

IDENTIFIKASI PERUBAHAN MINERAL SELAMA PROSES PEMANASAN PELET KOMPOSIT NIKEL DENGAN ANALISIS DIFRAKSI SINAR X

IDENTIFICATION OF MINERAL CHANGES DURING HEATING OF NICKEL COMPOSITE USING X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS

Nur Vita Permatasari, Adji Kawigraha, Abdul Hapid, Nurhadi Wibowo

Pusat Teknologi Pengembangan Sumber Daya Mineral, Deputi Bidang TPSA, BPPT
Gedung Geostech (820) – Kompleks Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan

e-mail : nvita.permatasari@gmail.com, akawigraha@gmail.com,
abdulhapid@gmail.com, nurh4diwibowo@gmail.com

Abstrak

Logam nikel didapat dari proses pengolahan bijih nikel yang salah satunya adalah saprolit. Pada penelitian ini proses reduksi pelet komposit yang merupakan masa campuran bijih nikel serta batubara kadar rendah dan bahan tambahan dilakukan dalam tungku tabung. Proses reduksi dilakukan dengan menaikkan temperatur dari temperatur normal hingga temperatur 450 °C, 700 °C serta 1100 °C tanpa waktu tahan. Proses reduksi juga dilakukan pada temperatur yang lebih tinggi yaitu 1300 °C namun dengan pemanasan terlebih dahulu pada temperatur 700 °C dan ditahan pada 1 jam dan 2 jam. Produk pelet komposit dianalisis dengan metode difraksi sinar X untuk mengetahui kandungan mineralnya. Hasil menunjukkan bahwa pemanasan pelet komposit menyebabkan terjadinya perubahan warna dari warna coklat menjadi abu-abu. Pemanasan juga menyebabkan terjadinya perubahan komposisi mineral dari masing-masing pelet. Fasa-fasa yang terbentuk setelah pemanasan adalah hematit, magnetit, besi, nikel dan Fe₃C. Pemanasan pelet pada temperatur rendah yang lebih lama akan menghasilkan jumlah logam besi yang lebih rendah.

Kata Kunci : Bijih nikel, Proses reduksi nikel, Pirometalurgi Nikel

Abstract

Nickel is obtained from saprolite through nickel ore processing. In this study, reduction of composite pellet has been done in a tube furnace. The pellet consist of nickel ore, coal and additive. The reduction process carried out by increasing the temperature from ambient to 450°C, 700°C and 1100°C without hold time. Moreover the reduction is also carried out at 700 °C during 1 and 2 hours followed by heating at 1300°C for 2 and 1 hours. Reduction product was analyzed by X-Ray diffraction to determine the mineral content. The results indicate that the heating causing color changes from red brown to gray. The phases formed after heating are hematite, magnetite, iron, nickel and Fe₃C. Heating the pellets at low temperature longer will produce lower iron.

Key Words : Nickel ore, Nickel reduction process, Nickel pirometallurgy

Diterima (received) : 6 Februari 2018, Direvisi (revised) :16 Februari 2018,
Disetujui (accepted) : 3 Maret 2018

PENDAHULUAN

Nikel adalah salah satu logam yang penting dan memiliki banyak aplikasi dalam industri. Sekitar 62% dari logam nikel digunakan dalam baja tahan karat, 13% dikonsumsi sebagai *superalloy* dan paduan besi karena sifatnya yang tahan korosi dan tahan suhu tinggi¹⁾. Bijih nikel yang merupakan bahan baku pembuatan logam nikel diklasifikasikan menjadi dua kelompok yaitu bijih sulfida dan bijih laterit. Cadangan bijih laterit merupakan cadangan terbesar dengan jumlah 73 % dari cadangan bijih nikel yang ada^{2,3)}. Bijih nikel laterit biasanya terdapat didaerah tropis atau sub-tropis yang terdiri dari pelapukan batuan ultramafik yang mengandung besi dan magnesium yang cukup tinggi. Deposit tersebut biasanya menunjukkan lapisan yang berbeda karena kondisi cuaca. Lapisan pertama adalah lapisan yang kaya silika dan yang kedua adalah lapisan limonit yang didominasi oleh gutit [FeO(OH)] dan hematit (Fe₂O₃). Lapisan berikutnya adalah saprolit [(Ni,Mg)SiO₃.nH₂O)] yaitu lapisan yang kaya magnesium dan elemen basal. Antara lapisan saprolit dan limonit biasanya terdapat lapisan transisi yang kaya magnesium (10-20% Mg) dengan besi yang disebut *serpentine* [MgSi₂O₅(OH)]₄. Proses pengolahan bijih nikel yang ada pada saat ini menggunakan lapisan saprolit sebagai bahan baku.

