



KARAKTERISTIK NIKEL LATERIT INDONESIA PADA PEMANASAN DARI 600°C SAMPAI DENGAN 1000°C

Iwan Setiawan^{1,2}

¹ Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI
Gedung 470 Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan

¹ iwan012@lipi.go.id

² Departemen Teknik Metalurgi dan Material UI
Kampus UI Depok

Abstrak - Nikel diperoleh dari bijih laterit dengan proses metalurgi yang menghasilkan feronikel. Logam nikel terdapat dalam mineral pembawa yaitu senyawa nikel magnesium silikat hidrat yang disebut garnierite. Garnierite merupakan nama umum dari mineral magnesium silikat hidrat termasuk diantaranya chlorite, clay dan serpentine. Keberhasilan reduksi nikel ditentukan diantaranya oleh jenis mineral pembawa nikel itu sendiri terutama kondisi pembentukan fasa forsterite yang relatif inert. Penelitian ini telah mempelajari fasa yang terbentuk bila bijih nikel dipanaskan dari temperatur 600°C sampai pada temperatur 1000°C dalam keadaan atmosfer udara. Analisis mikroskopi sampel hasil pemanasan di analisis menggunakan SEM-EDX dan untuk mengetahui peristiwa dehidroksilasi dan rekristalisasi dipelajari menggunakan alat DTA-TGA, dan XRD digunakan untuk mengetahui jenis mineral yang terkandung. Berdasarkan hasil XRD diketahui bahwa mineral pembawa nikel bijih dari sumber laterit Indonesia adalah jenis serpentin dengan komposisi mineral utama adalah lizardite. Setelah pemanasan akan menghasilkan fasa utama olivine, forsterite dan fasa minor yaitu enstatite. Fasa enstatite dihasilkan dari mineral talc dan dehidroksilasi lizardite. Besi akan masuk pada fasa olivine sehingga tidak tampak dalam kurva XRD. Berdasarkan analisis data hasil DTA-TGA diketahui bahwa puncak endotermik terdapat pada temperatur 78,8 °C, 293,7 °C dan 638,0 °C, ini berhubungan dengan pelepasan air bebas dan pelepasan air kristal. Sedangkan puncak eksotermik terjadi pada temperatur 828,0 °C yang merupakan kristalisasi forsterite. Temperatur 638,0 °C diketahui merupakan temperatur kritis dan awal proses terjadinya dehidroksilasi serpentin menjadi fasa forsterite.

Kata kunci : Laterit, Lizardite, Pemanasan, Eksotermik, Endotermik, Forsterite

Abstract - Nickel obtained from laterite ore by pyrometallurgical processes to produce ferronickel. Nickel metal contained in the mineral carrier which nickel compound called magnesium silicate hydrate garnierite. Garnierite is the common name of magnesium silicate hydrate minerals including chlorite, clay and serpentine. This research studied the phases formed when ore is heated from 600°C to the temperature of 1000°C in an air atmosphere. Heating microscopy analysis samples analyzed using scanning electron microscopy SEM-EDX and to know dehydroxylation and recrystallization was studied using DTA-TGA instrument. It is known that there are endothermic peak at 78,8 °C temperature of 293,7 °C and 638,0 °C, is related to the release of free water and release of crystalline water. While the exothermic peak occurs at a temperature of 828,0 °C associated with changes in the structure for their dehydroxylation serpentine into forsterite phase. Based on the XRD chart in mind that the sample heating will produce olivine, forsterite and enstatite phase.

Key words: Laterite, Lizardite, Roasting, Exotermic, Endothermic, Forsterite

I. PENDAHULUAN

Mineral terpenting pembawa nikel dari suatu bijih nikel laterit yaitu Garnierit. Mineral ini merupakan nama umum untuk group mineral yang termasuk mineral nikel magnesium silikat hidrat seperti chlorite, clay, dan serpentin silikat. Garnierit mempunyai struktur butiran yang halus, mempunyai kiralinitas yang rendah dan terdiri atas campuran beberapa mineral. Komponen-komponen penyusun garnierite biasanya adalah Lizardite, Antigorite, Chrysotile dan yang mempunyai struktur kaya nikel yaitu serpentin [1,2]. Dalam jenis bijih nikel sulfida, konsentrasi dapat dilakukan dengan cara-cara tradisional seperti flotasi dan milling. Bijih laterit hanya dapat diperlakukan secara upgrading minor dengan cara pengayakan. Terlepas dari banyak pengembangan proses, bijih nikel



laterit dapat diproses dengan baik dan ekonomis dengan cara smelting sedangkan teknik-teknik lain yang diinginkan belum memberikan hasil yang baik. Alasan mengapa pengolahan nikel laterit cukup sulit yaitu karena mineral pembawa nikel tersebar secara halus didalam silikat dan bijih oksida.

