

# Review Pengaruh Temperatur Tahan Pada Reduksi Langsung Bijih Besi

Naufal Muzakkii, Dian Mughni Fellicia dan Fakhreza Abdul

Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

*e-mail:* dian@mat-eng.its.ac.id

**Abstrak**—Pada tahun 2018 konsumsi baja nasional mengalami peningkatan sebesar 11% atau mencapai 15,1 juta ton dimana konsumsi baja nasional masih didominasi penggunaan raw material besi scrap. Dengan ketersediaan bijih besi yang melimpah, Indonesia dapat mengolah bijih besi menjadi besi spons yang memiliki nilai lebih. Bahan baku yang umum digunakan untuk pembuatan *sponge iron* antara lain adalah bijih besi, *reducing agent* (batubara, kokas, arang, gas, dll), dan *flux agent* (batu kapur). Reduksi langsung bijih besi merupakan metode peningkatan kadar Fe pada besi dengan mereduksi bijih besi yang sudah dijadikan pelet dibawah titik lebur besi yang bertujuan mengikat oksigen menggunakan karbon yang didapatkan dari batubara. Review ini bertujuan untuk mengetahui temperatur optimal pada reduksi bijih besi. Didapatkan temperatur dengan hasil paling optimal pada 1000°C - 1200°C. Pada beberapa kasus yang sudah dilakukan, didapatkan hasil yang berbeda walaupun menggunakan temperatur proses yang sama. Hal ini disebabkan karena karakteristik bahan yang digunakan seperti bijih besi, reduktan, dan batu kapur memiliki karakteristik yang berbeda serta waktu proses yang digunakan juga memiliki pengaruh pada hasil reduksi.

**Kata Kunci**—Bijih besi, Reduksi langsung, Temperatur.

## I. PENDAHULUAN

INDONESIA memiliki potensi dan sumber daya alam yang sangat melimpah pada sektor pertambangan, dengan persebaran mineral di berbagai daerah dan memiliki jenis yang berbeda dari tiap wilayahnya. Menurut Direktorat Jendral Mineral dan Batubara Kementerian ESDM produksi logam setengah jadi dari komoditas besi masih jauh dari kebutuhan. Adapun jumlah produksi logam setengah jadi dari komoditas besi di Indonesia per tahun 2019 yaitu 1.33 juta ton Fe dalam bentuk *sponge iron* yang dihasilkan oleh satu smelter dan 36.367 ton Fe. Dan yang telah diketahui, kebutuhan riil industri baja dalam negeri mencapai 7,1 juta ton Fe per tahun. Artinya, jumlah produksi logam setengah jadi dari komoditas besi masih kurang 5.73 juta ton Fe per tahun.

Bijih besi merupakan campuran mineral berharga yang mengandung besi dengan mineral-mineral lainnya yang disebut *gaunge*. Bijih besi merupakan bijih yang sangat penting karena mengandung bahan baku pembuatan logam besi yang sangat diperlukan dalam berbagai bidang [1]. Berdasarkan bentuk, bijih besi dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu bongkahan (*lump*) dan pasir. Disebutkan dalam data Kementrian ESDM tahun 2010 Indonesia memiliki sumber daya sekitar 2 milyar ton bijih besi dalam bentuk *lump*, termasuk bijih besi primer di dalamnya dengan sumber daya mencapai 557 juta ton. Bijih besi magnetik masuk ke

dalam jenis bijih besi primer. Indonesia tercatat memiliki 557.185.779 ton pada tahun 2010. Kekayaan sumber bijih besi Indonesia belum diimbangi dengan optimalisasi pemanfaatannya, sebagai contoh perusahaan baja nasional pun masih ada yang mengandalkan impor bahan baku bijih besi dalam bentuk pelet dari Brazil dan Swedia.

Hogonas Corporation mulai mengkomersilkan hasil olahan *sponge iron* pada tahun 1903 dan mulai memproduksi secara kontinyu pada tahun 1911 untuk memenuhi kebutuhan produksi baja [2]. Dinilai lebih ekonomis, banyak industri pengolahan bijih besi menggunakan metode *direct reduction iron*.

*Direct reduction iron* (DRI) merupakan salah satu metode atau teknologi untuk mengolah bijih besi untuk menghasilkan produk yaitu *sponge iron*. Prinsip sederhana dari metode ini adalah mereduksi bijih besi dibawah titik lebur besi. Bahan baku yang biasa digunakan untuk metode ini antara lain adalah bijih besi, *reducing agent* (batubara, kokas, arang, gas, dll), dan *flux agent* [3].

