



PENDEKATAN HUKUM STOKES PADA PROSES TERJADINYA *SLAG* UNTUK MENINGKATKAN EFEKTIVITAS PEMBERSIHAN CAIRAN LOGAM PADA PROSES PELEBURAN BESI COR

Muhammad Rizki Gorbyandi Nadi*, Cecep Ruskandi, Ari Siswanto dan Eko Koswara

Jurusan Teknik Pengecoran Logam, Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung, Indonesia

*corresponding author: rizkigorby@gmail.com

Received 30-12-2021, Revised 06-07-2022, Accepted 28-09-2022

Available Online 04-10-2022, Published Regularly October 2022

ABSTRACT

This study aimed to increase the effectiveness of slag cleaning in the cast iron smelting process. This study resulted in calculating of the terminal velocity of the slag emerging to the surface of the induction furnace based on Stokes' Law approach for each slag that appears during the cast iron smelting process. For each cast iron casting, three samples were taken based on the fastest time on the very light slag, the lag time for the heaviest slag, and the extreme time for comparison. The results of each sample are tested for characterization such as shape, size, and chemical composition of each sample which are then adjusted to the calculations that have been made. The characterization was analyzed using X-ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) for microstructure analysis. The results show that the Stokes law approach to predict the slag reaching the surface gets the appropriate result: all the slag reaches the surface at time $t = 230$ s. The slag that appears at time $t = 300$ s is the slag formed due to the interaction of the liquid with the surface which is not the slag that occurs from the raw material used. This study succeeded in minimizing the formation of slag in each casting of cast iron using an induction furnace.

Keywords: cast iron; slag; slag characterization; the terminal velocity of slag

ABSTRAK

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan efektivitas pembersihan *slag* pada proses peleburan besi cor. Penelitian ini menghasilkan perhitungan kecepatan terminal *slag* muncul ke permukaan tanur induksi berdasarkan pendekatan Hukum Stokes pada masing-masing *slag* yang muncul saat proses peleburan besi cor. Setiap pengecoran besi cor diambil tiga buah sampel berdasarkan waktu tercepat pada *slag* yang sangat ringan, waktu terlambat yang dimiliki oleh *slag* terberat dan waktu ekstrem sebagai pembanding. Hasil dari setiap sampel dilakukan pengujian karakterisasi seperti bentuk, ukuran dan komposisi kimia pada setiap sampel yang kemudian disesuaikan dengan perhitungan yang telah dibuat. Karakterisasi dianalisis dengan menggunakan *X-ray diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscope* (SEM), and *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS). Hasil menunjukkan bahwa pendekatan hukum stokes untuk memprediksi *slag* mencapai permukaan mendapatkan hasil yang sesuai bahwa seluruh *slag* mencapai permukaan pada waktu $t = 230$ s. *Slag* yang muncul pada waktu $t = 300$ s merupakan *slag* yang terbentuk akibat interaksi cairan dengan permukaan yang bukan merupakan *slag* yang terjadi dari *raw* material yang digunakan. Penelitian ini berhasil untuk meminimalisasi terbentuknya *slag* pada setiap pengecoran besi cor menggunakan tanur induksi.

Keyword : *slag*; besi cor; karakterisasi *slag*; kecepatan terminal *slag*

PENDAHULUAN

Produksi besi dan baja di dunia sangatlah besar karena kebutuhan akan besi dan baja digunakan oleh seluruh dunia saat ini. Dengan produksi yang sangat besar ini maka *slag* yang dihasilkan juga begitu besar. Untuk setiap ton dari baja akan menghasilkan *slag* sebesar 8-15%. Hingga tahun 2019 produksi *slag* semakin meningkat hingga 20%. Indonesia sendiri dapat memproduksi *slag* hingga 540.000 ton per tahunnya. Beberapa penelitian yang sudah dilakukan adalah bagaimana memanfaatkan *slag* yang diantaranya pembuatan beton ^[1], bidang pertanian ^[2], bahan baku semen ^[3], dan *slag remover* ^[4-5]. Beberapa penelitian tersebut hanya menunjukkan bagaimana memanfaatkan *slag* yang dihasilkan namun tidak mencoba bagaimana mengurangi atau meningkatkan efisiensi dalam pembuatan produksi besi dan baja sehingga *slag* yang dihasilkan lebih sedikit.