Meskipun berbagai investigasi untuk pemanfaatan bijih laterit di feronikel dan peleburan baja stainless proses telah dilakukan, masih banyak masalah yang perlu dipelajari. pengetahuan mineral pembawa nikel dalam bijih laterit dan perilaku mereka pada suhu tinggi adalah penting untuk mengembangkan proses pra-reduksi [3].

Proses rekoveri nikel dari bijih laterit secara pirometalurgi telah diteliti secara intensif oleh Li et. al. [4] yang melakukan studi pengaruh pemanasan awal dari residu hasil suatu leaching bijih nikel laterite asal China, Rhamdhani [5] mempelajari mikrostruktur, karakteristik fasa, analisis termodinamik beserta transformasinya selama roasting. Kim [6] melakukan peningkatan kadar nikel dari laterit dengan mempertimbangkan pengaruh kalsinasi dari bijih nikel laterite indonesia sebelum pemisahan magnet pada berbagai variasi temperatur kalsinasi dan *pulp density*. Dan diperoleh kondisi optimum temperatur kalsinasi pada 500 °C selama 1 jam pada intensitas medan magnet 0.5T akan menaikkan grade nikel dari 1,5% menjadi 2,9% dengan rekoveri 48%. Zhu [7] melakukan peningkatan kadar dengan cara reduksi selektif yang diikuti dengan pemisahan magnet. Reduksi dilakukan menggunakan batubara (*coal-base reduction*) dengan aditif kalsium sulfat. A Bunjaku [8] mempelajari fenomena yang terjadi bila bijih nikel laterit asal Colombia dipanaskan sampai 1300 °C, Sehingga dapat menyediakan informasi untuk reduksi dalam rangka peningkatan kadar. Bagaimanapun sifat dan minerologi bijih sangat khas untuk tiap tempat maka untuk mencapai hasil yang optimum suatu proses reduksi perlu mempelajari karakter pemanasan bijih. Penelitian ini akan mempelajari perilaku laterit akibat perlakuan pemanasan dan perubahan fasa dan morfologi bijih nikel laterite ketika dipanaskan sampai 1000 °C sebagai dasar untuk reduksi.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Bijih nikel yang digunakan pada percobaan ini merupakan bijih nikel laterit asal Pomalaa Sulawesi, Indonesia. Percobaan dilakukan dengan melakukan pemanasan 10-20 gram sampel bijih laterit mentah yang berbentuk pelet dalam muffle furnace dengan wadah sampel terbuat dari krusible alumina. Temperatur pemanasan yaitu pada 600, 700, 800, 900 dan 1000°C dengan keadaan atmosfer terbuka. Penahanan pemanasan dilakukan masing-masing selama 1 jam pada temperatur-temperatur tersebut. Bijih hasil pemanasan tiap temperatur kemudian disampling dan dianalisis menggunakan XRD SEM-EDX (Scanning Electron Microscopy Electron Dispersive X-ray). Karakterisasi thermal dari bijih menggunakan alat Differential Thermal Analyzer/Thermo Gravimetric analysis (DTA/TGA) Shimadzu DTG-60H yang bertujuan untuk mengetahui reaksi yang terjadi selama pemanasan. Pengujian struktur mikro dari sampel sebelum dan setelah pemanasan menggunakan Scanning Electron Microscopy-Electron Dispersive X-ray (SEM-EDX) Jeol 6390A. Sedangkan komposisi kimia bijih sebelum pemanasan menggunakan X-ray Fluorescence (XRF) Shimadzu VF320.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik kimia bijih nikel laterit

Komposisi material bijih berdasarkan analisis menggunakan XRF tertera dalam Tabel 1. Berdasarkan komposisi kimia, bijih dapat digolongkan ke dalam kategori saprolitik karena mengandung Ni dan Fe dalam rentang 1,7 % sampai 18,93%. Salah satu karakteristik utama dari bijih saprolitik adalah memiliki kandungan MgO dan SiO₂ yang tinggi. Bijih dengan rasio berat MgO/SiO₂ sebesar 0,54.