Telah dilakukan penelitian oleh Suharto, dkk terkait pengaruh temperatur dan jenis reduktan pada pembuatan *sponge iron* dengan teknologi *Direct Reduced Iron* (DRI) dalam *rotary kiln*. dengan variabel temperatur reduksi 900, 1050, dan 1200°C, sedangkan variabel jenis reduktan adalah batu bara *sub-bituminous* dan arang kayu. Dilakukan analisis kimia terhadap bahan dan produk yang dihasilkan untuk mengetahui keberhasilan proses dan kualitas produk. Hasil yang didapat, reduktan arang kayu sedikit lebih baik dibanding batu bara. Hal ini ditunjukkan pada temperatur 1200°C, dengan reduktan arang kayu dan waktu reduksi 2 jam menghasilkan *sponge iron* dengan persen metalisasi sebesar 97,43% lebih tinggi dibanding *sponge iron* dengan reduktan batu bara sebesar 96,7%.

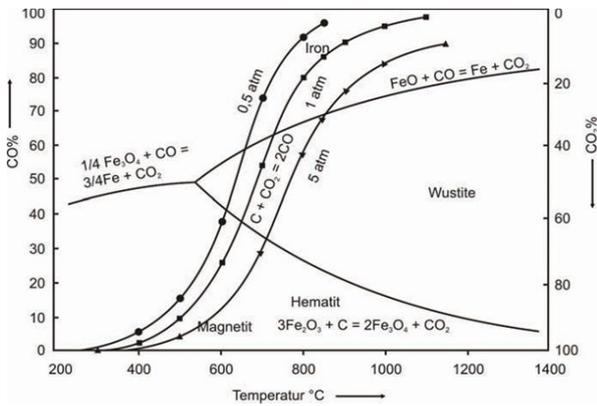
Berdasarkan hasil studi literatur, dan melihat kebutuhan bahan baku pembuatan baja yang terus meningkat, maka dilakukan review jurnal yang berkaitan dengan reduksi langsung bijih besi dengan variasi temperatur tahan guna mengembangkan penelitian sebelumnya dan mengetahui temperatur optimum pada reduksi langsung bijih besi.

Metalisasi yang dihasilkan dapat memenuhi standar nasional Indonesia untuk *sponge iron* yakni mini- mum 85%.

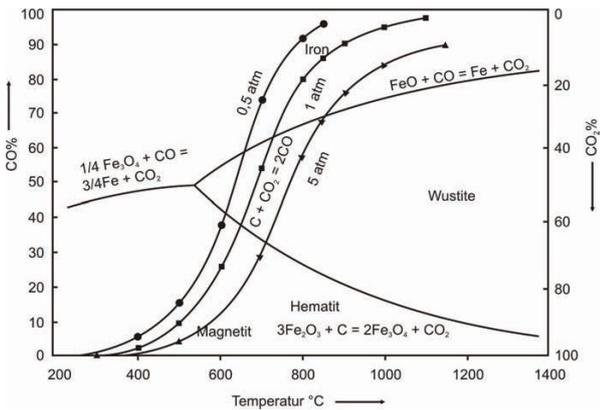
## II. REDUKSI LANGSUNG

### A. Kinetika Reduksi Bijih Besi

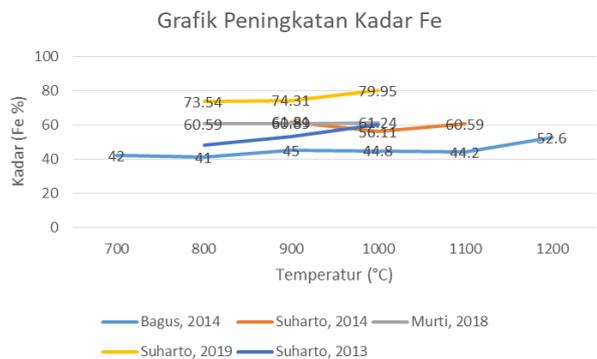
Kinetika reduksi bijih besi merupakan kecepatan besi oksida bertransformasi menjadi besi metalik dengan melepaskan oksigen. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kecepatan reaksi reduksi bijih besi, antara lain



Gambar 1. Efek tekanan terhadap kesetimbangan Boudouard [11]



Gambar 2. Diagram Kesetimbangan Boudouard [11].



Gambar 3. Grafik Peningkatan Kadar Fe

adalah ukuran partikel, bentuk dan dsitribusi ukuran partikel, bobot jenis, porositas, struktur Kristal, serta komposisi kimia. Kinetika reduksi langsung menggunakan reduktan batubara dipengaruhi oleh kombinasi beberapa mekanisme, yaitu perpindahan panas, perpindahan massa oleh konveksi, difusi fase gas, serta reaksi kimia dengan gasifikasi karbon [4].

