



REDUKSI BIJIH BESI LAMPUNG MEMANFAATKAN REDUKTOR MODEL GAS PRODUSER

Suharto ^{a,*}, Soesaptri Oediyani^b, Syuqron Fajri Shiddiq^b, Suropto Dwi Yuwono^c
Suhartono^d

^aBalai Penelitian Teknologi Mineral - LIPI

Jalan Ir. Sutami Km. 15 Lampung Selatan, Indonesia 35361

^bTeknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Jalan Jendral Soedirman Km.3 Cilegon, Indonesia 42435

^cJurusan Kimia - FMIPA UNILA

Jalan Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung

^dJurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani

Jl. Terusan Jenderal Sudirman, Cimahi 40533

*E-mail : harto_berg@yahoo.com

Masuk Tanggal : 21-10-2018, revisi tanggal : 09-02-2019, diterima untuk diterbitkan tanggal 06-11-2019

Intisari

Model gas produser hasil gasifikasi limbah biomassa digunakan sebagai reduktor dalam proses reduksi bijih besi. Campuran gas dengan kandungan CO, H₂, CH₄, CO₂, C_nH_m dan N₂ digunakan sebagai model gas produser untuk mereduksi bijih besi Lampung, yang kandungan mineral primernya berupa hematit. Bijih besi ini dipreparasi hingga ukuran -6+3 mm dan -12+10 mm, kemudian direduksi dalam *vertical tube furnace* dengan variasi temperatur 800, 900 dan 1000 °C, dan waktu reduksi 45, 60 dan 75 menit. Persentase Fe dan metalisasi diamati pada berbagai temperatur, waktu reduksi dan ukuran bijih besi tersebut. Reduksi bijih besi dengan ukuran -6+3 mm pada temperatur 1000 °C selama 75 menit menghasilkan persentase Fe dan metalisasi tertinggi, masing-masing sebesar 67,36% dan 84,25%. Analisa menggunakan *software Image-J* menunjukkan bijih besi dengan ukuran -6+3 mm memiliki jumlah porositas (39,48%) lebih banyak dibanding porositas bijih besi ukuran -12 +10 mm. Hasil analisa XRD menampilkan bahwa kandungan logam Fe paling banyak (puncak tertinggi) diperoleh dari bijih besi ukuran -6+3 mm pada temperatur dan waktu reduksi 1000 °C dan 75 menit. Gas produser hasil gasifikasi diharapkan dapat digunakan secara nyata sebagai reduktor bijih besi dalam upaya mensubstitusi batubara dan gas alam.

Kata Kunci: Bijih besi, gas produser, gasifikasi, persentase metalisasi, reduktor

Abstract

The producer gas model from the biomass waste gasification was utilized as reduction in the iron ore reduction process. A mixture of gases containing CO, H₂, CH₄, CO₂, C_nH_m, and N₂ was used as a producer gas model for reducing the Lampung iron ore, which hematite as the primary mineral content. Iron ore is prepared up to sizes -6+3 mm and -12+10 mm, and then to be reduced in the vertical tube furnace at a temperature variation of 800, 900 and 1000 °C, and a reduction time of 45, 60 and 75 minutes, respectively. The percentage of Fe and metallization were observed at various temperatures, reduction times, and the size of the iron ore. The reduction of iron ore of a size of -6+3 mm at a temperature of 1000 °C during 75 minutes yielded the highest percentage of Fe and metallization of 67.36% and 84.25%, respectively. Image-J analysis depicted than iron ore of a size of -6+3 mm had a greater amount of porosity (39.48%) than the porosity of the size of the iron ore size -12+10 mm. The XRD analysis results show that the highest content of Fe metal (highest peak) was obtained from samples of -6+3 mm at temperatures and reduction times of 1000 °C and 75 minutes, respectively. Producer gas from gasification is expected to be employed as an iron ore reduction actually in an effort to substitute coal and natural gas.

Keywords: Gas producer, gasification, iron ore, percent metallization, reductor

1. PENDAHULUAN

Gas CO dan H₂ hasil *cracking* atau reformasi dari gas alam dan batubara (*sub-bituminous coal*) umumnya digunakan sebagai reduktor pada proses reduksi bijih besi. Ketersediaan sumber daya jenis batu bara kadar karbon rendah dengan nilai kalori tidak lebih dari 5.100 kalori per kilogram di Indonesia sampai pada tahun 2014 adalah sebanyak 32.365,39 juta ton, dengan cadangan sebesar 9.193,20 juta ton [1]. Batubara dan gas alam ini merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui, ketersediaannya terbatas dan akan habis sewaktu-waktu. Ketersediaan limbah biomassa hasil pertanian dan kehutanan yang melimpah sangat potensial untuk menggantikan batu bara dan gas alam tersebut. Limbah biomassa ini dapat dikonversi menjadi gas produser. Gas produser dapat diperoleh dari sumber energi biomassa yang berasal dari tanaman sisa pengolahan atau limbah hasil pertanian melalui proses gasifikasi [2]. Teknologi gasifikasi dikenal sebagai salah satu teknologi konversi termal dengan memanfaatkan reaksi kimia antara biomassa dan *gasiyng agent* (udara) pada temperatur tinggi [3]. Gas produser dengan komposisi utama CO dan H₂ hasil gasifikasi limbah biomassa ini dapat digunakan sebagai reduktor untuk mereduksi bijih besi. Komposisi gas produser hasil gasifikasi biomassa janggel jagung pada umumnya berada pada kisaran 25% CO, 20% H₂, 2% CH₄, 10% CO₂ dan sisanya N₂ dengan panas pembakaran 3500 – 5000 kJ/m³ [4].

