



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Tugas Akhir - TL141584

**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***

**ISRO'UF GERIO PANGESTU
NRP. 02511440000015**

**Dosen Pembimbing
Wikan Jatimurti, ST., M.Sc.
Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D.**

**Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018**



TUGAS AKHIR - TL141584

**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***

Isro'uf Gerio Pangestu
NRP 0251144000015

Pembimbing:
Wikan Jatimurti, S.T.,M.Sc
Sungging Pintowantoro, S.T.,M.T.,Ph.D

Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

**STUDY OF HOLDING TIME VARIATION IN DIRECT
REDUCED IRON (DRI) SMELTING PROCESS ON THE Fe
CONTENT AND Fe RECOVERY IN THE PROCESS OF PIG
IRON MAKING WITH ELECTRIC ARC FURNACE METHOD**

Isro'uf Gerio Pangestu
NRP 02511440000015

Advisor:

Wikan Jatimurti, S.T.,M.Sc

Sungging Pintowantoro, S.T.,M.T.,Ph.D

Department of Materials Engineering
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**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***

TUGAS AKHIR

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

Oleh:
ISRO'UF GERIO PANGESTU
NRP. 02511440000015

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir
Wikan Jatimarti ST., M.Sc. (Pembimbing I)
Sungging Pintovantoro, Ph.D. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**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***

Nama : Isro'uf Gerio Pangestu
NRP : 02511440000015
Dosen Pembimbing : Wikan Jatimurti, ST., M.Sc
Co-Pembimbing : Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D

Abstrak

Sumber daya pasir besi melimpah di Indonesia menjadi peluang besar untuk Indonesia mengolah bahan baku tersebut dengan meningkatkan kandungan besinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi waktu *holding* pada peleburan *direct reduced iron* terhadap *recovery* Fe dan kandungan Fe total dalam pembuatan *pig iron* dengan metode *electric arc furnace*. Terdapat empat variasi waktu *holding*, yaitu 2 menit, 4 menit, 6 menit, dan 8 menit. Metode penelitian dengan mereduksi pasir besi yang di briket dan ditambahkan campuran dolomit dan batubara, reduksi menggunakan *muffle furnace* pada temperatur 1350°C selama 10 jam lalu didinginkan yang menghasilkan produk DRI. Kemudian DRI dilebur dengan tambahan batubara dan fluks SiO₂ menggunakan *electric arc furnace* dengan tegangan 16,2V dan arus 180A dan waktu *holding* mengikuti variabel untuk mendapatkan produk *pig iron*. Sampel *pig iron* ditimbang untuk mendapatkan nilai *recovery* Fe dan diuji menggunakan alat EDX dan XRD untuk mengetahui kandungan Fe total dari *pig iron*. Nilai kandungan Fe total tertinggi dari variasi waktu *holding* 4 menit dan terendah 2 menit. Dan, nilai *recovery* Fe tertinggi dari variasi waktu *holding* 6 menit dan terendah 2 menit.

Kata Kunci : Waktu holding, pasir besi, direct reduced iron (DRI), electric arc furnace, pig iron.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDY OF HOLDING TIME VARIATION IN DIRECT REDUCED IRON (DRI) SMELTING PROCESS ON THE Fe CONTENT AND Fe RECOVERY IN THE PROCESS OF PIG IRON MAKING WITH ELECTRIC ARC FURNACE METHOD

Name : Isro'uf Gerio Pangestu
NRP : 0251144000015
Advisor : Wikan Jatimurti, ST., M.Sc
Co-Advisor : Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D.

Abstract

The iron sand resources in Indonesia are a great opportunity for Indonesia to process the raw materials by increasing its iron content. This research aims to determine the effect of holding time variation on direct reduced iron smelting to Fe recovery and Fe content in the manufacture of pig iron by electric arc furnace method. There are four holding time variations, which are 2 minutes, 4 minutes, 6 minutes, and 8 minutes. Methods of research by reducing iron sand that in briquettes and added a mixture of dolomite and coal, the reduction using muffle furnace at 1350°C for 10 hours and then cooled that produce DRI products. Then DRI was melted with additional coal and SiO₂ flux using an electric arc furnace with a voltage of 16.2V and a current of 180A and the holding time variation following the variable to get the pig iron product. The pig iron sample was weighed to obtain the Fe recovery value and tested using EDX and XRD to determine the Fe content of pig iron. The highest Fe content value of the holding variation is 4 minutes and the lowest is 2 minutes. And the highest Fe recovery value of the holding variation is 6 minutes and the lowest is 2 minutes.

Keyword : Holding time, iron sand, direct reduced iron (DRI), electric arc furnace, pig iron.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr.Wb.

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan nikmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir pada Departemen Teknik Material FTI-ITS yang berjudul “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*” Tugas Akhir ini disusun untuk melengkapi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Material FTI-ITS.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, Tugas Akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberi dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan.

1. Allah SWT karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Orang tua Penulis, Bapak Mashuri dan Ibu Wiwik Isti Wilujeng dan Saudara penulis Imam Solikin Dwi Laksono yang telah mendukung penulis baik secara materiil maupun non-materiil melalui doa, motivasi dan semangat yang tak ternilai harganya.
3. Bapak Wikan Jatimurti, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir dan telah memberikan ilmu, bimbingan serta wawasan kepada penulis.
4. Bapak Sungging Pintowantoro, S.T., M.T. Ph.D selaku dosen copembimbing tugas akhir penulis yang telah memberikan arahan saat menulis Tugas akhir ini.

5. Bapak Fakhreza Abdul S.T, M.T yang telah menuangkan segala bimbingan, ilmu dan pelajaran mengenai tugas akhir dan kehidupan selama berada di Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material.
6. Bapak Dr. Sigit Tri Wicaksono S.Si., M.Si. selaku Dosen Wali penulis selama menempuh pendidikan di Departemen Teknik Material FTI-ITS.
7. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng. selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI-ITS.
8. Saudara Luki Wijaya dan Treshna Satria Purnamawan yang telah membantu dan menemani penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
9. Teman-teman penghuni lab tercinta Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material yang telah menemani penulis selama melaksanakan kegiatan tugas akhir, Abay, Icill, Luki, Yoso, Opik, Tommi, Nisya, dan Prita
10. Kawan-kawan yang telah banyak berkiprah membantu penulis selama kuliah, Hendy (cino), Quluq(bocil), Nigra, Bayu (babay), Megah(sasa tekpal), Yoso, dan Habib.
11. Saudara Bayu, Anugrah, Ridho, dan Eri, serta yang menemani penulis melaksanakan KP.
12. Mas dan mbak alumni lab ekstraksi yang telah memberi banyak ilmu, wejangan dan pengetahuan terkait tugas akhir.
13. Dosen dan karyawan yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan perkuliahan di Departemen Teknik Material FTI-ITS.
14. Teman-teman MT 16 yang selalu membantu penulis dengan baik.
15. Teman penulis yang selalu memberi dukungan, doa, dan motivasi selama berada di perantauan, khususnya Yayak yang menjadi teman kamar sejak mahasiswa baru.
16. Teman-teman satu organisasi penulis saat menjadi pengurus organisasi dan alumni organisasi selama menjadi mahasiswa.
17. Serta seluruh pihak yang telah memberikan partisipasi atas penulisan tugas akhir ini.

Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Penulis juga menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, Januari 2018
Penulis,

Isro'uf Gerio Pangestu
0251144000015

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pasir Besi	7
2.2 Batubara	9
2.3 Batu Kapur	11
2.4 Termodinamika Pasir Besi	12
2.5 Kinetika Reduksi Besi	16
2.6 <i>Direct Reduced Iron</i> atau DRI	17
2.7 Teknologi Pengolahan Pasir Besi (<i>Tunnel Kiln Process</i>)	19
2.8 <i>Electric Arc Furnace</i>	21
2.9 <i>Pig Iron</i>	25
2.10 Waktu dalam <i>Electric Arc Furnace</i>	27
2.11 Fluks Silika Oksida (SiO_2)	28
2.12 Penelitian Sebelumnya	30

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir Penelitian	33
3.2	Bahan Penelitian	35
3.2.1	Pasir Besi.....	35
3.2.2	Batubara	35
3.2.3	Batu Kapur	36
3.2.4	Kanji.....	36
3.2.5	Air	37
3.2.6	LPG	37
3.2.7	Fluks	37
3.2.8	Elektroda Grafit	38
3.3	Peralatan Penelitian	38
3.3.1	<i>Sagger</i>	38
3.3.2	Alat Kompaksi.....	39
3.3.3	<i>Muffle Furnace</i>	39
3.3.4	Timbangan Digital.....	40
3.3.5	Ayakan	41
3.3.6	<i>Thermocouple</i> dan <i>Thermometer Infrared</i>	41
3.3.7	<i>Blower</i>	42
3.3.8	<i>Power Supply</i>	42
3.3.9	Krusibel	43
3.4	Pelaksanaan Penelitian	43
3.4.1	Preparasi Material	43
3.4.2	Proses Reduksi	45
3.4.3	Persiapan Proses Smelting.....	45
3.4.4	Proses Smelting	46
3.4.5	Pengujian	47
3.5	Neraca Massa Briket Pasir Besi	52
3.6	Rancangan Penelitian dan Kegiatan	52

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1	Karakterisasi Bahan Penelitian	55
4.1.1	Pasir Besi.....	55

4.1.2	Batubara	56
4.1.3	Karakterisasi Dolomit.....	57
4.1.4	Karakterisasi <i>Direct Reduced Iron</i> atau DRI.....	59
4.2	Pengaruh Variasi Waktu <i> Holding </i> terhadap Kandungan Fe Total dalam <i>Pig Iron</i>	62
4.3	Pengaruh Variasi Waktu <i> Holding </i> terhadap <i>Recovery</i> Fe dalam <i>Pig Iron</i>	67
4.4	Pengaruh Variasi Waktu <i> Holding </i> terhadap Fasa yang Terbentuk dalam <i>Pig Iron</i>	70
4.5	Pengaruh Variasi Waktu <i> Holding </i> terhadap <i>Slag</i> yang Terbentuk	74

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	79
5.2	Saran	79

DAFTAR PUSTAKA **xxiii**

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pasir Besi	8
Gambar 2.2	Diagram <i>Ternery</i> FeO-Fe ₂ O ₃ -TiO ₂	9
Gambar 2.3	Diagram Ellingham.....	14
Gambar 2.4	Kesetimbangan Komposisi Gas terhadap Fungsi Temperatur pada Sistem Besi Karbon-Oksigen.....	15
Gambar 2.5	Produk <i>Direct Reduced Iron</i>	18
Gambar 2.6	Skema dari <i>Tunnel Kiln</i>	20
Gambar 2.7	Klasifikasi <i>Electric Arc Furnace</i>	22
Gambar 2.8	Skema <i>Twin Torch Arc Furnace</i>	23
Gambar 2.9	<i>Pig Iron</i> yang Dipisahkan dengan <i>Slag</i>	26
Gambar 2.10	Diagram <i>Binary</i> SiO ₂ -TiO ₂	29
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	34
Gambar 3.2	Pasir Besi	35
Gambar 3.3	Batubara.....	35
Gambar 3.3	Batubara.....	35
Gambar 3.4	Batu Kapur.....	36
Gambar 3.5	Kanji	36
Gambar 3.6	Tabung LPG.....	37
Gambar 3.7	Fluks SiO ₂	37
Gambar 3.8	Elektroda Grafit	38
Gambar 3.9	<i>Sagger</i>	38
Gambar 3.10	Alat Kompaksi	39
Gambar 3.11	<i>Muffle Furnace</i>	40
Gambar 3.12	Timbangan Digital	40
Gambar 3.13	Ayakan	41
Gambar 3.14	<i>Thermocouple</i> dan <i>Thermometer Infrared</i>	41
Gambar 3.15	<i>Blower</i>	42
Gambar 3.16	<i>Power Supply</i>	42
Gambar 3.17	<i>Crucible</i>	43

Gambar 3.18 Briket <i>Pillow</i> Pasir Besi	44
Gambar 3.19 Susunan Briket dan <i>Reduction Mix</i>	44
Gambar 3.20 Susunan Peralatan	45
Gambar 3.21 Skematik Preparasi <i>Smelting</i> dengan <i>Electric Arc Furnace</i>	46
Gambar 3.22 Alat Uji SEM-EDX.....	48
Gambar 3.15 Alat Uji XRD <i>PAN Analytical</i>	49
Gambar 4.1 Grafik XRD Pasir Besi	56
Gambar 4.2 Hasil Pengujian XRD Batu Kapur	59
Gambar 4.3 Grafik XRD Hasil Reduksi Briket Pasir Besi	61
Gambar 4.4 Pengaruh Variasi Waktu <i> Holding</i> terhadap Kandungan Fe Total dan Peningkatan Kandungan Fe	64
Gambar 4.5 Pengaruh Variasi Waktu <i> Holding</i> terhadap <i>Recovery Fe</i>	68
Gambar 4.6 Hasil Pengujian XRD <i>Pig Iron</i> Variasi Waktu <i> Holding</i> (a) 2 menit, (b) 4 menit, (c) 6 menit, (d) 8 menit	71
Gambar 4.7 Hasil Pengujian XRD <i>Slag</i> Variasi Waktu <i> Holding</i> (a) 2 menit, (b) 4 menit, (c) 6 menit, (d) 8 menit ...	77

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi Batu Kapur Berdasar Adanya Kalsit dan Magnesit	12
Tabel 2.2	<i>Input</i> dan <i>Output</i> Material di EAF	24
Tabel 2.3	Perbandingan Komposisi <i>Pig Iron</i> Produksi <i>Blast Furnace</i> dan <i>Pig Iron</i> dengan Reduksi Langsung ..	27
Tabel 3.1	Rancangan Penelitian Pembuatan DRI	52
Tabel 3.2	Rancangan Penelitian Pembuatan <i>Pig Iron</i>	53
Tabel 4.1	Hasil Pengujian EDX Konsentrat Pasir Besi	55
Tabel 4.2	Hasil Pengujian <i>Proximate Analysis</i> Batubara	57
Tabel 4.3	Hasil Pengujian EDX Batu Kapur	57
Tabel 4.4	Hasil Pengujian EDX Hasil Reduksi Pasir Besi	60
Tabel 4.5	Variabel dalam Penelitian	63
Tabel 4.6	Hasil Pengujian EDX <i>Pig Iron</i>	63
Tabel 4.7	Hasil <i>Recovery</i> Fe <i>Pig Iron</i>	67
Tabel 4.8	Hasil Pengujian EDX <i>Slag</i>	75

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah salah satu negara dengan konsumsi baja yang rendah jika dibanding dengan negara maju lainnya. Dari data tahun 2013 ditunjukkan bahwa konsumsi baja Indonesia jauh tertinggal dari sesama negara ASEAN yaitu Singapura yang telah mencapai 879 GDP perkapita dan sedangkan konsumsi baja Indonesia adalah 52 GDP perkapita (SEASI, 2013). Hal ini semakin diperburuk oleh fakta bahwa di tahun 2013 sebanyak 34% konsumsi baja nasional yang dapat disuplai oleh produsen dalam negeri atau sebesar 3,8 juta ton konsumsi baja nasional dipenuhi dari impor. Rendahnya konsumsi dan produksi baja nasional sangat bertolak belakang dengan potensi ketersediaan cadangan *ore* besi yang sangat melimpah. Data dari pusat sumber daya geologi tahun 2012 menyebutkan bahwa Indonesia memiliki deposit pasir besi dan bijih besi yang cukup melimpah dengan jumlah sekitar 5110 juta ton.

Dari fakta besarnya jumlah deposit *ore* besi di Indonesia sepatutnya diciptakan industri besi dan baja dari hulu ke hilir yang berkesinambungan mulai dari penambangan *ore* sampai aplikasi produk. Dimana berdasar data *Indonesian Iron and Steel Industry Association* masih ada beberapa proses yang terpotong dan tidak dikerjakan di Indonesia. Padahal dalam Keppres no 28 tahun 2008 tentang kebijakan industri nasional ditargetkan produksi baja mencapai 20 juta ton di tahun 2020.

Pasir besi merupakan pasir dengan konsentrasi unsur besi yang cukup signifikan dengan kadar diatas 50%. Pasir ini mengandung senyawa magnetit, maghemite, dan hematit serta sejumlah kecil unsur lainnya. Pasir besi di Indonesia kebanyakan berupa ilmenite yang mengandung unsur titanium cukup tinggi. Dari kadar besi dalam pasir besi Indonesia yang berada dikisaran diatas 50% maka diperlukan teknologi pengolahan konsentrat pasir besi untuk meningkatkan kadar besi tersebut. Salah satu teknologi



yang digunakan adalah *Direct Reduction Iron* (DRI) yaitu teknologi untuk meningkatkan kadar besi dengan mereduksi bijih maupun pasir besi dibawah titik leleh besi yang menghasilkan produk bernama *Direct Reduced Iron* atau DRI.

DRI adalah bentuk *solid state* dari pengolahan pasir besi dengan reduksi langsung yang memiliki derajat metalisasi lebih dari 82% dan kandungan Fe total lebih dari 72% (IS 15774: 2007). Kandungan besi total maksimal yang bisa didapatkan adalah 90-95,5% yang diperoleh dengan pengolahan *ore* besi sampai menjadi *pig iron*. Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan pasir besi menjadi *pig iron* agar diperoleh kandungan Fe total yang tinggi. Di industri pengolahan besi dan baja teknologi pengolahan *pig iron* dari pasir besi yang sudah dikembangkan dengan memakai metode reduksi langsung dari *ore* pasir besi menjadi *pig iron* dan teknologi pengolahan dari DRI menjadi *pig iron*. Dari dua metode yang telah ada pengolahan dari *ore* pasir besi menjadi *pig iron* adalah yang paling umum dan banyak digunakan dan sangat sedikit yang memakai teknologi dari DRI menjadi *pig iron*. Dari fakta ini maka dibutuhkan penelitian yang dapat menunjang pengembangan teknologi pengolahan pasir besi menjadi *pig iron* melalui metode pembentukan DRI terlebih dahulu.

Terdapat dua teknologi peleburan DRI menjadi *pig iron* di dunia, yaitu dengan metode *induction furnace* yang dipakai industry baja di India dan metode lain dengan *electric arc furnace*. Menurut Koblenzer Harald *electric arc furnace* memiliki kelebihan dalam konsumsi energi yang lebih rendah dan ketersediaan *raw material* yang lebih beragam jika dibandingkan dengan *induction furnace*. Selain dua hal tersebut, *electric arc furnace* juga memiliki keunggulan dalam kemampuan untuk menghasilkan produk dengan kualitas yang tinggi, pengendalian dalam hal ramah lingkungan yang baik, pengurangan dan pengoptimalan konsumsi energi listrik, dan pengontrolan proses yang sepenuhnya canggih dapat dijadikan faktor utama pemilihan *electric arc furnace* sebagai metode penilitan kali ini.



Teknologi *electric arc furnace* dalam sebuah industri sangat bergantung pada efisiensi daya yang digunakan pada proses yang dikerjakan. Beberapa penelitian telah mencoba meningkatkan efisiensi daya *electric arc furnace* seperti penelitian terbaru dari *MIDREX technologies* tahun 2010 yang membandingkan korelasi antara HDRI dan penghematan daya pada EAF. Selain itu penelitian dari Paravesh Bhawan bahkan meninjau efisiensi daya di *electric arc furnace* dari segi pencemaran lingkungan yang dihasilkan, sehingga didapatkan energi yang dikeluarkan oleh EAF lebih bersih dan ramah lingkungan. Oleh karena itu diperlukan sebuah inovasi baru dalam hal efisiensi pengoperasian EAF untuk menghasilkan produk baja yang diinginkan tetapi dengan *input* energi yang sangat minimal, dalam penelitian ini akan mencoba memperhitungkan input energi utama yang disuplai ke EAF yaitu daya yang salah satu faktor utamanya untuk efisiensi waktu proses di EAF atau dalam dunia industry lebih dikenal dengan waktu *tap-to-tap* pada *electric arc furnace*. Dimana dalam waktu *tap-to-tap* tersebut mencakup waktu *charging* material, waktu *holding* untuk peleburan dan *refining* antara logam dan pengotornya, serta terakhir *tapping* material.

Dalam proses peleburan DRI menjadi *pig iron* memiliki tujuan utama untuk meningkatkan kadar besi dan derajat metalisasi. Tetapi proses peleburan ini memiliki kelemahan dalam penurunan massa besi yang cukup banyak atau *recovery* besi yang rendah sehingga akan berpengaruh pada hasil produksi *pig iron* yang rendah yang mana dalam skala industry hal ini sangat dihindari karena berakibat pada tingginya *cost* produksi yang dipakai. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah penelitian yang dapat menjadi solusi dari masalah diatas tentang peningkatan derajat metalisasi dan kadar besi yang tinggi dari DRI tetapi tetap mempertahankan massa awal DRI yang diproses atau mendapatkan *recovery* besi yang tinggi sehingga dapat menunjang proses pengolahan pasir besi yang ekonomis dan biaya yang terjangkau serta ramah lingkungan (*eco-friendly*). Dengan harapan hasil penelitian ini dapat diproyeksikan dalam pengembangan proses



reduksi pasir besi dan peleburan DRI dalam skala besar, terutama pada proses *tunnel kiln*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi waktu *holding* pada proses peleburan DRI terhadap kandungan besi total dalam proses pembuatan *pig iron* dengan metode *electric arc furnace*?
2. Bagaimana pengaruh variasi waktu *holding* pada proses peleburan DRI terhadap *recovery* Fe dalam proses pembuatan *pig iron* dengan metode *electric arc furnace*?
3. Bagaimana pengaruh variasi waktu *holding* pada proses peleburan DRI terhadap fasa yang terbentuk dalam *pig iron* dalam proses pembuatan *pig iron* dengan metode *electric arc furnace*?
4. Bagaimana pengaruh variasi waktu *holding* pada proses peleburan DRI terhadap kandungan unsur dan fasa yang terbentuk dalam *slag* dalam proses pembuatan *pig iron* dengan metode *electric arc furnace*?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menganalisa masalah pada penelitian ini terdapat berapa batasan masalah yaitu:

1. Komposisi pasir besi, batubara, dan batu kapur dianggap homogen.
2. Kanji digunakan sebagai pengikat dan pengaruh reaksi kanji diabaikan.
3. Permeabilitas dan porositas pasir besi diasumsikan sama.
4. Tekanan kompaksi yang diberikan dianggap homogen.
5. Diasumsikan tidak ada *heat loss* dalam *muffle furnace* dan *electric arc furnace*.
6. Sumber energi utama yang digunakan untuk proses peleburan DRI menjadi *pig iron* berasal dari energi listrik.
7. Diasumsikan tekanan atmosfer pada reaktor peleburan bersifat *inert*.



8. Reaksi yang menyebabkan degradasi elektroda pada pembentukan busur listrik diabaikan.
9. Arus dan tegangan pada alat *electric arc furnace* dianggap homogen.
10. Komposisi fluks SiO_2 sebagai pengikat *impurities* dianggap homogen.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi waktu *holding* pada proses peleburan DRI terhadap kandungan besi total dalam proses pembuatan *pig iron* dengan metode *electric arc furnace*.
2. Menganalisis pengaruh variasi waktu *holding* pada proses peleburan DRI terhadap recovery Fe dalam proses pembuatan *pig iron* dengan metode *electric arc furnace*.
3. Menganalisis pengaruh variasi waktu *holding* pada proses peleburan DRI terhadap fasa yang terbentuk di *pig iron* dalam proses pembuatan *pig iron* dengan metode *electric arc furnace*.
4. Menganalisis pengaruh variasi waktu *holding* pada proses peleburan DRI terhadap kandungan unsur dan fasa yang terbentuk di *slag* dalam proses pembuatan *pig iron* dengan metode *electric arc furnace*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi empiris mengenai pengaruh variasi waktu *holding* pada proses peleburan DRI terhadap *recovery* besi dan kandungan besi total dalam proses pembuatan *pig iron* sehingga dapat diketahui waktu *holding* yang optimal dan efisien dengan menggunakan *electric arc furnace* sehingga berdampak pada hasil *recovery* besi yang tinggi.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pasir Besi

Pasir besi merupakan material tambang yang melimpah di Indonesia. Berbasis pada sifat pasir besi, material ini telah dimanfaatkan secara luas untuk berbagai kepentingan riset dan bahan produk industri. Telah diketahui sebelumnya bahwa endapan pasir besi dapat memiliki mineral-mineral magnetik seperti Magnetit (Fe_3O_4), Hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), dan Maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Mineral-mineral tersebut mempunyai potensi sebagai bahan industry (Yulianto dkk, 2002). Keberadaan pasir besi yang terdistribusi secara luas serta jumlahnya melimpah di Indonesia menjadi daya tarik secara ekonomi. Besi yang diperoleh dari bijih besi tidak dalam bentuk unsur murni Fe tetapi dalam bentuk besi oksida. Dalam pasir besi, oksida logam ini dijumpai dalam dua fase, Fe_2O_3 dan Fe_3O_4 . Keduanya merupakan bahan magnetik yang menunjukkan sifat kemagnetan ketika berada dalam medan magnet. Fe_2O_3 memiliki interaksi yang lebih lemah di dalam medan magnet dari pada Fe_3O_4 yang memiliki interaksi lebih kuat di dalam medan magnet. Pasir besi ini dapat lebih dimanfaatkan dalam bidang *material science* dengan nilai ekonomi yang lebih tinggi dan ramah lingkungan (Lee, D.G. 2009).

Persebaran pasir besi berasal dari kawasan pantai selatan pulau Jawa, yaitu Jawa bagian timur (Lumajang), Jawa bagian tengah (Jogja) dan Jawa bagian Barat (Cipatujah) dengan rata-rata kadar Fe yang dimiliki sekitar 20-50% dari massa senyawa pasir besi. Bahan yang digunakan sebagai reduktor (pengikat oksida) adalah karbon aktif yang berupa briket batubara dengan nilai kalor menengah (5000-6000 BTU) ditambah dengan bahan penguat struktur (*binder*) dari tepung tapioka (kanji) agar spesimen dapat dibuat menjadi briket. Dalam proses peningkatan kadar Fe pada pasir besi menjadi produk DRI diperlukan dilakukan dengan proses reduksi baik proses reduksi langsung maupun proses reduksi tidak langsung (Barman Tambunan, 2016).

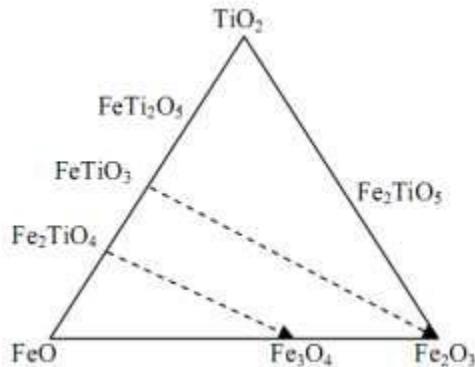


Kandungan besi yang terdapat pada endapan pasir besi utama adalah mineral tetanomagnetik dengan komposisi Fe 60%, Al_2O_3 3,3%, SiO_2 0,26%, P_2O_5 0,55%, TiO_2 9,2%, MgO 0,6%. Secara umum mineral dalam pasir besi terdiri dari dua komponen dibedakan atas dasar sifat magnetiknya. Oksida besi-titanium ($\text{Fe}_x\text{Ti}_y\text{O}_z$) adalah senyawa magnetik yang cukup dominan selain oksida besi lainnya. Kumpulan senyawa besi-titanium ini terdiri dari mineral-mineral yang memenuhi diagram segitiga (*ternary diagram*) dengan anggota-anggota tepi (*end members*) terdiri dari TiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , seperti terlihat dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Pasir Besi (*id.wikipedia.org*)

Diagram *ternery* menjelaskan berbagai komposisi kimia dari mineral-mineral oksida yang hampir selalu menjadi perhatian dalam mempelajari sifat kemagnetan dalam batuan, yaitu FeO (wustit), Fe_3O_4 (magnetit), $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (maghemit), $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (hematit), FeTiO_3 (ilmenit), Fe_2TiO_4 (ulvospinel), Fe_2TiO_5 (pseudobrookite), dan FeTi_2O_5 (ilmeno-rutile). Diagram fasa tersebut juga memuat informasi mengenai tiga deret sistem, yaitu titanomagnetite, titanohematite, dan pseudobrookit.



Gambar 2.2 Diagram *Ternary* FeO-Fe₂O₃-TiO₂ (Anggraeni, 2008)

Adapun proses pemisahan TiO₂ secara konvensional yaitu dengan teknologi *blast furnace*. Teknologi ini akan menimbulkan masalah pada tahap reduksi dan peleburan, pada saat terjadi reduksi antara besi dan TiO₂, TiO₂ yang terbentuk akan berada di dalam *slag* dan dapat tereduksi menjadi Ti₂O, yang dapat mengakibatkan slag akan semakin kental, sehingga sulit untuk memisahkan *slag* dan cairan besi yang terbentuk di dalam *blast furnace tap hole* (Edi Harianto, 2008).

2.2 Batubara

Batubara adalah mineral organik yang dapat terbakar, terbentuk dari sisa tumbuhan purba yang mengendap dan selanjutnya berubah bentuk akibat proses fisika dan kimia yang berlangsung selama jutaan tahun. Pembentukan batubara dimulai sejak periode pembentukan karbon (*Carboniferus Period*) dikenal sebagai zaman batubara pertama yang berlangsung antara 290 juta sampai 360 juta tahun yang lalu. Oleh karena itu, batubara termasuk dalam kategori bahan bakar fosil. Proses awal pembentukan, endapan tumbuhan berubah menjadi gambut (*peat*)



yang selanjutnya berubah menjadi batubara muda (*lignite*) atau disebut pula batubara coklat (*brown coal*).

Berdasarkan dari mutu atau tingkatannya batubara dikelompokkan menjadi kelas:

1. *Lignite*, adalah batubara yang berwarna hitam dan memiliki tekstur seperti kayu.
2. *Sub-bitumine*, batubara jenis ini memiliki warna hitam yang mempunyai kandungan air, zat terbang, dan oksigen yang tinggi serta memiliki kandungan karbon yang rendah.
3. *Bitumine*, batubara jenis ini merupakan batubara yang berwarna hitam dengan dengan tekstur ikatan yang baik.
4. *Antrasit*, merupakan batubara paling tinggi tingkatannya yang mempunyai kandungan karbon lebih dari 93 % dan kandungan zat terbang kurang dari 10 %. Antrasit umumnya lebih keras, kuat dan sering kali berwarna hitam mengkilat seperti kaca. (Yunita, 2000).

Kualitas batubara sangat berpengaruh dalam seluruh biaya produksi DRI. Untuk itu pemilihan batubara sebagai bahan bakar harus teliti. Pemilihan batubara sebagai bahan bakar untuk pemanasan dan reduktor, terdapat beberapa karakteristik yang harus dipenuhi, diantaranya (Ashid, 2014):

- (i) *Proximate Analysis*
- (ii) *Ash Fusion temperature*
- (iii) Kadar Sulfur
- (iv) *Caking and Swelling index*
- (v) Nilai Kalor

Komponen pembentuk batubara berdasarkan analisis proksimat terdiri dari: *Moisture*, *Ash*, *volatile matter*, dan *fixed carbon*. Komponen *volatile* adalah kandungan yang mudah menguap kecuali *moisture*. Penentuan *volatile* dilakukan dengan pemanasan pada temperatur 900-950°C selama 7 menit. Karbon tertambat adalah jumlah karbon yang tertambat di batubara. Penentuan karbon tertambat dengan cara mengurangi jumlah material mudah menguap dan kandungan abu pada kondisi udara kering (Faris, 2015).



2.3 Batu Kapur

Kapur adalah batuan sedimen terutama terdiri dari kalsium (CaCO_3), yang terjadi sebagai kalsit atau jenis aragonit yang terbentuk di di lapisan deposit yang terbaru (paling atas). Dolomit adalah terbentuk dari batuan sedimen yang sama di mana dolomit ($(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)$) mendominasi. Kebanyakan dolomite dibentuk oleh perpindahan awal kapur yang bereaksi dengan air yang kaya magnesium. Sekitar 20% dari semua batuan sedimen yang kapur dan dolomit atau gradasi antara keduanya. Kotoran umum di batuan karbonat sedimen meliputi tanah liat, mineral, silika sebuah dan lain-lain. (Harison, 1993).

Dalam penelitian ini jenis batu kapur yang digunakan adalah dolomit ($(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)$), batu kapur dalam menyediakan gas CO_2 untuk reaksi pembentukan gas CO (reaksi Boudouard). Gas CO_2 diperoleh dengan reaksi dekomposisi dolomit pada persamaan reaksi 2.1.



Selain itu batu kapur berperan sebagai *flux agent* atau pengikat pengotor. Batu kapur dapat berperan dalam proses desulfurisasi batubara melalui reaksi (2.2) pada *range* temperatur 870°C hingga 1037 °C. (Spencer, J. 1985).



