



PEMANFAATAN LIMBAH INDUSTRI BAJA SEBAGAI BAHAN BAKU PEMBUATAN LOGAM PIG IRON: PELEBURAN *MILL SCALE* MENGUNAKAN *SUBMERGED ARC FURNACE*

Fajar Nurjaman^{a,*}, Nurbaity Marsas Prilitasari^a, Arif Eko Prasetyo^b, Eko Nugroho^b

^aBalai Penelitian Teknologi Mineral - LIPI

Jl. Ir. Sutami Km. 15, Tanjung Bintang, Lampung Selatan, Indonesia 35361

^bUniversitas Muhammadiyah Metro

Iringmulyo, Metro Timur, Lampung, Indonesia 34381

*E-mail:

Masuk Tanggal :23-03-2019 , revisi tanggal:25-06-2019, diterima untuk diterbitkan tanggal : 28-06-2019

Intisari

Mill scale merupakan limbah/produk samping dari industri baja yang mengandung senyawa besi oksida *hematite* (Fe_2O_3), *magnetite* (Fe_3O_4) dan *wustite* (FeO). Telah dilakukan proses peleburan *mill scale* menjadi logam *pig iron* sebagai bahan baku sekunder untuk pembuatan material baja. Sebanyak 30 kg *mill scale* digerus hingga berukuran -40 mesh, kemudian dilakukan proses pencampuran dengan menambahkan batu bara (reduktor internal) sebanyak 0-6 kg dan *bentonite* (perekat) sebanyak 2% berat (0,6 kg) untuk selanjutnya dilakukan proses aglomerasi menggunakan mesin briket. Sebanyak 30 kg briket komposit *mill scale* dilebur bersama dengan kokas (reduktor eksternal) sebanyak 7-8 kg dan batu kapur (material fluks) sebanyak 0-4,5 kg menggunakan *submerged arc furnace*. Proses peleburan berlangsung selama 45 menit dan temperatur penuangan logam cair 1450-1500 °C. Pengaruh penambahan batu bara dalam briket komposit, jumlah kokas dan batu kapur dalam proses peleburan *mill scale* telah dipelajari. Dari proses peleburan *mill scale* diperoleh kondisi optimum, yaitu konsumsi energi spesifik sebesar 3,64 kWh/kg-produk, dengan menggunakan briket komposit *mill scale* dengan penambahan 0% batu bara dan penambahan batu kapur sebanyak 3 kg (10% berat) serta kokas sebanyak 7 kg (stoikiometri). Basisitas optimum pada proses peleburan *mill scale* adalah 1,0. Produk logam *pig iron* hasil peleburan *mill scale* dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai bahan baku pembuatan material besi tuang kelabu, putih dan mampunya tempa.

Kata Kunci: *Mill scale*, besi kasar, *submerged arc furnace*

Abstract

Mill scale is a by-product that resulted from the steel making industries containing iron oxides, such as *hematite* (Fe_2O_3), *magnetite* (Fe_3O_4) and *wustite* (FeO). The smelting process of *mill scale* into *pig iron* as secondary raw material for the steel making process has conducted. A 30 Kg of *mill scale* which crushed into -40 mesh, 0-6 kg amount of coal (internal reductant) and 2 wt.% (0.6 kg) of *bentonite* (binder) were mixed homogeneously and agglomerated using briquette machine. The composite briquette had been smelting together with 7-8 kg of coke (external reductant) and 0-4.5 kg of limestone (flux) using *submerged arc furnace*. The smelting process was carried out for 45 minutes, and the pouring temperature was 1450-1500 °C. The study of coal addition in composite briquette, amount of cokes and limestone addition in the smelting process of *mill scale* has been investigated clearly. The optimum specified consumption energy of smelting process of *mill scale* was 3.64 kWh/kg product, resulted from the smelting of 30 kg of *mill scale* with 0% coal addition in composite briquette together with 3 kg (10 wt.%) limestones and 7 kg of cokes (stoichiometric) addition. The optimum basicity for smelting a *mill scale* was 1.0. The *pig iron* which resulted from smelting the *mill scale* could promote as a raw material for producing grey cast iron, white cast iron, and malleable cast iron.

Keywords: *Mill scale*, *pig iron*, *submerged arc furnace*

1. PENDAHULUAN

Mill scale merupakan limbah/produk samping dari industri baja, yaitu berupa oksida logam yang terbentuk dari hasil proses pembuatan baja pada proses hot-rolled. Pada saat proses tersebut berlangsung, permukaan logam baja akan mengalami “scaling” (mengelupas) akibat teroksidasi pada temperatur tinggi (700-900 °C), seperti tampak pada Gambar 1(a). *Mill scale* tersebut dipisahkan dari logam baja melalui proses *flame cleaning*, *water spray*, *pickling*, atau *blasting* (Gambar 1(b)).



Gambar 1. (a) *Mill scale* pada baja setelah dilakukan proses *hot rolling*, (b) *Mill scale* setelah melalui proses pemisahan (*cleaning*) dari material baja

Sebanyak 35-40 kg *mill scale* diperoleh dari tiap ton produk baja *hot-rolled* yang dihasilkan [1]. Pada tahun 2020, kapasitas produksi baja di Indonesia diprediksi mencapai 13,67 juta ton per tahun [2], sehingga hampir sebanyak 390.571-341.750 ton *mill scale* dihasilkan. Dibutuhkan luas area tanah yang cukup luas untuk menampung *mill scale* dalam jumlah yang cukup banyak tersebut, selain itu logam berat yang terkandung dalam *mill scale* dapat larut dan mencemari tanah dan air yang berada di bawahnya [3]. Oleh karena itu perlu dilakukan pengolahan dan pemanfaatan limbah *mill scale* guna mengatasi dampak pencemaran lingkungan. *Mill scale* kaya akan kandungan besi oksida, yaitu *hematite* (Fe_2O_3), *magnetite* (Fe_3O_4) dan *wustite* (FeO), dengan kandungan Fe total lebih dari 70%. Selain itu, kandungan senyawa pengotor dalam *mill scale*, berupa oksida non-logam sangat rendah, sehingga pemanfaatan *mill scale* menjadi produk bernilai tambah tinggi sangat mungkin untuk dilakukan, diantaranya adalah sebagai bahan baku dalam industri semen, cat/pigmen, *powder metallurgy*, dan pembuatan besi-baja [1], [4]-[6]. Semakin berkurangnya cadangan bijih besi di alam serta semakin melimpahnya limbah *mill scale* yang dihasilkan menjadikan potensi *mill scale* sebagai bahan baku sekunder untuk pembuatan logam besi perlu dikembangkan lebih lanjut.

