

PENGOLAHAN NIKEL LATERIT SECARA PIROMETALURGI: KINI DAN PENELITIAN KEDEPAN

Iwan Setiawan

Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI- Teknik Metalurgi dan Material UI
Gedung 470 Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang Selatan, 15314

ABSTRAK

Cadangan nikel saat ini 70% adalah jenis laterit dan sisanya sulfida, dan dengan penurunan cadangan sumber nikel sulfida maka praktis pengembangan diarahkan ke pemanfaatan nikel laterite sebagai sumber nikel. Terdapat tiga pilihan proses pirometalurgi nikel laterite komersial saat ini yaitu pengolahan menjadi feronikel jenis shot/ingot dan feronikel luppen, pengolahan nikel matte dan pengolahan menjadi nickel pig iron (NPI).

Produksi feronikel dari bijih laterit secara pirometalurgi memerlukan energi lebih tinggi dibanding hidrometalurgi, karena pada prakteknya bijih laterit atau bijih pra-reduksi langsung dilebur untuk menghasilkan sejumlah kecil produk feronikel dan sejumlah besar slag. Untuk bijih laterit kandungan nikel minimum yang menguntungkan untuk diolah secara pirometalurgi adalah 1,8%, padahal lebih dari 50% cadangan nikel laterit mempunyai kandungan < 1,45%. Pertimbangan utama dalam pirometalurgi adalah kebutuhan energi dan kualitas bijih. Dari tiga proses utama pengolahan nikel secara pirometalurgi, proses yang mempunyai efisiensi energi paling tinggi yaitu *direct reduction* dalam proses luppen. Permasalahan pada pembuatan feronikel luppen penggunaan antrasit, kontrol *moisture* yang harus sensitif dan sangat tergantung asal bahan baku diperoleh. Permasalahan pada proses NPI yaitu dari harga produknya sendiri yang sangat sensitif, sedangkan pada pembuatan nikel-matte dan feronikel shot/ingot mempunyai masalah utama dalam tingginya kebutuhan energi.

Dengan permasalahan tersebut diatas tantangan penelitian kedepan dalam bidang pengolahan pirometalurgi nikel yaitu peningkatan kadar nikel dalam bijih awal, untuk memenuhi aspek ekonomi, penurunan temperatur reduksi tetapi pemisahan produk masih bisa dilakukan, substitusi reduktor dengan *low-grade coal*, peningkatan efisiensi *electric furnace* pada proses NPI.

Kata kunci: laterit, pirometalurgi, feronikel, reduksi, energi

ABSTRACT

Nickel reserves is currently 70% of laterite type and sulphide as remaint, and with a reduction in reserves of nickel sulphide resources directed to the development of the practical utilization of nickel laterite as a source of nickel. There are three current commercial options of pyrometallurgy process of nickel laterite: processing into ferronickel type of shot / luppen ingot and ferronickel, nickel matte processing and processing into nickel pig iron (NPI).

Production of ferronickel from lateritic ores with pyrometallurgy are require higher energies than hydrometallurgy, because in practice laterite ore carried out with direct reduction of pre-melted to produce small amounts of ferronickel and a large amount of slag. For a minimum nickel content laterite ore favorable for processed pyrometallurgy was 1.8%, whereas more than 50% reserves of nickel laterite has a content of <1.45%. Pyrometallurgy is a major consideration in energy needs beside quality of the ore. Since three main pyrometallurgy processing oh nickel, the direct reduction luppen process has the highest energy efficiency. Problems in the manufacture of ferronickel luppen use of anthracite, moisture control should be sensitive and highly dependent origin of the raw material was obtained. Problems on the NPI process is the price of its products was very sensitive, whereas in the manufacture of nickel-matte and ferronickel shot / ingot has a major problem in the high energy requirements.

With the above issues challenge future research in the field of processing pyrometallurgy nickel that elevated levels of nickel in ore, thus meeting the economic aspect, a decrease in the temperature of the reduction but the separation can still be done, and the substitution of a reductant with a low grade and and increase the efficiency of electric furnaces in the process of NPI.

