



TUGAS AKHIR–TL184834

**REVIEW PENGARUH REDUKTAN PADA REDUKSI
LANGSUNG PASIR BESI DAN BIJIH BESI LOKAL**

**AMRI ILHAM AZIZ
NRP. 0251164000072**

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

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



TUGAS AKHIR–TL184834

REVIEW PENGARUH REDUKTAN PADA REDUKSI LANGSUNG PASIR BESI DAN BIJIH BESI LOKAL

AMRI ILHAM AZIZ
NRP. 0251164000072

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

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT–TL184834

**REVIEW : EFFECT OF REDUCTOR IN DIRECT
REDUCTION LOCAL IRON SAND AND IRON ORE**

AMRI ILHAM AZIZ
NRP. 0251164000072

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

Materials And Metallurgical Engineering Department
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(This page is intentionally left blank)

**REVIEW PENGARUH REDUKTAN PADA REDUKSI
LANGSUNG PASIR BESI DAN BIJIH BESI LOKAL**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

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

Oleh:

AMRI ILHAM AZIZ

NRP 02511640000072

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

REVIEW PENGARUH REDUKTAN PADA REDUKSI LANGSUNG PASIR BESI DAN BIJIH BESI LOKAL

Nama : Amri Ilham Aziz
NRP : 0251164000072
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
PembimbingI : Dian Mughni Fellicia S.T., M.Sc
PembimbingII : Fakhreza Abdul S.T., M.T

Abstrak

Pemanfaatan pasir besi dan bijih besi lokal sebagai bahan mentah pembuatan besi dan baja belum optimal. Secara umum pasir besi diolah dengan metode reduksi langsung untuk meningkatkan kadar besi. Reduksi berlangsung pada temperatur di bawah titik leleh dengan bantuan reduktan. Hasilnya berupa sponge iron yang digunakan sebagai pengganti besi scrap pada industri besi dan baja. Review penelitian ini menganalisis pengaruh reduktan arang dan batu bara terhadap kadar Fe total pada hasil reduksi. Penelitian ini menggunakan data sekunder dari beberapa penelitian yang sudah ada kemudian dilakukan analisis berdasarkan teori. Bahan penelitian yang digunakan berasal dari dalam negeri seperti Solok, Lampung, dan beberapa kabupaten di Pulau Jawa. Reduksi menggunakan alat yang berbeda-beda diantaranya muffle furnace, burner las asitelin, dan rotary kiln. Dengan temperature reduksi di atas 900°C Reduksi menggunakan arang didapatkan hasil kenaikan kadar Fe rata-rata 12,67%, sedangkan untuk batu bara kenaikan rata-rata Fe sebesar 15,66%. Dalam review penelitian ini, batu bara lebih baik dalam mereduksi besi oksida karena kenaikan kadar Fe total yang lebih tinggi.

Kata Kunci: *pasir besi, bijih besi, reduksi langsung, reduktan*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

REVIEW : EFFECT OF REDUCTANT IN DIRECT REDUCTION LOCAL IRON SAND AND IRON ORE

Student Name : Amri Ilham Aziz
NRP : 0251164000072
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Dian Mughni Fellicia S.T., M.Sc
Co-Supervisor : Fakhreza Abdul, S.T., M.T.

Abstract

The utilization of local iron sand and iron ore as raw material is not optimum yet. Commonly iron sand processed with a direct reduction method to the increasing level of Fe. Reduction occurs at a temperature under a melting point conducted with a reductant. Product is sponge iron that use to substitute iron scrap in the iron and steel industry. This paper, review analysis effect of charcoal and coal as reductant towards total Fe content in reduction product. This paper using secondary data from another paper that already did, then analyzed based on theory. Raw materials used domestic materials such as Solok, Lampung, Jepara, Sukabumi, Lumajang, Kendal, Batang and Pemalang. Sub-bituminous coal form Binuang, South Borneo, and coal are from Jombang and Semarang. Reduction using a different machine such as muffle furnace, asetilin burner, and rotary kiln. Reduction temperature above 900oC. Reduction using charcoal known that the escalation of Fe content is the average 12,67%. Meanwhile, reduction using coal escalate of Fe content about 15,66% on average. In this review, coal is better than charcoal as a reduction agent due to the increase of Fe content was higher.

Keywords: *iron sand, iron ore, direct reduction, reductant*

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb. Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT, karena atas nikmat Nya penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir yang berjudul “Review Pengaruh Reduktan Pada Reduksi Langsung Bijih Besi” sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.

Penulis merasa bahwa dalam menyusun laporan ini menemui beberapa kendala, disamping itu juga menyadari bahwa penulisan laporan ini masih jauh dari sempurna. Penyusunan laporan ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada:

1. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing tugas akhir. Dengan bimbingan dan arahannya serta memberikan banyak masukan, kritik, dan saran bagi penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Fakhreza Abdul, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing 2 tugas akhir yang telah memberikan banyak masukan, kritik, dan saran bagi penulis.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari para pembaca. Penulis mengharapkan semoga laporan ini bermanfaat bagi para pembacanya.

Surabaya, Juli 2020

Penulis

Amri Ilham Aziz

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Review.....	3
1.5 Manfaat Review.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pasir Besi.....	5
2.2 Bijih Besi.....	6
2.3 Sponge Iron.....	6
2.4 Direct Reduction Iron.....	7
2.5 Batu bara.....	8
2.6 Arang.....	10
2.7 Termodinamika Reduksi Besi.....	11
2.8 Kinetika Reaksi Besi.....	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir.....	19
3.2 Bahan Penelitian.....	20
3.2.1 Pasir Besi.....	20
3.2.2 Bijih Besi.....	21
3.2.3 Batu Bara.....	21
3.2.4 Arang.....	22
3.2.5 Batu Kapur.....	22
3.2.6 Tepung Tapioka.....	23
3.3 Alat Penelitian.....	23

3.3.1	Muffle Furnace	23
3.3.2	Burner Las Asetilin	25
3.3.3	Rotary Kiln	25
3.4	Pengujian Karakterisasi.....	25
3.4.1	AAS	25
3.4.2	EDX.....	26
3.4.3	XRF	26
3.4.4	Proximate Analysis.....	27
3.5	Metode Review Penelitian	27
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		
4.1	Analisis Data.....	31
4.1.1	Proximate Analysis.....	32
4.2	Pembahasan.....	32
4.2.1	Pengaruh Reduktan Arang.....	34
4.2.2	Pengaruh Reduktan Batu bara	38
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	45
5.2	Saran	45
DAFTAR PUSTAKA		47
LAMPIRAN		55
UCAPAN TERIMA KASIH		57
BIODATA PENULIS		59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Ellingham.....	14
Gambar 2.2	Kesetimbangan komposisi gas terhadap fungsi temperatur pada sistem besi karbon-oksigen.....	15
Gambar 3.1	Diagram alir	20
Gambar 3.2	Pasir besi Sukabumi	21
Gambar 3.3	Batu bara <i>sub-bituminus</i>	22
Gambar 3.4	Arang kayu	22
Gambar 3.5	Batu kapur	23
Gambar 3.6	Tepung tapioka.....	23
Gambar 3.7	<i>Muffle furnace</i>	24
Gambar 3.8	<i>Crucible</i>	24
Gambar 4.1	Grafik pengaruh reduktan arang	35
Gambar 4.2	Grafik pengaruh reduktan batu bara.....	41

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Referensi Penelitian.....	28
Tabel 4.1 Data sekunder dari referensi penelitian	31
Tabel 4.2 Hasil <i>proximate analysis</i> dalam penelitian Abdul.....	32
Tabel 4.3 Kenaikan Fe hasil reduksi menggunakan arang	35
Tabel 4.4 Hasil Pengujian AAS Pasir Besi	36
Tabel 4.5 Kenaikan Fe hasil reduksi menggunakan batu bara	41
Tabel 4.6 Hasil uji XRF batu kapur.....	42

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri baja adalah salah satu pilar pembangunan bangsa. Industri ini memiliki peran utama dalam memasok bahan baku untuk pembangunan, mulai dari infrastruktur, alat transportasi, manufaktur, hingga pertahanan dan persenjataan negara. Akan tetapi, konsumsi baja Indonesia masih tergolong rendah di kawasan Asia Tenggara, yakni, 52 kg per kapita per tahun. Angka tersebut tergolong rendah jika dibandingkan negara tetangga seperti Singapura memiliki tingkat konsumsi baja per kapita tertinggi dengan 488 kg, disusul oleh Malaysia 299 kg per kapita, Thailand 239 kg per kapita, Vietnam 227 kg per kapita, Filipina 94 kg per kapita (SEAFI, 2017). Selain tingkat konsumsi yang rendah, produksi baja Indonesia juga tergolong rendah, hanya 5,19 juta ton pada 2019. Sementara itu, target produksi besi dan baja nasional mencapai 17 juta ton per tahun dan akan terus meningkat seiring pesatnya pembangunan infrastruktur (Kemenperin, 2019).

Salah satu permasalahan industri besi dan baja adalah *feed* yang digunakan berupa besi *scrap* memiliki harga yang mahal, sehingga dibutuhkan alternatif bahan baku yang lebih murah yaitu pasir besi dan bijih besi. Salah satu proses pengolahan mineral besi yang banyak digunakan adalah metode reduksi langsung atau *Direct Reduction Iron* (DRI). DRI adalah proses reduksi langsung besi oksida dibawah titik lelehnya menggunakan reduktan gas alam atau reduktan padat misalnya batu bara. Karakteristik dan komposisi bahan baku merupakan hal yang sangat sensitif dalam proses DRI. Bahan baku proses DRI terdiri dari bijih besi, *reducing agent* (batu bara, kokas, arang,

minyak bumi, gas bumi, hidrogen), dan *flux agent* (batu kapur). Menurut standar IS 15774: 2007, *sponge iron* hasil DRI harus memiliki derajat metalisasi lebih dari 82% dan kandungan besi total diatas 72%. Hal ini dikarenakan *sponge iron* akan digunakan pada proses *steelmaking* untuk berbagai aplikasi (Pangestu, 2018).

Penelitian terkait reduksi langsung berbahan bijih besi maupun pasir besi sudah banyak dilakukan, baik menggunakan *muffle furnace* atau *rotary kiln*. Variasi yang digunakan pada penelitian beragam, mulai dari jenis reduktan, bentuk dan dimensi briket, *binder agent*, temperatur dan waktu yang digunakan untuk mereduksi. Akan tetapi, hasilnya belum maksimal dikarenakan belum sesuai standar *sponge iron* yang baik.

Permasalahan bahan baku lokal dimana kadar Fe dalam bijih besi dan pasir besi tergolong rendah. Proses DRI bisa menjadi peluang karena dapat meningkatkan kadar Fe. Oleh karena itu, akan dilakukan review penelitian reduksi pasir besi lokal menggunakan reduktan arang dan batu bara. Dengan harapan hasil penelitian ini dapat menjadi acuan pengembangan proses pengolahan bijih besi dalam skala besar, seperti proses *tunnel kiln* atau *rotary kiln*. Sehingga dapat mengisi industri yang masih kosong dalam rantai pengolahan pasir besi dari hulu ke hilir.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan latar belakang di atas, dapat diambil rumusan masalah dalam review ini, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh reduktan arang terhadap kadar Fe total pada produk hasil proses reduksi langsung pasir besi dan bijih besi?
2. Bagaimana pengaruh reduktan batu bara terhadap kadar Fe total pada produk hasil proses reduksi langsung pasir besi dan bijih besi?

1.3 Batasan Masalah

Agar diperoleh hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah pada review penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Temperatur tahan dan tekanan udara sekitar dianggap konstan.
2. Pengaruh *binder* pada reaksi reduksi diabaikan.
3. Komposisi *raw material* pada briket dianggap sesuai perhitungan neraca massa

1.4 Tujuan Review

Dengan adanya beberapa rumusan masalah yang telah tertulis di atas, terdapat tujuan review sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh reduktan arang terhadap kadar Fe total pada produk hasil proses reduksi langsung pasir besi dan bijih besi.
2. Menganalisis pengaruh reduktan batu bara terhadap kadar Fe total pada produk hasil proses reduksi langsung pasir besi dan bijih besi.