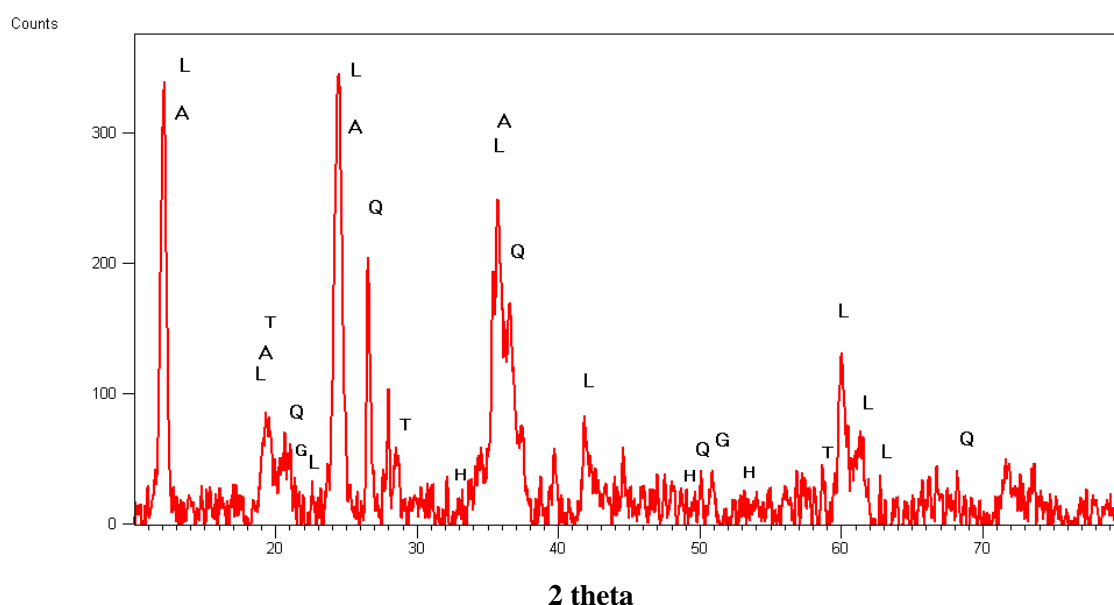
Tabel 1. Komposisi kimia bijih nikel (% berat)

NiO	Ni total	Fe ₂ O ₃	Co ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	LOI	Lain-lain
2,17	1,71	27,04	0,08	13,40	0,19	0,68	24,64	1,93	17,21	12,65

Karakteristik bijih juga ditelusuri lebih jauh dengan XRD. Hasil pengujian menggunakan XRD terdapat pada Gambar 1, dengan nama-nama mineral yang terkandung terlihat dalam Tabel 2. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui mineral-mineral yang terkandung di dalam bijih. Diketahui



bahwa bijih tersusun atas mineral-mineral golongan garnierit grup tipe serpentinik yaitu magnesium silicate hydroxide atau lizardite $[Mg_3Si_2O_5(OH)_4]$, dan antigorite. Senyawa lain sebagai pengotor atau minor yaitu haematite $[Fe_2O_3]$ dan goethite $[FeO(OH)]$ dan Talc $[Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2]$. Hasil XRD ini tidak menghasilkan komposisi mineral secara kuantitatif tetapi dapat membandingkan komposisi mineral relatif berdasarkan perbandingan intensitasnya. Mineral yang signifikan dalam yaitu serpentin dengan formula umum $(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$ yang terdiri atas antigorite, lizardite, clinochrysole dan mineral jenis chlorite [16]. Mineral yang dominan merupakan magnesium-silikat, sejumlah kecil kalsium-silikat dan Mg-Fe-silikat. Dalam beberapa tempat terdapat mengandung sedikit aluminium-silikat [10]. Dalam bijih saprolite, nikel terdapat didalam magnesium-silikat sedangkan kromium terdapat terutama dalam besi-silikat dan goethite [11]. Dari hasil analisis tidak tampak mineral nikel yang terpisah atau tersendiri dan sesuai dengan hasil yang telah dilakukan oleh peneliti lain terhadap sumber nikel yang berbeda [12]. Struktur kristal dari serpentinik itu sendiri adalah hexagonal closed-packed oxygen dengan atom Fe dan Ni berada pada interstisi oktahedral, serta mineral kuarsa (SiO_2) [17].



Gambar 1. Pola XRD bijih nikel (T: Talc, A:Antigorite, L:Lizardite, Q:Quartz, G:Goethite, H:Hematite)

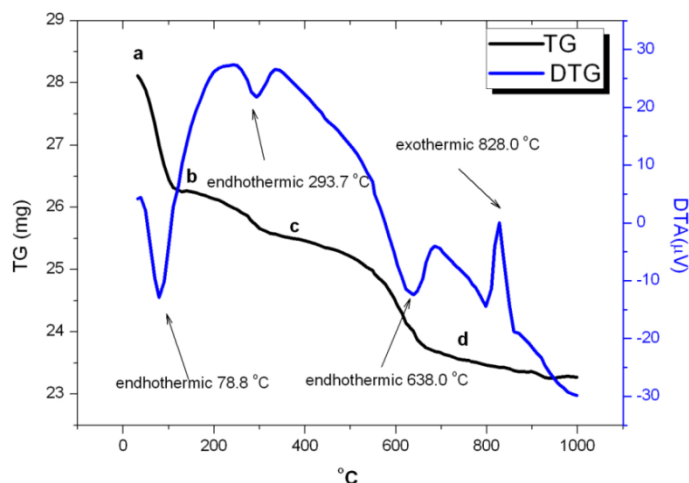
Tabel 2. Mineral yang terkandung dalam bijih laterit

Phase	Formula
Antigorite	$(Mg,Al)_3(Si,Al)_2O_5(OH)_4$
Lizardite	$(Mg,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
Goethite	$FeO.OH$
Quartz	SiO_2
Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$



3.2. Karakteristik Thermal

Gambar 2. merupakan data DTA/TG dari bijih nikel laterit bila laterit dipanaskan dalam dari temperatur kamar sampai 1000 °C. Pada gambar terdapat 4 reaksi yang terjadi selama proses pemanasan. Terdapat temperatur reaksi endotermik yaitu pada 78,8 °C; 293,7 °C; 638,0 °C, dan temperatur eksotermik pada 828,7°C.