Carr Donald D. dan Rooney L.F (1990) membuat klasifikasi mineral atas dasar kandungan kalsit dan dolomit serta material non-karbonat dalam batuan. Jika kandungan kalsit dalam batuan dominan, maka dapat dikatakan sebagai batu gamping. Apabila kandungan dolomit (MgCO_3) yang paling banyak (>15%) maka batuan tersebut diklasifikasikan sebagai batuan dolomit.



Tabel 2.1 Klasifikasi Batu Kapur Berdasarkan Adanya Kalsit dan Magnesit (Carr D.D and Rooney L.F.F, 1990)

Jenis Batuan	Persen Kalsit	Persen Magnesit
Batu Kapur	Kalsit >95%	Magnesit < 5 %
Batu Kapur magnesium	Kalsit 90 - 95%	Magnesit 5 - 10%
Batu Kapur dolomit	Kalsit 50 - 90%	Magnesit 10 - 50%
Dolomit gamping	Kalsit 10 - 50%	Magnesit 50 - 90%
Dolomit	Kalsit 0%	Magnesit > 90%

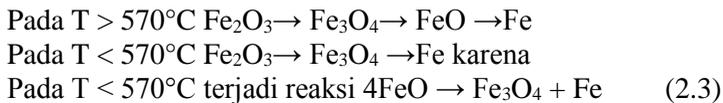
Untuk pembuatan DRI komposisi batu kapur cukup berpengaruh terhadap peningkatan kadar besi dan derajat metalisasi dari *ore* yang sebelumnya adalah pasir besi. Perbandingan komposisi pasir besi : batubara : batu kapur yang dapat menghasilkan kadar besi dan derajat metalisasi tertinggi pada hasil reduksi dapat dicapai dengan perbandingan 2,3 : 1 : 0,66 (Farid, 2017).

2.4 Termodinamika Pasir Besi

Diagram Ellingham merupakan diagram yang berisi bebas suatu reaksi yang diplot ke dalam suatu grafik dengan parameter energi bebas vs temperatur. Pada diagram Ellingham, logam yang aktif secara kimia memiliki energi bebas yang paling tinggi (negatif) dalam membentuk oksida terletak pada diagram di bagian paling bawah. Sedangkan untuk logam yang memiliki energi bebas terkecil (positif) dalam membentuk oksida terletak pada diagram di bagian paling atas. 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. Dari diagram Ellingham pada Gambar 2.3 dapat diketahui temperatur minimal yang dibutuhkan agar terjadi reaksi tersebut terjadi. Hal tersebut dapat ditunjukkan oleh perpotongan antara kurva oksida dan garis

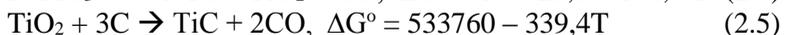
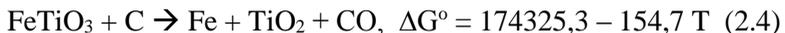


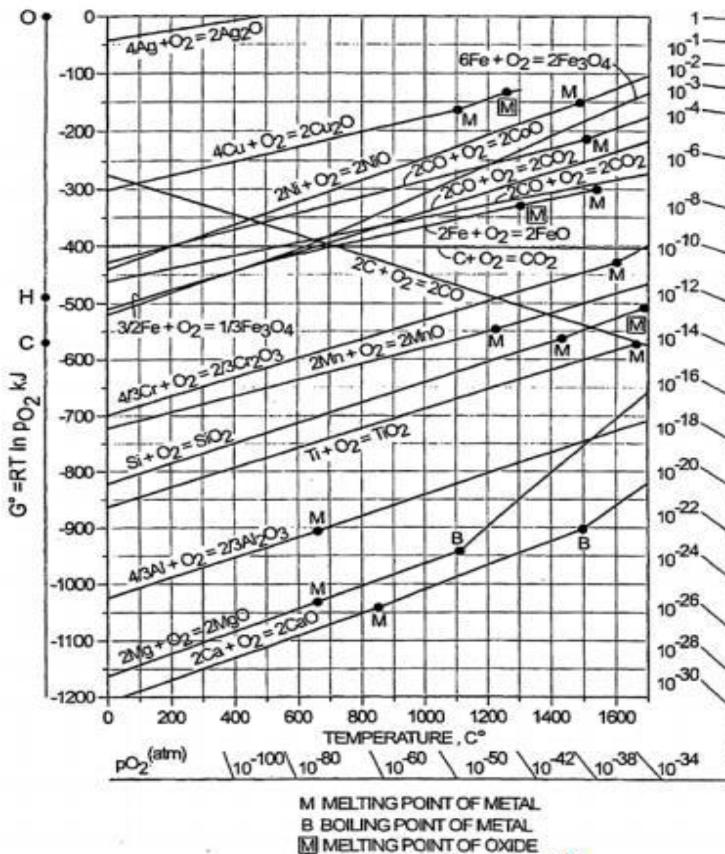
pembentukan CO. Termodinamika hanya dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu reaksi dapat berjalan spontan atau tidak pada temperatur tertentu berdasarkan energi bebas yang dimiliki. Namun tidak dapat digunakan untuk menentukan laju reaksi. Perpotongan antara garis reaksi oksida dan reduksi secara termodinamika menunjukkan bahwa reaksi tersebut berjalan pada temperatur tertentu. Reduksi dari besi oksida dapat digambarkan dengan skema 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*.

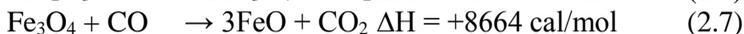
Proses reduksi pasir besi juga memerlukan reaksi untuk mereduksi senyawa ilmenite yang ada di dalam pasir besi. Reaksi utama dalam proses reduksi karbotermik ilmenite menjadi rutil dengan bantuan reduktor karbon terjadi pada temperatur diatas 1773 dan menghasilkan reaksi sesuai Pers. 2.4 dan 2.5. (Guo Peng, 2016).





Gambar 2.3 Diagram Ellingham (Ross, 1980)

Dalam proses berdasar batubara, gas reduktor utama adalah CO. Tiga reaksi reduksi dan entalpi reaksi pada 25°C dapat dituliskan sebagai berikut:

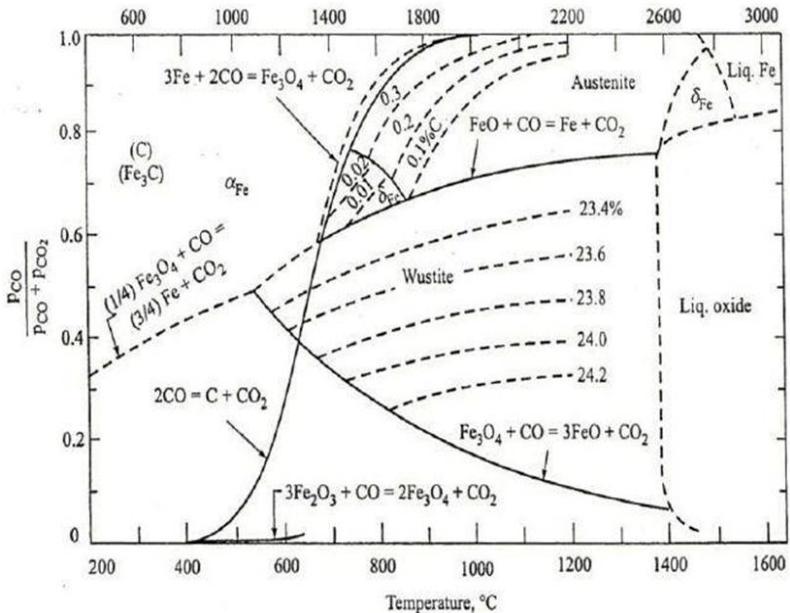




Entalpi reaksi pada 25°C dapat diketahui dari entalpi pembentukan. Reaksi 2.6 dan 2.8, mempunyai entalpi negatif, yang berarti reaksi eksotermik dan reaksi 2.7 mempunyai entalpi positif, berarti reaksi endotermik dan membutuhkan energi. Karena wustit metastabil di bawah 570°C, Fe₃O₄ dapat direduksi dalam satu langkah menjadi besi metalik, tanpa melewati reaksi wustit.



Dari standard energy untuk reaksi (2.6), (2.7) dan (2.8) 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. (Gambar 2.4).



Gambar 2.4 Kesetimbangan Komposisi Gas Terhadap Fungsi Temperatur Pada Sistem Besi Karbon-Oksigen (Arabinda, 2011)



Dalam sistem *solid* dan reduktor berfasa gas, seluruh rekasiselama reduksi bijih besi dapat terjadi dalam dua langkah (Ross, 1980): reduksi bijih besi (2.10) dan gasifikasi karbon (2.11).



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 meningkat, maka kesetimbangan sistem karbon oksigen akan bergeser untuk melepas tekanan. Oleh karena itu untuk menjaga rasio CO/CO₂ tetap sama pada tekanan tinggi, temperatur harus ditingkatkan.

2.5 Kinetika Reduksi Besi

Reaksi reduksi yang menggunakan batubara sebagai reduktor merupakan reaksi yang kompleks dimana terjadi reaksi yang simultan dan banyak tahapannya karena:

1. Merupakan sistem yang kompleks karena terdiri dari banyak fasa seperti Fe, besi oksida, batubara, carbon, dll.
2. Merupakan sistem yang terdiri dari banyak gas yaitu CO, CO₂, H₂, dan H₂O.
3. Sistem yang terdiri dari banyak reaksi kimia yaitu pirolisa batubara, reduksi besi oksida dll.

Reduksi pasir besi merupakan sistem yang multi fasa dan heterogen. Reaksi kimia heterogen yang terjadi pada bidang antar muka karakternya juga berubah seiring dengan waktu reduksi. Transfer massa dan panas tidak hanya terjadi didalam tiap fasa tapi juga antar fasa yang karakternya juga berubah seiring dengan waktu reduksi.

Tahapan fundamental yang terjadi pada reduksi besi oksida adalah sebagai berikut:

1. Kontak antara partikel carbon dengan partikel pasir besi.



2. Difusi gas CO dan H₂ devotalisasi, gasifikasi batubara dan produk reaksi pasir besi dengan carbon padat melewati “*boundary layer*” fasa gas dengan fasa padatan pasir besi.
3. Difusi inter partikel gas CO dan H₂ ke bidang antar muka reaksi.
4. “*Phase boundary reaction*”, terjadi migrasi ion Fe⁺⁺ dan electron ke *nucleus* Fe.
5. Difusi inter partikel gas CO₂ dan H₂O dari bidang antar muka.
6. Difusi gas CO₂ dan H₂O melewati “*boundary layer*” ke lingkungan.

Faktor yang mempengaruhi karakteristik reduksi antara lain adalah:

1. Komposisi gas reduktor. Laju reduksi yang menggunakan gas H dan campuran gas H₂ dan CO sebagai reduktor akan lebih cepat dibandingkan dengan gas CO terutama pada awal reduksi karena laju difusi gas H₂ lebih cepat dibandingkan gas CO, juga karena daya adsorpsi (*adsorption ability*) gas H lebih besar dibandingkan gas CO.
2. Konsentrasi dan jenis.
3. Temperatur, mempunyai efek yang besar terhadap laju reduksi besi oksida. Temperatur akan mempengaruhi laju difusi dan reaksi kimia. Pada umumnya laju reaksi reduksi besi oksida akan naik dengan naiknya temperatur (Makahanap, 2010).

2.6 Direct Reduced Iron atau DRI

DRI adalah besi yang diperoleh dari reduksi pasir besi secara langsung pada temperatur dibawah titik lelehnya, menggunakan reduktor gas alam atau reduktor padat misalnya batubara. Karakteristik bahan baku merupakan hal yang sangat sensitif dalam pembuatan DRI. Ada beberapa manfaat yang terkait dengan DRI yang memungkinkan untuk bersaing secara efektif dengan jenis lain dari besi lebur. Industri harus melakukannya dengan komposisi aktual dari produk akhir itu sendiri (Agunotero, dkk, 2015). Menurut standar IS 15774: 2007 dalam praktiknya sebuah DRI harus memiliki derajat metalisasi lebih dari 82% dan kandungan besi total diatas 72%. Hal ini dikarenakan DRI



digunakan sebagai bahan baku dalam proses *steel making* selain dari besi *scrap*.

Teknologi pembuatan DRI telah berkembang sejak awal abad ke-19 sebagai upaya menghasilkan besi secara dari pasir besi, dengan menghindari temperatur terlalu tinggi yang dibutuhkan untuk mencairkan besi. Dalam cabang industri besi baja, aktifitas pembuatan DRI masih perlu diperkuat dengan penelitian dan pengembangan. Hal ini disebabkan bahan baku pellet yang digunakan untuk membuat DRI dengan teknologi yang tersedia seluruhnya masih diimpor. Industri pembuatan pellet pasir besi belum ada di Indonesia (Jamali, 2010).

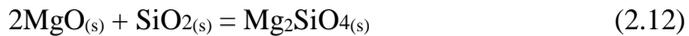
Proses pengolahan DRI menjadi produk lainnya seperti *pig iron* yang telah dikembangkan salah satunya dengan menggunakan *midrex technologies*. Proses ini dikembangkan mulai dari besi spons yang diolah lebih lanjut di dalam sebuah tungku dapur listrik (*Electric Arc Furnace*). Di dalam dapur besi spons dicampur dengan besi tua (*scrap*), dan paduan fero untuk diubah menjadi batangan baja, biasa disebut *billet* (Atsushi, 2011). Salah satu proses pembuatan DRI yaitu dengan proses reduksi langsung yang didefinisikan sebagai suatu proses menghasilkan besi metal dengan mereduksi bijih besi ataupun bentuk senyawa oksida lainnya dibawah temperatur lebur setiap material yang terlibat di dalamnya (Faenman., 1999). Proses reduksi langsung disebut dengan DRI (*Direct Reduction Iron*) hasilnya masih dalam bentuk padatan dan secara fisik pada permukaannya terlihat rongga-rongga atau porositas.



Gambar 2.5 Produk *Direct Reduced Iron* (Khattoi, 2013)



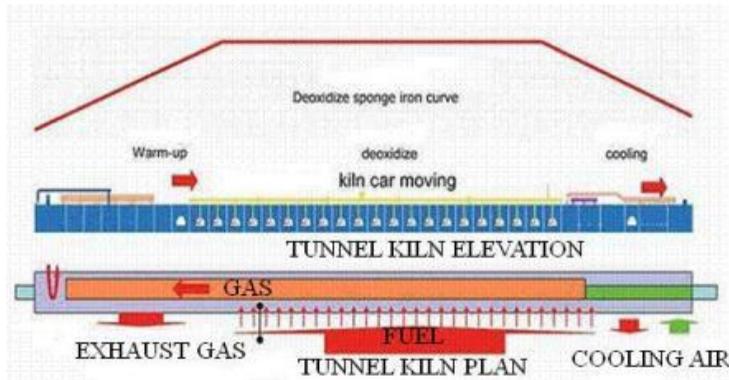
DRI memiliki beberapa fasa yang terkandung didalamnya setelah dilakukan pengamatan, fasa yang terdapat dalam DRI adalah besi, magnetite, maghemite, ilmenite, dan forsterite (Alief, 2016). Fasa forsterite (Mg_2SiO_4) dapat terbentuk dari reaksi antara MgO dan SiO_2 pada temperatur $1100-1400^{\circ}C$ sesuai dengan reaksi 2.12 (Brindley dan Hayami, 2006).



2.7 Teknologi Pengolahan Pasir Besi (*Tunnel Kiln Process*)

Teknologi *tunnel kiln* bukan teknologi baru di Indonesia karena sudah banyak industri yang menggunakannya, tapi aplikasi pada pengolahan bahan tambang belum dikenal luas di kalangan industri. Dalam hal kebutuhan energi, *tunnel kiln* dapat memanfaatkan potensi gas alam mengatasi permasalahan-permasalahan di atas dengan mempertimbangkan kemampuan teknologi dalam negeri dengan didukung oleh sumber daya yang ada yang masih sangat besar dan tersebar di seluruh wilayah Indonesia, namun karena kapasitas produksinya yang relatif lebih kecil daripada peralatan yang lain sehingga kurang berkembang di industri komersial. (Barman Tambunan, 2016).

Tunnel kiln adalah sebuah tungku berisolasi panjang yang stasioner terbuat dari refraktori batu bata atau *pressed ceramic wool blanket*. Tungku ini memiliki rel tertentu di dalam *kiln* berfungsi sebagai jalannya troli. Material dimasukkan ke dalam troli yang kemudian masuk ke bagian ujung dari *kiln* melalui *feed*. Kemudian material keluar dari ujung lainnya *kiln*, berjalan di dalam *kiln* dengan kecepatan tertentu. *Kiln* mempunyai tiga daerah berbeda, yaitu *pre-heat zone* (pemanasan), *firing zone* (deoksida), dan *cooling zone*. Skema *tunnel kiln* terdapat pada Gambar 2.6 (S. C. Khattoi, 2013).



Gambar 2.6 Skema dari *Tunnel Kiln* (S. C. Khattoi, 2013)

Gas alam digunakan untuk memanaskan *kiln*. Karbon di dalam kokas dan antrasit digunakan sebagai agen pereduksi dan juga sebagai bahan bakar. Campuran pereduksi yang terdiri dari kokas, antrasit, dan batukapur, dimasukkan bersama *iron ore* di dalam kapsul yang ditumpuk di atas *cars* (tempat berjalannya *kiln*). Kemudian *cars* didorong dari ujung ke ujung melewati *tunnel kiln* tersebut. Waktu diantara dua *cars* memasuki *kiln* disebut dengan “*pushing time*”. Perlu diingat bahwa penurunan *pushing time* berarti kenaikan laju produksi. *Tunnel kiln* terdiri atas tiga zona: zona pemanasan, zona pembakaran, dan zona pendinginan. *Cars* pada *kiln* pertama-tama melewati zona pemanasan, kemudian melewati zona pembakaran dimana *ore* direduksi menjadi besi pada temperatur tinggi konstan sekitar 1100 – 1200 °C. Setelah itu, *cars* pada *kiln* didinginkan pada zona pendinginan di *kiln*. Proses *cars* pada *kiln* ini bisa berlangsung 2 – 3 hari untuk melewati sebuah *kiln*.

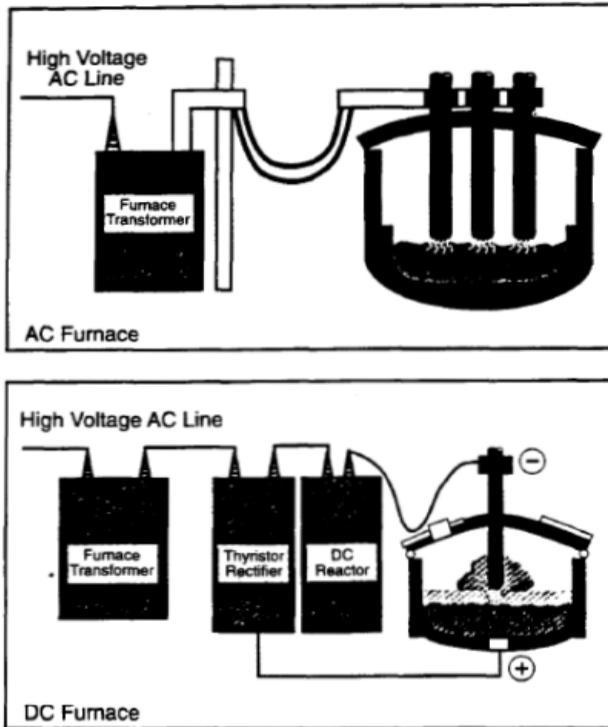
Pada proses *tunnel kiln*, material dilewatkan pada zona temperatur yang berbeda dari pemanasan, dan reduksi seperti pada *Blast furnace* tetapi dengan material *bed* yang tetap. Oleh karena itu, salah satunya mempunyai fleksibilitas dengan bahan baku. Kualitas dari produk sangat baik, dan juga prosesnya dapat diaplikasikan pada reduksi Ferro-nikel, ilminit, dan lainnya.



Keuntungan lainnya adalah proses ini juga memanfaatkan debu benefisiari langsung tanpa terjadi pengerasan. Investasi dan pemeliharaan dari *tunnel kiln* juga rendah. Dikarenakan prosesnya menggunakan gas, ini juga ramah lingkungan. Tidak seperti pada *rotary kiln*, pemanasan dilakukan diluar dan memungkinkan penggunaan sumber karbon yang berbeda sebagai pemanas dan pereduksi. Satu-satunya kelemahan dari proses *tunnel kiln* adalah rendahnya produktivitas, sangat kurang bahkan jika dibandingkan dengan *rotary kiln*.

2.8 Electric Arc Furnace

Electric arc furnace adalah salah satu teknologi yang umum dan populer digunakan dalam industri baja. Sumber utama panas untuk peleburan DRI atau *scrap* adalah obor busur plasma yang mencakup katoda yang dapat digerakkan dan anoda permanen yang dipisahkan dengan penumpukan tekanan gas. Mekanisme utama dalam transfer panas yang masuk adalah reaksi radiasi (Khodabandeh, 2017). Busur listrik bisa diproduksi melalui dua elektroda, perubahan energi listrik menjadi panas terjadi melalui arus dalam busur plasma terionisasi, dimana temperatur busur plasma tersebut bisa mencapai 6000°C. Tungku busur listrik dapat diklasifikasikan menurut proses transfer panas dari busur, yaitu melalui pemanasan tidak langsung atau langsung. Pemanasan secara tidak langsung terjadi saat busur terbentuk antara dua elektroda tanpa kontak dengan *feed material*. Panas ditransfer hanya oleh radiasi dan konveksi. Teknik ini juga digunakan dalam tungku *rotary* fase tunggal, yang tidak lagi digunakan karena tidak ekonomis. Dalam proses pemanasan secara langsung, busur yang terbentuk ditransfer melalui elektroda pada lelehan material. Panas ditransfer melalui konduksi, radiasi, dan konveksi (Grzella et al, 2005).

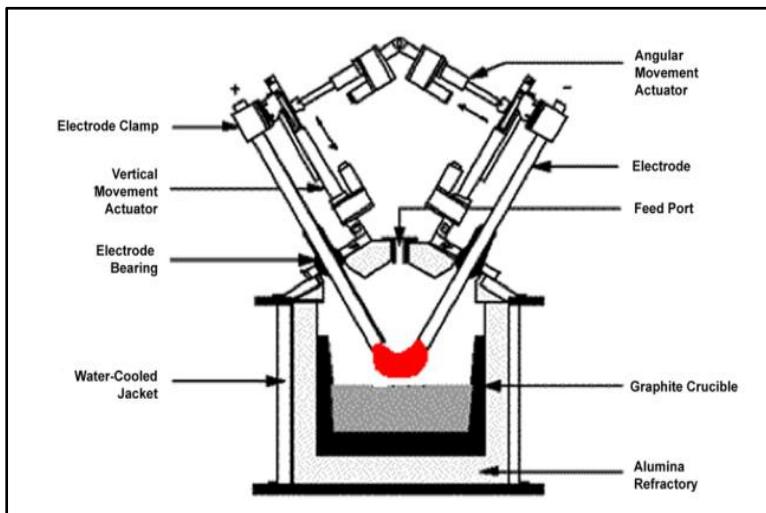


Gambar 2.7 Klasifikasi *Electric Arc Furnace* (Hurd & Kollar, 1991)

Gambar diatas merupakan klasifikasi umum dari *electric arc furnace* berdasarkan mekanisme suplai listrik yang digunakan, namun teknologi ini terus dikembangkan sehingga ada jenis yang memiliki kombinasi karakteristik dari keduanya. *Twin-torch arc furnace* yang dikembangkan oleh perusahaan Tetronics (Faringdon, UK) menggunakan dua elektrode dengan jenis suplai listrik DC untuk menghasilkan busur listrik. Kedua elektrode ini masing-masing bertindak sebagai kutub yang saling berlawanan, dan busur listrik yang terbentuk merupakan proses transfer elektron yang pada jarak tertentu menghasilkan *electrical*



breakdown pada atmosfer di sekitar ujung elektrode sehingga menyebabkan loncatan masif elektron dan reaksi spontan yang menghasilkan plasma dengan temperatur diatas 1500°C . Temperatur ekstrim yang dihasilkan dan meningkat seiring waktu juga memicu reaksi dekomposisi elektrode grafit menjadi gas CO sehingga terjadi erosi konstan pada ujung elektrode tersebut. Penempatan elektrode yang juga fleksibel menyebabkan pengoperasiannya dapat dilakukan dalam beberapa mode, yaitu mode tak langsung dimana arus busur listrik langsung ditransfer dari satu elektroda ke elektroda lainnya, atau di mode langsung dimana aliran arus dari satu elektroda menuju *feed material* kemudian kembali ke elektroda lain. Pada mode langsung ini aliran arus yang melalui material cair selain dipanaskan melalui busur listrik, resistansi yang terbentuk dari konduksi dalam material cair tersebut juga menyebabkan pemanasan internal dari *feed material* (Murphy, 2008).



Gambar 2.8 Skema *Twin Torch Arc Furnace* (Murphy, 2008)



Dalam dunia industri, *electric arc furnace* adalah unit yang masuk dalam bagian pabrik baja mini yang khusus memproduksi baja dan baja tahan karat dengan aplikasi beberapa produk industry. Proses yang terjadi di unit ini dibagi menjadi beberapa tahap yaitu:

1. Persiapan dan pengisian bahan baku.
2. Peleburan dan refining dari lelehan.
3. Pengecoran logam cair ke *ingot* dan *billet*.

Dua input utama untuk *electric arc furnace* untuk mendapatkan diinginkan adalah bahan baku baja dan energi (Bhawan Parivesh, 2010).

Tabel 2.2 *Input dan output Material di EAF (Bhawan Parivesh, 2010)*

Input	Output
<i>Ferrous material (steel, scrap, foundry returns, swaft, pig iron...)</i>	<i>Metal alloy (steel) Dust (metal content refractory)</i>
<i>Alloying metal (ferro alloy)</i>	NO _x , CO ₂ , CO
<i>Flux (lime stone ...)</i>	<i>Organic air pollutant, HC</i>
<i>Energy (electricity, gas, oil)</i>	<i>Metal oxide fumes</i>
<i>Oxygen</i>	<i>Slag (CaO₂, SiO₂, MgO)</i>
<i>Electrodes</i>	<i>Waste refractories</i>

Perbandingan antara dapur induksi dengan tungku busur listrik didapatkan dari beberapa factor yang salah satunya dalam hal konsumsi energi. *Electric arc furnace* memiliki karakteristik dinding tungku pembakaran yang tipis, temperatur pengotor yang rendah, ketersediaan bahan baku yang banyak serta keunggulan dalam hal penggunaan konsumsi energi listrik yang ramah lingkungan. Fleksibilitas *electric arc furnace* dapat digunakan untuk proses pembuatan baja dengan material yang berbeda, memiliki kemampuan untuk produksi dengan kualitas yang tinggi, control terhadap lingkungan yang baik, dan optimalisasi konsumsi



energi listrik yang merupakan faktor kunci dalam permasalahan lingkungan (Koblenzer, 2017).

Dalam proses peleburan besi oleh electric arc furnace dengan proses pada temperatur tinggi sampai diatas titik leleh besi akan dihasilkan karbon terlarut [C] dalam jumlah banyak dari besi cair, selain itu juga dihasilkan gas CO yang didapat daribatubara yang diberi panas. Reaksi pada temperatur tinggi yang berguna untuk mereduksi wustit dan melibatkan karbon terlarut [C] dan gas CO sesuai Pers. 2.13 dan 2.14 (Yan Chun, 2016).



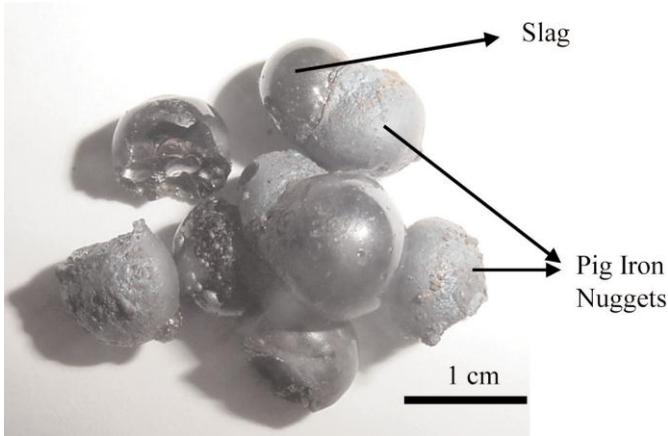
2.9 Pig Iron

Pig iron adalah produk antara hasil peleburan pasir besi dengan bahan dasar karbon yang memiliki kandungan karbon tinggi seperti kokas. *Pig iron* memiliki komposisi karbon yang sangat tinggi, antara 3,5 - 4,5% bersama silica dan unsur penyusun lainnya yang membuatnya sangat getas dan tidak berguna kecuali untuk aplikasi terbatas. Sejarah pembuatan *pig iron* dimulai ketika bangsa China pada dinasti Zhou Dynasty (1122-256 SM). Di Eropa proses produksi tidak ditemukan sampai akhir abad pertengahan atau sekitar tahun 1350-1500 Masehi (*International Iron Metallic Association*, 2017).

Produksi *pig iron* didominasi dengan peleburan bijih besi di *blast furnace*. Bahan baku yang digunakan dalam *blast furnace* adalah pellet biji besi, fluks, dan *coke*. Proses pembuatan *iron nugget* mampu menghasilkan produk padat secara langsung, memiliki massa jenis yang tinggi, *pig iron* dengan metalisasi yang tinggi. Reduktan (batubara) ditambahkan ke sistem untuk memasok karbon yang dibutuhkan untuk reduksi dan karburasi. *Binder* (bentonit) dalam hubungannya dengan partikel bijih halus berfungsi untuk memperbaiki sifat *ore* besi dalam kondisi basah atau kering. *Pig iron* diproduksi pada temperatur tungku 1450°C dan waktu *residence* 22 menit. *Pig iron* dipisahkan dengan *slag*nya



ditunjukkan pada Gambar 2.9. *Slag* dibersihkan kerapatan tinggi, dan besi dengan kadar yang tinggi.



Gambar 2.9 *Pig iron* yang dipisahkan dengan *slag*nya
(Anameric, 2014)

Dalam proses pengolahan *pig iron* diperlukan efisiensi dalam proses sehingga tidak menimbulkan kerugian atau *energy loss* yang besar. Proses pemisahan logam dengan pengotornya harus menghasilkan nilai *recovery* dan nilai *yield* yang tinggi. Perhitungan nilai *yield* sesuai Pers. 2.15 (Li Yan Chun, 2017).

$$\eta = \frac{mi \times wi}{mo} \times 100\% \quad (2.15)$$

Jika dibandingkan dengan *pig iron* yang diproduksi oleh *blast furnace*, *pig iron* yang didapatkan dari reduksi langsung dengan temperatur 1475°C dan waktu *residence* 28 menit memiliki beberapa perbedaan dalam komposisi kimianya yang ditunjukkan dalam Tabel 2.3.



Tabel 2.3 Perbandingan Komposisi *Pig Iron* Produksi *Blast Furnace* dengan *Pig Iron* dengan Reduksi Langsung (Anameric, 2006)

<i>Element</i>	<i>Blast Furnace Pig Iron (wt %)</i>	<i>Pig Iron Direct Reduction (wt%)</i>
Fe	90 – 95,5	95 - 97
C	4 - 5	1,7 – 3,5
Si	0,3 - 1	0,8
S	0,03	0,2 – 0,8
P	<1	0,12
Mn	0,1 – 2,5	0,12

2.10 Waktu dalam *Electric Arc Furnace*

Waktu dalam *Electric Arc Furnace* dikenal dengan istilah *tap-to-tap time* adalah waktu yang digunakan dalam proses di *electric arc furnace* yang dimulai dari *charging*, *smelting*, dan *tapping*. Waktu *tap-to-tap* dalam sebuah industri pengolahan logam yang menggunakan *electric arc furnace* dalam proses utamanya sangat berpengaruh terhadap efisiensi proses yang dipergunakan dalam proses tersebut. Dalam dunia industri EAF beroperasi sebagai proses peleburan yang dilakukan per *batch* dan menghasilkan baja cair. Siklus operasi EAF disebut siklus *tap-to-tap* atau terdiri dari proses pengisian tungku, fase pelelehan, fase *refining*, dan penuangan baja cair. Waktu *tap-to-tap* normalnya kurang dari 60 menit di EAF modern, dan beberapa operasi tungku kembar memerlukan waktu 35-40 menit (Stalhed, 1957).