1.5 Manfaat Review

Review ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap perkembangan teknologi dalam bidang metalurgi ekstraksi di Indonesia. Terutama dalam proses pengolahan pasir besi lokal menjadi *sponge iron* sebagai bahan baku industri besi dan baja serta dapat menjadi acuan untuk proses produksi skala besar menggunakan *tunnel kiln*. Sehingga meningkatkan produktivitas dan tingkat konsumsi besi dan baja nasional.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pasir Besi

Pasir besi berasal dari batuan yang mengandung mineral besi seperti magnetit, ilmenit, dan oksida besi yang kemudian hancur akibat cuaca, air permukaan dan gelombang. Partikel batuan yang hancur terbawa sampai ke laut kemudian secara alamiah dipisahkan oleh gelombang laut dan terakumulasi dalam endapan pasir besi di pantai. Tempat pengendapan pasir besi secara umum terjadi pada pantai yang landai, antara lain di sepanjang pantai barat Sumatera, pantai selatan Jawa dan Bali, pantai-pantai Sulawesi, Nusa Tenggara Timur, Maluku dan pantai utara Papua. Pasir besi pada umumnya berwarna abu-abu gelap atau kehitaman. Mengandung mineral utama berupa magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), dan ilmenit ($\text{FeTiO}_3/\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$) dengan pengotor berupa senyawa fosfor dan sulfur, serta mineral bebas lainnya dalam jumlah kecil. Rata-rata kadar Fe pada pasir besi di tiap daerah di Indonesia berbeda-beda sekitar 20-50%. (Rianna, 2018)

Pengolahan pasir besi menggunakan metode reduksi langsung adalah metode yang paling banyak digunakan. Reduksi langsung berarti mereaksikan mineral besi oksida secara langsung di bawah titik lelehnya, menggunakan reduktan gas alam atau reduktan padat berupa batu bara (C). Reduktan ini akan mereduksi besi oksida menjadi besi. Hasil proses reduksi langsung berupa besi spons (*sponge iron*) dengan derajat metalisasi 60-75% yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan besi dan baja. Dalam industri, pengolahan pasir besi dimulai dari reduksi langsung kemudian pelelehan *sponge iron* dan pemisahan *slag*

menggunakan *Electric Arc Furnace*. Reduksi langsung atau (Direct Reduction Iron) (Aguntoro, 2015).

2.2 Bijih Besi

Kelimpahan besi mencapai 32.07% dari masa Bumi dan kelimpahan mencapai 5% di kerak Bumi (J.W. Morgan., 1980). Bijih besi sering ditemukan di batuan sedimen. Mereka terbentuk karena reaksi kimia antara besi dan beberapa unsur yang lain. Secara umum di alam besi berikatan dengan oksigen, sulfur, dan silika membentuk senyawa masing-masing. Dengan oksigen terbentuk senyawa oksida, yaitu, Hematit (Fe_2O_3), Magnetit (Fe_3O_4), dan Goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$), dengan silika membentuk senyawa Greenalite ($\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), dengan sulfur membentuk senyawa Pyrite (FeS_2). Bijih besi hematit dapat dilihat secara kasat mata memiliki ciri berwarna kecoklatan, sementara bijih besi magnetik berwarna kehitaman. Hal ini menandakan kandungan besi yang lebih banyak pada bijih besi magnetik (Deer.W.A., 1992). Di antara senyawa besi tersebut, senyawa yang paling banyak ditemukan yaitu senyawa oksida Hematit dan Magnetit. Secara kimia bijih besi terdiri dari besi oksida dengan sejumlah kecil pengotor (*gangue*). Pengotor utama dalam bijih besi antara lain SiO_2 , Al_2O_3 , S, P, MgO, dan CaO, serta beberapa mineral berharga lain dalam jumlah sangat kecil seperti Nikel dan Kromium. *Mineral gangue* penting untuk diketahui kadar nya sebagai acuan dalam perhitungan kebutuhan massa pada proses pengolahan (Lu. L, 2015).

2.3 Sponge Iron

Sponge iron digunakan sebagai bahan baku industri baja. *Sponge iron* akan dilelehkan dalam *Electric Arc Furnaces*, sebagai pengganti besi *scrap*. *Sponge iron* diproduksi dari bijih

besi, kemudian dipanaskan atau direduksi dengan reduktan gas alam atau padatan menggunakan batu bara. Akan tetapi harga gas alam yang tinggi menyebabkan produsen baja lebih memilih batu bara sebagai reduktan. Bijih besi oksida (Hematit dan Magnetit) dibentuk menjadi pellet dengan campuran arang atau batu bara dengan komposisi sesuai perhitungan stoikiometri. Pellet bijih besi dipanaskan sampai dibawah titik leleh Fe, yaitu kurang dari 1500°C. Reduksi langsung bijih besi menghasilkan sponge iron yang memiliki Fe metal dan fasa pengotor yang lain seperti oksida besi sisa, fosfor, sulfur, alumina dan silica. (Suharto, 2014).

Menurut standar IS 15774: 2007 *sponge iron* harus memiliki derajat metalisasi di atas 82% dan kadar besi di atas 72%. Standar tersebut harus dipenuhi karena *sponge iron* digunakan sebagai bahan baku pembuatan besi dan baja. Maka dari itu proses reduksi langsung harus memiliki *recovery* yang baik.

2.4 Direct Reduction Iron

Direct Reduction Iron (DRI) adalah proses metalurgi pada pembuatan besi dari besi oksida secara langsung pada fase padat tanpa melalui fase cair seperti yang terjadi pada *blast furnaces* atau proses pelelehan lainnya. Besi oksida ditemukan dalam bentuk batuan mineral, paling banyak ditemukan adalah hematit (Fe_2O_3) dan magnetit (Fe_3O_4). Besi oksida hematit akan direduksi menjadi magnetit, kemudian menjadi wustit (FeO), dan hasil akhir logam besi. Proses DRI dapat dilakukan menggunakan reduktan gas alam atau padatan berupa batu bara. (Zevgolis, 2010). Karakteristik bahan baku dari iron ore, batu bara sebagai reduktan, dan batu kapur sebagai fluks akan sangat menentukan hasil akhir dari proses DRI. Menurut standar IS 15774: 2007

proses DRI harus memiliki derajat metalisasi lebih dari 82% dan *sponge iron* yang dihasilkan memiliki kandungan besi total di atas 72 % (Aguntoro, 2015).

Teknologi DRI atau reduksi langsung telah berkembang sejak awal abad ke-19 sebagai upaya menghasilkan besi secara langsung dari pasir besi atau bijih besi, dengan menghindari temperatur terlalu tinggi yang dibutuhkan untuk mencairkan besi. DRI dianggap lebih efisien karena temperatur yang digunakan lebih rendah, yakni di bawah titik leleh besi sehingga energi yang dibutuhkan lebih sedikit. Kemudian dari hasilnya juga lebih baik karena dapat meningkatkan kadar besi (Jamali. A, 2012). Hasilnya berupa *sponge iron* masih dalam bentuk padatan dan secara fisik pada permukaannya terlihat rongga-rongga atau porositas, dan bagian dalamnya berupa logam besi (Feinman, 1999). Proses pengolahan DRI menjadi produk lainnya seperti *pig iron* yang telah dikembangkan salah satunya dengan menggunakan *midrex technologies*. Proses ini dikembangkan mulai dari besispons yang diolah lebih lanjut di dalam sebuah tungku dapur listrik (*Electric Arc Furnace*). Di dalam dapur besi spons dicampur dengan besi tua (*scrap*), dan paduan ferro untuk diubah menjadi batangan baja, biasa disebut billet (Atsushi Masaki, 2010).

2.5 Batu bara

Batu bara sudah dan akan terus menjadi sumber daya energi karena kelimpahan dan harganya yang relatif murah terutama sebagai bahan pembangkit listrik. Batu bara merupakan sumber energi tak terbarukan, terbentuk dari endapan tumbuhan dan mendapat pengaruh kombinasi tekanan dan panas selama jutaan tahun sehingga membentuk lapisan batu bara. Oleh karena itu batu bara termasuk dalam kategori bahan bakar fosil. Proses

awalnya endapan tumbuan berubah menjadi gambut dan kemudian menjadi batu bara muda (*lignite*) atau disebut juga batu bara coklat (*brown coal*). Semakin tua usia batu bara umumnya semakin tinggi kadar karbon nya (Riaza. J, 2014)

Pada proses pembuatan sponge iron batu bara digunakan sebagai bahan bakar dan agen reduksi. Sifat dan kandungan batu bara sangat penting dalam proses DRI. Komposisi batu bara pada proses DRI tergantung pada stoikiometri reaksi, kadar *fixed carbon*, dan hilangnya *fixed carbon*. Dalam proses DRI pada rotary kiln, biaya konsumsi batu bara diperkirakan mencapai 75%. Semakin tinggi kualitas nya semakin mahal harga nya. Kualitas batu bara ditentukan dengan hasil *proximate analysis*. Analisis ini meliputi parameter karbon tetap (*fixed carbon*), zat terbang (*volatile matter*), abu (*ash*) dan kadar air (*moisture*) atau kadar air total (*total moisture*) dan atau kadar air inherent (*inherent moisture*) yang dinyatakan dalam persen berat (Aryono., 2006).

Menurut ASTM D388-05 Standar Classification of Coal. Berdasarkan dari mutu atau tingkatannya batu bara dikelompokkan menjadi kelas:

1. *Lignite*, adalah jenis batu bara muda, berwarna coklat kehitaman, memiliki kadar karbon rendah (25-35%), kadar air tinggi (sampai 45%), dan kandungan sulfur tinggi dan cenderung hancur bila terkena kondisi cuaca buruk, nilai kalori (ash free basis) kurang dari 5700 kkal/kg.
2. *Sub-bitumine*, batu bara jenis ini memiliki warna lebih hitam dibanding *lignite*, yang mempunyai kandungan karbon di bawah 86%, kandungan air (20-30%), zat terbang, dan oksigen yang tinggi, nilai kalorinya antara 5000 kkal/kg sampai dengan 6000 kkal/kg.

3. *Bitumine*, batu bara jenis ini merupakan batu bara yang berwarna hitam dengan tekstur yang lembut dan padat. Memiliki kadar karbon di atas 86% dan kadar moisture di bawah 20%, nilai kalorinya antara 6000 kkal/kg sampai dengan 7500 kkal/kg
4. *Antrasit*, merupakan batu bara paling tinggi tingkatannya yang mempunyai kandungan karbon lebih dari 93 % dan kandungan zat terbang kurang dari 10%, nilai kalori di atas 7500 kkal/kg. Antrasit umumnya lebih keras, kuat dan sering kali berwarna hitam mengkilat seperti kaca (Poertadji S, 2006).

2.6 Arang

Arang memiliki banyak manfaat di berbagai bidang seperti bahan bakar rumahan, agrikultur, kimia proses, dan industri. Banyak sekali masakan yang akan lebih baik saat dimasak menggunakan arang. Arang juga memiliki peranan penting di bidang pertanian karena dapat memperbaiki struktur tanah dan air. Peran di bidang kimia dapat sebagai agen pemurnian air, pembentuk senyawa lain seperti sulfide, karbon tetraklorida, sianida dan lain-lain. Secara industri, arang digunakan sebagai bahan bakar pembakaran pada industri semen, keramik, energi panas, dan juga ekstraksi (Rodrigues, 2019).

Arang berasal dari pembakaran kayu yang tidak sempurna. Pembakaran tidak sempurna akan menyebabkan karbonisasi, yaitu, senyawa karbon kompleks tidak teroksidasi menjadi karbon dioksida. Peristiwa tersebut disebut sebagai pirolisis. Pada saat pirolisis, energi panas mendorong terjadinya oksidasi sehingga sebagian besar molekul karbon yang kompleks terurai menjadi karbon atau arang (Petrus, et al., 2019). Pirolisis untuk pembentukan arang terjadi pada temperatur 150–3000° C. Pembentukan arang tersebut disebut sebagai pirolisis primer.

Arang dapat mengalami perubahan lebih lanjut menjadi karbon monoksida, gas hidrogen dan gas-gas hidrokarbon. Peristiwa ini disebut sabagai pirolisis sekunder. Makin rendah kadar abu, air, dan zat yang menguap maka makin tinggi pula kadar *fixed* karbonnya. Mutu arang tersebut pun akan semakin tinggi (Nurjito, 2008). Industri besi dan baja menggunakan arang sebagai agen pereduksi. Salah satu penelitian dilakukan oleh (Fu, 2012) menemukan bahwa arang dari pembakaran bambu dan tempurung kelapa dapat digunakan sebagai agen pereduksi dengan waktu reduksi optimum 15 menit dan perbandingan bijih besi dan karbon $(C/O)_{mol} 1$.

