

PROSES DEKARBURISASI *NICKEL PIG IRON*

Adil Jamali*, Rahardjo Binudi, Bintang Adjiantoro
Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI
Gedung 470, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan
E-mail : *adil.jamali@lipi.go.id

Masuk tanggal : 10-06-2014, revisi tanggal : 04-07-2014, diterima untuk diterbitkan tanggal : 18-07-2014

Intisari

PROSES DEKARBURISASI *NICKEL PIG IRON*. Nickel Pig Iron yang disingkat NPI adalah pig iron atau besi mentah yang mengandung nikel < 15 % dengan kandungan fosfor dan belerang lebih besar dari ferronikel. NPI dibuat dari bijih nikel laterite kadar rendah, Ni < 1,8 % yang banyak terdapat di Indonesia. Penggunaan NPI yang utama adalah sebagai bahan baku pembuatan stainless steel dan baja paduan nikel lainnya. Unsur nikel dalam paduan memberikan nilai lebih berupa ketahanan korosi, keuletan dan kekuatan serta sifat mampu las yang lebih baik dari baja biasa yang tidak mengandung nikel. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari proses dekarburisasi NPI dengan kandungan karbon 3 – 4 % menjadi baja laterit berkadar karbon sangat rendah, C < 0,03%. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium skala 200 kg logam cair. Bahan baku NPI dilebur dalam tungku induksi listrik kapasitas 500 kg, kemudian cairan logam dituang ke dalam konverter. Selanjutnya oksigen ditiupkan ke permukaan logam cair menggunakan pipa lance yang berlapis bahan refraktori. Proses dekarburisasi berhasil dilakukan dengan tiupan oksigen 160 kg/ton logam cair dalam waktu 24 menit, dihasilkan baja laterit berkadar karbon 0,01%.

Kata kunci : Nickel pig iron, Logam cair, Oksigen, Dekarburisasi, Baja laterit

Abstract

DECARBURISATION PROCESS OF *NICKEL PIG IRON*. Nickel Pig Iron or NPI is ferronickel containing less than 15% nickel with sulfur and phosphorus levels higher than ferronickel. NPI is made from low-grade laterite nickel ore, Ni < 1.8% which are widely available in Indonesia. The NPI is mainly use as a raw material for making stainless steel and nickel alloy steel. Nickel provides more value in the form of corrosion resistance, ductility, strength and improve weldability properties better than ordinary steel without containing of nickel. The aims of this research are to study decarburisation process of NPI with carbon content 3-4% to produce very low carbon laterite steel, C < 0.03%. The method used was a laboratory-scale experiment for 200 kg of molten metal. The raw material is melted in electric induction furnace 500 kg capacity, then the liquid metal is poured into the converter. Furthermore, oxygen is blown to the surface of molten metal using a lance pipe coated with refractory materials. Decarburisation process was successfully conducted by blowing oxygen 160 kg / ton of molten metal within 24 minutes, producing very low carbon laterite steel where C = 0.01%.

Keywords: Nickel pig iron, Molten metal, Oxygen, Decarburization, Laterite steel

PENDAHULUAN

Dewasa ini Indonesia sedang berusaha meningkatkan nilai tambah mineral termasuk bijih nikel dengan cara mendorong usaha pengolahan bijih mineral menjadi produk dengan nilai ekonomi tinggi. Belum adanya pabrik baja tahan karat sebagai pengguna utama NPI di dalam negeri, membuat daya tawar produsen NPI rendah^[1]. Berdasarkan kebiasaan di China, harga NPI hanya dihitung dari kandungan nikelnya,

sedangkan besi hanya dinilai sebagai bonus yang gratis. Regulasi pemerintah yang menetapkan batas kandungan Nikel dalam NPI dan kandungan besi dalam produk besi paduan, menambah tantangan bagi investor pengolahan bijih nikel. Berdasarkan Kepmen ESDM no. 1 tahun 2014, kandungan minimal Nikel dalam NPI yang boleh diekspor adalah 4%. Secara teknis dari bijih nikel kadar rendah, lebih mudah dihasilkan NPI dengan Ni < 4%. Permasalahan timbul jika dihasilkan produk NPI berkadar Nikel kurang dari