Proses pengolahan bijih nikel dapat dilakukan dengan jalur pirometalurgi yang melibatkan temperatur tinggi atau jalur hidrometalurgi yang melibatkan cairan kimia untuk memisahkan nikel dari batuan induknya. Salah satu bentuk proses pengolahan jalur hidrometalurgi adalah *high pressure acid leaching* (HPAL)^{5,6,7)}. Kedua cara pengolahan tersebut (*pyro-hydro*) dapat dikombinasikan untuk mengolah bijih nikel⁸⁾.

Di Indonesia cadangan bijih nikel laterit yang cukup besar terutama berada di Sulawesi, Halmahera, Papua dan Kalimantan. Cadangan bijih nikel yang ada ini diperkirakan sebesar 1576 MT atau sekitar 15% dari cadangan nikel di dunia. Dengan jumlah sebesar itu hanya ada dua perusahaan yang mengolah bijih nikel di Indonesia terutama bijih saprolit yang berkadar nikel tinggi yaitu, PT.INCO menjadi *nickel matte* dan PT. Antam menjadi *ferro-nikel*. Sebagian besar bijih diekspor dalam bentuk mentah⁹⁾.

Ekspor bijih akan terus berlangsung jika Indonesia tidak memiliki industri pengolahan bijih nikel laterit sekalipun tercantum dalam UU No. 4 Tahun 2009 dan PERMEN No. 1

Tahun 2014 tentang peningkatan nilai tambah mineral melalui kegiatan pengolahan dan pemurnian mineral di dalam negeri. Berdasarkan data Pohon Industri Baja 2009 dari Kementerian Perindustrian dan data IISIA (*Indonesia Iron and Steel Industry Association*), belum ada industri yang memproduksi *pig iron* maupun NPI di Indonesia. Untuk itu diperlukan upaya agar sumber daya bijih nikel yang melimpah dapat dimanfaatkan dan dikembangkan di Indonesia.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan mineral selama bijih nikel komposit mengalami proses reduksi. Bijih nikel dibentuk pelet komposit yang merupakan campuran saprolit, batubara (30%), natrium sulfat/ Na₂SO₄ (3%) dan bentonite (2%) dan telah ditentukan perbandingan komposisinya. Proses reduksi dilakukan dengan jalur pirometalurgi. Analisis perubahan mineral dilakukan terhadap produk reduksi dengan metode difraksi sinar X (XRD - *X-ray Diffraction*).

Untuk mendukung kegiatan penelitian ini digunakan diagram Ellingham. Diagram Ellingham adalah diagram yang menyajikan data-data termodinamika suatu logam yang mengalami proses pembentukan oksida, sulfida, ataupun klorida. Diagram Ellingham menghubungkan antara energi bebas Gibbs (ΔG) dan temperatur (T). Energi bebas Gibbs adalah suatu ukuran dari *driving force* yang dapat membuat suatu reaksi terjadi. ΔG yang bernilai negatif menunjukkan bahwa suatu reaksi dapat terjadi secara spontan tanpa energi dari luar. Sementara itu reaksi yang memiliki ΔG positif menunjukkan reaksi tersebut tidak akan terjadi secara spontan.

Diagram Ellingham juga dapat digunakan untuk menentukan rasio antara CO dan CO₂ yang dibutuhkan untuk dapat mereduksi logam oksida menjadi logam. Selain itu diagram Ellingham dapat digunakan untuk mengetahui keseimbangan dari tekanan parsial oksigen dari logam atau oksida saat temperatur tertentu.