Susanto, dkk. [5]-[6] melaporkan 3-4 kg limbah biomassa (janggel jagung) sebagai bahan baku proses gasifikasi dapat menghasilkan ±1,6 Nm³ gas produser. Gas produser dengan komposisi pada kisaran tersebut di atas hasil gasifikasi 4–8 kg janggel jagung akan setara dengan 1 Liter BBM. Selain dapat digunakan sebagai reduktor, gas produser ini dapat digunakan sebagai bahan bakar langsung untuk memproduksi listrik.

Bijih besi Lampung yang tergolong dalam bijih besi primer dengan kandungan mineral utama berupa hematit (Fe₂O₃) dipilih untuk proses reduksi bijih besi pada penelitian ini. Model gas produser berupa campuran gas dengan kandungan CO, H₂, CH₄, CO₂, C_nH_m dan N₂ digunakan sebagai reduktornya. Proses reduksi bijih besi dilakukan menggunakan *vertical tube furnace*, dengan variable proses temperatur reduksi, waktu tahan reduksi dan ukuran bijih besi. Persentase Fe dan metalisasi merupakan indikator kualitas proses reduksi bijih besi yang

dihasilkan. Kajian penelitian ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan terkait penggunaan gas produser nyata hasil gasifikasi limbah biomassa sebagai reduktor proses reduksi bijih besi. Penggunaan gas produser ini merupakan upaya dalam mensubstitusi batubara dan gas alam.

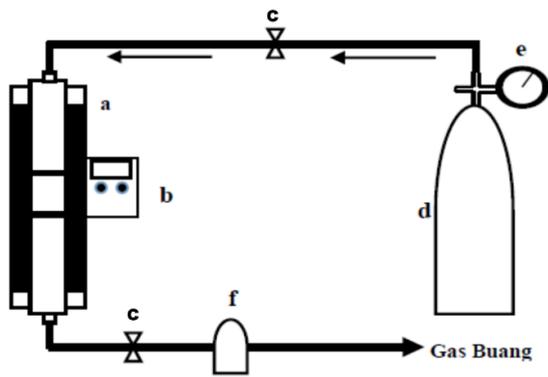
2. PROSEDUR PERCOBAAN

Sampel penelitian adalah bijih besi Lampung dengan kandungan mineral utamanya berupa hematit (Fe₂O₃). Bijih besi Lampung direduksi dalam *vertical tube furnace* menggunakan model gas produser sebagai reduktor yang dipesan dari PT. Aneka Gas Industri Tbk. Komposisi model gas produser ini disesuaikan dengan komposisi gas produser hasil gasifikasi janggel jagung; 25,51% CO, 20,03% H₂ dan 54,46% N₂. Model gas produser dalam tabung dengan tinggi 150 cm dan diameter 25 cm bertekanan awal 160 bar diumpakan ke dalam *vertical tube furnace* dengan temperatur ±1100 °C. Bahan baku, *vertical tube furnace* dan produk berupa besi spons disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. (a) *Vertical tube furnace*, (b) Gas produser, (c) Bijih besi, (d) Besi spons

Bongkahan bijih besi Lampung terlebih dahulu dihancurkan dengan menggunakan palu untuk memperoleh bongkahan dengan ukuran lebih kecil. Setelah diperoleh bongkahan dengan ukuran lebih kecil, bijih besi di-*screening* untuk memperoleh bijih besi dengan ukuran -6+3 mm (kode sampel C31) dan -12+10 mm (kode sampel A12). Percobaan dilanjutkan dengan proses reduksi bijih besi menggunakan reduktor model gas produser dalam sebuah tungku yang dinamakan *vertical tube furnace*.



Gambar 2. Instalasi *vertical tube furnace*

Keterangan:

- a. *vertical tube furnace*, b. *thermocontroller*,
 c. *needle valve*, d. tabung gas produser, e. regulator,
 f. CuCl dalam larutan HCl

Proses reduksi bijih besi dilakukan dengan variasi ukuran (-6+3 dan -12+10 mm), variasi temperatur (800, 900 dan 1000 °C) dan variasi waktu reduksi (45, 60 dan 75 menit). Setelah dilakukan reduksi bijih besi, besi spons yang dihasilkan dianalisa untuk mengetahui kadar Fe metal dengan standar uji ISO 16878:2016 (E), sedangkan kadar Fe totalnya dianalisa atas dasar standar uji ISO 2597-2:2008(E) [7]-[8], sehingga dapat dihitung persentase metalisasinya. Jumlah porositas pada masing-masing variasi ukuran bijih besi dilakukan melalui pengamatan menggunakan mikroskop optik. Hasil karakterisasi XRF (*x-ray fluorescence*) yang dilakukan di Laboratorium MIPA terpadu, Universitas Sebelas Maret terhadap bijih besi Lampung, disajikan pada Tabel 1. Sedangkan skema instalasi *vertical tube furnace* dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 1. Komposisi kimia bijih besi Lampung