4%. Produk tidak bisa diekspor, sedangkan di dalam negeri belum ada yang menggunakan. Diperlukan teknologi pemanfaatan NPI kadar rendah agar industri hilir pengolahan bijih nikel lebih cepat berkembang. Dengan konteks Indonesia saat ini, teknologi untuk meningkatkan daya saing NPI diantaranya dengan melakukan pemurnian logam cair NPI yang mengandung nikel < 4 %, menjadi paduan baja dengan kadar karbon sangat rendah, C < 0,03 % (baja karbon sangat rendah). Dengan dikuasainya teknologi pembuatan baja karbon sangat rendah (*ultra low carbon steel*), maka teknologi pembuatan baja karbon tinggi, medium dan rendah dapat juga dikuasai.

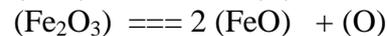
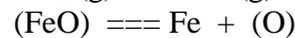
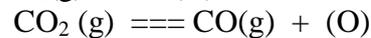
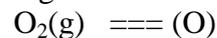
Untuk itu dalam penelitian ini sebagai tahap awal akan dilakukan proses dekarburisasi NPI dengan Ni < 4% dan C = 3-4 % menjadi produk paduan baja nikel dengan kadar C < 0,03 %. Karena baja paduan nikel tersebut berasal dari bijih nikel laterit maka untuk mudahnya disebut sebagai baja laterit.

TEORI DEKARBURISASI

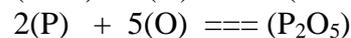
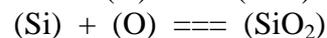
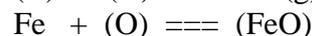
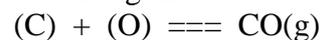
Dekarburisasi adalah proses penghilangan karbon dari logam cair, dalam hal ini paduan besi yang mengandung nikel sehingga memenuhi kadar karbon yang diinginkan. Kandungan karbon diturunkan dari sekitar 3,1 - 4 % menjadi C < 0,03 % menghasilkan baja karbon sangat rendah. Penurunan karbon dilakukan dengan meniupkan oksigen ke dalam cairan logam panas di dalam konverter (Gambar 1)^[2]. Dalam proses dekarburisasi di dalam konverter dibedakan adanya dua daerah kontak antara gas, cairan logam dan slag serta scrap (Gambar 2)^[3]. Pertama daerah cairan dan kedua daerah emulsi. Daerah cairan berada dibagian bawah konverter berisi logam cair dan slag serta gas-gas terlarut. Diatasnya terdapat daerah emulsi berisi campuran slag, butiran logam cair, slag dan gas CO, CO₂ yang membentuk emulsi. Menurut Brooks dan Ramdhani^[4] di kedua

daerah tersebut terjadi reaksi-reaksi kimia yang dapat dikelompokkan sebagai berikut :

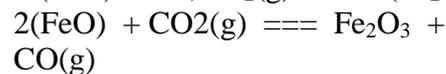
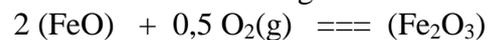
- Reaksi penangkapan oksigen di dalam logam



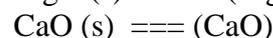
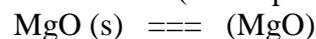
- Reaksi oksidasi elemen elemen di dalam logam



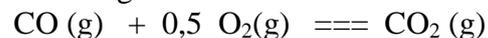
- Oksidasi di dalam slag



- Reaksi Flux (bahan pembentuk slag)



- Reaksi gas



Paralel dengan reaksi di atas, maka elemen Cr dan Ni akan mengalami reaksi sebagaimana elemen Fe dan oksidanya, (FeO). Kemudahan reaksi dapat diperkirakan dari besaran energi bebas Gibbs yang dapat disunting dari diagram Ellingham, ditampilkan dalam Tabel 1. Urutan kemudahan reaksi dengan oksigen adalah Si, Mn, Cr, C, Fe dan Ni. Mengingat besaran energi bebas reaksi Si, Mn, Cr relatif berdekatan, maka pada proses reaksi yang menghasilkan karbon rendah (C < 1%), kandungan unsur-unsur Si, Mn dan Cr akan berkurang lebih kecil atau mendekati persen kandungan unsur C.

