PENGARUH PENAMBAHAN ADITIF MgCl_2 PADA PROSES REDUKSI SELEKTIF BIJIH LIMONIT

THE EFFECT OF ADDITIVE MgCl_2 ON THE SELECTIVE REDUCTION PROCESS OF LIMONITE ORE

Achmad Shofi¹, Fajar Nurjaman², Fathan Bahfie², Eliyani³, Syafriadi³

¹ Dinas Pekerjaan Umum dan Tata Ruang, Jl. Diponegoro No.101, Kutoharjo, Kec. Rembang, Kabupaten Rembang, Jawa Tengah 59211

² Balai Penelitian Teknologi Mineral, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jl. Ir. Sutami Km. 15 Lampung Selatan, Lampung 35361

³ Departemen Fisika FMIPA, Universitas Lampung, Jl. Prof. Dr. Soemantri Brojonegoro No.1 Gedung Meneng, Bandar Lampung, Lampung 35145

Email : fathanbahfie@gmail.com/fathan.bahfie@lipi.go.id

Diterima : 10-09-2019

Direvisi : 14-11-2019

Disetujui : 11-12-2019

ABSTRAK

Bijih laterit limonit adalah oksida besi, kobalt dan kromium namun mengandung silika dan magnesium yang rendah (Fe 15-32 %, MgO < 10%) sehingga diperlukan proses pemisahan nikel dan besi. Reduksi selektif dapat menjadi rujukan proses yang baru dalam pemisahan FeNi pada limonit. Peningkatan kadar dan *recovery* nikel dengan variasi temperatur, waktu tahan reduksi dan penambahan konsentrasi reduktor melalui proses reduksi selektif bijih limonit menggunakan antrasit dan aditif MgCl_2 menjadi solusi dalam pemisahan besi dan nikel pada limonit. Limonit dikarakterisasi dengan XRF dan XRD lalu dicampur dengan batubara antrasit dan aditif MgCl_2 dan dibentuk *pellet*. Setelah itu dikeringkan pada suhu 120 °C selama 4 jam dan direduksi dengan variasi suhu 950 °C, 1050 °C, dan 1150 °C dan waktu tahan 60, 90, dan 120 menit dan didinginkan secara cepat. Selain itu, dilakukan proses pengeringan dan dihaluskan untuk proses pemisahan konsentrat dan *tailing*. Proses pemisahan dengan magnet dilakukan dengan metode basah. Lalu kedua sample dikarakterisasi XRF, XRD dan SEM-EDS. Hasil karakterisasi XRF dari konsentrat menunjukkan nilai optimum persen berat dan *recovery* nikel yaitu pada temperatur 1050 °C dengan reduktor 10 % dan waktu tahan reduksi selama 120 menit dengan kadar dan *recovery* nikel sebesar 2,37 %berat dan 56,94 %. Pola Difaktogram XRD hasil reduksi selektif menunjukkan fasa yang dominan seperti *fayalite* (Fe_2SiO_4), *magnesioferrite* (Fe_2MgO_4), dan *iron nickel* (Fedan Ni). Ukuran partikel feronikel yang optimal sebesar 11,8 μm .

Kata Kunci: aditif, feronikel, limonit, reduksi selektif, reduktor, temperatur, waktu tahan.

ABSTRACT

Limonite is ferro-oxide, cobalt and chromium mineral and also has silica and low magnesium (Fe 15-32%, MgO < 10%) so it needs a process to extract ferronickel on its. The selective reduction is the new and better way to extract ferronickel from limonite. Increasing weight percent and recovery of nickel with the variation of temperature, reduction holding time, and percentage of reductor on the limonite ore with the antracite and additive MgCl_2 by using selective reduction process. Limonite was characterized by XRD and XRF, mixed with additive and coal, and pelletized. It was dried at 120 °C for 4 hours and annealed at temperature 900 °C, 1050 °C, and 1150 °C for 60, 90, and 120 minutes. According XRF results, the optimum result of thw weight percent and recovery nickel is in the temperature 1050 °C, 10 % reductor, and reduction holding time for 120 minutes those are 2.37 wt%

and 56.94 %. The dominant phases are fayalite (Fe_2SiO_4), magnesioferrite (Fe_2MgO_4), dan iron nickel (Fe dan Ni) with the grain size of ferronickel is 11.8 μm .