Senyawa	Kadar %
Fe ₂ O ₃	86,42
SiO ₂	10,28
Al ₂ O ₃	1,00
P ₂ O ₅	0,41
K ₂ O	0,33
Nd ₂ O ₃	0,28
SO ₃	0,27
MnO	0,26

Catatan: Senyawa dengan kadar di bawah 0,20% tidak ditampilkan dalam tabel yang memiliki jumlah sebanyak 0,75%.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Perolehan Metalisasi

Keberhasilan proses reduksi bijih besi ini dinyatakan sebagai banyaknya oksigen yang

bereaksi/tersingkirkan oleh reduktor pada saat proses reduksi. Persen reduksi dan persen metalisasi digunakan untuk melihat kualitas reduksi besi spons. Persentase perolehan metalisasi besi spons reduksi bijih besi Lampung dengan menggunakan reduktor gas produser pada berbagai temperatur, waktu reduksi dan ukuran bijih besi, disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 3. Secara umum, perolehan metalisasi besi spons untuk berbagai sampel (kode) bijih besi meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur reduksi dan waktu reaksi untuk ukuran bijih yang mengecil. Pada Tabel 2 nampak, bahwa dengan semakin tinggi suhu proses yang digunakan untuk reduksi bijih besi maka derajat metalisasi juga semakin lebih besar. Perubahan oksida besi (Fe₂O₃) menjadi logam besi dapat terjadi melalui magnetit (Fe₃O₄) maupun wustit (FeO). Keduanya dapat direduksi oleh CO. Seiring dengan tingginya temperatur semakin tinggi tekanan gas CO, perubahan oksida besi menjadi logam semakin banyak jumlahnya. Pada Tabel 2 terlihat, persen metalisasi meningkat seiring meningkatnya waktu dan temperatur reduksi. Pada temperatur 1000 °C, magnetit dapat tereduksi menjadi wustit dengan baik dibandingkan pada temperatur 900 dan 800 °C, karena ketersediaan panas yang cukup untuk mereduksi magnetit (Fe₃O₄) menjadi wustit (FeO), yang berlangsung secara endotermik dengan kebutuhan persen gas CO lebih kecil. Secara termodinamika, pada temperatur 900 °C dan 800 °C diperlukan persen gas CO yang lebih tinggi untuk mereduksi magnetit menjadi wustit, dibanding pada temperatur 1000 °C. Dengan jumlah persen gas CO yang tidak mencukupi, maka hematit (Fe₂O₃) hanya tereduksi menjadi FeO. Karena itu, diperlukan temperatur yang lebih tinggi agar gas CO dapat mereduksi hematit dengan sempurna. Reduksi bijih besi yang dilakukan Matsubara dan Rigakushi [7] juga menyatakan bahwa, pada temperatur di bawah 910 °C, proses reduksi bijih oksida terdisosiasi lebih rendah dan lebih sulit untuk direduksi dibanding hematit dan magnetit oksida.

Meningkatnya temperatur menyebabkan reaksi reduksi bijih besi akan cenderung berjalan lebih spontan ke arah kanan (membentuk produk [logam Fe]). Sehingga reaksi reduksi bijih besi akan berjalan semakin baik pada setiap kenaikan temperatur. Sedikit perbedaan perolehan metalisasi disebabkan ukuran partikel bijih besi. Persentase reduksi akan menuju konstan, sebagai akibat perubahan gas CO menjadi CO₂, sebagaimana terlihat

pada Gambar 3. Secara teoritis, hal ini juga selaras dengan reaksi kesetimbangan disosiasi besi oksida; (1) $\text{FeO} \leftrightarrow \text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2$, dan (2) $\text{CO} \leftrightarrow \text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ (Boudouard). Jika temperatur reduksi diturunkan, reaksi penguraian gas akan bergeser dari gas CO menjadi CO_2 , yang menyebabkan jumlah reduktor akan tidak mencukupi [9]-[11].

Tabel 2. Perolehan metalisasi besi spons reduksi bijih besi Lampung dengan reduktor model gas produser

Ukuran (mm)	Suhu (°C)	Waktu Reduksi (menit)	Kode	Fe Metal (%)	Fe Total (%)	Metalisasi (%)
-6+3	800	45	A11	36,30	67,18	54,03
		60	A21	45,84	72,21	63,48
		75	A31	45,66	73,54	62,09
900	45	B11	32,60	65,21	49,99	
	60	B21	46,93	74,31	63,15	
	75	B31	55,82	74,31	75,12	
1000	45	C11	50,93	79,14	64,35	
	60	C21	61,29	77,33	79,26	
	75	C31	67,36	79,95	84,25	
800	45	A12	26,53	67,33	39,40	
	60	A22	33,27	70,33	47,31	
	75	A32	36,59	72,83	50,24	
-12+10	900	45	B12	36,37	71,31	51,00
		60	B22	43,37	74,31	58,36
		75	B32	45,35	78,41	57,84
1000	45	C12	39,61	72,21	54,85	
	60	C22	46,35	75,34	61,52	
	75	C32	45,61	72,14	63,22	

