit bertujuan menghasilkan campuran yang seragam dengan distribusi ukuran partikel atau komposisi yang merata. Selanjutnya, masing-masing serbuk residu bauksit dan batu kapur dilakukan proses *sampling* menggunakan *divider sampling* yang bertujuan untuk mendapatkan sampel yang representatif dari keseluruhan dari residu bauksit dan batu kapur. Masing-masing bahan dilakukan karakterisasi, yaitu residu bauksit menggunakan XRD, XRF, dan ICP-MS, sedangkan batu kapur dilakukan karakterisasi menggunakan XRD dan XRF, serta arang cangkang sawit dilakukan analisis proksimat. Proses homogenisasi dan *sampling* dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Proses (a) Homogenisasi dan (b) *sampling*

3.4.2 Pembuatan Pelet

Residu bauksit, arang cangkang sawit, dan batu kapur yang telah dilakukan pengayakan, kemudian dilakukan pencampuran dengan basis residu bauksit 40 gram. Setelah itu, ditambahkan air sebagai pengikat dalam pembuatan pelet. Pembuatan pelet dilakukan secara manual dengan konsep aglomerasi yang akan membentuk seperti bola-bola kecil dengan ukuran diameter 10-20 mm yang dapat dilihat pada Gambar 3.5. Selanjutnya pelet yang sudah selesai dibentuk, dilakukan pengeringan di dalam *oven* pada temperatur 120°C selama 240 menit.



Gambar 3. 5 Hasil Pembuatan Pelet

3.4.3 Reduksi Langsung

Pelet yang telah kering dimasukkan ke dalam krusibel grafit yang dilapisi *shield quartz*, lalu krusibel grafit dimasukkan ke dalam *muffle furnace* dan ditutup. Selanjutnya, ditekan tombol *on* pada *furnace* dan temperatur *furnace* diatur. Tahapan pertama pada proses reduksi langsung yaitu dilakukan variasi temperatur. Pengaturan temperatur dilakukan secara bertahap, yaitu temperatur dinaikkan hingga temperatur variasi yaitu 1050°C, 1150°C, 1250°C, dan 1350°C dan ditahan selama 60 menit dengan laju kenaikan temperatur 5°C/menit. Tahapan kedua, dilakukan variasi basisitas yaitu 0,8; 0,95; 1,1; dan 1,25 [50]. Perhitungan basisitas dapat dihitung dengan perbandingan antara CaO terhadap penjumlahan SiO₂ dan Al₂O₃ yang terkandung dalam residu bauksit dan batu kapur. Perhitungan untuk variasi basisitas menghasilkan massa batu kapur yang berbeda-beda yang dapat dilihat pada Lampiran Bagian A. Tahapan ketiga, dilakukan juga variasikan zat aditif yaitu Na₂B₄O₇·10H₂O, NaCO₃, CaF₂, dan H₃BO₃ dengan persen aditif sebanyak 2% dari massa residu bauksit yang digunakan. Tahapan keempat persen massa zat aditif (0, 2, 4, dan 6%) [58].



Gambar 3. 6 Proses Reduksi Langsung

Setelah selesai proses reduksi langsung, krusibel dikeluarkan menggunakan tang penjepit dan didinginkan secara cepat menggunakan media air. Sampel hasil reduksi dikeluarkan dari media air dan dikeringkan dalam *oven* hingga kering. Proses reduksi langsung dapat dilihat pada Gambar 3.6. dan pelet hasil reduksi langsung dapat dilihat pada Gambar 3.7. Kemudian, pelet hasil reduksi ditimbang dan diambil satu bagian untuk dilakukan analisa SEM-EDS, lalu sisanya digerus menggunakan *disc mill* dan diambil sebanyak 4 gram untuk analisa XRD dan 2 gram untuk uji derajat metalisasi Fe, serta sisanya dilanjutkan untuk proses pemisahan magnetik.



Gambar 3. 7 Pelet Hasil Reduksi Langsung

3.4.4 Pemisahan Magnetik

Pemisahan magnetik merupakan sebuah metode konsentrasi yang didasarkan pada sifat kemagnetan suatu material sehingga dapat menaikkan kadar mineral berharga. Pada penelitian ini sampel yang sudah digerus dan diayak menggunakan ayakan 200# dapat dilakukan pemisahan magnetik basah. Metode pemisahan magnetik basah efektif untuk partikel berukuran

halus (<1 mm) karena air dapat mencegah aglomerasi, mengurangi gesekan antar partikel, dan meminimalkan kehilangan mineral magnetik akibat terbawa aliran. Proses dilakukan dalam kondisi basah dengan menggunakan air sebagai media pembawa partikel, sehingga mineral dicampur dalam bentuk *slurry* sebelum dialirkan melalui medan magnet. Selama proses berlangsung, *Davis Tube* diatur pada sudut kemiringan 30° , sementara laju aliran air dikontrol melalui keran air pada kondisi yang sesuai agar partikel atau sampel yang dimasukkan dapat mengalir secara kontinu tanpa mengalami hambatan. Partikel yang dilewati pemisahan magnetik basah akan terpisah menjadi dua, yaitu partikel magnetik (konsentrat) akan tertahan oleh medan magnet dan non-magnetik (*tailing*) akan terbawa aliran air. Konsentrat yang dihasilkan perlu dikeringkan di dalam *oven* dan *tailing* akan disaring dan dikeringkan dalam *oven*. Proses ini dilakukan menggunakan alat *Davis Tube* dengan intensitas medan magnet yang rendah, yaitu 2400 Gauss [55]. Proses pemisahan magnetik basah dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Proses Pemisahan Magnetik Basah

3.4.5 Karakterisasi

a. ICP-MS

Sampel yang dilakukan karakterisasi ICP-MS dalam penelitian ini yaitu sampel residu bauksit. Prosedur karakterisasi ICP-MS diawali dengan preparasi sampel, yaitu residu bauksit dengan ukuran -325# ditimbang sebanyak 1 gram dan ditambahkan larutan asam dengan rasio 3:1:1 untuk 6 ml larutan HCL 37%, 3ml larutan HNO₃ 65%, dan 3 ml larutan HF 48%, lalu sampel dilakukan proses destruksi di dalam mesin *microwave*. Kemudian, sampel hasil destruksi dikeluarkan dan dilakukan proses penguapan HF di atas *hot plate* pada temperatur 140°C. Selanjutnya dilakukan proses pengenceran untuk menyesuaikan dengan batas deteksi alat. Proses pengenceran ini dilakukan menggunakan larutan standar, yaitu larutan HNO₃ untuk mendeteksi kandungan LTJ di dalam residu bauksit. Setelah itu, proses karakterisasi dilakukan dengan memasukkan sampel ke dalam *nebulizer* pada alat ICP-MS. Standar pengujian yang digunakan ICP-MS pada penelitian ini adalah ISO 17294-2:2016. Uji ICP-MS yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Alat Uji ICP-MS

b. XRD

Dalam karakterisasi XRD sampel yang diuji adalah serbuk residu bauksit, serbuk pelet hasil reduksi, konsentrat, dan *tailing* yang sudah dihancurkan dan diayak dengan ukuran -325#. Sampel dimasukkan ke dalam *holder* yang telah dibersihkan menggunakan *ethanol*, kemudian sampel dilakukan pemadatan agar sampel dapat mengisi seluruh rongga *holder* dan ditutup menggunakan *disc*. Setelah itu, sampel ditembakkan oleh sinar-X dengan sudut bervariasi. Sampel diputar untuk memastikan bahwa semua orientasi kristal terpapar. Sebagian besar sinar akan melewati atau dihamburkan secara acak. Sebagian lainnya mengalami difraksi yang terekam oleh detektor. Data dari detektor diolah untuk menghasilkan pola difraksi dalam bentuk grafik intensitas vs sudut 2θ . Sampel hasil pengujian XRD diperlukan perangkat lunak *HighScore plus* dan *Origin* untuk analisis lanjutan dan interpretasi pola agar dapat melihat senyawa-senyawa yang terbentuk. Standar yang digunakan pada karakterisasi ini sesuai dengan standar alat *PANalytical X'Pert3 Powder* XRD yang ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Alat Uji XRD

c. XRF

Pada penelitian ini, alat uji XRF digunakan untuk menentukan komposisi unsur pada sampel residu bauksit dan batu kapur. Sampel dimasukkan ke dalam *cup holder* yang telah dilapisi *mylar plastic film*. Kemudian, sampel diratakan pada seluruh permukaan *plastic film* hingga tertutup sempurna. Lalu, *Cup holder* ditutup dan sampel dimasukkan ke alat uji XRF. Standar yang digunakan pada karakterisasi ini sesuai dengan standar alat *PANalytical Epsilon 4* XRF yang ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Alat Uji XRF

d. FESEM-EDS

Prosedur karakterisasi SEM-EDS diawali dengan preparasi sampel, yaitu pelet hasil reduksi. Pertama sampel pelet hasil reduksi dilakukan proses *mounting*. Proses *mounting* dilakukan dengan menaruh sampel ke dalam *cup mounting*, lalu campurkan *clarocit powder* dan *clarocit liquid* dengan perbandingan 20:12 di dalam *cup*. Setelah itu, diaduk selama 90 detik dan dituangkan campuran ke dalam *cup mounting* yang berisikan sampel, serta tunggu selama 20-30 menit agar cetakan mengeras dengan sempurna. Tahapan berikutnya yaitu proses *polishing* menggunakan amplas berukuran

180#, 500#, 1200#, dan 4000#. Proses *mounting* dan *polishing* dapat dilihat pada Gambar 3.12. Setelah itu, sampel dilakukan karakterisasi sesuai dengan standar alat *Thermo Scientific Quattro* FESEM-EDS yang ditunjukkan pada Gambar 3.13.



(a)



(b)

Gambar 3. 12 Preparasi Sampel (a) Proses *Mounting* dan (b) Proses *Polishing*



Gambar 3. 13 Alat Uji FESEM-EDS

e. Analisis Proksimat

Analisis proksimat adalah metode analisis kimia yang digunakan untuk menentukan komposisi dasar suatu bahan bakar padat atau reduktor. Dalam

penelitian ini reduktor yang digunakan adalah arang cangkang sawit. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kadar air (*moisture*), kadar abu (*ash content*), kadar zat terbang (*volatile matter*), dan kadar karbon (*fixed carbon*). Standar pengujian yang dilakukan, yaitu ASTM D 3173-02 (kadar air), ASTM D 3174-02 (kadar abu), dan ASTM D 3175-02 (zat terbang), serta ASTM D 3172-02 (kadar karbon) secara triplo.

1) Kadar Air

Analisa kadar air arang cangkang sawit dilakukan dengan standar ASTM 3173-02. Sampel yang digunakan berukuran 250 μm . Prosedur analisa kadar air terdiri dari tiga langkah, yaitu:

- a) Sampel dikeringkan di dalam *oven* selama 30 menit dan ditimbang. Sampel seberat 1 gram diambil dan diletakkan dalam cawan, kemudian cawan ditutup dan ditimbang.
- b) Cawan diletakkan di dalam oven yang telah dipanaskan (105°C - 120°C). *Oven* ditutup dan dipanaskan selama 60 menit. Setelah itu, *oven* dibuka dan cawan didinginkan di dalam desikator. Cawan segera ditimbang setelah mencapai temperatur ruangan.
- c) Hasil analisis kadar air dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Kadar Air, \%} = [(A - B)/A] \times 100 \dots\dots\dots(3.1)$$

Keterangan,

A = berat sampel yang digunakan (gram)

B = berat sampel setelah pemanasan (gram)

2) Kadar Abu

Analisa kadar abu arang cangkang sawit dilakukan dengan standar ASTM 3174-02. Sampel yang digunakan berukuran 250 µm. Prosedur analisa kadar air terdiri dari empat langkah, yaitu:

- a) Sebanyak 1 gram sampel dimasukkan ke dalam cawan, kemudian ditimbang dan ditutup. Cawan diletakkan dalam *furnace* dalam keadaan dingin, lalu dipanaskan pada temperatur 500°C selama 60 menit.
- b) Sampel dipanaskan hingga mencapai temperatur 700–750°C selama 60 menit, kemudian pemanasan dilanjutkan hingga 120 menit.
- c) Cawan dipindahkan keluar dari *furnace*, didinginkan, dan ditimbang.
- d) Hasil analisis kadar abu dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Kadar Abu, \%} = [(A-B)/C] \times 100 \dots\dots\dots(3.2)$$

Keterangan,

A = berat cawan, tutup, dan abu (gram)

B = berat cawan kosong dan tutup (gram)

C = berat sampel yang digunakan (gram)

3) Zat Terbang

Analisa zat terbang arang cangkang sawit dilakukan dengan standar ASTM 3175-02. Sampel yang digunakan berukuran 250 µm. Prosedur analisa kadar air terdiri dari empat langkah, yaitu:

- a) Sampel seberat 1 gram ditimbang dalam cawan, kemudian cawan ditutup dan dimasukkan ke dalam *furnace*, dengan temperatur dijaga pada $950 \pm 20^{\circ}\text{C}$.
- b) Setelah pemanasan selama tepat 7 menit, cawan dipindahkan keluar dari *furnace* dan didinginkan.
- c) Cawan ditimbang setelah dingin.
- d) Hasil analisis zat terbang dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Weight Loss, \%} = [(A - B) / A] \times 100 \dots\dots\dots(3.3)$$

Keterangan,

A = berat sampel yang digunakan (gram)

B = berat sampel setelah pemanasan (gram)

Kemudian, dihitung persen zat terbang dengan persamaan:

$$\text{Zat Terbang, \%} = C - D \dots\dots\dots(3.4)$$

Keterangan,

C = *weight loss* (%)

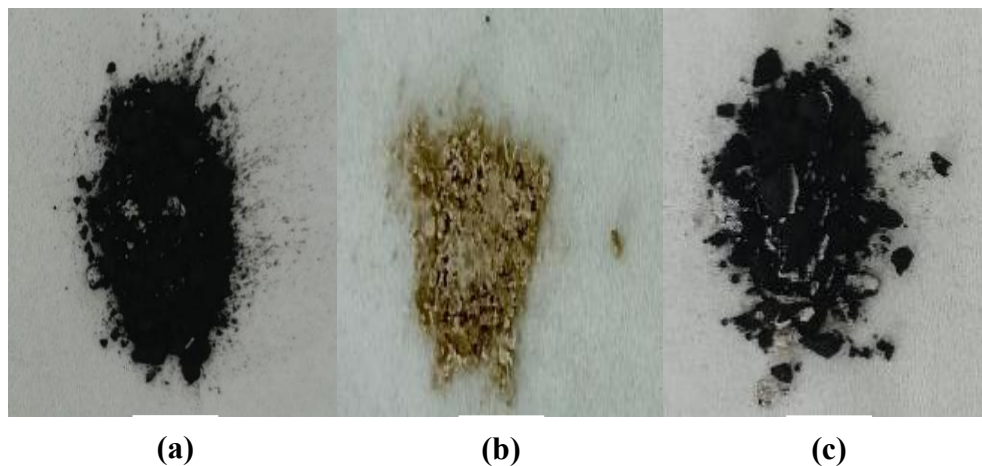
D = kadar air (%)

4) Kadar karbon

Analisa kadar karbon dalam arang cangkang sawit dilakukan dengan standar ASTM D 3172-02 dengan perhitungan dari data kadar air, kadar abu, dan zat terbang. Perhitungan kadar karbon sebagai berikut:

$$\text{Kadar Karbon, \%} = 100\% - [\text{kadar air (\%)} + \text{kadar abu (\%)} + \text{zat terbang (\%)}] \dots\dots\dots(3.5)$$

Perhitungan kadar karbon yang dihasilkan dapat menentukan massa arang cangkang sawit sebagai reduktor pada proses reduksi oksida besi berdasarkan stoikiometri. Adapun gambar sampel hasil analisis proksimat yang terdiri dari sampel analisis kadar air, kadar abu, dan zat terbang dapat dilihat pada Gambar 3.14.



Gambar 3. 14 Sampel Hasil Analisa Proksimat: (a) Kadar Air, (b) Kadar Abu, dan (c) Zat Terbang

f. Uji Derajat Metalisasi Fe

Uji derajat metalisasi Fe dilakukan untuk mengetahui efektivitas proses reduksi pada residu bauksit untuk mengubah senyawa oksida besi (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , dan FeO) menjadi Fe metal (Fe^0). Metode pengujian derajat metalisasi Fe diawali dengan menghitung kadar Fe total dan Fe metal dengan cara titrasi. Pengujian Fe total dengan cara titrasi mengacu pada standar IS : 1493 (Part I) – 1981 sedangkan pengujian Fe metal mengacu pada standar IS 15774 : 2007.

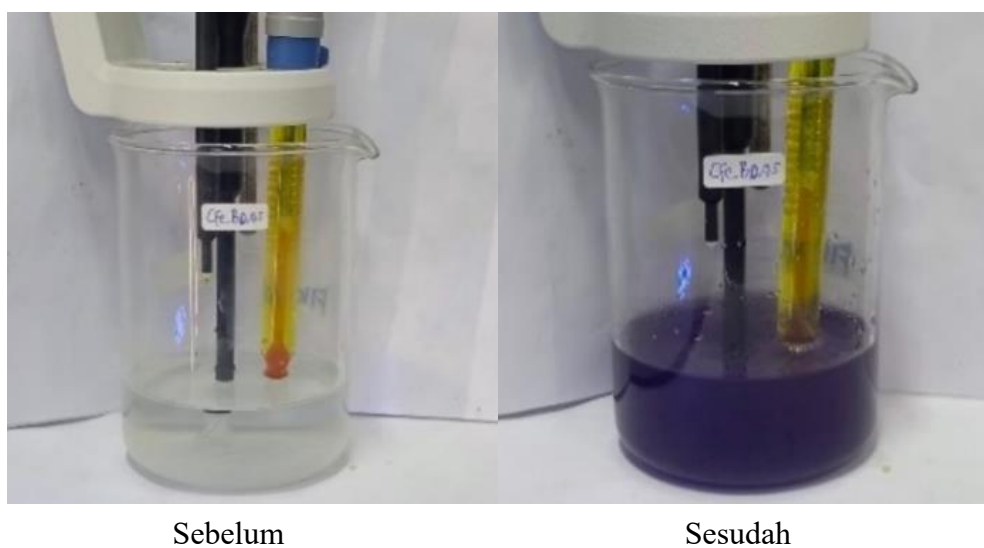
Adapun rangkaian proses uji Fe total dan Fe metal dapat dilihat pada Gambar 3.15 dan Gambar 3.16.

1) Uji Fe Total

Sebelum melakukan pengujian Fe total, terdapat beberapa bahan yang perlu disiapkan, seperti larutan *sodium diphenylamine sulphonate indicator* dan larutan standar. Pembuatan larutan *sodium diphenylamine sulphonate indikator*, yaitu 0,32 gram *barium diphenylamine sulphonate* dilarutkan dengan 100 ml aquades panas dan ditambahkan 0,5 gram Na_2SO_4 . Lalu, diaduk dan endapan barium sulfat disaring. Filtrat disimpan di dalam botol berwarna gelap. Sedangkan, untuk membuat larutan standar $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, yaitu 4,903 gram kalium dikromat dilarutkan dengan aquades panas sebanyak 1000 ml. Lalu, diaduk dan disimpan untuk digunakan sebagai larutan standar. Adapun gambar perubahan warna sebelum dan sesudah proses titrasi yang dapat dilihat pada Gambar 3.15. Setelah semua bahan siap, berikut adalah langkah-langkah uji Fe total dengan cara titrasi:

- a) Sampel diambil sebanyak 0,1 gram yang telah digerus dan dimasukkan ke dalam gelas beker 100 ml.
- b) Sebanyak 25 ml HCl pekat ditambahkan ke dalam gelas beker yang berisikan 0,1 gram sampel.
- c) Larutan dalam gelas beker diaduk dan dipanaskan hingga mendidih. Setelah itu sampel disaring untuk memisahkan antara residu dan filtrat.

- d) Sebanyak 10-12 tetes larutan SnCl_2 10% ditambahkan pada filtrat hingga warna larutan berubah dari warna kuning menjadi warna bening.
- e) Aquades panas sebanyak 75 ml ditambahkan pada filtrat dan didinginkan hingga temperatur kamar.
- f) Filtrat ditambahkan 1,5 ml HgCl_2 10% ke dalam larutan dan dibiarkan hingga terbentuk endapan putih
- g) Filtrat ditambahkan 5 ml H_3PO_4 dan dibiarkan selama 1 menit.
- h) Filtrat diteteskan sebanyak 2 tetes menggunakan larutan *sodium diphenylamine sulphonate indicator*.
- i) Larutan dititrasi menggunakan larutan standar $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,1 N hingga warna larutan berubah menjadi warna violet atau ungu.
- j) Volume titran yang digunakan hingga warna larutan berubah dicatat dan dihitung perolehan Fe total pada sampel.