Arang dapat digunakan sebagai pengganti batu bara pada industri besi dan baja. Penggantian ini menghasilkan lingkungan yang lebih baik karena reduksi karbondioksida yang berkurang. Hasil besi dan baja juga meningkat karena kandungan sulfur pada arang lebih rendah, kandungan abu rendah, dan reaktif sehingga pembentukan Fe metal lebih optimal. Kualitas arang sebagai agen pereduksi ditentukan oleh kandungan nya. Seperti kadar karbon, debu, zat yang mudah menguap, dan kadar air. Parameter tersebut didapatkan dari uji proksimat. (Abreu) melakukan penelitian menggunakan arang dari tanaman *eucalyptus* dan membandingkan hasilnya dengan batu bara antrasit dan *coke*. Kandungan arang berbeda tergantung sumber dan pembakaran yang dilakukan (Abreu, 2015).

2.7 Termodinamika Reduksi Besi

Diagram Ellingham adalah diagram yang menyajikan data – data termodinamika suatu logam yang mengalami proses pembentukan oksida, sulfida, dan klorida. Diagram tersebut dibentuk dari plot ΔG° (perubahan energi bebas Gibbs) pada temperatur (T) tertentu. Pada diagram Ellingham, logam yang

aktif secara kimia memiliki energi bebas yang paling tinggi (negatif) dalam membentuk oksida terletak pada diagram dibagian paling bawah. Sedangkan untuk logam yang memiliki energi bebas terkecil (positif) dalam membentuk oksida terletak pada diagram di bagian paling atas. Nilai ΔG° untuk reaksi oksidasi merupakan ukuran afinitas kimia suatu logam terhadap oksigen. Semakin negatif nilai ΔG° suatu logam menunjukkan logam tersebut semakin stabil dalam bentuk oksida. Persamaan Energi Gibbs ditunjukkan pada Persamaan 2.2 sebagai berikut:

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

Dimana: ΔG = perubahan energi Gibbs (J)

ΔH = perubahan entalpi reaksi (J)

ΔS = perubahan entropi reaksi (J/K)

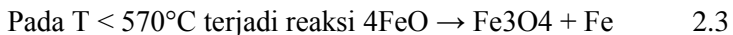
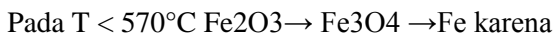
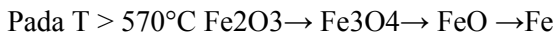
T =temperatur absolut reaksi (K)

T =temperatur absolut reaksi (K)

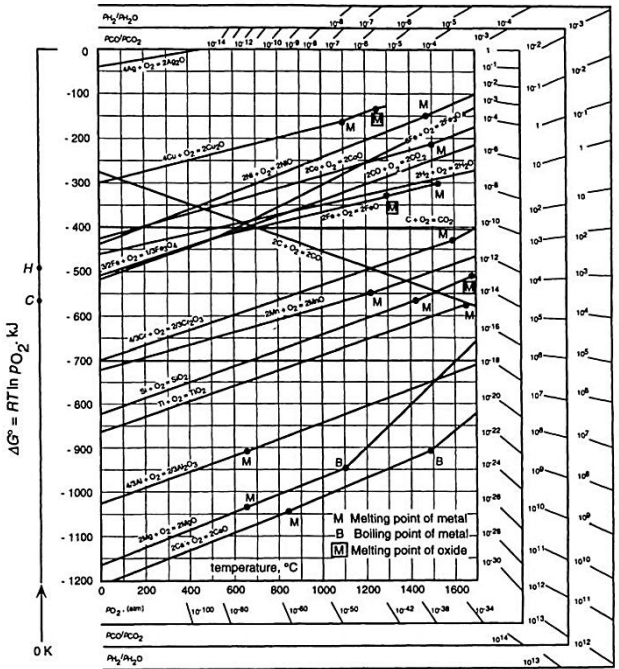
ΔG yang bernilai negatif menunjukkan bahwa suatu reaksi dapat terjadi secara spontan tanpa energi dari luar. Sementara itu reaksi yang memiliki ΔG positif menunjukkan reaksi tersebut tidak akan terjadi secara spontan. Entalpi adalah besaran dari energi yang dilepaskan ketika suatu reaksi berlangsung (panas dari suatu reaksi). Jika entalpinya bernilai negatif maka reaksi tersebut melepaskan energi (eksotermik), sedangkan jika bernilai positif maka reaksi tersebut membutuhkan energi (endotermik). Entropi adalah ukuran dari derajat ketidakteraturan suatu reaksi. Padatan memiliki bentuk yang teratur, cairan memiliki bentuk yang kurang teratur dan gas memiliki ketidakteraturan yang tinggi (Stratton, 2013).

Dari diagram Ellingham pada Gambar 2.1 dapat diketahui temperatur minimal yang dibutuhkan agar terjadi reaksi tersebut terjadi. Hal tersebut dapat ditunjukkan oleh perpotongan antara kurva oksida dan garis pembentukan CO. Termodinamika hanya

dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu reaksi dapat berjalan spontan atau tidak pada temperatur tertentu berdasarkan energi bebas yang dimiliki. Namun tidak dapat digunakan untuk menentukan laju reaksi. Perpotongan antara garis reaksi oksida dan reduksi secara termodinamika menunjukkan bahwa reaksi tersebut berjalan pada temperatur tertentu. Reduksi dari besi oksida dapat digambarkan dengan Skema 2.3 berikut:



Klasifikasi reaksi reduksi bijih besi berdasarkan *reducing agent* dikemukakan oleh *metallurgist* Prancis bernama Jacques Assenfratz pada tahun 1812 (Chatterjee, 1988). Dia membuktikan secara pengujian bahwa reduksi bijih besi terjadi dalam 2 Cara, yaitu: kontak antara bijih dan arang atau interaksi dengan *reducing gas*.



Gambar 2.1 Diagram Ellingham (Stratton, 2013)

Menurut Zevgolis, 2010, mekanisme reduksi komponen oksida besi dibagi menjadi 3 tahap:

- Tahap I: Reduksi hematit menjadi magnetit

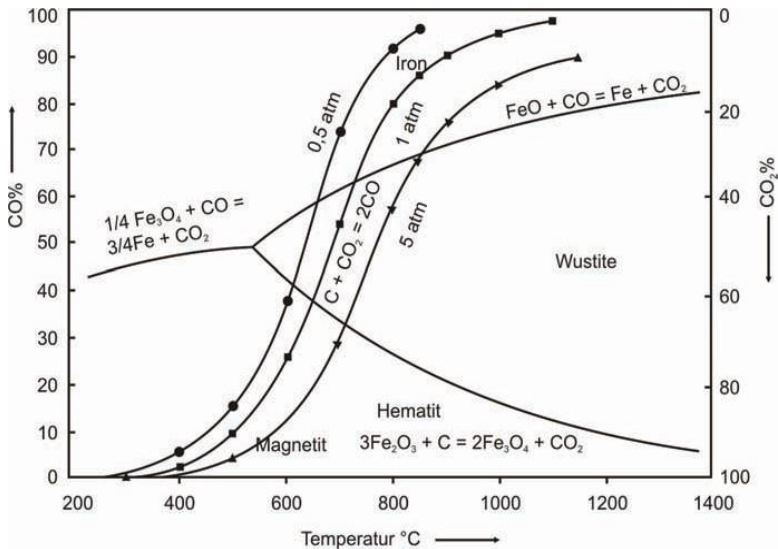
$$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2 \quad 2.4$$
- Tahap II: Reduksi magnetit menjadi wustit

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow 3\text{FeO} + \text{CO}_2 \quad 2.5$$
- Tahap III: Reduksi wustit menjadi logam besi

$$\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2 \quad 2.6$$

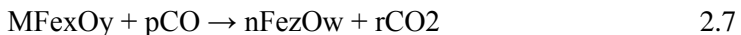
Dari standard energi untuk Reaksi 2.4, 2.5 dan 2.6 dapat diketahui konstanta kesetimbangan dan komposisi fasa gas pada

setiap temperatur. Setiap data kesetimbangan komposisi gas yang diperoleh dari kalkulasi dapat diplotkan dalam diagram komposisi gas terhadap fungsi temperatur, dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kesetimbangan komposisi gas terhadap fungsi temperatur pada sistem besi karbon-oksigen (Arabinda, 2011)

Dalam sistem *solid* dan reduktan berfasa gas, seluruh reaksi selama reduksi bijih besi dapat terjadi dalam dua langkah (Ross, 1980) : reduksi bijih besi pada Reaksi 2.7 dan gasifikasi karbon pada Reaksi 2.8.



Dalam reaksi Boudouard, ketika karbon dioksida bereaksi dengan karbon membentuk karbon monoksida, 1 volume karbon

dioksida menghasilkan 2 volume karbon monoksida pada tekanan konstan. Jika dalam volume konstan, reaksi akan meningkatkan temperatur. Jika tekanan meningkatkan, maka kesetimbangan sistem karbon oksigen akan bergeser untuk melepaskan tekanan. Oleh karena itu untuk menjaga rasio CO/CO₂ tetap sama pada tekanan tinggi, temperatur harus ditingkatkan. Sehingga ditunjukkan pada Gambar 2.2, kurva Reaksi 2.9 akan bergeser ke kanan menuju temperatur yang lebih tinggi (Chatterjee, 1988).

2.8 Kinetika Reaksi Besi

Kinetika reaksi reduksi bijih besi adalah kecepatan besi oksida untuk bertransformasi menjadi logam besi dengan melepaskan oksigen. Kecepatan reaksi reduksi bijih besi ditentukan oleh tinggi rendahnya kemampuan bijih besi tersebut untuk direduksi yang dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu ukuran partikel, bentuk dan distribusi ukuran partikel, bobot jenis, porosity, struktur kristal, serta komposisi kimia (Ross, 1980). Kinetika reduksi langsung menggunakan reduktan batu bara dipengaruhi oleh kombinasi beberapa mekanisme, yaitu perpindahan panas, perpindahan massa oleh konveksi, difusi fase gas, serta reaksi kimia dengan gasifikasi karbon memiliki banyak faktor yang memengaruhi reduksi besi oksida seperti komposisi bahan baku, basisitas, komposisi gas, dan suhu reduksi. Pengaruh komposisi gas terjadi pada perubahan volume dari besi oksida pada suhu 800-1100 °C. (El-Geassy, 2007).

Reaksi batu bara dan bijih besi merupakan suatu sistem yang kompleks. Perubahan dalam reaksi sangat dipengaruhi oleh parameter perpindahan panas yang meliputi ukuran, bentuk, bobot jenis partikel dan kecepatan aliran panas. Perpindahan panas yang terjadi dalam proses reduksi adalah perpindahan panas secara konduksi. Proses konduksi adalah perpindahan panas melalui zat

padat. Dalam sistem reduksi langsung dengan karbon, mekanisme perpindahan panas yang paling berpengaruh adalah konduksi dan konveksi (Sun, 1999). Proses konduksi sangat bergantung pada suhu proses, sifat padatan dan fase gas yang terjadi sehingga nilai konduktifitas panas padatan merupakan salah satu hal penting dalam proses reduksi konduktifitas panas yang tinggi akan meningkatkan kecepatan laju reaksi (Milandia, 2005).