Kemampuan untuk direduksi dari besi oksida sangat dipengaruhi oleh porositas yang dimiliki oleh besi oksida tersebut. Semakin tinggi porositas yang dimiliki oleh besi oksida maka semakin mempermudah difusi gas reduktan CO pada besi oksida sehingga meningkatkan laju reduksi. Pelet hasil aglomerasi memiliki porositas yang jauh lebih tinggi daripada pelet yang disinter, sehingga *reducibility* pelet hasil aglomerasi jauh lebih tinggi daripada pelet hasil sinter. Ukuran partikel pereaksi seperti karbon juga sangat berpengaruh. Semakin kecil partikel karbon maka semakin luas permukaan yang memungkinkan terjadinya reaksi, sehingga laju pembentukan CO semakin tinggi.

**B. Mekanisme Reduksi Besi Oksida**

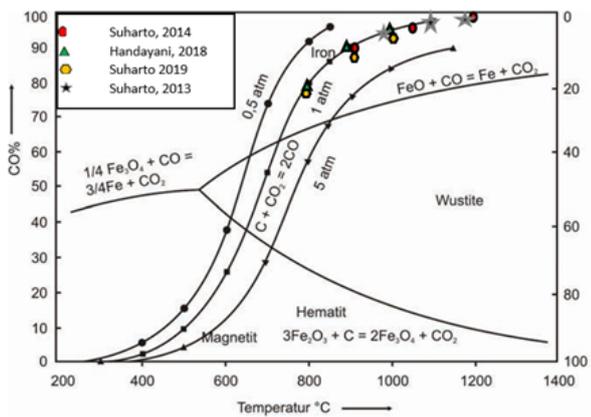
Tahapan yang terjadi pada proses reduksi langsung bijih besi berpori meliputi perpindahan massa dari agen reduksi bijih besi yaitu gas CO melalui lapisan laminar oksida ke *interface*, difusi melewati pori pada *interface* oksida, terjadi adsorpsi pada *interface* oksida, pengikatan oksigen melalui reaksi pembentukan CO<sub>2</sub>, desorpsi produk reaksi, difusi solid state dari produk reaksi zat padat, nukleasi, dan pertumbuhan inti, difusi produk reaksi kembali ke laminar, dan perpindahan massa produk reaksi melalui lapisan laminar kembali ke aliran gas [5]. Jika partikel besi oksida memiliki porositas yang rendah, maka faktor faktor yang lain harus dipertimbangkan. Porositas diperlukan untuk memudahkan proses difusi gas reduktor pada bijih besi. Selain itu, makin kecil ukuran bijih, maka luas permukaannya akan makin besar, akibatnya kontak antara gas reduktor dengan bijih besi akan makin besar [6]. Pada hal ini, gas reduktan tidak dapat menembus partikel, karena reaksi akan terjadi jika gas

Tabel 1.  
Variasi dan Hasil Pada Jurnal yang Digunakan

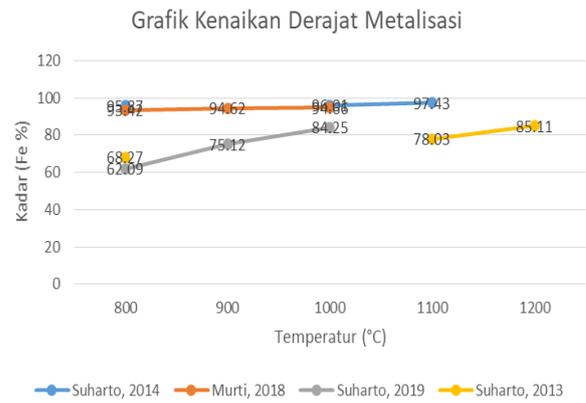
Jurnal	Variabel	Fe Total
Suharto, 2014	900 °C	61,81%
	1050 °C	56,11%
	1200 °C	60,59%
Bagus, 2014	700 °C	42,8%
	800 °C	41,6%
	900 °C	45,5%
	1000 °C	44,8%
	1100 °C	44,2%
Murti, 2018	1200 °C	52,6%
	800 °C	60,59%
	900 °C	60,89%
Suharto, 2019	1000 °C	61,24%
	800 °C	73,54%
Suharto, 2013	900 °C	74,31%
	1000 °C	79,95%
	1000 °C	48,41%
Suharto, 2013	1100 °C	55,33%
	1200 °C	60,35%