Gambar 3. 15 Proses Uji Fe Total Sebelum dan Sesudah Proses Titrasi

2) Uji Fe Metal

Sebelum melakukan pengujian Fe metal, perlu menyiapkan beberapa bahan seperti, larutan *sodium diphenylamine sulphonate indikator*, larutan standar $K_2Cr_2O_7$, dan larutan $FeCl_3$ 10%. Pembuatan larutan $FeCl_3$ 10%, yaitu melarutkan 100 gram besi (iii) klorida hexahidrat ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) dengan aquades hingga 1 liter. Adapun gambar perubahan warna sebelum dan sesudah proses titrasi yang dapat dilihat pada Gambar 3.16. Setelah semua bahan siap, berikut adalah langkah-langkah uji Fe metal dengan cara titrasi:

- a) Sampel diambil sebanyak 0,1 gram yang telah digerus dan dimasukkan ke dalam gelas beker 100 ml.
- b) Sebanyak 20 ml larutan $FeCl_3$ 10% ditambahkan ke dalam gelas beker yang berisi 0,1 gram sampel. Kemudian diaduk selama 60 menit dan disaring menggunakan kertas saring, serta cuci residu dengan HCl pekat.
- c) Filtrat dipindahkan ke dalam gelas beker 100 ml yang berisikan 40 ml aquades; 2,5 ml H_2SO_4 ; dan 2,5 ml H_3PO_4 .
- d) Filtrat diteteskan sebanyak 2 tetes menggunakan larutan *sodium diphenylamine sulphonate indikator*.
- e) Larutan dititrasi menggunakan larutan standar $K_2Cr_2O_7$ 0,1 N hingga warna larutan berubah menjadi warna hijau gelap.
- f) Volume titran yang digunakan hingga warna larutan berubah dicatat dan dihitung perolehan Fe metal pada sampel.



Sebelum

Sesudah

Gambar 3. 16 Proses Uji Fe Metal Sebelum dan Sesudah Proses Titrasi

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Awal Bahan Baku

4.1.1 Residu Bauksit

Residu bauksit yang digunakan berasal dari PT. Indonesia Chemical Alumina (ICA), Kalimantan Barat. Residu bauksit dilakukan karakterisasi ICP-MS untuk mengetahui kadar LTJ dalam residu bauksit yang dapat dilihat pada Tabel 4.1. Berdasarkan hasil karakterisasi ICP-MS, menunjukkan bahwa residu bauksit mengandung unsur LTJ seperti Sc, Y, La, Ce, dan Nd. Unsur LTJ dengan kadar tertinggi dalam residu bauksit yaitu Ce sebesar 595,15 ppm.

Tabel 4. 1 Hasil Karakterisasi ICP-MS Residu Bauksit

Unsur LTJ	Kadar (ppm)
Ce	595,15
Sc	16,26
La	6,47
Nd	6,01
Y	0,81

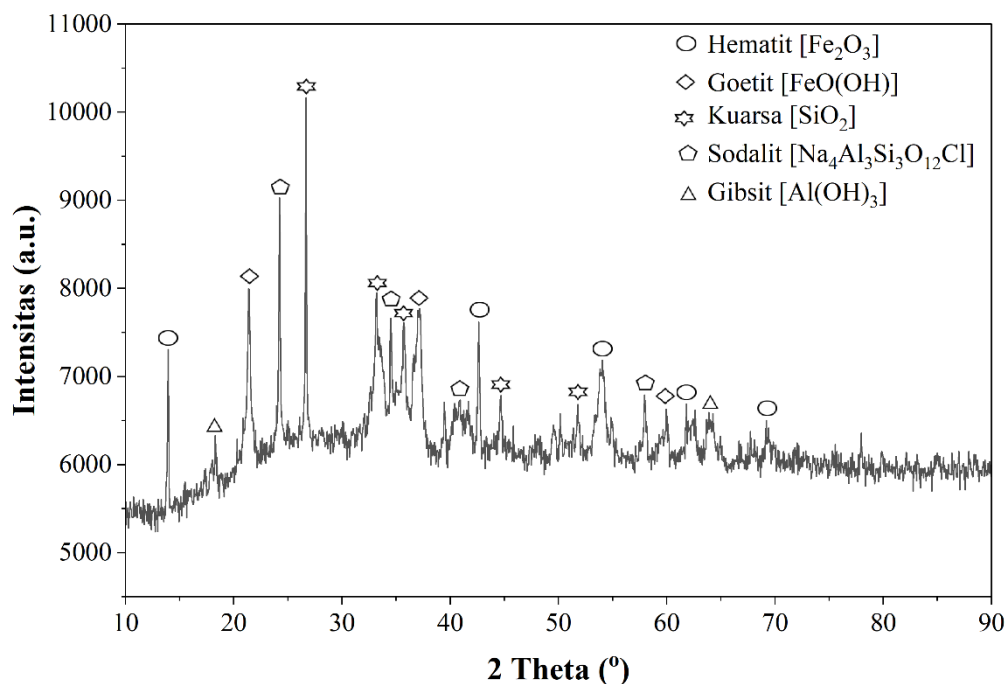
Identifikasi unsur-unsur residu bauksit dengan melakukan karakterisasi XRF dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.2. Berdasarkan hasil karakterisasi XRF, unsur pengotor yang terkandung dalam residu bauksit sebanyak 18,88% yang didominasi oleh 1,55% Ca, 1,73% Ti, 7,20% Al, dan

7,57% Si. Sedangkan unsur utama, yaitu Fe mencapai 40,85%. Unsur seperti Ca, Al dan Si diperlukan untuk menghitung nilai basisitas *slag*, sedangkan unsur Fe adalah unsur yang diinginkan untuk mendapatkan *pig iron*.

Tabel 4. 2 Hasil Karakterisasi XRF Unsur Dalam Residu Bauksit

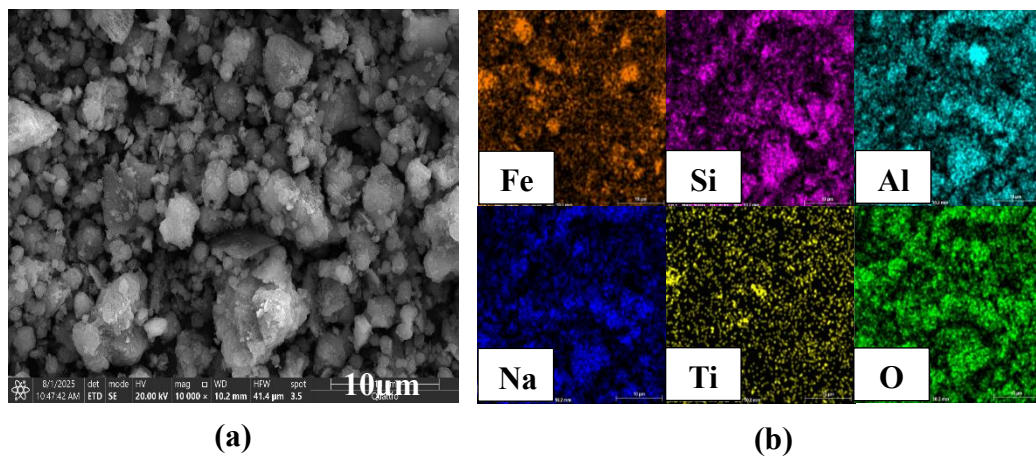
Unsur	Kadar	Unsur	Kadar
Fe	40,84%	Cr	576,20 ppm
Si	7,57%	Zr	286,99 ppm
Al	7,20%	Cu	279,20 ppm
Ti	1,73%	Pb	222,06 ppm
Ca	1,55%	Ni	194,72 ppm
P	0,26%	Rb	160,31 ppm
S	0,16%	Zn	108,45 ppm
V	0,16%	Ga	79,20 ppm
K	0,15%	Bi	40,29 ppm
Mn	0,10%	Sr	34,59 ppm
		Hg	6,53 ppm

Identifikasi fasa mineral dalam residu bauksit dilakukan karakterisasi XRD menggunakan mesin XRD *PANalytical X'pert* dengan posisi 2 theta (°) dari 10° hingga 90° dan menggunakan panjang gelombang CuK α sebesar 1.54056 Å. Kemudian, puncak-puncak dicocokkan dengan perangkat lunak *High Score Plus* dan *Origin*. Hasil karakterisasi XRD residu bauksit dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Hasil Karakterisasi XRD Residu Bauksit Kalimantan Barat

Dari hasil karakterisasi XRD yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 diketahui fasa mineral dominan yang terdapat pada residu bauksit yaitu 38% hematit [Fe_2O_3]. Selain itu, terdapat juga fasa 23,67% goetit [$\text{FeO}(\text{OH})$], 11,45% kuarsa [SiO_2], 19,48% sodalit [$\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$], dan 7,4% gibsit [$\text{Al}(\text{OH})_3$]. Pada penelitian ini, fasa mineral residu bauksit sebagian besar terdapat unsur Fe dalam bentuk hematit dan goetit, sedangkan sebagian kecil terdapat unsur Si dalam bentuk kuarsa dan unsur Al dalam bentuk gibsit. Sampel residu bauksit ini tidak dapat diklasifikasikan sebagai residu bauksit gibsit karena dominan mengandung hematit dan goetit. Menurut Gu, Wang, dan Liu (2012) residu bauksit dengan kandungan besi yang tinggi ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 30\%$) dapat dilakukan proses reduksi untuk mengekstraksi Fe logam.



Gambar 4. 2 SEM Residu Bauksit (a) Morfologi dan (b) EDS *Mapping*

Gambar 4.2 (a) menunjukkan morfologi SEM dengan pembesaran 5000x, terlihat bahwa partikel residu bauksit memiliki bentuk yang tidak beraturan yang terdiri atas agregat partikel halus hingga besar dengan ukuran mikrometer ($\pm 10\mu\text{m}$) yang tersebar ke permukaan mineral. Partikel residu bauksit dengan porositas tinggi dan ukuran partikel yang kecil menunjukkan bahwa residu bauksit terdiri dari campuran berbagai mineral unsur logam, yaitu Fe, Al, Si, Ti, Na, dan O seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 (b). Distribusi Fe tampak merata di seluruh area, menandakan bahwa Fe_2O_3 merupakan fasa dominan dalam residu bauksit. Hal ini sesuai dengan warna merah khas residu bauksit yang disebabkan oleh hematit dan goetit. Selain itu, unsur logam Al dan Si juga tersebar luas yang mengindikasikan keberadaan mineral silikat dan aluminat, seperti kuarsa dan gipsit. Adapun unsur Na yang cukup homogen yang menandakan adanya residu dari proses *Bayer*, di mana NaOH digunakan sebagai pelarut bauksit yang menyebabkan terbentuknya fasa seperti sodalit.

4.1.2 Arang Cangkang Sawit

Arang cangkang sawit digunakan sebagai reduktor yang berperan menyediakan karbon untuk menghasilkan gas CO yang digunakan untuk mereduksi Fe_2O_3 menjadi Fe. Analisis proksimat dilakukan untuk mengetahui karakteristik dasar arang cangkang sawit sebagai bahan reduktor dalam menentukan kadar air, kadar abu, zat terbang, dan kadar karbon. Hasil analisis proksimat arang cangkang sawit dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Analisis Proksimat Arang Cangkang Sawit

Parameter	Analisis Proksimat			Rata-rata	Standar
	Percobaan Ke -				
	1	2	3		
Kadar Air (%)	6,64	7,17	7,02	6,94	ASTM D3302-02
Kadar Abu (%)	1,99	2,83	2,56	2,46	ASTM D3174-02
Kadar Zat Terbang (%)	11,61	14,07	13,18	9,39	ASTM D3175-02
Kadar Karbon (%)	79,76	75,93	77,24	77,64	ASTM D3172-02

Hasil analisis proksimat pada Tabel 4.3 digunakan untuk perhitungan stoikiometri yang digunakan untuk menghitung kebutuhan arang cangkang sawit dan batu kapur yang dapat dilihat pada Lampiran A.

4.1.3 Batu Kapur

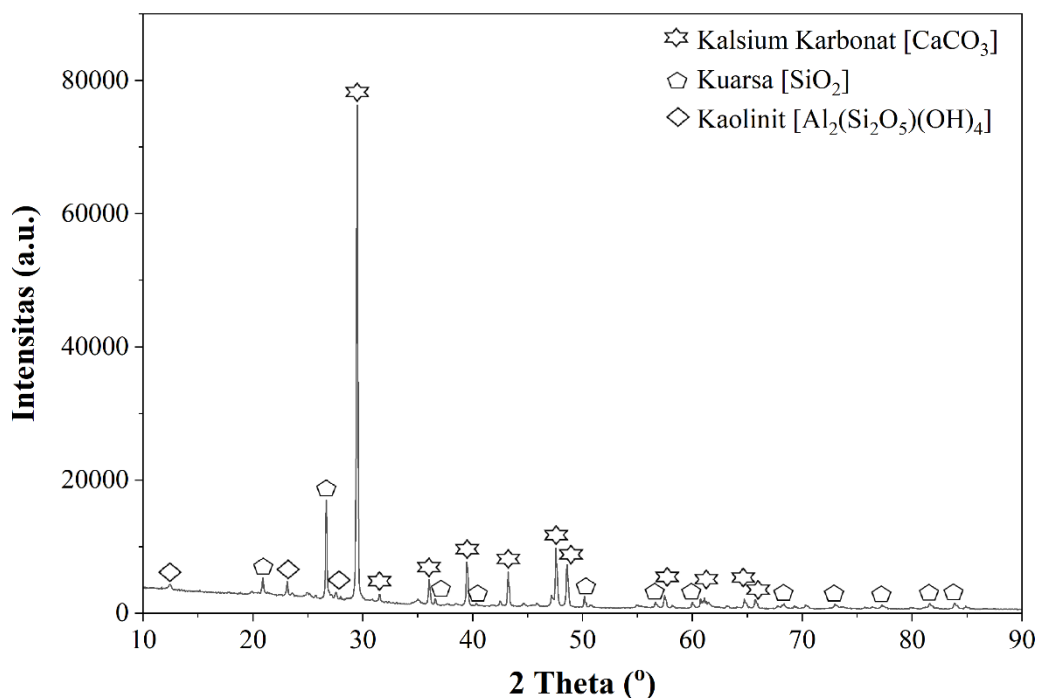
Batu kapur yang telah digerus dan diayak hingga ukuran sampel menjadi -200 mesh atau 74 μm . Hasil karakterisasi XRF pada batu kapur dapat dilihat pada Tabel 4.4. Dari hasil XRF, batu kapur memiliki unsur Ca yang tinggi yaitu 73,29%. Dari kandungan Ca yang tinggi, akan membantu proses dengan cara menyediakan gas CO_2 untuk penyediaan gas reduktor proses reduksi seperti yang ditunjukkan pada persamaan reaksi 2.4.

Tabel 4. 4 Hasil Karakterisasi XRF Batu Kapur

Unsur	Kadar	Unsur	Kadar
Ca	41,95%	Mn	188,27 ppm
Si	8,93%	Rb	183,86 ppm
Al	2,83%	Cr	107,96 ppm
K	1,73%	Cu	104,69 ppm
Fe	1,18%	V	21,97 ppm
Ti	0,28%	Zn	56,50 ppm
S	0,10%	Y	21,92 ppm
Sr	0,04%	Ga	17,17 ppm
Sn	0,07%	Pb	12,65 ppm
Zr	199,66 ppm	As	8,01 ppm

Hasil karakterisasi yang telah diolah dengan perangkat lunak *High Score Plus* menunjukkan tiga fasa yang terindikasi dalam sampel residu bauksit yaitu 61,9% kalsium karbonat (CaCO_3), 14,3% kuarsa [SiO_2], dan

23,8% kaolinit [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$]. Berdasarkan grafik XRD pada Gambar 4.3 didapatkan puncak tertinggi pada residu bauksit adalah CaCO_3 yaitu $29,4513^\circ$. Dapat diketahui bahwa semakin tinggi puncak yang terbentuk menandakan fasa CaCO_3 lebih dominan atau lebih banyak kristalnya di dalam batu kapur. Hal ini sesuai dengan data XRF yang menunjukkan bahwa kadar unsur Ca lebih tinggi daripada unsur-unsur lainnya.



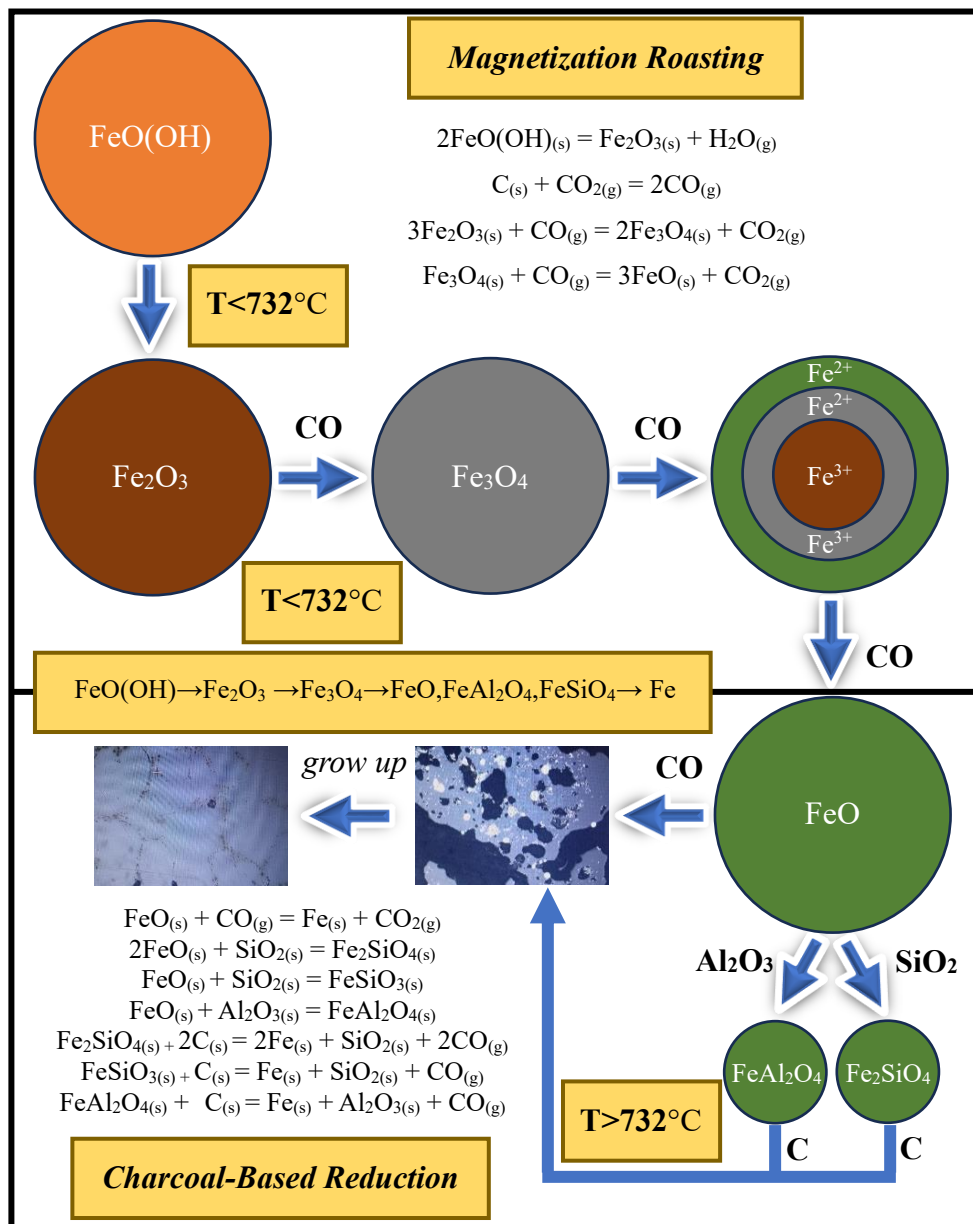
Gambar 4. 3 Hasil Karakterisasi XRD Batu Kapur

4.2 Mekanisme Proses Reduksi Oksida Besi

Mekanisme proses reduksi oksida besi pada Gambar 4.4 berlangsung melalui dua tahap, yaitu *magnetization roasting* pada suhu di bawah 732°C dan *charcoal-based reduction* pada suhu di atas 732°C . Pada tahap awal, mineral besi hidrat mengalami dehidrasi sehingga membentuk Fe_2O_3 , kemudian hematit (Fe^{3+}) direduksi secara bertahap oleh gas CO menjadi magnetit (Fe_3O_4) dan selanjutnya

menjadi wustit (FeO), yang ditandai dengan perubahan valensi Fe dari Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} . Sebagian FeO bereaksi dengan mineral pengotor seperti SiO_2 dan Al_2O_3 membentuk senyawa kompleks seperti Fe_2SiO_4 (fayalit) dan FeAl_2O_4 (spinel). Ketika suhu dinaikkan melebihi 732°C , FeO serta senyawa kompleks tersebut mengalami reduksi lanjut oleh karbon padat maupun gas CO sehingga menghasilkan Fe^0 dalam bentuk partikel logam kecil. Pembentukan Fe^0 ini dipengaruhi oleh difusi gas reduktor menuju permukaan partikel serta difusi oksigen ke arah luar, sehingga laju reduksi sangat bergantung pada temperatur dan waktu penahanan. Partikel besi metalik ini kemudian tumbuh (*grow up*) dan berkumpul sehingga membentuk butiran Fe yang berukuran lebih besar dan bersifat magnetik, sementara sisa SiO_2 , Al_2O_3 , dan senyawa silikat-aluminosilikat lainnya tetap menjadi fasa *tailing*, memungkinkan pemisahan besi secara efektif melalui proses pemisahan magnetik. Mekanisme ini menggambarkan bagaimana lapisan produk Fe terbentuk secara bertahap, sementara inti Fe_2O_3 terus mengecil karena ikut bereaksi dengan reduktor (CO atau C), sehingga lapisan Fe yang terbentuk di bagian luar semakin menebal dan antarmuka reaksi bergerak ke arah dalam. Berikut adalah langkah-langkah dalam proses reduksi tersebut [59]:

1. Difusi Eksternal: Gas reduktor, dalam hal ini CO, berdifusi melalui lapisan gas ke permukaan lapisan produk padat (Fe).
2. Difusi Internal: Gas CO kemudian berdifusi melalui lapisan produk (Fe) menuju antarmuka reaksi. Selanjutnya, ion besi berdifusi ke dalam melalui lapisan produk Fe.
3. Reaksi Kimia di Antarmuka: Pada tahap ini terjadi penyerapan gas CO, reaksi kimia di antarmuka, serta desorpsi gas oksidasi (CO_2).