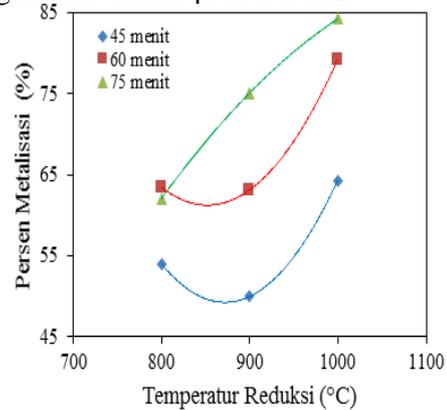
Pada suhu rendah ($T < 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) dengan jumlah persen gas CO yang tidak mencukupi maka hematit (Fe_2O_3) tidak dapat tereduksi secara sempurna menjadi logam Fe melainkan hanya sampai FeO. Diperlukan temperatur yang lebih tinggi agar konsentrasi gas CO dapat mereduksi hematit dengan sempurna. Secara teoritis, hematit tidak dapat direduksi pada temperatur di bawah $580 \text{ }^\circ\text{C}$ dan magnetit tidak dapat direduksi pada temperatur di bawah $670 \text{ }^\circ\text{C}$, karena CO terdekomposisi menjadi CO_2 dan C sesuai dengan diagram reaksi kesetimbangan CO/ CO_2 [9]-[10].

Hasil pengamatan pada setiap percobaan berbagai sampel menunjukkan bahwa, reaksi maksimum terjadi pada temperatur $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Pada Tabel 2, untuk fraksi ukuran -6+3 untuk waktu tahan 75 menit dengan temperatur proses sebesar $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, persen metalisasi dapat mencapai 84,25%. Pada temperatur ini, FeO dapat tereduksi maksimum menjadi logam Fe dan masih terdapat senyawa besi oksida yang belum tereduksi. Penggunaan model gas produser sebagai reduktor memerlukan tahapan kesetimbangan, pada saat gas CO belum stabil dan kesetimbangan antara gas CO- CO_2 berada pada daerah wustit, maka untuk mendapatkan Fe metal akan menjadi sulit. Waktu reduksi semakin lama menyebabkan persen metalisasi

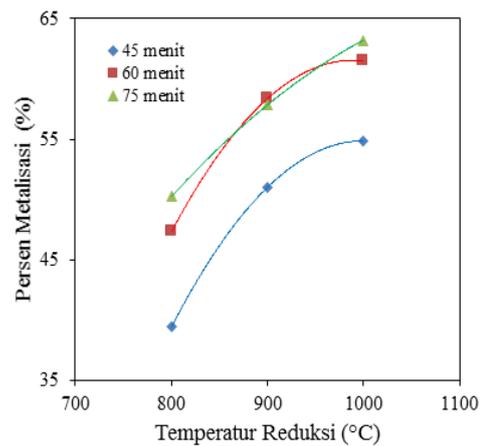
meningkat, mengindikasikan proses wustit menjadi Fe metal berlangsung lebih baik.

3.2. Pengaruh Variasi Temperatur terhadap Persentase Metalisasi Besi Spons

Persentase metalisasi tertinggi dari reduksi bijih besi berukuran -6+3 mm, pada temperatur reduksi $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan lama waktu proses reduksi 75 menit sebesar 84,25% (Gambar 3). Sedangkan persentase metalisasi terendah diperoleh pada kondisi temperatur $900 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan lama waktu proses reduksi 45 menit, sebesar 49,99%. Reduksi bijih besi berukuran -12+10 mm, persentase metalisasi tertinggi diperoleh pada kondisi temperatur reduksi $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan lama waktu proses reduksi 75 menit, sebesar 63,22%, sedangkan persentase metalisasi terendah diperoleh pada kondisi temperatur $800 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan lama waktu proses reduksi 45 menit, yaitu sebesar 39,40%, sebagaimana terlihat pada Tabel 2.



(a)



(b)

Gambar 3. Pengaruh variasi temperatur terhadap persentase metalisasi untuk ukuran lump ore; (a) -6+3 mm dan (b) -12+10 mm

Merujuk pada Gambar 3, persen metalisasi, yang merupakan perbandingan banyaknya logam Fe pada Fe total, dalam besi spons. Semakin meningkat temperatur maka persen

metalisisasi akan naik dan menuju konstan (cenderung turun) setelah temperatur 1000 °C, hal ini dapat dimungkinkan karena gas reduktor (CO) yang dibutuhkan untuk reaksi reduksi bijih tidak mencukupi. Pada saat eksperimen, kekurangan gas CO dapat terjadi karena laju aliran gas produser mengecil, seiring dengan berkurangnya tekanan gas dalam tabung model gas produser. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa bijih besi hematit Lampung tereduksi optimal pada temperatur 1000 °C (persen metalisisasi 84,25% dengan lama waktu proses reduksi 75 menit) dibandingkan pada temperatur 800 dan 900 °C. Sebagai hasil pembandingan Li, dkk. [12] melaporkan bahwa, peningkatan temperatur reduksi 1473 K (1200 °C) dengan waktu 50 menit, hanya memberikan tingkat metalisisasi sebesar 85,47%.