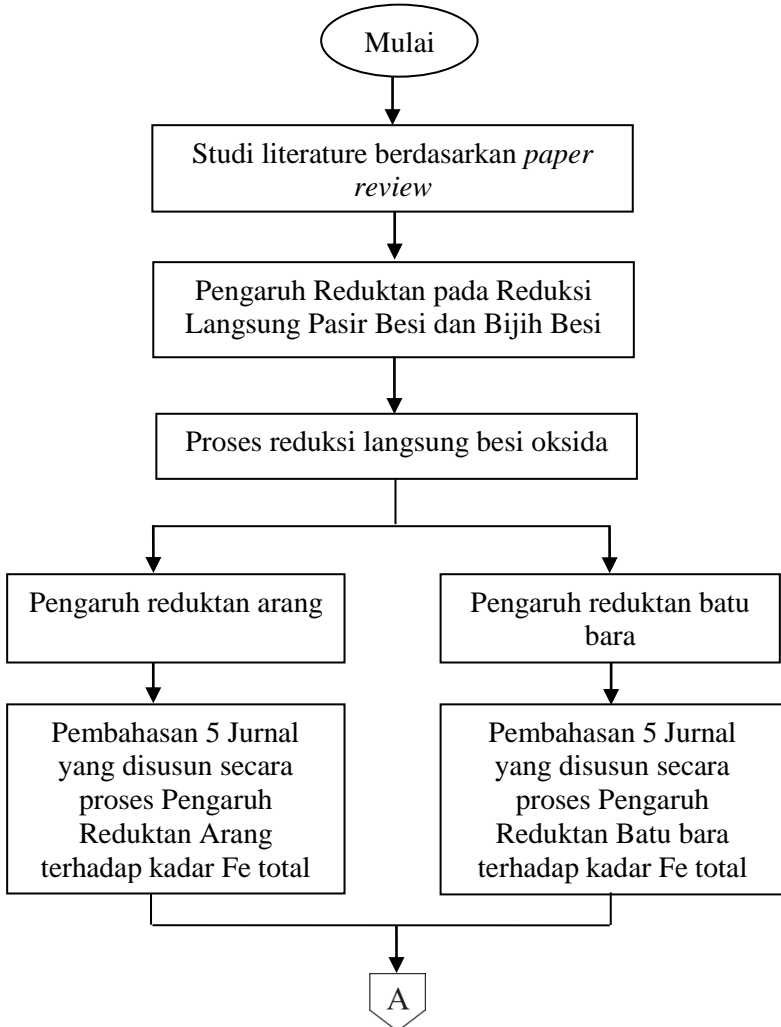
Perpindahan massa terjadi karena adanya gas CO dari batu bara yang bereaksi dengan bijih besi membentuk logam besi (Fe), sehingga oksigen dilepaskan dari bijih besi tersebut dan karbon (C) akan bereaksi dengan karbon dioksida (CO₂) untuk membentuk CO. Aliran gas CO yang menyebabkan proses konveksi dan difusi dipengaruhi oleh perbedaan tekanan dan konsentrasi gas dalam sistem sehingga perpindahan massa dapat berjalan baik (Milandia, 2005).

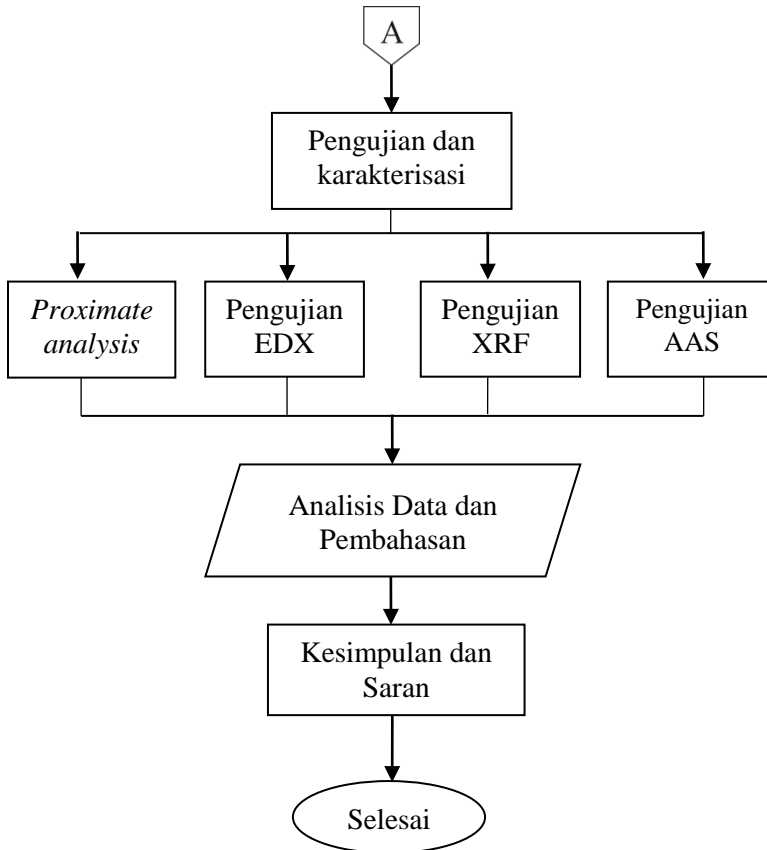
Besi oksida yang berisi karbon dapat direduksi pada suhu lebih rendah. Penurunan suhu ketika reduksi bijih besi dengan karbon terjadi saat peningkatan efisiensi energi dan karbon sebagai CO₂. Reaksi kimia yang terjadi pada proses reduksi langsung bijih besi dengan reduktan batu bara meliputi devolatilisasi batu bara, reduksi bijih besi dengan gas, dan gasifikasi arang batu bara (*char*). Devolatilisasi batu bara mulai terjadi lebih awal pada suhu rendah dengan laju reaksi lebih cepat dari reaksi reduksi bijih besi maupun gasifikasi arang batu bara (Seki, 2006).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir





Gambar 3.1 Diagram alir

3.2 Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan pada referensi penelitian secara umum sebagai berikut:

3.2.1 Pasir Besi

Pasir besi yang digunakan berasal dari berbagai daerah di Pulau Jawa seperti Sukabumi, Lumajang, Batang, Kendal, Jepara dan Pemalang dengan kandungan Fe yang berbeda-beda.

Pengolahan pasir besi diawali dengan proses benefisiasi menggunakan magnet untuk memisahkan senyawa magnetik dan non-magnetik. Kemudian dilakukan *sieving* dengan ukuran 50-100 *mesh* dan dilakukan pencucian berulang untuk menghilangkan pengotor yang tersisa. Kemudian pasir besi dianalisis kandungan Fe menggunakan AAS atau XRF. Gambar 3.2 menunjukkan pasir besi yang berasal dari Sukabumi.



Gambar 3.2 Pasir besi Sukabumi (Abdul F. P., 2019)

3.2.2 Bijih Besi

Bijih besi yang digunakan sebagai referensi data sekunder berasal dari Solok dan Lampung. Bijih yang masih berupa batuan mengalami proses *crushing* dan *sieving* mencapai ukuran 50 atau 100 *mesh*. Kemudian diuji kadar nya dengan pengujian XRF dikarenakan kadarnya berbeda-beda. Untuk memaksimalkan proses, beberapa penelitian memisahkan bijih besi dari pengotornya menggunakan *magnetic separator*, kemudian dibentuk briket.

3.2.3 Batu Bara

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



Gambar 3.3 Batu bara *sub-bituminus* (Riaza. J, 2014)

3.2.4 Arang

Arang yang digunakan pada penelitian ini berupa arang arang kayu Laban, kayu Asem, dan tempurung kelapa. Arang digunakan sebagai reduktan tambahan atau alternatif pengganti batu bara. Arang diuji proksimat untuk mengetahui kandungan karbon. Gambar 3.4 menampilkan gambar arang kayu.



Gambar 3.4 Arang kayu (Abdul F. W., 2018)

3.2.5 Batu Kapur

Batu kapur digunakan sebagai fluks dalam penelitian ini. Batu kapur yang digunakan berasal dari Gresik. Batu kapur terlebih dahulu dihancurkan hingga ukuran 50 *mesh*. Batu kapur yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.5



Gambar 3.5 Batu kapur (Oediyani S. E., 2018)

3.2.6 Tepung Tapioka

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



Gambar 3.6 Tepung tapioka (Suharto, 2014)

3.3 Alat Penelitian

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

3.3.1 Muffle Furnace

Muffle furnace merupakan alat yang direkayasa untuk mengatur panas yang berasal dari campuran gas bakar LPG dan

udara dari *blower*. Alat ini dapat bekerja pada temperatur tinggi dengan cara mengatur keluaran gas dan kecepatan *blower*. Sedangkan untuk tempat sampel digunakan *crucible* yang terbuat dari keramik SiC sehingga memiliki temperature maksimum sekitar 1500°C. Crucible merupakan tempat terjadinya reduksi briket pasir besi dan campuran *bed*-batu bara berupa batu bara, batu kapur atau reduktan tambahan. Panas di dalam *muffle furnace* akan memicu reaksi reduksi sehingga reduksi langsung dapat terjadi. Gambar *muffle furnace*, *crucible* berturut-turut ditunjukkan oleh Gambar 3.7 dan 3.8 di halaman berikutnya.



Gambar 3.7 *Muffle furnace* (Abdul F. W., 2018)



Gambar 3.8 *Crucible* (Abdul F. W., 2018)

3.3.2 Burner Las Asetilin

Burner las asetilen merupakan alat yang digunakan untuk mereduksi briket pasir besi. Alat ini digunakan karena dapat menghasilkan panas mencapai temperatur reduksi sekitar 1200°C. Menggunakan bahan bakar asetilin yang dicampur dengan oksigen pada burner kemudian disalurkan pada *torch* sebagai sumber keluaran panas.

3.3.3 Rotary Kiln

Rotary kiln atau tanur putar merupakan suatu reaktor berbentuk silinder panjang, berputar, dipasang dengan sudut kemiringan tertentu. *Raw material* berupa padatan dimasukkan dari ujung atas dan keluar dari bawah setelah mengalami proses pada temperatur tinggi dengan bantuan gas panas hasil reaksi pembakaran. Gas panas dialirkan berlawanan dengan arah *raw material* agar pembakaran lebih efisien. Terdapat empat zona pada *rotary kiln*, yaitu, *drying*, *pre-heating*, *devolatilization*, and *reduction-oxidation*. Keempat zona dibagi berdasarkan temperatur terjadinya reaksi serta kejadian fisik maupun kimia di masing-masing zona. Pada reduksi besi oksida menggunakan rotary kiln, terja reaksi yang kompleks. Karena adanya reaksi devolatilisasi batu bara selain reaksi reduksi besi oksida dan reaksi pembentukkan *slag*.

3.4 Pengujian Karakterisasi

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

3.4.1 AAS

Prinsip kerja *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) berupa penyerapan gelombang dengan panjang gelombang spesifik suatu unsur. Preparasi sampel untuk karakterisasi AAS berupa liquid yang kemudian dihembuskan pada nyala api burner

dengan bantuan gas bakar sehingga terbentuk aerosol. Kemudian sinar yang berasal dari lampu katoda dengan panjang gelombang sesuai dengan unsur yang diuji, akan dilewatkan melalui atom dalam nyala api sehingga elektron akan tereksitasi. Atom-atom dari sampel akan menyerap sebagian pancaran sinar dengan panjang gelombang khas, yang disebut absorbansi sedangkan yang diteruskan disebut emisi. Radiasi diteruskan pada detector melalui monokromator. *Chopper* dapat membedakan radiasi dari nyala api dengan sumber radiasi. Detektor akan menolak arus searah dari emisi nyala dan hanya mengukur arus bolak balik dari sumber radiasi atau sampel. Hubungan antara absorbansi dengan konsentrasi diturunkan dari hukum Lambert-Beer yang menjadi dasar dalam analisis kuantitatif.

3.4.2 EDX

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

3.4.3 XRF

X-Ray Fluorescence (XRF) merupakan salah satu metode karakterisasi unsur yang terkandung dalam sampel secara kualitatif dan kuantitatif. Pengujian XRF memiliki keunggulan yaitu tidak membutuhkan preparasi yang rumit dan waktu

pengujian yang singkat. Dasar analisis XRF berupa pencacahan sinar X karena efek fotolistrik. Efek fotolistrik terjadi karena elektron target pada atom terkena sinar berenergi tinggi berupa radiasi sinar gamma. Energi yang lebih tinggi akan memaksa elektron keluar dari orbit. Hal tersebut menyebabkan kekosongan pada atom. Kekosongan tersebut akan diisi elektron dari kulit yang lebih luar. Pengisian ulang ini diikuti pelepasan (emisi) energi berupa sinar X. Emisi yang dikeluarkan memiliki karakteristik khusus kemudian ditangkap oleh detektor dan dirubah menjadi sinyal tegangan (voltage). Sinyal tersebut akan terbaca sebagai puncak-puncak intensitas yang spesifik dan menandakan unsur tertentu.