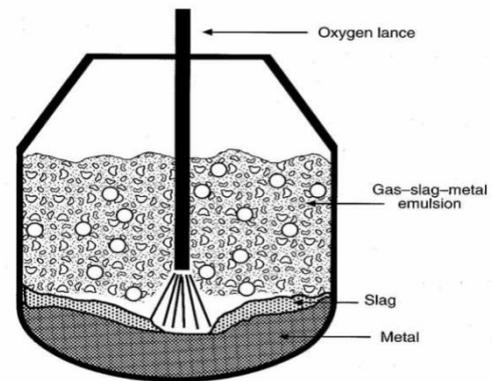
Unsur besi dan nikel diperkirakan juga mengalami pengurangan, namun tidak sebesar pengurangan yang dialami unsur-unsur yang disebutkan sebelumnya.

Salah satu hasil proses dekarburisasi dalam skala komersial diperlihatkan pada Gambar 3^[6].

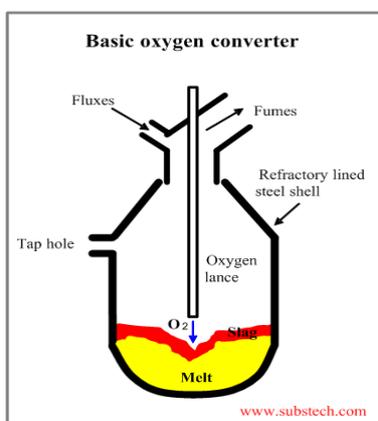
Tabel 1. Energi bebas dibaca dari diagram Ellingham^[5]

No.	Reaksi Kimia Proses Dekarburisasi	Delta G nol pada 1600 °C, KJ/mol O ₂
1.	Si + O ₂ ===== SiO ₂	- 577
2.	2Mn + O ₂ ===== 2 MnO	- 490
3.	4/3 Cr + O ₂ == = 2/3 Cr ₂ O ₃	- 430
4.	C + O ₂ ===== CO ₂	- 400
5.	2 Fe + O ₂ ===== 2 FeO	- 295
6.	2 Ni + O ₂ ===== 2 NiO	- 140

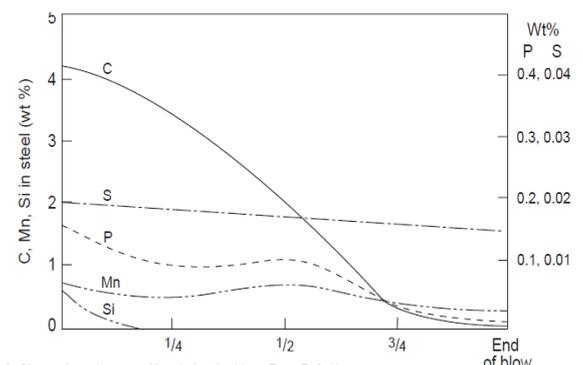
Walaupun proses dekarburisasi telah diterapkan dalam skala industri puluhan tahun yang lalu, namun masih banyak hal yang perlu diketahui, terutama dekarburisasi NPI yang mengandung nikel antara 2 – 4 % dan krom antara 3 - 4 %. Keduanya merupakan unsur padu yang bernilai ekonomi tinggi. Selain itu dewasa ini penelitian proses dekarburisasi dilaksanakan pada skala pilot antara 2 – 5 ton logam cair, atau skala komersial pada konverter berkapasitas > 200 ton^[7]. Dalam percobaan ini dilakukan dekarburisasi dengan kapasitas produk 200 kg logam cair. Hasil penelitian diharapkan dapat dimanfaatkan untuk industri kecil pengecoran baja paduan berkapasitas kecil maupun industri besar.



Gambar 2. Daerah reaksi di dalam konverter^[3]



Gambar 1. Konverter oksigen basa^[2]



i. 9.8 Change in melt composition during the blow. From Ref. 11.