Tabel 2.  
Variasi dan Hasil Metalisasi Jurnal Pembahasan yang Digunakan

Jurnal	Variabel	% Metalisasi
Suharto, 2014	900 °C	95,87%
	1050 °C	96,01%
	1200 °C	97,43%
Murti, 2018	800 °C	93,42%
	900 °C	94,62%
Suharto, 2019	1000 °C	94,66%
	800 °C	62,09%
	900 °C	75,12%
Suharto, 2013	1000 °C	84,25%
	1000 °C	68,27%
	1100 °C	78,03%
Suharto, 2013	1200 °C	85,11%



Gambar 4. Diagram Kesetimbangan Boudouard [11].



Gambar 5. Grafik Peningkatan Derajat Metalisasi

reduktan mampu menembus lapisan antarmuka, hal ini dapat mempengaruhi produk yang dihasilkan [7].

Jika parameter reduksi mengarah pada pembentukan lapisan besi padat di sekitar partikel, peningkatan pada proses reduksi dibatasi oleh difusi keadaan padat melalui lapisan produk yang terbentuk. Keadaan ini mengurangi kualitas reduksi karena menghalangi gas reduktan masuk ke lapisan *interface* karena difusi *solid-state* dominan. Selama proses reduksi magnetit, difusi pada keadaan padat sangat penting karena sifat oksida yang tidak keropos. Difusi *solid-state* biasa terjadi karena cacat kisi pada interstitial. Selama temperatur proses reduksi berada diatas 570 °C wustit akan terbentuk. Wustit menunjukkan kekosongan yang mendukung difusi ion besi pada kisi. Jika lapisan besi padat terbentuk pada proses reduksi, reduksi akan terus terjadi karena adanya difusi oksigen keluar permukaan. Koefisien pada difusi *solid-state* jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan difusi gas. Oleh karena itu, reduksi yang terjadi lebih rendah. Struktur produk hasil reduksi yang terbentuk bergantung pada proses nukleasi dan pertumbuhan nuklei. Pada reaksi *interface*, pengurangan oksigen menyebabkan perubahan rasio besi terhadap oksigen.

C. Termodinamika Reduksi Bijih Besi

Diagram Ellingham adalah diagram yang menampilkan energi bebas suatu reaksi yang diplot kedalam suatu grafik dengan parameter energi bebas vs temperatur. Logam yang aktif secara kimia memiliki energi bebas yang paling tinggi (negatif) dalam membentuk oksida terletak pada diagram Ellingham bagian paling bawah. Sedangkan, untuk logam yang memiliki energi bebas yang paling rendah (positif) dalam membentuk nilai oksida terletak pada diagram Ellingham bagian atas. Nilai ΔG° untuk reaksi oksidasi adalah ukuran afinitas kimia suatu logam terhadap oksigen. Semakin negatif nilai ΔG° suatu logam, menunjukkan logam semakin stabil dalam bentuk oksida. Dari gambar diagram Ellingham dibawah, dapat diketahui minimal temperatur untuk terjadinya reaksi.

Energi Gibbs adalah suatu ukuran dari penggerak yang dapat suatu reaksi terjadi. Seperti ditunjukkan pada Persamaan 1 energi Gibbs [8]:

$$\Delta G = -T \cdot \Delta S + \Delta H \tag{1}$$

Dimana:

ΔG = perubahan energi Gibbs (J)

ΔH = perubahan entalpi reaksi (J)

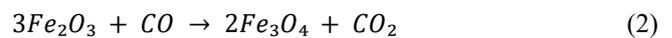
ΔS = perubahan entropi reaksi (J/K)

T = temperatur absolut reaksi (K)

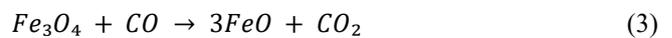
ΔG yang bernilai negatif menunjukkan bahwa suatu reaksi dapat terjadi secara spontan tanpa energi dari luar. Sementara itu reaksi yang memiliki ΔG positif menunjukkan reaksi tersebut tidak akan terjadi secara spontan. Entalpi adalah besaran dari energi yang dilepaskan ketika suatu reaksi berlangsung (panas dari suatu reaksi). Jika entalpinya bernilai negatif maka reaksi tersebut melepaskan energi (eksotermik), sedangkan jika bernilai positif maka reaksi tersebut membutuhkan energi (endotermik). Sehingga reaksi reduksi bijih besi akan berjalan semakin baik pada setiap kenaikan temperatur [9]. Entropi adalah ukuran dari derajat ketidakteraturan suatu reaksi. Padatan memiliki bentuk yang teratur, cairan memiliki bentuk yang kurang teratur dan gas memiliki ketidakteraturan yang tinggi [8].