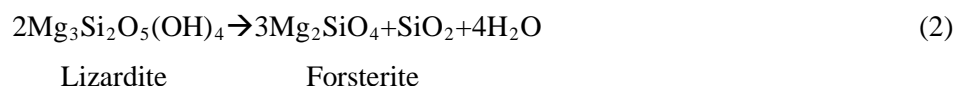


Gambar 2. Grafik DTA/TGA bijih laterit
 (kondisi: 20/menit, atmosfir 20% gas CO₂)

Reaksi endotermik pada 78,8°C merupakan permulaan penguapan air bebas. Pada pemanasan ini, temperatur ditahan pada temperatur yang tetap supaya air menguap semua. Kemudian reaksi endotermik selanjutnya terjadi pada 293,7 °C. Pada temperatur ini akan terjadi penguapan air bebas dan dari goethite [14] dengan persamaan reaksi sebagai berikut:



Air yang terbentuk menguap, ditandai dengan adanya penurunan massa sampel sehingga terlihat terjadi penurunan kurva pada grafik. Reaksi endotermik pada 638,0 °C merupakan reaksi dehidroksilasi gugus hidroksi dari mineral serpentin yang diikuti dengan reaksi eksotermik pada 828,0 °C yang merupakan rekristalisasi fasa forsterite. Menurut G.W. Brindley [15], Reaksi kehilangan air pada peristiwa dehidroksilasi ini karena adanya migrasi proton dari ion H⁺ bergabung dengan ion OH⁻ untuk membentuk molekul H₂O, dan ion magnesium dan ion silikon bermigrasi dalam arah berlawanan arah untuk menjaga muatan supaya tetap netral. Pada temperatur 638,0 °C ini struktur dari lizardite dan goethite mengalami kerusakan sehingga pada temperatur ini merupakan saat yang tepat untuk melakukan proses benefisiasi nikel karena struktur dari lizardite menjadi terbuka terhadap pengaruh luar. Jika produk akhir yang forsterit dan silika, maka persamaan kimia secara keseluruhan dapat ditulis sbb [15]:



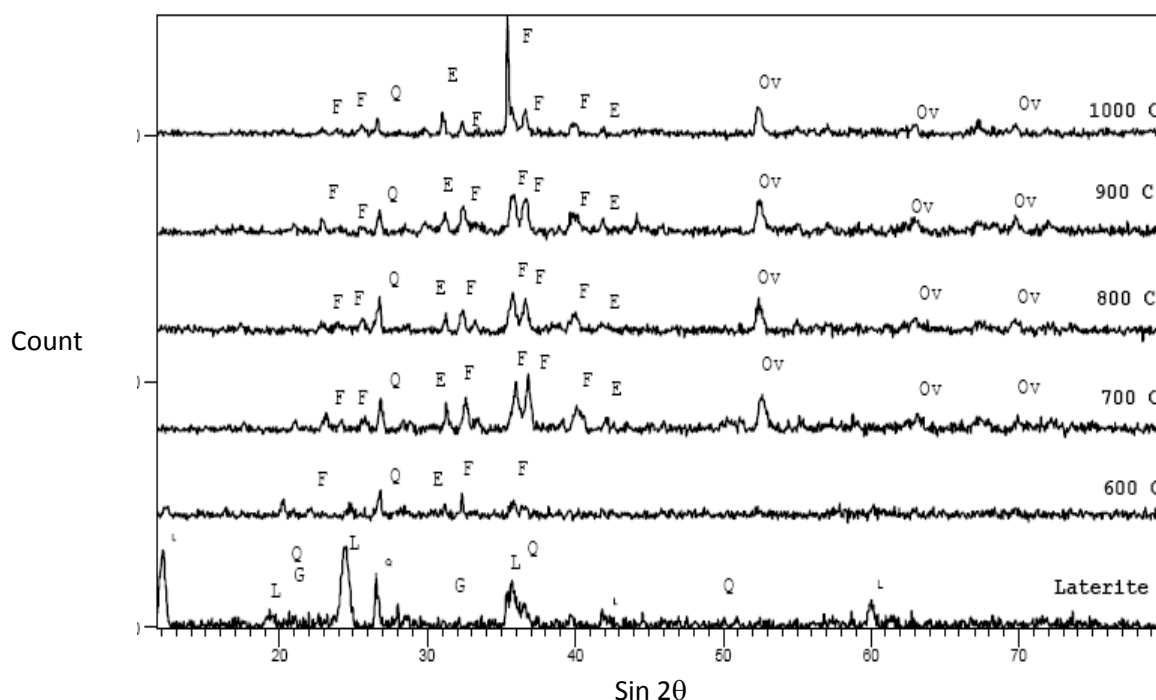
Pada temperatur 828,0 °C terjadi reaksi kristalisasi dari forsterite yang terbentuk. Hal ini sesuai yang telah dijelaskan secara detail oleh Ball [19] bahwa serpentin akan mengalami beberapa tahap reaksi bila dipanaskan yaitu akan mengalami dehidrasi (penguapan air bebas), dehidroksilasi (penguapan air kristal) dan kristalisasi forsterite pada temperatur sekitar 800 °C.