Tahap pertama dari siklus *tap-to-tap* adalah pengisian material ke tungku. Elektoda dinaikkan dan diayunkan ke sisi tungku untuk memungkinkan pengisian tungku untuk menggerakkan satu ember penuh material ke dalam *furnace*. Tungku paling modern dirancang untuk beroperasi dengan biaya *back-charge* yang minimum. Ini menguntungkan karena pengisian dalam *dead-times* dan tungku tidak memiliki daya dan karena itu material tidak meleleh. Meminimalkan *dead-times* membantu untuk memaksimalkan produktivitas tungku. Pengisian dengan



operasi yang berkesinambungan seperti *Fuchs Shaft Furnace* dan CONSTEEL dapat mengeliminasi siklus pengisian (Pretorius, 2000).

Tahap peleburan adalah periode inti (jantung proses) dari operasi EAF. EAF telah berkembang menjadi alat peleburan yang sangat efisien dan memiliki desain modern yang difokuskan untuk memaksimalkan kapasitas peleburan EAF. Peleburan dilakukan dengan memasok energi ke interior tungku. Energi ini dapat bersifat listrik atau kimia. Energi listrik ditopang melalui elektroda grafit dan biasanya merupakan kontributor terbesar dalam operasi peleburan. Awalnya, tegangan menengah diumpankan sampai elektroda masuk ke dalam material *scrap*. EAF membutuhkan panas untuk meleleh dan memperbaiki baja. Sumber utama panas adalah energi listrik yang diberikan melalui elektroda. Sisa panas diberikan melalui energi kimia (reaksi kimia). Banyak operasi EAF yang baru saja mengembangkan *heat balances* untuk tungkunya. Keseimbangan ini didasarkan pada total energi masuk dan keluar ke tungku selama siklus *tap-to-tap* berlangsung. Analisis keseimbangan tersebut menunjukkan bahwa ada variasi kebutuhan energi yang luas dan efisiensi transfer energi di EAF (Pretorius, 2000). Waktu selama proses peleburan sampai terjadinya *refining* antara logam dengan pengotornya bisa didefinisikan waktu *holding* peleburan.

2.11 Fluks Silika Oksida (SiO_2)

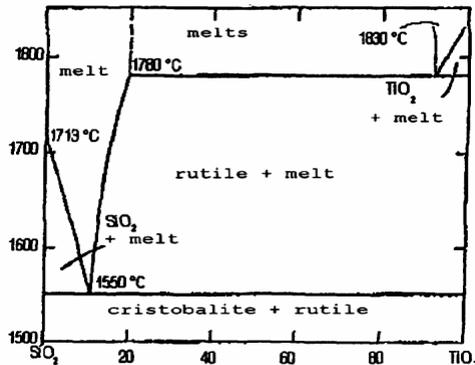
Pasir silika atau pasir kuarsa adalah salah satu material alam yang melimpah di Indonesia, tercatat bahwa total sumber daya pasir silika sebesar 18 miliar ton. Permintaan pasir silika dengan kadar kemurnian yang tinggi untuk pemenuhan kebutuhan industri sangat tinggi. Di dunia perindustrian pemakaian pasir silika saat ini cukup pesat, seperti dalam industri ban, karet, gelas, semen, beton, keramik, tekstil, kertas, kosmetik, elektronik, cat, film, pasta gigi, dan lain-lain (Byantech, 2011).

Di alam, silika sulit didapatkan sebagai unsur dengan kemurnian tinggi, karena memiliki afinitas tinggi terhadap oksida



dan atom lain dengan elektronegativitas tinggi. Secara kimia, ikatan antara oksigen dengan silikon bersifat 50% kovalen dan 50% ionik, sehingga membentuk ikatan yang kuat (White, 2005). Kandungan pengotor yang terdapat didalam pasir silika dapat mempengaruhi kualitas pasir silika dan produk berbahan baku pasir silika seperti merusak transmisi dari fiber optik dan transparansi pada industri kaca, menghitamkan produk keramik dan menurunkan titik leleh dari material refraktori.

Salah satu kegunaan silika dioksida yaitu sebagai *flux* untuk menikat pengotor dalam DRI menjadi *pig iron* pada temperatur 1550°C.



Gambar 2.10 Diagram *Binary* SiO₂-TiO₂ (R. W. Ricker dan F. A. Hummel, 1951)

Dalam akhir proses peleburan adanya penambahan fluks SiO₂ akan berpengaruh pada ikatan senyawa yang terjadi pada pengotor produk peleburan. Salah satu ikatan fasa yang terjadi, berdasarkan Lutge dan Metz tahun 1991 akan terbentuk fasa diposite yang merupakan reaksi antara CaO, MgO, dan SiO₂ sesuai Pers. 2.16





2.12 Penelitian Sebelumnya

Sudah banyak penelitian yang dilakukan dalam hal peningkatan efisiensi energi dalam perduksian pasir besi menjadi DRI hingga dilebur menjadi *pig iron* menggunakan bermacam-macam proses. Untuk penelitian pereduksian pasir besi menjadi DRI hasil yang cukup optimal dapat dilihat dari penelitian yang dilakukan oleh Hairul Wasik dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2016) dengan judul penelitian “Studi Variasi Jenis Arang pada Briket Pasir Besi terhadap Kandungan Fe Total dan Derajat Metalisasi pada Proses Pembuatan *Sponge Iron*”. Tujuan dari penelitian ini adalah membahas pengaruh penambahan variasi jenis arang pada briket pasir besi terhadap kandungan Fe total dan derajat metalisasi pada proses pembuatan DRI. Briket yang diteliti akan direduksi dengan cara dipanaskan menggunakan *muffle furnace* dilakukan *holding* pada temperatur 1350°C selama 10 jam, lalu dilakukan *cooling* 12 jam di *dalam muffle furnace*. Lalu hasil proses ini dikenai pengujian karkarakteristik menggunakan EDX, XRD, dan derajat metalisasi. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa briket dengan reduksi maksimal ialah briket dengan reduktor arang kayu laban dengan pengotor yang paling sedikit, kadar Fe total 64,145% dan derajat metalisasi 88,54%. Hal ini dikarenakan arang kayu laban memiliki kandungan *volatile matter* yang tinggi sehingga kemampuan memproduksi gas CO lebih banyak untuk mereduksi besi oksida. Tetapi dari hasil penelitian juga didapatkan hasil dari variable pembanding batubara sebagai reduktor yang menunjukkan nilai kadar Fe total yang cukup optimal dan mendekati maksimal dari DRI yaitu sebesar 79,0675% dan derajat metalisasi sebesar 95,5%.

Sedangkan penelitian yang khusus dilakukan untuk peningkatan efisiensi energi input daya dalam *electric arc furnace* dan khususnya untuk efisiensi waktu *tap-to-tap* dilakukan oleh R Grünbaum, B Creutzer, dan M Van Der Rest (2010) dengan judul penelitian “*SVC brings productivity improvements to OneSteel*”. Tujuan dari penelitian ini adalah analisis penggunaan komponen tambahan *Static Var Compensator* yang digunakan saat peleburan



baja di industry OneSteel Laverton untuk membantu menyediakan voltase dalam EAF. Keuntungan dari penggunaan komponen ini termasuk meningkatkan daya untuk EAF, yang juga artinya menurunkan waktu *tap-to-tap*, termasuk lainnya konsumsi energi yang rendah dan konsumsi elektroda juga rendah.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Nicholas George Koumetas dari University of Toronto (1998) dengan judul penelitian “*The Use of Oxygen to Decrease Electrical Energy Usage in the Electric Arc Furnace*” menghasilkan kesimpulan bahwa dengan penambahan dan rasio gas oksigen yang tepat dengan dialirkan melalui sisi samping dinding reaktor yang telah dimodifikasi untuk meningkatkan aliran oksigen bebas ke EAF di industry Co-Steel Lasco. Dari sini didapatkan penurunan konsumsi energi listrik sebesar 4,0% dengan diimbangi dengan penurunan konsumsi gas alam secara spesifik sebesar 42,7%. Sedangkan untuk waktu *tap-to-tap* yang diamati mengalami penurunan sebesar 4,5%.

Sedangkan penelitian dalam penggunaan DRI sebagai *raw material* untuk dijadikan *pig iron* mulai diperkenalkan dan dilakukan sejak lama yaitu seperti penelitian industry oleh John L. Stalhed (1957) yang mengambil judul “*Sponge Iron in Electric Arc Furnace*”. Dalam penelitian ini disebutkan bahwa keuntungan memperkenalkan *raw material* murni seperti DRI untuk proses pembuatan baja antara lain: menghasilkan produk baja yang lebih besar, hasil *reject* yang menurun, dan menghasilkan *scrap* dengan pengotor yang kecil. Jika besi spons dapat tereduksi dengan baik sampai persentase reduksi sebesar 92% dan mempunyai pengotor SiO₂ yang kurang dari 2% dapat disimpulkan bahwa biaya peleburan lebih kecil jika dibandingkan dengan meleburkan *scrap* saja. Di Swedia DRI hanya digunakan sebagai baja dengan kualitas tinggi dan diproduksi dalam jumlah yang sedikit.

Penelitian lain yang secara khusus mengamati proses pembuatan *pig iron* dengan metode meleburkan DRI dilakukan oleh Adil Jamali (2005) dengan judul penelitian “Pengolahan Pasir Besi Titan Menjadi *Hot Metal* dengan Tungku Induksi Listrik”.



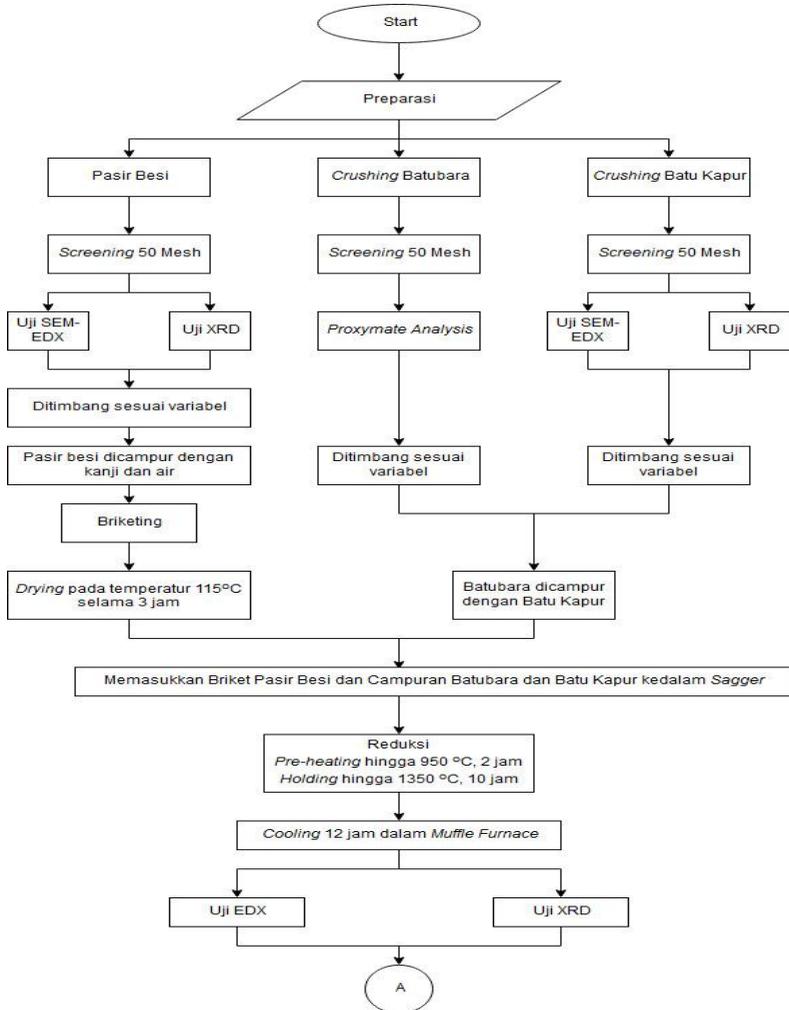
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan menghaluskan bahan penelitian samapai 100 mesh, membuat pellet komposit dengan pengikat bentonite dan pengerasan pellet, reduksi pellet dalam tungku tegak menghasilkan DRI, dan meleburkan briket DRI dengan menggunakan tungku induksi listrik, secara periodic slag yang terbentuk dikeluarkan dan logam cair di *tap* dari tungku. Dari hasil penelitian dapat diamati bahwa pada tahap peningkatan kadar Fe, analisa ayakan sangat membantu pemisahan. Pada tahap peletizing persentase bentonite 5% memberikan hasil terbaik. Pada tahap reduksi, metalisasi yang didapat belum optimal dikarenakan pada pengaturan temperatur dan waktu reduksi serta gumpalan antar pellet yang menghambat reduksi selanjutnya. Pada tahap peleburan dengan tungku induksi, disimpulkan bahwa DRI pasir besi dapat dilebur menghasilkan besi kasar berasal dari pasir besi. Tetapi dalam tahap peleburan masih perlu optimasi pada temperatur peleburan, *input* daya dan waktu peleburannya.

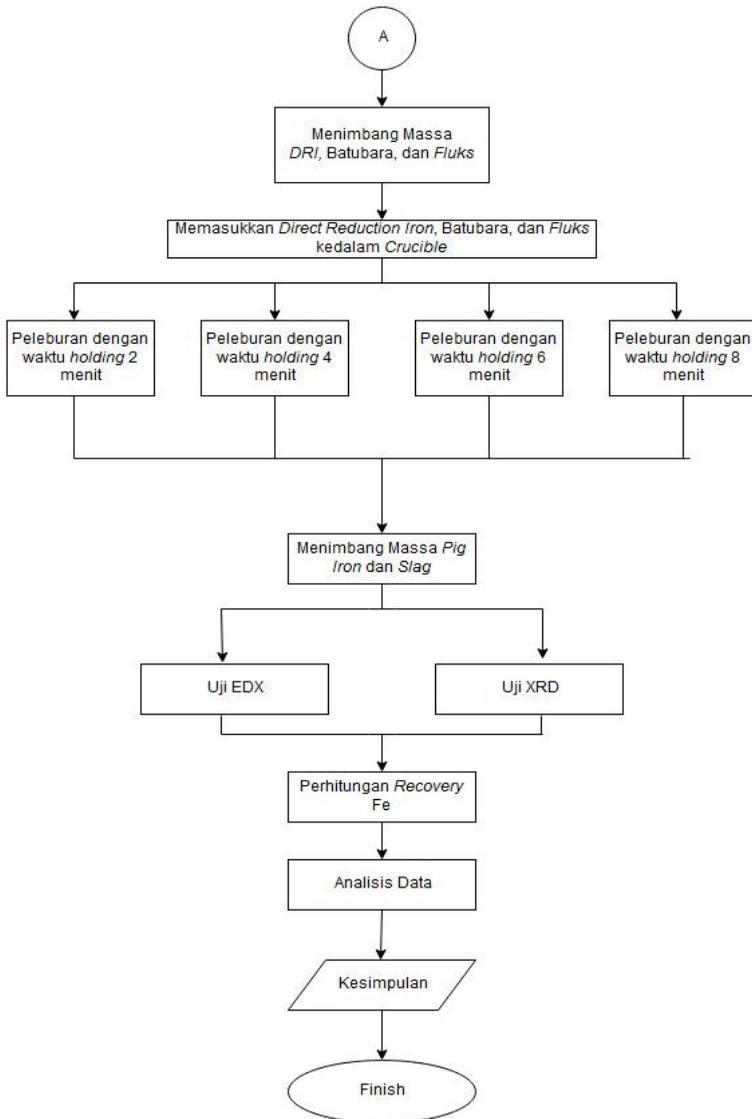
Penelitian yang dilakukan oleh Nuryadi Saleh dan Siti Rochani pada tahun 2015, telah melakukan penelitian terhadap peleburan *Direct Reduced Iron* (DRI). Pada penelitian DRI dicampurkan dengan sejumlah fluks CaCO_3 dan pasir kuarsa. Kemudian campuran spons besi dan kapur serta sedikit batubara diumpankan terhadap *residence furnace*. Proses reduksi dilakukan pada temperatur 1600°C , selama 1-2 jam. Produk yang dihasilkan adalah *pig iron* serta *slag* yang dianalisa komposisi kimianya. *Pig iron* yang dihasilkan mengandung Fe sebesar 95,79%.

Berdasarkan buku *fundamental electric arc furnace* oleh Eugene Pretorius dan Helmut Oltmann tahun 1998 telah dilakukan peleburan *scrap* dengan menggunakan *electric arc furnace* dengan energi sekitar 380–400 kWh untuk setiap ton dengan waktu yang dibutuhkan kurang dari 60 menit dan temperatur yang dapat tercapai sebesar 1430°C . Pada buku ini hasil dari peleburan *scrap* sebanyak 1000 kg dan menghasilkan *pig iron* dengan kandungan Fe sebesar 95,7%.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



3.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam percobaan ini adalah:

3.2.1 Pasir Besi

Pasir besi yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir besi yang berasal dari Sukabumi, Jawa Barat. Pasir besi diayak terlebih dahulu dengan ukuran 50 *mesh*. Pasir besi yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Pasir Besi

3.2.2 Batubara

Batubara merupakan penyedia gas reduktor, batubara dalam penelitian ini dihancurkan dan diayak hingga ukuran 50 *mesh*. Dalam penelitian ini digunakan batubara sebanyak 3596 gram. Batu bara yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 Batubara



3.2.3 Batu Kapur

Batu Kapur yang digunakan berasal dari Gresik. Batu kapur terlebih dihancurkan dan diayak hingga ukuran 50 *mesh*. Dalam penelitian ini digunakan batu kapur sebanyak 2440 gram. Batu kapur yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 Batu Kapur

3.2.4 Kanji

Kanji digunakan sebagai pengikat (*binder*) dalam pembuatan briket. Kanji yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.5



Gambar 3.5 Kanji



3.2.5 Air

Air digunakan dalam pembuatan briket DRI dengan metode direaksikan dengan kanji. Air yang digunakan air ledeng.

3.2.6 LPG

LPG merupakan bahan bakar yang digunakan untuk *muffle furnace*. LPG yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Tabung LPG

3.2.7 Fluks

Fluks SiO_2 digunakan sebagai pengikat *impurities* (titanium) yang masih ada dalam DRI.



Gambar 3.7 Flux SiO_2



3.2.8 Elektroda Grafit

Elektroda grafit berfungsi sebagai bahan yang mengalirkan arus listrik dengan cepat. Dua elektroda disambung satu dengan lainnya untuk menghasilkan busur api.



Gambar 3.8 Elektroda Grafit

3.3 Peralatan Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan beberapa peralatan, antara lain:

3.3.1 *Sagger*

Sagger merupakan tempat berlangsungnya proses reduksi yang berbentuk silinder. *Sagger* terbuat dari Silika Karbida (SiC) dengan Gambar sebagai berikut:



Gambar 3.9 *Sagger*

Dimensi sagger yang digunakan sebagai berikut:



Diameter dalam	: 110 mm
Diameter luar	: 121 mm
Tinggi bagian luar	: 141 mm
Tinggi bagian dalam	: 126 mm
Tebal dinding sagger	: 11 mm

3.3.2 Alat Kompaksi

Alat kompaksi digunakan untuk proses pembentukan briket pasir besi menjadi berbentuk bantalan. Alat kompaksi ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Alat Kompaksi

3.3.3 Muffle Furnace

Muffle Furnace merupakan tungku yang digunakan untuk proses reduksi pasir besi menjadi DRI. Dimensi *muffle furnace* yang digunakan adalah sebagai berikut:

Diameter dalam	: 28 cm
Diameter luar	: 32 cm
Tinggi bagian luar	: 40 cm
Tinggi bagian dalam	: 36 cm
Tebal batu tahan api	: 5 cm



Gambar 3.11 *Muffle Furnace*

3.3.4 Timbangan Digital

Digunakan sebagai alat ukur untuk penyamaan massa pasir besi, kanji, batubara, dan batu kapur. Selain itu untuk mengukur massa masing-masing DRI, *fluks*, *pig iron*, dan *slag*. Timbangan digital ditunjukkan pada Gambar 3.12.

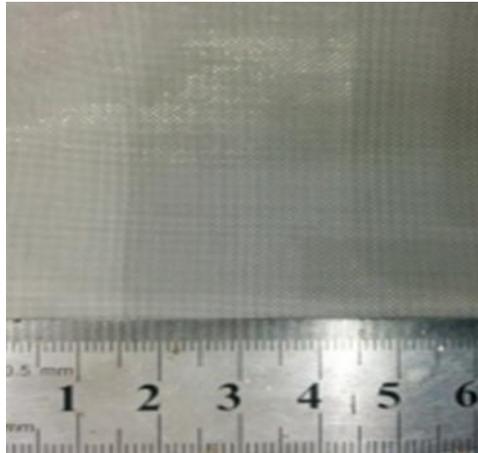


Gambar 3.12 Timbangan Digital



3.3.5 Ayakan

Merupakan alat *screening* pasir besi, batubara, dan batu kapur agar sesuai dengan ukuran butir yang diinginkan. Ayakan yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.13



Gambar 3.13 Ayakan

3.3.6 *Thermocouple dan Thermometer Infrared*

Merupakan alat yang digunakan sebagai pengukur temperatur saat proses reduksi pasir besi dan peleburan DRI menjadi *pig iron* sedang berlangsung. *Thermocouple* dan *Thermometer Infrared* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.14



Gambar 3.14 *Thermocouple* dan *Thermometer infrared*



3.3.7 Blower

Merupakan alat untuk menyuplai udara luar ke dalam *muffle furnace*. *Blower* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.15



Gambar 3.15 *Blower*

3.3.8 Power Supply

Merupakan alat penyuplai energi listrik yang merupakan sumber energi dalam *electric arc furnace*. Spesifikasi *power supply* yang digunakan adalah:

TIG/MMA Welder

Tegangan sebesar 16,2 Volt

Arus maksimal sebesar 200 Ampere



Gambar 3.16 *Power Supply*



3.3.9 Krusibel

Krusibel merupakan tempat berlangsungnya proses peleburan DRI menjadi *pig iron* yang berbentuk balok dengan atap terbuka. Krusibel yang digunakan terbuat dari Silika Karbida (SiC) dengan dimensi sebagai berikut:

Panjang luar	: 118 mm
Panjang dalam	: 85 mm
Lebar luar	: 75 mm
Lebar dalam	: 50 mm
Tinggi badan luar	: 60 mm
Tinggi bagian dalam	: 45 mm
Tebal dinding <i>crucible</i> :	25 mm



Gambar 3.17 *Crucible*

3.4 Pelaksanaan Penelitian

3.4.1 Preparasi Material

Langkah-langkah yang dilakukan pada proses preparasi material yaitu:

1. Menumbuk pasir besi, batubara, dan batu kapur dan kemudian mengayak hingga ≤ 50 mesh.
2. Menguji pasir besi menggunakan alat uji EDX dan XRD.
3. Menguji batukapur dengan EDX dan XRD.
4. Menguji batubara dengan *Proximate Analysis*.
5. Membuat briket pasir besi.

Pasir besi hasil ayakan ditimbang dengan berat 50 gram. Pasir besi dicampur dengan kanji sebanyak 5 gram serta campuran



pasir besi dan kanji ditambahkan dengan air mendidih sebanyak 5 gram dan diaduk. Perbandingan pasir besi : kanji : air adalah 10 : 1 : 1. Campuran pasir besi, kanji, dan air dibentuk menjadi briket bantalan dengan dikompaksi seperti Gambar 3.18. dalam satu kali proses reduksi dibutuhkan 4 buah briket dengan berat 200 gram pasir besi.



Gambar 3.18 Briket pillow pasir besi

6. Pembuatan campuran batubara dan batu kapur

Batubara dan batu kapur hasil ayakan ditimbang dengan berat sesuai perhitungan stoikiometri yaitu dengan perbandingan pasir besi : batubara : batu kapur adalah 1 : 0,44 : 0,62.

7. Briket pasir besi dicampur dengan batubara dan batu kapur kemudian dimasukkan ke dalam *crucible* dengan susunan seperti pada Gambar 3.19.

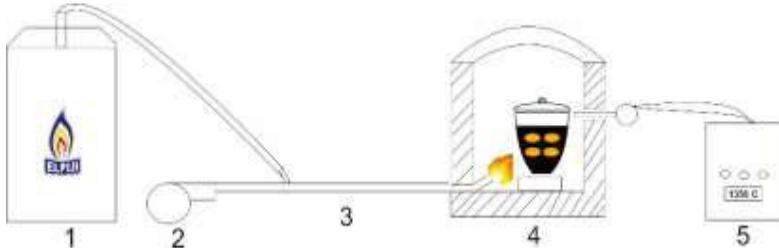


Gambar 3.19 Susunan Briket dan *Reduction Mix*

8. Crucible kemudian dimasukkan ke dalam *muffle gas furnace* untuk dipanaskan. Panas yang dihasilkan berasal pembakaran gas



LPG yang dihembuskan dengan udara bertekanan yang berasal dari *blower* dengan susunan alat seperti pada Gambar 3.20.



Gambar 3.20 Susunan Peralatan (1. Gas LPG, 2. *Blower*, 3. Pipa *Burner*, 4. *Muffle gas Furnace*, 5. *Thermocouple*)

3.4.2 Proses Reduksi

Langkah-langkah yang dilakukan pada proses pereduksian pasir besi yaitu:

1. *Sagger* yang berisi bahan baku dimasukkan dalam *muffle furnace*.
2. Pemanasan *sagger* dilakukan *pre-heating* pada temperatur 900°C selama 2 jam dan dilakukan *holding* pada temperatur 1350 °C selama 10 jam.
3. Sampel didinginkan didalam *muffle furnace* selama 12 jam.
4. Setelah proses ekstraksi selesai, sampel dikeluarkan dari *muffle furnace*. Hasil ekstraksi dikeluarkan dari *sagger*, selanjutnya akan dilakukan proses pengujian EDX, XRD, dan derajat metalisasi.

3.4.3 Persiapan Proses Smelting

Langkah-langkah yang dilakukan pada proses peleburan DRI menjadi *pig iron* yaitu:

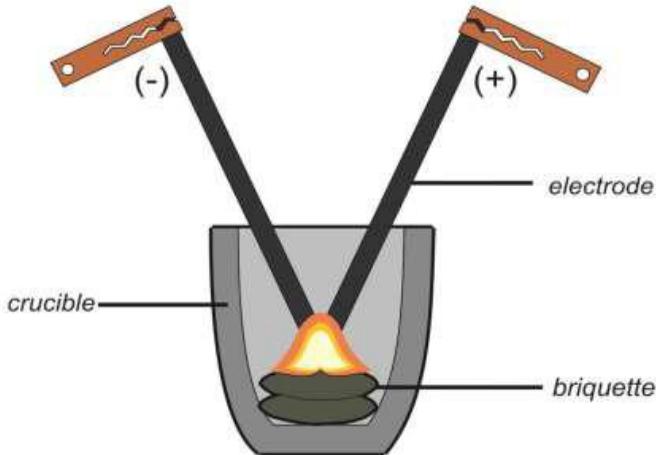
1. Menimbang massa DRI setelah mengalami proses reduksi.
2. Menimbang massa *fluks* SiO₂.
3. Menguji *fluks* menggunakan alat uji EDX dan XRD.
4. Memasukkan DRI hasil reduksi ke dalam *crucible* dan mencampurnya dengan *fluks* sesuai perbandingan berat.



3.4.4 Proses Smelting

Langkah-langkah yang dilakukan pada proses peleburan DRI yaitu:

1. DRI yang telah ditambahkan *fluks*, dimasukkan ke dalam *crucible* dan diposisikan bertumpuk serta berada di tengah-tengah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.21.



Gambar 3.21 Skematik Preparasi *Smelting* dengan *Electric Arc Furnace*

2. Pemanasan dilakukan dengan membentuk busur listrik menggunakan 2 elektrode grafit yang didekatkan ujungnya satu sama lain, berikut dengan *setting power supply* pada arus 180 A dan tegangan tetap sebesar 16,2 V.
3. Proses yang terjadi awal pemanasan bertujuan untuk melebur DRI dan *fluks* yang perlahan-lahan keduanya melebur di waktu menit ke-1, kemudian dilakukan *treatment* untuk *homogenizing* dengan meratakan pemanasan dengan busur listrik di seluruh permukaan DRI yang telah mencair tersebut untuk pemisahan fisik antara *slag* dengan *pig iron* berjalan sempurna.
4. Produk hasil *smelting* didinginkan di dalam *crucible* hingga mencapai temperatur kamar.



5. Setelah proses peleburan selesai, produk hasil *direct smelting* dikeluarkan dari *crucible*.
6. Dilakukan pemisahan fisik antara *slag* dengan *pig iron* dengan menggunakan palu. *Slag* akan pecah dan dapat dipisahkan sehingga menyisakan massa *pig iron* saja. Logam yang sudah terpisah tersebut kemudian dibersihkan dan ditimbang massa *pig iron* dan *slag* untuk selanjutnya dilakukan proses pengujian XRD dan EDX.

3.4.5 Pengujian

Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa pengujian untuk mendapatkan data yang sesuai dengan tujuan dari penelitian. Pengujian antara lain:

1. Pengujian EDX

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy atau EDX adalah suatu teknik 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 *detector* 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 apa saja yang terkandung di dalam suatu sampel. Serta dengan pengujian EDX, didapatkan pula persentase dari suatu unsur yang terkandung di dalam suatu sampel. Alat yang digunakan untuk uji EDX ditunjukkan seperti pada Gambar 3.22.



Gambar 3.22 Alat Uji SEM-EDX

2. Pengujian XRD

Untuk mengetahui struktur kristal dan senyawa secara kualitatif dilakukan pengujian *X-ray Diffraction* (XRD) dari sampel hasil reduksi dengan menggunakan alat XRD PAN *analytical*. Sinar X merupakan radiasi elektromagnetik yang memiliki energi tinggi sekitar 200 eV sampai 1 MeV. Sinar-X dihasilkan oleh interaksi antara berkas elektron eksternal dengan elektron pada kulit atom. Spektrum sinar X memiliki panjang gelombang $10^{-5} \sim 10$ nm, berfrekuensi $10^{17} \sim 10^{20}$ Hz dan memiliki energi $10^3 \sim 10^6$ eV. Panjang gelombang sinar-X memiliki orde yang sama dengan jarak antar atom sehingga dapat digunakan sebagai sumber difraksi kristal. XRD digunakan untuk menentukan ukuran kristal, regangan kisi, komposisi kimia dan keadaan lain yang memiliki orde yang sama. Alat yang digunakan untuk uji XRD PAN *Analytical* ditunjukkan seperti pada Gambar 3.23.



Gambar 3.23 Alat Uji XRD PAN Analytical

5. Proximate Analysis

Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis kandungan utama batubara yaitu: *Moisture*, *Volatile Matter*, *Fixed Carbon*, dan *Ash*.

a. Moisture, adalah kadar air yang terkandung di dalam batubara, nilai ini didapatkan ketika sample batubara dialirkan udara panas pada temperature 104-110°C. Bobot yang hilang itulah kadar *moisture* pada batubara. Prosedure lengkap pengetesaannya dapat dibaca pada ASTM D3173-02. Sampel yang digunakan dihaluskan sampai hingga 250 μm .

Bahan: 1. Udara kering

2. Pengering seperti kalsium sulfat anhidrat (0,004 mg/L), silika gel, magnesium perklorat (0,0005 mg/L), dan asam sulfat (0,003 mg/L)

Alat: 1. Oven Pengering

Prosedur: 1. Mengeringkan sampel dalam pengering selama 15 menit hingga 30 menit dan ditimbang.

2. Mengambil sampel seberat 1 gram dan diletakkan dalam kapsul, tutup kapsul dan ditimbang.

3. Meletakkan kapsul dalam *oven* yang telah dipanaskan (104°C – 110°C). Tutup *oven* dan panaskan selama 1 jam. Buka *oven* dan



dinginkan dengan pendingin. Timbang segera kapsul bila telah mencapai temperatur ruangan.

4. Menghitung hasil analisis.

Perhitungan:

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

Dimana: A= berat sampel yang digunakan (gram)

B= berat sampel setelah pemanasan (gram)

b. Volatile Matter, adalah kandungan batubara yang mudah menguap jika dipanaskan selain *moisture*. Metode pengujian dapat dibaca ASTM D3175-02. Sampel yang digunakan dihaluskan hingga 250 μm .

Alat: 1. Krusibel platina dengan tutup, untuk batu bara berkapasitas 10 – 20 mL, diameter 25 – 35 mm. Dan tinggi 30 – 35 mm.

2. *Vertical electric tube furnace*.

Prosedur:

1. Menimbang sampel seberat 1 g dalam krusibel platina, tutup krusibel dan masukkan dalam *furnace*, temperatur dijaga $950 \pm 20^\circ\text{C}$.

2. Setelah *volatile matter* lepas, yang ditunjukkan dengan hilangnya api *luminous*, periksa tutup krusibel masih tertutup.