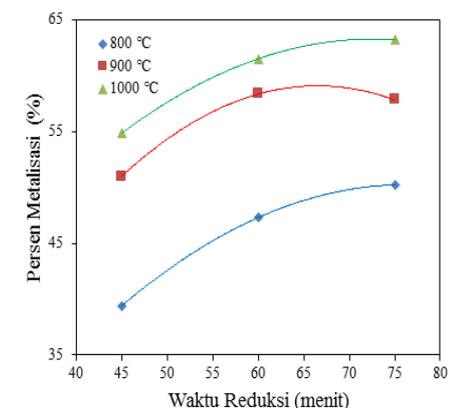
3.3. Pengaruh Variasi Waktu terhadap Persentase Metalisisasi Besi Spons

Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan pola kenaikan kurva persen metalisisasi terhadap waktu tahan untuk bijih besi ukuran -6+3 mm dan -12+10 mm. Semakin lama proses reduksi dilakukan maka persentase metalisisasi yang dihasilkan juga semakin tinggi. Namun demikian, pada gambar nampak kecenderungan penurunan persen metalisisasi pada waktu yang lebih lama dari 75 menit, hal ini dimungkinkan karena terbentuknya lapisan padat besi-metal pada permukaan besi oksida. Pada waktu tahan yang lebih lama ion Fe²⁺ mengalami difusi pada reaksi perubahan wustit menjadi besi metal yang pada akhirnya mengendap sebagai Fe (metal) pada permukaan besi oksida. Lapisan padat besi-metal ini akan menghambat difusi gas CO, sehingga proses reduksi akan menjadi semakin sulit. Penurunan konsentrasi gas CO pada kesetimbangan gas CO-CO₂ mengakibatkan konsentrasi reaksi produk CO₂ menjadi semakin banyak pada permukaan.

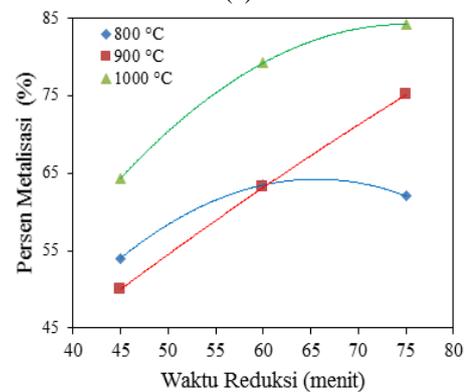
Bijih besi yang berukuran -12+10 mm, persentase metalisisasi tertinggi diperoleh pada lama waktu proses reduksi 75 menit dengan temperatur reduksi 1000 °C, yaitu sebesar 63,22%, sedangkan persentase metalisisasi terendah diperoleh pada lama waktu proses reduksi 45 menit dengan temperatur reduksi 800 °C, yaitu sebesar 39,40%. Hal ini menunjukkan bahwa pada waktu 75 menit reduksi berlangsung lebih optimal dibandingkan pada waktu reduksi 45 dan 60 menit, karena panas yang terserap dan reduksi besi oksida menjadi besi metal lebih maksimal. Temperatur reduksi, waktu reduksi, dan ukuran

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 [12].

Pada proses reduksi menggunakan gas CO atau H₂, diperlukan penahanan waktu, untuk memberikan kesempatan gas-gas tersebut berdifusi terlebih dahulu sampai ke bagian inti bijih besi, agar proses reduksi berjalan dengan sempurna. Konsentrasi CO dan H₂ semakin besar maka proses reduksi terhadap biji besi lebih cepat dicapai, melalui reaksi kimia (1) Fe₂O₃ + 3CO → 2Fe + 3CO₂ dan (2) Fe₂O₃ + 3H₂ → 2Fe + 3H₂O.



(a)



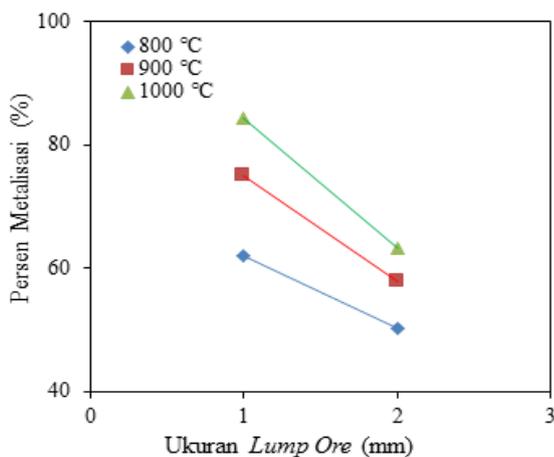
(b)

Gambar 4. Pengaruh variasi waktu terhadap persentase metalisisasi untuk ukuran bijih besi Lampung; (a) -6+3 mm dan (b) -12+10 mm

Namun demikian, konsentrasi produk reaksi CO₂ akan semakin banyak pada permukaan bijih besi dan dapat menghambat difusi gas CO dan H₂, sehingga proses reduksi akan menjadi semakin sulit [13]. Karena itu, laju alir dan konsentrasi CO dan H₂ dalam gas produser sangat berpengaruh pada proses reduksi biji besi ini.

Pada penelitian ini, bertambahnya waktu reduksi sampai batas waktu tertentu akan meningkatkan persentase metalisisasi menuju

konstan. Dari hasil analisa metalisasi, logam Fe yang terbentuk semakin bertambah seiring bertambahnya waktu tinggal pada saat proses reduksi. Peningkatan ini terjadi, karena besi oksida telah tereduksi oleh gas CO dan H₂. Semakin lama waktu tinggal, semakin banyak pula logam Fe yang terbentuk. Namun demikian, terlalu lamanya waktu tahan untuk proses reduksi juga tidak selalu menghasilkan hasil yang bagus. Karena, waktu tahan yang terlalu lama akan menyebabkan penurunan persen metalisasi, diantaranya disebabkan oleh terbentuknya lapisan padat besi-metal pada permukaan besi oksida. Pada waktu tahan yang lebih lama ion Fe²⁺ mengalami difusi pada reaksi perubahan wustit menjadi besi metal. Fe (metal) ini mengendap pada permukaan besi oksida [12].