Dalam proses peleburan besi dan baja menjadi salah satu proses yang penting saat proses pembuatan benda logam. Peleburan (*smelting*) adalah proses reduksi bijih atau *scrap* sehingga menjadi logam unsur yang dapat digunakan berbagai macam zat seperti karbid, hidrogen, logam aktif atau dengan cara elektrolisis. Pemilihan zat pereduksi ini tergantung dari kereaktifan masing-masing zat. Makin aktif logam makin sukar direduksi, sehingga diperlukan pereduksi yang lebih kuat.

Slag merupakan produk sampingan yang terbentuk dalam peleburan, pengelasan, dan proses metalurgi dan pembakaran lainnya dari pengotor dalam logam atau bijih yang diolah. *Slag* sebagian besar terdiri dari oksida campuran unsur-unsur seperti silikon, belerang, fosfor, dan aluminium; Abu; dan produk yang terbentuk dalam reaksinya dengan lapisan tungku dan zat fluks seperti batu kapur. *Slag* mengapung di permukaan logam cair, melindunginya dari oksidasi oleh atmosfer dan menjaganya tetap bersih. *Slag* membentuk agregat kasar yang digunakan dalam beton tertentu; digunakan sebagai bahan jalan dan pemberat dan sebagai sumber pupuk fosfat yang tersedia ^[6].

Proses terjadinya *slag* dalam proses peleburan terjadi saat adanya reaksi antara logam yang diolah berinteraksi dengan udara, *lining* dari tanur induksi maupun interaksi antar unsur yang berada saat proses peleburan. *Slag* terbentuk akan segera muncul ke permukaan tanur akibat dari perbedaan massa jenis *slag* dengan massa jenis bahan baku peleburan ^[7]. Bila proses peleburan dilakukan terlalu lama, permukaan cairan akan selalu berinteraksi dengan udara yang mengakibatkan jumlah *slag* semakin banyak terbentuk. Jika peleburan dilakukan terlalu singkat, *slag* yang muncul pada proses peleburan belum semua sampai ke permukaan. Berdasarkan hal tersebut, jika mengetahui waktu yang dibutuhkan *slag* untuk mencapai permukaan dalam proses peleburan maka *slag* yang terbentuk saat proses peleburan akan menghasilkan *slag* yang cukup dan tidak berlebihan sehingga mengurangi produksi *slag* pada setiap proses peleburan.

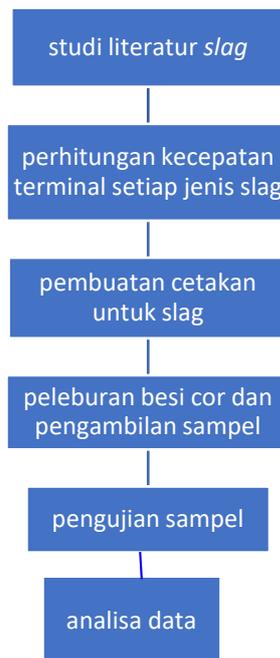
Untuk meminimalisasi permasalahan terjadinya *slag* pada proses peleburan besi cor, penting untuk mengetahui karakteristik *slag*nya itu sendiri seperti komposisi kimia dan mekanik dari *slag* yang terbentuk. Informasi ini berguna untuk menentukan pengaruh unsur kimia atau massa jenis atau bentuk *slag* saat proses peleburan besi cor. Beberapa studi telah dilakukan tentang terbentuknya *slag* memiliki bentuk bulat dan pipih yang sebagian besar merupakan oksida seperti FeO dan MnO ^[6].

Untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan *slag* dalam mencapai permukaan dilakukanlah pendekatan menggunakan Hukum Stokes mengenai viskositas untuk mendapatkan berapa kecepatan *slag* untuk muncul pada permukaan dari permukaan tanur. Dengan pendekatan ini, *slag* yang dihasilkan saat proses peleburan dapat diprediksikan kapan *slag* akan mencapai permukaan.

Berdasarkan hal tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui waktu yang tepat dalam pemberian *slag remover* pada proses peleburan besi cor sehingga seluruh slag yang muncul dapat diangkat seluruhnya dan juga mencegah terjadinya proses munculnya slag akibat interaksi cairan dengan udara.

METODE

Penelitian ini bertujuan untuk mencari waktu efektif dalam pemberian *slag remover* agar slag yang terbentuk selama proses peleburan menjadi lebih efisien dengan cara mengukur kecepatan terminal setiap bentuk atau jenis slag. Metode penelitian ini secara rinci dapat dijelaskan pada gambar 1 berikut



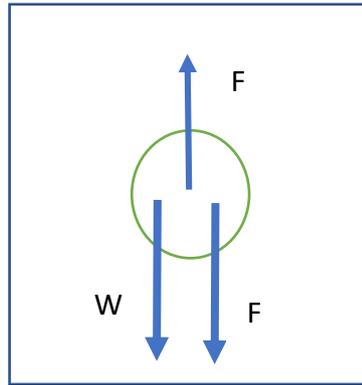
Gambar 1. Metodologi penelitian

Karakteristik Slag

Slag dalam metalurgi secara umum dibagi menjadi beberapa kategori diantaranya adalah *nonferrous*, *ferroalloy* dan *ferrous slag*. *Nonferrous slag* dihasilkan dari proses produksi dari bijih nonferrous metal yang menghasilkan slag FeO, SiO₂, dan CaO [7]. *Ferroalloy slag* berasal dari produksi bahan *ferro alloy bulk* menghasilkan slag yang terdiri dari SiO₂, MgO, Al₂O₃ [8]. *ferrous slag* dalam produksi besi cor menghasilkan CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, dan FeO [9]. Disimpulkan juga bahwa Kandungan kimia limbah slag besi biasanya bervariasi tergantung pada bahan dasar dan proses pembuatan baja, antara lain CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, MgO, dan P₂O₅. Kandungan mineral umum slag besi terdiri dari olivin, merwinit C₃S, C₂S, C₄AF, C₂F, RO (bebas CaO) [10-11]. Dengan perbedaan bahan baku, teknologi peleburan dan jenis baja, komposisi slag baja juga berubah.

Kecepatan terminal setiap slag

Persamaan perhitungan kecepatan terminal dari slag dapat diukur menggunakan pendekatan persamaan Hukum Stokes mengenai viskositas.



Gambar 2. Gaya yang diterima *slag* di dalam

Dengan *slag* yang terbentuk cenderung berbentuk bola ^[5] dan *slag* muncul setelah terjadinya reaksi di dalam cairan alumunium tersebut maka *slag* akan menerima 3 gaya pada gambar 2 yaitu Gaya Angkat Archimedes kemudian gaya berat *slag*nya itu sendiri dan gaya viskositas sehingga persamaan kecepatan terminal didapatkan sebagai berikut:

$$v = \frac{2gr^2}{9\eta}(\rho_f - \rho_b) \quad (1)$$

Dengan v merupakan kecepatan terminal dari *slag* (m/s), g gravitasi Bumi, r merupakan jari jari *slag* (m) dan massa jenis logam cair dan massa jenis *slag*

Dengan mengetahui ketinggian dari tanur yang digunakan saat proses peleburan maka didapatkanlah perkiraan kecepatan terminal dari masing masing *slag* dengan jari-jari *slag* terkecil dari *slag* ^[11] yaitu 0,075 mm dan nilai viskositas besi sebesar 0.0049 kg/ms ^[14] dan menggunakan persamaan kecepatan bahwa waktu yang dicapai *slag* untuk mencapai permukaan dari tanur hasilnya dapat dilihat dalam tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik *slag* dan kecepatan terminalnya.