Gambar 3. Perubahan komposisi cairan logam selama injeksi oksigen^[4]

PROSEDUR PERCOBAAN

Bahan

Bahan yang digunakan dalam percobaan ini meliputi NPI, kapur tohor dan 5 buah oksigen dalam botol yang masing-masing

berisi +/- 8 kg, dengan tekanan 125 atm. NPI tersebut adalah produksi PT Indoferro – Cilegon hasil pengolahan bijih nikel laterit Sulawesi menggunakan *blast furnace*. Untuk mengetahui komposisi kimianya, dilakukan analisa sampel logam cair dari NPI yang telah dilebur di tungku induksi sebelum percobaan dekarburisasi. Analisa menggunakan OES dengan hasil sebagai berikut : C = 3,15 %, Si = 3,27 %, P = 0,037 %, S = 0,03 %, Mn = 1,29 %, Ni = 3,27 %, Cr = 3,957 %, V = 0,064 %, Cu = 0,02 %, Ti = 0,074 %, Fe = 84,8 %. Dengan komposisi tersebut, NPI merupakan bahan baku baja paduan nikel yang baik, karena telah mengandung nikel, unsur paduan yang utama.

Peralatan

Beberapa peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tungku induksi listrik berkapasitas 500 Kg, *hoist crane* dengan maksimal beban 3 ton, *ladle transfer* kapasitas 300 kg, konverter 200 kg, penutup konverter dan lance atau pipa untuk memasukkan oksigen ke dalam cairan logam. Lance terbuat dari pipa baja dilapis bahan refraktori.

Untuk mencetak sampel logam, disediakan cetakan pasir. Foto konverter dalam percobaan disampaikan dalam Gambar 4.

Langkah-langkah Percobaan

Percobaan dilakukan dengan langkah langkah sebagai berikut :

- o NPI dimasukkan ke dalam tungku induksi listrik sebanyak 500 kg. Dalam waktu +/- 4 jam, NPI telah cair menjadi besi cair (*hot metal*) yang mengandung nikel pada temperatur 1500 – 1550 °C. Besi cair ini dapat digunakan untuk dua kali percobaan, masing-masing percobaan memerlukan 220 kg logam cair.
- o Ladle, konverter, lance, oksigen dalam botol dan hoist crane, serta cetakan logam dari bahan pasir disiapkan. Ke dalam ladle dimasukkan kapur sebanyak 1 kg agar saat logam cair dituangkan ke ladle dari tungku

induksi, akan terjadi reaksi desulfurisasi antara sulfur dan kapur menjadi slag. Diharapkan, kapur dapat menurunkan kandungan sulfur dalam logam.

- o Logam cair dituangkan ke ladle transfer selanjutnya dituangkan ke konverter sebanyak +/- 220 kg.
- o Peniupan oksigen menggunakan lance hingga oksigen dalam sebuah botol habis. Waktu peniupan dicatat berat oksigen dalam tabung, ditimbang sebelum dan sesudah reaksi.
- o Pengeluaran slag dari dalam ladle, dengan cara penuangan ke atas pasir cetak.
- o Pengambilan sampel logam cair dilakukan dengan cara menuangkan sebagian logam cair dari konverter ke dalam ladle kecil dan mencetaknya di cetakan pasir berukuran 60 x 200 x 50 mm. Ingot yang terbentuk dipotong dalam ukuran 40 x 40 x 40 mm yang dihaluskan dengan ampelas sebelum diuji.
- o Peniupan oksigen ke atas permukaan logam cair dalam konverter dilanjutkan untuk botol oksigen kedua. Setelah oksigen dalam botol habis, dilakukan pengeluaran slag dan pengambilan sampel sebagaimana prosedur sebelumnya.
- o Peniupan oksigen untuk botol ketiga, keempat dan kelima mengikuti prosedur yang sama dengan peniupan oksigen botol kesatu dan kedua.

Sample logam sebelum dan setelah peniupan oksigen diuji komposisi kimianya dengan *optical electron spectrometer* (OES).