BAHAN DAN METODE

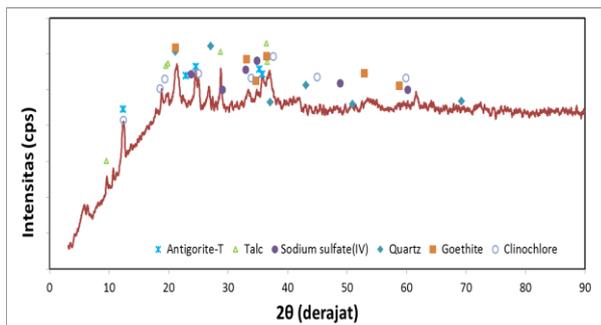
Bijih nikel yang digunakan dalam penelitian ini adalah saprolit yang memiliki kadar nikel yang lebih tinggi dibandingkan limonite. Bahan baku saprolit berasal dari Pomalaa – Provinsi Sulawesi Tenggara. Komposisi bijih nikel saprolit dan karakter mineraloginya dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 1.

Tabel 1.
Komposisi Kimia Saprolit

Komponen		Komponen	
Ni (%)	1,75	S (%)	0,01
Fe (%)	38	K (%)	0,01
Si (%)	27,8	Ti (ppm)	538
Mg (%)	8,57	P (ppm)	61
Al (%)	3,65	Co (ppm)	737
Cr (%)	1,77	Zn (ppm)	281
Mn (%)	0,635	Cu (ppm)	79,4
Ca (%)	0,45	Cl (ppm)	50
Na (%)	0,02		

Tabel 3.
Karakteristik Bentonit.

Komponen (%)		Komponen (%)	
Fe ₂ O ₃	4,71	P ₂ O ₅	0,02
TiO ₂	0,59	K ₂ O	0,32
SiO ₂	65,00	Na ₂ O	1,90
Al ₂ O ₃	17,37	MnO	0,04
CaO	1,12	LOI	7,30
MgO	1,25	H ₂ O	14,31
SO ₃	0,14		



Gambar 1.
Pola Difraksi Sinar X Saprolit dan rekapitulasi mineralnya

Batubara yang digunakan sebagai reduktor adalah batubara jenis kadar rendah. Jenis ini ditunjukkan dengan kadar *fixed carbon* yang hanya 38,13 %. Karakteristik keseluruhan batubara dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2.
Karakteristik Batubara
(pengujian dilakukan dengan basis adb)

Parameter	Jumlah (%)
<i>Proksimat</i>	
Moisture in dried sample	5,70
Kadar Abu	24,00
Volatile Matter	32,17
Fixed Carbon	38,13
<i>Ultimat</i>	
Karbon	54,81
Hidrogen	4,96
Nitrogen	1,61
Total Sulfur	1,92
Oksigen	12,70

Perekat yang digunakan untuk membentuk pelet komposit adalah bentonit. Karakteristik bahan ini dapat dilihat pada Tabel 3.

Bahan lain yang digunakan sebagai aditif dalam proses reduksi adalah natrium sulfat (Na₂SO₄). Bahan ini merupakan bahan kimia dan digunakan untuk memfasilitasi pembentukan logam nikel yang terpisah dari logam besi.

Penyiapan Bahan dan Pelet

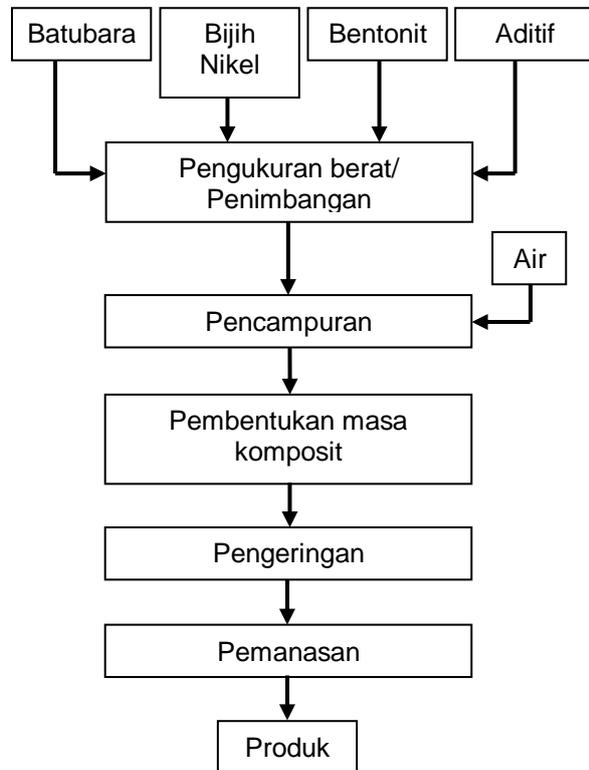
Penyiapan bahan dilakukan untuk mendapatkan bahan-bahan yang siap digunakan. Bijih nikel yang berasal dari tempat penambangan dikeringkan untuk menghilangkan kadar air. Bijih nikel kering kemudian digerus menggunakan *pot mill* selama dua jam. Bubuk bijih nikel kemudian disaring menggunakan *sieve shaker* untuk mendapatkan bijih yang berukuran 200 *mesh*. Batubara juga digerus dan disaring menggunakan alat-alat yang sama untuk mendapatkan ukuran yang sama seperti bubuk bijih nikel yang akan digunakan.