Teknik pengolahan *mill scale* sebagai bahan baku potensial untuk umpan *blast furnace*

dalam pembuatan logam besi telah dilakukan oleh Farahat, dkk. [17], dengan melakukan proses reduksi terhadap *mill scale* menggunakan reduktan batu bara antrasit pada temperatur 1100 °C selama 60 menit sehingga diperoleh produk berupa *sponge iron* dengan logam Fe sebesar 82% dan derajat metalisasi sebesar 97%. Derajat metalisasi *mill scale* meningkat seiring dengan bertambahnya waktu dan temperatur reduksi [8].

Proses peleburan *mill scale* secara langsung menggunakan tungku peleburan skala industri sebagai bahan baku dalam proses pembuatan logam besi belum banyak dilakukan. Pemanfaatan *mill scale* sebagai substitusi bahan baku scrap dan DRI (*direct reduced iron*) dalam pembuatan baja menggunakan *electric arc furnace* telah dilakukan oleh Saberifar, dkk. [9], akan tetapi hanya 14,9 % *mill scale* yang tereduksi menjadi logam baja sehingga menyebabkan tingginya konsumsi energi dan slag yang dihasilkan dalam proses pembuatan baja tersebut. Peleburan *mill scale* menggunakan tungku SAF (*submerged arc furnace*) telah dilakukan oleh Eissa, dkk. [10] menghasilkan logam besi kasar dengan perolehan logam Fe sebesar 76% dengan menggunakan reduktor kokas dan 86% dengan menggunakan reduktor grafit. Penggunaan fluks berupa CaSi mampu menurunkan kandungan sulfur secara optimal, dimana kandungan sulfur akan semakin berkurang dengan semakin meningkatnya basisitas terak/slag [10].

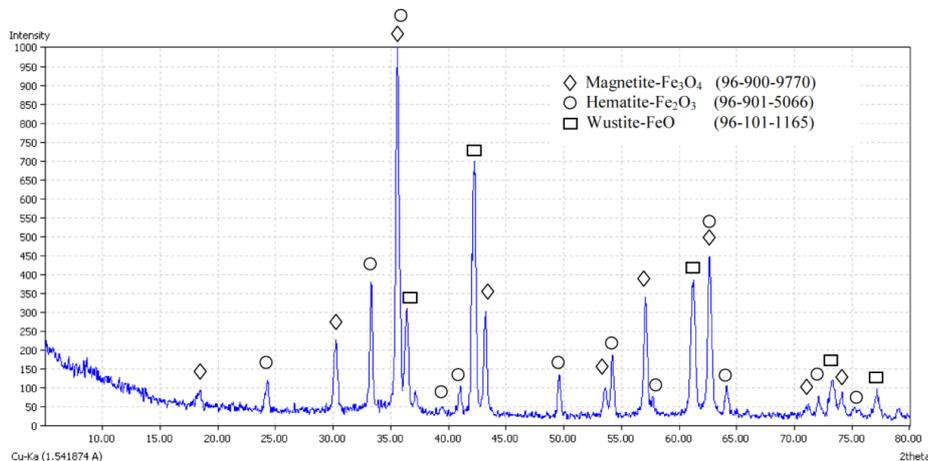
Rendahnya perolehan logam Fe merupakan salah satu permasalahan dalam proses peleburan limbah *mill scale* menjadi logam besi kasar. Dalam percobaan ini akan dipelajari pengaruh penambahan reduktor pada briket *mill scale* komposit dan pengaruh basisitas terak terhadap perolehan logam Fe serta kandungan unsur lainnya dalam produk logam besi kasar pada proses peleburan *mill scale* menggunakan SAF.

2. METODE PENELITIAN

Mill scale yang digunakan dalam percobaan ini merupakan produk samping dari proses pembuatan baja *hot rolled* di PT. Krakatau Steel, Indonesia. Karakterisasi terhadap *mill scale* terlebih dahulu dilakukan sebelum proses peleburan. Uji XRD (*x-ray diffraction*) dan XRF (*x-ray fluorescence*) dilakukan untuk mengetahui komposisi senyawa serta kandungan unsur yang terdapat dalam *mill scale*. Hasil uji XRD dan analisis Rietveld disajikan pada Gambar 2 dan Tabel 1, sedangkan hasil uji XRF

dari material *mill scale* dapat dilihat pada Tabel 2.

Sebanyak 30 kg *mill scale* terlebih dahulu digerus hingga berukuran mesh -40, kemudian dicampur merata dengan batu bara berukuran mesh -80 (internal reduktor) sebanyak 0-6 kg dan bentonit (sebagai perekat) sebanyak 2% berat (0,6 kg). Sejumlah air ditambahkan secukupnya dan diaduk bersama ketiga material tersebut dalam sebuah alat pengaduk, yaitu *screw mixer*, sehingga material tersebut tercampur merata. Selanjutnya dilakukan proses aglomerasi dengan menggunakan mesin briket, dengan dimensi briket berukuran 40 x 40 x 20 mm.