Keywords : laterite, pyrometallurgy, ferronickel, reduction, energy

PENDAHULUAN

Nikel laterite dan cadangannya

Nikel adalah unsur paduan utama dari stainless steel, dan mengalami pertumbuhan yang sangat cepat seiring dengan peningkatan permintaan stainless steel. Saat ini lebih dari 65% nikel digunakan dalam industri stainless steel, dan sekitar 12% digunakan dalam industri manufaktur super alloy atau nonferrous alloy (Moskalyk, Johnson). Indonesia sendiri merupakan salah satu negara penghasil nikel di dunia dari jenis lateritik. data produksi dan cadangan nikel dunia berdasarkan laporan United States Geological Survey pada Januari 2015 (USGS 2015). Dari segi potensi cadangan, Indonesia menempati urutan ke-enam dengan potensi cadangan sebesar 5% dari total seluruh cadangan dunia seperti. Hal ini menunjukkan posisi penting Indonesia di dunia pertambangan bijih nikel. Cadangan nikel dunia saat ini yaitu jenis lateritik sebanyak 72% dan sisanya sulfida (Dalvi), tetapi produksi nikel saat ini sebagian besar diperoleh dari jenis sulfida yaitu sebanyak 58% dan sisanya 42% dari jenis lateritik (Dalvi). Oleh karena itu penelitian dan pengembangan pada jenis laterit sangat diperlukan sehubungan dengan adanya penurunan cadangan nikel sulfida.

Tingkat keekonomian proses saat ini ditentukan terutama oleh kadar unsur Ni dalam cadangan, dimana kadar Ni diatas 1.7 % merupakan proses yang layak dengan kondisi skala besar, dan biaya infrastruktur dan energi yang relatif moderat seperti pada Table 1.

Tabel 1 . Bijih nikel dan keekonomiannya (Dalvi)

Skenario	Grade % Ni	Hasil
Bijih grade tinggi, upgradeable, biaya energi rendah, Biaya infrastruktur rendah	2.5	Menarik
Bijih grade menengah, biaya infrastruktur menengah, skala relatif besar, biaya energi sedang	2	Pertengahan

Bijih grade rendah, skala relatif kecil, biaya energi tinggi	< 1.7	Tidak menarik
--	-------	---------------

Pirometalurgi nikel laterite saat ini

Produksi feronikel dari bijih laterit memerlukan energi tinggi, karena bijih laterit atau bijih pra-reduksi umumnya langsung dilebur untuk menghasilkan sejumlah kecil produk feronikel dan sejumlah besar slag. Selain itu area dimana deposit itu berada mempunyai akses yang sulit terjangkau sehingga pasokan listrik untuk proses merupakan suatu tantangan tersendiri. Tidak seperti bijih nikel sulfida, bijih nikel laterit tidak dapat di upgrade dengan penghalusan (*grinding*) dan metode lain yang bersifat fisikal benefisiasi (Norgate). Karenanya hampir semua proses pengolahan nikel laterit menggunakan proses pirometalurgi terhadap kandungan nikel yang diatas 1.5%. Padahal lebih dari 50% cadangan dunia mempunyai kandungan Ni < 1.45%. sehingga kurang menguntungkan bila diolah dengan proses pirometalurgi yang umum.

Tabel 2 merupakan perbandingan penggunaan energi masing masing proses. Berdasarkan table tersebut dapat diketahui bahwa pembuatan feronikel dengan RKEF mempunyai tingkat kebutuhan anergi paling rendah. Dan yang tertinggi yaitu proses Caron.