No	Jenis <i>Slag</i>	Massa Jenis <i>Slag</i> (kg/m ³)	Kecepatan Terminal (cm/S)	Waktu Yang Dibutuhkan <i>Slag</i> Mencapai Permukaan (s)
1	Fe ₂ O ₃	5.25	0.445	112
2	Al ₂ O ₃	3.95	0.75	66
3	MgO	3.59	0.85	58
4	CaO	3.34	0.9	54
5	SiO ₂	2.65	1	70
6	MnO	5.37	0.4025	174
7	FeO	5.74	0.31	226
8	P ₂ O ₅	2.39	1.1475	61

Proses Pengambilan Sampel

Pada proses ini dilakukan pada tiga proses pengecoran besi cor dengan menggunakan tanur induksi dengan frekuensi medium, volume tanur 100 Kg dan tinggi tanur 70 cm. Proses pengecoran dilakukan menggunakan bahan dasar *scrap metal*. Bahan *scrap metal* kemudian dicairkan secara bertahap hingga seluruh bahan dasar mencair. Berdasarkan hasil pada tabel 1, sesaat setelah seluruh besi dicairkan perhitungan waktu dimulai, pengambilan sampel dilakukan dalam selang waktu yang berbeda yaitu, pada detik 65, 230, dan 300 detik. Pengambilan sampel dilakukan dengan menggunakan *dies* khusus pada permukaan cairan logam di tanur induksi. Sampel berukuran 40x40x10 mm dan dapat dilihat pada gambar 3. Sampel kemudian dipreparasi seperti dipotong dan dibuat dalam bentuk serbuk untuk proses analisa sampel.



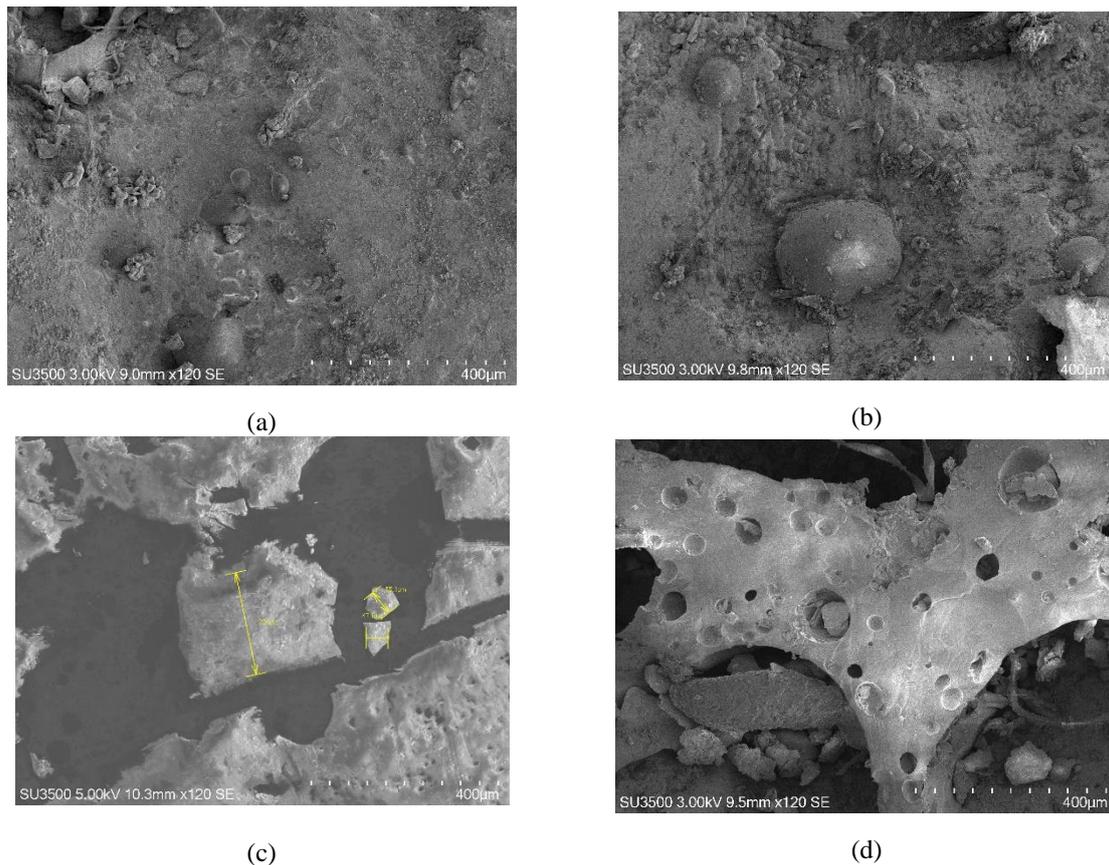
Gambar 3. Sampel yang telah diambil dari proses peleburan dengan $t=65,230$, dan 300 s