Keyword: additive, ferronickel, limonite, selective reduction, reductor, temperature, holding time.

PENDAHULUAN

Indonesia mempunyai kekayaan alam yang cukup melimpah seperti mineral logam. Beberapa mineral logam yang dihasilkan dari industri pertambangan berupa timah, nikel, tembaga, emas, perak dan lain-lain. Berdasarkan data Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Indonesia memiliki sumberdaya nikel sebesar 2.633 juta ton nikel (Virman et al., 2014).

Nikel adalah salah satu logam yang paling penting dan memiliki banyak aplikasi dalam dunia industri. Bijih nikel diklasifikasikan menjadi dua yaitu bijih nikel laterit dan bijih nikel sulfide. Bijih nikel laterit dihasilkan dari pelapukan batuan ultramafik dengan kandungan zat besi dan magnesium yang cukup tinggi dan biasanya terdapat di daerah tropis maupun subtropis (Astuti et al., 2012). Bijih nikel sulfida terbentuk melalui proses vulkanik atau hidrotermal dan banyak mengandung tembaga dan kobalt, dan mengandung sedikit logam mulia seperti emas, platinum, palladium dan rhodium (Pournaderi, 2014 : 195). Sebanyak 62 % nikel digunakan sebagai bahan baku pembuatan baja anti karat (*stainless steel*). Selain itu, nikel juga digunakan sebagai bahan baku pembuatan *alloy steels* dan *non-ferrous alloy* sebanyak 18 % (Barkas, 2010). Nikel (Ni) merupakan jenis logam yang memiliki peran penting dalam kehidupan sehari-hari dan memiliki banyak aplikasi dalam dunia industri. Nikel biasa digunakan untuk logam paduan seperti stainless steels karena dapat meningkatkan ketahanan korosi dan panas serta ketangguhan (Henpristian et al., 2014 : 205).

Laterit adalah produk hasil pelapukan batuan secara kimiawi yang berlangsung dalam waktu yang panjang pada kondisi iklim basah atau lembab. Laterit dapat diproses untuk menghasilkan nikel. Pada dasarnya batuan laterit dapat dibagi menjadi dua lapisan, yaitu lapisan limonit dan saprolit (Yildirim et al., 2012 : 337). Salah satu pemanfaatan bijih nikel laterit yaitu sebagai bahan dasar pembuatan ferronikel (Prasetyo dan Puguh, 2011 : 123). Ada dua jenis nikel laterit yaitu yang pertama bijih nikel limonit yang diperkaya oleh zat besi, namun mengandung silika dan magnesium yang rendah (Fe 15-32 %, $\text{MgO} < 10\%$). Komponen utama dari bijih laterit limonit adalah oksida besi, kobalt dan kromium (Kose, 2011 : 195). Dan bijih nikel saprolit yang mengandung zat besi yang lebih rendah dengan magnesium yang lebih tinggi ($\text{Fe} < 12\%$ dan $\text{MgO} > 25\%$). Bijih laterit saprolit disebut sebagai *garnierite* (Pournaderi, 2014 : 195).

Proses segregasi adalah teknik inovasi yang dapat dilakukan pada nikel laterit untuk meningkatkan kadar dan perolehan nikel dalam konsentrat feronikel, dimana akan terjadi proses pemisahan secara selektif reduksi Ni, Co, Fe kedalam logam melalui gas klorida. Penggunaan natrium klorida (NaCl) sebagai bahan yang digunakan untuk meningkatkan perolehan kembali dari nikel, dimana kondisi optimum diperoleh dengan mencampurkan bijih laterit dengan 11 % residu minyak sebagai pereduksi dan 4 % NaCl (Iwasaki, 1972).