3.4.4 Proximate Analysis

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

3.5 Metode Review Penelitian

Penelitian ini bersifat *review* beberapa penelitian mengenai reduksi langsung pasir besi menjadi *sponge iron*. Penelitian yang digunakan harus memuat kadar Fe pada pasir besi dan Fe total pada *sponge iron* dengan variable jenis reduktan. Data yang digunakan merupakan data sekunder dari penelitian yang sudah ada. Menggunakan setidaknya 5 jurnal dengan tahun terbit maksimal 10 tahun ke belakang.

Data yang digunakan memuat hasil uji karakterisasi pasir besi dan hasil akhir berupa *sponge iron*. Pengujian dapat menggunakan EDX, XRF atau AAS untuk mengetahui kandungan unsur pada sampel terutama kadar Fe pada pasir besi dan *sponge iron*. Hal ini bertujuan untuk membandingkan kadar sebelum dan sesudah proses reduksi dan membandingkan proses yang dilakukan.

Dari data sekunder kemudian dianalisa pengaruh penggunaan reduktan berupa arang dan batu bara. Reduktan diuji kandungan karbon sebagai penyedia gas CO yang akan mereduksi besi oksida pada pasir besi. Perlakuan lain juga menjadi pertimbangan seperti penggunaan alat dan penambahan batu kapur sebagai fluks. Kemudian dianalisis penggunaan reduktan, semakin tinggi kadar karbon semakin baik proses reduksi pasir besi dilihat dari peningkatan kadar Fe pada *sponge iron*.

Dari hasil analisa didapatkan kesimpulan berupa pengaruh reduktan, dilihat dari kandungan karbon dan volatile matter, akan meningkatkan kadar Fe pada hasil reduksi. Kemudian mengetahui pengaruh reduktan pada reduksi pasir besi. Kemudian kritik dan saran akan diberikan pada penelitian yang digunakan berupa opini berdasarkan teori dari referensi buku atau penelitian lainnya. Tabel 3.1 menunjukkan referensi penelitian yang digunakan pada review kali ini.

Tabel 3.1 Referensi Penelitian

Tahun	Nama Jurnal	Judul	Penulis
2018	Teknika	Pengaruh Waktu Tahan Dan Binder Terhadap Reduksi Pasir Besi Cilacap	Soesaptri Oediyani
2014	Jurnal Teknologi Mineral dan Batu Bara	Pengaruh Temperatur dan Jenis Reduktan Pada Pembuatan <i>Sponge Iron</i> Menggunakan Teknologi <i>Direct Reduced Iron</i> Dalam <i>Rotary Kiln</i>	Suharto
2019	Material	<i>Analysis of</i>	Fakhreza

	Science Forum	<i>Cylindrical Briquette Dimension on Total Iron Content and The Degree of Metallization in Direct Reduction Process of Iron Ore and Iron Sand Mixture</i>	Abdul
2015	Jurnal Teknik Mesin S-1 Undip	Reduksi Pasir Besi Pantai Sigandu Kabupaten Batang Menjadi <i>Sponge Iron</i> Menggunakan <i>Burner</i> Gas Asetilin	Its'nain Aji Pangestu
2015	Jurnal Teknik Mesin S-1 Undip	Uji Karakteristik <i>Sponge Iron</i> Hasil Reduksi Menggunakan <i>Burner</i> Las Asitelin Dari Pasir Besi Pantai Ngebum Kendal	Sigit Seno Anguntoro,
2015	Jurnal Teknik Mesin S-1 Undip	Uji Karakteristik <i>Sponge Iron</i> Hasil Reduksi Menggunakan <i>Burner</i> Las Asitelin Dari Pasir Besi Pantai Suweru Jepara	Sonar Hariawan
2015	Jurnal Teknik Mesin S-1 Undip	Uji Karakteristik <i>Sponge Iron</i> Hasil Reduksi Menggunakan <i>Burner</i> Las Asitelin Dari Pasir Besi Pantai Asemtoyong	Yugo Pranoto

Pemalang			
2018	Jurnal IPTEK Media Komunikasi Teknologi	Analisa Penggunaan Beberapa Jenis Arang Lokal Sebagai Reduktan dalam Proses Pembuatan Besi Spon (<i>Sponge Iron</i>) dari Bahan Baku Pasir Besi Menggunakan Metode Reduksi Langsung	Fakhreza Abdul
2018	Jurnal Metalurgi dan Material Indonesia	Pengaruh Pengaruh Temperatur dan Jenis Reduktor Terhadap Persen Metalisasi dan Persen Fe Hasil Reduksi Bijih Besi Kalimantan	Soesaptri Oediyani
2012	Majalah Metalurgi	Pengaruh Bahan Perekat Dan Waktu Reduksi Pada Pembuatan Briket Sponge Dari Bijih Besi Lokal	Adil Jamali

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

Pada review ini menggunakan data sekunder dari penelitian yang sudah dilakukan. Berikut akan ditampilkan data mengenai kadar Fe sebelum dan sesudah proses reduksi langsung berdasarkan referensi penelitian pada Tabel 4.1. Data tersebut diambil dari hasil terbaik di setiap penelitian.

Tabel 4.1 Data sekunder dari referensi penelitian

Raw Mateial	Reduktan	T Red (°C)	Fe awal (%)	Fe akhir (%)	Peneliti
Pasir Besi Kabupaten Batang	Arang kayu	1200	51,23	62,13	(Pangestu, 2015)
Pasir Besi Kabupaten Kendal	Arang kayu	1200	50,68	63,70	(Aguntoro, 2015)
Pasir Besi Kabupaten Pemalang	Arang kayu	1200	52,12	62,46	(Pranoto, 2015)
Pasir Besi Kabupaten Jepara	Arang kayu	1200	49,90	64,12	(Hariawan, 2015)
Pasir Besi Kabupaten Sukabumi	Batu bara <i>sub-bituminus</i>	1350	57,93	79,06	(Abdul, 2018)
Campuran pasir besi Lumajang dan bijih besi Solok	Batu bara <i>sub-bituminus</i>	1250	60,07	75,02	(Abdul, 2019)
Bijih besi	Arang	900	49,78	61,81	(Suharto,

Lampung Pasir besi Cilacap	kayu Batu bara	950	59,83	71,68	2014) (Oediyani, 2018)
Bijih besi Kalimantan	Batu bara	1150	60,23	74,82	(Oediyani, 2018)
Bijih besi Lampung	Batu bara	1000	53,58	69,36	(Jamali, 2012)

4.1.1 Proximate Analysis

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kadar karbon pada batu bara dan arang. Tabel 4.2 menunjukkan hasil analisis proksimat pada penelitian sebelumnya berikut standar yang digunakan.

Tabel 4.2 Hasil *proximate analysis* dalam penelitian Abdul (2018)

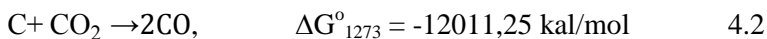
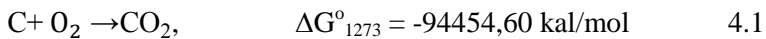
Parameter	Hasil (%)		Standar
	Batu bara	Arang Kayu	
<i>Moisture</i>	1,8	6,25	ASTM D 3173 - 02
<i>Ash</i>	4,75	2,8	ASTM D 3174 - 02
<i>Volatile matter</i>	52,86	22,8	ASTM D 3175 - 02
<i>Fixed carbon</i>	42,35	70,46	ASTM D 3172 - 02

4.2 Pembahasan

Pembahasan data sekunder meliputi pengaruh reduktan arang dan batu bara terhadap hasil reduksi pasir besi. Pada review ini penelitian mengenai reduksi pasir besi menggunakan karbon yang bersumber dari batu bara dan arang. Arang dan batu bara berperan sebagai penyedia atom C yang akan bereaksi menghasilkan gas reduktan CO. Konsentrasi gas CO sangat berpengaruh terhadap hasil reduksi. Dalam referensi penelitian digunakan dua variasi penggunaan jumlah reduktan, pasir besi, dan tapioka pada briket yang akan direduksi.

Reduksi besi oksida diawali pembentukan gas reduktan CO dari reaksi C dengan CO₂ atau O₂ pada temperatur tinggi. Panas dari pembakaran akan berpindah secara konduksi dan konveksi kemudian menyebabkan reaksi gasifikasi karbon. Gas CO kemudian berdifusi melalui pori dan mengalami reaksi yang menghasilkan gas CO₂. Gas CO₂ tersebut kemudian bereaksi dengan karbon mengalami pembentukan kembali gas CO dan akan mereduksi besi oksida terus menerus sehingga terbentuk Fe. (R. Béchara, 2018)

Pembentukan gas CO mengacu pada diagram Bauer Glassner dan Boudouard. Reaksi gasifikasi pembentukan CO merupakan reaksi di mana karbon menyebabkan CO₂ tidak stabil sehingga akan direduksi menjadi CO. Reaksi pembentukan bersifat endoterm, sehingga membutuhkan temperatur tinggi (Rigakushi., 1921). Reaksi ditunjukkan pada Reaksi 4.1 dan 4.2 sebagai berikut :



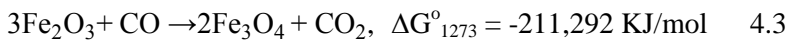
(Henpristian, 2014)

Terdapat empat daerah kestabilan besi oksida yaitu *hematit*, *magnetit*, *wustite*, dan besi. Ketika suatu kondisi kesetimbangan CO/CO₂ berada pada daerah *wustite*, maka *magnetite* dan *hematite* akan tereduksi. Pada diagram kesetimbangan dapat dilihat bahwa pada temperature di atas 900°C, gas CO akan stabil didapatkan 100% CO dan 0% CO₂. Hal tersebut menjadi acuan temperature reduksi yang optimum berada pada 900°C ke atas. (Suharto., 2019)

Secara termodinamika pada temperatur reduksi di bawah 900°C memerlukan persen CO lebih banyak. Sehingga apabila reduksi dilakukan pada temperatur tersebut, *hematite* hanya dapat mencapai fasa *wustite* (FeO), tidak mampu menjadi besi (Fe) karena kekurangan gas CO sebagai reduktan. Maka dari itu, diperlukan temperatur yang lebih tinggi untuk mereduksi hematit

secara sempurna. Secara teoritis jika temperatur reduksi diturunkan, reaksi penguraian gas akan berbalik dari gas CO menjadi CO₂ menyebabkan jumlah reduktan berkurang. Temperatur menjadi faktor penting dalam kesetimbangan gas CO/CO₂. (T. Lindstad, 2004)

Secara termodinamika, keberhasilan reaksi reduksi dapat dilihat pada diagram elingham. Besi oksida dapat direduksi menggunakan gas CO yang berasal dari gasifikasi karbon batu bara. Reaksi yang terjadi merupakan reaksi spontan, menandakan reaksi reduksi dapat terjadi ke arah produk. Hal ini dapat dilihat pada energi bebas Gibbs (ΔG) reaksi yang bernilai negatif (Tarumingkeng, 2016). Reaksi reduksi besi oksida ditunjukkan pada Reaksi 4.3, 4.4, dan 4.5 sebagai berikut :



(Henpristian, 2014)

Reaksi tersebut bersifat eksoterm (menghasilkan panas). Hal ini sejalan dengan kondisi kesetimbangan CO/CO₂ di mana akan stabil pada temperatur tinggi. Hasil reaksi berupa gas CO₂ menjadi tidak stabil akibat adanya karbon di temperatur tinggi. Sehingga tereduksi menjadi gas CO. Hal ini berlangsung terus-menerus sampai reduksi besi oksida sempurna menghasilkan Fe. Temperatur mempunyai peran yang sangat penting terhadap keberlangsungan reaksi. Hasil reaksi dipengaruhi banyak hal lagi, seperti penggunaan *raw material* dan reduktan yang digunakan. Kandungan yang berbeda akan menghasilkan besi spons yang berbeda pula (Yuan, 2020).