Proses pengujian dan analisa sampel

Sampel yang telah didapatkan kemudian dilihat karakteristik *slag*-nya. Setiap sampel dilakukan pengujian untuk melihat kandungan unsur, jumlah kandungan, dan bentuk *slag* yang muncul pada setiap masing masing sampel. Pengujian dilakukan dengan menggunakan SEM - EDS untuk melihat karakteristik *slag* yang muncul dalam sampel yang terlihat berwarna hitam seperti batuan kecil pada sampel dan juga unsur-unsur yang berada pada *slag* tersebut. X-Ray diffractometer (XRD; D8 Phase Bruker; Germany) dengan radiasi $\text{Cu-K}\alpha$ pada 30 kV dan 10 mA digunakan untuk menganalisis komposisi kimia yang terkandung dalam sampel yang berbentuk serbuk. Proses identifikasi senyawa pada hasil XRD menggunakan referensi database dari Joint Committee of Powder Diffraction Standard (JCPDS) ^[15]. Hasil-hasil pengujian tersebut selanjutnya dianalisa dan disesuaikan dengan hasil hipotesa peneliti lakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan gambar 3 dari sampel yang telah dilakukan dapat dilihat dari bentuk dan warna yang dihasilkan bahwa semakin lama waktu pengambilan cairan, *slag* yang terbentuk semakin banyak. Pada waktu yang semakin lama, warna yang muncul berbeda dari base besi cornya yang menunjukkan bahwa banyak *slag* yang terbentuk pada selang waktu $t = 230$ dan 300s. Pengujian selanjutnya menggunakan alat Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk melihat ukuran dan bentuk dari *slag* yang berada pada setiap sampel. Hasil pengujian dapat dilihat beberapa sampel pengujian pada gambar 4.



Gambar 4. *Slag* pada setiap sampel a. $t = 65$ s b. $t = 230$ s, c dan d. $t = 300$ s

Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat pada sampel $t = 65$ s, bentuk *slag* memiliki bentuk yang beragam dan tidak beraturan walaupun ada sebagian yang memiliki bentuk agak melingkar. Jari-jari *slag* yang dihasilkanpun beragam dari ukuran paling kecil $6,75 \mu\text{m}$ hingga $80 \mu\text{m}$. Ini menunjukkan bahwa *slag* yang memiliki jari-jari terkecil yang bergerak paling lambat sudah mencapai permukaan pada waktu 65 detik.