Gambar 2. Hasil analisis XRD *mill scale*

Tabel 1. Komposisi senyawa *mill scale* berdasarkan hasil analisis Rietveld

Senyawa	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	FeO
Kadar (% berat)	27,3	45,7	27

Tabel 2. Komposisi unsur dan senyawa *mill scale* berdasarkan hasil uji XRF

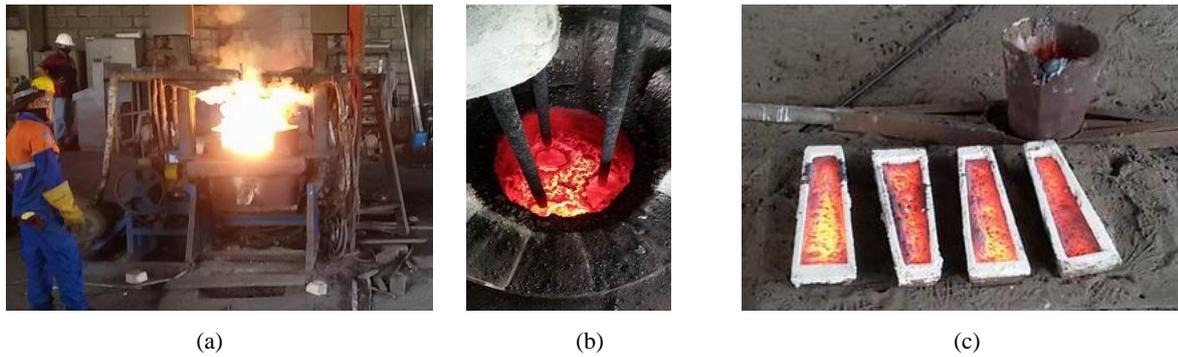
Unsur/ Elemen	Fe Total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	S Total	Basisitas (B)
Kadar (% berat)	72,5	0,78	0,78	0,21	0,13	0,69	0,096	0,49	0,22

Tabel 3. Analisis proksimat, sulfur dan nilai kalori batu bara

Komposisi (% berat)	Fixed Carbon	Moisture	Volatille Matter	Ash	Sulfur (S)	Posfor (P ₂ O ₅)	Nilai Kalori (Kal/gr)
Batu bara	47,74	6,72	21,14	24,41	1,06	0,26	5900
Kokas	84,69	1,91	2,06	11,89	0,97	0,38	7816

Tabel 4. Komposisi batu kapur yang digunakan

Komposisi	CaCO ₃ /CaO	SiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
Kadar (% berat)	73,72/40,56	2,2	0,013	0,38



Gambar 3. (a) *Submerged arc furnace*, (b) proses peleburan *mill scale*, (c) cetakan logam cair

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil uji XRD (*x-ray diffraction*) pada Gambar 2 dan XRF (*x-ray fluorescence*) dalam Tabel 2 tampak bahwa *mill scale* dalam percobaan ini memiliki kandungan unsur Fe yang tinggi dan didominasi oleh senyawa *magnetite* (Fe_3O_4) serta memiliki unsur pengotor (senyawa oksida non-logam) yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan bijih besi pada umumnya. Oleh karenanya *mill scale* yang berasal dari PT. Krakatau Steel ini sangat berpotensi untuk dijadikan sebagai bahan baku alternatif dalam pembuatan logam besi/*pig iron*.

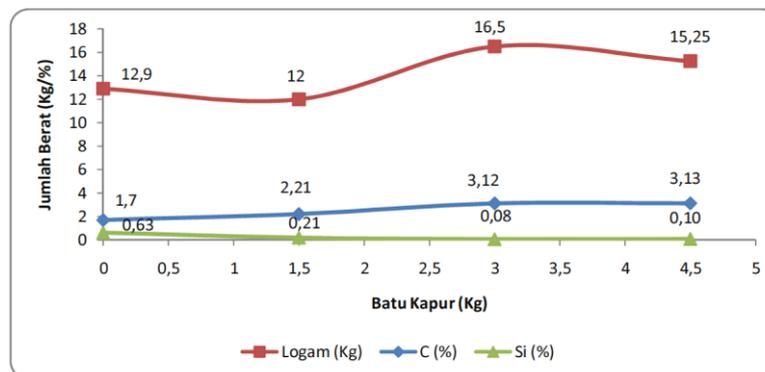
3.1. Pengaruh Fluks dan Basisitas Terak

Batu kapur, sebagai material fluks, ditambahkan ke dalam proses peleburan *mill scale* untuk memodifikasi basisitas terak, yang dinyatakan dengan persamaan (1). Basisitas sangat menentukan perolehan/*recovery* suatu unsur logam dalam proses peleburan batuan mineral logam. Dari Tabel 2, nilai basisitas dari bahan baku *mill scale* adalah sebesar 0,22.

$$B = \frac{CaO + MgO}{Al_2O_3 + SiO_2} \quad (1)$$

Tabel 5. Nilai basisitas uji coba peleburan *mill scale*

Uji Coba	Bahan Baku					Basisitas (B)
	Komposisi Briket <i>Mill scale</i> (kg)			Kapur (kg)	Kokas (kg)	
	<i>Mill scale</i>	Batu bara	Bentonit			
2	30	-	0,6	-	7	0,37
8	30	-	0,6	1,5	7	0,69
7	30	-	0,6	3	7	1,00
6	30	-	0,6	4,5	7	1,39



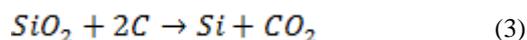
Gambar 4. Pengaruh penambahan material fluks (batu kapur) pada proses peleburan *mill scale* terhadap produk logam serta kandungan unsur C dan Si dalam produk logam yang dihasilkan