Penelitian dengan mencampurkan bijih nikel laterit, magnesium klorida (MgCl_2) dan kokas dengan kondisi optimal didapat pada mencampurkan 6 % MgCl_2 , 2 % kokas pada temperatur 980 °C selama 90 menit menghasilkan kadar dan perolehan kembali nikel masing-masing 5,25 % dan 91,5 %. Namun semua penelitian diatas dilakukan pada bijih nikel saprolit dan belum diujicobakan pada bijih nikel limonit (Liu et al., 2010 : 82). Oleh karena itu, penelitian limonit yang dilakukan dengan metode reduksi selektif dengan variasi temperatur, waktu tahan, dan jumlah batubara jenis antrasit serta penambahan aditif magnesium klorida.

BAHAN DAN METODE

Bahan Penelitian

Pada penelitian ini sebuah bijih nikel laterit kadar rendah dari Torobulu, Sulawesi Tenggara digunakan dalam penelitian ini. Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu limonit, aditif MgCl_2 , batubara (antrasit) dari padang, resin dan air. Pada tahap preparasi sampel komposisi kimia laterit dianalisis dengan XRF (*X-Ray Fluorence*) disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Kimia Bijih Nikel Laterit Kadar Rendah

Unsur	Ni	Fe	Si	Mg	Al	Ca	Cr	Mn	Co
Mass (%berat)	1,4	50,5	16,5	1,81	4,86	0,177	2,68	0,847	0,0662

Dapat diketahui bahwa hasil XRF kadar nikel 1,4 %berat, kadar besi 50,5 %berat dan magnesium yang rendah 1,81 %berat. Ini mengindikasikan bijih nikel laterit yang digunakan adalah jenis nikel laterit kadar rendah (limonit), yang kemudian diuji dengan menggunakan XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk mengetahui fasa.

Metode Penelitian

Bijih limonit digerus dan diayak sampai lolos ukuran 100 mesh lalu dikeringkan dalam vakum pada 100 °C dan dicampur dengan bahan aditif MgCl_2 10 % serta variasi reduktor 5 %, 10 % dan 15 % sehingga dibentuk menjadi pelet. Pembentukan pelet dari campuran sampel seperti bola-bola dengan ukuran diameter 10-15mm. Tahap pereduksian dilakukan dengan variasi temperatur reduksi sebesar 950 °C, 1050 °C dan 1150 °C dan variasi waktu tahannya sebesar 60 menit, 90 menit dan 120 menit. Setelah itu, material didinginkan dengan cepat (*quench*), dikeringkan, digerus, dan dikarakterisasi kembali dengan menggunakan XRD dan SEM (*scanning electron microscope*). Setelah itu, material digerus sampai ukuran 200 mesh dan dilakukan pemisahan konsentrat dan *tailing* dengan magnetik separator lalu dikarakterisasi kembali dengan XRF dan tahapan *tailing* dianalisis sama dengan konsentrat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Temperatur Reduksi Terhadap Kadar *Recovery* Besi Dan Nikel

Hasil pengujian XRF sampel pengaruh variasi temperature reduksi pada konsentrat dengan penambahan aditif 10 % MgCl_2 pada waktu reduksi 90 menit dan reduktor 10% terhadap kadar Fe dan Ni serta *recovery* Fe dan Ni disajikan pada Gambar 1. Pada Gambar 1 kadar feronikel menunjukkan bahwa kadar Fe dalam konsentrat yang diperoleh semakin meningkat seiring bertambahnya temperatur (Zhou et al., 2015 : 1). Hal ini berbanding terbalik dengan kadar Ni yang dihasilkan, dimana pada temperatur 950 °C terjadi kenaikan kadar nikel 1,81 %berat, kemudian pada temperatur 1050 °C mengalami kenaikan 2,25 %berat Ni dan pada temperatur 1150 °C mengalami penurunan 1,88 %berat. Hal ini dapat terjadi karena kadar nikel bisa naik karena adanya pyrohydrolysis NaCl yang membentuk HCl dimana dengan naiknya temperatur maka gas HCl yang dihasilkan akan meningkat. Kadar nikel yang lebih banyak akan mempercepat proses kloridasi dari oksida logam. Pada temperatur 1100-1200 °C akan mengalami penurunan, jika temperatur terlalu tinggi maka perpindahan molekul logam akan naik sehingga menyebabkan kadar Fe dan Ni menurun (Zhou et al., 2015 : 1).