Pada sampel $t = 230$ s, muncul beragam *slag* yang dihasilkan, *slag* yang muncul cenderung memiliki bentuk bulat dengan jari-jari beragam dari $2-169 \mu\text{m}$. Berdasarkan beberapa penelitian^[5-6] yang telah dilakukan hasil ini mendukung bahwa bentuk *slag* tersebut berasal dari scrap yang dilebur. Pada sampel $t = 300$ s, memiliki banyak bentuk *slag* yang beragam, dari yang berbentuk bulat dengan jari-jari $21-285 \mu\text{m}$, kemudian ada juga yang berbentuk seperti kristalin yang terbentuk. *Slag* yang berbentuk kristalin ini menunjukkan bahwa *slag* yang terbentuk merupakan hasil interaksi cairan dengan lingkungan yaitu dengan udara bebas di atas permukaan cairan karena bentuk *slag* yang terjadi yang bukan terjadi didalam cairan tidak akan mengalami tekanan segala arah dari cairan sehingga *slag* cenderung berbentuk kristalin atau kasar. Sehingga *slag* saat $t = 300$ s merupakan *slag* yang merupakan gabungan antara *slag* yang terjadi pada proses peleburan dan interaksi cairan dengan lingkungan,

Setelah mengetahui bentuk dan ukuran *slag* yang terjadi selanjutnya untuk mengetahui unsur-unsur yang terkandung pada setiap *slag* dilakukanlah pengujian menggunakan Energy Dispersive Spectrometri. Pengujian EDS ini dilakukan pada setiap bagian *slag* yang muncul pada gambar 3. Setiap *slag* kemudian dilakukan scanning unsur-unsur yang terkandung didalamnya. Selanjutnya dilakukan perhitungan rata-rata yang muncul pada tabel 2.

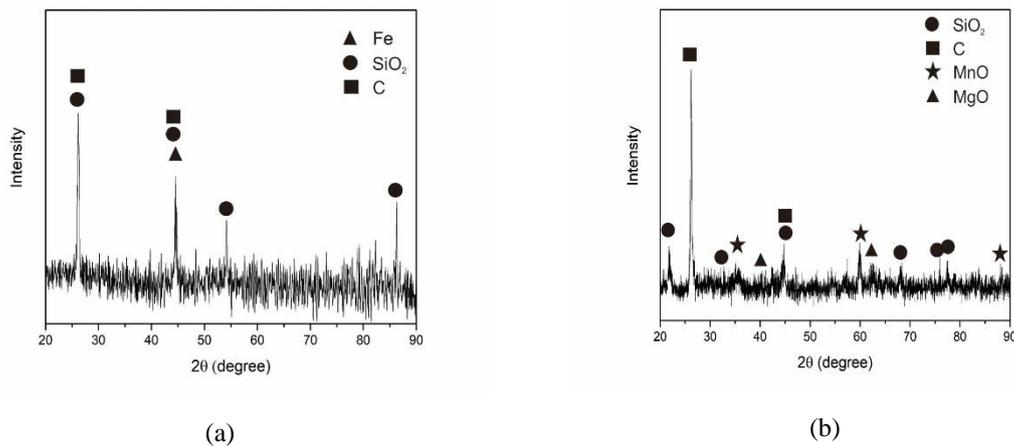
Pada saat proses pengujian hasil yang ada memiliki nilai unsur yang berbeda-beda dikarenakan setiap perbedaan waktu, *slag* yang muncul akan berbeda sesuai dengan tabel 1 dan pengaruh ukuran dari setiap unsur. Untuk unsur Al yang hilang saat $t = 230$ s namun muncul di saat $t = 300$ s. Hal ini terjadi karena unsur Al yang bersumber dari scrap metal saat $t = 230$ s itu sudah tidak muncul kembali di permukaan. Saat $t = 300$ s Al muncul kembali dikarenakan ada proses pembentukan slag antara *lining* yang berbahan alumina (Al_2O_3) dengan cairan sehingga muncul unsur Al saat $t = 300$ s.