Basisitas memiliki pengaruh penting terhadap proses peleburan senyawa oksida logam menjadi logam. Penambahan batu kapur mempengaruhi nilai basisitas terak, seperti ditunjukkan oleh Tabel 5. Dalam percobaan ini, nilai basisitas optimum dari proses peleburan *mill scale* adalah 1,0 yang diperoleh dengan penambahan batu kapur sebanyak 3 Kg dengan perolehan logam besi optimal sebesar 16,5 kg, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. Viskositas terak dan logam cair mempengaruhi reaksi difusi atom dalam proses reduksi senyawa oksida logam [11], seperti ditunjukkan oleh persamaan (2), dimana koefisien difusi berbanding terbalik dengan viskositas.

$$D = \frac{K_b \cdot T}{6\pi r \mu} \quad (2)$$

D adalah koefisien difusi, K_b adalah konstanta Boltzman $91,38 \times 10^{-23}$ J/mol K, T adalah temperatur (K), r adalah jari-jari partikel (cm), dan μ adalah viskositas (poise). Rehackova, dkk. [12] menyatakan bahwa viskositas sangat dipengaruhi basisitas terak, dimana viskositas akan berkurang seiring dengan meningkatnya basisitas dan mencapai nilai viskositas minimum pada basisitas (CaO/SiO₂) 1,19, selanjutnya nilai viskositas akan meningkat kembali seiring dengan bertambahnya basisitas. Hal tersebut sesuai dengan hasil percobaan sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 4, dimana penambahan batu kapur sebanyak 3 kg (basisitas 1,0) memberikan perolehan logam besi optimal, namun pada penambahan batu kapur 4,5 Kg (basisitas 1,39) perolehan produk logam besi cenderung menurun.

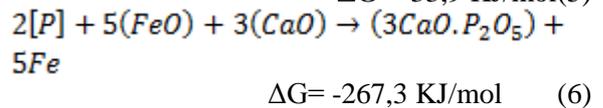
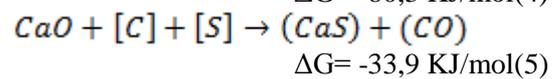
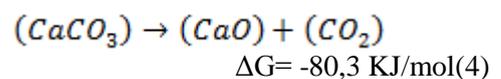
Kandungan silikon dalam logam semakin berkurang seiring dengan meningkatnya basisitas atau jumlah material fluks yang ditambahkan, seperti tampak pada Gambar 4. Senyawa SiO₂ berasal dari bahan baku (*mill scale*, batu kapur, batu bara dan kokas), dimana SiO₂ akan tereduksi menjadi silikon (Si) berdasarkan persamaan (3). Proses reduksi senyawa SiO₂ ditentukan oleh basisitas terak [13]-[14]. Peningkatan basisitas akan mengubah kondisi terak menjadi basa, sehingga hal tersebut akan menghambat reduksi SiO₂ yang bersifat asam dalam proses peleburan [15].



Dari Gambar 4, meningkatnya kandungan karbon dalam logam pig iron menunjukkan bahwa afinitas karbon terhadap Fe akan semakin

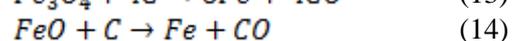
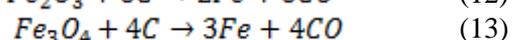
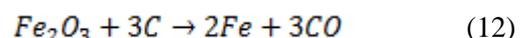
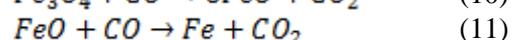
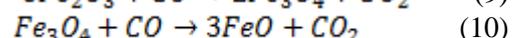
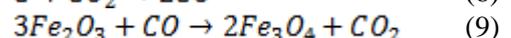
meningkat dengan meningkatnya basisitas yang berdampak terhadap penurunan viskositas, sehingga akan meningkatkan difusivitas atom (karbon) [12].

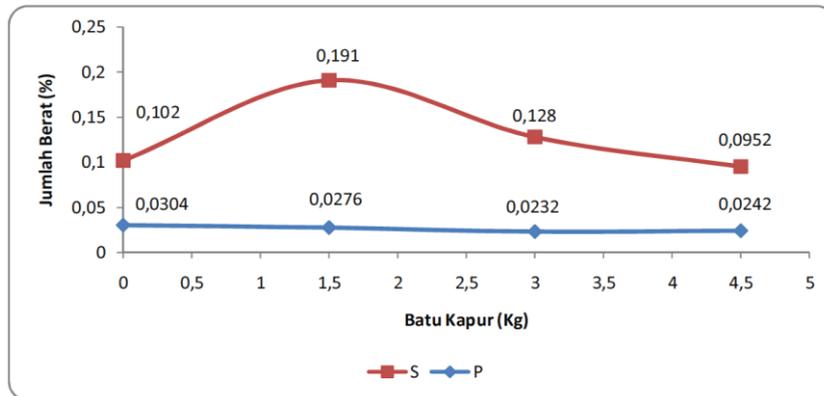
Keberadaan sulfur (S) dan posfor (P) dalam logam besi akan memberikan dampak negatif terhadap sifat mekanik (kekuatan dan ketangguhan). Oleh karena itu, keberadaan sulfur dan posfor dalam logam besi/baja sangat dibatasi. Dari Gambar 5, tampak bahwa kandungan sulfur dan posfor dalam logam yang diperoleh dari hasil peleburan *mill scale* mengalami penurunan (desulfurisasi dan deposforisasi) seiring dengan semakin banyaknya jumlah batu kapur yang ditambahkan dalam proses peleburan *mill scale* [10]. Reaksi desulfurisasi dan deposforisasi pada temperatur peleburan 1500 °C ditunjukkan oleh persamaan (4-6) [16]-[17].