Gambar 1. Hasil pengujian XRF pengaruh variasi temperatur terhadap (a) kadar dan (b) *recovery* dari besi dan nikel.

Gambar 2 menjelaskan bijih nikel setelah direduksi dengan penambahan aditif magnesium klorida dan variasi temperatur 950 °C, 1050 °C, dan 1150 °C difraksi feronikel meningkat seiring dengan bertambahnya temperatur reduksi hingga 1150 °C. Selain itu, puncak magnesioferrite (Fe_2MgO_4) menurun seiring dengan meningkatnya temperatur. Produk ini dapat menunjukkan bahwa temperatur reduksi yang tinggi dapat meningkatkan pembentukan paduan feronikel dan menghilangkan mineral pengotor (Zhou et al., 2015 : 1). Penelitian ini juga menyimpulkan bahwa puncak *magnesium oxide* menurun seiring dengan bertambahnya temperatur, karena Mg akan bereaksi dengan O_2 membentuk MgO sehingga pada temperatur 1150 °C sudah tidak terlihat lagi.

Gambar 2. Pola Difaktogram XRD pada pengaruh variasi temperatur reduksi 950 °C (hijau), 1050 °C (biru), dan 1150 °C (ungu) terhadap perubahan fasa bijih hasil reduksi dengan 10 % MgCl_2 pada waktu 90 menit dan reduktor 10 % ($\blacktriangle$ =olivine, $\circ$ =magnesioferrit, $\diamond$ =quartz, $\blacklozenge$ =iron-nickel, $\bullet$ =cristobalite, $\square$ =fayalite, $*$ =magnesium oxide, ∇ =pigeonite).

Tabel 2. Perhitungan *rietveld refinement* pengaruh variasi temperatur.

Senyawa	Kandungan	Jumlah (%)		
		950 °C	1050 °C	1150 °C
Magnesioferrite	Fe_2MgO_4	51,0	29,0	14,5
Magnesium Oxide	MgO	7,0	-	-
Olivine	FeMgSiO_4	38,2	-	-

<i>Iron Nickel</i>	FeNi	1,6	20,1	29,1
<i>Silicon</i>	Si	2,2	-	-
<i>Fayalite</i>	Fe ₂ SiO ₄	-	50,9	-
<i>crystalobolite</i>	SiO ₂	-	-	1,9
<i>Pigeonite</i>	FeMgSiO ₃	-	-	44,6

Pengaruh Waktu Tahan Reduksi Terhadap Kadar Dan *Recovery* Besi Dan Nikel

Hasil pengujian XRF sampel pengaruh variasi waktu tahan reduksi pada konsentrat dengan penambahan aditif 10 % MgCl₂ pada temperatur 1050 °C dan reduktor 10 % terhadap kadar Fe dan Ni serta *recovery* Fe dan Ni pada Gambar 3. Kadar Ni meningkat secara bertahap dengan peningkatan waktu tahan reaksi hingga 90 menit dan mencapai maksimum. Hal ini dapat terjadi karena nikel dapat larut dalam air dan kemudian hilang dalam pemisahan magnetik basah. Semakin lama waktu reduksi, kadar Ni dalam konsentrat semakin naik sedangkan kadar Fe hanya naik hingga waktu tertentu, lalu kemudian turun. Hal ini terjadi karena semakin lama waktu reduksi, maka jumlah CO akan meningkat dan menyebabkan oksida besi yang tereduksi semakin banyak. Kemudian pada Gambar 3 (b) *recovery* Fe dan Ni diatas menunjukkan bahwa waktu tahan reduksi mempengaruhi *recovery* yang didapatkan. *Recovery* Fe dan Ni semakin menurun seiring bertambahnya waktu tahan reduksi (Zhou et al., 2015 : 1). Pada waktu 60 menit diperoleh *recovery* Fe dan yaitu Ni 38,78 % dan 48,37 %, pada waktu 90 menit atau lebih cenderung menurun seiring bertambahnya waktu tahan reduksi, kemudian naik lagi pada waktu tahan 120 menit dengan perolehan *recovery* Fe dan Ni yaitu 41,69 % dan 56,94 %.