Tabel 2. Perbandingan kebutuhan energi pengolahan nikel

Process	Typical kWh/lb Ni
From sulphide ores containing 1% Ni	
Smelting process	10
Leaching process	10
From oxide ores	
2.5% Ni garnierite to matte to metal	26-27
2.5% Ni garnierite to 25% FeNi	16-19
1.4% Ni mixed ores, Caron process	28-38
1.4% Ni laterite, acid process	20-26
1.4% Ni laterite, improved acid process (AMAX)	14-16

Proses pirometalurgi bijih laterit secara komersial saat ini secara garis besar terdiri atas:

- *Rotary kiln electric furnace (RKEF)*

Proses RKEF banyak digunakan untuk menghasilkan feronikel dan nikel-matte. Proses ini diawali dengan pengeringan kandungan *moisture* hingga 45% melalui proses *pretreatment*. Pada proses tersebut, bijih laterit dikeringkan dengan *rotary dryer* pada temperatur 250°C hingga kandungan *moisture*-nya mencapai 15-20%. Produk dari *rotary dryer* selanjutnya masuk ke-tahap kalsinasi (pre-reduksi) menggunakan *rotary kiln* pada suhu 800-900°C. adapun reaksi yang berlangsung di *rotary kiln*, yaitu: evaporasi dari air, disosiasi dari mineral-mineral pada temperatur 700°C menjadi oksida-oksida dan uap air, reduksi dari nikel oksida dan besi oksida gas reduktor pada temperatur sekitar 800°C. Hasil proses kalsinasi kemudian dilebur di dalam *electric furnace* pada temperatur 1500-1600°C menghasilkan feronikel. Pada *electric furnace* terjadi pemisahan feronikel dari terak silika-magnesia, terjadi Reduksi nikel oksida dan besi oksida kalsin menjadi nikel logam, dan pelelehan dan pelarutan nikel dalam feronikel. Proses ini yang paling umum digunakan dalam industri pirometalurgi nikel saat ini karena tahapan proses dianggap lebih sederhana dan dapat diaplikasikan terhadap bijih dari berbagai lokasi. Walaupun pada kenyataannya konsumsi energi sangat tinggi dan hanya lebih rendah dari proses Caron.

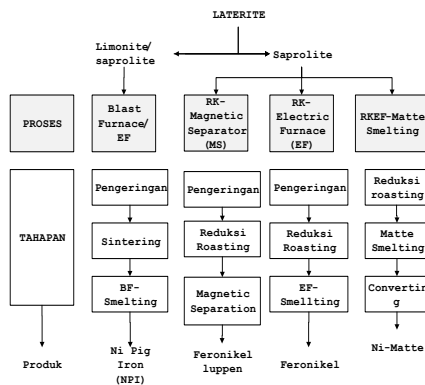
- *Nippon Yakin Oheyama Process*

Nippon Yakin Oheyama Process merupakan proses reduksi langsung garnierite ore yang menghasilkan feronikel dalam suatu *rotary kiln*. *Silicate ore* (2,3-2,6% Ni, 12-15% Fe) bersama antrasit, coke breeze, dan batu kapur dicampur dan dibuat menjadi briket. Briket tersebut kemudian diumpankan ke dalam *rotary kiln* yang menggunakan pembakaran batu-bara dengan gradien temperatur 700-1300°C. Dalam *rotary kiln* tersebut, briket akan mengalami proses pengeringan, dehidratasi, reduksi, dan dilebur membentuk feronikel yang disebut luppen. Hasil proses tersebut kemudian didinginkan cepat dalam air (*quenching*), dan luppen yang berukuran 2-3 mm dengan grade 22% Ni dan 0.45% Co dipisahkan dari teraknya melalui proses *grinding*, *screening*, *jigging*, dan *magnetic separation*. Recovery awal melalui proses ini hanya berkisar 80% diakibatkan tingginya kandungan pengotor dalam bijih yang sulit dipisahkan dengan *rotary kiln*. Proses ini

mempunyai energi yang relatif rendah dibandingkan dengan pembuatan feronikel menggunakan ELKEM proses karena tidak dibutuhkan energi yang tinggi pada proses pemisahan feronikel dari pengotornya. Beberapa hal yang kritis dari proses ini yaitu masalah kontrol *moisture* briket yang sangat ketat karena menentukan reduksibilitas dan penggunaan antrasit yang relatif mahal dan kemungkinan ketersediannya semakin menurun.