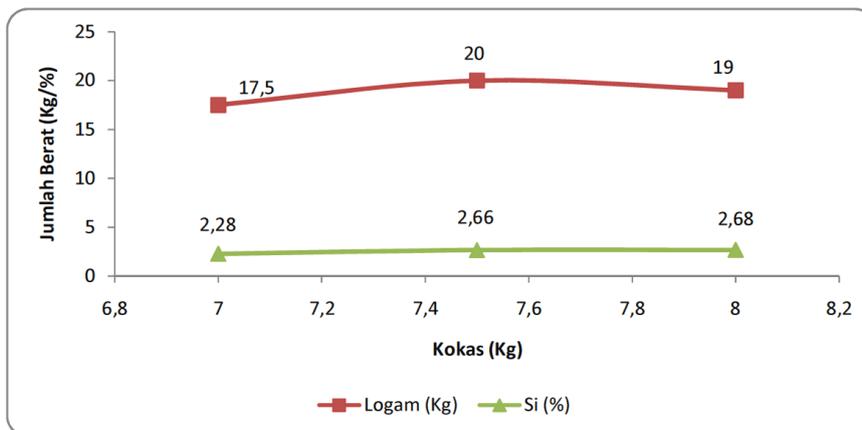
3.2 Pengaruh Jumlah Kokas sebagai Reduktor Eksternal

Proses reduksi senyawa logam oksida menjadi logam (paduan) melibatkan gas reduktan yang diperoleh dari proses pembakaran material mengandung karbon (reaksi *Boudouard*), seperti ditunjukkan oleh persamaan (7-11) [18] atau melibatkan material karbon secara langsung tanpa melibatkan gas reduktan (reduksi langsung), ditunjukkan oleh persamaan (12-14) [9]. Tidak seperti halnya *blast furnace*, umumnya dalam proses peleburan batuan mineral logam menggunakan SAF, proses reduksi senyawa mineral logam juga terjadi secara langsung (*direct reduction*). Dalam percobaan ini digunakan kokas lokal, sebagai reduktor, untuk melebur *mill scale* menjadi logam *pig iron*.

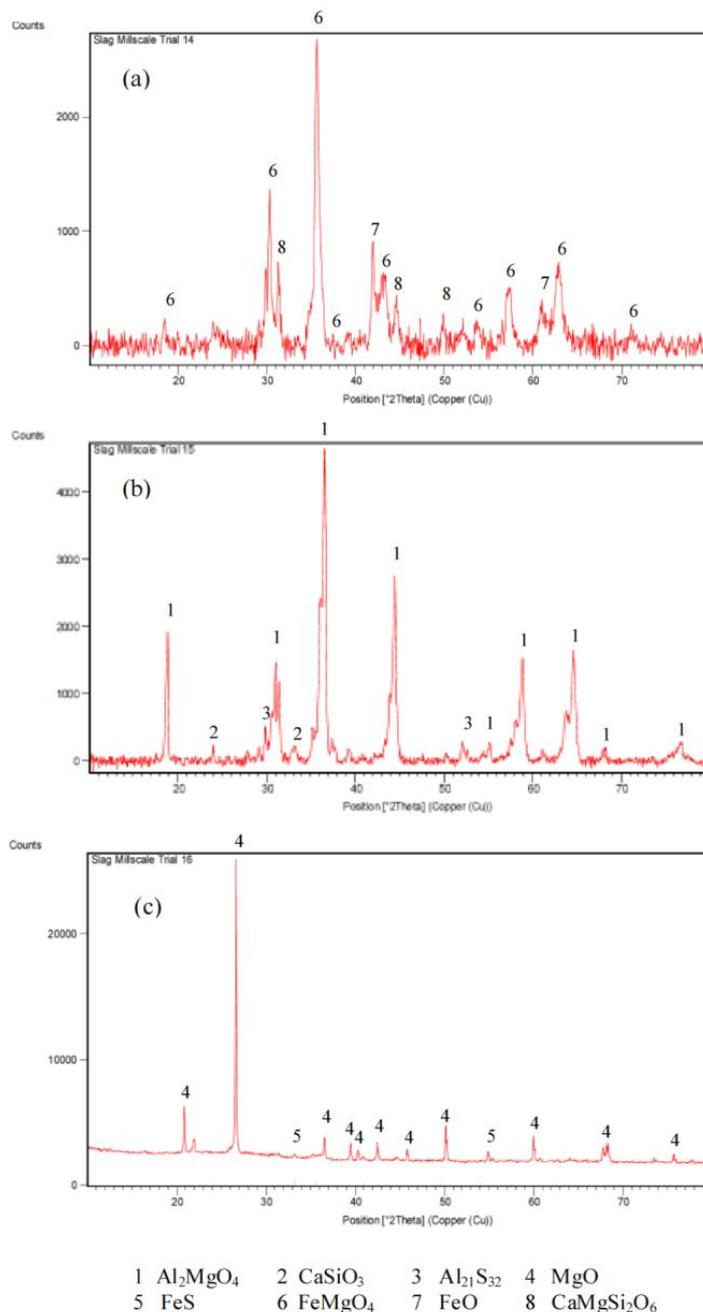




Gambar 5. Pengaruh penambahan material fluks (batu kapur) pada proses peleburan *mill scale* terhadap kandungan unsur S dan P dalam produk logam yang dihasilkan



Gambar 6. Pengaruh jumlah reduktor eksternal (kokas) pada proses peleburan *mill scale* terhadap produk logam dan kandungan Si dalam logam pig iron yang dihasilkan



