

**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

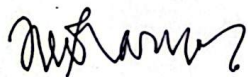
**EKSTRAKSI LOGAM BESI DARI RESIDU BAUKSIT
DENGAN METODE REDUKSI LANGSUNG DAN
PEMISAHAN MAGNETIK MENGGUNAKAN
ADITIF BORAKS ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)**

SKRIPSI

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

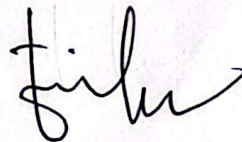
Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh :

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 Titrasi	50
Gambar 3. 16 Proses Uji Fe Metal Sebelum dan Sesudah Proses Titrasi	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.

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.