Secara umum, reduksi Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hematit tidak bisa terjadi reduksi secara langsung menjadi logam besi. Jika temperatur proses berada dibawah 570 °C. reduksi terjadi secara bertahap dari Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menjadi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang disebut magnetit, kemudian berlanjut ke FeO yaitu wustit dan menjadi Fe atau logam besi. Mekanisme reduksi komponen oksida besi dibagi menjadi 3 tahap: [5], [10]

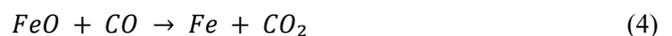
Tahap I: Reduksi hematit menjadi magnetit



Tahap II: Reduksi magnetit menjadi wustit



Tahap III: Reduksi wustit menjadi logam besi



Reaksi Boudouard merupakan reaksi kesetimbangan kimia antara karbon monoksida dengan karbon dioksida pada suhu tertentu. Reaksi ini merupakan reaksi disproporsionasi karbon monoksida menjadi karbon dioksida dan grafit. Hal ini dapat dijelaskan melalui Gambar 2.1 yang menampilkan reaksi kesetimbangan Boudouard memotong kurva wustite-iron pada temperatur 700°C serta memotong kurva magnetite-wustite di temperatur 650°C. Secara termodinamika, pada saat temperatur dibawah 700°C wustit tidak dapat direduksi. Sedangkan pada temperatur 650°C magnetit tidak dapat direduksi karena CO berdekomposisi menjadi CO<sub>2</sub> dan C [11]. Reaksi Boudouard merupakan reaksi yang bersifat endotermik sehingga membutuhkan temperatur tinggi untuk dapat berjalan. Dari diagram

Boudouard-Gaussner pada Gambar 1, senyawa yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh perbandingan antara CO/CO<sub>2</sub> dan juga temperatur operasi [12]. Temperatur juga menentukan komposisi tekanan gas parsial CO/CO<sub>2</sub>; pada temperatur 1000 K perbandingan tekanan gas parsial CO dengan CO<sub>2</sub> adalah 60,89% : 39,11% [11], sehingga minimal pada temperatur 727°C reduksi wustit terjadi secara eksotermik. Berdasarkan diagram Bauer Glassner magnetit mulai tereduksi pada temperatur 670-870°C membentuk FeO. FeO tereduksi pada temperatur 870-1000°C [13].

#### D. Pengaruh Temperatur pada Laju Reduksi

Mengenai kinetika reduksi, temperatur tinggi selalu menghasilkan keuntungan karena ketergantungannya yang memungkinkan pembatasan pada laju pembentukan oleh temperatur. Secara umum, laju difusi dan reaksi batas fasa meningkat seiring meningkatnya temperatur proses. Dari sudut pandang termodinamika, reduksi oksida besi dapat dilakukan pada temperatur rendah. Pemanfaatan gas reduktan yang digunakan pada temperatur yang rendah tidak mencukupi karena keterbatasan kinetik. Oleh karena itu, diperlukan temperatur tertentu untuk mencapai pemanfaatan gas reduktan yang sesuai dengan kebutuhan ekonomi proses industri [14].

Untuk gas reduktan yang terdiri dari karbon monoksida, potensi reduksi berkurang seiring bertambahnya temperatur. Pada hal ini, temperatur reduksi yang tinggi hanya bermanfaat untuk mengurangi batasan kinetik. Temperatur reduksi juga mempengaruhi pembentukan jenis besi. Area susunan besi padat harus dihindari, karena reduksi dibatasi pada keadaan padat. Pengaruh temperatur terhadap laju reduksi telah diteliti oleh banyak peneliti. Bahgat dan Khedr [15] melakukan penelitian terkait perilaku reduksi kristal tunggal magnetit dengan hidrogen dalam penganalisis termogravimetri pada suhu antara 900°C sampai 1100°C. Hasil percobaan yang dilakukan menunjukkan bahwa proses reduksi pada temperatur 900°C dan 950°C mengalami pelambatan secara drastis pada derajat reduksi 80% dan 90%. Fenomena ini terjadi dikarenakan terbentuknya lapisan besi padat yang mencegah kontak gas dengan lapisan *interface* oksida besi. Dengan meningkatnya temperatur, reduksi terjadi semakin cepat dan hasil reduksi yang diperoleh baik. Pengaruh Temperatur pada laju reduksi hematit telah diselidiki oleh El-Geassy dan Nashr [16], didapatkan hasil bahwa 80% reduksi terjadi pada temperatur 700°C sampai 1100 °C terjadi sangat cepat dan tidak memiliki perbedaan hasil yang besar. Pada temperatur yang lebih rendah, terutama pada temperatur 500°C.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Pengaruh Temperatur Tahan Terhadap Kadar Fe