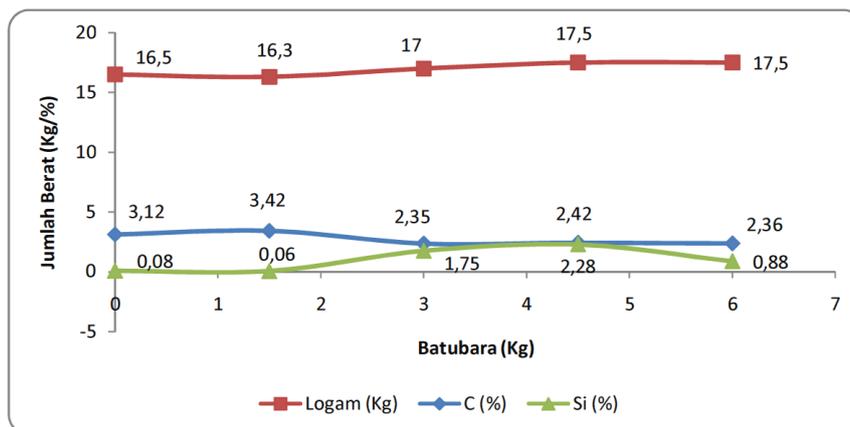
Gambar 7. Analisis XRD terak dengan penggunaan reduktor kokas sebanyak: (a) 7 kg (uji coba 14), (b) 7,5 kg (uji coba 15), (c) 8 kg (uji coba 16)

Dari Gambar 6, tampak bahwa produk logam yang dihasilkan meningkat pada penambahan kokas 7,5 kg atau setara dengan 1,07 dari stoikiometri. Penambahan kokas lebih dari 1,07 stoikiometri menyebabkan berkurangnya produk logam pig iron yang dihasilkan. Dari hasil analisis XRD pada terak dari hasil uji coba dengan penambahan kokas sebanyak 7 kg (Gambar 7(a)), tampak terdapat senyawa FeO dan Fe-Mg-O, menunjukkan bahwa sebagian senyawa besi oksida belum

tereduksi sepenuhnya akibat jumlah reduktor kokas yang tidak mencukupi. Dari hasil analisis XRD pada terak dari hasil uji coba dengan penambahan kokas sebanyak 8 kg (Gambar 7(c)), terdapat senyawa FeS. Dalam Tabel 3, kokas mengandung 0,97% S, dimana sulfur memberikan dampak negatif terhadap proses reduksi senyawa besi oksida. Afinitas Fe terhadap S akan menghasilkan senyawa *troilite* (FeS) yang akan menjadi senyawa pengotor dalam proses peleburan senyawa besi

oksida, sehingga perolehan logam Fe akan semakin berkurang dengan penambahan jumlah kokas yang berlebih. Dari hasil XRD pada terak dari hasil uji dengan penambahan Kg kokas (Gambar 7(b)) tidak ditemukan senyawa mengandung logam besi, hal tersebut menunjukkan bahwa hampir seluruh senyawa logam oksida tereduksi menjadi logam besi sehingga menyebabkan perolehan logam pig iron optimum.

Dari Gambar 6, menunjukkan bahwa kandungan Si dalam produk logam semakin meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah kokas yang ditambahkan, dimana proses reduksi senyawa SiO₂ yang terdapat dalam *mill scale* dapat tereduksi oleh kokas menjadi silikon, sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan (3).



Gambar 8. Pengaruh jumlah reduktor internal (batu bara) pada proses peleburan *mill scale* terhadap produk logam dan kandungan C, Si dalam logam pig iron yang dihasilkan

Tabel 6. Data hasil peleburan *mill scale* menggunakan *submerged arc furnace*

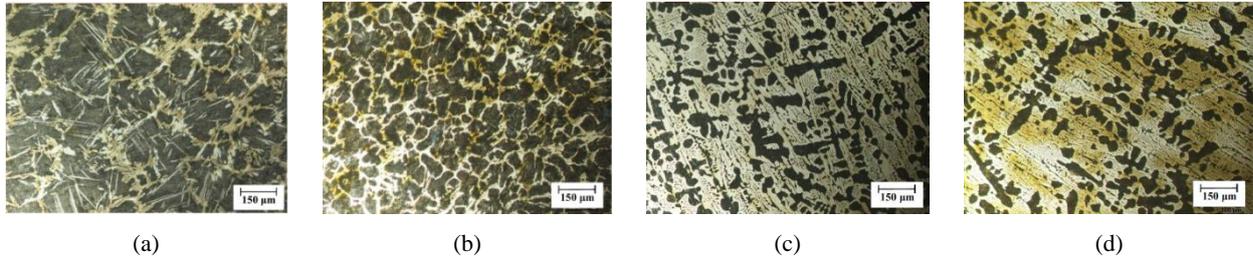
Uji Coba	Bahan Baku					Logam (kg)	Rasio Kokas-Logam	Konsumsi Energi Spesifik (kWh/kg)
	Komposisi Briket <i>Mill scale</i> (kg)			Kapur (kg)	Kokas (kg)			
	<i>Mill scale</i>	Batu bara	Bentonit					
2	30	-	0,6	-	7	12,9	0,54	4,65
8	30	-	0,6	1,5	7	12	0,58	5,60
7	30	0	0,6	3	7	16,5	0,42	3,64
6	30	-	0,6	4,5	7	15,25	0,46	4,33
12	30	1,5	0,6	3	7	16,3	0,43	4,05
13	30	3	0,6	3	7	17	0,41	4,24
11	30	4,5	0,6	3	7	17,5	0,40	4,46
14	30	6	0,6	3	7	17,5	0,40	4,18
15	30	4,5	0,6	3	7,5	20	0,38	4,50
16	30	4,5	0,6	3	8	19	0,42	4,42

Tabel 7. Komposisi kimia produk logam pig iron hasil peleburan *mill scale*

Uji Coba	Komposisi Unsur Pig Iron (% berat)				
	C	Si	Mn	S	P
2	1,7	0,63	0,1	0,10	0,03
8	2,21	0,21	0,05	0,19	0,03
7	3,12	0,08	0,04	0,13	0,02
6	3,13	0,01	0,06	0,01	0,02
12	3,42	0,06	0,05	0,17	0,04
13	2,35	1,75	0,32	0,14	0,04
11	2,42	2,28	0,35	0,11	0,04
14	2,36	0,88	0,17	0,01	0,05
15	2,69	2,66	0,39	0,22	0,05
16	2,53	2,68	0,37	0,15	0,05