4.2.1 Pengaruh Reduktan Arang

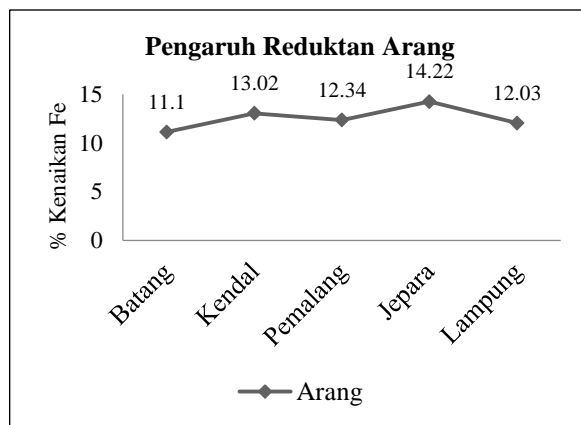
Berdasarkan data sekunder yang didapatkan mengenai reduksi pasir besi menggunakan reduktan arang, kadar Fe mengalami peningkatan. Hal tersebut menandakan reduksi telah

terjadi dengan berkurangnya oksida pada pair besi. Kenaikan kadar Fe tersebut ditampilkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Kenaikan Fe hasil reduksi menggunakan arang

<i>Raw material</i>	Kadar Fe (%)		Kenaikan (%)	Peneliti
	<i>Raw material</i>	<i>Sponge Iron</i>		
Batang	51,23	62,13	11,10	(Pangestu, 2015)
Kendal	50,68	63,70	13,02	(Aguntoro, 2015)
Pemalang	52,12	62,46	12,34	(Pranoto, 2015)
Jepara	49,90	64,12	14,22	(Hariawan, 2015)
Lampung	49,78	61,81	12,03	(Suharto, 2014)

Data kenaikan %Fe penggunaan reduktan arang diplot grafik pada Gambar 4.1



Gambar 4.1 Grafik pengaruh reduktan arang

Penelitian yang dilakukan (Pangestu, 2015); (Aguntoro, 2015); (Pranoto, 2015); dan (Hariawan, 2015) menggunakan metode yang sama. Pasir besi melalui proses pencucian dan pemisahan menggunakan magnet. Hal tersebut menghasilkan pasir besi dengan jumlah pengotor yang jauh lebih sedikit. Proses pemisahan dilakukan terlebih dahulu sebanyak tiga kali untuk mendapatkan pasir besi dengan kandungan yang tinggi. Kemudian pasir dicuci menggunakan deterjen untuk menghilangkan pengotor yang lain. Pasir besi diuji AAS untuk mendapatkan kandungan unsur Besi (Fe), Magnesium (Mg), Silikon (Si), dan Karbon (C). Semakin kecil kadar pengotor maka semakin baik kualitas pasir besi sebagai *raw material*. Tabel 4.4 menunjukkan hasil pengujian AAS dari *raw material* untuk mengetahui pengotor Mg, Si dan C.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian AAS Pasir Besi

Kadar Unsur (%)				Peneliti
Mg	Si	C	Fe	
1,42	3,56	6,12	51,23	(Pangestu, 2015)
1,2	1,98	0,85	62,13	
2,43	2,43	4,12	50,63	(Aguntoro, 2015)
1,25	1,13	1,15	63,70	
2,18	1,94	8,10	52,12	(Pranoto, 2015)
1,43	0,85	2,70	62,46	
1,63	2,63	7,30	49,90	(Hariawan, 2015)
1,42	1,43	1,90	64,12	

Pasir besi kemudian dibentuk briket dengan campuran arang kayu, tapioka dan air. Kemudian dibentuk briket dengan komposisi 75% pasir besi, 20% karbon, dan 5% perekat dicampur air dan dicetak menggunakan cetakan dan palu yang ditekan. Karbon berasal dari arang kayu dengan *fixed carbon* 70,46%. Briket kemudian dioven dengan temperatur 250°C selama dua jam. Tujuan pemanasan dalam oven untuk menghilangkan kadar air dan tapioka sehingga meninggalkan bekas berupa lubang-

lubang kecil. Lubang tersebut nantinya akan membantu difusi dari gas reduktor yang dihasilkan dari pembakaran. Setelah dioven, briket dibakar menggunakan las asetilin dengan temperatur 1200°C. *Sponge iron* yang dihasilkan diuji dengan metode AAS. Dari hasil pengujian, diketahui peningkatan kadar Fe dan penurunan kadar pengotor. Hasil tertinggi dari pasir besi Jepara mencapai Fe akhir 64,12% sekaligus peningkatan sebesar 14,22%.

Pada penelitian Suharto *et. al* (2014), dilakukan penelitian reduksi langsung bijih besi Lampung menggunakan reduktan arang dan batu bara dengan *rotary kiln*. Bijih besi dihancurkan menggunakan *ball mill* kemudian diayak dengan ukuran 100 mesh. Bahan baku diuji kandungannya dengan uji XRF. Hasilnya, kadar Fe 49,90%, Si 8,45%, Mg 1,74%, Al 1,83%, Mn 2,04%, dan sisanya dengan kadar < 1%. Kadar C pada reduktan batu bara dan arang kayu berturut-turut 44,25 dan 76,85%. Setelah itu dilakukan pembentukan pelet mencampur 77% bijih besi halus, 20% reduktan, dan 3% bentonit. Pembentukan pelet menggunakan mesin balling drum yang kemudian dijemur. Proses reduksi dengan mengumpan pelet ke dalam *rotary kiln* ditambahkan *flux*. *Flux* digunakan sebagai pengikat sulfur dalam batu bara atau arang kayu. Temperatur reduksi yaitu 900, 1050, dan 1200°C selama 2 jam. Setelah selesai *sponge iron* dimasukkan ke dalam *cooler* hingga temperatur ruang untuk mencegah reoksidasi. Dari variasi yang dilakukan, hasil terbaik didapatkan oleh reduksi menggunakan reduktan arang kayu pada temperatur 1200°C dengan kadar Fe total 61,81%. Peneliti beranggapan bahwa kecilnya kadar Fe akhir dikarenakan kadar Fe awal juga rendah. Peningkatan kadar Fe dipengaruhi oleh pengotornya, selain itu waktu reduksi yang lebih lama dibandingkan bijih besi dengan kadar Fe tinggi.

Berdasarkan kedua metode penelitian di atas, reduksi besi oksida merupakan hal yang kompleks. Faktor reduktan tidak bisa dijadikan acuan utama. Secara teoritis semakin tinggi kadar karbon dapat menghasilkan atmosfer yang lebih reduktif karena

jumlah karbon yang semakin banyak (Yuan, 2020). Akan tetapi, terdapat faktor lain pada arang yakni *volatile matter*. Secara umum kualitas arang dilihat dari kandungan karbon nya. Sementara itu, semakin tinggi kadar karbon, kadar *volatile matter* menurun (Rath, 2017). *Volatile matter* berkaitan dengan kemampuan pembakaran secara spontan. Jika *volatile matter* lebih tinggi arang tersebut lebih mudah terbakar dan menghasilkan gas reduksi lebih baik. Faktor berikutnya adalah kandungan awal Fe pada *raw material*. Semakin sedikit pengotor akan memudahkan reduksi besi oksida menjadi besi. Hal ini dikarenakan unsur yang ikut bereaksi lebih sedikit (Oediyani S. E., 2018). Kemudian memungkinkan hasil *sponge iron* memiliki pengotor yang lebih sedikit sehingga dapat menjadi *sponge iron* yang memiliki kadar Fe tinggi. Hasil reduksi menggunakan reduktan arang memiliki rata-rata peningkatan 12,67%. Berdasarkan penelitian Tze Chean Ooi (2011), pembakaran arang menghasilkan emisi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan batu bara. Kadar CO_x, SO_x, NO_x menurun pada udara hasil pembakaran penggunaan arang pengganti batu bara (Liang, 2020). Sehingga penelitian tentang penggunaan arang sebagai agen pereduksi harus terus dilakukan untuk kebaikan lingkungan.

4.2.2 Pengaruh Reduktan Batu bara

Penelitian Abdul *et. al* (2018), meneliti penggunaan arang lokal dan batu bara untuk mereduksi pasir besi. Pasir besi berasal dari Sukabumi, batu bara berasal dari Kalimantan, arang dari Jombang, batu kapur dari Gresik. *Raw material* dihancurkan dan diayak dengan ukuran 100 mesh. Kemudian dilakukan pengujian awal, uji XRF untuk komposisi kimia pasir besi dan batu kapur. Hasil uji XRF menunjukkan %berat Fe 57,93%, Ti 8,46%, Si 3,4%, Mg 2,72%, Al 2,66% dan O 24,4%. Analisis proksimat untuk berbagai reduktan. Hasil nya dapat dilihat pada Tabel 4.2. Pasir besi dibentuk briket dengan campuran air dan tapioka. Briket dioven untuk menghilangkan kadar air. Kemudian dimasukkan *crucible* bersama *reactor bed* berupa campuran

reduktan dan batu kapur. Komposisi bahan dalam penelitian ini yaitu 100 gr pasir besi, 60 gr batu kapur dan variasi reduktan 44 gr batu bara, 40 gr arang tempurung kelapa, 37 gr arang kayu laban, 36 gr arang kayu asem. Perbedaan jumlah reduktan karena kadar karbon tiap jenis arang yang berbeda dan disesuaikan dengan jumlah kebutuhan neraca massa reduksi. Kemudian reduksi menggunakan *muffle furnace* dengan temperatur 1350°C selama 10 jam kemudian didiamkan hingga mencapai temperatur ruang. *Sponge iron* diuji XRF ulang untuk mengetahui kadar Fe total. Pada penelitian ini hasil terbaik didapatkan briket yang direduksi menggunakan batu bara. Dari kadar Fe awal 57,93% menjadi 79,065%.

Abdul et. al (2019) melakukan penelitian menggunakan campuran pasir besi dan bijih besi yang berasal dari Lumajang dan Solok. Metode yang sama seperti sebelumnya menggunakan *muffle furnace* dan reduktan berupa batu bara *sub-bituminus*. *Raw material* dihaluskan dan diayak menggunakan ukuran 50 mesh. Dilakukan pengujian XRF dari campuran bijih besi dan pasir besi. Dengan hasil kadar Fe 60,07%, Si 6,09%, Ti 0,78%, Al 1,39%, Mg 2,40%, Ca 2,49%. Kemudian dibentuk briket dengan perbandingan komposisi pasir besi : bijih besi : air : tapioka sebesar 4 : 6 : 1 : 1. Bahan dicampur dan dibentuk silinder berlubang dengan variasi dimensi. Reduktan batu bara dicampur batu kapur dimasukkan ke dalam *crucible* bersama briket. Pemanasan dilakukan mencapai 1250°C selama 2 jam kemudian pada temperatur yang sama ditahan selama 10 jam. Pendinginan dalam *muffle furnace* hingga temperatur ruang. Pengujian XRF *sponge iron* untuk mengetahui kadar Fe total. Briket dengan dimensi diameter dalam 7,9 cm, diameter luar 15,1 cm, tinggi 19,5 cm mendapatkan hasil terbaik. Pengujian XRF dilakukan pada permukaan atas dan bawah didapatkan hasil sebesar 75,2% Fe di permukaan atas dan 75,41% Fe di permukaan bawah.

Oediyani et. al, (2018) melakukan penelitian pengaruh binder dan waktu tahan pada reduksi pasir besi Cilacap menggunakan reduktan batu bara *sub-bituminus*. Preparasi *raw*

material pasir besi, batu bara dan batu kapur menggunakan *rod mill* hingga menghasilkan butiran dengan ukuran 100 mesh. Briket dibentuk dengan komposisi 78% pasir besi, 22% batu bara dan batu kapur, 2% binder berupa dekstrin dan bentonit. Kemudian reduksi dilakukan pada temperatur 950°C menggunakan *muffle furnace* dengan waktu tahan bervariasi 15, 30, 45, 60, 75, 90, dan 120 menit. Hasil terbaik didapatkan variasi waktu tahan 120 menit dengan binder dekstrin sebesar 71,68% Fe.

Oediyani *et.al* (2018) pada penelitian mengenai pengaruh temperatur dan jenis reduktan reduksi langsung bijih besi Kalimantan. Melakukan penelitian dengan variabel temperatur 800, 900, 1000°C, dan reduktan berupa batu bara *sub-bituminus*, arang kayu, dan arang tempurung kelapa. Dengan kadar Fe awal 60,23% hasil uji EDX. Reduktan diuji kandungan karbon nya dan hasilnya batu bara 36%, arang kayu 46%, arang tempurung kelapa 70%. Kemudian bijih besi yang sudah dihaluskan dibentuk briket dengan campuran reduktan. Briket direduksi pada temperatur variabel dalam *muffle furnace* selama 3 jam. Hasil terbaik pada penggunaan batu bara yaitu kadar Fe akhir sebesar 74,82%.