3. Setelah pemanasan tepat 7 menit, pindahkan krusibel keluar *furnace* dan didinginkan.

4. Timbang ketika dingin

5. Presentasi *weight loss* dikurangi presentasi *moisture* sama dengan *volatile matter*.

Perhitungan:

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

Dimana: A = berat sampel yang digunakan (gram)

B = berat sampel setelah pemanasan (gram)

Kemudian persen *volatile matter* dihitung:

$$\text{Volatile Matter, \%} = C - D$$

Dimana: C = *Weight Loss* (%)

D = *Moisture* (%)



c. Fixed carbon, adalah material padat selain *ash* pada batubara. Metode penentuannya tidak ada standar khusus, tetapi merupakan selisih bobot batubara dikurangi bobot *moisture*, *volatile matter*, dan *ash* (sesuai prosedur di ASTM D 3172-02).

$$\text{Fixed Carbon, \%} = 100\% - [\text{moisture (\%)} + \text{ash (\%)} + \text{volatile matter (\%)}]$$

d. Ash, adalah kandungan abu pada batubara. Metode pengetesannya dapat dilihat di ASTM D3174-02. Sampel yang digunakan dihaluskan hingga 250 μm .

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

Prosedur:

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

Perhitungan:

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

Dimana:

- A = berat kapsul, tutup, dan *ash* (gram)
B = berat kapsul kosong dan tutup (gram)
C = berat sampel yang digunakan (gram)

6. Recovery Fe

Recovery Fe didefinisikan sebagai persentase Fe yang terdapat pada massa akhir dari proses pereduksian hingga peleburan, *recovery Fe* dapat dihitung menggunakan persamaan 3.3

$$\text{Recovery Fe} = \frac{\text{massa akhir Fe} \times \text{kadar akhir Fe}}{\text{massa awal Fe} \times \text{kadar awal Fe}} \times 100\% \quad 3.3$$



Dimana massa akhir Fe adalah massa dari Fe yang terdapat pada *pig iron* dan massa awal Fe adalah massa dari Fe yang terdapat pada pasir besi.

3.5 Neraca Massa Briket Pasir Besi

Sebelum dilakukan proses aglomerasi dan direduksi menjadi DRI, terlebih dahulu dilakukan perhitungan pada massa bahan (neraca massa) terhadap komposisi bahan di dalam briket. Perhitungan ini berpengaruh pada keberhasilan proses aglomerasi dan reduksi berupa morfologi maupun komposisi yang dihasilkan. Adapun bahan yang digunakan adalah pasir besi, batu bara, dan dolomit, pasir silika, dan kanji. Perhitungan untuk masing-masing massa bahan tersebut dilakukan dengan memperhatikan perilaku termal senyawa penyusunnya pada temperatur tinggi melalui pemanasan oleh busur listrik.

Komposisi massa batu bara dihitung berdasarkan kebutuhan karbon sebagai agen reduktor langsung untuk mereduksi Fe_2O_3 dari dekomposisi pasir besi pada temperatur tinggi.

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

3.6 Rancangan Penelitian dan Kegiatan

3.6.1 Rancangan Penelitian Pembuatan DRI

Berikut adalah rancangan penelitian yang dilakukan untuk proses reduksi mendapatkan DRI sesuai dengan perhitungan stoikiometri.

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian Pembuatan DRI

Pasir besi	Batubara	Batu Kapur	Hasil Pengujian		
			XRD	EDX	Derajat Metalisasi
1	0,44	0,62			



3.6.2 Rancangan Penelitian Pembuatan *Pig Iron*

Berikut adalah rancangan penelitian yang dilakukan untuk proses reduksi mendapatkan *pig iron* sesuai dengan perhitungan stoikiometri.

Tabel 3.2 Rancangan Penelitian Pembuatan *Pig Iron*

Perbandingan massa (gr)			Waktu (sekon)	Arus (A)	Tegangan (V)	Hasil pengujian		
<i>DR I</i>	Batu bara	Fluks				EDX	XR D	<i>Recovery Fe</i>
1	0,104	0,028	120	180	16,2			
			240					
			360					
			480					



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Bahan Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian karakterisasi terhadap beberapa bahan penelitian yang digunakan, yaitu pasir besi, batubara, batu kapur, dan DRI.

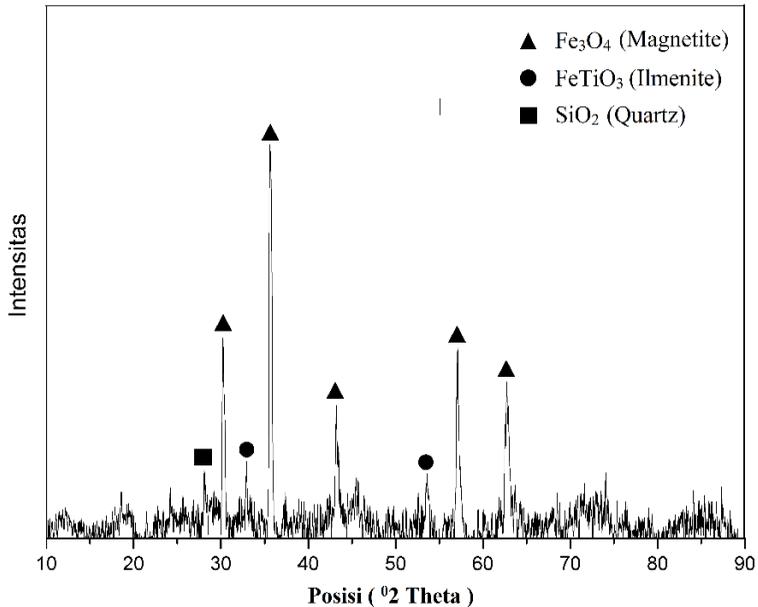
4.1.1 Pasir Besi

Identifikasi dari pasir besi dimulai dengan identifikasi unsur dengan pengujian EDX. Pengujian EDX dilakukan dengan alat SEM *Panalytical* milik Departemen Teknik Material ITS. Hasil pengujian EDX dari pasir besi bisa dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil Pengujian EDX Konsentrat Pasir Besi

Parameter	Fe	Si	Mg	O	Ti	Al
%Wt	57,93	3,14	2,72	24,4	8,46	2,66

Pada hasil pengujian EDX, kadar besi dalam pasir besi masih cukup rendah yaitu 57,93% dan masih banyak unsur seperti silikon, magnesium, oksigen, titanium dan aluminium. Setelah mengetahui kandungan unsur-unsur yang dominan dalam konsentrat pasir besi dilanjutkan dengan identifikasi fasa pasir Besi dengan menggunakan pengujian XRD dengan menggunakan mesin XRD *PANalytical X'Pert*. Pengujian dilakukan dengan posisi 2θ 10^0 sampai 90^0 dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar $1,54056 \text{ \AA}$. Pasir besi yang digunakan berupa konsentrat dan berasal dari Sukabumi, yang telah diayak dengan ayakan 50 mesh atau $397 \mu\text{m}$. Selanjutnya puncak-puncak dicocokkan dengan kartu dari *software PDF-2 Release 2011*. Hasil pengujian XRD pasir besi dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik XRD Pasir Besi Sukabumi

Dari hasil pengujian XRD yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1 dapat diketahui fasa dominan yang terdapat pada pasir besi berupa magnetit (Fe_3O_4). Selain itu juga terdapat fasa magemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), ilmenit (FeTiO_3), dan silika (SiO_2).

4.1.2 Batubara

Batubara berperan penting menyediakan karbon dalam bertindak sebagai reduktor (gas CO hasil gasifikasi batubara) yang mereduksi Fe_2O_3 menjadi Fe dan FeTiO_3 menjadi Fe.

Pengujian *proximate analysis* merupakan pengujian yang sangat penting untuk menentukan kadar *moisture*, *ash*, *volatile matter*, dan *fixed carbon*. Pengujian *proximate* dilakukan berdasarkan standar ASTM D 3173-02. Hasil pengujian *proximate analysis* batubara yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.2.



Tabel 4.2 Hasil Pengujian *Proximate Analysis* Batubara

Parameter	Hasil	Unit	Standar Pengujian
Kelembapan Total (<i>Moisture</i>)	1.8	%, ar	ASTM D3302-02
Kadar Abu (<i>Ash</i>)	4.75	%, ar	ASTM D3174-02
Kadar Karbon Tetap (<i>Fixed Carbon</i>)	42.35	%, adb	ASTM D3175-02
Kadar Zat yang mudah menguap (<i>Volatile Matter</i>)	52.86	%, adb	ASTM D3172-02
Nilai Kalori	7204	Cal/gr, adb	ASTM D5865-03

Batu bara ini memiliki nilai kalori yang cukup tinggi, yaitu 7204 kal/gr dan kadar karbon 42,35%. Sehingga dapat dikategorikan sebagai batu bara golongan Sub-bituminus. Hasil dari analisa proksimat di atas digunakan untuk perhitungan neraca massa yang digunakan untuk kebutuhan fluks dan batubara.

4.1.3 Karakterisasi Dolomit

Identifikasi dari batu kapur (dolomit) dimulai dengan identifikasi unsur dengan pengujian EDX. Pengujian EDX dilakukan dengan alat SEM *Panalytical* milik Departemen Teknik Material ITS. Hasil pengujian EDX dari pasir besi bisa dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian EDX Batu Kapur

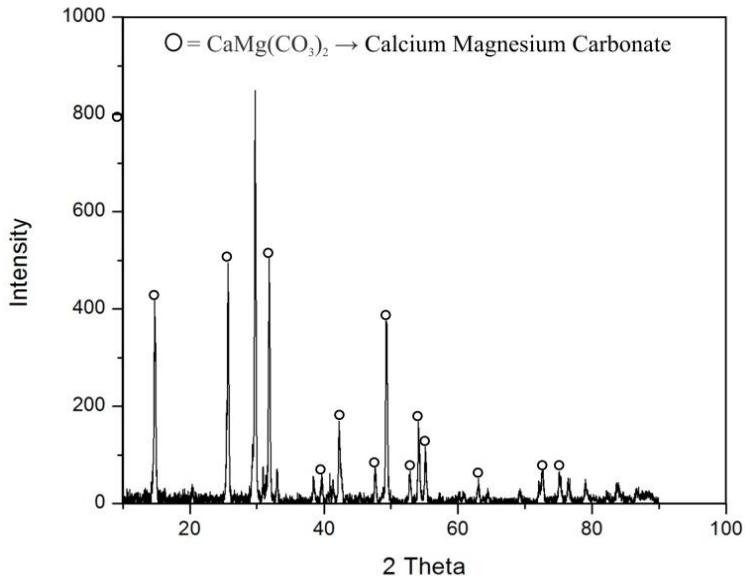
No.	Elemen	Rumus Kimia	Komposisi (%)
1.	Kalsium	Ca	18.015
2.	Magnesium	Mg	14.30
3.	Karbon	C	12.6215
4.	Oksigen	O	55.0635



Dari pengujian EDX di atas tampak bahwa kapur memiliki kandungan Mg yang cukup tinggi, yaitu 14.30 %. Dari kandungan Mg tersebut dapat disimpulkan bahwa kapur yang digunakan ialah *dolostone* atau dolomit bukan *limestone*. Dari segi proses aglomerasi, baik Mg maupun Ca yang membentuk senyawa $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ akan membantu proses dengan cara menyediakan gas CO_2 untuk penyediaan gas reduktor proses reduksi seperti yang ditunjukkan pada Reaksi 2.3.

Batu kapur memegang peranan dalam menyediakan gas CO_2 dari reaksi dekomposisi batu kapur dan mengikat pengotor seperti sulfur. Dari hasil pengujian XRD dan EDX yang telah dilakukan, dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ berperan dalam menyediakan CO_2 melalui reaksi dekomposisi dolomit. Gas CO_2 hasil dekomposisi dolomit berperan dalam menyediakan gas reduktor (CO) melalui reaksi Boudouard.

Setelah mengetahui kandungan unsur-unsur yang dominan dalam dolomit dilanjutkan dengan identifikasi fasa dari dolomit, identifikasi fasa dari dolomit dilakukan dengan menggunakan mesin XRD *PAN analytical*. Pengujian dilakukan dengan posisi 2θ dari 10° sampai 90° dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar $1,54056 \text{ \AA}$. Batu kapur yang digunakan berupa dolomit yang berasal dari Gresik. Dolomit telah diayak dengan ayakan 50 mesh atau $300 \mu\text{m}$. Hasil pengujian XRD dolomit dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil Pengujian XRD Batu Kapur

Pengujian XRD dari dolomit menghasilkan *peak* senyawa yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 diatas. Hasil pengujian XRD dianalisa dengan menggunakan *PDF-2 Release 2011*. Dari *peak* tersebut dapat diketahui fasa-fasa yang terdapat pada dolomit. Semakin tinggi *peak* yang terbentuk menandakan semakin banyaknya juga fasa yang terdapat pada dolomit tersebut, maka dari analisa *peak* didapatkan fasa dominan pada dolomit adalah *Calcium Magnesium Carbonate* ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

4.1.4 Karakterisasi *Direct Reduced Iron* atau DRI

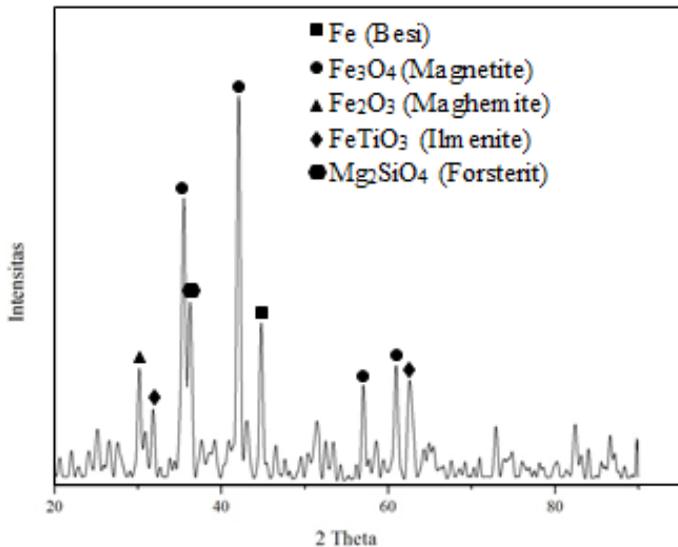
Identifikasi dari DRI yang merupakan hasil reduksi pasir besi dilakukan dimulai dengan identifikasi unsur dengan pengujian EDX. Pengujian EDX dilakukan dengan alat SEM Panalytical milik Departemen Teknik Material ITS. Hasil pengujian EDX dari reduksi pasir besi bisa dilihat pada Tabel 4.4

**Tabel 4.4** Hasil Pengujian EDX Hasil Reduksi Pasir Besi

Parameter	Fe	Si	Mg	Ca	Ti	Al
%Wt	75,722	3,21	4,24	1,06	2,295	1,21

Pada hasil pengujian EDX, dapat diketahui bahwa telah terjadi terjadi proses reduksi pada briket pasir besi. Hal ini dibuktikan dengan naiknya kandungan Fe sebesar 17,792%. Kenaikan ini dikarenakan tereduksinya fasa besi oksida yang terdapat pada bahan pasir besi oleh gas CO yang berasal dari batubara dan batu kapur sesuai dengan Pers. 2.6, 2.7, dan 2.8. Sesuai dengan persamaan diatas bahwa besi oksida tereduksi dengan penambahan gas CO dari batubara dan batu kapur yang merupakan agen reduktor, (Arabinda, 2011).

Identifikasi fasa dari hasil reduksi pasir besi dilakukan menggunakan mesin XRD PANalytical X'Pert. Pengujian dilakukan dengan posisi 2θ 10° sampai 90° dan menggunakan Panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar $1,54056 \text{ \AA}$. Sampel hasil reduksi pasir besi yang diuji XRD yaitu pasir besi yang telah direduksi dengan menggunakan *muffle furnace*. Selanjutnya data hasil pengujian XRD dianalisa dengan cara dicocokkan dengan kartu JCPDFWIN *release* 2000. Gambar 4.3 merupakan hasil identifikasi dari fasa yang terbentuk pada briket yang telah direduksi.



Gambar 4.3 Grafik XRD Hasil Reduksi Briket Pasir Besi

Dari hasil pengujian XRD yang ditunjukkan oleh Gambar 4.3 dapat diketahui fasa dominan yang terdapat pada DRI hasil reduksi pasir besi berupa besi (Fe) dengan puncak 2θ 44,8270, magnetit (Fe_3O_4) dengan puncak 2θ 35,5122, 43,1060, 57,0851 dan 62,5952, maghemit (Fe_2O_3) dengan puncak 2θ 30,1810, ilmenit (FeTiO_3) dengan puncak 2θ 31,8666, 63,4721, serta forsterit (Mg_2SiO_4) dengan puncak 2θ 36,2542.

Sebagaimana pada hasil pengujian XRD fasa Fe selalu muncul, hal ini menunjukkan telah terjadi proses reduksi pada briket DRI. Akan tetapi reduksi yang berjalan belum berjalan maksimal diindikasikan fasa pada puncak tertinggi masih berupa besi oksida, selain itu masih terdapatnya pengotor seperti Forsterit, Quartz, dan Magneli.

Pada hasil XRD briket DRI memiliki fasa FeO, secara ideal menurut diagram kesetimbangan Fe-O-C pada fasa FeO akan tidak bisa terbentuk pada DRI karena FeO akan terdekomposisi menjadi α -iron dan Fe_3O_4 pada temperatur dibawah 570°C (Biswas



1982). Reaksi dekomposisi ini terjadi jika pendinginan berjalan dengan lambat. Adapun dengan adanya kandungan FeO pada briket hasil reduksi menandakan bahwa proses pendinginan yang dialami oleh briket DRI masih berjalan terlalu cepat.

Adanya fasa Fe_3O_4 dan Fe_2O_3 menandakan adanya senyawa besi oksida yang belum tereduksi, hal ini terindikasi proses difusi gas reduktor (CO) ke dalam partikel pasir besi dalam briket masih belum maksimal. Difusifitas sangat dipengaruhi oleh porositas dan permeabilitas dari partikel dari briket pasir besi.

Selain itu, terbentuknya fasa FeTiO_3 pada proses reduksi briket pasir besi disebabkan laju reduksi besi oksida dari senyawa ilmenit memang sedikit lebih rendah jika dibandingkan dengan oksida besi natural (Merk dan Pickles, 1988). Serta ilmenit merupakan senyawa kristalin yang stabil pada temperatur likuidus ($1100\text{-}1350^\circ\text{C}$) sehingga pada temperatur tersebut senyawa ilmenit kerap kali terbentuk (Liu., dkk, 2016).

Terdapatnya fasa forsterit (Mg_2SiO_4) yang merupakan fasa pengotor yang terdapat pada DRI hasil reduksi briket pasir besi. Fasa Mg_2SiO_4 dapat terbentuk dari reaksi antara MgO dan SiO_2 pada temperatur $1100\text{-}1400^\circ\text{C}$ sesuai dengan reaksi 2.12 (Brindley dan Hayami, 2006).

Derajat metalisasi yang merupakan prosentase Fe metalik yang terbentuk dari Fe total yang ada pada briket hasil reduksi. Adapun hasil pengujian derajat metalisasi diketahui bahwa briket DRI mengandung derajat metalisasi sebesar 66,52%. Derajat metalisasi yang tinggi dipengaruhi oleh difusi gas CO yang merata baik secara vertikal maupun horizontal.

4.2 Pengaruh Variasi Waktu *Holding* terhadap Kandungan Fe Total dalam *Pig Iron*

Sampel hasil reduksi pasir besi yang diuji dengan EDX yaitu DRI yang telah dilebur menggunakan *electric arc furnace* dengan variasi sesuai dengan Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Variabel dalam Penelitian



No.	Variabel (Menit)	Arus (A)	Tegangan (V)
1.	2	180	16,2
2.	4	180	16,2
3.	6	180	16,2
4.	8	180	16,2

Kadar unsur Fe dari *pig iron* hasil peleburan dalam setiap variabel dapat diketahui dengan menggunakan pengujian EDX. Pengujian EDX dilakukan dengan alat SEM *Panalytical* milik Departemen Teknik Material ITS. Adapun hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian EDX *Pig Iron*

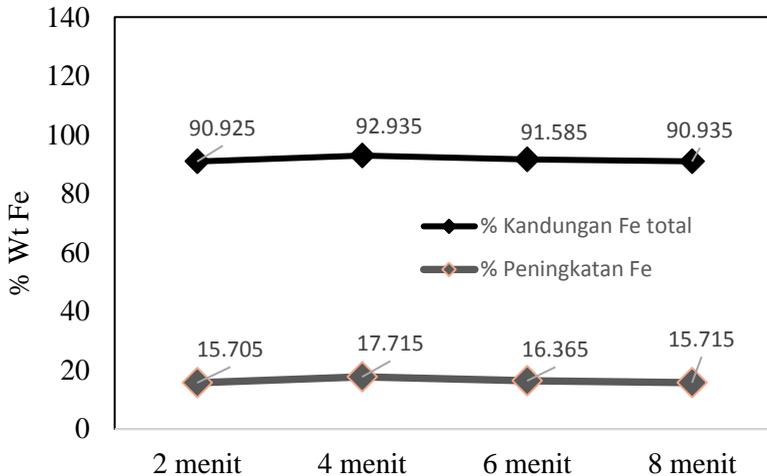
Unsur %Wt	Variabel 2 menit	Variabel 4 menit	Variabel 6 menit	Variabel 8 menit
Fe	90,925	92,935	91,655	90,935
Ti	7,165	5,675	6,155	7,535
Si	0,52	0,22	0,830	0,2
C	1,39	1,17	1,36	1,34

Dari hasil pengujian EDX untuk mengetahui kandungan Fe total, dapat diketahui bahwa telah terjadi peningkatan kandungan Fe sesuai dengan perbedaan waktu *holding* yang digunakan saat melebur DRI dengan menggunakan *electric arc furnace*. Apabila kandungan Fe total pada hasil peleburan dibandingkan dengan kandungan Fe total pada DRI yang merupakan bahan awal peleburan sebesar 75,722% maka akan diperoleh peningkatan kadar Fe.

Berdasarkan data Tabel 4.6 dan hasil perbandingan kandungan Fe total dan peningkatan kandungan Fe dapat di plot



pada Grafik pengaruh variabel waktu *holding* terhadap kandungan Fe total dalam *pig iron* dan peningkatan kandungan Fe, adapun grafik kandungan Fe total dalam *pig iron* dengan peningkatan kandungan Fe hasil peleburan DRI dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Pengaruh Variasi Waktu *Holding* terhadap Kandungan Fe Total dan Peningkatan Kandungan Fe

Berdasarkan Gambar 4.4 dapat diketahui bahwa telah terjadi proses peleburan yang baik pada briket DRI. Hal ini dibuktikan dengan naiknya kadar Fe Total. Kenaikan ini dikarenakan tereduksinya beberapa fasa yang dominan dalam DRI seperti magnetit (Fe_3O_4), wustit (FeO), dan ilmenit (FeTiO_3). Fasa Fe dapat memisahkan dari beberapa fasa tersebut ketika dipanaskan diatas temperatur leleh unsur besi yaitu 1535°C . Kenaikan kadar Fe juga dipengaruhi adanya reduktor batubara yang ditambahkan saat peleburan dengan *electric arc furnace* dan tambahan fluks yang berfungsi mengikat unsur pengotor yang terdapat pada DRI. Titanium adalah unsur yang paling sukar terpisah dengan unsur Fe ketika membentuk sebuah fasa apabila



tidak dikenai perlakuan khusus seperti yang terdapat dalam proses *electric arc furnace*.

Reduksi yang dilakukan diatas titik leleh akan menghasilkan *pig iron* dimana sebagian besar unsur pengotor memisahkan dari unsur besi ketika berada dalam fase cair dan selanjutnya akan mengambang di atasnya ketika membeku. Saat temperatur pemanasan yang sangat tinggi, reduksi dan pemisahan beberapa unsur pengotor menghasilkan kandungan unsur silikon dan mangan dalam kadar kurang dari 1% tergantung pada komposisi bahan dan kondisi proses (Yildirim, 2017). Menurut Anameric tahun 2014, *pig iron* yang baik mengandung kadar Fe total antara 90 – 95,5%. Dalam penelitian yang dilakukan menunjukkan semua variabel waktu *holding* sudah didapatkan kandungan Fe total sesuai dengan standar yang baik.

Presentase dari besi dalam *slag* mengindikasikan reaksi reduksi yang belum sempurna dan dianggap *iron loss* (Srivastava, 2012). Sehingga waktu *holding* 2 menit diindikasikan belum terjadi reaksi reduksi yang optimal karena kandungan Fe total belum maksimal yaitu sebesar 90,925%. Dalam hasil uji EDX *slag* juga ditunjukkan bahwa masih banyak terdapat kandungan Fe didalam *slag*. Hal ini dipengaruhi reaksi peleburan dan reduksi besi yang belum terjadi secara sempurna karena menurut perhitungan *energy balances*, waktu *holding* 2 menit belum bisa menghasilkan keseimbangan energi yang cukup untuk menghasilkan reaksi reduksi besi oksida menjadi besi pada proses peleburan DRI.

Menurut perhitungan *energy balances*, waktu *holding* paling optimal yang dibutuhkan untuk melebur DRI adalah 4 menit karena waktu tersebut akan menghasilkan energi yang cukup menghasilkan reaksi reduksi besi oksida menjadi besi. Variasi waktu ini juga sesuai digunakan karena tidak menghasilkan energi berlebih yang mengakibatkan turunnya kandungan Fe total dalam *pig iron*. Energi yang dibutuhkan menurut *heat balances* membutuhkan waktu *holding* 200 detik dengan metode peleburan menggunakan *electric arc furnace* yang memiliki efisiensi 70% (Joseph, 1987).



Energi yang berlebih pada proses peleburan DRI akan menyebabkan reaksi berlangsung terlalu tinggi dan akan berakibat pada turunnya kandungan besi total dalam *pig iron*. (Yousef, 2010). Waktu *holding* 6 dan 8 menit menyebabkan kelebihan energi peleburan jika ditinjau dari perhitungan *energy balances*. Kandungan Fe total yang dihasilkan juga lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan waktu *holding* 4 menit. Dimana semakin tinggi energi berlebih dari *electric arc furnace* akan menyebabkan kandungan Fe total juga semakin rendah.

Unsur titanium dapat direduksi kadarnya dengan menggunakan reduksi karbotermik senyawa ilmenit yang diinvestigasi oleh Welham dan Williams pada temperatur 1773 K di atmosfer. Hal ini menunjukkan bahwa fasa rutil yang awalnya terlihat dapat tereduksi unsur titaniumnya selama berlangsungnya reduksi karbotermik (Gou Peng, 2016). Reaksi utama yang terjadi selama proses peleburan yang melibatkan reduksi karbotermik seperti Pers. 2.4 dan Pers. 2.5. Reaksi pada Pers. 2.4 dan 2.5 dapat terjadi ketika reaksi berlangsung di temperatur yang lebih tinggi dari 1773 K.

Analisa yang menunjukkan perbedaan reaksi yang terjadi di temperatur 1773 K ketika laju reaksi yang semakin meningkat berbanding lurus dengan peningkatan temperatur reaksi. Laju reaksi menunjukkan trend yang meningkat sampai mencapai temperatur optimal dan bergerak turun ketika laju reaksi mengakibatkan reaksi berjalan lambat (Guo Peng, 2016).

Dari pembahasan diatas menunjukkan perbandingan laju reaksi CO yang digunakan mereduksi ilmenit, berbanding lurus dengan hasil penelitian peleburan DRI yang menunjukkan laju reaksi paling optimal untuk mereduksi ilmenit sebanding ketika waktu *holding* sekitar 4 menit. Waktu peleburan oleh *electric arc furnace* yang tepat akan menyebabkan reaksi reduksi karbotermik yang berfungsi mereduksi kandungan *ilmenite* berjalan optimal untuk dan dapat menurunkan kadar unsur titanium dalam *pig iron*. Waktu *holding* 2 menit membuat reaksi berjalan terlalu cepat atau ketika reaksi belum sampai pada kondisi optimal.



4.3 Pengaruh Variasi Waktu *holding* terhadap *Recovery* Fe dalam *Pig Iron*

Variasi waktu *holding* yang digunakan juga akan mempengaruhi *recovery* Fe pada *pig iron* hasil peleburan DRI. Nilai *recovery* Fe didapatkan dari perbandingan kadar Fe dan massa DRI sebelum peleburan dengan kadar Fe dan massa *pig iron* setelah peleburan dengan *electric arc furnace*. Proses dikatakan optimal jika proses tersebut mendapatkan perolehan *recovery* besi dengan dengan persentase yang tinggi, metode untuk menentukan *recovery* besi sesuai dengan Pers. 3.3.

Selain waktu *holding*, temperatur juga mempengaruhi tinggi atau rendahnya nilai *recovery* Fe. Temperatur berpengaruh pada peningkatan nilai *recovery* dan kadar besi. Nilai tertinggi dari tingkat *recovery* dapat dilihat ketika temperatur diatas 1300°C, ketika temperatur diatas 1300°C lelehan yang dihasilkan akan meningkat dengan cepat berbanding lurus dengan peningkatan temperatur. (Li Ke-qing dkk, 2011).

Untuk mengetahui pengaruh waktu *holding* terhadap *recovery* besi pada *pig iron* dapat dilihat pada Tabel 4.7

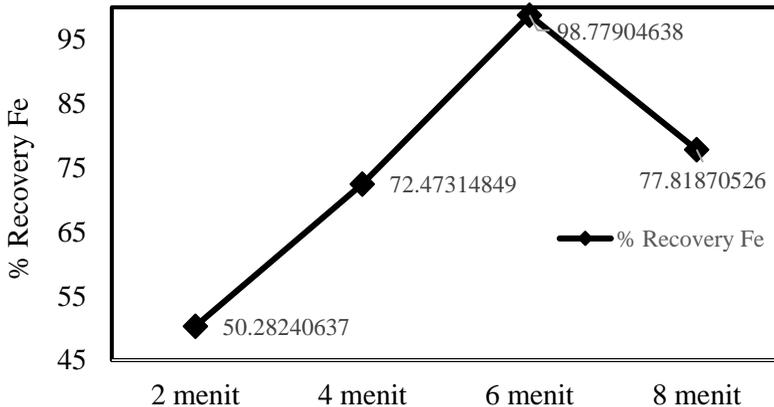
Tabel 4.7 Hasil *Recovery* Fe *Pig Iron*

Waktu <i>holding</i>	Massa Awal (gr)	Kadar Fe Awal (%wt)	Massa Akhir (gr)	Kadar Fe Akhir (%wt)	Recovery Fe (%)
2 menit	40	75,722	16,75	90,925	50,282
4 menit	40	75,722	23,62	92,935	72,473
6 menit	40	75,722	32,668	91,585	98,780
8 menit	40	75,722	25,92	90,935	77,819

Berdasarkan data Tabel 4.7 dapat di plot pada Grafik pengaruh variabel waktu *holding* terhadap *recovery* Fe dalam *pig*



iron, adapun grafik *recovery* Fe hasil peleburan DRI dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Pengaruh Variasi Waktu *Holding* terhadap *Recovery* Fe

Berdasarkan Tabel 4.7 dan Gambar 4.5 dapat diketahui bahwa telah terjadi proses reduksi pada semua briket DRI ketika dilebur menggunakan *electric arc furnace*. Dalam penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan *recovery* besi, proses pemisahan *pig iron* dan pengotornya dapat terjadi dan berkorelasi dengan baik ketika proses peleburan terjadi di dalam *crucible* yang kemudian dikenai temperatur tinggi (Hui Guo, 2017). Peningkatan efisiensi energi untuk menghasilkan hasil *recovery* yang tinggi dapat diperoleh dengan pengendalian proses yang lebih baik dan peningkatan efisiensi termodinamika proses (Qi Zhang, 2017).

Ketika peleburan DRI menggunakan waktu *holding* 2 menit didapatkan *recovery* Fe sebesar 50,282%, dimana hasil akhir peleburan mendapatkan massa *pig iron* sebesar 16,75 gram dan kandungan Fe total 90,925%. Menurut perhitungan *heat balances* yang dilakukan menunjukkan bahwa energi yang dibutuhkan untuk melebur DRI seharusnya lebih tinggi jika dibandingkan dengan waktu *holding* 2 menit. Artinya untuk menghasilkan *pig iron* yang



baik masih kurang maksimal, dikarenakan pada saat energy balances belum mencapai titik keseimbangan maka dapat dipastikan reaksi yang digunakan untuk melebur DRI belum terjadi dan proses peleburan yang belum optimal sehingga menghasilkan *recovery* Fe yang tidak maksimal.