Bahan perekat bentonit telah berupa bubuk. Penyiapan bentonit hanya terdiri dari penyaringan untuk mendapatkan bentonit dengan ukuran 200 *mesh*. Bahan aditif Na₂SO₄ merupakan bahan kimia yang dijual umum dan memiliki ukuran hingga 200 *mesh*.

Seluruh bahan kemudian dibuat pelet komposit. Komposisi bahan yang digunakan adalah batubara 30 %, Na₂SO₄ 3 %, perekat bentonit 2% dan sisanya adalah saprolit.

Seluruh bahan dicampur terlebih dahulu dalam kondisi kering. Setelah bahan campuran homogen, air ditambahkan secara manual. Pasta yang terbentuk kemudian dibentuk komposit dengan ukuran 2 cm x 2 cm x 2 cm. Pelet komposit basah kemudian dikeringkan dalam *oven* pada temperatur 105 °C. Pemanasan dilakukan terus menerus hingga berat pelet konstan selama beberapa saat. Berat pelet yang konstan menunjukkan bahwa air bebas yang ditambahkan pada saat proses pembuatan pelet telah habis.

Pelet dengan berat konstan yang telah kering kemudian dikeluarkan dari oven pengering dan siap untuk dipanaskan hingga temperatur tinggi. Tahapan kerja sejak proses penyiapan, pembentukan pelet komposit serta pemanasan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2.

Diagram alir proses pembuatan serta proses pemanasan komposit nikel

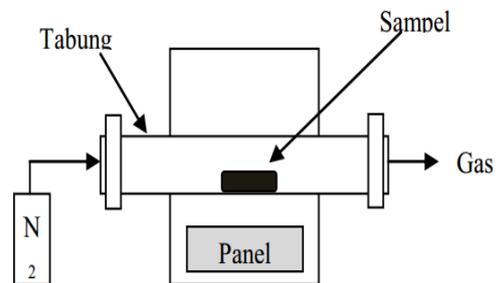
Proses Reduksi

Pelet komposit kering direduksi didalam tungku tabung (*furnace tube*) pada temperatur yang berbeda-beda. Proses pemanasan yang dilakukan untuk beberapa temperatur yaitu 450 °C, 700 °C, 1100 °C serta 1300 °C. Rincian percobaan detil dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4.
Variabel Percobaan Reduksi
Skala Laboratorium

No.	Temperatur (°C)	Waktu (Jam)	Temperatur (°C)	Waktu (Jam)
1.	450	0	-	-
2.	700	0	-	-
3.	1100	0	-	-
4.	700	1	1300	2
5.	700	2	1300	1

Tungku tabung yang digunakan telah diprogram dengan kecepatan kenaikan temperatur 10 °C/menit. Tungku juga diprogram pada awal tiap percobaan sesuai dengan rute yang diinginkan. Pada saat temperatur dan waktu yang diinginkan telah tercapai maka kenaikan temperatur akan dihentikan. Temperatur akan turun secara alami. Pada saat penurunan temperatur terjadi, gas nitrogen dialirkan kedalam tungku tabung. Aliran nitrogen digunakan untuk mempercepat penurunan temperatur dan mempertahankan keadaan tungku agar tidak ada oksigen (O₂) yang masuk kembali. Skema tungku tabung yang digunakan serta posisi pelet komposit selama pemanasan dapat dilihat pada Gambar 3.