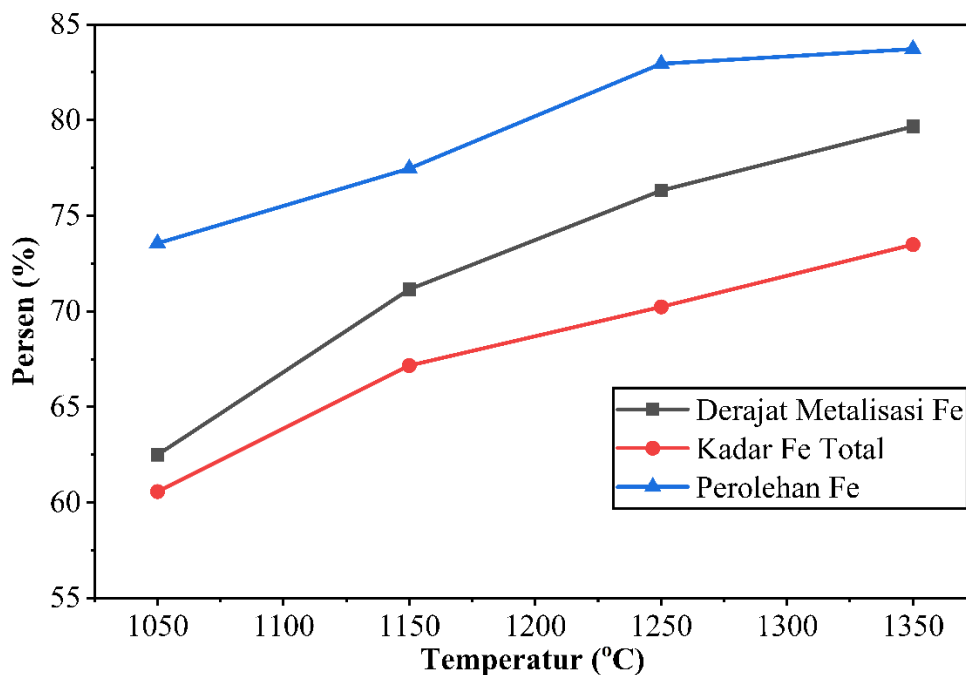


Gambar 4. 4 Mekanisme Proses Reduksi Besi Oksida dari Residu Bauksit[54]

4.3 Pengaruh Variasi Temperatur Reduksi Langsung

Variasi temperatur reduksi dilakukan dalam kondisi rasio C/O 1,17 sesuai perhitungan stoikiometri, waktu reduksi 60 menit, dan basisitas 0,95, serta ukuran partikel pemisahan magnetik 74 µm dengan intensitas medan magnet sebesar 2400 Gauss. Hasil uji titrasi untuk menentukan pengaruh temperatur reduksi langsung

terhadap derajat metalisasi Fe, kadar Fe total, dan perolehan Fe yang dapat dilihat pada Gambar 4.5. Hasil uji titrasi menunjukkan bahwa kenaikan temperatur dari 1050°C hingga 1350°C menghasilkan peningkatan untuk ke tiga parameter, yaitu kadar Fe total (60,57% – 73,49%), perolehan Fe (73,56% – 83,72%), dan derajat metalisasi Fe (62,49% – 79,67%).

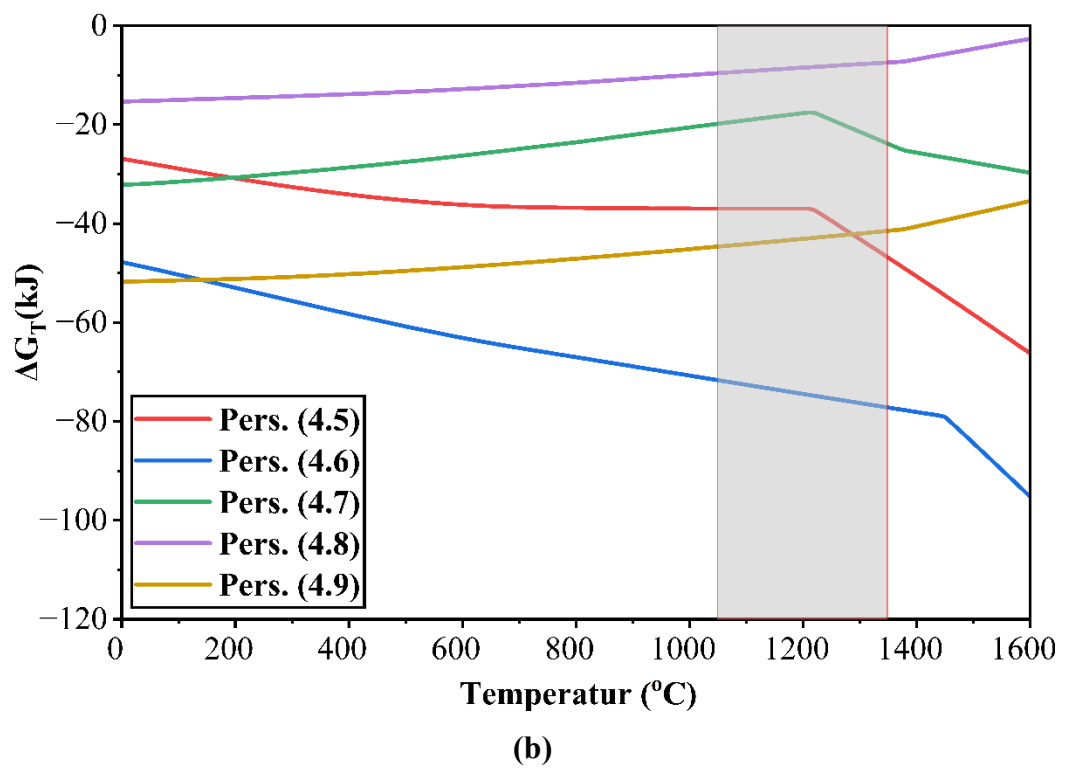
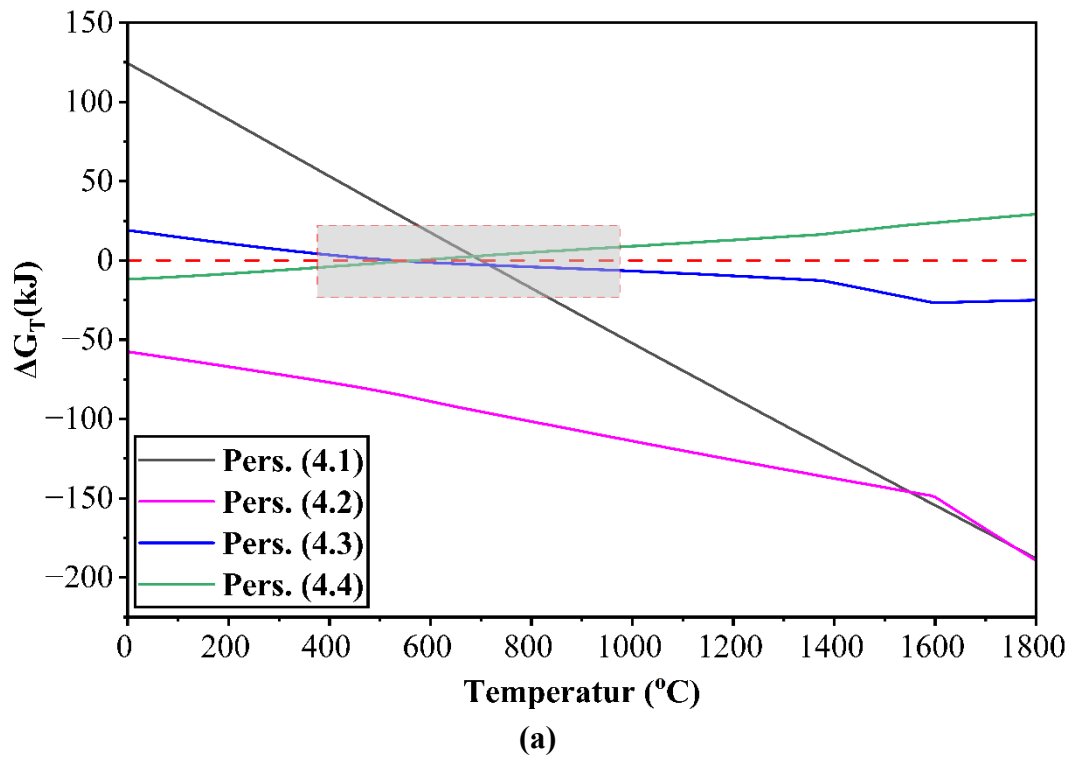


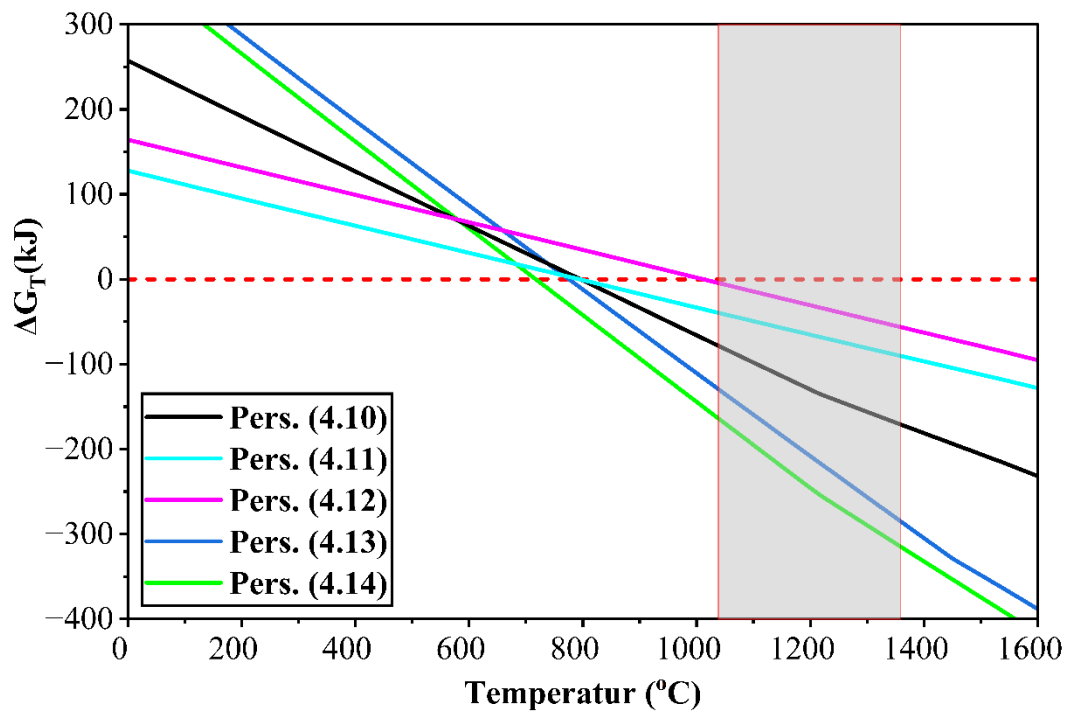
Gambar 4. 5 Pengaruh Temperatur Reduksi Terhadap Kadar Fe Total, Derajat Metalisasi Fe, dan Perolehan Fe

Kenaikan kadar Fe total dan perolehan Fe dengan meningkatnya temperatur reduksi yang disebabkan oleh meningkatnya pemisahan fasa logam dari fasa oksida (*slag*) pada temperatur tinggi. Pada temperatur rendah, sebagian Fe masih terikat dalam bentuk oksida kompleks ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ atau $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), sehingga belum seluruhnya tereduksi. Ketika temperatur meningkat, reaksi reduksi menjadi lebih lengkap, sehingga Fe logam terakumulasi dan kandungan Fe dalam produk logam meningkat. Selain itu, meningkatnya temperatur membantu pertumbukkan partikel

Fe logam kecil menjadi partikel yang lebih besar, sehingga mudah dipisahkan secara magnetik. Derajat metalisasi Fe menunjukkan sejauh mana oksida besi (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO) telah direduksi menjadi Fe logam. Kenaikan ini terjadi karena proses reduksi oksida besi merupakan reaksi endotermik. Artinya, semakin tinggi temperatur, semakin banyak FeO yang tereduksi menjadi Fe logam. Laju kenaikan terjadi signifikan ketika temperatur reduksi dari $1050 - 1250^\circ\text{C}$, namun ketika temperatur reduksi di atas 1250°C , derajat metalisasi masih naik tetapi mulai atau sedikit melandai. Kecenderungan pelandaian ini mengindikasikan adanya keterbatasan reaksi akibat perubahan kondisi fasa pada sistem. Hal ini FeO yang dihasilkan dari oksida besi dalam residu bauksit mudah bereaksi dengan SiO_2 , sehingga membentuk fasa fayalit (Fe_2SiO_4). Fasa fayalit menunjukkan fasa cair pada temperatur tinggi karena titik leburnya 1205°C , dan fasa cair tersebut menjebak sebagian residu bauksit dan partikel karbon sehingga mencegah terjadinya kontak antara fasa padat dan fasa gas, yang menghambat peningkatan derajat metalisasi Fe [56].

Untuk menganalisis proses reduksi langsung berbasis arang cangkang sawit dari residu bauksit, dapat dilakukan perhitungan termodinamika berdasarkan energi bebas Gibbs standar (ΔG_T) menggunakan perangkat lunak *HSC Chemistry 6.0*. Semua reaksi potensial antara oksida besi, karbon, karbon monoksida, karbon dioksida, dan oksida pengotor (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO) dihitung dalam rentang temperatur $0 - 1800^\circ\text{C}$. Reaksi (4.1) hingga (4.14) dan nilai ΔG° yang sesuai ditunjukkan pada Tabel 4.5 dan hasil perhitungan perubahan ΔG_T terhadap temperatur digambarkan pada Gambar 4.6 (a–c).





(c)

Gambar 4. 6 Termodinamika Reaksi (a) Reduksi Oksida Besi, (b) Oksida Besi dengan Oksida Pengotor dan (c) Reduksi Lanjutan

Pada proses reduksi langsung ini dilakukan analisa termodinamika. Pada Gambar 4.6(a) ini menunjukkan bahwa grafik reaksi (4.1) – (4.4) merupakan reaksi *Boudouard* dan rangkaian tahapan reduksi $\text{Fe}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$. Pada reaksi (4.2) memiliki $\Delta G_T < 0$ pada rentang temperatur 25 – 1800°C, serta pada reaksi (4.1) dan (4.3) memiliki $\Delta G_T < 0$ terjadi ketika temperatur >700°C dan >530°C pada masing-masing reaksi. Sedangkan pada reaksi (4.4) memiliki $\Delta G_T < 0$ terjadi ketika temperatur <570°C, lalu di temperatur yang lebih tinggi membuat nilai ΔG_T menjadi kurang negatif (>0). Reaksi-reaksi yang memiliki nilai $\Delta G_T < 0$ artinya, reaksi-reaksi tersebut dapat berlangsung secara spontan. Pada Gambar 4.6 (b) menampilkan nilai ΔG_T pada reaksi antara oksida besi dengan oksida pengotor

(CaO, SiO₂, Al₂O₃) yang membentuk fasa baru seperti, fayalit, spinel, dan kalsium-oksida besi pada persamaan (4.5) – (4.9). Artinya, fasa fayalit (Fe₂SiO₄) dan spinel (FeAl₂O₄) dapat terbentuk pada temperatur tinggi. Fasa-fasa ini bersifat stabil dan sulit direduksi lebih lanjut menjadi Fe logam, sehingga pada temperatur yang terlalu tinggi, derajat metalisasi Fe dapat menurun akibat terperangkapnya Fe dalam bentuk silikat dan spinel. Sedangkan pada Gambar 4.6(c) menunjukkan bahwa reaksi (4.10) – (4.14) merupakan tahap lanjutan, yaitu ketika sistem sudah mencapai temperatur tinggi dan gas CO melimpah, maka Fe yang masih dalam bentuk senyawa atau oksida bisa direduksi kembali menjadi Fe logam.

Tabel 4. 5 Reaksi-Reaksi yang Terjadi Selama Proses Reduksi Langsung

Persamaan	Reaksi
4.1	$C_{(s)} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$
4.2	$3Fe_2O_{3(s)} + CO_{(g)} \rightarrow 2Fe_3O_{4(s)} + CO_{2(g)}$
4.3	$Fe_3O_{4(s)} + CO_{(g)} \rightarrow 3FeO_{(s)} + CO_{2(g)}$
4.4	$FeO_{(s)} + CO_{(g)} \rightarrow Fe_{(s)} + CO_{2(g)}$
4.5	$CaO_{(s)} + Fe_2O_{3(s)} \rightarrow CaO \cdot Fe_2O_{3(s)}$
4.6	$2CaO_{(s)} + Fe_2O_{3(s)} \rightarrow 2CaO \cdot Fe_2O_{3(s)}$
4.7	$2FeO_{(s)} + SiO_{2(s)} \rightarrow Fe_2SiO_{4(s)}$
4.8	$FeO_{(s)} + SiO_{2(s)} \rightarrow FeSiO_{3(s)}$
4.9	$FeO_{(s)} + Al_2O_{3(s)} \rightarrow FeAl_2O_{4(s)}$
4.10	$CaO \cdot Fe_2O_{3(s)} + 3C_{(s)} = 2Fe_{(s)} + CaO_{(s)} + 3CO_{(g)}$
4.11	$2CaO \cdot Fe_2O_{3(s)} + 3C_{(s)} = 2Fe_{(s)} + 2CaO_{(s)} + 3CO_{(g)}$
4.12	$Fe_2SiO_{4(s)} + 2C_{(s)} = 2Fe_{(s)} + SiO_{2(s)} + 2CO_{(g)}$

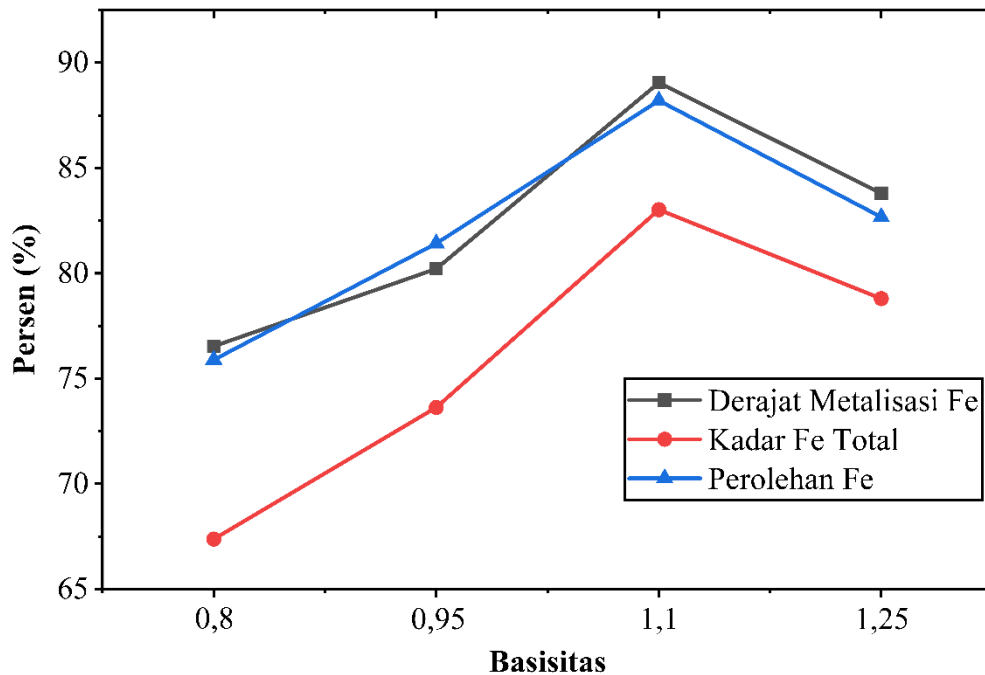
Tabel 4.5 Lanjutan

Persamaan	Reaksi
4.13	$\text{FeSiO}_{3(s)} + \text{C}_{(s)} = \text{Fe}_{(s)} + \text{SiO}_{2(s)} + \text{CO}_{(g)}$
4.14	$\text{FeAl}_2\text{O}_{4(s)} + \text{C}_{(s)} = \text{Fe}_{(s)} + \text{Al}_2\text{O}_{3(s)} + \text{CO}_{(g)}$