Kemudian pada waktu *holding* 4 menit didapatkan *recovery* Fe sebesar 72,473% dari hasil massa *pig iron* 23,62 gram dan kandungan Fe total 92,935%. Berbeda dengan *recovery* Fe pada waktu *holding* 2 menit, menurut perhitungan *heat balances* waktu 4 menit telah cukup untuk menghasilkan *pig iron* dengan hasil maksimal. Namun untuk menghasilkan massa *pig iron* yang tinggi harus dilakukan proses reduksi yang lebih lanjut karena proses reduksi wustit (FeO) yang akan direduksi menjadi besi dalam proses peleburan memerlukan suplai gas CO yang cukup untuk proses reduksi (Li Yan Chun, 2017). Gas CO dalam proses peleburan dengan *electric arc furnace* diperoleh dari batubara yang dipanaskan dengan busur listrik secara langsung.

Efek temperatur peleburan pada kandungan besi total dan kualitas *yield* besi akan semakin meningkat berbanding lurus dengan peningkatan temperatur peleburan dari 1500 sampai 1575°C (Li Yan Chun, 2017). *Recovery* Fe yang sangat tinggi sebesar 98,779% didapatkan dari massa *pig iron* 32,668 gram dan kandungan Fe total 91,585%. *Recovery* Fe yang tinggi didukung oleh proses pelarutan batubara yang optimal dan homogenisasi *pig iron* pada proses pemanasan berlangsung dengan baik ketika waktu *holding* 6 menit sehingga menghasilkan massa *pig iron* yang cukup tinggi. Hal ini didukung oleh penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Yuan dan Liu yang menyebutkan bahwa temperatur dan *holding time* yang optimal akan menghasilkan kualitas *yield* besi yang tinggi serta kadar Fe yang juga tinggi. Kualitas *yield* besi dapat diketahui sesuai dengan Pers. 2.15. (Li Yan Chun, 2017).

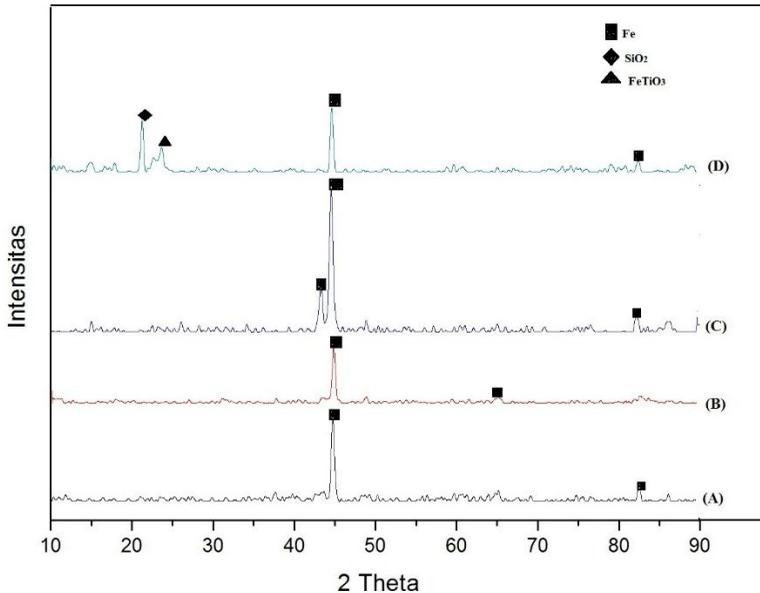
Ketika *holding time* dan temperatur pada proses peleburan besi sudah berada pada kondisi optimal maka akan menghasilkan nilai *yield* besi dan kandungan Fe yang baik. Tetapi diatas waktu dan temperatur tersebut *yield* besi rata-rata akan tetap, sedangkan



kandungan Fe berkurang sedikit (Yan-chun, 2017). Proses peleburan DRI dengan waktu *holding* 8 menit didapatkan nilai *recovery* Fe 77,819% didapatkan dari massa *pig iron* 25,92 gram dengan kandungan Fe total 90,935%. Dimana nilai *recovery* Fe menunjukkan trend hasil yang sama dengan penelitian Yan-chun tahun 2017. Hal ini dikarenakan proses pemanasan yang sebenarnya sudah maksimal jika diteruskan membuat kadar Fe yang sudah terbentuk dalam *pig iron* akan berdifusi menuju *slag* yang terbentuk.

4.4 Pengaruh Variasi Waktu *Holding* terhadap Fasa yang Terbentuk dalam *Pig Iron*

Identifikasi fasa yang terbentuk dalam *pig iron* hasil peleburan DRI dengan menggunakan *electric arc furnace* dilakukan dengan menggunakan alat uji XRD *Panalytical* milik Departemen Teknik Material ITS. Sudut difraksi yang digunakan pada posisi 2θ 10 – 90° dan menggunakan Panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar 1,54056 Å. Hasil uji XRD dianalisa menggunakan kartu JCPDF Release 2011. Hasil pengujian XRD pada pengaruh waktu *holding* terhadap fasa yang terbentuk dalam *pig iron* hasil peleburan DRI dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Hasil Pengujian XRD *Pig Iron* Variasi Waktu *Holding* (a) 2 menit, (b) 4 menit, (c) 6 menit, (d) 8 menit

Berdasarkan hasil XRD pada Gambar 4.6 fasa yang terbentuk dalam *pig iron* yang dilebur dengan menggunakan *electric arc furnace* untuk seluruh variasi waktu *holding* memiliki fasa pada puncak yang sama kecuali pada variasi 8 menit yang memiliki fasa selain Fe. Pada peleburan DRI dengan waktu *holding* 2 menit diketahui terbentuk fasa besi (Fe) dengan puncak 2θ pada 44,674 dan 82,471. Untuk peleburan DRI dengan waktu *holding* 4 menit juga diketahui terbentuk fasa besi (Fe) dengan puncak 2θ pada 44,735 dan 65,172. Sedangkan untuk peleburan DRI dengan variasi waktu *holding* 6 menit juga terbentuk fasa besi dengan puncak 2θ pada 43,491, 44,584 dan 82,214. Kemudian pada peleburan DRI dengan waktu *holding* 8 menit diketahui terbentuk fasa SiO₂ dengan puncak 2θ pada 21,325 selain itu juga diketahui terdapat fasa ilmenit (FeTiO₃) dengan puncak 2θ pada 23,729.



Serta terbentuk fasa besi (Fe) dengan puncak 2θ pada 44,592 dan 82,470.

(a) Analisa Hasil XRD *Pig Iron* dengan Waktu *Holding* 2 Menit

Dari hasil pengujian XRD yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. (a), *pig iron* dengan waktu *holding* peleburan DRI selama 2 menit menunjukkan puncak tertinggi dominan adalah fasa besi (Fe). Hal ini mengindikasikan bahwa fasa besi oksida pada DRI telah tereduksi seluruhnya. Proses reduksi fasa besi oksida terjadi dengan bantuan penambahan reduktor batubara sehingga menghasilkan gas CO sebagai pereduksi besi oksida sesuai dengan persamaan Boudouard. (Arabinda, 2011).

Selain itu, sudah tidak terdapatnya fasa besi oksida titan pada hasil peleburan DRI juga dipengaruhi oleh reaksi yang mereduksi fasa tersebut dengan melepaskan ikatannya. Reaksi reduksi ini juga dibantu dengan penambahan reduktor gas CO yang dapat bereaksi pada temperatur diatas 1773 K. (Guo Peng, 2016).

(b) Analisa Hasil XRD *Pig Iron* dengan Waktu *Holding* 4 Menit

Pada hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. (b), proses reduksi yang optimal ditunjukkan oleh hasil XRD *pig iron* untuk peleburan dengan waktu *holding* 4 menit karena fasa puncak tertinggi merupakan fasa besi (Fe). Fasa besi oksida yang terdapat dalam DRI dapat direduksi dengan bantuan gas CO yang dihasilkan dari proses pemanasan langsung oleh busur listrik dari *electric arc furnace*. Reaksi reaksi yang melibatkan besi oksida sesuai dengan persamaan Boudouard. (Arabinda, 2011).

(c) Analisa Hasil XRD *Pig Iron* dengan Waktu *Holding* 6 Menit

Pada hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. (c), proses reduksi yang paling optimal ditunjukkan oleh hasil XRD *pig iron* dengan variasi waktu *holding* 6 menit karena fasa puncak tertinggi merupakan fasa besi (Fe). Intensitas puncak yang paling tinggi juga ditunjukkan oleh variasi waktu *holding* 6 menit jika dibandingkan dengan intensitas puncak fasa besi (Fe) pada variasi



waktu *holding* lainnya. Hasil XRD fasa DRI menunjukkan fasa besi oksida yang paling dominan terdapat pada puncak 2θ adalah fasa Fe_3O_4 , dimana fasa magnetit (Fe_3O_4) tidak stabil ikatan senyawanya ketika berada pada temperatur leleh besi sehingga fasa ini mudah untuk tereduksi menjadi fasa besi (Fe). Karena fasa magnetit mudah tereduksi di temperatur leleh besi, maka reaksi reduksi besi oksida lain yang dibutuhkan pada peleburan DRI adalah reaksi untuk mereduksi fasa wustit (FeO). Menurut Yan chun tahun 2016, fasa wustit bisa direduksi oleh gas CO dan karbon terlarut [C]. Karbon terlarut [C] dalam jumlah yang banyak dapat dihasilkan oleh besi cair, sedangkan gas CO didapat dari batubara yang diberi panas pada temperatur tinggi. Reaksi reduksi wustit yang melibatkan karbon terlarut [C] dan dari gas CO sesuai Pers. 2.13 dan Pers. 2.14.

Pemisahan *slag* dengan besi lebih sempurna jika terjadi dalam keadaan cair. Oleh karena itu, reduksi besi dan kualitas besi cair diperoleh pada besi cair medium. (Yan chun dkk, 2016). Terbentuknya puncak baru yang merupakan fasa yang sama pada peleburan DRI mengindikasikan bahwa kandungan Fe meningkat (Sungging, 2012).

(d) Analisa Hasil XRD *Pig Iron* dengan Waktu *Holding* 8 Menit

Berdasarkan Gambar 4.6. (d) pengujian XRD pada *pig iron* hasil peleburan DRI dengan waktu *holding* 8 menit diketahui puncak dengan intensitas tertinggi adalah fasa besi (Fe). Fasa besi oksida yang terdapat dalam DRI dapat direduksi dengan bantuan gas CO. (Arabinda, 2011). Proses laju reaksi reduksi fasa besi dengan menggunakan gas CO oksida akan kembali berjalan lambat setelah mencampai waktu optimal sehingga hasil reduksi tidak mendapatkan fasa besi (Fe) yang maksimal. (Yongsheng Sun dkk, 2015). Turunnya laju reaksi fasa besi (Fe) yang sudah terbentuk dalam *pig iron* kembali berikatan dengan senyawa atau unsur lain untuk membentuk fasa baru.

Adanya fasa FeTiO_3 (ilmenit) menandakan bahwa reduksi ilmenit tidak berjalan dengan baik dikarenakan proses reduksi



ilmenit menunjukkan trend yang meningkat sampai mencapai temperatur optimal dan bergerak turun setelah melewati temperatur optimalnya dan mengakibatkan reaksi berjalan lambat. (Guo Peng, 2016). Pada pengujian hasil EDX kandungan unsur titanium dalam variasi waktu *holding* 8 menit juga menunjukkan paling tinggi dibandingkan dengan variasi lain. Sedangkan fasa SiO_2 yang terdapat dalam *pig iron* dikarenakan fluks yang ditambahkan dengan tujuan untuk mereduksi unsur titanium yang terdapat dalam fasa besi oksida titan tidak dapat bereaksi seluruhnya. Sehingga masih terdapat fasa SiO_2 yang berdiri sendiri. Reaksi pengikatan SiO_2 terjadi pada temperatur diatas 1400°C . (Muan, 1965).

4.5 Pengaruh Variasi Waktu *Holding* terhadap *Slag* yang Terbentuk

Variasi pengaruh waktu *holding* yang digunakan untuk melebur DRI untuk dijadikan *pig iron* juga sangat berpengaruh terhadap *slag* yang terbentuk sebagai material pengotor dalam peleburan. Untuk mengetahui pengaruh variasi waktu *holding* terhadap *slag* yang terbentuk dimulai dengan mengidentifikasi unsur yang terbentuk didalam *slag* dengan pengujian EDX. Pengujian EDX dilakukan dengan alat SEM *Panalytical* milik Departemen Teknik Material ITS. Hasil pengujian *slag* untuk semua variabel waktu *holding* bisa dilihat pada Tabel 4.8



Tabel 4.8 Hasil Pengujian EDX *Slag*

Unsur %Wt	Variabel 2 menit	Variabel 4 menit	Variabel 6 menit	Variabel 8 menit
Fe	5,385	4,455	5,04	4,665
V	0,525	1,375	1,22	1,0
Ti	4,585	4,27	4,72	5,995
Ca	11,63	10,03	12,42	13,85
Si	22,68	19,315	19,81	17,77
Al	9,1	10,55	11,19	10,17
Mg	8,055	8,83	9,34	9,625
O	38,04	41,175	36,25	36,915

Berdasarkan Tabel 4.8 *slag* hasil peleburan DRI masih terdapat kandungan Fe untuk setiap variasi waktu *holding* yang digunakan. Oksigen merupakan unsur yang paling dominan terdapat dalam komposisi unsur penyusun *slag*. Selanjutnya unsur pengotor Si, Ca, Al, Mg, dan Ti memiliki kandungan dengan persentase yang cukup besar, kandungan unsur pengotor ini diperoleh senyawa yang ada pada DRI. Unsur pengotor ini berikatan dengan oksigen untuk membentuk senyawa oksida yang ada dalam *slag* hasil peleburan DRI. Khusus unsur Si yang memiliki persentase kandungan paling besar dibandingkan dengan unsur pengotor lainnya dipengaruhi oleh penggunaan tambahan fluks SiO₂ pada proses peleburan DRI.

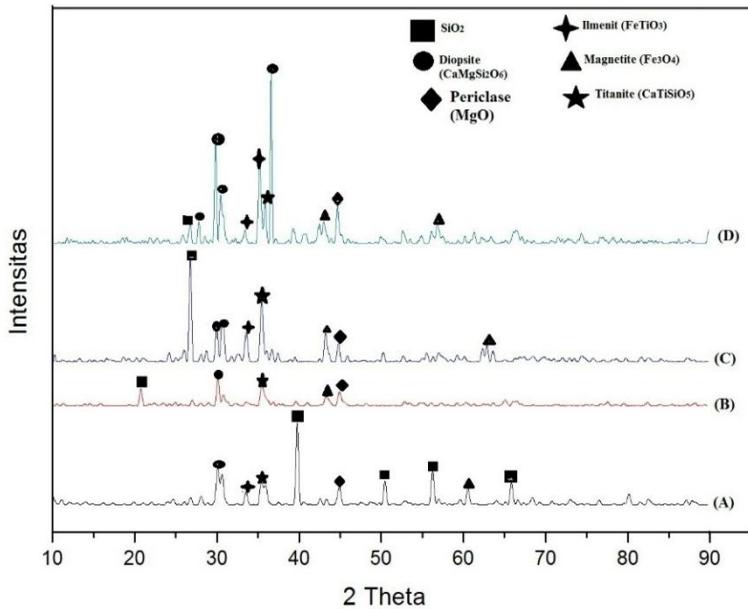
Dalam produksi *pig iron* dengan menggunakan proses reduksi dengan melebur *ore* logam menjadi logam cair dan kotorannya yang dipisahkan dalam bentuk *slag*. Ketika proses reduksi besi oksida berada pada kondisi diatas temperatur leleh, pengotor akan dipisahkan menjadi slag dengan kandungan total besi yang sangat rendah. Besi yang masih terkandung dalam slag dikatakan *iron loss*. Dalam penelitian yang dilakukan



menunjukkan bahwa kandungan besi dalam *slag* yang paling tinggi ada pada variabel waktu *holding* 2 menit. Kandungan Fe yang tinggi pada *slag* (pengotor) adalah indikasi besi oksida tidak tereduksi secara sempurna (Srivastava, 2012). Hal ini dapat dianalisa dari kondisi pemanasan yang kurang optimal.

Kandungan Fe terendah dalam *slag* terdapat pada variasi waktu *holding* 4 menit. Kandungan besi dalam *slag* yang rendah menandakan reaksi reduksi telah berjalan dengan baik dan tidak terjadi *iron loss* dalam jumlah yang banyak.

Selanjutnya untuk mengidentifikasi fasa dari *slag* hasil peleburan DRI dilakukan pengujian XRD dengan menggunakan alat uji XRD *PAN Analytical* milik Departemen Teknik Material ITS. Sudut difraksi yang dipakai adalah pada posisi 2θ $10 - 90^\circ$ dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar 1.54056 \AA . Kemudian grafik difraksi hasil uji XRD dianalisa menggunakan *JCPDF card PDF-2 Release 2011*. Hasil pengujian XRD *slag* dari hasil peleburan DRI dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Hasil Pengujian XRD *Slag* Variasi Waktu *Holding* (a) 2 menit, (b) 4 menit, (c) 6 menit, (d) 8 menit

Berdasarkan hasil XRD pada Gambar 4.7 (a) *slag* hasil peleburan DRI dengan menggunakan variasi waktu *holding* 2 menit, fasa yang terbentuk adalah Diopsite dengan puncak 2θ pada 30,128 dan 30,354, fasa Ilmenite dengan puncak 2θ pada 33,467, fasa Titanite dengan puncak 2θ pada 35,331 dan 35,904, fasa SiO₂ dengan puncak 2θ pada 39,732, 50,413, 56,203, dan 65,770, fasa Periclase dengan puncak 2θ pada 44,932, dan fasa Magnetite dengan puncak 2θ pada 60,483.

Hasil XRD pada Gambar 4.7 (b) *slag* hasil peleburan DRI dengan menggunakan variasi waktu *holding* 4 menit, fasa yang terbentuk adalah SiO₂ dengan puncak 2θ pada 20,51, fasa Diopsite dengan puncak 2θ pada 29,773, fasa Titanite dengan puncak 2θ



pada 35,168, fasa Magnetite dengan puncak 2θ pada 43,156, dan fasa Periclase dengan puncak 2θ pada 44,705.

Hasil XRD pada Gambar 4.7 (c) *slag* hasil peleburan DRI dengan menggunakan variasi waktu *holding* 6 menit, fasa yang terbentuk adalah SiO_2 dengan puncak 2θ pada 26,6324, Diopside pada puncak 2θ pada 29,8705 dan 43,0898, Titanite dengan puncak 2θ pada 33,4429 serta Ilmenite dengan puncak 2θ pada 35,3120.

Sedangkan hasil XRD pada Gambar 4.7 (d) *slag* hasil peleburan DRI dengan menggunakan variasi waktu *holding* 8 menit, fasa yang terbentuk adalah SiO_2 dengan puncak 2θ pada 26,927, fasa Diopside dengan puncak 2θ pada 27,914, 29,915, 30,568, dan 36,684, fasa Ilmenite dengan puncak 2θ pada 33,498 dan 35,346, fasa Titanite dengan puncak 2θ pada 35,987, fasa Magnetite dengan puncak 2θ pada 42,593, 43,106, dan 56,884, dan fasa Periclase dengan puncak 2θ pada 44,738.

Terdapatnya fasa SiO_2 dari hasil XRD *slag* merupakan penggunaan fluks yang ditambahkan untuk mengikat pengotor pada proses peleburan DRI. Kemudian terdapatnya fasa diopside yang muncul pada *slag* di setiap variasi waktu *holding* pada proses peleburan DRI menunjukkan bahwa terjadi ikatan senyawa antara CaO , MgO dan SiO_2 , pada temperatur di atas 680°C dengan adanya gas CO . Berdasarkan Luttge dan Metz tahun 1991 diopside dapat terbentuk dari reaksi antara CaO , MgO dan SiO_2 dengan Pers. 2.16.

Terdapatnya fasa titanite pada *slag* hasil peleburan DRI menunjukkan bahwa penggunaan fluks SiO_2 telah dapat mengikat pengotor Ti , berdasarkan Muan dan Osborn tahun 1965 fasa titanite dapat terbentuk pada temperatur di atas 1400°C . Adanya fasa ilmenite pada *slag* hasil peleburan DRI mengindikasikan bahwa unsur Fe yang terdapat pada *slag* masih berikatan dengan TiO_2 . Fasa ini kerap muncul pada temperatur tinggi (Liu dkk, 2016). Kemudian terdapatnya fasa periclase pada *slag* hasil peleburan DRI mengindikasikan bahwa ada beberapa yang belum berikatan menjadi fasa diopside. Selain itu, fasa periclase memungkinkan menghambat proses reduksi besi oksida titan sehingga terdapatnya fasa ilmenite pada *slag*. (Merk dan Pickles, 1988).

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. *Pig iron* yang memiliki kandungan Fe total tertinggi yaitu sebesar 92,935% adalah *pig iron* yang memiliki variasi waktu *holding* 4 menit sementara *pig iron* yang memiliki variasi waktu *holding* 2 menit yaitu sebesar 90,925%
2. Nilai *recovery* Fe yang tertinggi dihasilkan dari *pig iron* dengan variasi waktu *holding* 6 menit yaitu sebesar 98,780%, sedangkan *pig iron* yang memiliki nilai *recovery* Fe terendah yaitu sebesar 50,282% dihasilkan dari variasi waktu *holding* 2 menit.
3. Fasa yang dominan terlihat pada *pig iron* adalah fasa besi (Fe) untuk semua variasi waktu *holding*, tetapi untuk variasi waktu *holding* 8 menit juga terdapat fasa ilmenit (FeTiO_3) dan fasa SiO_2 dengan intensitas yang rendah.
4. Kandungan Fe tertinggi yang terdapat dalam *slag* dari variasi waktu *holding* 2 menit dan yang terendah dari variasi waktu *holding* 4 menit. Fasa yang dominan terlihat pada *slag* untuk semua variasi waktu *holding* adalah fasa SiO_2 , diopside, dan fasa ilmenit.

5.2. Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan proses peleburan DRI dengan menggunakan *close furnace*.
2. Melakukan *tapping slag* secara berkala ketika proses masih berada pada temperatur tinggi.
3. Melakukan proses peleburan dengan kondisi nyala busur listrik yang konstan selama proses.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Anameric, B. dan S. Komar Kawatra. 2008. **Direct Iron Smelting Reduction Process**. Michigan: Mineral Processing and Extractive Metall. Rev., 30: 1-51.
- Anameric, B. dan S.K. Kawatra. 2014. **Laboratory Study Related to the Production and Properties of Pig Iron Nuggets**. Houghton: Michigan Technological University.
- Anguntoro, Sigit Seno; Sugeng Tirta Atmaja; Yusuf Umardani. 2015. **Uji Karakteristik Sponge Iron Hasil Reduksi Menggunakan Burner Las Asitelin dari Pasir Besi Pantai Ngebum Kendal**. Semarang: Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 3.
- Atsushi, Masaaki; Hiroshi Uemura; Takashi Sakaguchi. 2010. **MIDREX Processes**. Kobelco Techonology Review No. 29.
- Bhawan, Parivesh. 2010. **Comprehensive Industry Document on Electric Arc and Induction Furnace**. Delhi: Central Pollution Control Board Ministry of Environment and Forest.
- Billah, Mu'tasim. 2010. **Kemampuan Batubara Dalam Menurunkan Kadar Logam Cr⁺⁺ dan Fe⁺⁺ Dalam Limbah Industri Baja**. Surabaya: Jurnal Penelitian Ilmu Teknik Vol. 10.
- Dang, Jie; Guo-hua Zhang; Kuo-chih Chou. 2014. **Kinetics and Mechanism of Hydrogen Reduction of Ilmenite Powders**. Beijing: Elsevier Journal of Alloys and Compound (ScienceDirect).
- Dey, Nishant R.; Anil K. Prasad; Shravan K. Singh. 2015. **Energy Survey of the Coal Based Sponge Iron Industry**. Jamsshadpur: Elsevier Case Studies in Thermal Engineering (ScienceDirect).
- Djeghader, Y. dan H. Labar. 2013. **Harmonics Mitigation Using the DC Power Supply Case Electric Arc Furnace**. Mediamira Science Publisher.

- Elkader, Mohammed Abd; Ayman Fathy; Mamdouh Eissa. 2014. **Effect of Direct Reduction Iron Proportion in Metallic Charge on Technological Parameters of EAF Steelmaking Process**. Cairo: International Journal of Science and Research (IJSR).
- Goodwill, Joseph E. 1987. **Understanding Electric Arc Furnace Operations for Steel Production**. Pittsburgh: Center for Metals Production.
- Gou, Hai-peng, dkk. 2016. **Kinetic Study on Carbothermic Reduction of Ilmenite with Active Carbon**. Beijing: Science Direct.
- Grobler, F.; R.C.A Minnit. 1999. **The Increasing Role of Direct Reduced Iron in Global Steelmaking**. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Grünbaum, R.; B. Creutzer; M. Van Der Rest. 2010. **SVC Brings Productivity Improvements to OneSteel**. Steel Times Internasional.
- Indonesian Iron and Steel Industry Association. 2015. **Peranan dan Prospek Industri Baja Nasional**. Jakarta: Road Map Industri dan Pasar Baja Nasional.
- Jamali, Adil. 2005. **Pengolahan Pasir Besi Titan Menjadi Hot Metal dengan Tungku Induksi Listrik**. Bandung: Indonesian Institute of Science-LIPI.
- Harald, Koblenzer dan Vucinic Bojan. 2016. **Induction Furnace Versus Electric Arc Furnace in Steelmaking Process, Advantages and Disadvantages**. Butrio dan Jiangu: DCM Process Technology.
- Khodabandeh, Erfan, dkk. 2017. **Parametric Study of Heat Transfer in an Electric Arc Furnace and Cooling System**. Teheran: Elsevier Applied Thermal Engineering (ScienceDirect).
- Ke-qing, Li, dkk. 2011. **Iron Extraction from Oolitic Iron Ore by a Deep Reduction Process**. Beijing: Journal of Iron and Steel Research (Science Direct).

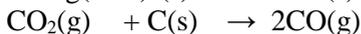
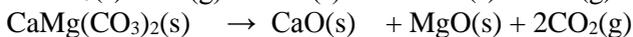
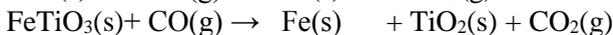
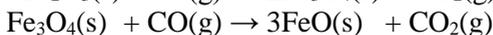
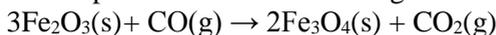
- Kirschen, Marcus; Karim Badr; Herbet Pfeifer. 2011. **Influence of Direct Reduced Iron on the Energy Balance of the Electric Arc Furnace in Steel Industry**. Aachen: Elsevier Energy (ScienceDirect).
- Koumetas, Nicholas George. 1998. **The Use of Oxygen to Decrease Electrical Energy Usage in the Electric Arc Furnace**. Toronto: National Library of Canada.
- Kumar, Umesh; A. K. Prasad; Sourabh Kumar Soni. 2016. **Efficient Use of Energy in an Electric Arc Furnace by Heat Integration Approach**. Jamshedpur: International Journal of Engineering Science and Research Technology, ISSN: 2277-9656.
- Li, Yan-chun, dkk. 2017. **Iron Extraction from Lead Slag by Bath Smelting**. Changha: Science Direct.
- Liao, xuefeng, dkk. 2017. **Enhanced Carbothermic Reduction of Ilmenite Placer by Additional Ferrosilicon**. Yunan: Journal of Alloys and Compounds
- Makahapan, Basso D. dan A. Manaf. 2010. Karakteristik Reduksi Bijih Besi Laterit. Jakarta: Majalah Metalurgi, V 25.2.
- Meraikib, Mohammed. 1993. **Effects of Sponge Iron on the Electric Arc Furnace Operation**. Doha: Metallurgical Research Expert, ISIJ International, Vol. 33.
- Mobarak, Yousef A. 2010. **Arc Furnace Loads Voltage Stability**. Aswan: High Institute of Energy, South Valley University.
- Murphy, Anthony Bruce dan Joachim V. R. Heberlein. 2008. **Thermal Plasma Waste Treatment**. Lindfield: Journal of Physics: Applied Physics.
- Pretorius, Eugene dan Helmut Oltman. 2002. **EAF Fundamentals**. Process Technology Group and LWB Refractories.
- Rizal, Farid. 2017. **Analisa Pengaruh Komposisi Batu Kapur Terhadap Kadar Fe dan Derajat Metalisasi pada Proses Reduksi Besi Oksida Dalam Pasir Besi**. Surabaya: Digital Library ITS.
- Ross, H. U. 1980. Physical Chemistry: Part I Thermodynamics. **Direct Reduced Iron Technology and Economics of**

- Productions and Use.** Warrendale: The Iron and Steel Society.
- Stalhed, John L. 1957. **Sponge Iron in Electric Arc Furnace.** Journal of Metals.
- Srivastava, Urvashi, dkk. 2012. **Production of Pig Iron by Utilizing Biomass as a Reducing Agent.** Michigan: Internal Journal of Mineral Processing.
- Sun, Youngshen, dkk. 2015. **Thermogravimetric Study of Coal-based Reduction of Oolitic Iron Ore.** Shenyang and NewYork: International Journal of Mineral Processing.
- Supriyatna, Yayat Iman., Muhammad Amin., Suharto. 2012. **Studi Penggunaan Reduktor pada Proses Reduksi Pellet Besi Lampung Menggunakan Rotary Kiln.** Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan PKM: Sains, Teknologi, dan Kesehatan.
- Tanaka, Hidetoshi. 2015. **Resource Trend and Use of Direct Reduced Iron in Steelmaking Process: Kobelco Technology Review.**
- Wasik, Hairul, 2016. **Studi Variasi Jenis Arang pada Briket Pasir Besi terhadap Kandungan Fe Total dan Derajat Metalisasi pada Proses Pembuatan Sponge Iron.** Surabaya: Digital Library ITS.
- Worrel, Erust, dkk. 2010. **Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry.** Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Zulfalina dan Azwar Manaf. 2004. **Identifikasi Senyawa Mineral dan Ekstraksi Titanium Oksida dari Pasir Mineral.** Banda Aceh: Indonesian Journal of Materials Science.

Lampiran A (Perhitungan Teoritis Berat)

Perhitungan stoikiometri perbandingan pasir besi: batubara: batu kapur

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



Data yang dibutuhkan dalam perhitungan komposisi material adalah

- Pasir besi

Dari data pengujian EDX, diperoleh presentase berat elemen-elemen yang terkandung di dalam pasir besi yang diperoleh dari Sukabumi, Jawa Barat.

Hasil EDX Pasir Besi						
Parameter	Fe	Si	Mg	O	Ti	Al
%Wt	57.93	3.14	2.72	24.4	8.46	2.66

Dari data pengujian XRD, mineral – mineral yang terkandung dalam pasir besi dan persentasenya, antara lain:

- Maghemite (Fe_2O_3) = 16,33 %
- Magnetite (Fe_3O_4) = 46,065 %
- Ilmenite (FeTiO_3) = 21,273 %

Apabila diasumsikan setiap briket pasir besi terdiri dari 200 gram ore pasir besi maka :

- Magnetite (Fe_3O_4) = 92,130 gram $\gg \frac{\text{Massa}}{\text{Mr Fe}_3\text{O}_4} = 0,397118017 \text{ mol}$
- Maghemite (Fe_2O_3) = 32,660 gram $\gg \frac{\text{Massa}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} = 0,204125 \text{ mol}$

- Ilmenite (FeTiO_3) = 42,546 gram $\gg \frac{\text{Massa}}{\text{Mr FeTiO}_3} = 0,28027668 \text{ mol}$
- Batu bara
Dari data pengujian *proximate analysis (fixed carbon)* diperoleh konsentrasi 42,35 %.
- Batu Kapur
Dari data pengujian EDX, diperoleh persentase berat elemen-elemen yang terkandung di dalam batu kapur yang diperoleh dari Gresik, Jawa Timur.

Hasil EDX Batu Kapur

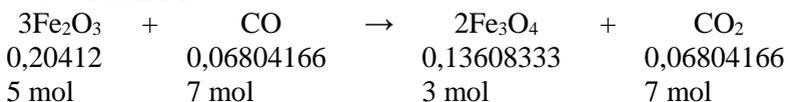
No.	Elemen	Rumus Kimia	Komposisi (%)
1.	Kalsium	Ca	18.015
2.	Magnesium	Mg	14.30
3.	Karbon	C	12.6215
4.	Oksigen	O	55.0635

Dari data pengujian XRD, terdapat mineral – mineral lain yang terkandung dalam batu kapur adalah dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)

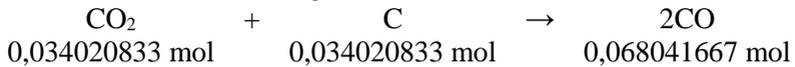
Dalam penelitian ini reduksi besi oksida pada pasir besi bertahap seperti berikut.