HASIL DAN PEMBAHASAN

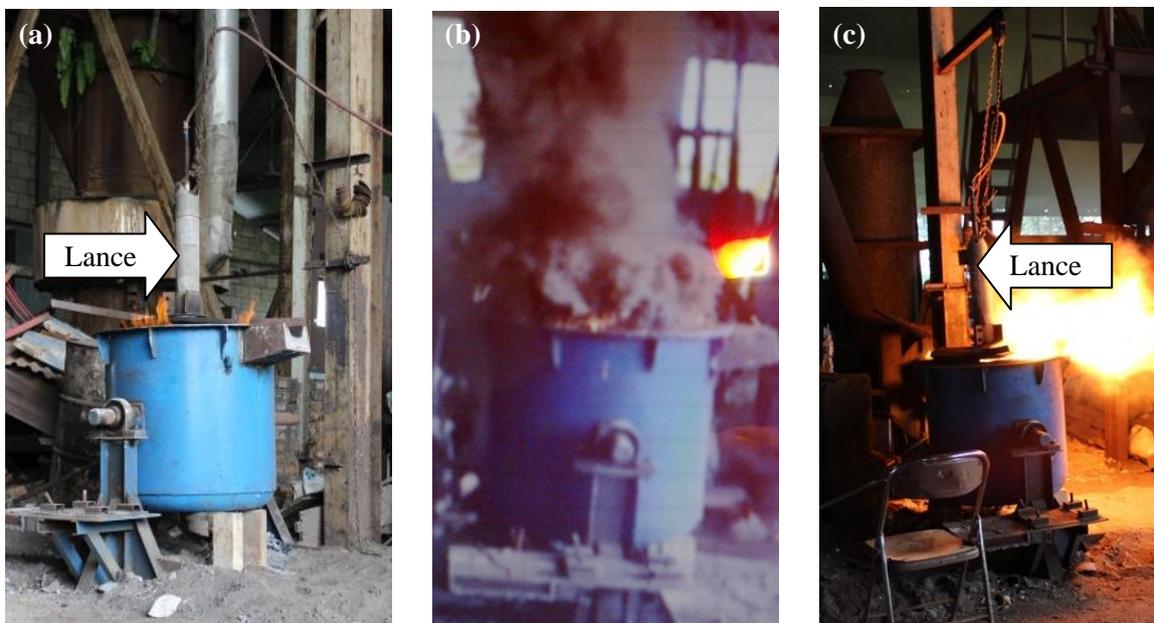
Pengamatan Visual Percobaan Dekarburisasi

Pengamatan visual proses dekarburisasi ditunjukkan dalam Gambar 4(a), 4(b) dan 4(c). Pada Gambar 4(a) ditunjukkan rangkaian peralatan konverter yang telah

diisi besi cair mengandung nikel. Peralatan tersebut terdiri dari tabung konverter berwarna biru, lance dan pipa fleksibel yang menghubungkan lance dengan sumber oksigen. Pada Gambar 4(b) diperlihatkan peristiwa konverting pada menit pertama dimana dari konverter keluar asap hitam pekat bercampur asap kecoklatan. Diperkirakan asap tersebut adalah campuran SiO_2 dan karbon yang tidak terbakar serta kemungkinan oksida Mn dan oksida Cr. Dengan berlangsungnya reaksi antara oksigen dengan cairan logam beserta unsur-unsur di dalamnya, semakin lama kepekatan asap semakin berkurang hingga pada menit-menit terakhir menjadi bersih sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4(c). Pada saat itu kandungan karbon telah melewati 0,03%, batasan baja karbon sangat rendah. Hasil analisa produk baja pada menit ke 24 menunjukkan bahwa telah terbentuk baja dengan kadar karbon 0,01%. Dengan demikian, berlangsungnya reaksi dekarburisasi dapat diikuti dengan mengamati kondisi asap yang terbentuk dari reaksi tersebut.

Pengaruh Waktu Injeksi Oksigen Terhadap % Mn, Si dan C pada Proses Dekarburisasi

Pengaruh waktu injeksi oksigen terhadap karbon, mangan dan silikon ditunjukkan dalam Gambar 5. Terlihat bahwa pola penurunan karbon, mirip dengan hasil dekarborisasi skala industri yang ditunjukkan dalam Gambar 3. Awalnya karbon teroksidasi dengan kecepatan yang rendah kemudian mengalami percepatan hingga mencapai kadar kurang dari 0,5%. Setelah itu mengalami penurunan kecepatan. Dari kadar karbon 3,1 % di dalam logam cair sebelum dekarburisasi, menjadi 0,01% karbon setelah dekarburisasi diperlukan waktu 24 menit. Dengan demikian target percobaan berupa penurunan karbon hingga $\text{C} < 0,03\%$ telah tercapai, bahkan terlampaui hingga didapat baja karbon sangat rendah $\text{C} = 0,01\%$.