4.4 Pengaruh Variasi Basisitas

Variasi basisitas yang berbeda dilakukan dalam kondisi rasio C/O 1,17, waktu reduksi 60 menit, temperatur reduksi 1300°C, dan ukuran partikel pemisahan magnetik 74 µm dengan intensitas medan magnet sebesar 2400 Gauss, serta variasi basisitas, yaitu 0,8; 0,95; 1,1; dan 1,25. Gambar 4.7 merupakan hasil uji titrasi untuk menentukan pengaruh temperatur reduksi terhadap derajat metalisasi Fe, kadar Fe total, dan perolehan Fe. Pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa dengan peningkatan basisitas dari 0,8 hingga 1,1 dapat meningkatkan nilai derajat metalisasi Fe (76,54% - 89,05%), kadar Fe total (67,38% - 83,02%), dan perolehan Fe (75,89% - 90,06%). Namun, ketika basisitas dinaikkan menjadi 1,25 didapatkan nilai derajat metalisasi Fe, kadar Fe total, dan perolehan Fe menjadi turun yaitu 83,94%; 74,33%; dan 82,43%. Hal ini disebabkan oleh oksida basa, yaitu CaO bersifat melepaskan ion oksigen bebas (O^{2-}) ke dalam *slag*, menurunkan viskositas, dan mempermudah reaksi reduksi terjadi, sedangkan oksida asam seperti SiO_2 dan Al_2O_3 cenderung mengikat oksigen, dan meningkatkan viskositas *slag*, dan menghambat difusi gas reduktor [60]. CaO yang bersifat basa menggantikan FeO dari fasa kompleks seperti Fe_2SiO_4 , sehingga FeO dapat kembali direduksi menjadi Fe logam. Namun, dengan penambahan CaO yang berlebih dapat menyebabkan *slag* menjadi heterogen dan

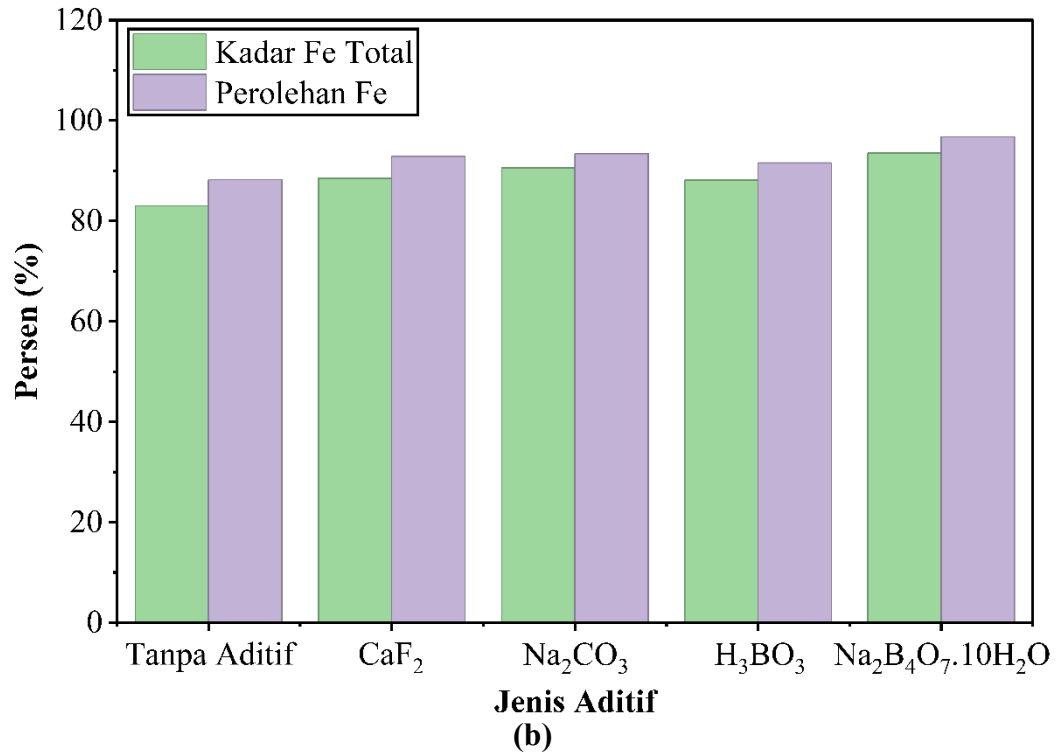
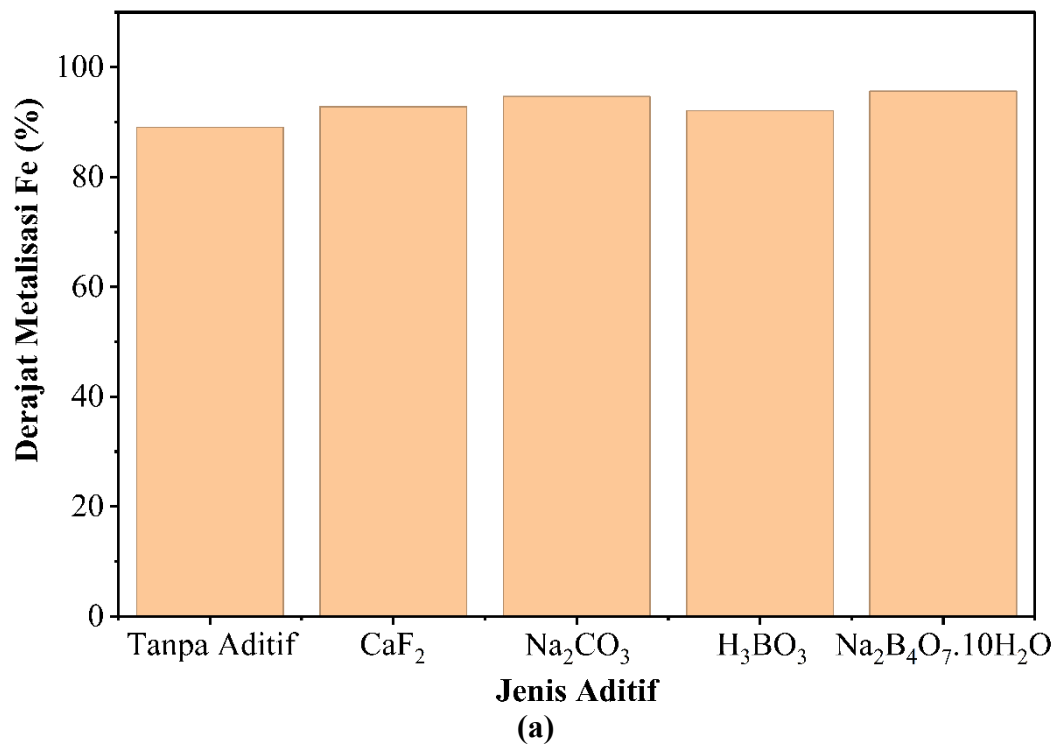
viskositasnya meningkat sehingga pemisahan Fe logam dan *slag* menjadi sulit, serta rasio perolehan Fe kembali menurun [57].



Gambar 4. 7 Pengaruh Temperatur Reduksi Terhadap Kadar Fe Total, Derajat Metalisasi Fe, dan Perolehan Fe

4.5 Pengaruh Variasi Jenis Aditif

Variasi jenis aditif yang berbeda dilakukan dalam kondisi rasio C/O 1,17, waktu reduksi 60 menit, temperatur reduksi 1350°C, basisitas 1,1 dan ukuran partikel pemisahan magnetik 74 μm dengan intensitas medan magnet sebesar 2400 Gauss, serta variasi jenis aditif yang digunakan yaitu CaF_2 , Na_2CO_3 , H_3BO_3 , dan $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Gambar 4.8 menunjukkan pengaruh penambahan berbagai jenis aditif terhadap nilai derajat metalisasi Fe, kadar Fe total, dan perolehan Fe pada proses reduksi.



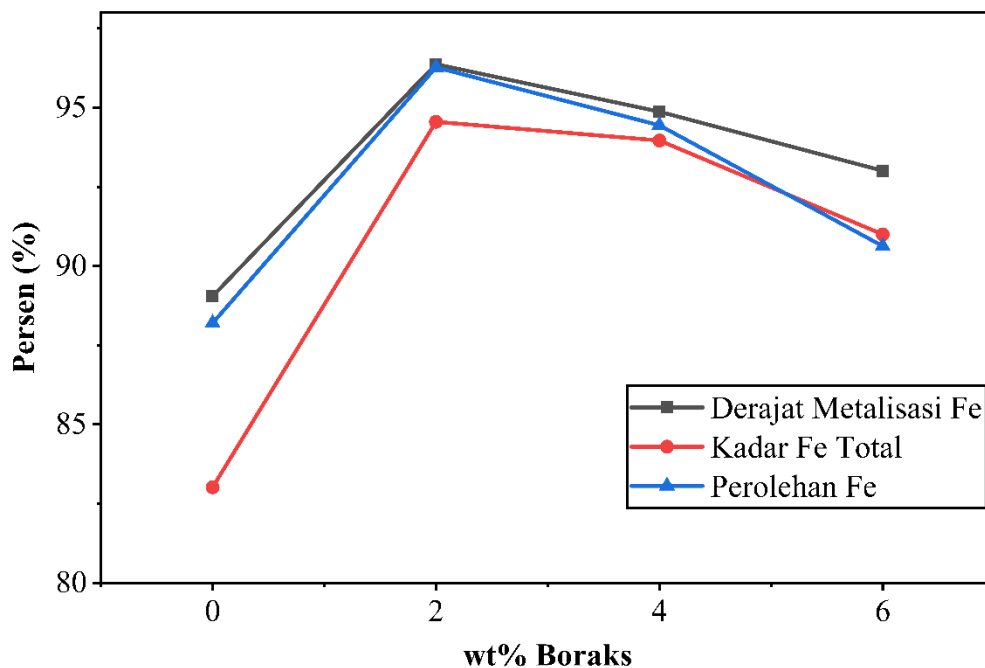
Gambar 4. 8 Pengaruh Jenis Aditif Terhadap (a) Derajat Metalisasi Fe, serta (b) Kadar Fe Total dan Perolehan Fe

Berdasarkan hasil yang diperoleh, terlihat bahwa sampel tanpa aditif memiliki nilai derajat metalisasi Fe sebesar 89,05%, kadar Fe total 83,02%, dan perolehan Fe 88,20%. Dengan adanya penambahan aditif seperti CaF_2 , Na_2CO_3 , H_3BO_3 , dan $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ masing-masing dapat meningkatkan nilai derajat metalisasi Fe menjadi (92,8%; 94,66%; 92,05%; dan 95,62%), kadar Fe total (88,52%; 90,58%; 88,1%; dan 93,49%), dan perolehan Fe (92,89%; 93,41%; 91,57; dan 96,76%). Peningkatan nilai-nilai dari parameter tersebut menunjukkan bahwa penambahan aditif berfungsi sebagai fluks yang menurunkan titik lebur *slag* [61] dan meningkatkan mobilitas ion serta perpindahan massa antara fasa padat dan gas, sehingga reaksi reduksi Fe_2O_3 menjadi Fe berlangsung lebih efisien [62][63]. Selain itu, keberadaan aditif juga mempercepat pembentukan fasa cair pada temperatur reduksi dan berperan dalam proses aglomerasi dan pertumbuhan partikel Fe logam. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa boraks merupakan aditif paling optimal dalam meningkatkan derajat metalisasi Fe, kadar Fe total, dan perolehan Fe.

Secara teoritis, efektivitas boraks disebabkan oleh perannya yang ganda, yaitu sebagai pelarut oksida logam dan sebagai penurun viskositas *slag*. Ketika dipanaskan, boraks terurai menjadi Na_2O dan B_2O_3 , komponen Na_2O menurunkan viskositas *slag* dengan membentuk senyawa kompleks dengan silika, sedangkan B_2O_3 berperan meningkatkan homogenitas fasa cair [64]. Kondisi ini memperlancar pelepasan oksigen dari FeO dan mempermudah pemisahan antara logam dan *slag*. Akibatnya, fraksi Fe logam yang terbentuk menjadi lebih dominan dan mudah dipisahkan secara magnetik pada tahap pasca reduksi. Secara keseluruhan, urutan efektivitas jenis aditif terhadap peningkatan derajat metalisasi Fe, kadar dan perolehan Fe yaitu $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{CaF}_2 > \text{H}_3\text{BO}_3$.

4.6 Pengaruh Variasi Wt% Boraks

Variasi jenis aditif yang berbeda dilakukan dalam kondisi rasio C/O 1,17, waktu reduksi 60 menit, temperatur reduksi 1350°C, basisitas 1,1 dan ukuran partikel pemisahan magnetik 74 μm dengan intensitas medan magnet sebesar 2400 Gauss, serta variasi wt% boraks yaitu 0%, 2%, 4%, dan 6%. Hasil uji titrasi ini dilakukan untuk menentukan wt% boraks terhadap derajat metalisasi Fe, kadar Fe total, dan perolehan Fe. Pada Gambar 4.9 menunjukkan bahwa penambahan boraks dari 0 wt% ke 2 wt% mengalami peningkatan, yaitu kadar Fe total (83,02% – 94,55%), perolehan Fe (88,2% – 96,27%), dan derajat metalisasi Fe (89,05% – 96,37%). Peningkatan ini menunjukkan bahwa boraks pada kadar optimal yaitu 2 wt% berperan dalam memperbaiki proses reduksi besi. Setelah melewati kadar optimal yaitu pada 4 wt% dan 6 wt%, terjadi penurunan bertahap pada nilai derajat metalisasi Fe, kadar Fe total, dan perolehan Fe.



Gambar 4. 9 Pengaruh wt% Boraks Terhadap Derajat Metalisasi Fe, Kadar Fe Total dan Perolehan Fe

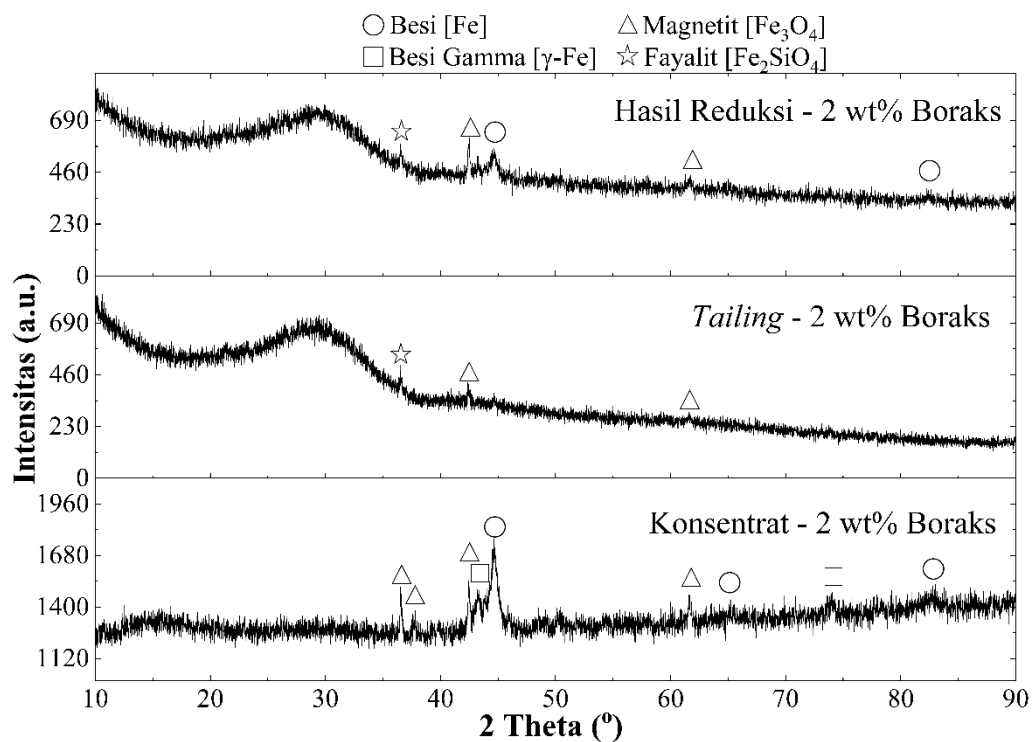
Peningkatan derajat metalisasi Fe, kadar Fe total, dan perolehan Fe pada penambahan 2 wt% boraks disebabkan boraks berperan sebagai agen fluks yang menurunkan titik leleh *slag* dan viskositas fasa cair selama proses reduksi. Hal ini mempercepat difusi gas reduktor (CO) ke dalam partikel oksida besi dan mempermudah pemisahan antara fasa logam (Fe) dan fasa *slag*. Boraks dapat terurai pada suhu 1150°C yang menghasilkan Na₂O yang kemudian bereaksi dengan SiO₂ dan Al₂O₃ untuk menggantikan FeO dalam senyawa kompleks seperti FeO•SiO₂ atau FeO•Al₂O₃ sehingga FeO dapat tereduksi lebih lanjut menjadi Fe metalik [58]. Dengan demikian, ketersediaan FeO bebas dalam sistem meningkat, yang secara langsung meningkatkan peluang terjadinya reaksi reduksi lanjutan menjadi Fe⁰. Reaksi yang terjadi sebagai berikut:



Selain itu, aditif boraks mengandung kelompok atom [BO₃], di mana ion B³⁺ menarik elektron valensi Si–O–Si dalam proses pengolahan reduksi, yang menyebabkan pemutusan beberapa ikatan Si–O–Si [65]. Hal ini menyebabkan pemisahan SiO₂ dan FeO, yang mempercepat transformasi FeO menjadi Fe. Namun, pada penambahan boraks di atas 2 wt%, derajat metalisasi Fe, kadar Fe total, dan perolehan Fe menurun kembali. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya fasa cair berlebih dari senyawa Na⁺ dan B³⁺ dengan titik leleh rendah yang melapisi permukaan partikel reduksi. Lapisan ini menghalangi difusi gas reduktor (CO) ke dalam partikel dan menghambat kontak langsung antara FeO dan karbon, sehingga reaksi reduksi FeO → Fe terhambat [58].

4.7 Analisa Fasa Mineral pada Hasil Reduksi, Konsentrat, dan *Tailing*

Proses reduksi langsung pada residu bauksit menggunakan arang cangkang sawit sebagai reduktor dan batu kapur sebagai fluks, serta penambahan 2 wt% boraks bertujuan untuk menurunkan titik leleh dan viskositas *slag* sehingga pelelehan dan pemisahan fasa logam terhadap *slag* menjadi lebih mudah. Evaluasi keberhasilan proses reduksi dan pemisahan fasa dilakukan melalui analisis fasa mineral yang terbentuk pada produk hasil reduksi. Analisis ini dilakukan untuk mengidentifikasi transformasi oksida besi menjadi fasa magnetik atau logam, serta distribusi fasa silikat dan kalsium pada *slag*. Selain itu, perbandingan pola difraksi dan fasa-fasa yang muncul antara hasil reduksi, konsentrat, dan *tailing* dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Hasil Karakterisasi XRD pada Reduksi Langsung, Konsentrat, dan *Tailing*

Berdasarkan Gambar 4. 10 pola difraksi sinar-X hasil reduksi langsung dengan penambahan 2 wt% boraks terlihat terbentuknya fasa besi metalik (Fe) dan magnetit (Fe_3O_4) sebagai fasa dominan, yang mengindikasikan bahwa proses reduksi oksida besi dari residu bauksit berlangsung secara efektif. Keberadaan puncak Fe menunjukkan bahwa sebagian oksida besi telah tereduksi hingga tingkat logam, sementara magnetit muncul sebagai fasa antara yang umum terbentuk pada kondisi reduksi berbasis karbon. Intensitas puncak magnetit yang masih teramati mengindikasikan bahwa proses reduksi belum sepenuhnya mencapai reduksi total ke besi logam. Pada pola XRD hasil reduksi langsung dan *tailing* terlihat adanya puncak lebar (*broad peak*) pada rentang sudut difraksi sekitar $20^\circ - 35^\circ$ (2θ), yang mengindikasikan keberadaan fasa amorf. Berdasarkan komposisi kimia residu bauksit dan batu kapur, fasa amorf ini terutama tersusun oleh silika (SiO_2) bersama dengan oksida lain seperti Al_2O_3 , CaO , dan TiO_2 . Oksida-oksida tersebut masuk ke dalam *slag* selama proses reduksi dan membentuk struktur kaca (*glass phase*) akibat pendinginan cepat setelah reduksi. Selain itu, terdapat juga mineral besi yang tertinggal di dalam *tailing*, yaitu besi yang tidak tereduksi sepenuhnya dalam bentuk fasa magnetit (Fe_3O_4) dan fasa fayalit (Fe_2SiO_4) yang terbentuk akibat reaksi antara oksida besi dan silika selama proses reduksi.