I. Reaksi Reduksi Fe_2O_3

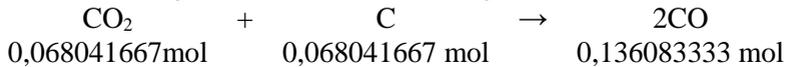
a. Reaksi 1



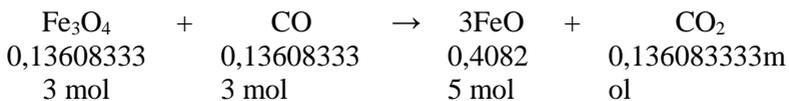
CO₂ hasil reaksi dekomposisi batu kapur yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan C batu bara



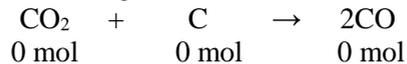
Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 1 dengan C batubara



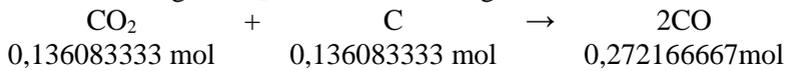
b. Reaksi 2



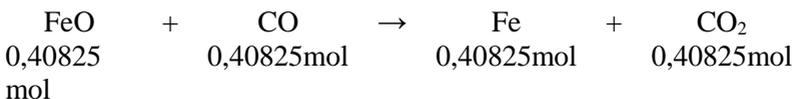
CO₂ hasil reaksi dekomposisi batu kapur yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan C batu bara



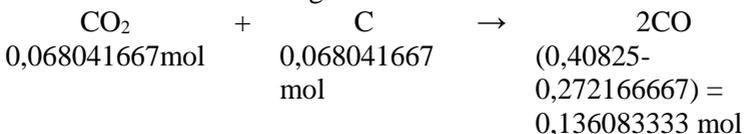
Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 2 dengan C batubara



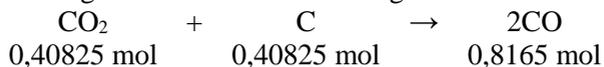
c. Reaksi 3



CO₂ hasil reaksi dekomposisi batu kapur yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan C batu bara

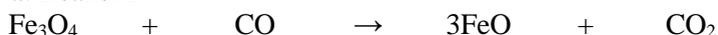


Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 3 dengan C batubara



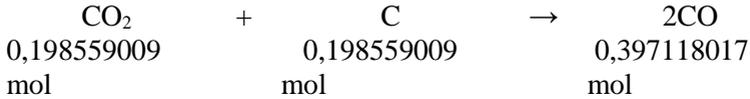
II. Reaksi Reduksi Fe₃O₄

a. Reaksi 1



0,3971180 0,3971180 1,1913540 0,3971180
 17 mol 17 mol 52 mol 17 mol

CO₂ hasil reaksi dekomposisi batu kapur yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan C batu bara



Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 2 dengan C batubara



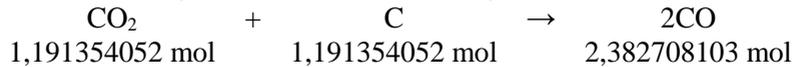
a. Reaksi 2



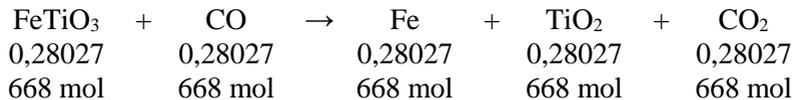
CO₂ hasil reaksi dekomposisi batu kapur yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan C batu bara



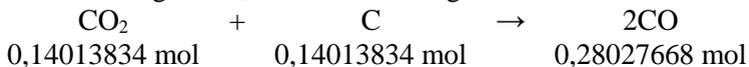
Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 2 dengan C batubara



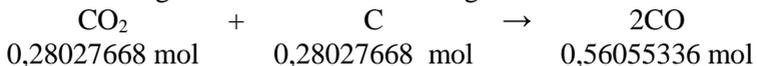
c. Reaksi Reduksi FeTiO₃



Reaksi gas CO₂ hasil reaksi dengan C batubara



Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 2 dengan C batubara



Perhitungan Kebutuhan Batubara

$$\text{Total mol C} = 0,034020833 + 0,068041667 + 0 + 0,136083333 + 0,068041667 + 0,40825 + 0,198559009 +$$

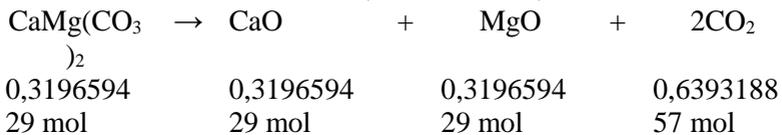
$$\begin{aligned}
 &0,397118017 + 0,198559009 + 1,191354052 + \\
 &0,14013834 + 0,28027668 \\
 &= 3,120442606 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa C yang dibutuhkan} &= \text{total mol C} \times \text{Ar C} \\
 &= 3,120442606 \times 12,0 = \\
 &37,44531127 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa batubara yang dibutuhkan} &= \frac{1}{42,35\%} \times \text{massa C} \\
 &= \frac{1}{42,35\%} \times 37,44531127 \\
 &= 88,41868069 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

Perhitungan Kebutuhan Kapur

$$\begin{aligned}
 \text{Total CO}_2 \text{ yang dibutuhkan} &= 0,034020833 + 0 + 0,068041667 + \\
 &0,198559009 + 0,198559009 + \\
 &0,14013834 = 0,639318857 \text{ mol}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \text{Massa dolomit} &= \text{mol CaMg(CO}_3\text{)}_2 \times \text{Mr CaMg(CO}_3\text{)}_2 \\
 &= 0,319659429 \times 184,397 = 58,91323269 \\
 &\text{gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \% \text{ Wt Dolomit} &= \frac{\text{Mr CaMg(CO}_3\text{)}_2}{\left(\frac{1}{18,015\%} \times \text{Ar Ca}\right) + \left(\frac{1}{14,6135\%} \times \text{Ar Mg}\right)} \times 100\% \\
 &= \frac{58,91323269}{\left(\frac{1}{18,015\%} \times 40,078\right) + \left(\frac{1}{14,6135\%} \times \text{Ar } 24,305\right)} \times 100\% \\
 &= 47,01923305 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa batu kapur yang dibutuhkan} &= \frac{1}{47,02\%} \times \text{massa dolomite} \\
 &= \frac{1}{47,02\%} \times 58,9132326 \\
 &= 125,2960307 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

Maka Perbandingan massa yang diperoleh adalah :

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Pasir Besi} & : & \text{Batu Bara} & : & \text{Batu Kapur Dolomit} \\
 200 & : & 88,42 & : & 125,3 \\
 1 & : & 0,442 & : & 0,626
 \end{array}$$

Perhitungan Neraca Massa Peleburan *Sponge Iron*

Berdasarkan pengujian XRD *sponge iron* terdapat fasa besi oksida. Sehingga dibutuhkan batubara untuk mereduksi besi oksida serta fluks SiO₂ untuk mengikat unsur pengotor yang terdapat pada *sponge iron*.

Hasil Pengujian XRD	
Fasa	% wt
Fe	14,2
Fe ₂ O ₃	38,2
Fe ₃ O ₄	46,2
FeTiO ₃	7,28

Pada peleburan, *sponge iron* yang digunakan sebanyak 40 gram. Berdasarkan hasil tersebut maka mol yang didapat,

$$\text{Fe} = 5,68 \text{ gram} \quad \frac{\text{Massa Fe}}{\text{Ar Fe}} = 0,101 \text{ mol}$$

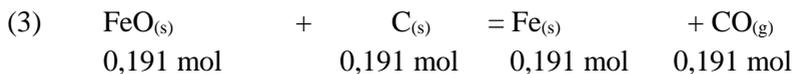
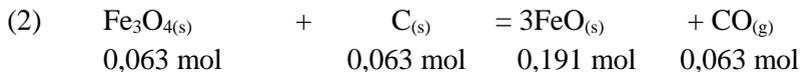
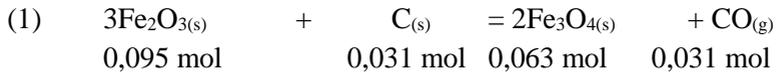
$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 15,28 \text{ gram} \quad \frac{\text{Massa Fe}_2\text{O}_3}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} = 0,095 \text{ mol}$$

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 = 18,488 \text{ gram} \quad \frac{\text{Massa Fe}_3\text{O}_4}{\text{Mr Fe}_3\text{O}_4} = 0,079 \text{ mol}$$

$$\text{FeTiO}_3 = 2,91 \text{ gram} \quad \frac{\text{Massa FeTiO}_3}{\text{Mr FeTiO}_3} = 0,019 \text{ mol}$$

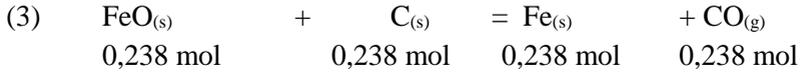
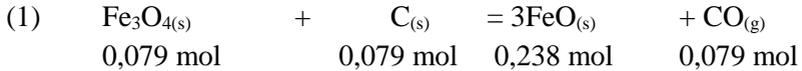
(i) Perhitungan kebutuhan batubara

1. Reaksi pada Fe₂O₃



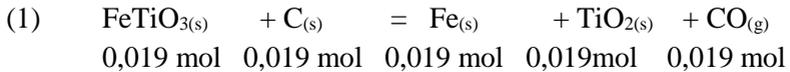
Jumlah unsur C yang dihasilkan = 0,031 mol

2. Reaksi pada Fe₃O₄



Jumlah unsur C yang dihasilkan = 0,079 mol

3. Reaksi pada FeTiO₃



Jumlah unsur C yang dihasilkan = 0,019 mol

Sehingga jumlah total unsur yang dibutuhkan sebanyak 0,130 mol atau 1,568 gram

$$\begin{aligned} \text{Massa batubara yang dibutuhkan} &= \frac{1}{42,35\%} \times \text{massa C} \\ &= \frac{1}{42,35\%} \times 1,568 \\ &= 3,703 \text{ gram} \end{aligned}$$

Massa batubara ditambahkan safety factor sebesar 25%, sehingga kebutuhan batubara untuk melebur sebanyak 4,629 gram.

(ii) Perhitungan Kebutuhan Fluks

Mol TiO₂ dari reduksi ilmenite = mol fluks SiO₂

Mol TiO₂ = 0,019 mol

Mol SiO₂ = 0,019 mol

Massa fluks SiO₂ sebanyak 1,15 gram

Maka Perbandingan Massa yang diperoleh sebesar

$$\begin{array}{lll} \text{Sponge iron} & : & \text{Batubara} & : & \text{Fluks SiO}_2 \\ 1 & : & 0,115 & : & 0,0288 \end{array}$$

Perhitungan Neraca Panas Peleburan *Sponge Iron*

Berdasarkan pengujian EDX dan XRD diketahui bahwa komposisi senyawa yang terdapat pada *sponge iron* sebagai berikut.

Mol *sponge iron* yang terbentuk.

Senyawa	Mol
Fe ₃ O ₄	0,143
FeO	0,429
Fe	0,550
TiO ₂	0,019
Al ₂ O ₃	0,008
MgO	0,069
FeTiO ₃	0,019
Fe ₂ O ₃	0,095
SiO ₂	0,044

Berdasarkan persamaan :

$$\Delta H = \epsilon H_{\text{produk}} - \epsilon H_{\text{reaktan}} \text{ dan,}$$

$$H = n \int C_p dT$$

Entalphy pembentukan senyawa pada 298 K

Senyawa	$\Delta H_f(\text{kJ/mol})$
Fe ₃ O ₄	-1118
FeO	-272
Fe	0
TiO ₂	-944,7
SiO ₂	-910,86
Al ₂ O ₃	-1669,8
MgO	-601,6
CO ₂	-393,509
CO	-110,525
C	0
Fe ₂ O ₃	-824,2
CaO	-635,09

Kalor specific (Cp) dari unsur dan senyawa

$$(Cp = a + bT + cT^{-2})$$

Kalor Spesifik (cal/degremol)				
Senyawa	a	bT	Ct ⁻²	Temperatur (K)
Fe ₃ O ₄	41,17	0,01882	-979500	1065
FeO	12,26	0,001492	-76200	1173
Fe	4,13	0,00638		1041
Fe	6,12	0,00336		1179
Fe	8,4			1674
TiO ₂	11,81	0,00754	-41900	713
SiO ₂	10,87	0,008712	-241200	848
SiO ₂	10,95	0,0055		1873
Al ₂ O ₃	22,08	0,008971	-522500	1973
MgO	10,86	0,001197	-208700	2073
CO ₂	10,34	0,00274	-195500	1200
CO	6,6	0,0012		2500
FeTiO ₃	177,857	0,540476	2,9E+07	4273
Fe ₂ O ₃	24,73	0,01604	-423400	1097
C	2,673	0,002617	-116900	1373
CaTiSiO ₅	358,276	0,00011448 8	-45276	1683
CaO	10	0,00484	-108000	1173
CaMgSi ₂ O	54,46	0,005746	-1500000	1573

6

- Temperatur yang digunakan sebesar 1943 K
- Temperatur awal sebesar 298 K
- Temperatur reaksi Fe₃O₄ sebesar 973 K
- Temperatur reaksi FeO sebesar 983 K

Berdasarkan data tersebut dan persamaan maka,

(i) Panas pembentukan untuk reaksi :

(1) $\text{Fe}_3\text{O}_{4(s)} + \text{C}_{(s)} > 3\text{FeO}_{(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 176,08 \text{ kJ}$
(2) $3\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)} + \text{C}_{(s)} = 2\text{Fe}_3\text{O}_{4(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 125,58 \text{ kJ}$
(3) $\text{FeO}_{(s)} + \text{C}_{(s)} = \text{Fe}_{(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 141,81 \text{ kJ}$
(4) $\text{FeTiO}_{3(s)} + \text{C}_{(s)} = \text{Fe}_{(s)} + \text{TiO}_{2(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 1,90 \text{ kJ}$
(5) $\text{CaO}_{(s)} + \text{TiO}_{2(s)} + \text{SiO}_{2(s)} = \text{CaTiSiO}_{5(l)}$	$\Delta H = 439,77 \text{ kJ}$
(6) $\text{CaO}_{(s)} + \text{MgO}_{(s)} + 2\text{SiO}_{2(s)} = \text{CaMgSi}_2\text{O}_{6(l)}$	$\Delta H = 21,41 \text{ kJ}$
(7) $\text{Al}_2\text{O}_{3(s)} = \text{Al}_2\text{O}_{3(l)}$	$\Delta H = 0,21 \text{ kJ}$
(8) $\text{Fe}_{(s)} = \text{Fe}_{(l)}$	$\Delta H = 19,02 \text{ kJ}$
(9) $\text{MgO}_{(s)} = \text{MgO}_{(l)}$	$\Delta H = 5,709 \text{ KJ}$
(10) $\text{SiO}_{2(s)} = \text{SiO}_{2(l)}$	$\Delta H = 4,16 \text{ KJ}$
(11) $\text{TiO}_{2(s)} = \text{TiO}_{2(l)}$	$\Delta H = 2,67 \text{ KJ}$
(12) $\text{CaO}_{(s)} = \text{CaO}_{(l)}$	$\Delta H = 1,11 \text{ KJ}$

(ii) Panas Reaksi

(13) $1/3\text{Fe}_3\text{O}_{4(s)} + \text{C}_{(s)} > 3/4\text{Fe}_{(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 25,27 \text{ kJ}$
(14) $\text{FeO}_{(s)} + \text{C}_{(g)} > \text{Fe}_{(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 149,56 \text{ kJ}$

Sehingga total panas yang dibutuhkan sebesar 1119,96 kJ.

Panas yang dihasilkan dari *electric arc furnace*

Waktu (sekon)	Voltage (V)	Arus (A)	Energi (Kj)
120	16,2	180	349,920
240			699,840
360			1.049,76
480			1.399,680

Lampiran B (Hasil Uji XRD)

Hasil Uji XRD Pasir Besi



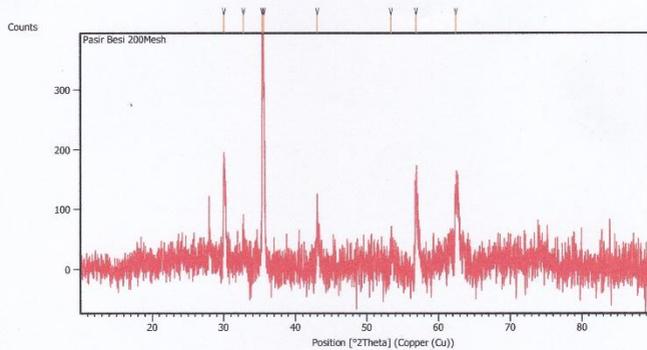
LABORATORIUM PENGOLAHAN MINERAL DAN MATERIAL
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
Telp. (031) 5943645, 081232092373, Email : sungging@mat-eng.its.ac.id

Surabaya, 22 September 2016

No : 10/LTPMM/IX/2016
Hal : Laporan Hasil Pengujian XRD
Lampiran : -

LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Berdasarkan permohonan pengujian yang diberikan, maka telah dilakukan pengujian X-Ray Diffractometer (XRD) untuk sampel pasir besi Sukabumi. Berikut ini ialah hasil pengujian XRD sampel pasir besi Sukabumi.



Gambar 1. Hasil pengujian X-Ray Diffractometer (XRD) sampel pasir besi Sukabumi

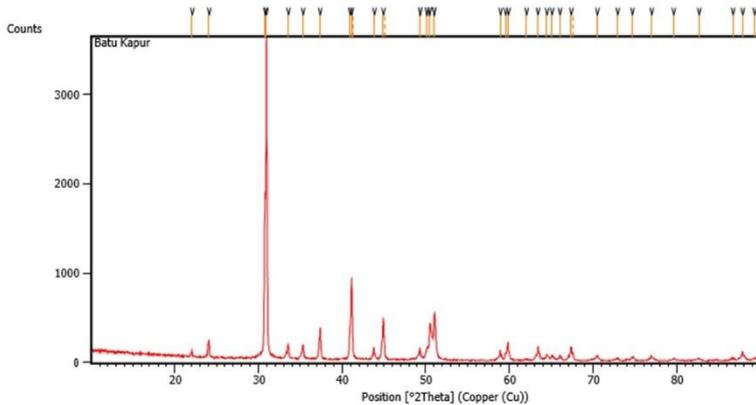
Dari grafik di atas, maka diperoleh senyawa – senyawa yang mungkin ada di dalam pasir besi Sukabumi. Tabel 1 menunjukkan senyawa – senyawa tersebut.

Tabel 1. Hasil analisa kandungan senyawa yang mungkin ada di dalam pasir besi

No	Senyawa	Formula	Wt %
1	Magnetite	Fe_2O_4	46,065
2	Maghemite	$Fe_2O_3 (\beta)$	16,33
3	Ilmenite	$FeTiO_3$	21,273
4	Magnesium oksida	MgO	4,588
5	Aluminium oksida	Al_2O_3	5,026
6	Silikon oksida	SiO_2	6,718

Sf

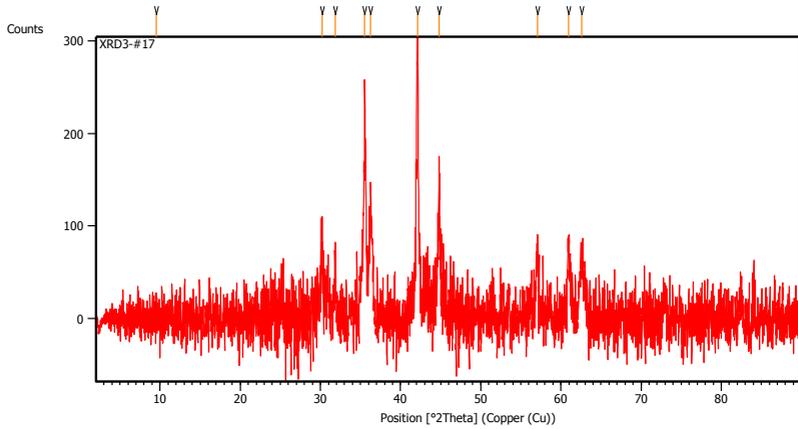
Hasil Uji XRD Batu Kapur



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
22.0550	73.23	0.0669	4.03040	2.03
24.0961	161.29	0.1004	3.69343	4.47
30.7582	1687.90	0.1004	2.90695	46.75
30.9449	3610.70	0.1004	2.88984	100.00
33.5597	129.23	0.1673	2.67042	3.58
35.3255	156.43	0.1004	2.54088	4.33
37.3633	330.77	0.0669	2.40685	9.16
40.8910	285.95	0.1004	2.20699	7.92
41.1275	917.37	0.1020	2.19303	25.41
41.2581	371.23	0.0612	2.19182	10.28
43.7981	121.38	0.1224	2.06530	3.36
44.9393	460.15	0.1224	2.01547	12.74
45.0573	228.55	0.0612	2.01546	6.33
49.2930	111.62	0.0816	1.84716	3.09
50.1110	131.89	0.2040	1.81891	3.65
50.4740	333.92	0.1632	1.80667	9.25
51.0180	496.42	0.1428	1.78868	13.75

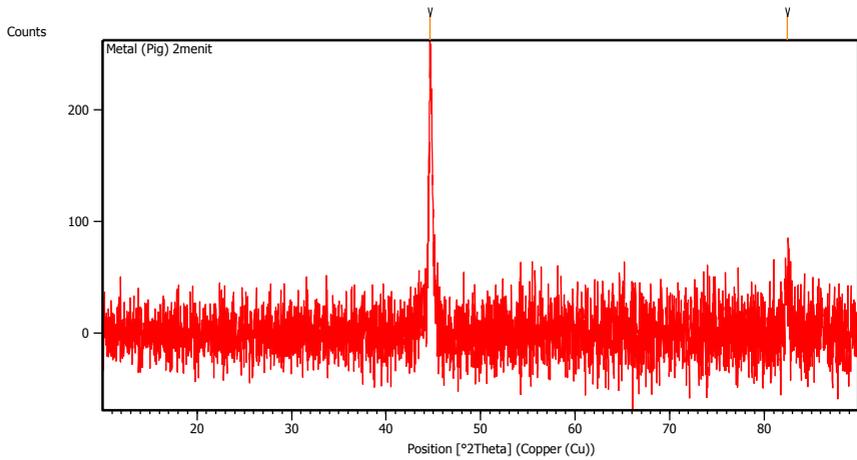
Hasil Uji XRD *Sponge Iron*



Peak List:

Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
9.5047	13.16	0.9446	9.30531	4.53
30.1810	84.78	0.2362	2.96122	29.15
31.8666	40.35	0.4723	2.80833	13.87
35.5122	230.59	0.1968	2.52795	79.27
36.2542	110.06	0.3936	2.47789	37.84
42.1060	290.89	0.1968	2.14608	100.00
44.8270	149.76	0.1378	2.02193	51.48
57.0851	85.34	0.2362	1.61348	29.34
60.9542	76.90	0.2362	1.52000	26.44
62.5952	59.44	0.4723	1.48405	20.43

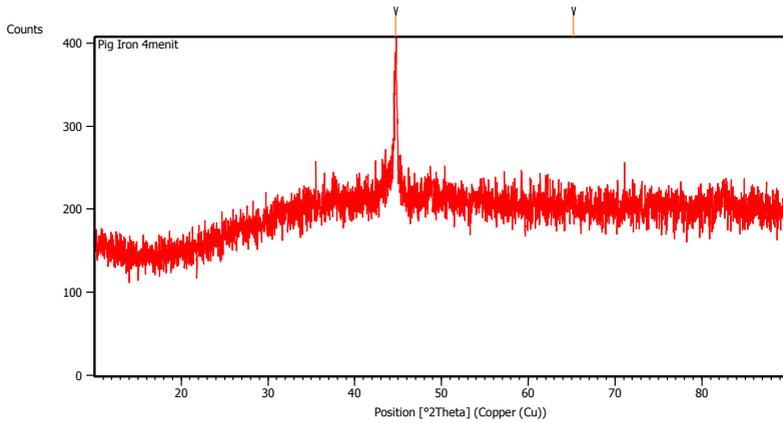
Hasil Uji XRD Pig Iron 2 menit



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6735	246.72	0.1338	2.02852	100.00
82.4714	46.41	0.4015	1.16958	18.81

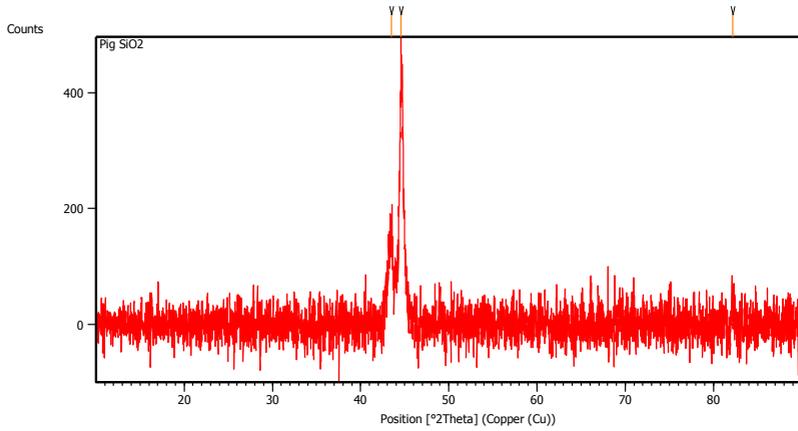
Hasil Uji XRD *Pig Iron 4 menit*



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.7375	150.39	0.3346	2.02576	100.00
65.1718	10.24	0.9368	1.43147	6.81

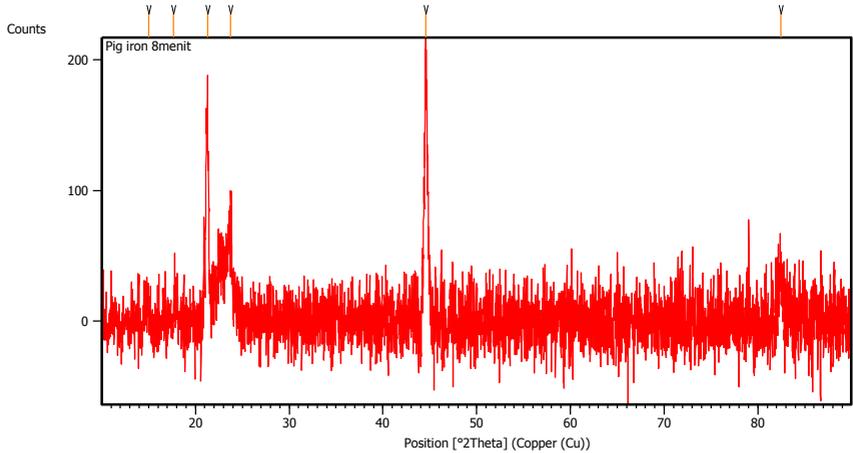
Hasil Uji XRD Pig Iron 6 menit



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.4941	159.85	0.4684	2.08075	35.73
44.5841	447.37	0.2007	2.03238	100.00
82.2141	49.24	0.5353	1.17259	11.01

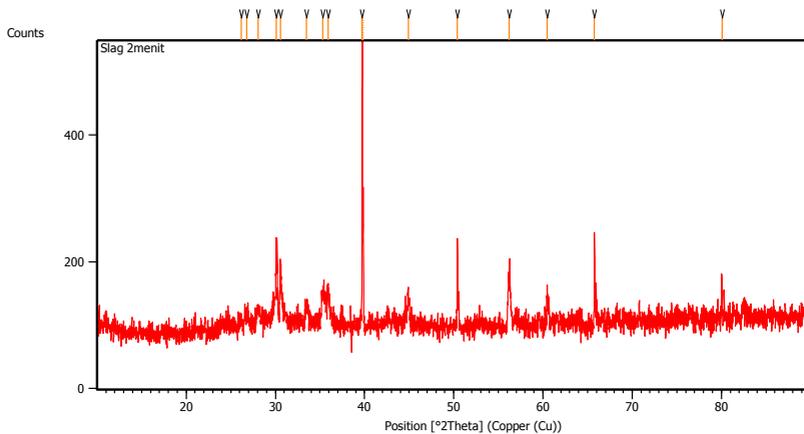
Hasil Uji XRD *Pig Iron 8 menit*



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
15.0138	28.12	0.6691	5.90098	13.73
17.6882	37.55	0.8029	5.01435	18.33
21.3247	143.50	0.2676	4.16676	70.06
23.7287	71.81	0.4015	3.74978	35.06
44.5917	204.84	0.1673	2.03205	100.00
82.4703	35.75	0.4684	1.16959	17.45

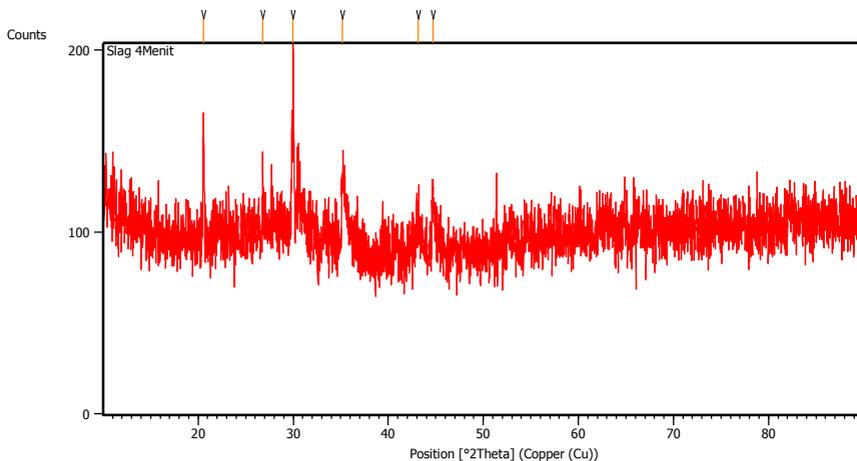
Hasil Uji XRD Slag 2 menit



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
26.1475	12.26	0.4015	3.40813	2.99
26.7921	18.00	0.4015	3.32758	4.39
28.0693	25.38	0.4015	3.17901	6.19
30.1277	99.50	0.1673	2.96633	24.29
30.5429	94.51	0.1673	2.92695	23.07
33.4670	31.22	0.2676	2.67760	7.62
35.3307	48.84	0.4015	2.54051	11.92
35.9041	61.77	0.1673	2.50125	15.08
39.7316	409.67	0.0612	2.26680	100.00
39.8433	218.50	0.0408	2.26632	53.34
44.9321	44.17	0.2448	2.01577	10.78
50.4133	140.94	0.0612	1.80870	34.40
56.2028	75.63	0.3264	1.63534	18.46
60.4831	50.55	0.1224	1.52944	12.34
65.7700	146.19	0.0612	1.41872	35.68
80.0710	57.63	0.0816	1.19749	14.07

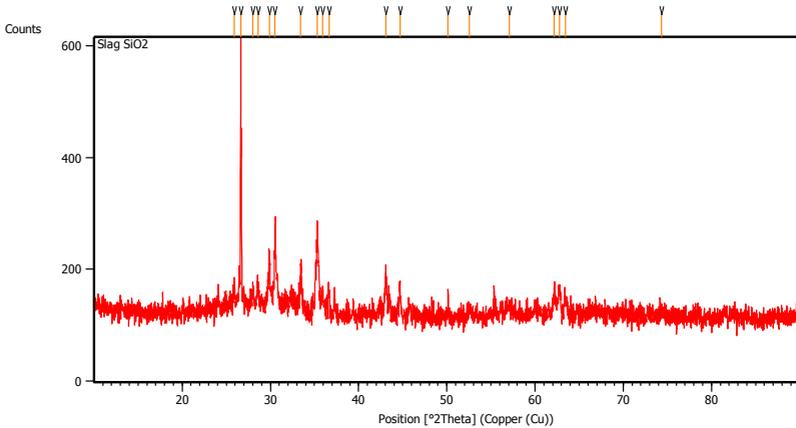
Hasil Uji XRD Slag 4 menit



Peak List:

Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
20.5610	58.40	0.1673	4.31977	56.41
26.7733	41.56	0.1004	3.32987	40.15
29.9797	103.51	0.0502	2.98064	100.00
35.1677	33.77	0.2007	2.55192	32.62
43.1560	18.75	0.4015	2.09626	18.12
44.7048	34.50	0.2007	2.02717	33.33