Tabel 2. Rata-rata Hasil Pengujian EDS

Unsur	t = 65s	t=230 s	t = 300 s	Setelah Dibersihkan
	Berat (%)	Berat (%)	Berat (%)	Berat (%)
C	17.21	13.94	63.07	3.59
O	16.19	17.36	24.07	-
Fe	61.58	60.20	2.61	94
Al	1.36		3.25	-
Si	1.06	5.35	4.87	1.9
Mn	-	3.15	1.2	0.2
Mg	-	-	2.2	-

Pada sampel saat $t = 65$ s didapatkan bahwa *slag* yang muncul memiliki unsur unsur yang bisa menjadi *slag* berupa Al dan Si dengan komposisi $> 1\%$. Unsur Si merupakan salah satu unsur yang pasti ada karena merupakan penyusun utama pada besi cor dan kemungkinan untuk menjadi *slag* sangat tinggi, ini bisa dilihat bahwa pada setiap peleburan memiliki nilai Si. Kandungan Al yang muncul juga bisa didapatkan dari scrap yang digunakan atau kemungkinan lain hasil interaksi cairan dengan lining pada tanur. Pada $t = 230$ s didapatkan unsur lainnya yaitu Mn dengan komposisi $> 3\%$ dan adanya kenaikan nilai Si. Pada $t = 300$ s didapatkan unsur lainnya yaitu mg sebesar 2% . Berdasarkan hasil hasil tersebut menunjukkan bahwa unsur unsur pembentuk *slag* mengalami kenaikan dengan seiringnya waktu dari 60-300 detik sesuai dengan kelajuan terminal masing masing *slag* yang ada. Kemudian data hasil pengujian pada sampel yang telah dibersihkan dapat disimpulkan bahwa *slag* yang terbentuk sangat kecil sekali sehingga bisa dikatakan cairan sudah bersih dari *slag*.

Selanjutnya dilakukan pengujian XRD untuk melihat senyawa apa yang terbentuk dari *slag* tersebut. Dari hasil pengujian XRD pada gambar 4 bagian kiri dapat dilihat bahwa *slag* yang dihasilkan dalam setiap sampel memiliki kandungan *slag* berupa SiO_2 dan juga *slag* yang berupa *graphete*. Sedangkan gambar 4 bagian kanan merupakan hasil pengujian XRD pada sampel cairan $t = 240$ s yang menghasilkan beberapa *slag* yang muncul diantaranya MnO , MgO , dan SiO_2 yang biasa muncul dalam proses peleburan besi cor terutama berbahan dasar scrap. Dengan hasil XRD ini menunjukkan bahwa *slag* yang terbentuk pada setiap waktu yang ditentukan telah dapat diprediksi dan sesuai dengan hasil perhitungan.



Gambar 5. Hasil pengujian XRD pada *slag* yang terbentuk, (a) pengujian *slag* pada $t=65$ s dan (b) pengujian *slag* pada $t=240$ s

Berdasarkan hasil-hasil yang telah didapatkan dari percobaan ini didapatkan bahwa pendekatan Hukum Stokes untuk memprediksi kecepatan terminal pada *slag* mendapatkan hasil yang sesuai. Dengan menggunakan kecepatan paling tinggi yaitu *slag* SiO₂ kecepatan paling rendah yaitu FeO walaupun yang terdeteksi yang paling lambat adalah MnO didapatkan bahwa *slag* yang terbentuk saat $t=65$ s terdapat *slag-slag* yang dominan berukuran kecil maupun besar dan memiliki kecenderungan berbentuk bola dengan jari-jari terkecil hingga $6,75\mu\text{m}$. Selanjutnya pada saat $t=240$ s terdapat *slag* yang mulai beragam dari dari jari jari kecil hingga besar saat $t=300$ s, *slag* yang terbentuk beragam tidak hanya seperti bola namun juga kristalin lainnya dengan jari-jari $21-285\mu\text{m}$ yang merupakan *slag* campuran antara *slag* yang muncul pada cairan dan juga *slag* yang muncul akibat interaksi dengan lingkungan. Setelah waktu $t=300$ s cairan diberikan *slag* remover hingga *slag* dipermukaan bersih. Kemudian cairan diuji kembali dan dihasilkan bahwa tidak ada *slag* yang terbentuk pada cairan tersebut.