Pada pola XRD konsentrat, intensitas puncak Fe dan Fe_3O_4 meningkat secara signifikan dibandingkan dengan hasil reduksi awal, yang menandakan bahwa proses pemisahan magnetik berhasil memperkaya fasa besi dan fasa magnetik ke dalam fraksi konsentrat. Selain itu, terdeteksinya fasa $\gamma\text{-Fe}$ menunjukkan bahwa sebagian besi berada dalam struktur austenit akibat kondisi temperatur tinggi selama reduksi dan kemungkinan terstabilisasi oleh kandungan karbon yang berasal

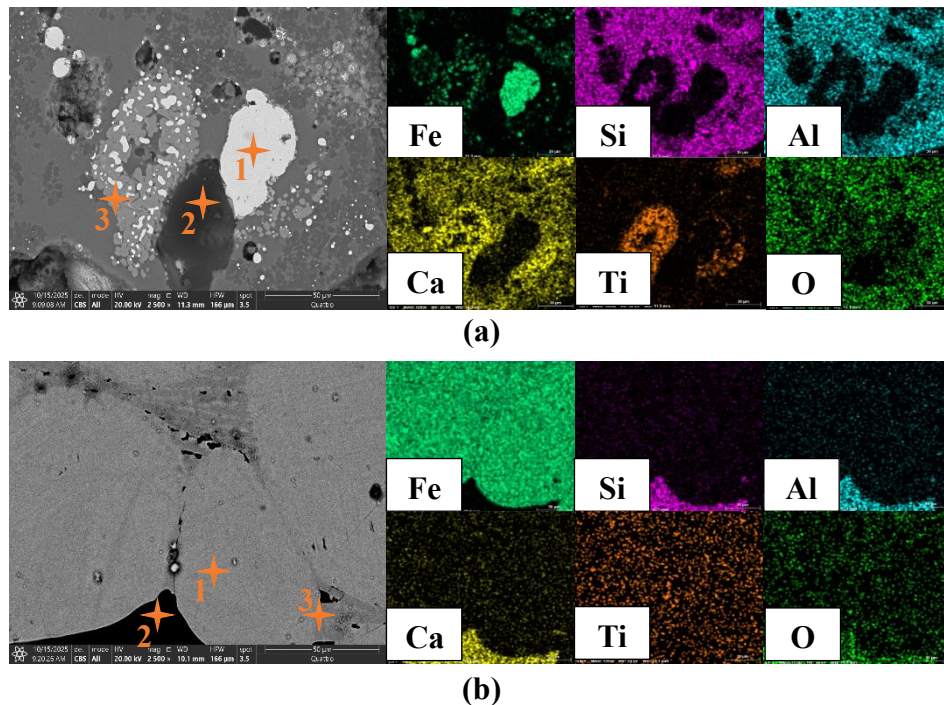
dari arang cangkang sawit. Kehadiran fasa ini juga mengindikasikan kondisi reduksi yang cukup kuat serta kontak yang baik antara reduktor dan oksida besi.

4.8 Pengaruh Boraks terhadap Morfologi pada Hasil Reduksi

Hasil karakterisasi SEM dan EDS *mapping* pada Gambar 4.11 menunjukkan gambar morfologi permukaan dan persebaran unsur dari sampel hasil reduksi residu bauksit. Gambar 4.11 (a) merupakan sampel hasil reduksi residu bauksit tanpa aditif, sedangkan Gambar 4.11 (b) merupakan sampel hasil reduksi residu bauksit dengan penambahan boraks 2 wt%. Hasil SEM tanpa aditif terlihat bahwa morfologi sampel masih tidak homogen dan terdapat banyak rongga. Adanya area berwarna putih yang menunjukkan keberadaan partikel Fe metal yang terbentuk dan area lainnya yang berwarna gelap merupakan pengotor, seperti Ca, Si, Al, dan Ti. Berdasarkan Hasil EDS *mapping* menunjukkan bahwa sebagian besar Fe masih berasosiasi dengan oksigen dan unsur pengotor lainnya. Persebaran ini menunjukkan bahwa Fe belum sepenuhnya tereduksi menjadi logam murni, tetapi masih terikat dalam bentuk fasa oksida seperti magnetit, fayalit, atau spinel. Hal ini mengindikasikan bahwa proses reduksi Fe_2O_3 masih belum berlangsung sepenuhnya akibat keterbatasan difusi dan kontak antartpartikel reduktor dengan oksida logam.

Sebaliknya, hasil SEM dengan penambahan boraks 2 wt% terlihat bahwa morfologi sampel adanya aglomerasi partikel Fe metal yang berukuran lebih besar. Hal ini menandakan bahwa penambahan boraks 2 wt% berperan dalam mempercepat proses penyatuan partikel logam Fe selama reduksi. Berdasarkan

EDS *mapping* menunjukkan bahwa unsur Fe tersebar lebih merata dan luas, menunjukkan terbentuknya partikel logam Fe yang lebih dominan. Sementara unsur Ca, Si, Al, dan Ti terlihat di daerah berbeda, menunjukkan bahwa unsur-unsur tersebut telah berpindah ke dalam fasa *slag*.



Gambar 4. 11 Morfologi SEM dan EDS Mapping pada Produk Reduksi Langsung (a) Tanpa Aditif dan (b) 2 wt% Boraks

Pada Gambar 4.11 (a) menunjukkan hasil EDS untuk *point* 1 memiliki kandungan Fe yang sangat tinggi yaitu 82,10 wt% dan sedikit unsur C yaitu 15,76 wt%, menunjukkan bahwa titik ini merupakan fasa logam Fe metal. Kandungan C kecil menunjukkan sisa reduktor yang mungkin masih melekat pada permukaan logam. Pada *point* 2 memiliki kadar Fe yang sangat rendah yaitu 2,79 wt% tetapi unsur Ca (24,54 wt%) dan Ti (39,79 wt%). Morfologi di area ini tampak gelap dan berpori, menandakan area pengotor atau *slag*. Sementara itu, *point* 3 menunjukkan kadar Fe rendah yaitu 5,34 wt% dengan kandungan Al (3,11 wt%) dan Ca (27,18 wt%). Keberadaan fasa ini menandakan bahwa sebagian besar unsur Al dan Si tidak

tereduksi dan tetap berada di fasa *slag*. Morfologi di area ini terlihat lebih gelap, sesuai dengan karakter optik mineral silikat yang umumnya non-konduktif. Fasa yang terbentuk pada *point 2* dan *point 3* ini berupa amorf yang tersusun antara mineral CaO, SiO₂, Al₂O₃, dan TiO₂, hal ini sesuai hasil XRD pada Gambar 4.10.

Pada Gambar 4.11 (b) menunjukkan hasil EDS di *point 1* bahwa kadar Fe yang meningkat signifikan yaitu 94,77 wt% dengan hanya sedikit unsur lain, menandakan bahwa area ini merupakan fasa Fe metal murni dengan tingkat reduksi yang lebih sempurna dibandingkan tanpa aditif. Hal ini menjelaskan kenapa morfologi pada area ini terlihat padat dan terang, menandakan terbentuknya butiran logam Fe berukuran besar. Pada *point 2* juga menunjukkan kadar Fe yang tinggi yaitu 90,84 wt% dengan sedikit kandungan C (7,69 wt%) dan Si (0,40 wt%), yang menunjukkan area Fe metal yang mungkin masih terlapisi sisa karbon atau oksida tipis di permukaan. Sementara itu, *point 3* menunjukkan kadar Fe yang rendah yaitu 2,70 wt% tetapi mengandung Si (12,74 wt%), Al (8,07 wt%), dan Ca (22,95 wt%), menunjukkan fasa *slag*. Titik-titik yang diberi penanda (*point 1*, *2*, dan *3*) merepresentasikan area yang dianalisis menggunakan EDS untuk mengetahui komposisi unsur dominan pada tiap fasa yang dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Hasil EDS *Point* pada Produk Reduksi Langsung

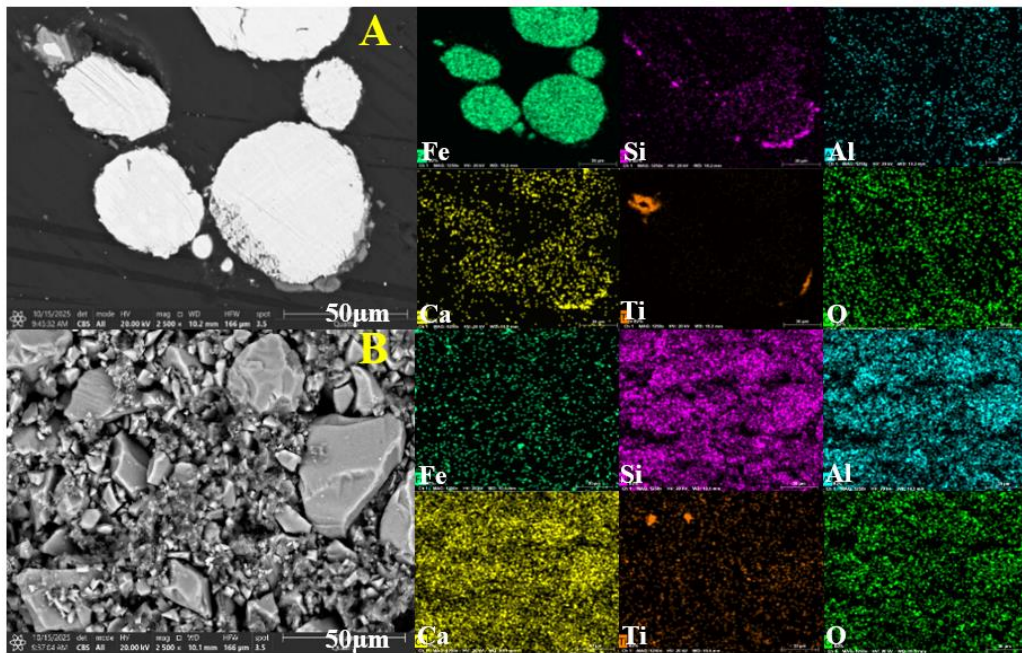
<i>Point</i>		Unsur (wt%)					
		Fe	C	Si	Al	Ca	Ti
Tanpa Aditif	1	82,10	15,76	0,16	-	0,33	0,29
	2	2,79	10,81	0,36	0,31	24,54	39,79
	3	5,34	3,93	3,03	3,11	27,18	4,61

Tabel 4. 6 Lanjutan

<i>Point</i>		Unsur (wt%)					
		Fe	C	Si	Al	Ca	Ti
Boraks 2 wt%	1	94,77	4,41	0,37	0,01	0,02	-
	2	90,84	7,69	0,40	0,06	0,15	0,14
	3	2,70	3,95	12,74	8,07	22,95	1,61

4.9 Analisa Morfologi pada Konsentrat dan *Tailing*

Gambar 4.12 memperlihatkan hasil analisa SEM dan EDS *mapping* pada sampel hasil proses pemisahan magnetik, yaitu (a) konsentrat dan (b) *tailing*. Pada Gambar 4.12 (a), morfologi menunjukkan butiran dengan bentuk bulat dan permukaan halus yang umumnya merupakan ciri dari fasa Fe logam atau oksida besi hasil reduksi yang berhasil terpisahkan dalam fraksi magnetik. Hasil pemetaan unsur EDS *mapping* memperlihatkan distribusi unsur Fe yang dominan dan homogen di area yang berwarna putih, sementara unsur Si, Al, Ti, dan Ca menunjukkan intensitas yang jauh lebih rendah dan tersebar area di pinggir Fe logam dengan warna abu gelap. Distribusi oksigen (O) tampak berikatan pada sebagian partikel yang menandakan bahwa sebagian Fe masih berada dalam bentuk oksida yaitu Fe_3O_4 . Pada Gambar 4.12 (b) menunjukkan morfologi yang jauh lebih kompleks dengan permukaan kasar, tidak teratur, dan ukuran partikel yang beragam. Hasil EDS *mapping* memperlihatkan bahwa persebaran unsur Fe tidak dominan pada *tailing*, melainkan unsur Si, Al, Ca, dan Ti yang dominan pada *tailing*. Hal ini menunjukkan bahwa fasa yang terbentuk fasa amorf. Struktur amorf merupakan kondisi zat pada yang atom-atom penyusunnya tidak tersusun secara teratur.



Gambar 4. 12 Morfologi SEM dan EDS *Mapping* pada (a) Konsentrat
(b) *Tailing*

Tabel 4. 7 Hasil EDS Spektrum pada Residu Bauksit dan *Tailing*

Residu Bauksit		<i>Tailing</i>	
Unsur	Kadar	Unsur	Kadar
LTJ		LTJ	
Sc	0,03%	Sc	0,13%
Ce	0,06%	Ce	0,12%

Tabel 4.7 merupakan Hasil EDS spektrum unsur LTJ yaitu skandium dan serium yang berada dalam residu bauksit dan *tailing*. Berdasarkan hasil EDS spektrum menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kadar LTJ dari residu bauksit ke *tailing*. Hal ini dapat terjadi karena matriks LTJ dalam residu bauksit terdistribusi sebagai unsur isomorfik dalam fasa aluminosilikat. Hal ini disebabkan oleh kemiripan radius ionik dan valensi Sc^{3+} dengan Al^{3+} sehingga Sc dapat

menggantikan posisi Al dalam kisi mineral aluminosilikat [55][66]. Sebagian kecil LTJ juga terdapat dalam bentuk teradsorpsi ionik pada permukaan partikel residu bauksit atau sebagai senyawa ionik dalam kisi mineral. Dengan kata lain, LTJ tidak hadir sebagai mineral oksida tersendiri, melainkan terdispersi di dalam struktur mineral non-magnetik (pengotor) yang sulit terlarut [26]. Proses reduksi dengan arang cangkang sawit dan batu kapur dapat mengubah oksida besi menjadi fasa magnetik (Fe^0 dan Fe_3O_4), memisahkan Fe secara magnetik, sedangkan Sc tetap di fasa non-magnetik. Fraksi *tailing* setelah pemisahan magnetik mengandung kadar Sc dan Ce masing-masing adalah 0,13% dan 0,12% sehingga dapat dimanfaatkan untuk proses lanjutan seperti pelindian asam, *extraction solvent*, dan *deep eutectic solvent* guna mengekstraksi LTJ.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Reduksi langsung dan dilanjutkan proses pemisahan magnetik didapatkan hasil yang optimal yaitu kadar Fe total 94,55%; derajat metalisasi 96,37%; dan perolehan Fe 96,27% dengan kondisi yaitu rasio C/O 1,17; waktu reduksi 60 menit; temperatur reduksi 1350°C; basisitas 1,1; dan 2 wt% boraks untuk reduksi langsung; serta 74 μm ukuran partikel dan 2400 Gauss intensitas medan magnet untuk pemisahan magnetik. Hal ini menunjukkan penambahan boraks dapat mengoptimalkan proses ekstraksi logam Fe dengan efisiensi yang tinggi (>90% ekstraksi).
2. Fasa mineral pada hasil reduksi langsung yaitu Fe, Fe_3O_4 , dan Fe_2SiO_4 , serta fasa amorf yang tersusun oleh SiO_2 bersama dengan oksida lain seperti Al_2O_3 , CaO, dan TiO_2 . Kemudian, fasa pada konsentrat didominasi oleh fasa yang bersifat magnetik yaitu Fe, Fe_3O_4 , dan $\gamma\text{-Fe}$. Sedangkan, fraksi *tailing* didominasi oleh fasa amorf dan sedikit fasa besi yaitu Fe_2SiO_4 dan Fe_3O_4 .
3. Pengaruh penambahan wt% boraks terhadap morfologi hasil reduksi langsung yaitu dengan penambahan 2wt% boraks terjadi penumpukkan dan pertumbuhan butiran Fe logam hingga 50 μm .

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Melakukan kombinasi dua jenis aditif seperti Na_2CO_3 dan Boraks atau lainnya untuk memberikan pengaruh sinergis yang mampu meningkatkan efisiensi proses reduksi dan kualitas produk logam yang dihasilkan, baik dari segi derajat metalisasi Fe, kandungan Fe total, perolehan Fe maupun morfologi hasil reduksi.
2. Melakukan variasi waktu reduksi untuk memberikan hasil reduksi paling efisien tanpa menyebabkan sintering berlebih atau kehilangan unsur akibat oksidasi ulang.
3. Melakukan penelitian lebih lanjut mengenai ekstraksi LTJ karena berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa pada fraksi *tailing* setelah proses reduksi masih terdapat unsur LTJ yang potensial untuk dimanfaatkan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai metode ekstraksi dan pemurnian LTJ dari *tailing* dengan metode Ekstraksi seperti pelindian asam, *solvent extraction*, dan *deep eutectic solvent*. Hal ini dapat mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya dalam sampel dengan cara meminimalkan kehilangan unsur berharga sehingga mendukung konsep *zero waste* dan pemanfaatan berkelanjutan terhadap limbah industri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Wang, N. Sun, H. Tang, and W. Sun, "A review on comprehensive utilization of red mud and prospect analysis," *Minerals*, vol. 9, no. 6, 2019, doi: 10.3390/min9060362.
- [2] A. Y. Al Hakim, D. Sunjaya, A. N. H. Hede, T. Indriati, and T. Hidayat, "Critical Raw Materials Associated with The Lateritic Bauxite and Red Mud In West Kalimantan, Indonesia," *Geochemistry Explor. Environ. Anal.*, vol. 23, no. 3, 2023, doi: 10.1144/geochem2022-064.
- [3] U. S. D. of the Interior and U. S. G. Survey, "Mineral Commodity Summaries 2025," 2025. doi: <https://doi.org/10.3133/mcs2025>.
- [4] M. Gräfe and C. Klauber, "Bauxite residue issues: IV. Old obstacles and new pathways for in situ residue bioremediation," *Hydrometallurgy*, vol. 108, no. 1–2, pp. 46–59, 2011, doi: 10.1016/j.hydromet.2011.02.005.
- [5] Rossalina W, Zaharah T. A, and Silalahi I. H, "Komposisi Unsur dan Karakterisasi Mineral Magnetik dalam Red Mud, Residu Bauksit di PT Indonesia Chemical Alumina (ICA) Kalimantan Barat," *Indones. J. Pure Appl. Chem.*, vol. 4, no. 3, pp. 139–144, 2021, [Online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/IJoPAC/article/view/49660/pdf>
- [6] D. R. Zhang, H. R. Chen, J. L. Xia, Z. Y. Nie, R. Y. Zhang, and E. Pakostova, "Efficient dealkalization of red mud and recovery of valuable metals by a sulfur-oxidizing bacterium," *Front. Microbiol.*, vol. 13, 2022, doi: 10.3389/fmicb.2022.973568.
- [7] C. R. Borra, B. Blanpain, Y. Pontikes, K. Binnemans, and T. Van Gerven, "Recovery of Rare Earths and Other Valuable Metals From Bauxite Residue (Red Mud): A Review," *J. Sustain. Metall.*, vol. 2, no. 4, pp. 365–386, 2016, doi: 10.1007/s40831-016-0068-2.
- [8] IISIA, "Proyeksi Kinerja Baja Nasional 2024," Association, The Indonesian

Iron & Steel Industry. Accessed: Sep. 10, 2025. [Online]. Available: <https://iisia.or.id/news/proyeksi-kinerja-baja-nasional-2024>

- [9] IISIA, “Proyeksi Kinerja Baja Nasional 2025,” Association, The Indonesian Iron & Steel Industry.
- [10] IISIA, “Chairman IISIA : Kebutuhan Baja Indonesia Diperkirakan akan Mencapai 100 Juta Ton pada Tahun 2045 | IISIA The Indonesian Iron & Steel Industry Association,” Indonesian Iron and Steel Association. Accessed: Sep. 10, 2025. [Online]. Available: <https://iisia.or.id/news/chairman-iisia-kebutuhan-baja-indonesia-diperkirakan-akan-mencapai-100-juta-ton-pada-tahun-2045>
- [11] C. M. Yasin, A. Praditya, A. I. Wardhana, Y. Ramanda, W. Ferlianta, and A. Asdriargo, “Peluang Investasi Besi Indonesia,” 2022.
- [12] A. Svobodova-Sedlackova *et al.*, “Mapping the Research Landscape of Bauxite by-Products (Red Mud): An Evolutionary Perspective from 1995 to 2022,” *Heliyon*, vol. 10, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24943.
- [13] M. Archambo and S. K. Kawatra, “Red Mud: Fundamentals and New Avenues for Utilization,” *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, vol. 42, no. 7, pp. 427–450, 2021, doi: 10.1080/08827508.2020.1781109.
- [14] R. Susana *et al.*, “Effisiensi Pemanfaatan Red Mud Dan Bokhasi Limbah Sayuran Pada Media Gambut Dalam Meningkatkan Ketersediaan Dan Serapan Hara Tanaman Lobak Efficiency of the Use of Red Mud and Vegetable Waste Bokhasi on Peat Media in Increasing Nutrien Availability and Nu,” *J. Pertan. Agros*, vol. 26, no. 1, pp. 4825–4834, 2024.
- [15] H. T. Nguyen and Q. M. Do, “Preparation of a Novel Cement from Red Mud and Limestone,” *Int. J. Eng. Res. Africa*, vol. 58, no. January, pp. 171–182, 2022, doi: 10.4028/www.scientific.net/JERA.58.171.
- [16] N. Navnage, S. Bainade, P. Patke, P. Kadu, P. Ramteke, and A. Gabhane, “Influence of Red Mud on remediation of heavy Metal Polluted Soil,” *J. Pharmacogn. Phytochem.*, vol. 8, no. 2, pp. 56–58, 2019, [Online]. Available: <https://www.phytojournal.com/special->

issue?ArticleId=7201&issue=2S&vol=8&year=2019

- [17] Y. Zhang, Y. Wang, Y. Yu, H. Hu, H. Qin, and D. Peng, “Effects of Red Mud Leachate on the Microstructure of Fly Ash-Modified Red Clay Anti-Seepage Layer under Permeation,” *Sustain.*, vol. 15, no. 20, 2023, doi: 10.3390/su152015161.
- [18] U. S. Geological Survey, “Mineral Commodity Summaries 2025,” 2025. doi: <https://doi.org/10.3133/mcs2025>.
- [19] H. Sutar, S. C. Mishra, S. K. Sahoo, A. P. Chakraverty, and S. M. Himanshu, “Progress of Red Mud Utilization: An Overview.pdf,” *Am. Chem. Sci. J.*, vol. 4, no. 3, pp. 255–279, 2014.
- [20] K. Pirkanniemi and M. Sillanpää, “Heterogeneous water phase catalysis as an environmental application: A review,” *Chemosphere*, vol. 48, no. 10, pp. 1047–1060, 2002, doi: 10.1016/S0045-6535(02)00168-6.
- [21] Y. Pontikes, “Applications - Red Mud Project.” Accessed: Jan. 08, 2025. [Online]. Available: <https://redmud.org/utilisation/applications/>
- [22] S. Eray, E. Keskinilic, Y. A. Topkaya, and A. Geveci, “Reduction Behavior of Iron in the Red Mud,” *J. Min. Metall. Sect. B Metall.*, vol. 57, no. 3, pp. 431–437, 2021, doi: 10.2298/JMMB210227039E.
- [23] R. Damayanti and H. Khareunissa, “Composition and Characteristics of Red Mud: A Case Study on Tayan Bauxite Residue from Alumina Processing Plant at West Kalimantan,” *Indones. Min. J.*, vol. 19, no. 3, pp. 179–190, 2017, doi: 10.30556/imj.vol19.no3.2016.660.
- [24] S. Agrawal and N. Dhawan, “Evaluation of Red Mud As A Polymetallic Source – A Review - ScienceDirect,” *Miner. Eng.*, vol. 171, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.10784>.
- [25] W. Ding, S. Bao, Y. Zhang, and J. Xiao, “Efficient Selective Extraction of Scandium from Red Mud,” *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, vol. 44, no. 4, pp. 304–312, 2023, doi: 10.1080/08827508.2022.2047044.