Berdasarkan Gambar 2 dapat diperkirakan kehilangan berat akibat peristiwa penguapan uap air yaitu dari titik a ke b sebesar 15,4 %, kehilangan air kristal goethite yaitu dari titik b ke c sebesar 2,3 % dan kehilangan air kristal menjadi forsterite dari c ke d yaitu sebesar 6,0 %.



3.3. Analisis Struktur Kristal

Analisis difraksi menggunakan XRD dilakukan untuk identifikasi fasa yang terbentuk sebelum dan sesudah perlakuan pemanasan. Mineral utama yang terdapat dalam laterit sebelum pemanasan adalah garnierite grup jenis serpentin dan merupakan campuran dari lizardite $[(Mg,Al,Ni)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8]$ dan antigorite $[(Mg,Al,Ni)_3(Si,Al)_2O_5(OH)_4]$ sebagai pengotor. Sedangkan setelah pemanasan adalah forsterite $[Mg_2SiO_4]$, Quartz $[SiO_2]$, Olivine $(Mg,Fe)_2SiO_4$. Forsterite merupakan olivine yang kaya akan magnesium dan mengandung sedikit besi.

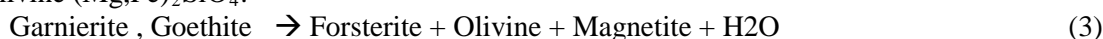


Gambar 3. Pola difraksi dari sampel bijih sampai pemanasan 1000°C (F:Forsterite, Q:Quartz, Ov:Olivine, L: Lizardite, G:Goethite, E:Enstatite)

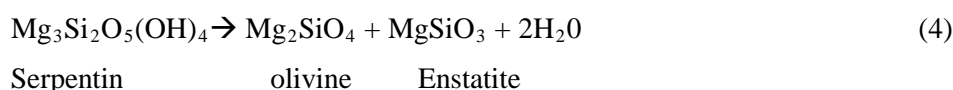
Tabel 3. Mineral utama yang terbentuk pada temperatur pemanasan

Bijih laterit awal	Setelah Pemanasan				
	600 °C	700 °C	800°C	900 °C	1000 °C
lizardite, talk, quartz goethite	lizardite, quartz, forsterite	quartz, forsterite, olivine, Enstatite	quartz, forsterite, olivine, Enstatite	quartz, forsterite, olivine, Enstatite,	quartz, forsterite, olivine, Enstatite

Berdasarkan analisis XRD pada Gambar 3, mineral yang terbentuk setelah pemanasan yaitu forsterite, olivine dan enstatite yang semuanya merupakan produk oksidasi dari mineral. Garnierite group golongan serpentine (clinocrysotile, antigorite, lizardite) bertransformasi menjadi forsterite dan olivine $(Mg,Fe)_2SiO_4$.

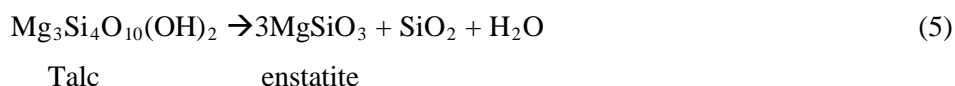


Pada temperatur yang tinggi dan mencapai keseimbangan serpentine akan membentuk olivine sesuai persamaan 4 [2].





Sedangkan mineral minor Talc akan menghasilkan enstatite dan silika



Tetapi pada temperatur diatas 900 °C, fasa olivine akan lebih banyak dari enstatite dan telah dibuktikan Brindley [15,20]. Dimana enstatite dapat mengurai menjadi forsterite dan silika. Tetapi dalam penelitian ini terlihat bahwa enstatite masih muncul bersama silika, sehingga tidak semua enstatite menjadi olivine. Menurut Pham Thi Hang [2] keberadaan Enstatite ditentukan oleh asal sumber nikel dan kadarnya dimana bijih kadar rendah akan menghasilkan enstatite walaupun dalam skala minor sebaliknya bijih kadar tinggi akan menghasilkan olivine. Selain itu kontribusi mineral minor Talc akan menghasilkan sejumlah kecil enstatite sesuai persamaan (5), sehingga berdasarkan hasil diatas dapat ditulis suatu reaksi umum pemanasan laterit sampel percobaan yaitu sbb:



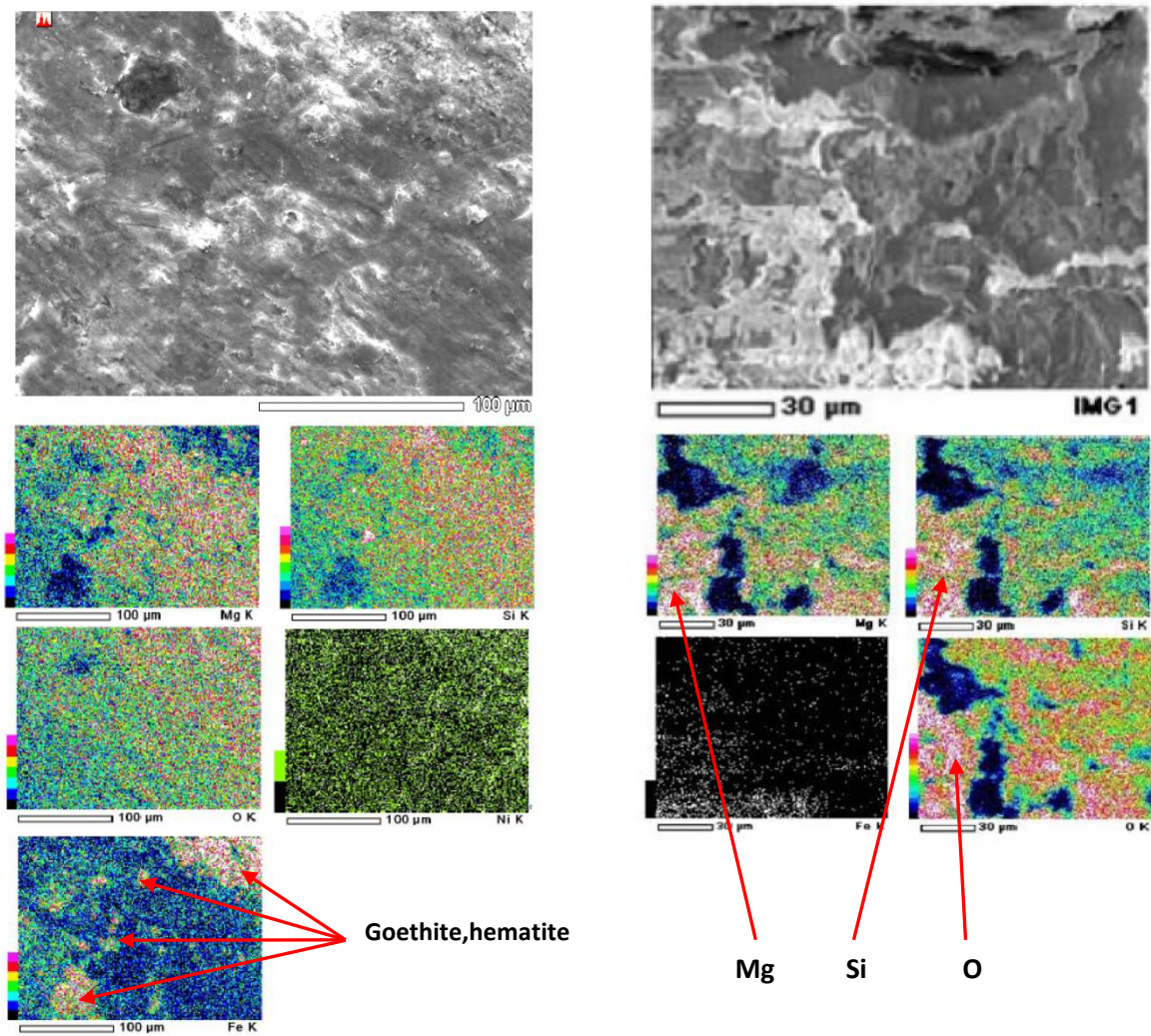
Serpentin olivine Enstatite silika

Olivine dalam reaksi diatas adalah campuran forsterite dan sedikit fayalite (FeO.SiO₂) sehingga karena forsterite dominan maka akan muncul puncak secara tersendiri.

Berdasarkan identifikasi fasa dengan XRD terlihat reaksi pembentukan forsterite telah terjadi pada temperatur 700 °C, dan menurut data DTA-TG pada sekitar temperatur 638,0°C, dimana pada temperatur tersebut terjadi suatu dehidroksilasi air kristal dari lizardite. Menurut Mackenzie [18] temperatur sekitar 700°C merupakan suatu reaksi dehidroksilasi endothermik yang bertahap karena kemungkinan adanya keberadaan komponen mineral lain dan adanya mineral chlorite sehingga daerah endothermik akan menjadi sangat lebar yaitu dari sekitar 650 °C sampai 800 °C. Tetapi bila dipanaskan lebih lanjut maka suatu reaksi eksotermik yang cepat akan terjadi pada temperatur kristalisasi forsterite. Dalam kaitannya dengan proses ekstraksi nikel, pada tahap ini logam nikel dan besi akan sulit untuk di reduksi lebih lanjut karena fasa yang terbentuk akan menjebak logam besi dan nikel kedalamnya sehingga proses reduksi akan terhambat [3, 6].