Gambar 3. Hasil pengujian XRF pengaruh variasi waktu tahan terhadap (a) kadar dan (b) *recovery* dari besi dan nikel

Pada Gambar 4 menerangkan pada waktu tahan 60 menit terlihat muncul peak dari *olivine* (FeMgSiO₄) yang cukup tinggi, namun kemudian menghilang pada sampel 90 menit dan 120 menit. *Olivine* pada 60 menit akan berubah menjadi *fayalite* (Fe₂SiO₄) pada waktu tahan 90 menit dan *fayalite magnesian* (FeMgSiO₄) pada waktu tahan 120 menit.

Gambar 4. Pola Difaktogram pada pengaruh variasi waktu tahan reduksi 60 menit (hijau), 90 menit (biru), dan 120 menit (merah) terhadap perubahan fasa bijih hasil reduksi dengan 10 % $MgCl_2$ pada temperatur 1050 °C dan reduktor 10 % ($\blacktriangle$ =*olivine*, $\bigcirc$ =*magnesioferrit*, $\blacksquare$ =*fayalite magnesian*, $\blacklozenge$ =*iron-nickel*, $\square$ =*fayalite*).

Tabel 3. Perhitungan *rietveld refinement* pengaruh variasi waktu tahan.

Senyawa	Kandungan	Jumlah (%)		
		950 °C	1050 °C	1150 °C
<i>Iron Nickel</i>	FeNi	16,0	20,1	19,5
<i>Magnesioferrite</i>	Fe ₂ MgO ₄	19,3	29,0	26,0
<i>Olivine</i>	FeMgSiO ₄	53,0	-	-
<i>Fayalite</i>	Fe ₂ SiO ₄	-	50,9	-
<i>Fayalite Magnesian</i>	FeMgSiO ₄	-	-	53,0

Pengaruh Jumlah Reduktor Terhadap Kadar Dan *Recovery* Besi Dan Nikel

Hasil pengujian XRF sampel pengaruh variasi jumlah reduktor pada konsentrat dengan penambahan aditif 10 % $MgCl_2$ pada temperatur 1050 °C dan waktu tahan 90 menit terhadap kadar Fe dan Ni serta *recovery* Fe dan Ni. Pada Gambar 5, ini menunjukkan bahwa dengan reduktor sebanyak 5 %, didapatkan kandungan logam nikel sebesar 2,22 %berat. Ketika reduktor ditambahkan menjadi 10 %, kandungan logam nikel naik dengan signifikan menjadi 2,25 %berat. Lalu penurunan terjadi ketika jumlah reduktor ditambahkan lagi menjadi 15 %, namun penurunan tidak terlalu signifikan yaitu menjadi 1,88 %berat. Selain dari kandungan logam nikel, perolehan nikel juga mengalami penurunan apabila reduktor semakin banyak. Kemudian untuk logam besi, nilai kandungannya juga turun ketika reduktor ditambahkan dari 5 % hingga 15 %, namun penurunannya tidak terlalu berarti. Selain itu, perolehan besi lebih menurun seiring ditambahkannya reduktor (German et al., 2009 : 1).

Gambar 5. Hasil pengujian XRF pengaruh variasi jumlah reduktor terhadap (a) kadar dan (b) *recovery* dari besi dan nikel.