- *Nickel Pig Iron (NPI)*

Nickel Pig Iron diproduksi di china mulai tahun 2006 untuk menjawab tingginya harga dan permintaan nikel. Nickel Pig Iron (NPI) merupakan ferronickel yang memiliki kadar nikel yang rendah (1,5-8%). Pembuatan NPI dilakukan dengan mini *blast furnace* dan *electric arc furnace* (EF). Proses produksi NPI pada mini *blast furnace* menggunakan kokas sebagai reduktor dan sumber energi. Karbon akan mereduksi besi sehingga kandungan FeO di dalam terak akan sangat kecil. Pada proses ini juga ditambahkan bahan imbuah berupa limestone untuk mengatasi temperatur leleh terak tinggi akibat rendahnya kandungan FeO dan tingginya kadar silika dan magnesita di dalam terak. NPI ini disebut sebagai “*dirty nickel*” karena akan menghasilkan slag yang banyak, konsumsi energi yang tinggi, polusi lingkungan dan menghasilkan produk dengan kualitas rendah. Tetapi bagaimanapun produksi NPI akan tetap menjadi sesuatu yang ekonomis selama harga nikel relatif tinggi. Proses produksi NPI yang lain yaitu menggunakan *electric furnace*. Dengan peningkatan kualitas EF maka proses ini diyakini mempunyai efisiensi energi yang lebih tinggi dari proses *blast furnace*. Sehingga pada prakteknya dalam 10 tahun terakhir pembuatan NPI meningkat signifikan terutama di China dan Indonesia. Kelebihan utama dalam proses ini yaitu dapat mengolah bijih kadar rendah yang sulit dilakukan dengan proses pirometalurgi lain.



Gambar 1. Diagram alir sederhana ekstraksi nikel secara komersial dari bijih nikel laterit.

Dari proses-proses tersebut diatas dapat dibuat suatu ringkasan tahapan proses utama ekstraksi nikel secara pirometalurgi yaitu sbb:

1. Pengeringan (*drying*) yaitu eliminasi sebagian besar air bebas yang terdapat dalam bijih
2. Kalsinasi-reduksi yaitu eliminasi air bebas yang tersisa dan eliminasi air kristal, pemanasan awal bijih dan reduksi sebagian besar unsur nikel dan pengontrolan terhadap reduksi besi.
3. *Electric furnace smelting* yaitu reduksi nikel yang tersisa dan pemisahan feronikel dari hasil sampingnya yaitu slag besi magnesium silikat.
4. *Refining* yaitu eliminasi unsur minor yang tidak dikehendaki dari produk feronickel untuk dapat memenuhi kebutuhan pasar.

Beberapa variasi proses dilakukan untuk memenuhi kebutuhan pasar. Variasi pertama yaitu penambahan sulfur pada kalsin diikuti *converting* menjadi produk yang mempunyai kadar besi rendah yaitu produk nickel matte (proses yang dilakukan PT. Inco/Vale Indonesia dan SLN-Eramet). Variasi kedua yaitu pengembangan dari proses produksi besi, pada tahap kalsinasi-reduksi diberikan temperatur yang cukup untuk melelehkan sebagian dari kalsin dan meningkatkan ukurannya menjadi suatu butiran feronikel. Pasta kalsin yang terbentuk selanjutnya didinginkan secara langsung dengan air (*water quencing*) dan dipisahkan secara magnetik. Produk akhir yang terbentuk yaitu butiran feronickel yang disebut luppen (proses yang dilakukan *Nippon Yakin* Jepang). Beberapa contoh proses komersial produksi nikel dari laterit yang

menggunakan saprolite dan saprolite-limonite sebagai bahan bakunya sbb (Bergman):

- Pengolahan feronikel shot/ingot: PT. Aneka Tambang, Cerro Matoso, Falconbridge, Hyuga, SLN-Eramet, Larco, Pamco
 - Pengolahan Feronikel luppen: Nippon Yakin Oheyama
 - Pengolahan Nikel-matte: PT. Vale Indonesia (Inco)
- dan
- Pengolahan NPI: Xinxing group, Tsingshan Group-Bintang Delapan Indonesia, Indoferro Indonesia.