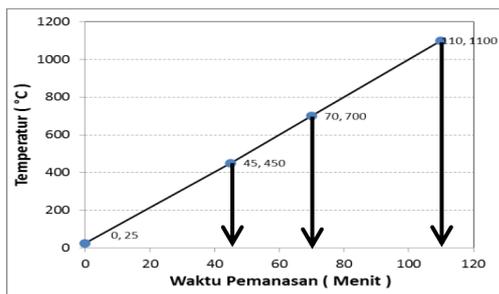
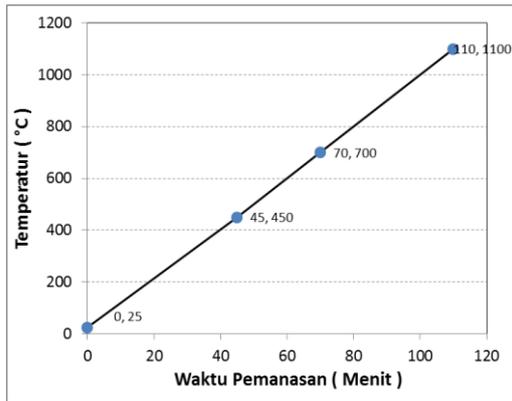


Gambar 3.

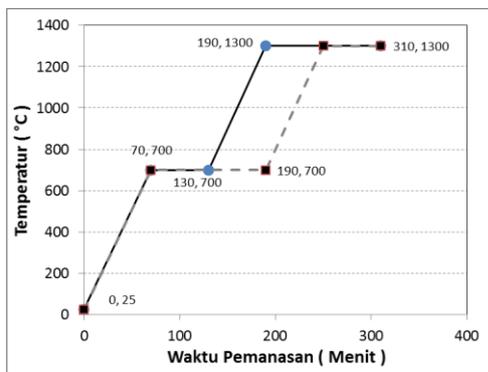
Skema tungku tabung dan posisi pelet komposit selama pemanasan

Proses pemanasan pelet komposit pada temperatur 450 °C, 700 °C serta 1100 °C dilakukan dengan tanpa waktu tahan pada masing-masing temperatur. Proses pemanasan hingga temperatur 1300 °C dilakukan dengan dua cara. Pemanasan pertama dilakukan dengan memanaskan pelet hingga 700 °C dan ditahan selama 1 jam dan kemudian pemanasan dilanjutkan hingga temperatur 1300 °C dan ditahan selama 2 jam. Pemanasan kedua dilakukan dengan memanaskan pelet hingga 700 °C dan ditahan selama 2 jam dan kemudian pemanasan dilanjutkan hingga temperatur 1300 °C dan ditahan selama 1 jam. Rute pemanasan pelet dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.

Produk yang dihasilkan dipersiapkan untuk pengujian XRD. Penyiapan sampel dilakukan dengan menghaluskan pelet komposit yang telah direduksi dengan alat pengerus kecil (*mini grinding mill*). Identifikasi mineral dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Match 2.



Gambar 4.
Rute pemanasan pelet komposit untuk 450 °C , 700 °C dan 1100 °C tanpa waktu tahan



Gambar 5.
Rute pemanasan pelet komposit pada 700 °C (1 jam) - 1300 °C (2 jam) dan 700 °C (2 jam) - 1300 °C (1 jam)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bahan baku bijih nikel saprolit yang digunakan memiliki kandungan nikel 1,75 % dan besi 38 %. Jumlah ini menunjukkan bahwa bijih masih dapat digolongkan memiliki kadar nikel yang tinggi yang masih berpotensi untuk dapat diproses melalui jalur pirometalurgi. Bijih memiliki mineral antigorite, klinoklor, gutit dan kuarsa. Dua mineral pertama merupakan komponen utama bijih. Hasil analisis sinar X tidak dapat

langsung mendeteksi adanya unsur nikel dalam bijih karena jumlah nikel sangat kecil sehingga mineral yang mengandung nikel tidak dapat teridentifikasi dengan mudah. Deteksi hanya dapat dilakukan pada mineral-mineral pembawa nikel seperti antigorite dan klinoklor.