Pada Gambar 6 menunjukkan bahwa hasil reduksi dengan variasi jumlah reduktor untuk peak *iron nickel* intensitas tertinggi berada pada reduktor 5 %. Hal ini dapat dijelaskan bahwa dengan semakin meningkatnya jumlah reduktor maka gas pereduksi (gas CO) yang dihasilkan semakin banyak, sehingga besi oksida yang berubah menjadi besi logam semakin banyak juga dan mengakibatkan kadar nikel yang dihasilkan menjadi menurun (Elliott et al., 2017 : 166).

Gambar 6. Pengaruh jumlah reduktor 5 % (hijau), 10 % (biru), dan 15 % (merah) terhadap perubahan fasa bijih hasil reduksi dengan 10 % MgCl_2 pada temperatur 1050 °C dan waktu 90 menit (◆=*iron-nickel*, □=*fayalite*, ○=*magnesioferrit*, ☆=*quartz*).

Tabel 4. Perhitungan *rietveld refinement* pengaruh variasi jumlah reduktor.

Senyawa	Kandungan	Jumlah (%)		
		5 %	10 %	15 %
<i>Iron Nickel</i>	FeNi	24,2	20,1	23,6
<i>Magnesioferrite</i>	Fe_2MgO_4	27,0	29,0	29,7
<i>Fayalite</i>	Fe_2SiO_4	45,4	50,9	46,7
<i>Quartz</i>	SiO_2	3,4	-	-

Karakterisasi SEM-EDS

Hasil pengujian sampel pengaruh variasi jumlah reduktor menggunakan peralatan SEM-EDS. Berdasarkan Gambar 7 dapat menjelaskan semakin tinggi kadar reduktor, ukuran partikel feronikel yang terbentuk semakin besar. Rata-rata ukuran partikel pada kadar reduktor 5 % adalah 11,1 μm , 10 % reduktor 11 μm , dan terbesar pada 15 % reduktor yaitu 11,8 μm . Selain itu, penambahan jumlah reduktor tidak berpengaruh terhadap besaran butir tetapi berpengaruh terhadap jumlah butir yang semakin banyak dan sebaran yang lebih merata. Dari rata-rata tiga besaran butir dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambahnya jumlah reduktor tidak menyebabkan terjadinya perubahan besar butir yang dihasilkan.

Gambar 7. Hasil SEM bijih setelah reduksi dengan aditif 10 % MgCl_2 pada temperatur 1050 °C, waktu reduksi 60 menit, dan variasi jumlah reduktor, yaitu (a) 5, (b) 10, dan (c) 15 %.

Pada Gambar 8(a) menjelaskan ketiga titik yang terobservasi pada sampel antara lain yaitu titik 1 (putih) adalah *ferronickel* (abu-abu terang) adalah olivine (FeMgSiO_4) dan fayalite (Fe_2SiO_4), serta titik 2 (abu-abu) dan 3 (hitam) dengan unsur penyusun berupa Fe, Mg, Al, Si dan O adalah pengotor berdasarkan Tabel 5.

Gambar 8. (a) Hasil SEM setelah reduksi dengan aditif pada temperatur 1050 °C, waktu 90 menit, reduktor 15 %, (b) Spektrum EDS daerah 1 pada gambar (a), (c) Spektrum EDS daerah 2 pada gambar (a), dan (d) Spektrum EDS daerah 3 pada gambar (a)

Tabel 5. Hasil SEM EDS pengaruh variasi jumlah reduktor

Unsur	Titik 1	Titik 2	Titik 3
C	7,14 %	9,52 %	24,83 %
Fe	88,22 %	38,04 %	42,71 %
Ni	4,64 %	-	-
O	-	33,85 %	19,78 %
Mg	-	3,70 %	1,71 %
Al	-	5,85 %	3,13 %
Si	-	9,04 %	5,14 %
Cr	-	-	2,69 %