PENGEMBANGAN SAAT INI

Nikel laterit mempunyai keterbatasan untuk diproses prekonsentrasi secara konvensional, seperti *dense media separation*, *gravity separation*, *magnetic separation*, *electrostatic separation*, *roasting*, maupun flotasi. Tidak satupun di antara proses tersebut yang dinilai mampu memberikan nilai tambah yang potensial jika dihitung dan dibandingkan terhadap modal yang harus dikeluarkan untuk *operating* dan *investment cost* (Quast). Proses rekoveri pada bijih nikel laterit sangat sulit dikarenakan sifat mineraloginya yang kompleks serta keterbatasan teknologi yang telah ada saat ini (Canterford). Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengolah nikel laterit menjadi logamnya dengan menggunakan beberapa variasi proses yaitu: variasi jenis reduktor, aditif, temperatur reduksi,

Reduksi Menggunakan Reduktor Padat

Reduktor dengan karbon merupakan jenis reduktor yang paling banyak digunakan untuk reduksi bijih nikel karena kelimpahannya yang sangat besar. Salah satu proses yang populer yaitu produksi feronikel Krupp-Renn process. Tahapan proses ini yaitu penggerusan bijih dengan mencampur dengan material berkarbon yaitu batu-bara antrasit, kokas dan limestone sebagai flux kemudian dibuat briket. Tahap selanjutnya direduksi dengan dialiri gas panas dari hasil pembakaran batu bara. Produk yang terbentuk didinginkan, digerus, dipisahkan secara fisik dan terakhir pemisahan dengan magnetik. Produk akhir berupa partikel dengan ukuran 2 - 3 mm dengan komposisi Ni 18-22% (T. Watanabe). Peneliti lain yang melakukan hal yang mirip yaitu T.Watanabe, Beggs, Hoffman, Diaz.

Reduktor gas

Penggunaan gas telah dipelajari pada daerah temperatur yang lebar yaitu dari 550°C sampai 1250 °C. Beberapa penelitian, seperti yang dari Crawford et.al., telah menunjukkan bahwa pada temperatur tinggi dan kadar besi yang tinggi sangat baik untuk memperoleh rekovery yang tinggi. Valix dan Kawahara mengklaim bahwa pada temperatur reduksi yang lebih besar dari 800°C akan menghambat perolehan nikel karena terjadi pembentukan fase olivine yang stabil.

Penambahan sulfur

Haris, telah mempelajari sulfidasi bijih laterit pada temperatur rendah dan berhasil menampilkan bahwa nikel oksida dapat disulfidasi secara selektif membentuk nikel-besi-sulfida. Valix et.al. (2002) telah memaparkan hasil reduksi saprolit menggunakan gas CO-CO₂ dan mempelajari pengaruh sulfur yang ditambahkan. Pada saprolite hasil kalsinasi menyebabkan Ni terperangkap dalam forsterite sehingga menghasilkan recovery yang rendah yaitu hanya Ni=6.4% dan Fe=8.1%

Penelitian lain terkait penambahan sulfur saat reduksi bijih nikel laterit dalam usaha peningkatan jumlah perolehan nikel dalam feronikel telah dilakukan di antaranya melakukan reduksi selektif nikel laterit dengan penambahan natrium sulfat (Na₂SO₄) dan kalsium sulfat (CaSO₄) yaitu oleh Jiang et.al, Li et.al., Zhu et.al.

Prekonsentrasi bijih

Beberapa penelitian yang berhubungan dengan peningkatan kadar telah banyak dilakukan. Kim et. al.(2010) mempelajari pengaruh kalsinasi sebelum pemisahan magnetik pada berbagai variasi densitas dan temperatur kalsinasi, Li et. al.(2009) mempelajari pengaruh pre roasting sebelum leaching dengan asam. Jungah Kim et.al[43] telah memaparkan bahwa preparasi awal terhadap bijih dengan cara roasting awal pada beberapa temperatur dan diikuti dengan pemisahan magnetik, dapat meningkatkan kadar nikel dari 1.5% menjadi 2.9%. Zhu et. al., menggunakan aditif kalsium sulfat dan batu-bara untuk proses reduksi selektif yang ikuti pemisahan magnetik terhadap bijih Indonesia akan meningkatkan grade nikel. Penelitian yang

bersifat fisikal ugrading telah banyak dilakukan pada perlakuan awal bijih. Seperti pemisahan magnetik, screening, elektrostatis, gravitasi dan kombinasi-kombinasinya seperti yang telah dilakukan oleh Lesic et.al, Anodera et.al., Agatzini-Leonardou et.al., Stamboliadis et. al., tetapi tidak semua menampakkan hasil yang signifikan.