Pada review jurnal ini penelitian mengenai reduksi bijih besi menggunakan variasi temperatur tahan terhadap kadar Fe total serata derajat metalisasi sponge iron yang dihasilkan. Temperatur menjadi hal yang penting untuk dikontrol karena berkaitan dengan efisiensi. Reduksi besi oksida diawali pembentukan gas reduktan CO dari reaksi C dengan CO<sub>2</sub> atau O<sub>2</sub> pada temperatur tinggi. Panas dari pembakaran akan berpindah secara konduksi dan konveksi kemudian menyebabkan reaksi gasifikasi karbon. Gas CO kemudian berdifusi melalui pori dan mengalami reaksi yang

menghasilkan gas CO<sub>2</sub>. Gas CO<sub>2</sub> tersebut kemudian mengalami pembentukan kembali gas CO dan akan mereduksi besi oksida terus menerus sehingga terbentuk Fe.

Menurut Ross [9] pada jurnalnya yang memiliki topik *Direct Reduced Iron Technology and Economics of Productions and Use*, jika dilihat dari diagram Ellingham, kenaikan temperatur proses menyebabkan reaksi reduksi bijih besi akan cenderung berjalan ke arah kanan (membentuk logam Fe) atau berjalan lebih spontan. Sehingga reaksi reduksi bijih besi akan berjalan semakin baik pada setiap kenaikan temperatur. Pernyataan diatas juga didukung oleh Murti Handayani [17], pada penelitian yang dilakukan dengan menggunakan variasi temperatur. Semakin tinggi temperatur maka semakin tinggi pula kadar Fe dan derajat metalisasi yang dihasilkan. Hal ini juga bisa dijelaskan berdasarkan gambar yang menampilkan kurva kesetimbangan Boudouard memotong kurva *wustite-iron* pada temperatur 700°C dan memotong kurva *magnetite-wustite* pada temperatur 650°C. Itu berarti secara termodinamika wustit tidak dapat direduksi pada temperatur di bawah 700°C dan magnetit tidak dapat direduksi pada temperatur di bawah 650°C, karena CO berdekomposisi menjadi CO<sub>2</sub> dan C. Pada Gambar 2 dan 3 serta Tabel 1 merupakan pemetaan variabel proses yang digunakan oleh tiap jurnal serta hasil yang didapatkan dari tiap jurnal yang digunakan.

#### B. Pengaruh Temperatur Tahan Terhadap Derajat Metalisasi

Parameter keberhasilan proses reduksi bijih besi dapat dilihat dari persentase metalisasi yang menyatakan perbandingan antara jumlah logam Fe yang sudah terpisah dari oksigen dengan Fe total yang merupakan jumlah Fe yang terkandung dalam sampel bijih besi. Temperatur memiliki peran penting untuk menentukan tekanan gas parsial CO/CO<sub>2</sub>; pada temperatur 1000 K tekanan gas parsial CO dengan CO<sub>2</sub> adalah 60,89% : 39,11%, sehingga temperatur minimal untuk berjalannya reduksi wustit adalah 727°C yang terjadi secara eksotermik. Hal ini bisa dijelaskan pada gambar yang menampilkan kurva kesetimbangan Boudouard yang memotong kurva *wustite-iron* pada temperatur 700°C dan memotong kurva *magnetite-wustite* pada temperatur 650°C. Dalam artian secara termodinamika wustit tidak dapat direduksi pada temperatur di bawah 700°C dan magnetit tidak dapat direduksi pada temperatur di bawah 650°C, karena CO berdekomposisi menjadi CO<sub>2</sub> dan C.