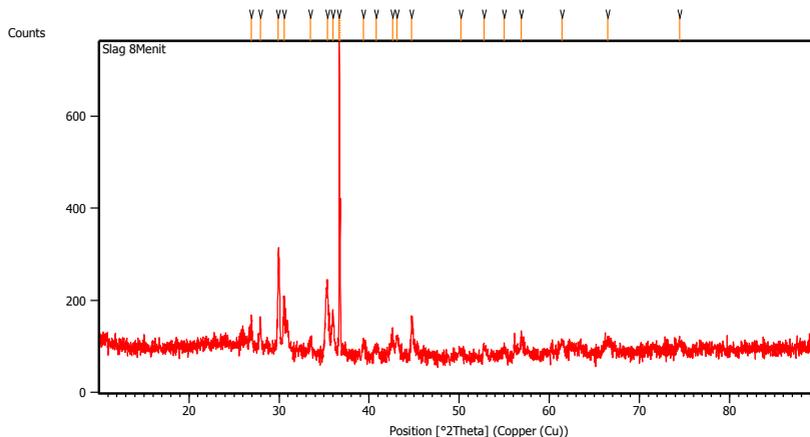
Hasil Uji XRD Slag 6 menit



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.9131	37.90	0.2007	3.43843	7.92
26.6324	478.66	0.0836	3.34717	100.00
27.9766	29.60	0.3346	3.18934	6.18
28.5989	43.01	0.2007	3.12133	8.98
29.8705	95.44	0.1673	2.99129	19.94
30.5297	143.33	0.1338	2.92819	29.94
33.4429	82.31	0.1673	2.67948	17.20
35.3120	140.26	0.1338	2.54182	29.30
35.9378	44.91	0.2007	2.49898	9.38
36.6497	37.59	0.2007	2.45206	7.85
43.0898	83.51	0.1673	2.09933	17.45
44.6802	48.54	0.1338	2.02823	10.14
50.1428	51.14	0.0612	1.81783	10.68
52.5852	13.63	0.4684	1.74044	2.85
57.0691	14.02	0.8029	1.61389	2.93
62.1879	45.02	0.2007	1.49278	9.40
62.7673	41.49	0.2007	1.48039	8.67
63.4407	25.69	0.3346	1.46629	5.37
74.3051	8.51	0.6691	1.27651	1.78

Hasil Uji XRD *Slag* 8 menit



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
26.9269	40.28	0.3346	3.31123	5.81
27.9138	58.89	0.1338	3.19636	8.49
29.9147	205.43	0.1171	2.98698	29.61
30.5682	101.23	0.1338	2.92458	14.59
33.4983	25.84	0.2007	2.67517	3.72
35.3461	156.18	0.3011	2.53944	22.51
35.9867	101.33	0.1338	2.49569	14.61
36.6842	693.69	0.0612	2.44780	100.00
36.7904	325.79	0.0612	2.44705	46.96
39.3569	27.21	0.3264	2.28751	3.92
40.7969	15.02	0.6528	2.21003	2.16
42.5930	37.25	0.4080	2.12090	5.37
43.1062	39.93	0.3264	2.09683	5.76
44.7381	70.88	0.1632	2.02406	10.22
50.1739	14.26	0.9792	1.81677	2.06
52.7442	26.23	0.2448	1.73413	3.78
55.0158	14.08	0.4896	1.66778	2.03

56.8843	38.08	0.3264	1.61735	5.49
61.4170	20.33	0.4896	1.50841	2.93
66.4937	23.91	0.8160	1.40502	3.45
74.5032	20.36	0.4896	1.27256	2.94

Referensi PDF Card

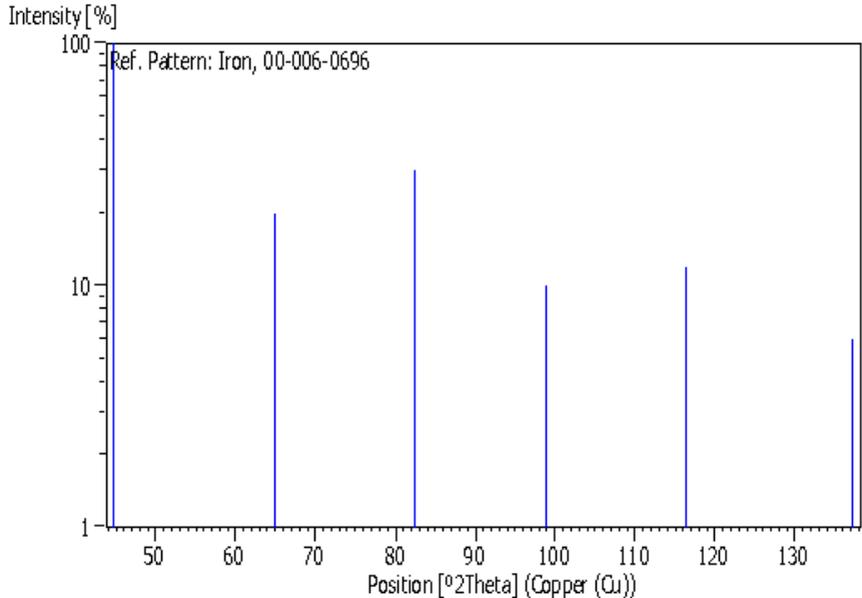
Fe (Iron)

Reference code: 00-006-0696
Mineral name: Iron, syn
Compound name: Iron
Common name: bainite, ferrite, ledkunite
Empirical formula: Fe
Chemical formula: Fe

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I[%]
1	1	1	0	2.02680	44.674	100.0
2	2	0	0	1.43320	65.023	20.0
3	2	1	1	1.17020	82.335	30.0
4	2	2	0	1.01340	98.949	10.0
5	3	1	0	0.90640	116.390	12.0
6	2	2	2	0.82750	137.144	6.0

Stick Pattern



Fe (Iron)

Reference code: 01-089-4186

Mineral name: Iron, delta, ferrite, δ -Fe

Compound name: Iron

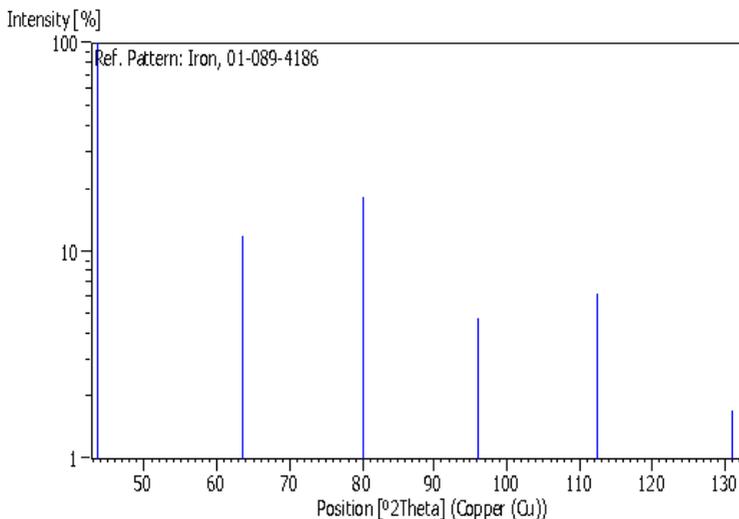
Empirical formula: Fe

Chemical formula: Fe

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	2.07290	43.629	100.0
2	2	0	0	1.46580	63.406	11.9
3	2	1	1	1.19680	80.127	18.2
4	2	2	0	1.03640	96.017	4.7
5	3	1	0	0.92700	112.395	6.2
6	2	2	2	0.84630	131.065	1.7

Stick Pattern



FeTiO₃ (Ilmenite)

Reference code: 00-002-0880

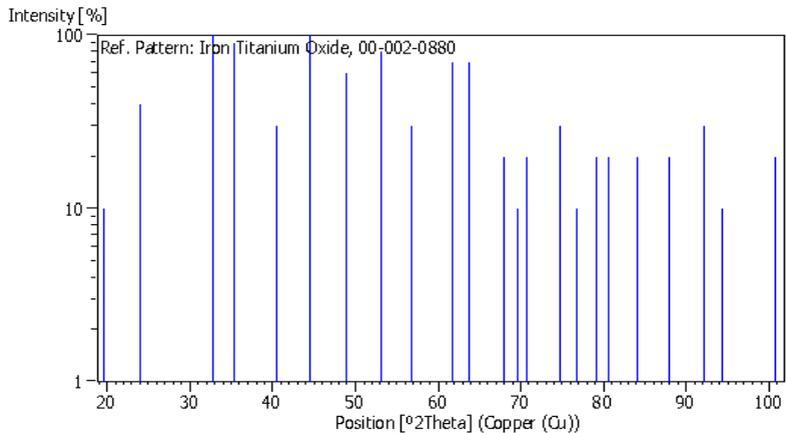
Mineral name: Ilmenite
Compound name: Iron Titanium Oxide

Empirical formula: FeO₃Ti
Chemical formula: Fe₊₂TiO₃

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	0	3	4.50000	19.713	10.0
2	0	1	2	3.70000	24.033	40.0
3	1	0	4	2.73000	32.778	100.0
4	1	1	0	2.53000	35.452	90.0
5	1	1	3	2.23000	40.416	30.0
6				2.03000	44.600	100.0
7	0	2	4	1.86000	48.930	60.0
8	1	1	6	1.72000	53.212	80.0
9	1	2	2	1.62000	56.783	30.0
10	2	1	4	1.50000	61.799	70.0
11	3	0	0	1.46000	63.687	70.0

Stick Pattern



Magnetite(Fe₃O₄)

Reference code: 01-076-7165

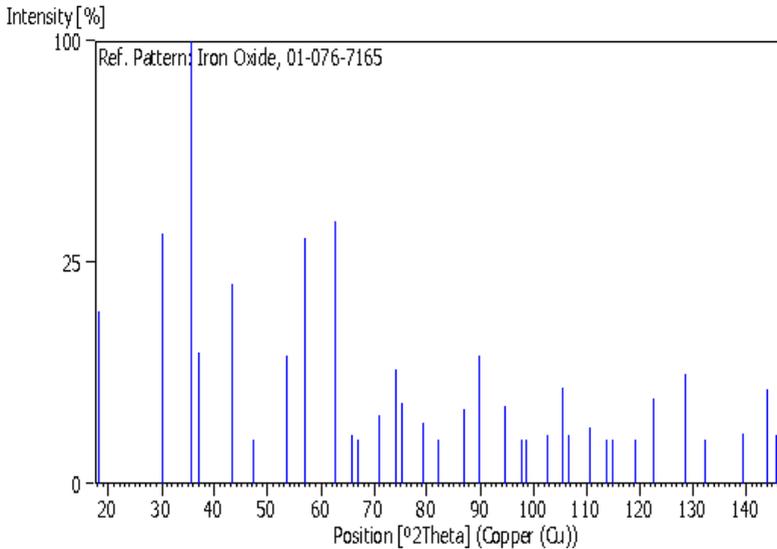
Mineral name: Magnetite
Compound name: Iron Oxide
Common name: Iron diiron(III) oxide

Empirical formula: Fe₃O₄

Chemical formula: Fe₃O₄

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	4.83620	18.330	15.1
2	2	2	0	2.96160	30.152	32.0
3	3	1	1	2.52560	35.516	100.0
4	2	2	2	2.41810	37.151	8.8
5	4	0	0	2.09420	43.163	20.4
6	3	3	1	1.92170	47.262	0.1
7	4	2	2	1.70990	53.551	8.3



Maghemite (Fe₂O₃)

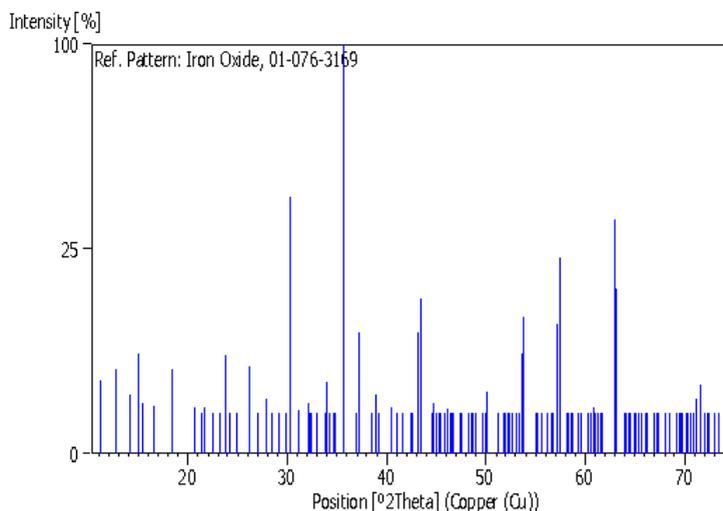
Reference code: 01-076-3169

Mineral name: Maghemite-Q, syn
Compound name: Iron Oxide
Common name: γ -Fe₂O₃, Iron(III) oxide

Empirical formula: Fe₂O₃
Chemical formula: Fe₂O₃

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
28	2	2	0	2.95270	30.245	39.2
29	2	0	6	2.95270	30.245	39.2
30	2	2	2	2.86790	31.161	1.1
31	2	2	3	2.78310	32.136	1.5
32	2	1	6	2.78310	32.136	1.5
33	1	1	8	2.77040	32.287	0.3
34	3	0	1	2.76050	32.406	0.2
35	2	0	7	2.71850	32.921	0.4
36	3	0	2	2.71180	33.005	0.5
37	1	0	9	2.64590	33.851	0.8
38	3	0	3	2.63600	33.982	3.1
39	3	1	0	2.63600	33.982	3.1
40	3	1	1	2.62040	34.191	0.5
41	2	1	7	2.58440	34.682	0.6
42	3	1	2	2.57860	34.762	0.6
43	1	1	9	2.52180	35.571	69.4
44	3	1	3	2.51320	35.697	100.0



Fe₂O₃ (Hematit)

Reference code:

00-024-0072

Mineral name:

Hematite

Compound name:

Iron Oxide

Empirical formula:

Fe₂O₃

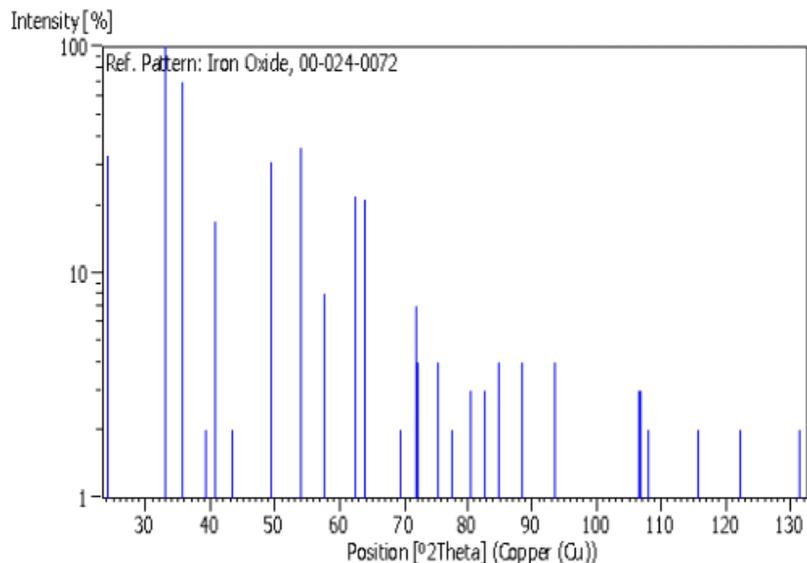
Chemical formula:

Fe₂O₃

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3.68600	24.125	33.0
2	1	0	4	2.70300	33.115	100.0
3	1	1	0	2.51900	35.612	70.0
4	0	0	6	2.29500	39.223	2.0
5	1	1	3	2.20800	40.836	17.0
6	2	0	2	2.08000	43.473	2.0
7	0	2	4	1.84280	49.417	31.0
8	1	1	6	1.69660	54.005	36.0
9	1	2	2	1.60130	57.508	8.0
10	0	1	8	1.60130	57.508	8.0
11	2	1	4	1.48730	62.385	22.0
12	3	0	0	1.45430	63.966	21.0

Stick Pattern



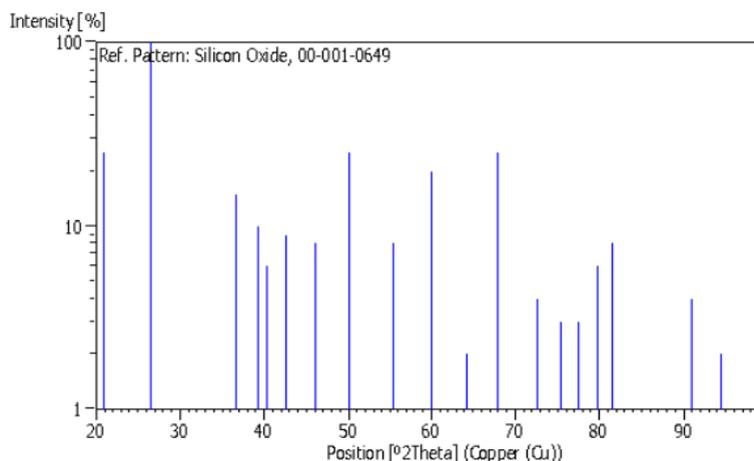
SiO₂ (Quartz)

Reference code:	00-001-0649
Mineral name:	Quartz
Compound name:	Silicon Oxide
Empirical formula:	O ₂ Si
Chemical formula:	SiO ₂

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	0	4.25000	20.885	25.0
2	1	0	1	3.35000	26.587	100.0
3	1	1	0	2.45000	36.650	15.0
4	1	0	2	2.29000	39.312	10.0
5	1	1	1	2.23000	40.416	6.0
6	2	0	0	2.12000	42.612	9.0
7	2	0	1	1.97000	46.035	8.0
8	1	1	2	1.82000	50.079	25.0
9	1	0	3	1.66000	55.296	8.0
10	2	1	1	1.54000	60.026	20.0
11	1	1	3	1.45000	64.179	2.0
12	2	1	2	1.38000	67.861	25.0
13	1	0	4	1.30000	72.675	4.0
14	3	0	2	1.26000	75.374	3.0
15	2	2	0	1.23000	77.549	3.0
16	2	1	3	1.20000	79.870	6.0
17	1	1	4	1.18000	81.506	8.0
18	3	1	1	1.16000	83.219	1.0
19	3	1	2	1.08000	90.998	4.0
20	1	0	5	1.05000	94.381	2.0
21	4	0	1	1.04000	95.578	1.0
22	2	2	3	1.02000	98.085	1.0

Stick Pattern



Mg₂SiO₄(Forsterit)

Reference code: 00-034-0189

Mineral name: Forsterite, syn

Compound name: Magnesium Silicate

Empirical formula: Mg₂O₄Si

Chemical formula: Mg₂SiO₄

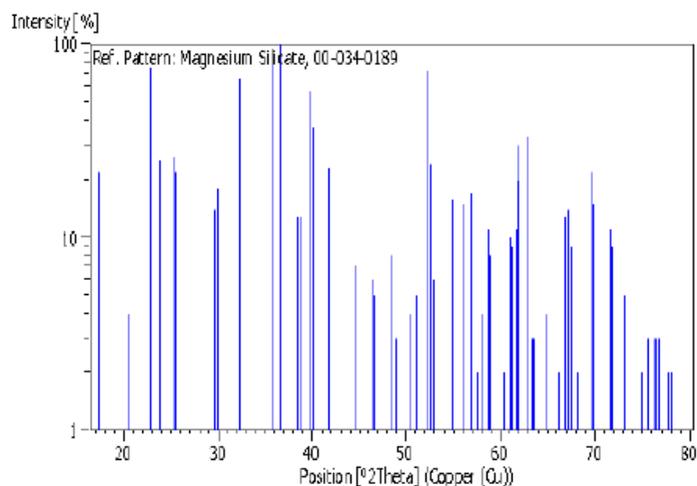
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	2	0	5.10210	17.367	22.0
2	0	1	1	4.30750	20.603	4.0
3	1	2	0	3.88120	22.895	76.0
4	1	0	1	3.72220	23.887	25.0
5	1	1	1	3.49600	25.458	26.0
6	0	2	1	3.47680	25.601	22.0
7	1	2	1	3.00650	29.691	14.0
8	2	0	0	2.99060	29.852	18.0
9	0	3	1	2.76530	32.348	66.0
10	1	3	1	2.50970	35.749	83.0
11	2	1	1	2.45670	36.547	100.0
12	1	4	0	2.34560	38.344	13.0
13	0	1	2	2.31500	38.871	13.0

14	2	2	1	2.26730	39.722	57.0
15	0	4	1	2.24700	40.097	37.0
16	1	1	2	2.15890	41.806	23.0
17	2	3	1	2.03030	44.593	7.0
18	0	3	2	1.94790	46.588	6.0
19	2	4	0	1.94070	46.771	5.0
20	0	5	1	1.87440	48.530	8.0
21	2	0	2	1.86080	48.908	3.0
22	3	2	0	1.85690	49.017	2.0
23	3	0	1	1.83860	49.532	1.0
24	2	1	2	1.82990	49.789	1.0
25	3	1	1	1.80900	50.405	4.0
26	1	5	1	1.78860	51.020	5.0
27	2	2	2	1.74830	52.284	73.0
28	0	4	2	1.73860	52.598	24.0
29	3	2	1	1.72940	52.900	6.0
30	1	4	2	1.66980	54.944	16.0
31	1	6	0	1.63470	56.227	15.0
32	3	3	1	1.61730	56.886	17.0
33	0	6	1	1.60080	57.527	2.0
34	2	5	1	1.58840	58.019	4.0
35	3	4	0	1.57080	58.732	11.0
36	0	1	3	1.56660	58.905	8.0
37	1	0	3	1.53230	60.359	2.0
38	1	1	3	1.51440	61.148	10.0
39	3	1	2	1.51110	61.296	9.0
40	2	4	2	1.50320	61.653	11.0
41	1	5	2	1.49900	61.845	20.0
42	4	0	0	1.49540	62.010	30.0
43	2	6	0	1.47800	62.823	33.0
44	1	2	3	1.46740	63.329	3.0
45	3	2	2	1.46380	63.503	3.0
46	0	3	3	1.43650	64.855	4.0
47	2	6	1	1.41110	66.170	2.0
48	1	3	3	1.39680	66.936	13.0
49	0	7	1	1.39300	67.143	14.0
50	3	3	2	1.39300	67.143	14.0
51	2	1	3	1.38740	67.451	9.0
52	2	5	2	1.37480	68.153	2.0
53	3	5	1	1.36570	68.670	1.0
54	2	2	3	1.35050	69.554	22.0
55	0	4	3	1.34640	69.796	15.0
56	4	3	1	1.31550	71.685	11.0
57	1	4	3	1.31310	71.836	9.0
58	3	6	0	1.29370	73.086	5.0
59	4	0	2	1.26610	74.948	2.0
60	2	7	1	1.26270	75.185	1.0

61	4	1	2	1.25610	75.649	3.0
62	0	5	3	1.25150	75.977	1.0
63	3	6	1	1.24780	76.242	3.0
64	4	4	1	1.24480	76.459	3.0
65	3	0	3	1.24110	76.729	3.0
66	3	1	3	1.23170	77.422	1.0
67	2	4	3	1.22760	77.730	2.0
68	3	5	2	1.22380	78.093	2.0
69	1	7	2	1.21600	78.613	1.0
70	1	8	1	1.20600	79.393	1.0

Stick Pattern



MgO (Periclase)

Reference code: 01-071-1176

Mineral name: Periclase

Compound name: Magnesium Oxide

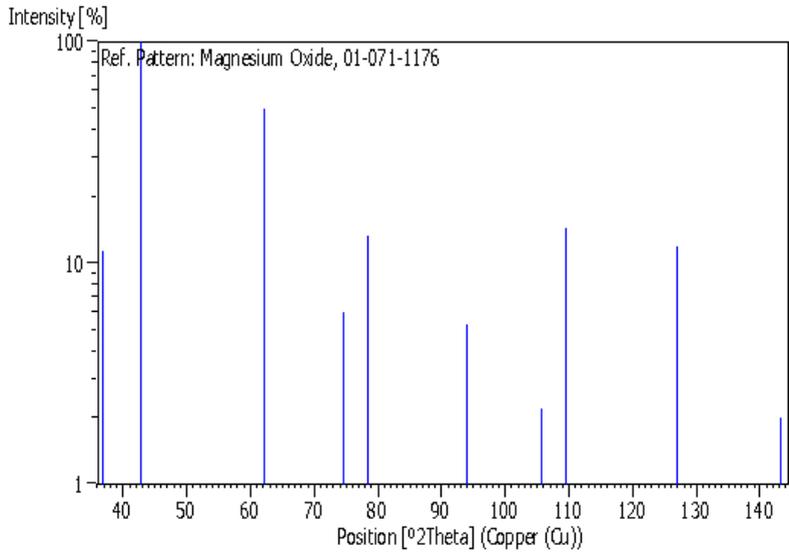
Empirical formula: MgO

Chemical formula: MgO

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	2.43470	36.889	11.4
2	2	0	0	2.10850	42.856	100.0
3	2	2	0	1.49090	62.218	49.8
4	3	1	1	1.27150	74.576	6.0
5	2	2	2	1.21730	78.513	13.3
6	4	0	0	1.05420	93.890	5.3
7	3	3	1	0.96740	105.548	2.2
8	4	2	0	0.94300	109.544	14.4
9	4	2	2	0.86080	126.982	11.9
10	5	1	1	0.81160	143.286	2.0

Stick Pattern



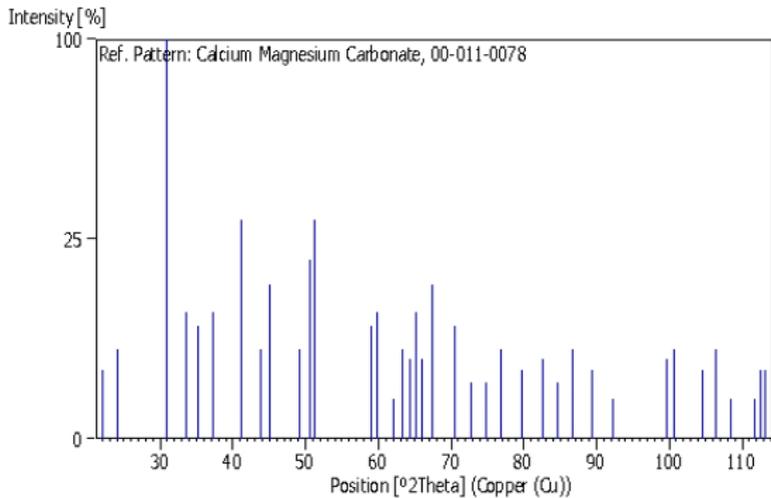
Dolomite (CaMg(CO₃)₂)

Reference code:	00-011-0078
Mineral name:	Dolomite
Compound name:	Calcium Magnesium Carbonate
Empirical formula:	C ₂ CaMgO ₆
Chemical formula:	CaMg (CO ₃) ₂

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	1	4.03000	22.039	3.0
2	0	1	2	3.69000	24.099	5.0
3	1	0	4	2.88600	30.961	100.0
4	0	0	6	2.67000	33.537	10.0
5	0	1	5	2.54000	35.308	8.0
6	1	1	0	2.40500	37.361	10.0
7	1	1	3	2.19200	41.148	30.0
8	0	2	1	2.06600	43.782	5.0
9	2	0	2	2.01500	44.950	15.0
10	0	2	4	1.84800	49.269	5.0
11	0	1	8	1.80400	50.554	20.0
12	1	1	6	1.78600	51.100	30.0
13	0	0	9	1.78100	51.254	30.0
14	2	1	1	1.56700	58.888	8.0
15	1	2	2	1.54500	59.812	10.0
16	1	0	10	1.49600	61.982	1.0
17	2	1	4	1.46500	63.445	5.0
18	2	0	8	1.44500	64.428	4.0
19	1	1	9	1.43100	65.135	10.0

20	1	2	5	1.41300	66.070	4.0
21	3	0	0	1.38900	67.362	15.0
22	0	0	12	1.33500	70.480	8.0
23	2	1	7	1.29700	72.870	2.0
24	0	2	10	1.26900	74.748	2.0
25	1	2	8	1.23800	76.956	5.0
26	2	2	0	1.20200	79.710	3.0
27	1	1	12	1.16800	82.524	4.0
28	3	1	2	1.14400	84.651	2.0
29	2	1	10	1.12300	86.618	5.0
30	2	2	6	1.09600	89.309	3.0
31	0	0	15	1.06800	92.316	1.0
32	4	0	4	1.00800	99.669	4.0
33	3	1	8	1.00100	100.623	5.0
34	1	0	16	0.97300	104.685	3.0
35	3	0	12	0.96200	106.399	5.0
36	2	3	2	0.94900	108.524	1.0
37	3	2	4	0.93000	111.845	1.0
38	1	2	14	0.92600	112.580	3.0
39	0	4	8	0.92300	113.140	3.0



CaTiSiO₅ (Titanite)

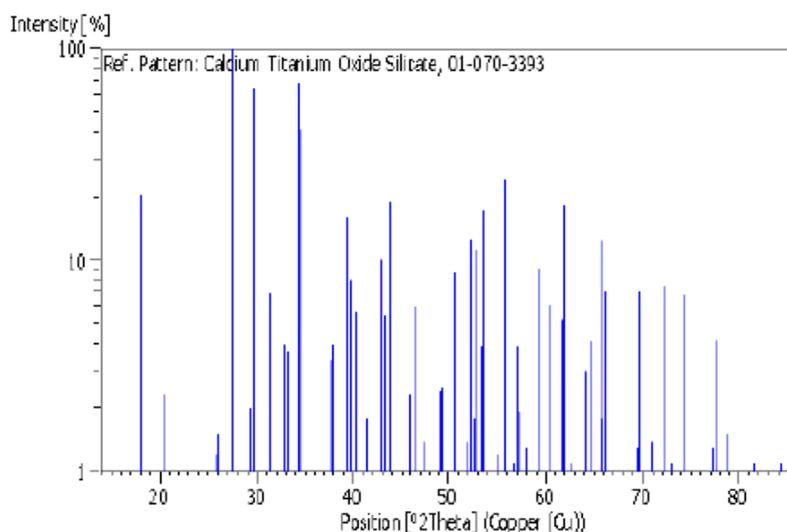
Reference code:	01-070-3393
Compound name:	Calcium Titanium Oxide Silicate
Common name:	titanite HP, syn
Empirical formula:	CaO ₅ SiTi
Chemical formula:	Ca (TiO) (SiO ₄)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	1	5.99670	14.761	0.7
2	1	1	0	5.18770	17.078	0.5
3	0	1	1	4.93940	17.944	20.4
4	1	1	-1	4.75990	18.626	0.4
5	0	2	0	4.35540	20.374	2.3
6	1	2	0	3.61090	24.635	0.1
7	0	2	1	3.52400	25.252	0.1
8	2	0	-1	3.49080	25.496	0.5
9	1	2	-1	3.45700	25.750	1.2
10	1	1	1	3.41400	26.080	1.5
11	2	1	-1	3.24030	27.505	100.0
12	2	1	0	3.02760	29.479	2.0
13	0	0	2	2.99640	29.773	65.5
14	2	0	-2	2.84180	31.455	6.9
15	0	1	2	2.81180	31.455	6.9
16	2	2	-1	2.72390	32.654	4.0
17	2	1	-2	2.70160	33.133	3.7
18	1	3	0	2.64820	33.821	0.9
19	0	3	1	2.61340	34.205	60.2
20	1	2	-2	2.61340	34.285	68.2
21	2	2	0	2.59380	34.552	41.5
22	0	2	2	2.46970	36.340	0.2
23	2	0	1	2.45900	36.511	0.8
24	2	2	-2	2.38000	37.768	3.4
60	1	5	0	1.60200	54.512	0.2
69	0	5	1	1.67300	54.830	1.0
70	3	2	1	1.66940	54.958	0.5
71	1	5	-1	1.66570	55.090	1.2
72	0	3	3	1.64650	55.788	24.4
73	2	4	1	1.63030	56.392	0.9
74	4	2	-1	1.62040	56.760	1.1
75	4	2	-2	1.62040	56.768	1.1
76	4	0	-3	1.61440	56.998	3.9
77	4	0	0	1.61440	56.990	3.9
78	1	4	2	1.60670	57.296	1.9
79	2	1	-4	1.60670	57.296	1.9
80	1	2	3	1.60240	57.464	0.3
81	3	4	-1	1.59720	57.669	0.3
82	4	1	0	1.58740	58.059	1.3
83	4	1	-3	1.58740	58.059	1.3
84	1	1	-4	1.58360	58.212	0.3
85	1	5	1	1.57700	58.479	0.1
86	2	3	2	1.56350	59.033	0.7
87	2	5	-1	1.55880	59.229	9.3
88	1	5	-2	1.53820	60.103	0.4
89	1	4	-3	1.53820	60.103	0.4
90	2	5	0	1.53440	60.268	1.9
91	3	3	1	1.53440	60.268	1.9
92	3	4	0	1.53050	60.437	6.1
93	2	2	-4	1.53050	60.437	6.1
94	2	4	-3	1.52130	60.841	0.2
95	4	3	0	1.51320	61.322	0.2