Gambar 5. Pengaruh variasi ukuran bijih besi Lampung terhadap persentase metalisasi

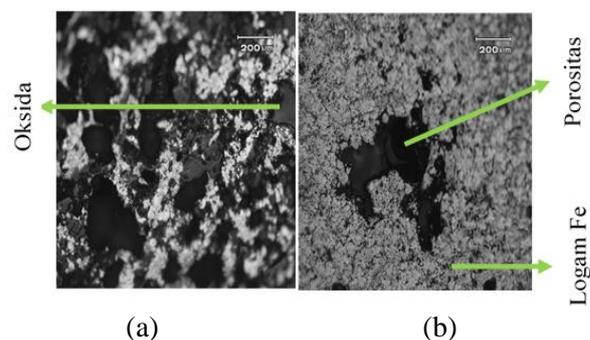
3.4. Pengaruh Variasi Ukuran Bijih Besi terhadap Persentase Metalisasi Besi Spons

Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin besar ukuran bijih besi yang digunakan untuk proses reduksi maka persentase metalisasi yang dihasilkan semakin rendah. Persentase metalisasi tertinggi diperoleh pada bijih besi berukuran -6+3 mm dengan temperatur reduksi 1000 °C, yaitu sebesar 84,25%, sedangkan persentase metalisasi terendah diperoleh pada bijih besi berukuran -12+10 mm dengan temperatur reduksi 800 °C, sebesar 50,24%. Hal ini mengindikasikan bahwa bijih besi dengan ukuran -6+3 mm, reduksi berlangsung lebih optimal dibandingkan bijih besi dengan ukuran -12+10 mm. Bijih besi dengan ukuran yang lebih kecil memiliki lebih banyak porositas dibandingkan dengan bijih besi berukuran lebih besar. 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 [14].

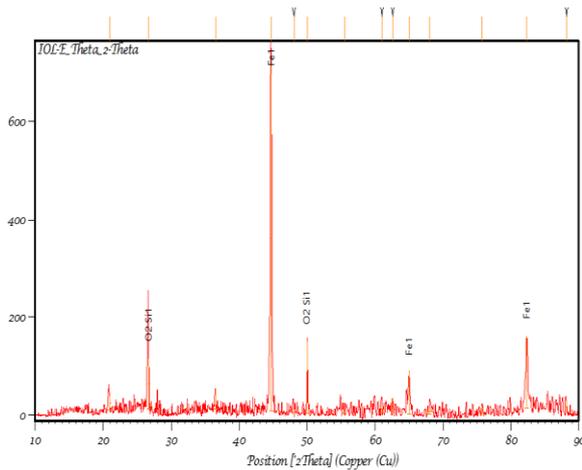
Gambar 6 memberi gambaran, bahwa porositas pada bijih besi ukuran -6+3 mm lebih banyak dibandingkan pada bijih besi ukuran -12+10 mm. Jumlah porositas pada bijih besi ukuran -6+3 mm sebanyak 39,48%, sedangkan jumlah porositas pada bijih besi ukuran -12+10 mm sebanyak 15,27%. Karena itu, berdasarkan hasil pengamatan porositas menggunakan *software Image-J* ini, ukuran bijih yang lebih optimal untuk dilakukan proses reduksi adalah bijih besi dengan ukuran -6+3 mm [10].

Besi spons dengan ukuran -6+3 mm direduksi pada temperatur 1000 °C dalam waktu 75 menit memberikan hasil terbaik pada penelitian ini dengan persentase metalisasi sebesar 84,25%. Hasil analisa XRD dari bijih besi dengan ukuran -6+3 mm dapat dilihat pada Gambar 7. Terlihat bahwa *puncak* tertinggi dan dominan yang terdapat pada grafik analisa XRD adalah unsur Fe [15].



Gambar 6. Porositas pada bijih besi Lampung ukuran; (a) -6+3 mm, dan (b) -12+10 mm

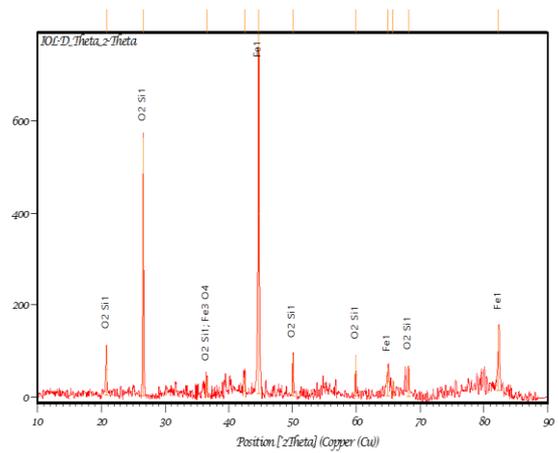
Hasil ini menunjukkan bahwa proses reduksi berlangsung dengan optimal, karena mineral besi oksida seperti hematit, magnetit dan wustit tidak terdeteksi. Selain itu, dari penelitian diperoleh pula besi spons dengan hasil terkecil yang terdapat pada bijih besi dengan ukuran awal -12+10 mm. Besi spons dengan ukuran awal -12+10 mm direduksi pada temperatur 800 °C dalam waktu 45 menit. Adapun persentase metalisasi yang diperoleh adalah sebesar 39,40%. Hasil analisa XRD dari bijih besi dengan ukuran awal -12+10 mm dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Hasil Analisa XRD bijih besi dengan ukuran -6+3 mm