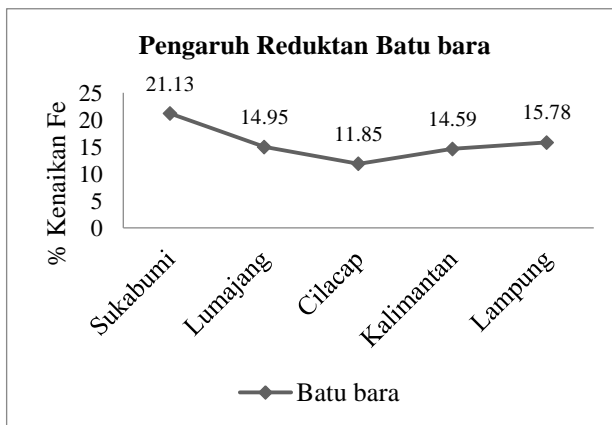
Jamali *et. al* (2012) melakukan penelitian mengenai pengaruh jenis perekat pada briket dan waktu reduksi pada pembuatan *sponge iron* dari bijih besi Lampung. Perekat yang digunakan adalah aci dan bentonit, sedangkan waktu reduksi 10, 20, 30, 40 menit. Setelah bijih besi dihaluskan dan dibentuk briket, direduksi menggunakan *rotary kiln* dengan temperatur 1150°C. Variasi terbaik didapatkan pada waktu reduksi 40 menit dan binder aci. Kadar Fe pada *sponge iron* mengalami kenaikan dari awalnya 53,58%, menjadi 69,36%.

Data kenaikan Fe dari proses reduksi menggunakan reduktan batu bara dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Kenaikan Fe hasil reduksi menggunakan batu bara

<i>Raw material</i>	Kadar Fe (%)		Kenaikan (%)	Peneliti
	Raw material	Sponge Iron		
Sukabumi	57,93	79,06	21,13	(Abdul, 2018)
Campuran (Lumajang dan Solok)	60,07	75,02	14,95	(Abdul, 2019)
Cilacap	59,83	71,68	11,85	(Oediyani, 2018)
Kalmantan	60,23	74,82	14,59	(Oediyani, 2018)
Lampung	53,58	69,36	15,78	(Jamali, 2012)

Data % kenaikan Fe pengaruh reduktan batu bara diplot grafik pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik pengaruh reduktan batu bara

Penggunaan batu bara sebagai reduktan mampu meningkatkan kadar Fe pasir besi yang berasal dari Sukabumi mencapai 79,06 % dari raw material 57,93% dengan peningkatan sebesar 21,13%. Batu bara sendiri memiliki kadar karbon 42,35% (Abdul, 2018). Dari tren data sekunder yang didapatkan, kadar karbon bukan menjadi acuan utama kualitas suatu reduktan. Batu bara dengan kadar karbon lebih rendah mampu mencapai kenaikan kadar Fe lebih tinggi dibandingkan penggunaan arang. Kenaikan kadar Fe rata-rata mencapai 15,66%.

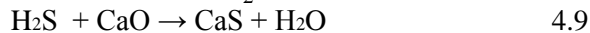
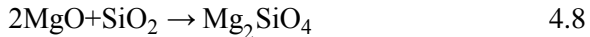
Berdasarkan data pada kandugan reduktan arang dan batu bara, terdapat perbedaan yang signifikan pada *volatile matter* sekitar 30%. *Volatile matter* berpengaruh pada hasil reduksi besi oksida (Liu.Z, 2018.). Batu bara mulai mengalami devolatilisasi pada temperatur 300°C, suatu reaksi dekomposisi zat yang mudah menguap menjadi karbon, tar, dan gas. Gas yang dihasilkan berupa CO dan H₂ dimana berpengaruh pada reaksi reduksi besi oksida. Gas reduktan terbentuk di atas temperature 800°C. (Nukman, 2008). Gas CO yang dihasilkan dari reaksi Boudouard ditambah gas H₂ menyebabkan atmosfer yang reduktif di sekitar briket. Sehingga semakin banyak reduktan yang berdifusi pada permukaan besi oksida dan sehingga reduksi besi oksida menjadi logam Fe berjalan lebih optimal (Abdul, 2018). Kondisi muffle furnace yang tertutup juga menjadi faktor pendukung. Panas yang dihasilkan menjadi lebih stabil dan mudah dikontrol.

Beberapa penelitian reduksi langsung besi oksida menggunakan aditif berupa batu kapur. Batu kapur berperan sebagai fluks untuk mengikat pengotor menjadi *slag*. Kandungan batu kapur diketahui dari uji XRF. Pada penelitian (Abdul F. P., 2019) diketahui hasil XRF batu kapur dolomit CaMg(CO₃)₂ dari daerah Gresik Jawa Timur pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil uji XRF batu kapur

Parameter	Ca	Mg	Si	Fe	S	Al
%	18,08	13,74	0,55	0,072	0,004	0,001

Batu kapur mengalami reaksi dekomposisi pada temperatur 750°C seperti pada Reaksi 4.6 dan membentuk *slag* pada Reaksi 4.7 dan 4.8.



(Islam, 2020)

CO₂ hasil dekomposisi menjadi sumber tambahan pembentuk gas reduktan CO. Kemudian CaO akan mengikat Si membentuk senyawa CaSiO₃ (*calcium metasilicate*), dan menyebabkan terjadinya desulfurisasi batu bara pada rentang temperatur 870 hingga 1037 °C seperti pada Reaksi 4.9. MgO dan SiO₂ akan bereaksi pada rentang temperatur 1100 hingga 1400 °C membentuk senyawa Mg₂SiO₄ (*forsterite*) (Abdul, 2019).

Berdasarkan analisis data dan pembahasan di atas, terdapat beberapa hal yang menjadi perhatian penulis. Pada penelitian penggunaan reduktan arang, reduktan dicampurkan ke dalam briket. Sedangkan pada beberapa penelitian reduktan batu bara, reduktan digunakan sebagai *reactor bed* tidak tergabung dalam briket. Penggunaan reduktan sebagai *reactor bed* berpengaruh pada kenaikan kadar Fe total. Pada penelitian Oediyani (2018), kenaikan Fe hanya mencapai 11,85%. Sedangkan pada penelitian Abdul (2018) dan Abdul (2019), kenaikan Fe mencapai 21,13 dan 14,95%. Hal ini mengindikasikan reduktan lebih efektif digunakan sebagai *reactor bed*. Hal ini sesuai dengan teori (Suharto., 2019) bahwa reduktan padat lebih sulit untuk mereduksi dibandingkan saat berfasa gas. Gas CO lebih mudah untuk berdifusi dan bereaksi dengan besi oksida serta lebih mudah terserap sampai inti briket. Penambahan batu kapur pada *reactor bed* juga menambah jumlah gas CO yang terbentuk (Zhu, 2012).

Faktor kualitas reduktan yang ditentukan kadar karbon dan *volatile matter* juga berpengaruh. Kadar karbon menunjukkan jumlah karbon yang dapat bereaksi membentuk gas reduktif CO,

volatile matter menunjukkan angka pembakaran spontan. Angka minimum *volatile matter* yang baik berkisar antara 25-35 %wt (Rath, 2017). Sehingga karbon menjadi cukup reaktif untuk pembentukan gas CO.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Arang dapat digunakan sebagai reduktan pada reduksi langsung besi oksida. Penggunaan arang dapat meningkatkan kadar Fe rata-rata sebesar 12,67% Fe.
2. Batu bara dapat digunakan sebagai reduktan pada reduksi langsung besi oksida. Penggunaan batu bara dapat meningkatkan kadar Fe rata-rata sebesar 15,66% Fe. Penggunaan batu bara lebih reduktif dari pada arang pada proses reduksi langsung besi oksida.

5.2 Saran

Untuk review penelitian yang akan datang, terdapat beberapa saran yang dapat diperhatikan dan dilakukan sebagai berikut:

1. Melakukan penelitian terkait penggunaan campuran arang dan batu bara sebagai reduktan besi oksida.
2. Melakukan penelitian penambahan aditif terhadap reduksi langsung besi oksida.
3. Melakukan karakterisasi yang menyeluruh terhadap hasil reduksi besi oksida.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul, F. P. 2019. "Analysis of Cylindrical Briquette Dimension on Total Iron Content and Degree of Metallization in Direct Reduction Process of Iron Ore and Iron Sand Mixture". **Materials Science Forum**.
- Abdul, F. W. 2018. "Analisa Penggunaan Beberapa Jenis Arang Lokal Sebagai Reduktor dalam Proses Pembuatan Besi Spon (Sponge Iron) dari Bahan Baku Pasir Besi Menggunakan Metode Reduksi Langsung". **Jurnal IPTEK Vol.22**, 43-50.
- Abreu, G. C., Jr., .. J., Silva, .. B., & Pedrini, .. R. 2015. "Operational And Environmental Assessment On The Use Of Charcoal In Iron Ore Sinter Production". **Journal of Cleaner Production** , 387-394.
- Anguntoro, S. S., Atmadja, S. T., & Umardani, Y. 2015. "Karakteristik Sponge Iron Hasil Reduksi Menggunakan Burner Las Asetilin Pasir Besi Pantai Ngebum Kendal". **Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol-3**.
- Arabinda, S. a. 2011. "Sponge Iron Production in Rotary Kiln". **New Delhi: PHI Learning Private Limited**.
- Aryono., N. A. 2006. "Dampak Pembakaran Batubara Indonesia Terkait Kandungan Produk Gas Buang". **Pusat Teknologi Konversi dan Konservasi Energi Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). Jurnal Energi dan Lingkungan Vol. 2**, No. 1, Juni 2006 Hlm. 1-5.
- Atsushi Masaki, H. U. 2010. "MIDREX Processes". **Kobelco Technology Review** No. 29.
- Chatterjee, A. 1988. "Proceedings of XV Symposium of SIDOR". Puerto Ordaz, Venezuela.

-
- Deer.W.A., H. Z. 1992. “An Introduction to the Rock-Forming Minerals, second ed”. **Longman Scientific and Technical**, London, 696 p.
- El-Geassy. 2007. “Reduction Kinetics and Catastrophic Swelling of MnO₂-doped Fe₂O₃ Compacts with CO at 1073–1373 K.” **ISIJ International**. 47(3):377–385.
- Eriksson, K. M. 2005. “Energy Survey of the Sponge Iron Process”. **Lund Institute of Technology**. Sweden.
- Feinman, J. 1999. “Direct Reduction and Smelting Processes”. **J. Feinman and Associates, Inc.** U.S.
- Fu, J. Z. 2012. “Exploration of Biomass Char for CO₂ Reduction in RHF Process for Steel Production”. **International Journal Greenhouse Gas Control**. 8, 143-149.
- Hariawan, S. S. 2015. “Uji Karakteristik Sponge Iron Hasil Reduksi Menggunakan Burner Las Asitelin Dari Pasir Besi Pantai Suweru Jepara”. **Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol.3**.
- Henpristian, Y. I. 2014. “Pengaruh Waktu Reduksi dan Komposisi Pelet Terhadap Persen Fe Metal dan Persen Ni FeNi Spons Dari Bijih Nikel Limonit Menggunakan Simulasi Rotary Kiln”. **Majalah Metalurgi**. Vol 5.
- Islam, M. W. 2020. “A Review Of Dolomite Catalyst For Biomass Gasification Tar Removal”. **Fuel**, 095-117.
- J.W. Morgan., E. A. 1980. “Chemical Composition of Earth, Venus, and Mercury”. **Proc. Natl. Acad. Sci. USA**. 77 (12),. 6973–6977.
- Jamali. A, F. R. 2012. “Pengaruh Bahan Perikat Dan Waktu Reduksi Pada Pembuatan Briket Sponge Iron Dari Bijih Besi Lokal”. **UPT Balai Pengolahan Mineral Lampung, LIPI**. Indonesia.
-