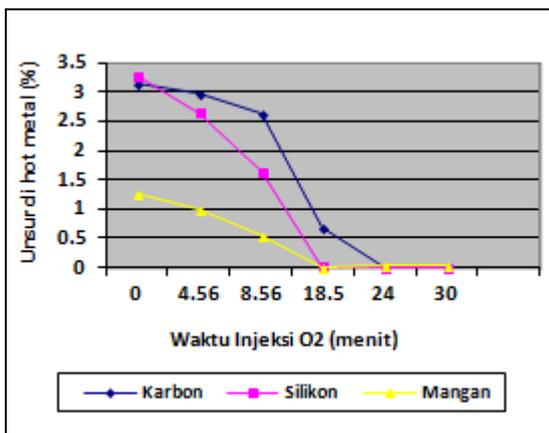


Gambar 4. (a) Konverter sebelum dioperasikan, (b) Konverter pada menit pertama, dan (c) Konverter dimenit-menit akhir operasi

Ketika peniupan oksigen dilanjutkan hingga waktu total peniupan selama 30 menit, didapat persentasi karbon yang

relatif tidak berubah dari $\text{C} = 0,01\%$. Sebagaimana diperkirakan dari termodinamika proses, silikon dan mangan

mengalami reaksi lebih cepat dari karbon. Silikon yang semula berkadar 3,27% di logam cair berkurang menjadi 0,017% dalam waktu 18,5 menit injeksi oksigen. Demikian pula Mangan, dalam waktu yang sama, berkurang dari 1,27% menjadi 0,018%. Hasil percobaan pengaruh waktu dekarburisasi terhadap kandungan elemen Karbon, Mangan dan Silikon ini selanjutnya dapat dimanfaatkan dalam perancangan dan pengoperasian konverter.



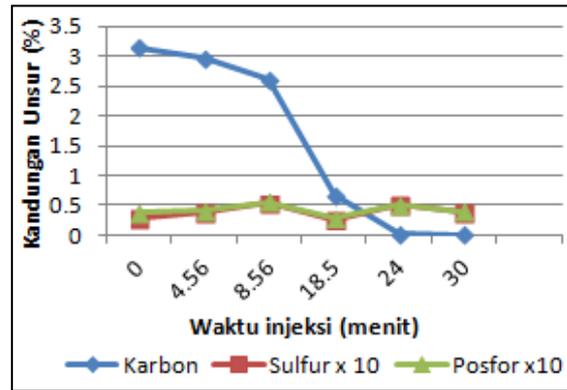
Gambar 5. Pengaruh waktu injeksi oksigen terhadap % Mn, Si dan C pada proses dekarburisasi

Pengaruh Waktu Injeksi Oksigen pada % C, S dan P dalam Proses Dekarburisasi

Persentase belerang sedikit berfluktuasi dari 0,03% menjadi 0,038 % setelah 30 menit injeksi oksigen sebagaimana terlihat dalam Gambar 6. Sedangkan persentase fosfor juga mengalami fluktuasi dari semula 0,037% menjadi 0,039 % diakhir injeksi. Untuk kandungan belerang dan fosfor yang lebih rendah, diperlukan penelitian tersendiri proses pengurangan kedua unsur tersebut.

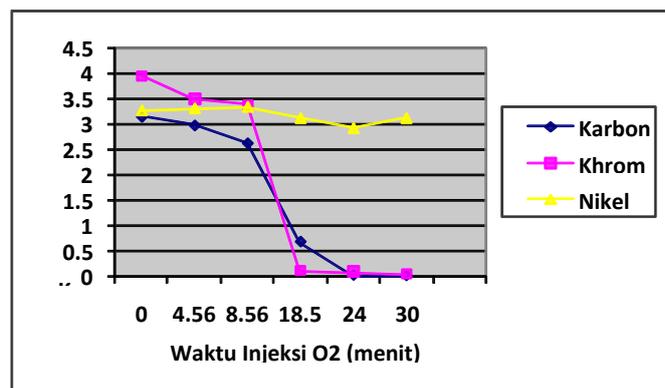
Pengaruh Waktu Injeksi Oksigen pada % C, Cr dan Ni dalam Proses Dekarburisasi