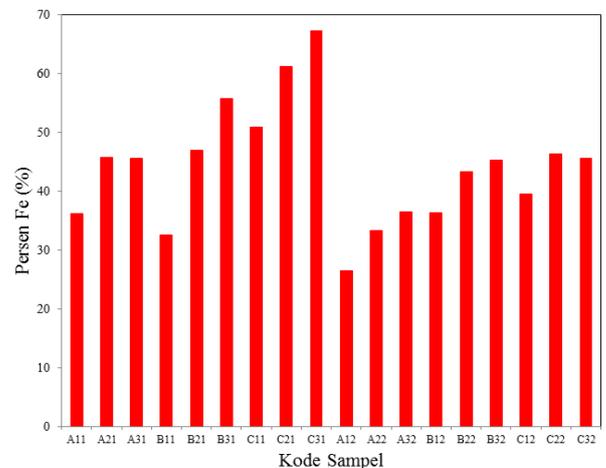
Pada Gambar 8 terlihat bahwa puncak tertinggi dan dominan yang terdapat pada grafik analisa XRD adalah unsur Fe [15]. Namun masih terdapat puncak mineral magnetit yang mengindikasikan proses reduksi bijih besi belum berlangsung optimal.

Atas dasar penelitian ini, diketahui bahwa variasi temperatur, waktu reduksi dan ukuran bijih besi mempengaruhi besarnya persentase Fe yang dihasilkan dalam besi spons. Besarnya persentase Fe pada tiap sampel bisa disajikan pada Gambar 9. Pada Gambar 9 nampak bahwa sampel dengan persentase Fe terbaik sebesar 67,36% Fe terdapat pada bijih besi dengan ukuran -6+3 mm. Bijih besi dengan ukuran -6+3 mm merupakan sampel besi spons yang mengalami reduksi pada kondisi temperatur 1000 °C, waktu tahan reduksi selama 75 menit. Sedangkan persentase Fe terkecil terdapat pada bijih besi dengan ukuran awal sebesar -12+10 mm dengan nilai sebesar 26,53% Fe. Bijih besi ini merupakan besi spons yang mengalami reduksi pada kondisi temperatur 800 °C, waktu tahan reduksi selama 45 menit. Gambar 9 juga bahwa sampel dengan persentase Fe terbaik sebesar 67,36% Fe terdapat bijih besi dengan ukuran awal -6+3 mm. Bijih besi dengan ukuran ini merupakan besi spons yang mengalami reduksi pada kondisi temperatur 1000 °C, waktu tahan reduksi selama 75 menit. Sedangkan persentase Fe terkecil terdapat pada bijih besi dengan ukuran awal -12+10 mm dengan nilai sebesar 26,53% Fe. Bijih besi dengan ukuran awal -12+10 mm mengalami reduksi pada kondisi temperatur 800 °C, waktu tahan reduksi selama 45 menit.



Gambar 8. Hasil analisa XRD bijih besi dengan ukuran awal -12+10 mm

Merujuk pada Peraturan Menteri ESDM No.1 Tahun 2014 tentang peningkatan nilai tambah mineral melalui kegiatan pengolahan dan pemurnian mineral di dalam negeri dapat diketahui bahwa batas minimal pengolahan konsentrat bijih besi baik berupa hematit, magnetit ataupun pirit menjadi besi spons adalah sebesar 75% Fe [16]-[17]. Dari hasil penelitian diperoleh satu sampel yang hampir memenuhi syarat tersebut, yaitu pada sampel C31 dengan besar persentase Fe 67,36% Fe.



Gambar 9. Persentase Fe pada bijih besi ukuran; -6+3 mm (sampel C31) dan -12+10 mm (sampel A12)

Hal ini menunjukkan bahwa model gas produser dengan komposisi 25,51% CO, 20,03% H₂ dan 54,46% N₂ layak dipakai sebagai reduktor untuk mereduksi bijih besi Lampung. Hasil ini memberikan informasi, bahwa gas produser nyata hasil gasifikasi biomassa dapat digunakan sebagai reduktor untuk mereduksi bijih besi. Namun demikian, agar hasil reduksi lebih maksimal, masih perlu dilakukan kajian modifikasi ukuran bijih besi menjadi *pellet*.

4. KESIMPULAN

Persentase metalisasi tertinggi dicapai pada kondisi waktu tinggal reduksi selama 75 menit pada temperatur 1000 °C dengan bijih besi ukuran -6+3 mm dan -12+10 mm, masing-masing sebesar 84,25% dan 63,22%, Persentase Fe tertinggi dicapai pada kondisi waktu tinggal reduksi selama 75 menit pada temperatur 1000 °C dengan bijih besi ukuran -6+3 mm sebesar 67,36%. Sedangkan persentase Fe yang direduksi selama 60 menit pada temperatur 1000 °C dengan bijih besi ukuran -12+10 mm sebesar 46,35%.