3.4. Analisis Perubahan Struktur Mikro

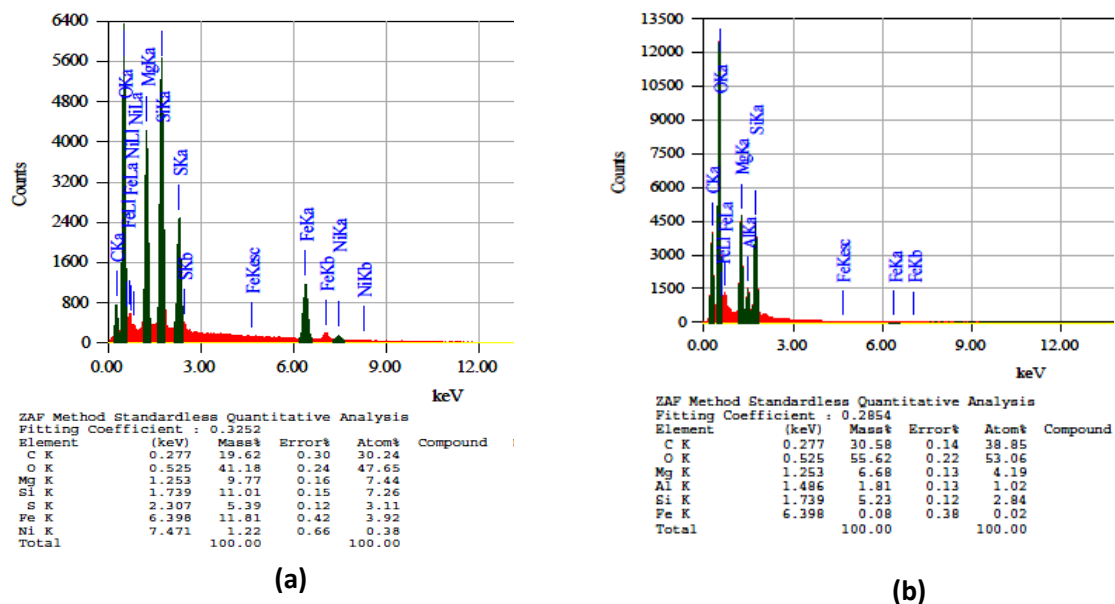
Analisis sebaran unsur dalam permukaan sampel sebelum dan setelah pemanasan diinvestigasi menggunakan analisis pemetaan unsur (elemental mapping) menggunakan alat SEM-EDX dimana gradasi warna dari titik-titik dari hitam ke warna merah menandakan peluang ditemukannya unsur dengan warna merah menandakan semakin banyak unsur ditempat tersebut. Gambar 4 merupakan gambar mikrostruktur laterit mentah sebelum pemanasan.



(a). Pemetaan unsur Mg, Si, O, Ni dan Fe dari bijih nikel laterit mentah sebelum pemanasan

(b) Pemetaan unsur Mg, Si, O dan Fe dari bijih nikel laterit setelah pemanasan 1000 °C

Gambar 4. Pemetaan unsur bijih nikel laterit (a) sebelum dan (b) sesudah pemanasan



Gambar 5. Komposisi kimia permukaan sampel sebelum (a) dan setelah (b) pemanasan

Dari 4a dan 4b terlihat unsur-unsur utama seperti Mg, Si, O, Fe dan Ni tersebar halus secara merata. Logam Fe dan Ni tampak tidak berkelompok sehingga menandakan logam Ni dan Fe terdapat dalam struktur mineral garnierite. Analisis komposisi kimia terhadap permukaan sampel sebelum pemanasan (gambar 5a) untuk Fe dan Ni masing-masing 11,81% dan 1,22%, sedangkan setelah pemanasan (gambar 5b) untuk Fe menjadi 0,08% dan Ni tidak terdeteksi. Sehingga telah terjadi penurunan komposisi kimia pada permukaan bijih. Hal ini terjadi kemungkinan karena setelah pemanasan sebagian nikel dan besi terlarut dalam kristal forsterite sehingga komposisi kimia nikel dan besi pada permukaan sampel menurun. Bahkan pada Gambar 5b unsur Ni tidak terdeteksi. Hal ini menandakan bahwa pada temperatur tersebut logam nikel dan besi berada di dalam forsterite sehingga kadarnya menurun dipermukaan sampel.