PENELITIAN KEDEPAN

Berdasarkan uraian diatas telah diketahui bahwa proses pengolahan nikel dihadapkan kepada penurunan kadar nikel dalam cadangan nikel laterit dan masalah kebutuhan energi. Dengan adanya penurunan kandungan nikel dalam bahan baku maka menurut penulis proses pembuatan NPI merupakan yang paling baik dilakukan karena memungkinkan mengolah bijih laterite kadar rendah. Tetapi proses tipe *blast furnace* pada pembuatan NPI memerlukan energi tinggi maka dengan perubahan menjadi electric arc (EF) yang lebih efisien maka memungkinkan proses pengolahan ini akan menjadi pilihan yang terbaik. Sedangkan bila berdasarkan table kebutuhan energi diketahui bahwa pembuatan feronikel lebih rendah daripada pembuatan nikel matte. Proses luppen merupakan salah satu jenis proses pembuatan feronikel yang mempunyai temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan proses Elkem karena tidak menggunakan *arc*, sehingga proses ini mempunyai potensi untuk dikembangkan lebih lanjut dan dapat digunakan untuk semua tipe bijih yang selama ini tidak dapat dilakukan oleh proses luppen. Kendala lain yaitu substitusi batu bara antrasit dengan jenis low grade.

Dalam kaitannya dengan pembentukan kualitas aglomerasi feronikel maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut penambahan aditif yang diyakini akan meningkatkan ukuran partikel.