Penggunaan model gas produser sebagai reduktor bijih bijih besi dapat memberikan hasil yang hampir memenuhi syarat minimal konsentrasi pemurnian mineral bijih besi. Dengan demikian, gas produser nyata hasil gasifikasi limbah biomassa yang direpresentasikan dengan model gas produser tersebut, terbukti dapat mereduksi bijih besi dengan baik. Penggunaan batu bara dan gas alam sebagai reduktor untuk mereduksi bijih besi dapat disubstitusi dengan gas produser tersebut.

Penelitian lanjut akan diarahkan pada kajian kinetika reduksi bijih besi Lampung menggunakan reduktor gas produser (berbagai komposisi CO dan H₂) nyata hasil gasifikasi limbah biomassa. Gambaran mekanisme dan parameter laju reaksi selama proses reduksi bijih besi berlangsung, diharapkan dapat dicapai pada penelitian ini. Selain itu, untuk memaksimalkan keberhasilan proses reduksi bijih besi akan digunakan bijih besi yang telah berbentuk pelet dengan temperatur reduksi di atas 1000 °C.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih sebesar-besarnya kepada Balai Penelitian Teknologi Mineral-LIPI yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian ini melalui kegiatan Insentif SINAS Kemenristek RI tahun 2013.

DAFTAR PUSTAKA

[1] J. Mulyono, "Prospek dan tantangan batu bara Indonesia," Seminar Himpunan Mahasiswa Teknik Pertambangan (HMTT), Universitas Trisakti, Jakarta, pp. 1-11, 2015.

[2] B. Kretschmer, A. Buckwell, C. Smith, E. Watkins dan B. Allen, "Recycling Agricultural, Forestry and Food Wastes and Residues for Sustainable Bioenergy and Biomaterials, Brussels: Science and

Technology Options Assessment", pp. 42-58, 2013.

- [3] E. Madadian, M. Lefsrud, C. A. P. Lee dan Y. Roy, "Green energy production: The potential of using biomass gasification," *Journal of Green Engineering*, vol. 4, pp. 101-116, 2014.
- [4] Suhartono, B. D. Prasetyo dan I. N. Azizah, "Synthetic gas (syngas) production in downdraft gasifier and its application as fuel using conventional domestic (LPG) stove," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 8, pp. 5238-5243, 2016.
- [5] H. Susanto, T. Suria dan S. H. Pranolo, "Economic Analysis of Biomass Gasification for Generating Electricity in Rural Areas in Indonesia," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 334, pp. 012012, 2018. Doi :10.1088/1757-899X/334/1/012012.
- [6] Waluyanto, Suharyati, S. H. Pambudi, J. L. Wibowo, dan N. I. Pratiwi, "Outlook energi Indonesia 2018," Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, ISSN 2527-3000 Jakarta, pp. 39-72, 2018.
- [7] ISO 2597-2, Titrimetric Methods After Titanium (III) Chloride Reduction, Switzerland: ISO 2008, 2018.
- [8] ISO 16878, Iron Ore-Determination of Metallic Iron Content- Iron (III) Chloride Tittimetric Methode, Switzerland: ISO 16878, 2016.
- [9] Matsubara dan Rigakushi, "Chemical equilibrium between iron, carbon and oxygen," *Proceedings of the New York Meeting*, pp. 1-53, 1921.
- [10] R. Béchara, H. Hamadeh, O. Mirgoux dan F. Patisson, "Optimization of the iron ore direct reduction process through multiscale process modeling," *Materials*, vol. 11, no. 1094, pp. 2-18, 2018.
- [11] T. Lindstad, M. Syvertsen, R.J. Ishak, H.B. Arntzen dan P.O. Grøntvedt, "The influence of alkalis on the boudouard reaction," *Tenth International Ferrous Congress; INFACON X: Transformation through Technology*, pp. 261-271, 2004.
- [12] Y. Li, Y. Han, Y. Sun, P. Gao, Y. Li dan G. Gong, "Growth behavior and size characterization of metallic iron particles in coal-based reduction of oolitic hematite-coal composite briquettes," *Material*, vol. 8, no. 177, pp. 1-14, 2018.
- [13] H. Chena, Z. Zhenga dan W. Ship, "Investigation on the kinetics of iron ore fines reduction by CO in a micro-fluidized

- bed,” *Procedia Engineering*, vol. 102, pp. 1726 – 1735, 2015.
- [14] D. S. Scott dan F. A. L. Dullien, “Diffusion of ideal gases in capillaries and porous solids,” *A.I.Ch.E.*, vol. 8, no. 1, pp. 113-117, 1962.
- [15] M. Krispin, A. Ullrich dan S. Horn, “Crystal structure of iron-oxide nanoparticles synthesized from ferritin,” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 14, no. 2, pp. 1-10, 2012.
- [16] E. Herianto, "Nilai tambah bijih besi Indonesia," *Prosiding Seminar Material Metalurgi*, pp. 35-42, 2013.
- [17] Suharto, Y. Supriyatna dan M. Amin, "Peleburan sponge iron pada tungku kupola menjadi hot metal," *Prosiding Seminar Nasional Insentif Riset SINas*, pp. 25-29, 2013.