Tabel 8. Data standar komposisi kimia untuk produk besi tuang [15]

Jenis Besi Tuang	Komposisi Kimia (% berat)				
	C	Si	Mn	P	S
Besi tuang Kelabu	2,5-4,0	1,0-3,0	0,2-1,0	0,002-1,0	0,002-0,25
Besi tuang Putih	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,8	0,06-0,2	0,06-0,2
Besi tuang mampu tempa	2,2-2,9	0,9-1,9	0,15-1,2	0,02-0,2	0,02-0,2



Gambar 9. Struktur mikro logam pig iron: (a) uji coba 2; (b) uji coba 8; (c) uji coba 7; (d) uji coba 6. Etsa Nital 3%

3.3 Pengaruh Jumlah Batu Bara sebagai Reduktor Internal

Dalam percobaan ini, pengaruh penambahan reduktor ke dalam briket *mill scale* dalam proses peleburan menggunakan SAF telah dipelajari. Sejumlah batu bara ditambahkan ke dalam briket *mill scale* sebagai reduktor internal. Kokas digunakan sebagai reduktor eksternal sejumlah 7 Kg atau setara dengan jumlah stoikiometri yang dibutuhkan dalam proses peleburan *mill scale* menjadi logam *pig iron*.

Dari Gambar 8 tampak bahwa perolehan logam *pig iron* optimum diperoleh dengan penambahan reduktor (batu bara) internal sebanyak 4,5 Kg. Kandungan karbon dalam produk logam *pig iron* cenderung semakin menurun dengan bertambahnya reduktor internal. Untuk kandungan silikon dalam *pig iron* semakin meningkat pada penambahan reduktor internal hingga sebanyak 4,5 Kg, namun menurun secara signifikan pada penambahan sebanyak 6 Kg. Sama seperti halnya dengan kokas, batu bara mengandung senyawa oksida posfor. Pada jumlah tertentu posfor akan menghambat proses reduksi senyawa logam dan non-logam oksida yang terkandung dalam *mill scale*. Dari Tabel 6, tampak bahwa konsumsi energi terendah ditunjukkan oleh nilai spesifik konsumsi energi minimum yang diperoleh dari hasil peleburan *mill scale* tanpa menggunakan reduktor internal batu bara. Hal tersebut menunjukkan bahwa reduksi langsung oleh reduktor eksternal (kokas) memiliki peranan yang lebih besar dalam proses peleburan menggunakan SAF [9], selain itu

keberadaan unsur pengotor dalam batu bara menjadi salah satu penyebab semakin meningkatnya konsumsi energi yang dibutuhkan. Namun dari Tabel 6 tersebut tampak bahwa penambahan reduktor internal mampu mengurangi rasio kokas terhadap logam (*coke to metal ratio*), sehingga dapat mengurangi kebutuhan kokas dalam proses peleburan *mill scale*.

3.4 Aplikasi Produk Logam *Pig Iron* dari Proses Peleburan *Mill scale*

Komposisi kimia dari produk logam *pig iron* yang diperoleh dari proses peleburan *mill scale* menggunakan SAF ditunjukkan oleh Tabel 7 dengan kandungan 1,7-3,42 C; 0,01-2,68 Si; 0,01-0,22 S; 0,02-0,05 P. Dari data tersebut, hampir semua produk logam *pig iron* tersebut memenuhi persyaratan komposisi sebagai bahan baku pembuatan material besi tuang kelabu (*gray cast iron*), besi tuang putih (*white cast iron*) dan mampu tempa (*malleable cast iron*), seperti ditunjukkan dalam Tabel 8 [19]. Besi tuang putih memiliki nilai kekerasan yang tinggi, umumnya digunakan sebagai komponen (mesin) tahan aus [20]. Tingginya nilai kekerasan dikarenakan oleh keberadaan struktur karbida Fe_3C (warna putih) yang terbentuk pada struktur mikro diantara matriks ferit (warna hitam), seperti ditunjukkan Gambar 9. Semakin tinggi kandungan karbon, semakin banyak volume karbida Fe_3C , sehingga semakin keras logam *pig iron* yang dihasilkan. Sedangkan besi tuang kelabu dan mampu tempa dengan nilai kekerasan yang lebih rendah memiliki sifat

mampu permesinan (*machinability*) yang baik dan mampu redam getar yang baik, sehingga banyak digunakan sebagai komponen otomotif [21]. Oleh karena itu peningkatan nilai tambah terhadap *mill scale* akan jauh lebih tinggi jika diaplikasikan sebagai bahan baku komponen/produk besi tuang putih, kelabu, dan mampu tempa.

4. KESIMPULAN

Mill scale dapat dijadikan sebagai bahan baku pembuatan logam *pig iron* melalui proses peleburan dengan menambahkan reduktan berupa material mengandung karbon (kokas) dan fluks (batu kapur). Jumlah reduktan (eksternal) kokas optimum dalam proses peleburan *mill scale* menggunakan SAF (*submerged arc furnace*) adalah setara dengan 1,07% stoikiometri karbon.

Penambahan batu kapur mempengaruhi nilai basisitas terak peleburan *mill scale*, dimana penambahan batu kapur sebanyak 3 Kg (basisitas terak 1,0) dengan penambahan kokas dan batu bara sebanyak 7 Kg dan 0 Kg, menghasilkan konsumsi energi spesifik yang optimum, yaitu sebesar 3,64 kWh/Kg.

Penambahan reduktan internal mampu menurunkan rasio kokas terhadap logam (*coke to metal ratio*), namun tidak menurunkan nilai konsumsi energi (listrik) spesifik, dimana nilai optimum diperoleh tanpa penambahan reduktan (batu bara) internal.