Unsur krom mempunyai pola yang mirip dengan karbon, setelah injeksi 8,56 menit kecepatan reaksinya meningkat hingga mencapai komposisi di bawah 0,1% pada waktu injeksi 24 menit. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 7. Berbeda dengan



Gambar 6. Pengaruh waktu injeksi pada % C, S dan P dalam proses dekarburisasi

nikel yang mengalami penurunan persentase dari 3,4% nikel menjadi 3,1% nikel, yang berarti jumlah nikel bereaksi relatif kecil dibandingkan unsur-unsur lainnya, seperti: karbon, silikon, mangan dan krom. Hal ini disebabkan delta energi bebas reaksi nikel dengan oksigen sebesar -140 KJ/mol O_2 , yang berarti lebih sulit bereaksi dibandingkan reaksi Fe dengan oksigen, dengan $\Delta G = -295 \text{ KJ/mol O}_2$. Karena jumlah Fe jauh lebih banyak dari nikel, maka kinetika reaksinya lebih baik dibanding reaksi nikel dengan oksigen. Oksigen lebih mudah bertemu besi dibanding nikel.

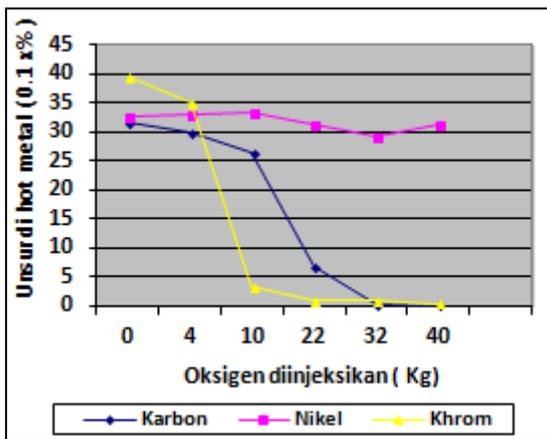


Gambar 7. Pengaruh waktu injeksi oksigen pada % C, Cr dan Ni dalam proses dekarburisasi

Pengaruh Oksigen pada Kandungan C, Ni dan Cr dalam Logam Cair

Dengan hasil percobaan pengaruh penggunaan oksigen (kg) terhadap kandungan unsur C, Cr dan Ni, maka dapat diperkirakan kebutuhan oksigen

untuk kandungan akhir karbon yang dikehendaki. Jika diinginkan baja berkadar C = 0,3% maka dari Gambar 8 diperkirakan jumlah oksigen adalah sebesar 28 kg, pada tekanan antara +/- 3 atm dan laju alir rata-rata 254 l/menit. Terlihat pula unsur krom akan bereaksi dan akan menurun lebih cepat dari karbon. Sementara itu presentase nikel relatif konstan, hanya sedikit penurunannya. Jumlah pemakaian oksigen pada saat terbentuk baja dengan karbon = 0,01 % adalah 32 kg (Gambar 8). Keadaan ini terjadi pada menit ke 24 sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 5, 6 dan 7. Setelah percobaan, jumlah baja yang dihasilkan ditimbang dan diperoleh 200 kg baja. Dengan demikian rasio pemakaian oksigen per kg baja adalah 32 kg oksigen/200 kg baja = 0,16 kg O₂/kg baja atau setara dengan 160 kg O₂ / ton baja.

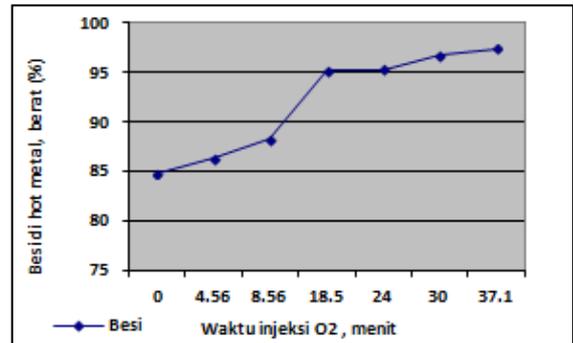


Gambar 8. Pengaruh oksigen pada kandungan C, Ni dan Cr dalam logam cair

Kadar Besi di dalam Logam Cair saat Proses Dekarburisasi

Pengaruh proses dekarburisasi terhadap kadar besi dalam logam cair dituangkan dalam Gambar 9. Dengan delta G yang lebih positif dibanding elemen lain selain nikel maka Fe relatif terlindungi dari oksidasi, sehingga persentase berat relatif, pada akhir reaksi mengalami peningkatan dari semula sebesar 85% menjadi 97%. Sesungguhnya jumlah Fe setelah dekarburisasi juga berkurang dari jumlah sebelum dekarburisasi. Adanya