- [26] H. Habibi, M. Mokmeli, S. Shakibania, and D. Pirouzan, "Separation and recovery of titanium and scandium from the red mud.pdf," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 317, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123882>.
- [27] A. V. Boyarintsev, H. Y. Aung, S. I. Stepanov, A. A. Shoustikov, P. I. Ivanov, and V. G. Giganov, "Evaluation of Main Factors for Improvement of the Scandium Leaching Process from Russian Bauxite Residue (Red Mud) in Carbonate Media," *ACS Omega*, vol. 7, no. 1, pp. 259–273, 2022, doi: [10.1021/acsomega.1c04580](https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04580).
- [28] C. R. Borra, B. Blanpain, Y. Pontikes, K. Binnemans, and T. Van Gerven, "Recovery of Rare Earths and Major Metals from Bauxite Residue (Red Mud) by Alkali Roasting, Smelting, and Leaching," *J. Sustain. Metall.*, vol. 3, no. 2, pp. 393–404, 2017, doi: [10.1007/s40831-016-0103-3](https://doi.org/10.1007/s40831-016-0103-3).
- [29] S. Agrawal and N. Dhawan, "Microwave acid baking of red mud for extraction of titanium and scandium values.pdf," *Hydrometallurgy*, vol. 204, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105704>.
- [30] G. Power, M. Gräfe, and C. Klauber, "Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices," *Hydrometallurgy*, vol. 108, no. 1–2, pp. 33–45, 2011, doi: [10.1016/j.hydromet.2011.02.006](https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.006).
- [31] K. Evans, "The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue," *J. Sustain. Metall.*, vol. 2, no. 4, pp. 316–331, 2016, doi: [10.1007/s40831-016-0060-x](https://doi.org/10.1007/s40831-016-0060-x).
- [32] E. Pudjianto, E. Magdalena, D. P. Dewanti, S. N. Damarjati, M. Arbi, and R. M. Friccilia, *Statistik Perkebunan 2023-2025 JILID I*. Sekretariat Direktorat Jenderal Perkebunan, 2025.
- [33] N. Kamal, "Karakterisasi dan Potensi Pemanfaatan Sawit," *J. Teknol. Fak. Tek. - Univ. Pakuan*, pp. 61–68, 2012.
- [34] N. Hudaya and Hartoyo, "Pembuatan Arang Aktif dari Tempurung Biji-Bijian asal Tanaman Hutan dan Perkebunan.pdf," *J. Penelit. Has. Hutan*, vol. 8, no. 4, pp. 146–149, 1990.

- [35] W. R. Wicaksono and S. Nurhatika, "Variasi Komposisi Bahan pada Pembuatan Briket Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis*) dan Limbah Biji Kelor (*Moringa oleifera*)," *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 7, no. 2, 2019, doi: 10.12962/j23373520.v7i2.37231.
- [36] H. Harmiansyah, P. W. Dari, S. Wahyuni, S. D. Rahmawati, N. M. T. Wati, and A. K. Putri, "Karakteristik arang dari cangkang kelapa sawit sebagai bahan dasar utama pembuatan biobriket," *Sultra J. Mech. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 29–36, 2023, doi: 10.54297/sjme.v2i1.442.
- [37] T. O. R, A. Yonanda, and A. Ansyori, "Pemanfaatan Cangkang Sawit Sebagai Bahan Reduktor Terhadap Bijih Mangan," *Semin. Nas. Inov. dan Apl. Teknol. di Ind.*, pp. 361–366, 2019.
- [38] S. Alaabed *et al.*, "United Arab Emirates limestones: impact of petrography on thermal behavior," *Mineral. Petrol.*, vol. 108, no. 6, pp. 837–852, 2014, doi: 10.1007/s00710-014-0329-3.
- [39] LGS, "Why Are There Color Variations In Stone?," Lets Get Stoned. Accessed: Jan. 09, 2025. [Online]. Available: <https://lgsgranite.com/color-variations-stone/>
- [40] J. Oates, *Lime and Limestone: Chemistry and Technology, Production and Uses*. Weinheim: Wiley-VCH, 1998.
- [41] M. Megawati, A. Alimuddin, and L. Abdul Kadir, "Komposisi Kimia Batu Kapur Alam dari Industri Kapur Kabupaten Kolaka Sulawesi Tenggara," *Saintifik*, vol. 5, no. 2, pp. 104–108, 2019, doi: 10.31605/saintifik.v5i2.230.
- [42] Noviyanti, Jasruddin, and E. H. Sujiono, "Karakterisasi Klasium Karbonat ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) dari Batu Kapur Kelurahan Tellu Limpoe Kecamatan Suppa," *J. Sains dan Pendidik. Fis.*, vol. 11, no. 2, pp. 169–172, 2015, doi: <https://ojs.unm.ac.id/JSdPF/article/view/1484>.
- [43] B. Indonesia, "Harga Batu Kapur Limestone Per Kg dan Per Kubik Manfaat Batu Kapur," Builder Future Construction. Accessed: Sep. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.builder.id/harga-batu-kapur-limestone/>

- [44] W. Yang, C. Wang, B. Ma, F. Yin, and Y. Chen, "Study on the Influence of CaO on Reduction Smelting for the Laterite Ore," *Adv. Mater. Res.*, vol. 634–638, pp. 3260–3264, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.634-638.3260.
- [45] K. Sharma, "Smelting : Types , Process , Uses , Challenges , Environmental Impact," *Scien Info*. Accessed: Sep. 02, 2025. [Online]. Available: <https://scienceinfo.com/smelting-types-process-uses-challenges/>
- [46] S. Agrawal, V. Rayapudi, and N. Dhawan, "Microwave Reduction of Red Mud for Recovery of Iron Values," *J. Sustain. Metall.*, vol. 4, pp. 427–436, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0183-3>.
- [47] C. R. Borra, "Smelting of Bauxite Residue (Red Mud) in View of Iron and Selective Rare Earths Recovery," *J. Sustain. Metall.*, vol. 2, no. 1, pp. 28–37, 2016, doi: 10.1007/s40831-015-0026-4.
- [48] S. Agrawal, V. Rayapudi, and N. Dhawan, "Comparison of microwave and conventional carbothermal reduction of red mud for recovery of iron values," *Miner. Eng.*, vol. 132, pp. 202–210, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.012>.
- [49] S. Yuan, X. Liu, P. Gao, and Y. Han, "A semi-industrial experiment of suspension magnetization roasting technology for separation of iron minerals from red mud," *J. Hazard. Mater.*, vol. 394, pp. 1–10, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122579>.
- [50] R. Roasting, W. Adding, and S. Salt, "Recovery of Iron From High-Iron Red Mud by Reduction Roasting With Adding Sodium Salt," *J. Iron Steel Res.*, vol. 19, no. 8, pp. 1–5, 2012, doi: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60131-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60131-9).
- [51] Y. Yang, X. Wang, M. Wang, and H. Wang, "Iron Recovery from the Leached Solution of Red Mud Through the Application of Oxalic Acid," *Miner. Process.*, pp. 1–32, 2016, doi: 10.1016/j.minpro.2016.11.001.
- [52] P. Stratton, "Ellingham Diagrams – Their Use and Misuse," *Int. Heat Treat. Surf. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 70–73, 2013, doi:

10.1179/1749514813Z.000000000053.

- [53] DoITPMoS, “Ellingham Diagrams (all content),” University Cambridge. Accessed: Sep. 10, 2025. [Online]. Available: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ellingham_diagrams/ellingham.php
- [54] S. Yuan, W. Zhou, Y. Han, and Y. Li, “Selective Enrichment of Iron Particles from Complex Refractory Hematite-Goethite Ore by Coal-Based Reduction and Magnetic Separation,” *Powder Technol.*, vol. 367, pp. 305–316, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.004>.
- [55] J. Xiao, K. Zou, N. Zhong, and D. Gao, “Selective separation of iron and scandium from Bayer Sc-bearing red mud,” *J. Rare Earths*, no. June, 2022, doi: [10.1016/j.jre.2022.06.003](https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.06.003).
- [56] G. Ning, B. Zhang, C. Liu, S. Li, Y. Ye, and M. Jiang, “Large-Scale Consumption and Zero-Waste Recycling Method of Red Mud in Steel Making Process,” *Minerals*, vol. 8, 2018, doi: [10.3390/min8030102](https://doi.org/10.3390/min8030102).
- [57] K. Wang, Y. Liu, G. Lyu, X. Li, X. Chen, and T. Zhang, *Light Metals: Recovery of Iron from High-Iron Bayer Red Mud by Smelting Reduction*, Tomsett, A. Springer International Publishing, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36408-3>.
- [58] B. Hu, P. Hu, R. Gao, C. Hu, and F. Zheng, “Effects of Borax and Grinding Alkalinity on the Reduction – Magnetic Separation of Beach Placer,” *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 5, p. 868, 2023.
- [59] Q. Xu, Z. Li, and Z. Gu, “Experimental Investigation of the Fluidization Reduction Characteristics of Iron Particles Coated with Carbon Powder under Pressurized Conditions,” *molecules*, vol. 25, no. 8, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/molecules25081810>.
- [60] K. Wang, Y. Liu, T. A. Zhang, X. F. Li, and X. Chen, “Investigation of the smelting reduction mechanism and of iron extraction from high-iron red mud,” *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 12, 2020, doi: [10.1088/2053-1591/abd137](https://doi.org/10.1088/2053-1591/abd137).

- [61] R. Kitagawa and H. Fukaya, "Effect of Flux Addition on the Reduction of EAF Slag Containing Cr_2O_3 and MnO ," *ISIJ Int.*, vol. 65, no. 7, pp. 1038–1042, 2025, doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-393.
- [62] J. Ju, G. Ji, C. Tang, K. Yang, and Z. Zhu, "Investigation of fluoride evaporation from $\text{MgO} - \text{TiO}_2 - (\text{Li}_2\text{O})$ slag for electroslag remelting," *Sci Rep*, vol. 12284, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-69283-6.
- [63] A. Nugraha, B. Priyono, A. Maksum, H. Juna, and J. W. Soedarsono, "The effect of sodium sulfate (Na_2SO_4) and sodium carbonate (Na_2CO_3) addition on the reduction-roasting process of titania iron sand," *E3S Web Conf.*, vol. 67, pp. 2–7, 2018, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186703054>.
- [64] J. Guo, Q. Hu, J. Zou, and D. Lu, "The Viscosity of $\text{Na}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ Slags," *J. Physics Conf. Ser.*, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2557/1/012090.
- [65] R. Z. Xu, J. L. Zhang, W. X. Han, Z. Y. Chang, and K. X. Jiao, "Effect of BaO and Na_2O on the Viscosity and Structure of Blast Furnace Slag," *Ironmaking Steelmak.*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1080/03019233.2018.1498761.
- [66] A. Akcil, N. Akhmediyeva, R. Abdulvaliyev, Abhilash, and P. Meshram, "Overview On Extraction and Separation of Rare Earth Elements from Red Mud : Focus on Scandium Overview On Extraction and Separation of Rare Earth Elements from Red Mud : Focus on Scandium," *An Int. J.*, vol. 39, no. 3, pp. 145–151, 2018, doi: 10.1080/08827508.2017.1288116.

LAMPIRAN A

CONTOH PERHITUNGAN

Lampiran A. Contoh Perhitungan

A.1 Perhitungan Stoikiometri

A.1.1 Perhitungan Kebutuhan Arang Cangkang Sawit

Pada setiap reaksi kimia diperlukan kesetimbangan rumus molekul untuk senyawa kimia dengan persamaan stoikiometri. Pada proses reduksi fasa oksida besi dalam residu bauksit terdapat reaksi kimia yaitu reaksi reduksi, reaksi *Boudouard*, dan reaksi dekomposisi. Persamaan reaksi yang terjadi dalam penelitian dapat dilihat sebagai berikut:

1. $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
2. $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2 \text{CO}$
3. $2\text{FeO}(\text{OH}) \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$
4. $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$
5. $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow 3\text{FeO} + \text{CO}_2$
6. $\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$

Dari data pengujian XRD, mineral – mineral yang terkandung dalam residu bauksit dan persentasenya, antara lain:

1. Goetit $[\text{FeO}(\text{OH})] = 23,67\%$
2. Hematit $[\text{Fe}_2\text{O}_3] = 38\%$
3. Kuarsa $[\text{SiO}_2] = 11,45\%$
4. Sodalit $[\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\text{Cl}_2] = 19,48\%$
5. Gibsit $[\text{Al}(\text{OH})_3] = 7,40\%$

Apabila basis massa residu bauksit yang digunakan setiap pembuatan pelet adalah 40 gram, maka perhitungan mol untuk reaksi reduksi pada fasa *goethite* dan hematit sebagai berikut.

$$1. \text{ Massa Goetit } [\text{FeO}(\text{OH})] = 40 \text{ gram} \times 23,67\% = 9,47 \text{ gram}$$

$$\text{Mol Goetit } [\text{FeO}(\text{OH})] = \frac{\text{massa}}{\text{Mr FeO}(\text{OH})} = \frac{9,47 \text{ gram}}{90 \text{ gram/mol}} = 0,105 \text{ mol}$$

$$2. \text{ Massa Hematit } [\text{Fe}_2\text{O}_3] = 40 \text{ gram} \times 38\% = 15,20 \text{ gram}$$

$$\text{Mol Hematit } [\text{Fe}_2\text{O}_3] = \frac{\text{massa}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} = \frac{15,20 \text{ gram}}{160 \text{ gram/mol}} = 0,095 \text{ mol}$$

Tabel A. 1 Reaksi Reduksi FeO(OH) Menjadi Fe Tahap I

Tahapan Reaksi	Reaksi Reduksi	
Reaksi I	$2 \text{ FeO}(\text{OH}) \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$	
	Mol FeO(OH)	0,105
	Mol Fe ₂ O ₃	0,053
	Mol H ₂ O	0,053

Tabel A. 2 Reaksi Reduksi FeO(OH) Menjadi Fe Tahap II

Tahapan Reaksi	Reaksi Reduksi	
Reaksi II	$3 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2 \text{ Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	
	Mol Fe ₂ O ₃	0,053
	Mol CO	0,018
	Mol Fe ₃ O ₄	0,035

Mol CO ₂	0,018
---------------------	-------

Tabel A.2 (Lanjutan)

Reaksi Boudouard		Reaksi CO ₂ dengan C	
CO ₂ + C = 2 CO		CO ₂ + C = 2 CO	
Mol CO ₂	0,009	Mol CO ₂	0,018
Mol C	0,009	Mol C	0,018
Mol CO	0,018	Mol CO	0,035

Tabel A. 3 Reaksi Reduksi FeO(OH) Menjadi Fe Tahap III

Tahapan Reaksi	Reaksi Reduksi			
Reaksi III	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$			
	Mol Fe_3O_4		0,035	
	Mol CO		0,035	
	Mol FeO		0,105	
	Mol CO_2		0,035	
	Reaksi <i>Boudouard</i>		Reaksi CO_2 dengan C	
	$\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$		$\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$	
	Mol CO_2	0	Mol CO_2	0,035
	Mol C	0	Mol C	0,035
	Mol CO	0	Mol CO	0,070

Tabel A. 4 Reaksi Reduksi FeO(OH) Menjadi Fe Tahap IV

Tahapan Reaksi		Reaksi Reduksi	
Reaksi IV		$\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$	
	Mol Fe_2O_3		0,105
	Mol CO		0,105
	Mol Fe_3O_4		0,105
	Mol CO_2		0,105
Reaksi <i>Boudouard</i>		Reaksi CO_2 dengan C	
$\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$		$\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$	
Mol CO_2	0,018	Mol CO_2	0,105
Mol C	0,018	Mol C	0,105
Mol CO	0,035	Mol CO	0,210

Tabel A. 5 Reaksi Reduksi Bertahap Fe_2O_3 Menjadi Fe Tahap I

Tahapan Reaksi		Reaksi Reduksi	
Reaksi I		$3 \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	
	Mol Fe_2O_3		0,095
	Mol CO		0,032
	Mol Fe_3O_4		0,063
	Mol CO_2		0,032

Tabel A.5 (Lanjutan)

Reaksi <i>Boudouard</i>		Reaksi CO₂ dengan C	
$\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$		$\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$	
Mol CO ₂	0,016	Mol CO ₂	0,032
Mol C	0,016	Mol C	0,032
Mol CO	0,032	Mol CO	0,063

Tabel A. 6 Reaksi Reduksi Bertahap Fe₂O₃ Menjadi Fe Tahap II

Tahapan Reaksi	Reaksi Reduksi	
Reaksi II	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$	
	Mol Fe ₃ O ₄	0,063
	Mol CO	0,063
	Mol FeO	0,0190
	Mol CO ₂	0,063
	Reaksi <i>Boudouard</i>	Reaksi CO₂ dengan C
	$\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$	$\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$
	Mol CO ₂	0
	Mol C	0
	Mol CO	0
	Mol CO ₂	0,063
	Mol C	0,063
	Mol CO	0,127

Tabel A. 7 Reaksi Reduksi Bertahap Fe₂O₃ Menjadi Fe Tahap III

Tahapan Reaksi		Reaksi Reduksi	
Reaksi III		$\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$	
	Mol Fe ₂ O ₃		0,190
	Mol CO		0,190
	Mol Fe ₃ O ₄		0,190
	Mol CO ₂		0,071
Reaksi <i>Boudouard</i>		Reaksi CO ₂ dengan C	
$\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$		$\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$	
Mol CO ₂	0,032	Mol CO ₂	0,190
Mol C	0,032	Mol C	0,190
Mol CO	0,063	Mol CO	0,380

Berikut adalah perhitung rasio C/O berdasarkan total mol O pada Fe₂O₃ dari mineral goetit dan hematit, serta total mol C pada reaksi *Boudouard* dan reaksi CO₂ dengan C yang didapat pada Tabel A.1 hingga Tabel A.7.

$$\text{mol O pada Fe}_2\text{O}_3 \text{ (goetit)} = 3 \times 0,053 \text{ mol} = 0,158 \text{ mol}$$

$$\text{mol O pada Fe}_2\text{O}_3 \text{ (hematit)} = 3 \times 0,095 \text{ mol} = 0,285 \text{ mol}$$

$$\text{Total mol O} = 0,158 + 0,285 = 0,443 \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} \text{Total mol C} &= 0,009 + 0,018 + 0 + 0,035 + 0,018 + 0,105 + 0,016 + 0,032 + \\ &0 + 0,063 + 0,032 + 0,190 = 0,517 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\text{Rasio C/O}_{\text{stoikiometri}} = \frac{\text{total mol C}}{\text{total mol O}} = \frac{0,517 \text{ mol}}{0,443 \text{ mol}} = 1,17 \text{ mol}$$

Dari data analisis proksimat, kadar karbon pada arang cangkang sawit sebesar 77,64%. Kebutuhan arang cangkang sawit yang digunakan sebagai reduktor dapat dihitung sebagai berikut berikut:

$$\begin{aligned} \text{Massa arang cangkang sawit} &= \frac{\text{Ar C} \times \text{total mol C}}{\% \text{ kadar karbon}} \\ &= \frac{12 \times 0,517 \text{ mol}}{77,64\%} = 7,985 \text{ gram} \cong 8 \text{ gram} \end{aligned}$$

A.1.2 Perhitungan Kebutuhan Batu Kapur

Perhitungan kebutuhan batu kapur untuk masing-masing variasi basisitas diperlukan data kadar CaO, SiO₂, dan Al₂O₃ pada residu bauksit dan batu kapur sebagai berikut.

massa residu bauksit = 40 gram

kadar unsur residu bauksit: CaO = 1,64%; SiO₂ = 12,79%; dan Al₂O₃ = 10,99%.

kadar unsur batu kapur: CaO = 44,85%; SiO₂ = 17,38%; dan Al₂O₃ = 5,03%.