Pada Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan diagram kesetimbangan *Bauer-Glaessner* yang menunjukkan garis kesetimbangan yang memotong senyawa pembentukan besi. Hasil dari penelitian yang sudah dilakukan sesuai dengan teori yaitu semakin tinggi temperatur maka semakin tinggi metalisasi yang dihasilkan. Jika dilihat dari Tabel 2. pada penelitian yang dilakukan Suharto di tahun 2014, pada temperatur 900°C memiliki metalisasi paling rendah yaitu sebesar 95,87% jika dibandingkan dengan persen metalisasi pada temperatur 1200°C sebesar 97,43%. Hasil yang sama diperoleh dari penelitian Murti [17] di tahun 2018, persen metalisasi terendah berada pada variable temperatur terendah yaitu 800°C sebesar 93,42% dan persen metalisasi paling tinggi didapatkan pada temperatur 1200°C sebesar 94,66%. Penelitian yang dilakukan Suharto di tahun 2019 dan 2013

mendapatkan hasil yang sama dengan teori bahwa semakin tinggi temperatur maka semakin tinggi derajat metalisasi yang dihasilkan. Meski menggunakan temperatur yang sama pada masing – masing jurnal, hasil yang didapatkan berbeda. Dengan jumlah persen gas CO yang tidak mencukupi, maka hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) hanya tereduksi menjadi FeO. Karena itu, diperlukan temperatur yang lebih tinggi agar gas CO dapat mereduksi hematit dengan sempurna [18]. Reduksi bijih besi yang dilakukan Matsubara [19] juga menyatakan bahwa, pada temperatur di bawah  $910^\circ\text{C}$ , proses reduksi bijih oksida terdisosiasi lebih rendah dan lebih sulit untuk direduksi dibanding hematit dan magnetit oksida. Hal yang mempengaruhi adalah karakterisasi *raw material* yang berbeda. Bijih besi yang berasal dari berbagai daerah yang digunakan memiliki kandungan Fe awal yang berbeda.

Kandungan bijih besi dari berbagai daerah memiliki kadar yang berbeda. Seperti halnya bijih besi yang dipakai pada penelitian Murti Handayani dan Suharto memiliki kandungan dan kadar pengotor yang berbeda. Jelas perlakuan yang dilakukan juga harus berbeda untuk mendapatkan hasil yang optimal. Kemudian jenis reduktan, pada beberapa penelitian sudah melakukan variasi jenis reduktan yang berbeda. Hal yang mempengaruhi dari perbedaan jenis reduktan adalah kandungan *fixed carbon*. Reduktan sendiri memiliki peran sebagai penyedia karbon yang berfungsi mengikat oksigen untuk pemurnian bijih besi. Hal ini mengindikasikan bahwa kandungan jumlah *fixed carbon* pada reduktan akan membuat perolehan logam Fe pada besi spons menjadi optimal karena secara tidak langsung konsentrasi dari produk reduksi yang dihasilkan seperti CO dan  $\text{CO}_2$  akan banyak pula yang berdampak pada difusi. Kemudian ukuran partikel yang digunakan, sedikit banyak mempengaruhi proses reduksi karena antar partikel menjadi tempat terjadinya proses difusi. Persen metalisasi, yang merupakan perbandingan banyaknya logam Fe pada Fe total, dalam besi spons. Semakin meningkat temperatur maka persen bijih berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan partikel besi. Ukuran rata-rata partikel besi meningkat, dan partikel besi tumbuh seiring dengan peningkatan temperatur, waktu reduksi, atau pengecilan ukuran bijih besi [20]. Waktu tahan juga mempengaruhi dan berkaitan dengan kandungan pengotor pada bijih besi. Pada beberapa kasus rendahnya kadar Fe total yang diperoleh disebabkan rendahnya kadar Fe awal di dalam kandungan bijih besi, karena memang kadar Fe pada bijih besi yang beredar di Indonesia memiliki kandungan Fe yang relatif kecil dibandingkan dengan bijih besi yang berasal dari negara lain, sehingga peningkatan kadar sangat dipengaruhi oleh pengotornya. Dari hasil penelitian yang sudah dilakukan, semua memiliki hasil yang sama karena kenaikan temperatur berbanding lurus dengan meningkatnya kadar Fe total serta derajat metalisasi pada proses reduksi bijih besi. Proses reduksi memiliki hasil yang optimal pada temperatur  $>1000^\circ\text{C}$  dilihat dari diagram ellingham serta kesetimbangan reaksi boudouard menuju ke arah kanan akan membentuk logam Fe dan reaksi berjalan spontan.

#### IV. KESIMPULAN

Proses reduksi bijih besi dapat terjadi pada temperatur  $727^\circ\text{C}$  untuk mereduksi wustit menjadi Fe.

Pada tiap penelitian memiliki temperatur optimal yang berbeda dikarenakan perbedaan *raw material*, semua penelitian pada jurnal yang digunakan mendapatkan hasil optimal pada temperatur  $>1000^\circ\text{C}$ .