95	4	2	0	1.51320	61.202	0.6
96	4	2	-3	1.51320	61.202	0.6
97	1	2	-4	1.51050	61.323	0.3
98	0	5	2	1.50640	61.500	0.3
99	0	0	4	1.49920	61.836	5.2
100	4	3	-1	1.49610	61.978	18.3
101	4	3	-2	1.49610	61.978	10.3
102	2	5	-2	1.48530	62.479	0.9
103	1	3	3	1.48190	62.638	1.1
104	0	1	4	1.47750	62.846	0.2
105	0	4	3	1.47260	63.079	0.1
106	3	2	-4	1.46880	63.261	0.3
107	3	1	2	1.46620	63.387	0.9
108	2	0	3	1.45680	63.844	0.3
109	0	6	0	1.45180	64.090	3.0
110	2	1	3	1.43690	64.835	4.1

Stick Pattern



CaMgSi₂O₆ (Diopside)

Reference code:

00-017-0318

Mineral name:

Diopside

Compound name:

Calcium Magnesium Silicate

Empirical formula:

CaMgO₆Si₂

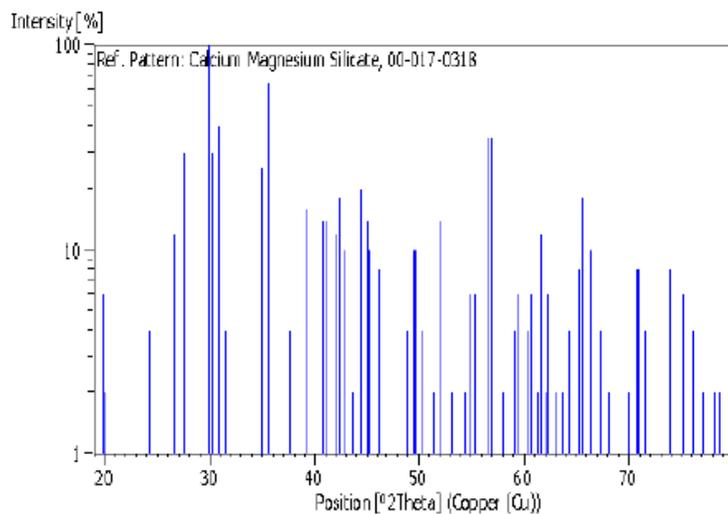
Chemical formula:

CaMg (SiO₃)₂

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	2	0	4.46200	19.882	6.0
2	-1	1	1	4.40700	20.133	2.0
3	1	1	1	3.66000	24.299	4.0
4	0	2	1	3.34300	26.544	12.0
5	2	2	0	3.23100	27.585	30.0
6	-2	2	1	2.99200	29.838	100.0
7	3	1	0	2.95100	30.262	30.0
8	-3	1	1	2.89400	30.873	40.0
9	1	3	0	2.83800	31.498	4.0
10	-1	3	1	2.56600	34.939	25.0
11	0	0	2	2.52400	35.539	65.0
12	-1	1	2	2.51800	35.627	65.0
13	1	3	1	2.38900	37.621	4.0
14	3	1	1	2.30100	39.117	16.0
15	1	1	2	2.21500	40.701	14.0
16	0	2	2	2.19800	41.030	14.0
17	3	3	0	2.15600	41.867	12.0
18	-3	3	1	2.13300	42.340	18.0
19	-4	2	1	2.10800	42.867	10.0
20	4	2	0	2.07500	43.583	2.0
21	0	4	1	2.04200	44.324	20.0
22	-4	0	2	2.01400	44.974	14.0
23	2	0	2	2.00600	45.163	10.0
24	-1	3	2	1.96800	46.085	8.0
25	3	3	1	1.86000	48.930	4.0
26	5	1	0	1.83500	49.642	10.0
27	2	2	2	1.83100	49.757	10.0
28	1	3	2	1.81300	50.286	4.0
29	4	2	1	1.77400	51.471	2.0
30	1	5	0	1.75400	52.102	14.0
31	-5	1	2	1.72000	53.212	2.0
32	-1	5	1	1.68400	54.442	2.0
33	-2	4	2	1.67300	54.830	6.0
34	-3	1	3	1.65800	55.368	6.0
35	-2	2	3	1.62400	56.631	35.0
36	4	4	0	1.61700	56.898	35.0
37	5	3	0	1.58600	58.115	2.0
38	6	0	0	1.56200	59.096	4.0
39	3	5	0	1.55000	59.599	6.0
40	-6	0	2	1.52900	60.503	4.0
41	4	0	2	1.52300	60.766	6.0
42	-5	3	2	1.50960	61.363	2.0
43	-1	3	3	1.50340	61.644	12.0
44	2	4	2	1.49180	62.176	2.0

45	0	6	0	1.48770	62.367	6.0
46	6	2	0	1.47500	62.965	2.0
47	4	4	1	1.46090	63.643	2.0
48	-6	2	2	1.44690	64.333	4.0
49	0	6	1	1.42670	65.356	8.0
50	5	3	1	1.42250	65.573	18.0
51	-3	5	2	1.40960	66.303	10.0
52	1	5	2	1.40720	66.378	10.0
53	2	2	3	1.38950	67.335	4.0
54	-7	1	1	1.37550	68.114	2.0
55	0	4	3	1.34390	69.945	2.0
56	-7	1	2	1.33050	70.754	8.0
57	6	2	1	1.32690	70.975	6.0
58	-5	3	3	1.31680	71.603	4.0
59	-2	6	2	1.28240	73.836	8.0
60	0	0	4	1.26240	75.206	6.0
61	3	5	2	1.24800	76.228	4.0
62	-1	7	1	1.23620	77.089	2.0
63	5	3	2	1.22220	78.136	2.0
64	-4	2	4	1.21740	78.505	2.0
65	0	2	4	1.21470	78.714	2.0



CaMgSi₂O₆ (Diopside)

Reference code: 01-070-2129

Compound name: Calcium Aluminum Silicate
Common name: Tschermak's pyroxene, syn, calcium aluminium catena-alumosilicate

Empirical formula: Al₂CaO₆Si
Chemical formula: CaAl₂SiO₆

Peak list

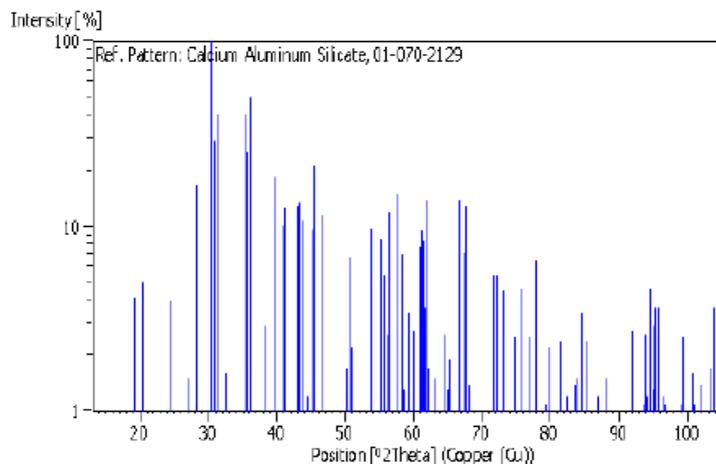
No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	6.31360	14.016	0.2
2	2	0	0	4.61700	19.208	4.1
3	-1	1	1	4.37710	20.272	0.5
4	0	2	0	4.32600	20.514	5.0
5	1	1	1	3.63120	24.495	3.9
6	0	2	1	3.29040	27.078	1.5
7	2	2	0	3.15680	28.247	16.8
8	-2	2	1	2.94080	30.370	100.0
9	3	1	0	2.90000	30.808	29.1
10	-3	1	1	2.85860	31.265	40.4
11	1	3	0	2.75290	32.498	1.6
12	0	0	2	2.53410	35.393	40.8
13	-2	0	2	2.53410	35.393	40.8
14	-1	1	2	2.52240	35.563	3.7
15	-1	3	1	2.50730	35.784	25.2
16	2	2	1	2.47750	36.229	49.8
17	1	3	1	2.33950	38.448	2.9
18	4	0	0	2.30850	38.985	0.7
19	3	1	1	2.27440	39.593	18.7
20	1	1	2	2.21160	40.767	10.1
21	-2	2	2	2.18660	41.254	12.7
22	0	2	2	2.18660	41.254	12.7
23	0	4	0	2.16300	41.725	0.7
24	3	3	0	2.10450	42.941	13.0
25	-3	3	1	2.08860	43.285	13.6
26	-4	2	1	2.07290	43.629	10.9
27	4	2	0	2.03660	44.448	1.2
28	-4	0	2	2.00480	45.192	9.7
29	2	0	2	2.00030	45.299	9.4

30	0	4	1	1.98940	45.561	21.6
31	2	4	0	1.95870	46.316	0.4
32	-1	3	2	1.94610	46.634	11.5
33	-2	4	1	1.90370	47.736	0.5
34	-5	1	1	1.86870	48.688	0.3
35	3	3	1	1.82520	49.926	0.9
36	-4	2	2	1.81900	50.108	1.2
37	2	2	2	1.81560	50.209	1.7
38	5	1	0	1.80610	50.491	6.7
39	-3	3	2	1.79220	50.911	2.2
40	1	3	2	1.79220	50.911	2.2
41	2	4	1	1.75890	51.946	0.1
42	4	2	1	1.74790	52.297	0.2
43	-1	1	3	1.71500	53.379	0.1
44	-5	1	2	1.70480	53.724	3.8
45	3	1	2	1.70080	53.860	9.9
46	1	5	0	1.70080	53.860	9.9
47	-3	1	3	1.66000	55.296	8.4
48	-2	4	2	1.64520	55.836	5.4
49	0	4	2	1.64520	55.836	5.4
50	-1	5	1	1.63780	56.111	2.6
51	-2	2	3	1.62270	56.680	12.0
52	-5	3	1	1.59470	57.768	15.0
53	-4	4	1	1.59470	57.768	15.0
54	1	5	1	1.58820	58.037	0.7
55	4	4	0	1.57840	58.422	7.1
56	5	1	1	1.57360	58.617	1.3
57	0	2	3	1.57360	58.617	1.3
58	5	3	0	1.55520	59.380	3.4
59	6	0	0	1.53900	60.069	2.7
60	-6	0	2	1.51440	61.148	7.6
61	4	0	2	1.51110	61.296	9.6
62	3	5	0	1.50840	61.417	8.3
63	-3	5	1	1.50140	61.735	3.6
64	-6	2	1	1.50140	61.735	3.6
65	-1	3	3	1.49590	61.987	13.9
66	-4	2	3	1.49140	62.195	2.7
67	-5	3	2	1.48920	62.297	1.7
68	-4	4	2	1.46860	63.271	1.5
69	2	4	2	1.46860	63.271	1.5
70	-3	3	3	1.45900	63.736	0.1
71	6	2	0	1.45000	64.179	0.4
72	0	6	0	1.44200	64.578	2.6

73	4	4	1	1.43210	65.079	1.3
74	-6	2	2	1.42930	65.222	1.2
75	4	2	2	1.42660	65.361	1.9
76	5	3	1	1.39830	66.655	14.0
77	0	6	1	1.38700	67.473	3.8
78	2	2	3	1.38450	67.611	7.2
79	-3	5	2	1.38100	67.605	12.9
80	1	5	2	1.38100	67.805	12.9
81	2	6	0	1.37640	68.063	1.4
82	-2	4	3	1.36070	68.958	0.9
83	-2	6	1	1.35560	69.255	1.0
84	-7	1	1	1.35560	69.255	1.0
85	0	4	3	1.33140	70.699	1.0
86	-2	0	4	1.31800	71.528	1.0
87	3	1	3	1.31800	71.528	1.0
88	-7	1	2	1.31510	71.710	5.4
89	5	1	2	1.31250	71.874	0.8
90	-5	3	3	1.30690	72.230	5.4
91	6	2	1	1.30690	72.230	5.4
92	-3	1	4	1.29110	73.257	4.5
93	-1	1	4	1.29110	73.257	4.5
94	-6	4	1	1.28680	73.542	0.4
95	-5	5	1	1.28350	73.762	0.3
96	-4	4	3	1.28050	73.964	0.3
97	-6	2	3	1.27700	74.200	0.1
98	0	0	4	1.26700	74.886	2.5
99	5	5	0	1.26270	75.185	0.1
100	-2	2	4	1.26120	75.290	0.1
101	0	6	2	1.25330	75.848	4.6
102	-2	6	2	1.25330	75.848	4.6
103	4	4	2	1.23870	76.904	2.5
104	-7	3	1	1.23870	76.904	2.5
105	-4	6	1	1.23070	77.497	0.6
106	-1	5	3	1.23070	77.497	0.6
107	1	7	0	1.22520	77.911	6.5
108	3	5	2	1.22520	77.911	6.5
109	-4	2	4	1.21730	78.513	0.6
110	3	3	3	1.21040	79.048	0.2
111	-3	5	3	1.21040	79.048	0.2
112	-7	3	2	1.20820	79.220	0.6
113	5	3	2	1.20620	79.378	1.1
114	-7	1	3	1.20370	79.575	0.6
115	-5	1	4	1.20090	79.798	2.2

116	-1	7	1	1.20090	79.798	2.2
117	-1	3	4	1.18950	80.719	0.7
118	-3	3	4	1.18950	80.719	0.7
119	7	1	1	1.18700	80.925	0.4
120	-8	0	2	1.18090	81.430	2.4
121	1	7	1	1.18090	81.430	2.4
122	5	5	1	1.17430	81.986	0.4
123	1	5	3	1.16920	82.421	1.2
124	2	6	2	1.16920	82.421	1.2
125	-8	2	1	1.15600	83.572	1.4
126	8	0	0	1.15420	83.732	1.5
127	4	6	1	1.15100	84.018	0.2
128	-6	0	4	1.14600	84.469	3.4
129	3	7	0	1.14600	84.469	3.4
130	-8	2	2	1.13920	85.091	0.8
131	6	2	2	1.13700	85.295	2.4
132	-6	4	3	1.13700	85.295	2.4
133	-2	4	4	1.12580	86.349	0.2
134	-1	7	2	1.11920	86.985	0.7
135	-5	5	3	1.11810	87.092	1.2
136	-5	3	4	1.11810	87.092	1.2
137	8	2	0	1.11520	87.376	0.2
138	-2	6	3	1.11300	87.592	0.1
139	7	3	1	1.10580	88.310	1.5
140	2	2	4	1.10580	88.310	1.5
141	0	6	3	1.09680	89.226	0.6
142	-4	4	4	1.09480	89.433	0.6
143	5	1	3	1.09480	89.433	0.6

Stick Pattern



Lampiran C (Hasil Uji EDX)

Hasil Uji EDX Pasir Besi



LABORATORIUM PENGOLAHAN MINERAL DAN MATERIAL
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

Telp. (031) 5943645, 081232092373, Email : sunning@mat-eng.its.ac.id

Surabaya, 22 September 2016

No : 09/LTPMM/IX/2016
Hal : Laporan Hasil Pengujian SEM-EDX
Lampiran : -

LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Berdasarkan permohonan pengujian yang diberikan, maka telah dilakukan pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) - Electron Dispersive X-Ray (EDX) untuk sampel pasir besi Sukabumi. Berikut ini ialah hasil pengujian dan analisa uji SEM dan EDX tersebut.



Gambar 1. Hasil pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) sampel pasir besi Sukabumi

Tabel 1. Hasil Pengujian EDX Pasir Besi Sukabumi

No	Element	Wt%	At%
1	O	24.44	49.59
2	Mg	2.72	3.64
3	Al	2.66	3.20
4	Si	3.14	3.63
5	Ca	0.65	0.53
6	Ti	8.46	5.73
7	Fe	56.93	33.68

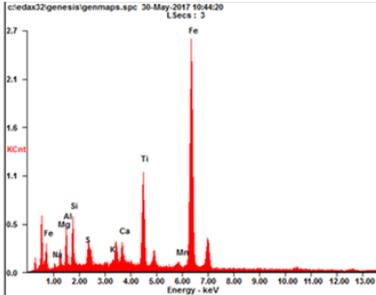
Hasil Uji EDX *Sponge Iron*

Microanalysis Report

Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

11/21/2017



Element	Wt %	At %
CaK	01.06	02.31
TiL	00.32	00.92
AlK	01.21	02.24
SiK	03.11	05.80
FeK	75.33	72.73
MgK	04.24	05.42
CaK	01.06	01.49

EDAXZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
TABLE : DEFAULT

KV:17.51 TILT:0.00 TAKE-OFF:32.72 AMP:6.4 DETECTOR TYPE
:SDD APOLLOX RESOLUTION:127.89

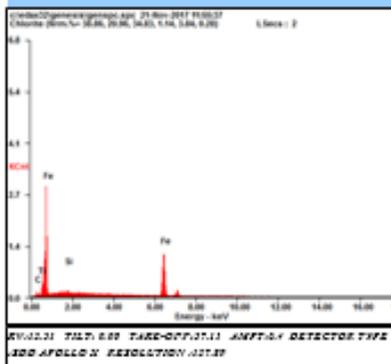
Hasil Uji EDX Pig Iron 2 menit

Microanalysis Report

Prepared for: Company Name Here

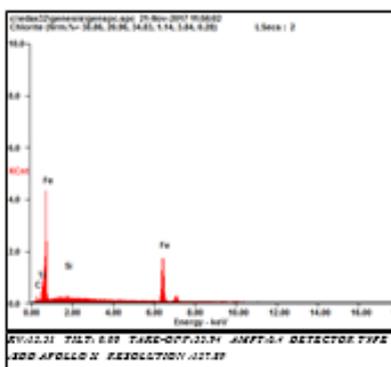
Prepared by: Your Name Here

11/21/2017



Element	Wt %	At %
CA	01.37	03.99
Fe	98.38	98.97
Si	00.34	01.01
C	00.31	00.03

EDAX EAF QUANTIFICATION STANDARDLESS ZPC
TABLE : DEFAULT



Element	Wt %	At %
CA	01.41	06.15
Fe	97.93	98.81
Si	00.50	00.93
C	00.14	04.11

EDAX EAF QUANTIFICATION STANDARDLESS ZPC
TABLE : DEFAULT

Hasil Uji EDX Pig Iron 4 menit

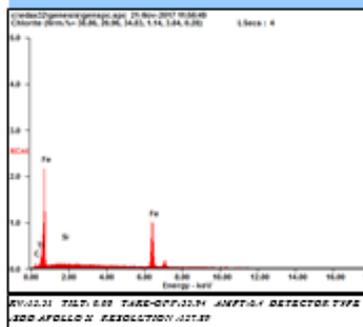
Microanalysis Report



Prepared for: Company Name Here

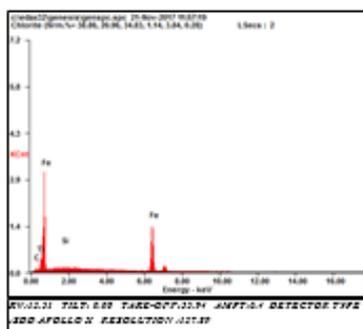
Prepared by: Your Name Here

11/21/2017



Element	Wt %	At %
C	0.119	0.524
Si	0.537	0.592
S	0.021	0.043
Fe	92.32	88.89

EDAX EAF QUANTIFICATION: STANDARDLESS EEC
TABLE: DEFAULT



Element	Wt %	At %
C	0.116	0.511
Si	0.598	0.682
S	0.021	0.040
Fe	92.26	87.76

EDAX EAF QUANTIFICATION: STANDARDLESS EEC
TABLE: DEFAULT

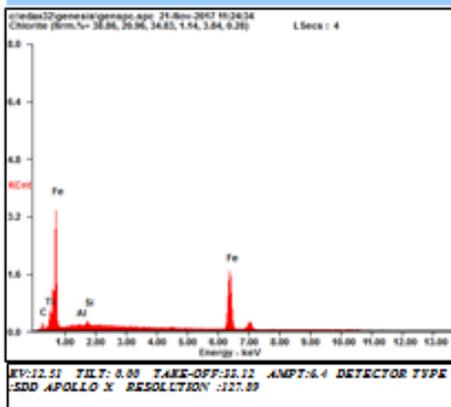
Hasil Uji EDX Pig Iron 6 menit

Microanalysis Report

Prepared for: *Company Name Here*

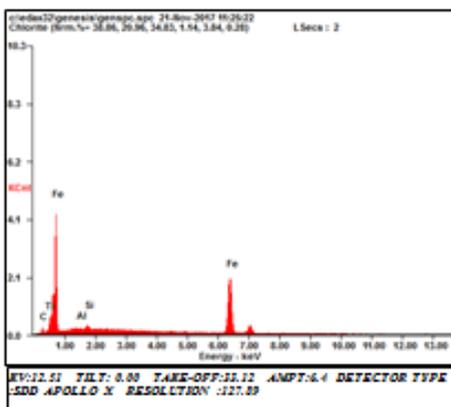
Prepared by: *Your Name Here*

11/21/2017



Element	Wt %	At %
C K	01.29	05.61
Ti L	06.18	06.76
Al K	00.16	00.31
Si K	00.69	01.29
Fe K	91.69	86.03

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
TABLE : DEFAULT



Element	Wt %	At %
C K	01.40	06.07
Ti L	06.01	06.53
Al K	00.21	00.41
Si K	00.90	01.68
Fe K	91.48	85.32

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
TABLE : DEFAULT

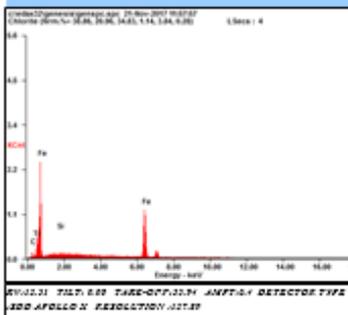
Hasil Uji EDX Pig Iron 8 menit

Microanalysis Report

Prepared for: Company Name Here

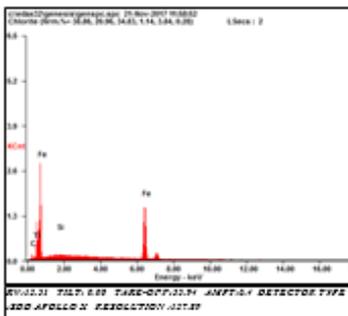
Prepared by: Your Name Here

11/21/2017



Element	Wt %	At %
C	01.50	05.68
Si	05.40	01.04
Fe	92.11	93.28

EDAX/EAF QUANTIFICATION: STANDARDLESS SEC TABLE: DEFAULT



Element	Wt %	At %
C	01.33	05.99
Si	03.51	09.41
Fe	95.16	84.60

EDAX/EAF QUANTIFICATION: STANDARDLESS SEC TABLE: DEFAULT

Hasil Uji EDX *Slag* 2 menit

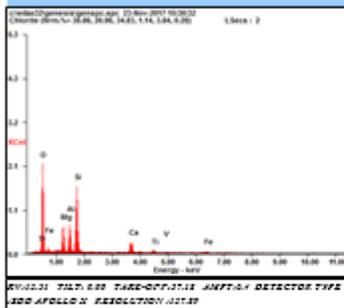
Microanalysis Report



Prepared for: Company Name Here

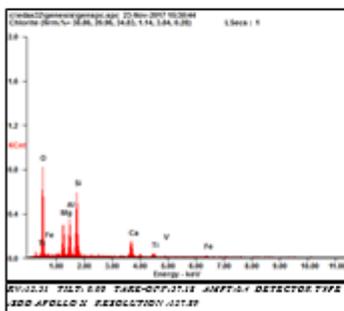
Prepared by: Your Name Here

11/23/2017



Element	Wt %	At %
O	56.79	53.94
Fe	07.38	07.11
Mg	08.31	07.02
Si	24.12	19.57
Ca	10.15	05.37
Ti	04.11	01.98
V	00.53	00.24
Fe	05.83	02.33

EDAX EAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
TABLE - DEFAULT



Element	Wt %	At %
O	56.79	53.94
Fe	08.55	08.15
Mg	09.39	08.32
Si	21.23	17.37
Ca	13.11	07.80
Ti	05.00	02.45
V	00.91	00.24
Fe	04.94	02.08

EDAX EAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
TABLE - DEFAULT

Hasil Uji EDX Slag 4 menit

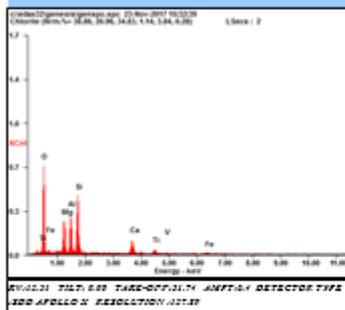
Microanalysis Report



Prepared for: Company Name Here

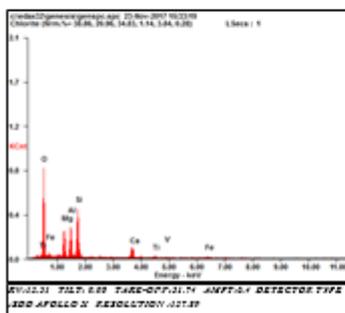
Prepared by: Your Name Here

11/23/2017



Element	Wt %	At %
O K	40.21	58.81
Mg K	08.82	08.20
Al K	10.66	08.93
Si K	19.38	13.60
Ca K	10.13	03.71
Ti K	04.77	02.13
V K	01.20	00.55
Fe K	04.31	01.95

EDAX:RAP QUANTIFICATION STANDARDLESS ZSC
 TABLE:DEFAULT



Element	Wt %	At %
O K	42.13	58.93
Mg K	08.84	08.08
Al K	10.44	08.60
Si K	19.23	13.25
Ca K	09.93	03.31
Ti K	03.77	01.73
V K	01.33	00.88
Fe K	04.10	01.63

EDAX:RAP QUANTIFICATION STANDARDLESS ZSC
 TABLE:DEFAULT

Hasil Uji EDX *Slag* 6 menit

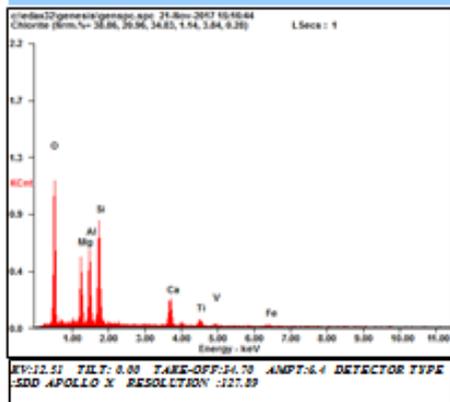
Microanalysis Report

Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

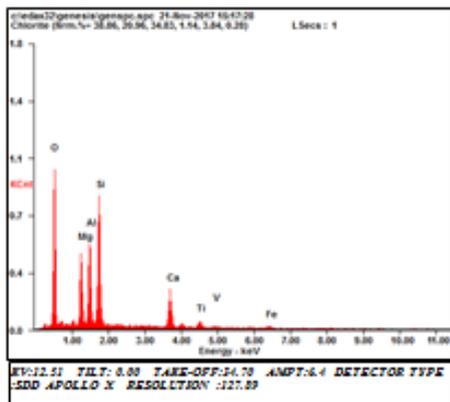


11/21/2017



Element	Wt %	At %
O K	39.44	55.83
Mg K	09.37	08.73
Al K	11.32	09.50
Si K	18.91	15.25
Ca K	11.29	06.38
Ti K	05.22	02.47
V K	00.87	00.39
Fe K	03.57	01.45

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
TABLE : DEFAULT



Element	Wt %	At %
O K	36.25	52.78
Mg K	09.34	08.95
Al K	11.19	09.66
Si K	19.81	16.43
Ca K	12.42	07.22
Ti K	04.72	02.30
V K	01.22	00.56
Fe K	05.04	02.10

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
TABLE : DEFAULT

Lampiran D (Hasil Uji Proximate Analysis Batubara)

LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Nama Pemilik : M. Rifqi Mahendra
Alamat Pemilik : T.Material & Metalurgi ITS
Nama Contoh : **Batubara** Tanggal Terima : 15 Ags 2016
Deskripsi : Bentuk : Padat/Cair/Gas Tanggal Pengujian : 22 Ags 2016
Contoh Volume : - Tanggal Selesai Pengujian : 13 Sep 2016
Kemasan : Plastik Jumlah Contoh : 1
Kode Contoh : **EI-0513**

Menyatakan bahwa contoh tersebut di atas telah diuji di Laboratorium Energi – LPPM ITS.

Hasil Pengujian

No.	Nama Contoh	Jenis Uji	Hasil	Satuan	Metode Pengujian
1	Batubara	Total Moisture	4,17	%Ar	ASTM D 3302-15
		Moisture in Sample	3,30	%Adb	ASTM D 3173-11
		Ash Content	10,30		ASTM D 3174-12
		Volatile Matter	42,08		ASTM D 3175-11
		Fixed Carbon	44,32		ASTM D 3172-13
		Kalori	6706	Cat/gr	Bomb kalorimeter
		HGI	28	-	ASTM D 409-11

Suhu : 20,3 °C
Humidity : 48 %
Analisis : MBB

Catatan:

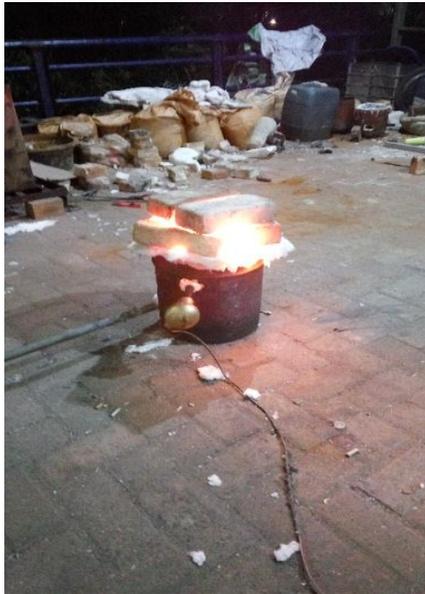
- Laporan Hasil Pengujian tidak boleh digandakan tanpa persetujuan tertulis dari Laboratorium Energi.
- Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh yang diuji.
- Hasil pengujian ini tidak dapat digunakan sebagai alat bukti hukum.

Mengetahui,
Manajer Teknis



Vita Yuliana, S.Si
NIP. 914014001

Lampiran G (Dokumentasi Penelitian)



Muffle furnace ketika proses reduksi langsung



Briket sponge iron setelah melalui proses reduksi



Briket Sponge iron Sebelum Proses peleburan



Proses Peleburan



Pig Iron Variasi Waktu Tap-to-tap 2 menit



Pig Iron Variasi Waktu tap-to-tap 4 menit



Pig Iron Variasi Waktu tap-to-tap 6 menit



Pig Iron Variasi waktu tap-to-tap 8 menit

BIODATA PENULIS



Isro'uf Gerio Pangestu, lahir di Kediri pada tanggal 13 Desember 1995. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN Mojo, Kediri. Kemudian dilanjutkan ke jenjang pertama di SMPN 4 Kediri. Selanjutnya penulis menempuh pendidikan jenjang atas di SMAN 1 Kediri. Lalu, penulis melanjutkan Pendidikan tinggi di Departemen Teknik Material FTI-ITS.

Selama menempuh aktivitas perkuliahan, penulis juga tercatat Aktif di acara tingkat organisasi himpunan dan eksternal. Penulis tercatat sebagai staff departemen Kesejahteraan Mahasiswa HMMT FTI-ITS periode 2015/2016. Penulis juga mengemban amanah sebagai Kepala Departemen Mentoring LDJ Ash-Haabul Kahfi periode 2016/2017. Penulis ikut berpartisipasi dalam proyek Produksi dan Sertifikasi *Frangible Bullet* yang bekerjasama dengan PT. PINDAD dan didanai oleh LPDP. Berbagai pelatihan seperti LKMM Pra TD, TD dan Peladvo

Penulis memiliki pengalaman kerja praktik di PT. PJB UP Gresik dan PERTAMINA MOR-V Jatim-Balinus pada bulan Januari-Februari 2017 dan Juli-Agustus 2017 dan memiliki topik selama kerja praktik dengan judul “Analisis *Overheating* Pipa Boiler pada *Secondary Super Heater* pada PLTU 3 PJB Gresik” dan “Perbandingan Pipa *Glass Reinforced Epoxy* dan *Carbon Steel* pada Proses Suplai Gas LPG Terminal Nilam Utara, Surabaya”.

Tugas akhir yang diambil penulis yaitu dalam bidang metalurgi ekstraksi dengan judul “Studi Pengaruh Variasi Waktu *Holding* pada Proses Peleburan *Direct Reduced Iron* terhadap Kandungan Fe Total dan *Recovery* Fe dalam Proses Pembuatan *Pig Iron* dengan Metode *Electric Arc Furnace*”. Penulis dapat dihubungi di 081259796578 atau email ke gisrouf@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)