IV. KESIMPULAN

1. Jenis mineral utama pembawa logam nikel asal Pomalaa Sulawesi yaitu golongan serpentin dengan jenis mineral utama yang adalah lizardite.
2. Berdasarkan analisis menggunakan DTA-TG bahwa puncak endormik terjadi pada temperatur 78,8 °C, 293,7 °C dan 638,0 °C dan ini berhubungan dengan reaksi penguapan uap air dan pelepasan air kristal dari goethite dan pelepasan air kristal mineral serpentinik membentuk fasa forsterite. Temperatur kristalisasi forsterite terjadi pada temperatur 828,0 °C.
3. Fasa forsterite, olivine dan enstatite ditemukan pada temperatur 700 °C, enstatite merupakan degradasi dari talc dan kontribusi dari lizardite, sedangkan unsur besi tidak muncul karena membentuk fasa olivine (Mg,Fe)₂SiO₄.
4. Pada temperatur pemanasan 638,0 °C merupakan awal terjadi reaksi dehidroksilasi nikel laterit menjadi forsterite, pada temperatur tersebut mineral mengalami perubahan struktur dan pada saat itu waktu yang tepat untuk mereduksi logam nikel dan besi didalamnya.



DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Dalvi, A.D., Bacon, W.G., Osborne, R.C., "The past and the future of nickel laterite", PDAC 2004 International Convention, Trade Show & Investors Exchange, March 7-10, 2004, pp. 1-27.
- [2]. Pham Thi Hang , G. W. Brindley, The nature of Garnierite III; Thermal Transformation, Clays and Clay Minerals, 1973, Vol. 21, pp. 51-57. Pergamon Press. Great Britain.
- [3]. Kawahara, M., Toguri, J.M., Bergman, R.A., Reducibility of laterite ores, Metallurgical transactions B. Vol. 19B, April 1988, pp. 181-186.
- [4]. Li G. H., Shi T. M., Rao M.J., Jian T, Zhang Y. B., Beneficiation of nickeliferous laterite by reduction roasting in the presence of sodium sulfate [J]. Minerals Engineering, 2012, 32: 19-26.
- [5]. Rhamdhani, M.A., Hayes, P.C., Jak, E., 2009a. Nickel laterite Part1: thermodynamic analysis of phase transformations occurring during reduction roasting., Trans. Inst. Min. Metall., Section C 118(3), 146–155.
- [6]. Kim,J., Dodbiba,G., Tanno,H., Okaya,K., Matsuo,S., Fujita,T., 2010. Calcination of low-grade laterite for concentration of Ni by magnetic separation. Miner.Eng. 23, 282–288.
- [7]. Zhu D. Q., Cui Y., Vining K, Hapugoda S, Douglas J., Pan J., Zeng G. L., Upgrading low nickel content laterite ores using selective reduction followed by magnetic separation. International Journal of Mineral Processing, 2012, 106-109
- [8]. A Bunjaku et al., Phenomena In Thermal Treatment of lateritic Nickel Ores Up to 1000 °C, The Twelfth International Ferro Alloy Congress, 2010, pp 641-652.
- [9]. Valix, M., Cheung, W.H., 2002. Effect of sulfur on the mineral phases of laterite ores at high temperature reduction. Minerals Engineering 15 (7), 523–530.
- [10]. T. T. Chen, J. E. Dutrizac and E. Krause., International Laterite Nickel Symp. 2004, TMS, Warrendale, PA, (2004), 79.
- [11]. R. A. Bergman, Can. Min. Metall. Bull., **96** (2003), 127.
- [12]. Elias M, Donaldson M. J., Giorgettan., Geology, Mineralogy and chemistry of lateritic nickel-cobalt deposits near Kalgoorlie western Australia, Journal Economic Geology, 1981, 76(4), 1775-1783.
- [13]. Zhu D. Q., Cui Yu, Sarath H., Keith Vining, Pan Jian, Mineralogy and crystal chemistry of a low grade nickel laterite ore, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 22(2012) 907-916
- [14]. Bunjaku, M. Kekkonen, K. Pietila and P. Taskinen, Effect of mineralogy and reducing agent on reduction of saprolitic nickel ores, Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C) 2012 Vol. 121.
- [15]. G. W. Brindley, Ryoza Hayami, Kinetic and Mechanisms of Dehydration and Recrystallization of Serpentine., Clays and Clay Minerals 12, National Conference on Clay and Minerals, The Pennsylvania State University, 1964, p. 35-47.
- [16]. Mackenzie, R.C., Differential thermal analysis. , American mineralogist Vol. 1, 1970 London.
- [17]. John Rakovan, Serpentine, Department of Geology Miami University oxford Volume 86, January/February 2011.
- [18]. MacKenzie, K.J.D. and Meinhold, R.H., Thermal reactions of chrysotile revisited: ²⁹Si and ²⁵Mg MAS NMR study, American mineralogist, Vol. 79, 1994, pp. 43-50
- [19]. Ball, M.C. and Taylor, H.F.W., Dehydration of chrysotile in air and under hydrothermal conditions, Mineralogical Magazine, Vol. 33, 1963, pp. 467-482
- [20]. G. W. Brindley, and Zussman, J., Structural study of the thermal transformation of serpentine minerals to forsterite, American Mineral, 42(1957)., 461-474.