Hasil paling baik didapatkan oleh penelitian yang dilakukan Suharto pada pengolahan bijih besi lampung dengan temperatur  $1200^\circ\text{C}$  dan didapatkan persen metalisasi sebesar 97.43%.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Llewellyn and R. Hudd, *Steels: Metallurgy and Applications*. London: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] N. Selvakumar, "Particulate Processing (Powder Metallurgy)," in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2017.
- [3] J. Feinman and D. R. Mac Rae, *Direct Reduced Iron: Technology and Economics of Production and Use*. Warrendale, PA: Iron & Steel Society, 1999.
- [4] A.-H. A. El-Geassy, M. I. Nasr, A. A. Omar, and E.-S. A. Mousa, "Reduction kinetics and catastrophic swelling of  $\text{MnO}_2$ -doped  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  compacts with CO at 1073-1373 K," *ISIJ Int.*, vol. 47, no. 3, pp. 377–385, 2007, doi: 10.2355/isijinternational.47.377.
- [5] L. von Bogdandy and H.-J. Engell, *Die Reduktion der Eisenerze wissenschaftliche Grundlagen u. technische Durchföhrung mit 381 Bildern u. 54 Taf.* Berlin: Springer, 1967.
- [6] D. S. Scott and F. A. L. Dullien, "Diffusion of ideal gases in capillaries and porous solids," *AIChE J.*, vol. 8, no. 1, pp. 113–117, 1962, doi: 10.1002/aic.690080126.
- [7] C. Feilmayr, A. Thurnhofer, F. Winter, H. Mali, and J. Schenk, "Reduction behavior of hematite to magnetite under fluidized bed conditions," *ISIJ Int.*, vol. 44, no. 7, pp. 1125–1133, 2004, doi: 10.2355/isijinternational.44.1125.
- [8] P. Stratton, "Ellingham diagrams - their use and misuse," *Int. Heat Treat. Surf. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 70–73, 2013, doi: 10.1179/1749514813Z.00000000053.
- [9] H. U. Ross, "Direct Reduced Iron Technology and Economics of Productions and Use," in *Physical Chemistry*, 3rd ed., Warrendale, PA: The Iron and Steel Society of AIME, 1980, pp. 19–34.
- [10] W. K. Jozwiak, E. Kaczmarek, T. P. Maniecki, W. Ignaczak, and W. Maniukiewicz, "Reduction behavior of iron oxides in hydrogen and carbon monoxide atmospheres," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 326, no. 1, pp. 17–27, 2007, doi: 10.1016/j.apcata.2007.03.021.
- [11] R. L. Stephenson and R. M. Smailer, *Direct Reduced Iron: Technology and Economics of Production and Use*. Warrendale, PA: The Iron & Steel Society, 1980.
- [12] A. Sarangi and B. Sarangi, *Sponge Iron Production in Rotary Kiln*. New Delhi: PHI Learning, 2011.
- [13] T. Rosenqvist, *Principles of Extractive Metallurgy*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [14] D. Spreitzer and J. Schenk, "Reduction of Iron Oxides with Hydrogen—A Review," *steel Res. Int.*, vol. 90, no. 10, 2019, doi: 10.1002/srin.201900108.
- [15] M. Bahgat and M. H. Khedr, "Reduction kinetics, magnetic behavior and morphological changes during reduction of magnetite single crystal," *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 138, no. 3, pp. 251–258, 2007, doi: 10.1016/j.mseb.2007.01.029.
- [16] A. A. El-Geassy and M. I. Nasr, "Influence of the original structure on the kinetics of hydrogen reduction of hematite compacts," *Trans. Iron Steel Inst. Japan*, vol. 28, no. 8, pp. 650–658, 1988, doi: 10.2355/isijinternational1966.28.650.
- [17] M. Handayani, "Pengaruh temperatur dan jenis reduktor terhadap perolehan metalisasi hasil reduksi bijih besi," *J. Furn.*, vol. 2, no. 1, 2016.
- [18] International Standard Organization (ISO), *ISO 2597-2:2019 - Iron ores — Determination of Total iron content — Part 2: Titrimetric Methods After Titanium(III) Chloride Reduction*. International Standard Organization (ISO), 2019.
- [19] A. Matsubara, "Chemical equilibrium between iron, carbon and oxygen," in *Proceedings of the New York Meeting*, 1921, pp. 1–53.
- [20] Y. Li, Y. Han, Y. Sun, P. Gao, Y. Li, and G. Gong, "Growth behavior and size characterization of metallic iron particles in coal-based reduction of oolitic hematite-coal composite briquettes," *Minerals*, vol. 8, no. 5, p. 177, 2018, doi: 10.3390/min8050177.