pengurangan unsur-unsur lainnya seperti C, Si, Mn dan Cr yang jumlahnya lebih banyak dari pengurangan Fe, menyebabkan persentase Fe meningkat.



Gambar 9. Pengaruh waktu injeksi pada kadar besi dalam logam cair

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil studi literatur yang dilanjutkan dengan percobaan dekarburisasi NPI yang berasal dari bijih nikel dalam negeri, dapatlah disampaikan kesimpulan dan saran sebagai berikut.

Kesimpulan :

1. Proses dekarburisasi logam cair NPI telah berhasil dilakukan dari kadar karbon semula 3,1% menjadi baja dengan kadar karbon 0,01%.
2. Persentase kandungan Silikon, Mangan dan krom mengalami penurunan yang signifikan mendekati besaran persentase karbon diakhir proses.
3. Kandungan besi dan nikel mengalami penurunan sedikit, sehingga diakhir proses persentase nikel relatif sama dengan persentase awal, sedangkan persentase besi meningkat dari 85% menjadi 97%.
4. Proses dekarburisasi 200 kg NPI cair berlangsung selama 24 menit untuk mencapai kadar karbon 0,01% dari semula 3,1%. Oksigen yang dibutuhkan adalah 32 kg, atau 160 kg/ton logam cair. Bertambahnya waktu dekarburisasi menjadi 30 menit tidak mengubah persentase karbon dalam produk baja.

Saran :

1. Agar dilakukan penelitian proses desilikonisasi logam cair NPI dan penelitian dekarburisasi yang menyisakan unsur Chrom > 2% dalam produk baja.
2. Perlu dikembangkan konverter skala 500 - 2000 kg untuk industri kecil pengecoran baja, serta konverter penelitian skala pilot untuk pembuatan baja laterit, baja dari bahan baku nikel laterit lokal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Diucapkan terima kasih kepada Bapak Yusuf dan UPT BPML LIPI yang telah menyediakan fasilitas pengecoran, serta Fajar Nurjaman, Zulkifli Ilyas, Sofi dan para teknisi di laboratorium pengecoran logam UPT BPML LIPI atas bantuan pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jamali, Adil. 2013., „Daya Saing Usaha Pengolahan Bijih Nikel dengan Blast Furnace”. *Prosiding Seminar Material Metalurgi 2013*, Pusat Penelitian Metalurgi.
- [2] Kopeliovich, Dmitri. „Basic Oxygen Furnace (BOF)”. http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=basic_oxygen_furnace_bof, diakses 05 Juni 2014)
- [3] Miller T.W., Jimenez J., Sharon A., Goldstein D.A. 1988., Chapter 9 Oxygen Steelmaking Process”. *The AISE Steel Foundation*, Pittsburgh, PA, hal 496.
- [4] Miller T.W., Jimenez J., Sharon A., Goldstein, D.A. 1988., Chapter 9 Oxygen Steel making Process”. *The AISE Steel Foundation*, Pittsburgh, PA, hal 497.
- [5] Ellingham Diagrams, http://web.mit.edu/2.813/www/readings/Ellingham_diagrams.pdf, diakses 05 Juni 2014)
- [6] Brooks, G.A., Ramdhani, M.A. 2013., „Current Developments in Oxygen Steel making”. *3rd Indonesian Iron and Steel Conference*, Institut Teknologi Bandung, 26 – 27 September 2013, II.1, pp. 2 – 12.
- [7] Ogasawara, Yasushi, Miki, Yuji, Uchida, Yuichi, Kikuchi, Naoki. 2013., „Development of High Efficiency Dephosphorization System in Decarburization Converter Utilizing Fe₂O Dynamic Control”. *ISIJ International*, Vol. 53, No. 10, pp. 1786–1793.