KESIMPULAN

Dengan pendekatan Hukum Stokes dan karakteristik dari *slag* pada proses peleburan maka didapatkan kecepatan setiap jenis unsur yang terkandung pada *slag*. Kecepatan ini dapat menentukan waktu kapan seluruh *slag* mencapai permukaan sehingga proses pemberian *slag* remover diberikan pada waktu yang tepat sehingga mengurangi *slag* yang ada pada cairan dan juga *slag* yang akan muncul saat cairan berinteraksi dengan udara atau *lining*. Waktu yang tepat saat *slag* seluruhnya mencapai permukaan pada penelitian ini yaitu saat waktu $t=240$ s.

DAFTAR PUSTAKA

1. Bing, L., Biao, T., Zhen, M., Hanchi, C., & Hongbo, L. 2019. Physical and chemical properties of steel slag and utilization technology of steel slag at home and abroad. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 242(3), 032012.
2. Palod, R., Deo, S. V., & Ramtekkar, G. D. 2017. Review and suggestions on use of steel slag in concrete and its potential use as cementitious component combined with GGBS. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(4), 1026-1035..
3. Suwarno, S. 2010. Pemanfaatan Steel Slag Indonesia Di Bidang Pertanian. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 12(1), 36-41.

4. Mehdilo, A., & Irannajad, M. 2012. Iron removing from titanium slag for synthetic rutile production. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 48(2), 425-439.
5. Wang, G., Qiu, L., Zhang, S., Zhai, X., & Ma, J. Hydrothermal Modification of Granular Steel Slag for Phosphate Removal. In *2011 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*..
6. Labrecque, C., Gagné, M., & Planque, E. 2003. Effect of charge materials on slag formation in ductile iron melts. In Keith Millis World Symposium on Ductile Iron, *American Foundry Soc* (pp. 41-48)..
7. Regordosa, A., & Llorca-Isern, N. 2016. Chemical and structural characterization of slag compounds formed in the melting processes to produce spheroidal graphite cast irons. *International Journal of Metalcasting*, 10(4), 421-434.
8. Matinde, E., Simate, G. S., & Ndlovu, S. 2018. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African institute of mining and metallurgy*, 118(8), 825-844.
9. Piatak, N. M., Parsons, M. B., & Seal II, R. R. 2015. Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*, 57, 236-266.
10. Tüfekçi, M., Demirbaş, A., & Genc, H. 1997. Evaluation of steel furnace slags as cement additives. *Cement and Concrete Research*, 27(11), 1713-1717.
11. Reuter, M., Xiao, Y., & Boin, U. 2004. Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes. In *VII International conference on molten slags fluxes and salts*, *The South African Institute of Mining and Metallurgy* (Vol. 2004, pp. 349-356).
12. Kourounis, S., Tsivilis, S., Tsakiridis, P. E., Papadimitriou, G. D., & Tsibouki, Z. 2007. Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag. *Cement and concrete research*, 37(6), 815-822.
13. Saraswati, K. A. P., & Razif, M. 2020. Potensi pemanfaatan slag aluminium sebagai substitusi semen dalam proses stabilisasi/solidifikasi limbah b3 dengan kajian pustaka (studi kasus: pt. X kecamatan kesamben, jombang). *ENVIROTEK: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 12(2), 53-58.
14. Hildebrand, J. H., & Lamoreaux, R. H. 1976. Viscosity of liquid metals: An interpretation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 73(4), 988-989.
15. American Ceramic Society. 2003. JCPDS-International Centre for Diffraction Data, Swarthmore, PA.