Batubara yang digunakan sebagai reduktor merupakan batubara kadar rendah. Jenis batubara ditunjukkan dengan jumlah *fixed carbon* yang rendah yaitu 38,13 %. Fixed Carbon merupakan salah satu sumber reduktor terutama pada saat proses reduksi. Batubara dapat menghasilkan gas CO yang merupakan reduktor.

Perubahan Fisik

	
a. Pelet sebelum dipanaskan	b. Pelet setelah dipanaskan 450 °C
	
c. Pelet setelah dipanaskan 700 °C	d. Pelet setelah dipanaskan 1100 °C
	
e. Pelet setelah dipanaskan 1300 °C	

Gambar 6.
Perubahan warna komposit berdasarkan kenaikan temperatur tanpa waktu tahan

Tabel 5.
Rekapitulasi perubahan warna dengan kenaikan temperatur

No.	Rute Temperatur (°C)	Waktu (Jam)	Warna
1.	normal	0	Coklat
2.	450	0	Merah coklat
3.	700	0	Coklat
4.	1100	0	-
5.	700	1	-
	1300	2	Abu-abu gelap
6.	700	2	-
	1300	1	Abu-abu gelap

Pelet komposit selama proses pemanasan mengalami perubahan warna

yang sangat signifikan. Perubahan terutama terjadi pada pemanasan temperatur tinggi. Warna pelet komposit sebelum pemanasan adalah coklat. Warna ini mengikuti warna coklat bijih nikel. Pemanasan pada temperatur 450 °C menyebabkan warna pelet menjadi merah coklat dan pada temperatur 700 °C pelet menjadi coklat. Perubahan warna lebih jelas terjadi pada saat pemanasan pelet komposit pada temperatur 1100 °C dan 1300 °C. Pelet komposit berubah warna menjadi abu-abu gelap. Hal ini tampak pada foto-foto yang ada pada Gambar 6. Rekapitulasi perubahan warna dapat dilihat pada Tabel 5.

Perubahan Mineral/Fasa

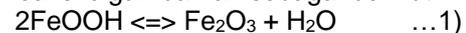
Hasil analisis data difraksi sinar X dengan *software* Match menunjukkan bahwa terdapat berbagai mineral yang berbeda-beda selama proses pemanasan 450 °C, 700 °C dan 1100 °C tanpa waktu tahan. Mineral-mineral yang teridentifikasi adalah antigorit, klinoklor, talk, enstatite, forsterite, karbon, hematit, kuarsa, magnetit, wustit, nikel dan besi. Perubahan masing-masing mineral disebabkan karena perubahan mineral akibat proses pemanasan pada tahap awal serta adanya proses reduksi sehingga terbentuk mineral atau fasa baru. Rekapitulasi jumlah dari masing-masing mineral dapat dilihat pada Gambar 7.

Pada temperatur 450 °C 0 jam, pelet komposit didominasi oleh mineral antigorit, klinoklor, talk serta enstatit. Mineral-mineral lain merupakan mineral dengan jumlah yang minor. Pada temperatur 700 °C 0 jam, pelet komposit didominasi oleh mineral enstatit, talk, klinoklor dan antigorit. Pada temperatur

1100 °C, produk pelet komposit didominasi oleh besi dan nikel.

Gambar 7 juga menunjukkan bahwa terdapat beberapa jenis perubahan selama proses pemanasan pelet komposit. Beberapa mineral seperti antigorit, klinoklor, talk, forsterit dan hematit cenderung berkurang seiring dengan kenaikan temperatur. Enstatit, kuarsa (*silicon oxide quartz low*), nikel serta besi cenderung bertambah seiring dengan kenaikan temperatur.