Rumus Basisitas:

$$\text{Basisitas} = \frac{\text{massa CaO (total)}}{[\text{massa Al}_2\text{O}_3(\text{total})] + [\text{massa SiO}_2(\text{total})]}$$

Basisitas =

$$\frac{\% \text{CaO (massa residu bauksit)} + \% \text{CaO (massa batu kapur)}}{[\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{SiO}_2(\text{massa residu bauksit})] + [\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{SiO}_2(\text{massa residu bauksit})]}$$

$$\text{Bs} = \frac{a + (\text{BK} \times b)}{c + (\text{BK} \times d)}$$

$$\text{BK} = \frac{(\text{Bs} \times b) - a}{c - (\text{Bs} \times d)}$$

Diketahui Bs = basisitas, BK = massa batu kapur, a = massa residu bauksit $\times$ CaO% residu bauksit, b = CaO% batu kapur, c = massa residu bauksit $\times$ (SiO₂% residu bauksit + Al₂O₃ residu bauksit), dan d = (SiO₂% batu kapur + Al₂O₃ batu kapur). Dari persamaan massa batu kapur dapat dihitung nilai a, b, c, dan d untuk mendapatkan massa batu kapur pada masing masing variasi basisitas.

$$a = 40 \text{ gram} \times 1,64\% = 0,6556 \text{ gram}$$

$$b = 44,85\% = 0,4485$$

$$c = 40 \text{ gram} \times (12,79\% + 10,99\%) = 9,5149 \text{ gram}$$

$$d = 17,38\% + 5,03\% = 0,2241$$

$$1. \text{ Basisitas} = 0,8$$

$$BK = \frac{(Bs \times b) - a}{c - (Bs \times d)} = \frac{(0,8 \times 0,4485) - 0,6556 \text{ gram}}{9,5149 \text{ gram} - (0,8 \times 0,2241)} = 25,83 \text{ gram}$$

$$2. \text{ Basisitas} = 0,95$$

$$BK = \frac{(Bs \times b) - a}{c - (Bs \times d)} = \frac{(0,95 \times 0,4485) - 0,6556 \text{ gram}}{9,5149 \text{ gram} - (0,95 \times 0,2241)} = 35,57 \text{ gram}$$

$$3. \text{ Basisitas} = 1,1$$

$$BK = \frac{(Bs \times b) - a}{c - (Bs \times d)} = \frac{(1,1 \times 0,4485) - 0,6556 \text{ gram}}{9,5149 \text{ gram} - (1,1 \times 0,2241)} = 48,56 \text{ gram}$$

$$4. \text{ Basisitas} = 1,25$$

$$BK = \frac{(Bs \times b) - a}{c - (Bs \times d)} = \frac{(1,25 \times 0,4485) - 0,6556 \text{ gram}}{9,5149 \text{ gram} - (1,25 \times 0,2241)} = 66,72 \text{ gram}$$

A.1.3 Perhitungan Penambahan Aditif

Diketahui:

Massa residu bauksit = 40 gram

wt% Aditif = 2%

Massa Aditif = 40 gram $\times$ 2% = 0,8 gram

A.2 Perhitungan Derajat Metalisasi Fe

A.2.1 Perhitungan Fe Total

Diketahui:

Normalitas $K_2Cr_2O_7 = 0,1 \text{ N} = 0,1 \text{ gram/ml}$

Volume Titran = 2,585 ml

Massa Uji Sampel = 0,1 gram

$$\text{Fe Total (\%)} = \frac{\text{Volume Titran} \times \text{Normalitas } K_2Cr_2O_7 \times 0,05585 \times 100\%}{\text{Massa Uji Sampel}}$$

$$\text{Fe Total (\%)} = \frac{2,585 \text{ ml} \times 0,1 \text{ gram/ml} \times 0,05585 \times 100\%}{0,1 \text{ gram}} = 14,44\%$$

A.2.2 Perhitungan Fe Metal

Diketahui:

Volume Titran = 4,845 ml

Massa Uji Sampel = 0,1 gram

$$\text{Fe Total (\%)} = \frac{\text{Volume Titran} \times 0,001862 \text{ gram/ml} \times 100\%}{\text{Massa Uji Sampel}}$$

$$\text{Fe Total (\%)} = \frac{4,845 \text{ ml} \times 0,001862 \text{ gram/ml} \times 100\%}{0,1 \text{ gram}} = 9,02\%$$

A.2.3 Perhitungan %Metalisasi Fe

Diketahui:

Fe Total (%) = 14,44%

Fe Metal (%) = 9,02%

$$\% \text{ Metalisasi Fe} = \frac{\text{Fe Metal (\%)}}{\text{Fe Total (\%)}} = \frac{9,02\%}{14,44\%} \times 100\% = 62,49\%$$

A.3 Perhitungan Perolehan Fe

Diketahui:

Massa Hasil Reduksi Langsung = 52,64 gram

Massa Konsentrat = 9,23 gram

Kadar Fe Total pada Reduksi Langsung (%) = 14,44%

Kadar Fe Total pada Konsentrat (%) = 60,57%

$$\text{Perolehan Fe} = \frac{\text{massa Konsentrat} \times \text{Kadar Fe Total pada Konsentrat}}{\text{massa Hasil Reduksi} \times \text{Kadar Fe Total pada Reduksi}} \times 100\%$$

$$\text{Perolehan Fe} = \frac{14,4\% \times 52,64 \text{ gram}}{60,57\% \times 9,23 \text{ gram}} \times 100\% = 73,56\%$$

LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN

Lampiran B. Data Penelitian

Tabel B. 1 Data Termodinamika Okisda Besi Menjadi Fe Metal

T(°C)	ΔG_T			
	(4.1)	(4.2)	(4.3)	(4.4)
0	124,385	-57,578	19,042	-11,796
10	122,637	-58,044	18,623	-11,666
20	120,883	-58,508	18,199	-11,530
30	119,125	-58,970	17,772	-11,388
40	117,363	-59,432	17,343	-11,240
50	115,597	-59,894	16,913	-11,088
60	113,828	-60,358	16,483	-10,930
70	112,056	-60,822	16,054	-10,768
80	110,281	-61,289	15,627	-10,601
90	108,504	-61,758	15,201	-10,430
100	106,725	-62,228	14,778	-10,256
110	104,944	-62,701	14,357	-10,078
120	103,161	-63,175	13,938	-9,896
130	101,377	-63,651	13,522	-9,711
140	99,591	-64,128	13,109	-9,523
150	97,805	-64,607	12,698	-9,332
160	96,017	-65,088	12,291	-9,138
170	94,228	-65,569	11,886	-8,941
180	92,439	-66,052	11,485	-8,742
190	90,650	-66,535	11,086	-8,541
200	88,859	-67,019	10,690	-8,337
210	87,069	-67,504	10,297	-8,132
220	85,278	-67,990	9,908	-7,924
230	83,487	-68,476	9,521	-7,714
240	81,696	-68,963	9,138	-7,503
250	79,905	-69,450	8,757	-7,289
260	78,114	-69,939	8,380	-7,075
270	76,324	-70,428	8,006	-6,858
280	74,533	-70,917	7,635	-6,640
290	72,743	-71,408	7,268	-6,421
300	70,953	-71,900	6,905	-6,200
310	69,164	-72,394	6,545	-5,979
320	67,375	-72,889	6,189	-5,756
330	65,587	-73,385	5,836	-5,532
340	63,799	-73,884	5,488	-5,307
350	62,012	-74,385	5,145	-5,081
360	60,225	-74,889	4,805	-4,854
370	58,439	-75,396	4,471	-4,626
380	56,654	-75,906	4,141	-4,398
390	54,869	-76,420	3,816	-4,169

Tabel B.1 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T			
	(4.1)	(4.2)	(4.3)	(4.4)
400	53,085	-76,938	3,497	-3,940
410	51,302	-77,460	3,184	-3,709
420	49,520	-77,988	2,876	-3,479
430	47,739	-78,521	2,574	-3,248
440	45,958	-79,060	2,279	-3,017
450	44,178	-79,605	1,991	-2,785
460	42,399	-80,157	1,710	-2,553
470	40,621	-80,717	1,436	-2,321
480	38,844	-81,285	1,170	-2,089
490	37,068	-81,861	0,912	-1,857
500	35,293	-82,447	0,662	-1,625
510	33,519	-83,043	0,421	-1,392
520	31,745	-83,649	0,190	-1,160
530	29,973	-84,266	-0,032	-0,928
540	28,201	-84,894	-0,245	-0,696
550	26,430	-85,535	-0,447	-0,465
560	24,661	-86,188	-0,638	-0,234
570	22,892	-86,855	-0,818	-0,003
580	21,124	-87,535	-0,987	0,228
590	19,357	-88,217	-1,149	0,458
600	17,591	-88,898	-1,309	0,687
610	15,826	-89,575	-1,464	0,916
620	14,062	-90,249	-1,616	1,144
630	12,299	-90,918	-1,765	1,371
640	10,537	-91,582	-1,912	1,598
650	8,776	-92,239	-2,056	1,824
660	7,016	-92,889	-2,197	2,048
670	5,257	-93,530	-2,337	2,272
680	3,498	-94,163	-2,475	2,495
690	1,741	-94,788	-2,611	2,716
700	-0,015	-95,408	-2,746	2,936
710	-1,771	-96,026	-2,879	3,155
720	-3,525	-96,644	-3,011	3,373
730	-5,279	-97,262	-3,143	3,589
740	-7,031	-97,880	-3,273	3,803
750	-8,783	-98,499	-3,403	4,016
760	-10,533	-99,117	-3,532	4,226
770	-12,283	-99,736	-3,661	4,435
780	-14,032	-100,354	-3,790	4,642
790	-15,779	-100,973	-3,918	4,848
800	-17,526	-101,592	-4,046	5,053
810	-19,272	-102,212	-4,174	5,257

Tabel B.1 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T			
	(4.1)	(4.2)	(4.3)	(4.4)
820	-21,017	-102,832	-4,303	5,460
830	-22,761	-103,452	-4,431	5,662
840	-24,504	-104,072	-4,560	5,864
850	-26,246	-104,692	-4,688	6,066
860	-27,987	-105,312	-4,818	6,266
870	-29,728	-105,932	-4,947	6,467
880	-31,467	-106,551	-5,078	6,667
890	-33,205	-107,170	-5,208	6,866
900	-34,943	-107,788	-5,340	7,066
910	-36,679	-108,406	-5,471	7,264
920	-38,415	-109,023	-5,604	7,456
930	-40,150	-109,639	-5,737	7,647
940	-41,884	-110,255	-5,872	7,838
950	-43,617	-110,870	-6,007	8,030
960	-45,349	-111,484	-6,142	8,221
970	-47,080	-112,097	-6,279	8,414
980	-48,810	-112,710	-6,417	8,606
990	-50,540	-113,321	-6,555	8,799
1000	-52,268	-113,931	-6,695	8,993
1010	-53,996	-114,541	-6,835	9,187
1020	-55,723	-115,149	-6,977	9,381
1030	-57,449	-115,757	-7,119	9,575
1040	-59,174	-116,363	-7,263	9,770
1050	-60,898	-116,968	-7,408	9,965
1060	-62,621	-117,572	-7,554	10,161
1070	-64,344	-118,175	-7,701	10,356
1080	-66,065	-118,777	-7,849	10,552
1090	-67,786	-119,378	-7,998	10,749
1100	-69,506	-119,978	-8,148	10,946
1110	-71,225	-120,576	-8,300	11,143
1120	-72,943	-121,174	-8,453	11,340
1130	-74,661	-121,770	-8,606	11,538
1140	-76,378	-122,366	-8,761	11,736
1150	-78,093	-122,960	-8,917	11,934
1160	-79,808	-123,553	-9,075	12,132
1170	-81,523	-124,145	-9,233	12,331
1180	-83,236	-124,736	-9,393	12,530
1190	-84,948	-125,326	-9,553	12,729
1200	-86,660	-125,914	-9,715	12,929
1210	-88,371	-126,502	-9,878	13,129
1220	-90,081	-127,089	-10,042	13,329
1230	-91,791	-127,675	-10,208	13,529

Tabel B.1 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T			
	(4.1)	(4.2)	(4.3)	(4.4)
1240	-93,499	-128,260	-10,374	13,729
1250	-95,207	-128,844	-10,541	13,930
1260	-96,914	-129,427	-10,710	14,131
1270	-98,620	-130,009	-10,880	14,332
1280	-100,326	-130,590	-11,050	14,534
1290	-102,030	-131,170	-11,222	14,735
1300	-103,734	-131,750	-11,395	14,937
1310	-105,437	-132,328	-11,569	15,139
1320	-107,140	-132,906	-11,743	15,341
1330	-108,841	-133,483	-11,919	15,544
1340	-110,542	-134,060	-12,096	15,746
1350	-112,242	-134,636	-12,274	15,949
1360	-113,942	-135,211	-12,453	16,152
1370	-115,640	-135,785	-12,633	16,355
1380	-117,338	-136,359	-12,955	16,606
1390	-119,035	-136,932	-13,574	16,955
1400	-120,732	-137,505	-14,196	17,330
1410	-122,427	-138,077	-14,818	17,675
1420	-124,122	-138,649	-15,443	18,020
1430	-125,817	-139,220	-16,069	18,366
1440	-127,510	-139,791	-16,696	18,712
1450	-129,203	-140,362	-17,325	19,058
1460	-130,895	-140,932	-17,956	19,405
1470	-132,586	-141,502	-18,587	19,751
1480	-134,277	-142,072	-19,220	20,098
1490	-135,967	-142,641	-19,855	20,445
1500	-137,656	-143,211	-20,491	20,793
1510	-139,345	-143,780	-21,128	21,140
1520	-141,032	-144,349	-21,766	21,488
1530	-142,720	-144,918	-22,405	21,835
1540	-144,406	-145,487	-23,046	22,168
1550	-146,092	-146,054	-23,688	22,440
1560	-147,777	-146,618	-24,331	22,711
1570	-149,461	-147,180	-24,975	22,983
1580	-151,145	-147,738	-25,620	23,254
1590	-152,828	-148,293	-26,266	23,526
1600	-154,510	-149,310	-26,681	23,797
1610	-156,192	-151,337	-26,591	24,068
1620	-157,873	-153,361	-26,502	24,339
1630	-159,553	-155,383	-26,413	24,610
1640	-161,233	-157,403	-26,325	24,881
1650	-162,912	-159,421	-26,238	25,152

Tabel B.1 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T			
	(4.1)	(4.2)	(4.3)	(4.4)
1660	-164,590	-161,436	-26,151	25,423
1670	-166,268	-163,449	-26,066	25,694
1680	-167,945	-165,459	-25,981	25,964
1690	-169,621	-167,468	-25,897	26,235
1700	-171,297	-169,474	-25,814	26,505
1710	-172,972	-171,478	-25,731	26,775
1720	-174,646	-173,479	-25,650	27,046
1730	-176,320	-175,479	-25,569	27,316
1740	-177,993	-177,476	-25,489	27,586
1750	-179,665	-179,471	-25,409	27,856
1760	-181,337	-181,464	-25,331	28,126
1770	-183,008	-183,455	-25,253	28,395
1780	-184,679	-185,443	-25,176	28,665
1790	-186,349	-187,429	-25,099	28,934
1800	-188,018	-189,414	-25,024	29,204
1660	-164,590	-161,436	-26,151	25,423
1670	-166,268	-163,449	-26,066	25,694
1680	-167,945	-165,459	-25,981	25,964
1690	-169,621	-167,468	-25,897	26,235
1700	-171,297	-169,474	-25,814	26,505
1710	-172,972	-171,478	-25,731	26,775
1720	-174,646	-173,479	-25,650	27,046
1730	-176,320	-175,479	-25,569	27,316
1740	-177,993	-177,476	-25,489	27,586
1750	-179,665	-179,471	-25,409	27,856
1760	-181,337	-181,464	-25,331	28,126
1770	-183,008	-183,455	-25,253	28,395
1780	-184,679	-185,443	-25,176	28,665
1790	-186,349	-187,429	-25,099	28,934
1800	-188,018	-189,414	-25,024	29,204

Tabel B. 2 Data Termodinamika Pembentukan Oksida Pengotor

T(°C)	ΔG_T				
	(4.5)	(4.6)	(4.7)	(4.8)	(4.9)
0	-26,888	-47,778	-32,159	-15,307	-51,721
10	-27,078	-48,025	-32,112	-15,279	-51,702
20	-27,271	-48,274	-32,060	-15,249	-51,681
30	-27,468	-48,525	-32,004	-15,218	-51,658
40	-27,667	-48,778	-31,944	-15,186	-51,635
50	-27,868	-49,032	-31,880	-15,153	-51,610

Tabel B.2 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T				
	(4.5)	(4.6)	(4.7)	(4.8)	(4.9)
60	-28,070	-49,289	-31,812	-15,119	-51,585
70	-28,273	-49,546	-31,742	-15,085	-51,560
80	-28,476	-49,805	-31,670	-15,050	-51,533
90	-28,678	-50,065	-31,594	-15,015	-51,506
100	-28,881	-50,326	-31,517	-14,979	-51,479
110	-29,083	-50,588	-31,438	-14,944	-51,451
120	-29,284	-50,851	-31,357	-14,907	-51,423
130	-29,484	-51,114	-31,274	-14,871	-51,394
140	-29,683	-51,379	-31,190	-14,835	-51,364
150	-29,880	-51,644	-31,105	-14,798	-51,334
160	-30,076	-51,909	-31,018	-14,761	-51,303
170	-30,271	-52,176	-30,930	-14,724	-51,271
180	-30,463	-52,442	-30,840	-14,687	-51,238
190	-30,654	-52,709	-30,750	-14,650	-51,205
200	-30,843	-52,976	-30,659	-14,613	-51,170
210	-31,029	-53,244	-30,566	-14,576	-51,134
220	-31,214	-53,511	-30,473	-14,539	-51,098
230	-31,396	-53,779	-30,379	-14,501	-51,060
240	-31,577	-54,046	-30,284	-14,463	-51,021
250	-31,755	-54,314	-30,188	-14,426	-50,981
260	-31,930	-54,581	-30,091	-14,388	-50,940
270	-32,103	-54,848	-29,993	-14,350	-50,897
280	-32,274	-55,115	-29,895	-14,311	-50,853
290	-32,442	-55,382	-29,796	-14,273	-50,808
300	-32,608	-55,648	-29,696	-14,234	-50,762
310	-32,771	-55,914	-29,595	-14,195	-50,714
320	-32,931	-56,179	-29,493	-14,155	-50,665
330	-33,089	-56,443	-29,391	-14,116	-50,614
340	-33,244	-56,707	-29,287	-14,076	-50,562
350	-33,396	-56,970	-29,183	-14,035	-50,509
360	-33,546	-57,233	-29,078	-13,994	-50,454
370	-33,692	-57,494	-28,972	-13,953	-50,398
380	-33,836	-57,755	-28,865	-13,912	-50,341
390	-33,977	-58,014	-28,758	-13,869	-50,282
400	-34,114	-58,273	-28,650	-13,827	-50,222
410	-34,249	-58,530	-28,540	-13,784	-50,161
420	-34,381	-58,787	-28,430	-13,740	-50,098
430	-34,510	-59,041	-28,319	-13,696	-50,035
440	-34,636	-59,295	-28,207	-13,651	-49,970
450	-34,758	-59,547	-28,094	-13,605	-49,904
460	-34,877	-59,798	-27,980	-13,559	-49,837
470	-34,993	-60,047	-27,865	-13,512	-49,769

Tabel B.2 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T				
	(4.5)	(4.6)	(4.7)	(4.8)	(4.9)
480	-35,106	-60,295	-27,750	-13,464	-49,700
490	-35,216	-60,541	-27,633	-13,416	-49,630
500	-35,322	-60,785	-27,515	-13,367	-49,559
510	-35,425	-61,027	-27,396	-13,317	-49,487
520	-35,524	-61,267	-27,276	-13,266	-49,415
530	-35,620	-61,506	-27,155	-13,215	-49,342
540	-35,713	-61,742	-27,033	-13,162	-49,268
550	-35,801	-61,976	-26,910	-13,109	-49,194
560	-35,886	-62,208	-26,786	-13,054	-49,119
570	-35,968	-62,437	-26,660	-12,999	-49,042
580	-36,045	-62,664	-26,527	-12,935	-48,965
590	-36,118	-62,888	-26,391	-12,871	-48,888
600	-36,188	-63,109	-26,256	-12,806	-48,809
610	-36,253	-63,328	-26,121	-12,741	-48,730
620	-36,314	-63,543	-25,985	-12,677	-48,650
630	-36,371	-63,756	-25,850	-12,612	-48,569
640	-36,423	-63,965	-25,715	-12,548	-48,488
650	-36,471	-64,171	-25,579	-12,483	-48,406
660	-36,513	-64,373	-25,444	-12,419	-48,323
670	-36,552	-64,571	-25,309	-12,355	-48,239
680	-36,585	-64,766	-25,173	-12,291	-48,155
690	-36,613	-64,957	-25,038	-12,227	-48,070
700	-36,638	-65,145	-24,903	-12,163	-47,985
710	-36,661	-65,333	-24,767	-12,100	-47,898
720	-36,683	-65,519	-24,632	-12,036	-47,812
730	-36,703	-65,706	-24,497	-11,973	-47,724
740	-36,722	-65,892	-24,362	-11,910	-47,636
750	-36,739	-66,078	-24,228	-11,847	-47,547
760	-36,756	-66,263	-24,093	-11,784	-47,458
770	-36,771	-66,448	-23,958	-11,721	-47,368
780	-36,785	-66,633	-23,824	-11,658	-47,277
790	-36,799	-66,818	-23,690	-11,596	-47,186
800	-36,812	-67,004	-23,556	-11,534	-47,095
810	-36,824	-67,189	-23,414	-11,464	-47,003
820	-36,836	-67,374	-23,262	-11,384	-46,910
830	-36,847	-67,560	-23,110	-11,303	-46,817
840	-36,858	-67,746	-22,958	-11,223	-46,723
850	-36,868	-67,932	-22,806	-11,143	-46,628
860	-36,877	-68,117	-22,654	-11,063	-46,534
870	-36,886	-68,303	-22,502	-10,983	-46,438
880	-36,895	-68,489	-22,351	-10,903	-46,343
890	-36,903	-68,676	-22,200	-10,824	-46,246