-
- Kadir, A. R. 2016. “Analisis Proksimat Terhadap Kualitas Batubara Di Kecamatan Tanah Grogot Kabupaten Paser Provinsi Kalimantan Timur”. **Jurnal Geomine**, 4, 118-122.
- Liang, T. S. 2020. “Environmental Impact Evaluation of An Iron and Steel Plant in China: Normalized Data and Direct/Indirect Contribution”. **Journal of Cleaner Production**.
- Liu.Z, X. B. 2018. “Carbothermal Reduction Of Iron Ore In Its Concentrate-Agricultural Waste Pellets”. **Advances in Materials Science and Engineering**, vol. 1, p. 1-6.
- Lu. L, I. . 2015. “CSIRO Mineral Resources Flagship, Pullenvale, QLD”. **Australia Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, Futtsu**. Chiba-Pref. Japan.
- Lukman, M. Y. 2012. “Sintesis Biomaterial Komposit CaO-SiO₂ Berbasis Material Alam (Batuan Kapur Dan Pasir Kuarsa) Dengan Variasi Suhu Pemanasan Dan Pengaruhnya Terhadap Porositas, Kekerasan Dan Mikrostruktur”. **Journal Sains** Vol. 2 No.1. Malang : UM.
- Milandia, A. 2005. “Studi Pendahuluan Pembuatan Besi Spons menggunakan Bijih Besi Lokal Dengan Reduktor Campuran Batu bara–Greencoke”. Cilegon: **Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa**.
- Nukman. 2008. “Dekomposisi Volatile Matter Batu Bara Tanjung Enim Dengan Menggunakan Thermogravimetry Analyzer (TGA)”. **Makara, Teknologi**, Vol. 12, No.2, 65-69.
- Nurjito, &. L. 2008. “Campuran Arang Tempurung Kelapa Bekas dan Arang Tempurung Kelapa Baru untuk Media Karburasi Baja Karbon Rendah”. **Program Studi Teknik Mesin UNY**, 2-9.
-

-
- Oediyani, S. E. 2018. “Pengaruh Waktu Tahan dan Binder Terhadap Reduksi Pasir Besi Cilacap”. **Teknika**, 63-74.
- Oediyani, S. M. A. 2018. “Pengaruh Temperatur dan Jenis Reduktor Terhadap Persen Metalisasi dan Persen Fe Hasil Reduksi Bijih Besi Kalimantan”. **Jurnal Metalurgi dan Material Indonesia (JMMI), Vol 1**.
- Pangestu, I. A., Atmadja, .. S., & . Umardani, Y. 2015. “Reduksi Pasir Besi Pantai Sigandu Kabupaten Batang Menjadi Sponge Iron Menggunakan Burner Gas Asetilin.” **Jurnal Teknik Mesin S-1 Vol 3**.
- Pangestu., I. G. 2018. “Studi Pengaruh Variasi Waktu Holding Pada Proses Peleburan Direct Reduced Iron (DRI) Terhadap Kandungan Fe Total Dan Recovery Fe Dalam Proses Pembuatan Pig Iron Dengan Metode Electric Arc Furnace”. **Digital Library ITS.Surabaya**
- Petrus, H. T., Putera, .. A., Sugiarto, .. E., Perdana, .. I., Warmada, .. I., Nurjaman, .. F., et al. 2019. “Kinetics On Roasting Reduction of Limonitic Laterite Ore Using Coconut Charcoal and Anthracite Reductants”. **Minerals Engineering**.
- Poertadji S, N. d. 2006. “Pengaruh Aglomerasi Air-Minyak Sawit Terhadap Kadar Karbon Dan Nilai Kalori Batubara Semi-Antrasit, Bituminus Dan Sub-Bituminus”. **Program Pascasarjana Ilmu Material, FMIPA – UI. Jakarta**
- Pranoto, Y. .. 2015. “Uji Karakteristik Sponge Iron Hasil Reduksi Menggunakan Burner Las Asetilin Dari Pasir Besi Pantai Asemtoyong Pematang”. **Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol 3**.
- R. Béchara, H. H. 2018. “Optimization Of The Iron Ore Direct Reduction Process Through Multiscale Process Modeling”. **Materials** vol. 11, no. 1094, pp, 2-18.
-

-
- Rath, S. S. 2017. “Biomass Briquette As An Alternative Reductant For Low Grade Iron Ore Resources”. **Biswal Biomass and Bioenergy**.
- Rianna, M. T. 2018. “Preparation And Characterization Of Natural Iron Sand From Kata Beach, Sumatera Barat Indonesia With High Energy Milling (HEM)”. **Jurnal Natural** Vol 18.
- Riaza, J, K. R. 2014. “Single Particle Ignition and Combustion of Anthracite, Semi-Anthracite and Bituminous Coals In Air and Simulated Oxy-Fuel Conditions”. **Mechanical and Industrial Department, Northeastern University, Boston, MA 02115, USA**.
- Rigakushi., M. 1921. “Chemical Equilibrium Between Iron Carbon and Oxygen”. **Proceedings of the New York Meeting**, 1-53.
- Rodrigues, T. J. 2019. “Technological Prospecting In The Production Of Charcoal: A Patent Study”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**.
- Ross, H. U. 1980. “Physical Chemistry: Part I Thermodynamics. Direct Reduced Iron Technology and Economics of XXVI Productions and Use”. **Warrendale: The Iron and Steel**.
- Seki, I. d. 2006. “Reduction Kinetics of Hematite Powder Mechanically Milled with Graphite”. **ISIJ International** 46(1):1–7.
- Stratton, P. 2013. “Ellingham Diagrams – Their Use and Misus”. **International Heat Treatment and Surface Engineering**. 7. 70-73.
- Sucipto, E. 2007. “Hubungan Pemaparan Pertikel Debu pada Pengolahan Batu Kapur Terhadap Penurunan Kapasitas Fungsi Paru”. **Universitas Diponegoro**. Semarang.
-

-
- Suharto, Y. I. 2014. "Effect of Temperature and Reductor on the Making of Sponge Iron Using Direct Reduction Iron Technology in a Rotary Kiln". **Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara** Volume 10, Nomor 1. UPT. Balai Pengolahan Mineral Lampung – LIPI, Lampung, Indonesia.
- Suharto., S. O. 2019. "Reduksi Bijih Besi Lampung Memanfaatkan Reduktor Model Gas Produser". **Majalah Metalurgi** Vol 34.2.2019, Balai Penelitian Teknologi Mineral LIPI, 71-80.
- Sun, S. 1999. "A Study of Kinetics and Mechanism of Iron Ore Reduction in Ore/Coal Composites". **McMaster University**. Kanada
- T. Lindstad, M. S. 2004. "The Influence Of Alkalis On The Boudouard Reaction". **Tenth International Ferroalloys Congress; INFACON X: Transformation through Technology**, pp. 261-271.
- Tambunan, B. C. 2016. "Desain dan Simulasi Tungku Bakar untuk Pengolahan Pasir Besi menjadi Sponge iron dengan Teknologi Tunnel Kiln". **M. P. I.** Vol. 10, no. 1, 51-60.
- Tarumingkeng S., E. J. 2016. "Termodinamika Dalam Memahami Proses Pengolahan Mineral". **Prosiding Seminar Nasional Fisika**, Vol. V.
- Tze Chean Ooi., D. T. 2011. "The Effect of Charcoal Combustion on Iron-Ore Sintering Performance and Emission of Persistent Organic Pollutants". **Combustion and Flame**, 979-987.
- Yuan, S. 2020. "Selective Enrichment Of Iron Particles From Complex Refractory Hematite-Goethite Ore By Coal-Based Reduction And Magnetic Separation". **Powder Technology** 367, 305–316.
-

-
- Zevgolis, E. 2010. "Phase Transformations Of Nickeliferous Laterites During Preheating And Reduction With Carbon Monoxide". **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**.
- Zhu, D.Q., Y. Cui, K. Vining, S. Hapugoda, J. Douglas, J. Pan, G.L. Zheng. 2012. "Upgrading Low Nickel Content Laterite Ores Using Selective Reduction Followed By Magnetic Separation". **International Journal of Mineral Processing**. 106-109

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamu'alaikum wr. wb. Pertama-tama saya mengucapkan syukur Alhamdulillah kepada Allah yang telah memberikan nikmat dan rahmat-Nya sehingga saya bisa menyusun laporan tugas akhir saya. Kemudian tak lupa juga shalawat serta salam saya haturkan kepada nabi besar Muhammad SAW yang telah membawa kita dari zaman yang bodoh kepada zaman yang terang seperti sekarang. Dengan terbentuknya laporan tugas akhir ini, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua saya, Fajar Suryanto dan Siti Khotimah, juga adik saya Bagas Aji Tifanto dan Cahya Sofi Kamila yang telah mendukung untuk menyelesaikan kuliah dan tugas akhir.
2. Seluruh dosen-dosen Teknik Material dan Metalurgi atas ilmu yang telah diberikan selama saya berkuliah di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.
3. Ibu Dian Mughni Fellicia S.T., M.Sc dan Bapak Fakhreza Abdul, ST., MT. selaku pembimbing tugas akhir.
4. Seluruh karyawan yang bekerja di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
5. Keluarga MT 18 dan teman-teman 2016 yang telah berjuang bersama-sama hingga akhir.
6. Teman seperjuangan tim kaderisasi HMMT 2017-2019, Mas Mbak MT 17, MT 18, MT 19 yang telah banyak memberikan pembelajaran dan berbagi pengalaman.
7. Tim Matrice Futsal Club, mas-mas alumni MFC, Pelatih : Mas Aan, Mas Lukman, Mas Happy, serta terutama MFC MT 18, Farros, Daniel, Mong, Ghilman, Epong, Yos, Erick, Riyan, Wor dan lainnya.
8. Teman-teman UKM IBC ITS, departemen KA, Grup Batang Reborn, dan Apa Aja 2016 (Septian, Erdi, Taris, Alwan, Hermawan, Nindya, Putri)
9. Naufal Muzakkii a.k.a Gacleng sebagai partner TA ugal.
10. Mbak Alexandra Elbakyan.

11. Mas Mbak yang telah menyelesaikan perkuliahannya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi
12. Teman-teman Laboratorium Pengolahan Material yang telah banyak membantu.
13. Dan semua pihak yang telah membantu saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini

Saya menyadari bahwa dalam pembuatan laporan ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, saya mengharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk perbaikan kedepannya. Saya juga berharap laporan tugas akhir yang saya kerjakan dapat bermanfaat dan dapat dimanfaatkan sebaik mungkin.

Surabaya, Juli 2020
Penulis,

Amri Ilham Aziz

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kebumen pada tanggal 5 November 1997, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari Bapak Fajar Suryanto dan Ibu Siti Khotimah. Hobi penulis adalah olahraga, membaca novel, mendaki gunung, dan menonton film. Riwayat pendidikan dimulai dari SDN 1 Kutosari, SMP Negeri 1 Kebumen, SMA N 1 Kebumen, dan menempuh pendidikan ke jenjang yang lebih tinggi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.

Selama menempuh bangku perkuliahan, penulis pernah mengikuti beberapa pelatihan, organisasi, dan kepanitiaan. Penulis pernah menjabat sebagai staff dan Wakil Direktur Eksternal BSO Minat Bakat HMMT FTIRS 2017-2019, diamanahi menjadi Kadep Kesejahteraan Anggota (2018) di UKM IBC ITS. Penulis pernah menjuarai beberapa kompetisi olahraga cabang futsal dan bulutangkis. Kejuaraan nya di antara lain ITS Futsal Championship (IFC) 2017 dan 2018, Red Olympic Game (ROG) 2020, IBC Cup 2018, dan Dies Natalis ITS ke-59. Penulis juga berhasil didanai pada PKM-PE Kemenristekdikti 2019. Penulis diamanahi menjadi Asisten Laboratorium Pengendalian Korosi pada tahun 2018-2019.

Penulis mengikuti kerja praktik di PT Universal Tekno Reksajaya, Jakarta, pada periode Agustus 2019. Pada saat kerja praktik mengambil topik “Analisis Kegagalan Pada Wiring Rod Cylinder PC3000”. Penulis mengambil penelitian Tugas Akhir di Laboratorium Pengolahan Mineral dengan judul “Review Pengaruh Reduktan Pada Reduksi Langsung Pasir Besi dan Bijih Besi Lokal”.

Email : amriilhamazz@gmail.com