KESIMPULAN

Peluang penelitian dalam pengolahan nikel laterit secara pirometalurgi masih terbuka karena masih banyak hal yang harus diperbaiki dalam proses yang sudah ada saat ini. Penelitian lebih lanjut kemungkinan didasarkan pada isu efisiensi pemakaian energi dan isu ketersediaan cadangan nikel kadar tinggi yang semakin menurun.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada para peneliti dari kelompok penelitian nilai tambah Pusat Penelitian Metalurgi dan Material (P2MM) LIPI atas dukungannya sehingga makalah ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Antola, O., Holappa, L., & Paschen, P. (1995). Nickel Ore Reduction by Hydrogen and Carbon Monoxide Containing Gases . Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 169-179.
- Canterford J.H., "Leaching of Some Australian Nickeliferous Laterites With H₂SO₄ at Atmospheric Pressure," Proc. Aust. Inst. Min. Metall, vol. no. 265, pp. pp. 19-26, 1978.
- Canterford, J.H., 1975. The treatment of nickeliferous laterites, Miner. Sci. Eng. 7 (1), 3-17.
- Dalvi, A.D., Bacon, W.G., & Osborne, R., 2004. The Past and the Future of Nickel Laterites. In: PDAC 2004 International Convention. Trade Show & Investors Exchange, North Carolina, USA, pp. 1-27.
- Diaz, C. M., Vahed, A., Shi, D., Doyle, C. D., Warner, A. E., & MacVicar, D. J. (1993, January 12). Patent No. 5,178,666. United States.
- G. A. Crawford, "Segregation of Nickel in Laterites - The Falconbridge Experience," Segregation Symposium, pp. 219-240, 1960.
- Jiang, M., Sun, T., Liu, Z., Kou, J., Liu, N., & Zhang, S., 2013. Mechanism of sodium sulfate in promoting selective reduction of nickel laterite ore during reduction roasting process. International Journal of Mineral Processing 123 (2013) 32-38.
- Johnson, Jeremiah, Reck, B.K., Wang, T., Graedel, T.E., 2008. The energy benefit of stainless steel recycling. Energy policy 36 (1), 181–192.
- Jungah Kim a, Gjergj Dodbiba et all, Calcination of low-grade laterite for concentration of Ni by magnetic separation, Minerals Engineering 23 (2010) 282–288
- Kawahara, M., Toguri, J.M., Bergman, R.A., 1988. Reducibility of Laterite Ores. Metall. Trans. B 19B, 181–186.
- Li, G., Shi, T., Rao, M., Jiang, T., & Zhang, Y., 2012. Beneficiation of Nickeliferous Laterite by Reduction Roasting in the Presence of Sodium Sulfate. Elsevier Mineral Engineering, China.
- Li, S., & Coley, K. S. 2000. Kinetics and Mechanism of Reduction Laterite Ore High in Serpentine. The 39th Annual Conference of Metallurgists (pp. 179-192). Ottawa: CIM.
- Moskalyk, R.R., Alfantazi, A.M., 2002. Nickel laterite processing and electrowinning practice. Miner. Eng. 15, 593–605.
- Norgate, T., Jahanshahi, S., 2010. Low grade ores: Smelt, leach or concentrate. Miner. Eng. 23, 65–73
- Quast, K., Connor, J.N., Skinner, W., Robinson, D.J., & Jonas, A.M., 2015. Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores Part 1. Minerals Engineering xxx (2015) xxx-xxx.
- R. A. Bergman, Nickel Production from Low-Iron Laterite Ores: Process Descriptions, CIM Bull, Vol. 96, No. 1072, June-July, 2003 pp127-138
- T. Utigard and Bergman, Gaseous Reduction of Laterite Ores, Metallurgical and Materials Transactions Volume 23 B. April 1992—271
- T. Watanabe, Sadao, Direct Reduction of Garnierite Ore for Production of Ferro-Nickel with a Rotary Kiln at Nippon Yakin Kogyo Co., Ltd., Oheyama Works, International Journal of Mineral Processing, 19 (1987) 173-187.
- Valix, M., Cheung, W.H., 2002. Study of phase transformation of laterite ores at high temperature. Miner. Eng. 15, 607–612
- Valix, M., Cheung, W.H., 2002. Study of phase transformation of laterite ores at high temperature. Miner. Eng. 15, 607–612
- Valix, M., Cheung, W.H., 2002b. Effect of sulfur on the mineral phases of laterite ores at high temperature reduction. Miner. Eng. 15, 523–530.
- Williem J.Crama & A.H. Baas, Process for the Preparation Of A Ferronickel Concentrate, Netherlands, Patent no: 4,490,174, US
- Zhu, D.Q., Cui, Y., Hapugoda, S., Vining, K., & Pan, J., 2011. Mineralogy and Crystal Chemistry of a Low Grade Nickel Laterite Ore. Transactions Nonferrous Metals Society of China 907-916.

- Zhu, D.Q., Cui, Y., Vining, K., Hapugoda, S., Douglas, J., Pan, J., & Zheng, G.L., 2012. Upgrading low nickel content laterite ores using selective reduction followed by magnetic separation. Elsevier International Journal of Mineral Processing, Australia.
- Agatzini-Leonardou, S., Zafiratos, I.G., Spathis, D., 2004. Beneficiation of a Greek serpentinitic nickeliferous ore. Part I. Mineral processing. Hydrometallurgy 74, 259–265.
- Onodera, J., Inoue, T., Imaizumi, T., 1987. Attempts at the beneficiation of lateritic nickel ore. Int. J. Miner. Process. 19, 25–42.
- Lesic, D., 1965. Beneficiation tests of a low-grade serpentinitic iron–nickel–chromium–cobalt ore in a dense liquid. In: Roberts, A. (Ed.), Mineral Processing. Pergamon Press, pp. 323–331.
- Stamboliadis, E., Alevizos, G., Zafiratos, J., 2004. Leaching residue of nickel ferrous laterites as a source of iron concentrate. Miner. Eng. 17, 245–252.
- Beggs, D., Bunge, F. H., & Vedensky, D. N. (1970, March 31). Patent No. 3,503,735. United States.
- Crama, W. J., & Baas, A. H. (1984, December 25). Patent No. 4,490,174. United States.
- U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2015.