Tabel B.2 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T				
	(4.5)	(4.6)	(4.7)	(4.8)	(4.9)
900	-36,910	-68,862	-22,049	-10,744	-46,150
910	-36,917	-69,048	-21,898	-10,665	-46,053
920	-36,924	-69,235	-21,747	-10,586	-45,955
930	-36,930	-69,421	-21,597	-10,507	-45,857
940	-36,936	-69,608	-21,447	-10,428	-45,759
950	-36,941	-69,794	-21,297	-10,350	-45,660
960	-36,946	-69,981	-21,148	-10,271	-45,560
970	-36,950	-70,167	-20,998	-10,193	-45,461
980	-36,954	-70,354	-20,849	-10,115	-45,361
990	-36,958	-70,541	-20,701	-10,038	-45,260
1000	-36,962	-70,727	-20,552	-9,960	-45,159
1010	-36,965	-70,914	-20,404	-9,883	-45,058
1020	-36,968	-71,101	-20,256	-9,806	-44,957
1030	-36,970	-71,287	-20,109	-9,729	-44,855
1040	-36,972	-71,474	-19,962	-9,652	-44,753
1050	-36,974	-71,660	-19,815	-9,576	-44,650
1060	-36,976	-71,847	-19,669	-9,500	-44,547
1070	-36,977	-72,033	-19,523	-9,424	-44,444
1080	-36,978	-72,220	-19,377	-9,348	-44,341
1090	-36,979	-72,406	-19,232	-9,273	-44,237
1100	-36,979	-72,592	-19,087	-9,198	-44,133
1110	-36,979	-72,779	-18,943	-9,123	-44,028
1120	-36,979	-72,965	-18,799	-9,049	-43,924
1130	-36,979	-73,151	-18,655	-8,974	-43,819
1140	-36,979	-73,336	-18,512	-8,900	-43,713
1150	-36,978	-73,522	-18,369	-8,827	-43,608
1160	-36,977	-73,707	-18,227	-8,753	-43,502
1170	-36,976	-73,893	-18,085	-8,680	-43,396
1180	-36,974	-74,078	-17,944	-8,608	-43,290
1190	-36,973	-74,263	-17,803	-8,535	-43,184
1200	-36,971	-74,448	-17,663	-8,463	-43,077
1210	-36,969	-74,633	-17,523	-8,392	-42,971
1220	-37,268	-74,817	-17,579	-8,320	-42,864
1230	-37,995	-75,001	-18,060	-8,249	-42,757
1240	-38,725	-75,185	-18,542	-8,179	-42,649
1250	-39,457	-75,369	-19,025	-8,109	-42,542
1260	-40,192	-75,553	-19,508	-8,039	-42,434
1270	-40,928	-75,736	-19,991	-7,969	-42,327
1280	-41,666	-75,919	-20,476	-7,900	-42,219
1290	-42,407	-76,102	-20,961	-7,831	-42,111
1300	-43,149	-76,285	-21,446	-7,763	-42,003
1310	-43,894	-76,467	-21,932	-7,695	-41,894

Tabel B.2 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T				
	(4.5)	(4.6)	(4.7)	(4.8)	(4.9)
1320	-44,641	-76,649	-22,419	-7,628	-41,786
1330	-45,389	-76,831	-22,906	-7,561	-41,677
1340	-46,140	-77,013	-23,394	-7,494	-41,569
1350	-46,892	-77,194	-23,883	-7,428	-41,460
1360	-47,647	-77,375	-24,372	-7,362	-41,352
1370	-48,403	-77,555	-24,862	-7,296	-41,243
1380	-49,161	-77,735	-25,258	-7,184	-41,087
1390	-49,922	-77,915	-25,458	-6,974	-40,832
1400	-50,684	-78,095	-25,657	-6,763	-40,577
1410	-51,447	-78,274	-25,857	-6,553	-40,321
1420	-52,213	-78,452	-26,057	-6,343	-40,066
1430	-52,980	-78,631	-26,257	-6,134	-39,810
1440	-53,750	-78,809	-26,458	-5,925	-39,554
1450	-54,521	-79,087	-26,659	-5,715	-39,297
1460	-55,293	-80,144	-26,860	-5,507	-39,041
1470	-56,068	-81,204	-27,062	-5,298	-38,784
1480	-56,844	-82,267	-27,264	-5,090	-38,527
1490	-57,622	-83,333	-27,466	-4,882	-38,270
1500	-58,401	-84,403	-27,669	-4,674	-38,013
1510	-59,183	-85,475	-27,872	-4,467	-37,755
1520	-59,966	-86,551	-28,076	-4,260	-37,498
1530	-60,750	-87,630	-28,280	-4,054	-37,240
1540	-61,536	-88,712	-28,484	-3,848	-36,983
1550	-62,323	-89,796	-28,690	-3,642	-36,725
1560	-63,111	-90,882	-28,895	-3,436	-36,467
1570	-63,899	-91,970	-29,101	-3,231	-36,209
1580	-64,687	-93,061	-29,308	-3,026	-35,951
1590	-65,477	-94,153	-29,515	-2,822	-35,693
1600	-66,266	-95,246	-29,723	-2,618	-35,434

Tabel B. 3 Data Termodinamika Reduksi Lanjutan dari Oksida Pengotor

T(°C)	ΔG_T				
	(4.10)	(4.11)	(4.12)	(4.13)	(4.14)
0	369,954	390,844	257,338	127,896	164,310
10	364,722	385,670	254,053	126,249	162,672
20	359,490	380,493	250,766	124,602	161,034
30	354,258	375,315	247,478	122,955	159,395
40	349,026	370,137	244,188	121,308	157,757
50	343,794	364,959	240,898	119,662	156,120
60	338,564	359,782	237,608	118,017	154,483
70	333,334	354,607	234,319	116,373	152,848

Tabel B.3 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T				
	(4.10)	(4.11)	(4.12)	(4.13)	(4.14)
80	328,105	349,435	231,030	114,730	151,213
90	322,879	344,265	227,742	113,089	149,580
100	317,654	339,098	224,456	111,449	147,948
110	312,431	333,935	221,171	109,810	146,318
120	307,210	328,776	217,888	108,173	144,688
130	301,991	323,621	214,607	106,537	143,060
140	296,774	318,470	211,327	104,903	141,433
150	291,561	313,324	208,051	103,271	139,807
160	286,349	308,183	204,776	101,640	138,182
170	281,141	303,046	201,504	100,012	136,558
180	275,935	297,914	198,234	98,384	134,935
190	270,733	292,788	194,967	96,759	133,313
200	265,533	287,666	191,703	95,135	131,692
210	260,336	282,550	188,441	93,513	130,071
220	255,142	277,439	185,181	91,893	128,452
230	249,951	272,333	181,925	90,274	126,833
240	244,764	267,233	178,671	88,657	125,215
250	239,579	262,138	175,419	87,041	123,597
260	234,398	257,049	172,171	85,427	121,980
270	229,219	251,964	168,925	83,815	120,363
280	224,044	246,885	165,681	82,204	118,746
290	218,872	241,812	162,440	80,595	117,130
300	213,703	236,743	159,202	78,987	115,515
310	208,537	231,680	155,966	77,380	113,899
320	203,375	226,622	152,732	75,775	112,284
330	198,215	221,569	149,501	74,171	110,669
340	193,058	216,521	146,272	72,568	109,054
350	187,904	211,478	143,045	70,966	107,440
360	182,753	206,440	139,820	69,365	105,825
370	177,605	201,407	136,597	67,766	104,211
380	172,459	196,378	133,377	66,167	102,596
390	167,317	191,355	130,158	64,569	100,982
400	162,177	186,335	126,941	62,973	99,368
410	157,039	181,321	123,726	61,376	97,753
420	151,905	176,310	120,512	59,781	96,139
430	146,773	171,304	117,300	58,186	94,525
440	141,643	166,302	114,090	56,592	92,911
450	136,515	161,304	110,881	54,998	91,297
460	131,390	156,311	107,673	53,405	89,683
470	126,267	151,321	104,466	51,812	88,069
480	121,146	146,335	101,260	50,220	86,455
490	116,027	141,352	98,055	48,627	84,841

Tabel B.3 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T				
	(4.10)	(4.11)	(4.12)	(4.13)	(4.14)
500	110,911	136,373	94,851	47,035	83,227
510	105,796	131,398	91,648	45,443	81,614
520	100,683	126,425	88,446	43,851	80,000
530	95,571	121,456	85,244	42,259	78,387
540	90,461	116,491	82,042	40,667	76,773
550	85,353	111,528	78,841	39,074	75,159
560	80,246	106,568	75,640	37,481	73,546
570	75,141	101,610	72,439	35,888	71,931
580	70,036	96,655	69,230	34,287	70,317
590	64,933	91,702	66,021	32,685	68,702
600	59,831	86,752	62,813	31,084	67,087
610	54,729	81,804	59,605	29,483	65,472
620	49,628	76,858	56,398	27,883	63,856
630	44,528	71,913	53,191	26,283	62,240
640	39,428	66,970	49,985	24,683	60,623
650	34,329	62,029	46,778	23,083	59,005
660	29,230	57,089	43,572	21,483	57,387
670	24,131	52,150	40,366	19,884	55,768
680	19,031	47,212	37,159	18,284	54,148
690	13,932	42,275	33,952	16,684	52,527
700	8,832	37,339	30,745	15,085	50,906
710	3,732	32,403	27,537	13,484	49,283
720	-1,369	27,467	24,328	11,884	47,659
730	-6,472	22,531	21,117	10,283	46,034
740	-11,575	17,595	17,906	8,682	44,408
750	-16,680	12,659	14,693	7,079	42,780
760	-21,786	7,721	11,479	5,477	41,151
770	-26,894	2,783	8,262	3,873	39,520
780	-32,004	-2,156	5,044	2,269	37,888
790	-37,113	-7,094	1,826	0,664	36,255
800	-42,223	-12,032	-1,392	-0,940	34,621
810	-47,332	-16,968	-4,617	-2,551	32,987
820	-52,441	-21,903	-7,853	-4,174	31,353
830	-57,549	-26,836	-11,088	-5,795	29,718
840	-62,656	-31,769	-14,322	-7,417	28,083
850	-67,763	-36,699	-17,556	-9,038	26,448
860	-72,868	-41,628	-20,788	-10,658	24,813
870	-77,972	-46,555	-24,019	-12,278	23,178
880	-83,075	-51,480	-27,249	-13,897	21,542
890	-88,176	-56,403	-30,478	-15,515	19,907
900	-93,276	-61,325	-33,706	-17,133	18,272
910	-98,375	-66,244	-36,932	-18,750	16,638

Tabel B.3 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T				
	(4.10)	(4.11)	(4.12)	(4.13)	(4.14)
920	-103,487	-71,176	-40,171	-20,373	14,996
930	-108,598	-76,106	-43,409	-21,996	13,354
940	-113,706	-81,034	-46,645	-23,617	11,713
950	-118,811	-85,958	-49,877	-25,237	10,072
960	-123,914	-90,879	-53,107	-26,856	8,433
970	-129,014	-95,797	-56,334	-28,473	6,795
980	-134,111	-100,712	-59,558	-30,089	5,157
990	-139,206	-105,623	-62,780	-31,703	3,520
1000	-144,298	-110,532	-65,998	-33,315	1,884
1010	-149,387	-115,438	-69,214	-34,927	0,249
1020	-154,473	-120,340	-72,427	-36,536	-1,385
1030	-159,557	-125,240	-75,638	-38,145	-3,019
1040	-164,638	-130,137	-78,845	-39,751	-4,651
1050	-169,717	-135,031	-82,050	-41,357	-6,283
1060	-174,793	-139,922	-85,252	-42,961	-7,913
1070	-179,867	-144,810	-88,452	-44,563	-9,543
1080	-184,938	-149,696	-91,648	-46,165	-11,172
1090	-190,007	-154,579	-94,842	-47,764	-12,801
1100	-195,073	-159,459	-98,034	-49,363	-14,428
1110	-200,136	-164,337	-101,222	-50,960	-16,054
1120	-205,197	-169,212	-104,408	-52,555	-17,680
1130	-210,256	-174,085	-107,591	-54,149	-19,305
1140	-215,313	-178,955	-110,772	-55,742	-20,929
1150	-220,366	-183,822	-113,950	-57,333	-22,552
1160	-225,418	-188,687	-117,125	-58,923	-24,174
1170	-230,467	-193,550	-120,298	-60,511	-25,795
1180	-235,514	-198,410	-123,468	-62,098	-27,416
1190	-240,558	-203,268	-126,635	-63,684	-29,035
1200	-245,600	-208,123	-129,800	-65,268	-30,654
1210	-250,640	-212,977	-132,962	-66,851	-32,272
1220	-255,377	-217,828	-135,927	-68,432	-33,889
1230	-259,682	-222,676	-138,463	-70,012	-35,505
1240	-263,983	-227,523	-140,998	-71,591	-37,121
1250	-268,279	-232,367	-143,529	-73,168	-38,735
1260	-272,571	-237,209	-146,058	-74,744	-40,349
1270	-276,858	-242,049	-148,585	-76,319	-41,961
1280	-281,140	-246,887	-151,108	-77,892	-43,573
1290	-285,419	-251,723	-153,630	-79,464	-45,184
1300	-289,692	-256,557	-156,148	-81,034	-46,795
1310	-293,962	-261,389	-158,665	-82,603	-48,404
1320	-298,227	-266,218	-161,178	-84,171	-50,013
1330	-302,488	-271,046	-163,689	-85,737	-51,620

Tabel B.3 Lanjutan

T(°C)	ΔG_T				
	(4.10)	(4.11)	(4.12)	(4.13)	(4.14)
1340	-306,745	-275,872	-166,198	-87,302	-53,227
1350	-310,998	-280,696	-168,704	-88,866	-54,833
1360	-315,246	-285,519	-171,207	-90,428	-56,438
1370	-319,491	-290,339	-173,708	-91,989	-58,042
1380	-323,731	-295,157	-176,207	-93,548	-59,646
1390	-327,968	-299,974	-178,703	-95,106	-61,248
1400	-332,151	-304,740	-181,147	-96,639	-62,825
1410	-336,390	-309,564	-183,648	-98,199	-64,431
1420	-340,625	-314,386	-186,147	-99,759	-66,036
1430	-344,857	-319,206	-188,644	-101,317	-67,641
1440	-349,085	-324,025	-191,138	-102,873	-69,244
1450	-353,309	-328,742	-193,631	-104,429	-70,847
1460	-357,530	-332,679	-196,121	-105,984	-72,449
1470	-361,747	-336,611	-198,608	-107,537	-74,051
1480	-365,961	-340,538	-201,094	-109,089	-75,652
1490	-370,172	-344,460	-203,577	-110,640	-77,252
1500	-374,379	-348,378	-206,058	-112,189	-78,851
1510	-378,583	-352,290	-208,537	-113,737	-80,449
1520	-382,784	-356,198	-211,014	-115,284	-82,047
1530	-386,981	-360,101	-213,488	-116,830	-83,644
1540	-391,206	-364,030	-215,992	-118,391	-85,256
1550	-395,550	-368,077	-218,615	-120,011	-86,927
1560	-399,891	-372,119	-221,236	-121,629	-88,599
1570	-404,229	-376,157	-223,855	-123,247	-90,270
1580	-408,564	-380,191	-226,473	-124,864	-91,940
1590	-412,897	-384,221	-229,089	-126,480	-93,610
1600	-417,228	-388,247	-231,703	-128,095	-95,279

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan

C.1 Gambar Alat-Alat Proses



Gambar C. 1 *Autotitrator*



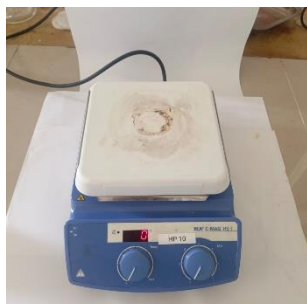
Gambar C. 2 *Davis Tube*



Gambar C. 3 *Disc Mill*



Gambar C. 4 *Divider Sampling*



Gambar C. 5 *Hot Plate*



Gambar C. 6 *Muffle Furnace*



Gambar C. 7 *Oven*



Gambar C. 8 *Sieve Shaker*



Gambar C. 9 *V-Homogenizer*

C.2 Gambar Alat-Alat Pendukung



Gambar C. 10 Ayakan 200# dan 300#



Gambar C. 11 Baskom Kotak



Gambar C. 12 Bata Tahan Api



Gambar C. 13 Batang Pengambil
Stirrer Bar



Gambar C. 14 Botol Semprot



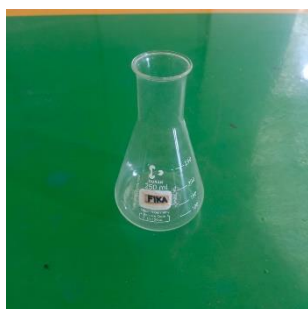
Gambar C. 15 Cawan Keramik 50 ml



Gambar C. 16 Corong



Gambar C. 17 Desikator



Gambar C. 18 Erlenmeyer 250 ml



Gambar C. 19 *Face Shield*



Gambar C. 20 Gelas Beker 100 ml
dan 300 ml



Gambar C. 21 Kertas Saring



Gambar C. 22 Kertas Timbang



Gambar C. 23 Krusibel Grafit



Gambar C. 24 Kuas



Gambar C. 25 Labu Ukur 100 ml dan 1000 ml



Gambar C. 26 Media Pendingin



Gambar C. 27 Mesin *Polishing Grinding*



Gambar C. 28 *Mounting Cup*



Gambar C. 29 Neraca Digital



Gambar C. 30 Palu



Gambar C. 31 Pipet Pump



Gambar C. 32 Pipet Tetes



Gambar C. 33 Pipet Ukur 2 ml



Gambar C. 34 Piring Keramik



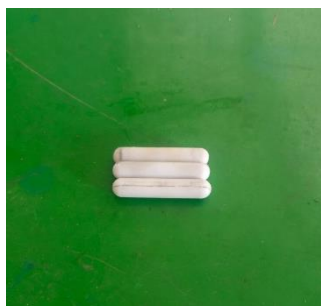
Gambar C. 35 Sarung Tangan



Gambar C. 36 *Shield Quartz*



Gambar C. 37 Spatula



Gambar C. 38 *Stirrer Bar*



Gambar C. 39 Tang Krusibel

C.3 Gambar Bahan Baku



Gambar C. 40 Arang Cangkang Sawit

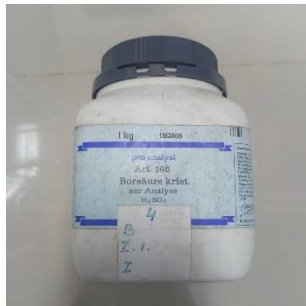


Gambar C. 41 Batu Kapur



Gambar C. 42 Residu Bauksit

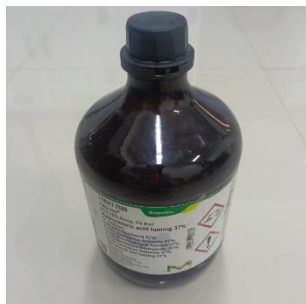
C.4 Gambar Bahan Kimia



Gambar C. 43 Asam Borat (H₃BO₃)



Gambar C. 44 Asam Fosfat



Gambar C. 45 Asam Klorida



Gambar C. 46 Asam Sulfida



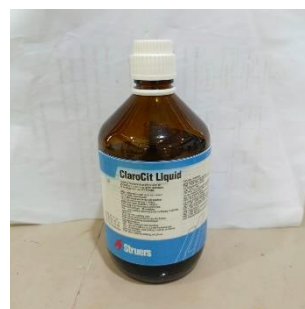
Gambar C. 47 *Barium Diphenylamine Sulphonate Indicator*



Gambar C. 48 *Besi (III) Klorida Hexahidrat*



Gambar C. 49 *Boraks*



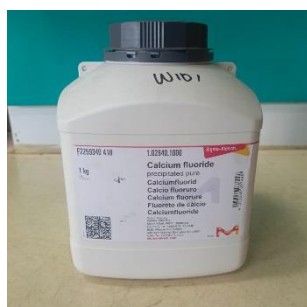
Gambar C. 50 *Clarocit Liquid*



Gambar C. 51 *Clarocit Powder*



Gambar C. 52 *Kalium Dikromat*



Gambar C. 53 *Kalsium Fluorida*



Gambar C. 54 *Merkuri (II) Klorida*



Gambar C. 55 Natrium Karbonat



Gambar C. 56 Natrium Sulfat



Gambar C. 57 Timah (II) Klorida

C.5 Gambar Bahan Hasil Proses



Gambar C. 58 Hasil Reduksi
Langsung



Gambar C. 59 Konsentrat



Gambar C. 60 Tailing