KESIMPULAN

Kadar Fe dalam konsentrat semakin meningkat dengan menaikkan temperatur. Kadar Ni tertinggi dalam konsentrat 2,25 %berat pada temperatur 1050 °C dan reduktor 10 %; dan *recovery* 64,15 % pada temperatur 950 °C. Ukuran partikel optimal pada temperatur 1150 °C dan reduktor 15 % sebesar 11,8 µm. Semakin lama waktu tahan reduksi maka akan mempengaruhi kadar Fe dan Ni dalam konsentrat yang diperoleh. Kadar Ni tertinggi dalam konsentrat 2.37 %berat pada temperatur 1150 °C dan Kadar Fe dan Ni mengalami penurunan ketika konsentrasi reduktor ditambahkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi untuk pendanaan penelitian ini melalui Insentif Sistem Inovasi Nasional (INSINas) program 2019 dengan nomor : 15/INS-1/PPK/E4/2019.

DAFTAR PUSTAKA

- Astuti, W., Zulfiadi, Z., Shofi, A dan Fajar, N. 2012. Pembuatan Nickel Pig Iron (NPI) dari Bijih Nikel Laterit Indonesia menggunakan Mini Blast Furnace. *Seminar Insinas 2012*.
- Barkas, J. 2010. Drivers and Risk for Nickel Demand. 7th China Nickel Conference. Shanghai.
- Elliott, R., Pickles, C. A. dan Peacey, J. 2017. Ferronickel particle formation during the carbothermic reduction of a limonitic laterite ore. *Minerals Engineering*. Elsevier Ltd, 100 : 166–176. doi: 10.1016/j.mineng.2016.10.020.
- German, R., Suridan, P., Park, S. 2009. Review: liquid phase sintering. *Journal of Materials Science* vol. 44, no. 1 : 1-39.
- Henpristian, Yopy., Iwan D.A dan Soesaptri O. 2014. Pengaruh Waktu Reduksi dan Komposisi Pelet terhadap Persen Fe Metal dan Persen Ni Feni Spons dari Bijih Nikel Limonit Menggunakan Simulator Rotary Kiln. *Majalah Metalurgi*. Vol 29.3.2014, ISSN 0126-3188 : 205-214.
- Iwasaki, I. (1972, April 18). *Patent No. 3,656,935*. United States.
- Kose, S. 2010. Hydrometallurgical Processing of Lateritical Nickel Ores.(Thesis). *Metallurgical and Materials Engineering* : 195.
- Liu, W.-r., Li, X.-h., Hu, Q.-y., Wang, Z.-x., Gu, K.-z., Li, J.-h., & Zhang, L.-x. 2010. Pretreatment study on chloridizing segregation and magnetic separation of low-grade nickel laterites. *Trans. Nonferrous Metallurgical Society of China* : pp 82-86.
- Pournaderi, S. 2014. Optimization of Ferronikel Reduction from Nickel Laterite Ores. *Thesis: School of Natural and Science* : 195.
- Prasetyo, A., Puguh. 2011. Peningkatan Kadar Nikel dan Besi dari Bijih Nikel Laterit Kadar Rendah Jenis Saprolit untuk Bahan Baku NPI. *Jurnal Metalurgi*. Vol. 26.No. 3 : 123-130.
- Virman., Endang, H., Risal. 2014. Penentuan Profil Nikel Laterit Menggunakan Metode Geolistrik Tahanan Jenis Daerah Entrop Kota Jayapura. *Vol. 5 No. 1 ISSN: 2087-0922*.
- Yildirim, H., Turen, A dan Yucel, O. 2012. Nickel Pig Iron (NPI) Production from Domestic Lateritic Nickel Ores Using Induction Furnace. *International Iron & Steel Symposium* : 337-338.
- Zhou, S., Wei, Y., Li, B., Wang, H., Ma, B., Wang, C., 2015. Chloridization and Reduction Roasting of High-Magnesium Low-Nickel Oxide Ore Followed by Magnetic Separation to Enrich Ferronickel Concentrate. *Metallurgical and Materials Transactions B* : 1-9.