Logam *pig iron* hasil peleburan *mill scale* dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai bahan baku untuk pembuatan material besi tuang kelabu, putih dan mampu tempa

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Koperasi Minagro Alam Lestari yang telah menyediakan limbah *mill scale* dari PT. Krakatau Steel serta Balai Penelitian Teknologi Mineral-LIPI atas pendanaan kegiatan penelitian melalui skema pembinaan UMKM.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. A. Legodi, dan D. de Waal, "The preparation of magnetite, goethite, hematite and maghemite of pigment quality from mill scale iron waste," *Dyes Pigments*, vol. 74, pp. 161-168, 2007. DOI:10.1016/j.dyepig.2006.01.038.

[2] Z. Zulhan, "Aspek teknologi dan ekonomi pembangunan pabrik pengolahan bijih besi menjadi produk baja di Indonesia," *Majalah Metalurgi*, vol. 28, no. 2, hal. 105-120,

Agustus, 2013. DOI: 10.14203/metalurgi.v8i2.252.

[3] R. Sen, S. Dehiya, U. Pandel, dan M. K. Banerjee, "Utilization of low grade coal for direct reduction of mill scale to obtain sponge iron: effect of reduction time and particle size," *Procedia Earth Planet. Sci.*, 11, pp. 8-14, 2015. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.06.003.

[4] T. P. Rahman, A. Sukarto, N. T. Rochman, dan A. Manaf, "Sintesis pigmen besi oksida berbahan baku limbah industri baja (mill scale)," *Jurnal Fisika*, vol. 3, hal. 86-89, 2013. DOI: 10.15294/jf.v3i1.3972.

[5] A. Fiandimas dan A. Manaf, "Pembuatan magnet permanen barium heksaferit berbahan baku mill scale dengan teknik metalurgi serbuk," *Jurnal Sains Materi Indonesia*, vol. 5, pp. 45-50, 2003.

[6] O. Benchiheb, S. Mechachi, S. Serrai, dan M. G. Khalifa, "Elaboration of iron powder from mill scale," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 4, pp. 267-276, December, 2010.

[7] R. Farahat, M. Eissa, G. Megahed dan A. Baraka, "Reduction of mill scale generated by steel processing," *Journal of Steel and Related Materials: Steel Grips*, vol. 8, 2010.

[8] B. D. Flores, I. V. Flores, M. C. Bagatini, E. Osorio, dan A. C. F Vilela, "Study on reducing and melting behavior of mill scale/petroleum coke blend," *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, vol. 10, pp. 365-374, 2013. DOI:10.4322/tmm.2013.050.

[9] S. Saberifar, F. Jafari, M. A. Jafarzadeh, dan S. A. Mousavi, "Recycling evaluation of mill scale in electric arc furnace," *JMATPRO*, vol. 2, pp. 73-78, August, 2014.

[10] M. Eissa, A. Ahmed, dan M. El-Fawkhry, "Conversion of mill scale waste into valuable products via carbothermic reduction," *Journal of Metallurgy*, vol. 2015, pp. 1-9, August, 2015. DOI: 10.115/2015/926028.

[11] S. Oediyani, P. J. Sari, dan D. P. Hadi, "The effect of local coal and smelting sponge iron on iron content of pig iron," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 316, 012047: 1-7, 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/316/1/012047.

[12] L. Rehackova, S. Rosypalova, R. Dudek, J. Kukutschova, dan J. Dobrovska, "Effect of cao/sio₂ ratio on viscosity and structure of slag," *Metabk*, 54(3), pp. 455-458, 2015.

[13] V. A. Grachev, "Thermodynamics and mechanism of silicon reduction by carbon

- in a crucible reaction," *Orient J. Chem.*, 32(6), pp. 2929-2937, December, 2016. DOI: 10.13005/ojc/320612.
- [14] A. Klimczyk, M. Bernasowski, R. Stachura, dan A. Ledzki,"Reduction of silicon in blast furnace," *Proc. 23rd International Conference on Metallurgy and Materials* (Metal 2014), May, 2014.
- [15] M. K. Mohanty, S. Mishra, B. Mishra, dan S. Sarkar,"Effect of basicity on the reduction behaviour of iron ore pellets," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 43, pp. 5989-5998, 2018. DOI: 10.1007/s13369-018-3107-4.
- [16] X. Yuang, J. Duan, C. Shi, M. Zhang, Y. Zhang, dan J. Wang,"A thermodynamic model of phosphorus distribution ratio between CaO-SiO₂-FeO-Fe₂O₃-MnO-AL₂O₃-P₂O₅ slags and molten steel during a top-bottom combined blown converter steelmaking process based on the ion and molecule coexistence theory," *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 42B, pp. 738-770, August, 2011. DOI: 10.1007/s11663-011-9491-8.
- [17] E. T. Turkdogan dan L. J. Martonik,"Sulfur solubility in iron-carbon melts coexistence with solid CaO dan CaS," *Transactions ISIJ*, vol. 23, pp. 1038-1044, 1983.
- [18] N. Gade, G. Verma, R. Sen, dan U. Pandel,"Effect of calcium carbonate on the reduction behaviour of mill scale," *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 11, pp. 319-324, 2015. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.06.067.
- [19] J. R. Davis, "Classification and basic metallurgy of cast iron," in *ASM Specialty Handbook Cast Irons*. ASM International, pp. 3-15, 1996.
- [20] B. Zheng, Z. Huang, J. Xing, Y. Xiao, dan F. Xiao,"Effect of chromium content on cementite-pearlite interaction of white cast iron during three-body abrasive wear," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 69, issue 6, pp.863-871, 2017. DOI: 10.1108/ilt-08-2016-0195.
- [21] J. Machuta dan I. Nova,"Metallurgy of the gray cast iron for the automotive parts," *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, vol. 39, no. 9, 2017. DOI: 10.15407/mfint.39.091267.