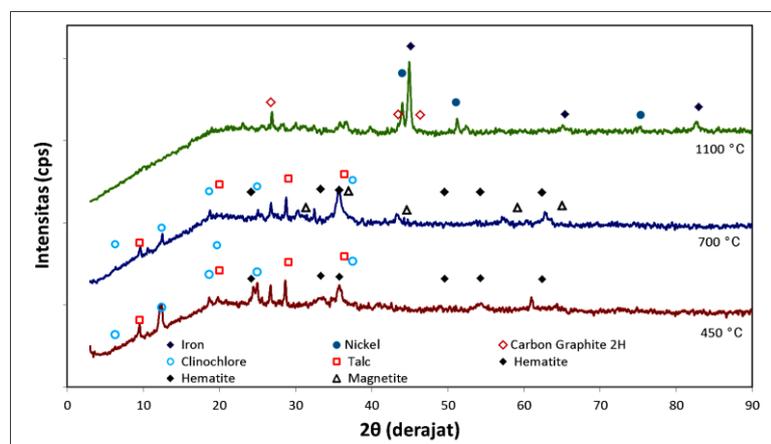
Kenaikan temperatur dari temperatur normal menjadi 450 °C menyebabkan gutit yang terdapat dalam bijih nikel mengalami perubahan menjadi hematit. Perubahan gutit menjadi hematit terjadi pada temperatur antara 295 °C hingga 350 °C. Proses perubahan ini merupakan reaksi pelepasan air dan reaksi digambarkan sebagai berikut :



Pemanasan diatas temperatur perubahan besi hidroksida menjadi hematit menyebabkan pelet berubah warna menjadi merah coklat yang merupakan warna khas hematit. Antigorit serta klinoklor berkurang seiring dengan kenaikan temperatur dan sebaliknya forsterit serta enstatit cenderung bertambah jumlahnya. Forsterite yang pada temperatur 700 °C jumlahnya bertambah akan kembali berkurang dengan kenaikan temperatur.

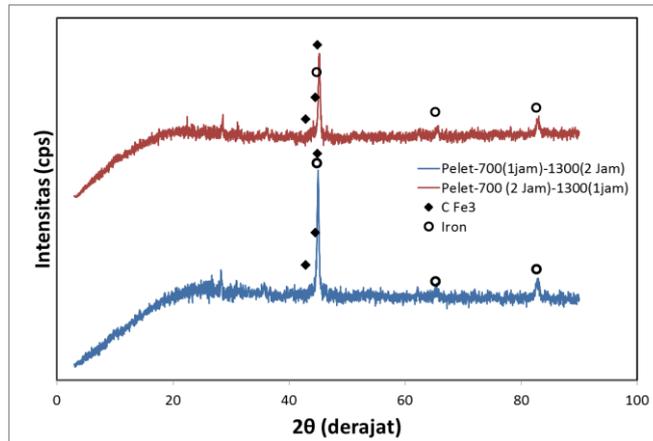
Pembentukan nikel dan besi terjadi pada temperatur 1100 °C. Kedua logam tidak membentuk logam paduan FeNi.

Hasil analisis difraksi sinar X pada pelet komposit yang dipanaskan pada temperatur 1300 °C dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7.

Hasil difraksi sinar-X pelet dengan kenaikan temperatur hingga 450 °C, 700 °C dan 1100 °C tanpa waktu tahan



Gambar 8.
Hasil difraksi sinar-X pelet
hingga temperatur 1300 °C

Hasil analisis difraksi sinar X tersebut menunjukkan bahwa kedua produk pemanasan memiliki mineral atau fasa yang sama yaitu Fe_3C dan Fe. Jumlah kedua fasa berbeda untuk kedua produk. Hal ini ditandai dengan adanya perbedaan puncak Fe dan Fe_3C . Produk pelet komposit yang dipanaskan pada temperatur 700 °C selama 1 jam memiliki kandungan besi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pelet yang dipanaskan pada 700 °C selama 2 jam. Sebaliknya pelet tersebut memiliki Fe_3C yang lebih rendah dibandingkan dengan produk pelet yang dipanaskan pada 700 °C selama 2 jam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemanasan pada temperatur 700 °C yang lebih lama akan mengurangi pembentukan logam Fe. Sebaliknya pemanasan yang lebih lama pada temperatur 1300 °C akan menghasilkan Fe yang lebih banyak. Hasil analisis ini juga berbeda dengan hasil analisis peneliti lain yang menyatakan bahwa pada temperatur 1300 °C sesungguhnya pelet dapat menghasilkan logam paduan $FeNi^{10}$. Perbedaan hasil disebabkan rute pemanasan yang berbeda. Pemanasan pada temperatur rendah di tahap awal dengan waktu yang relatif lama akan menyebabkan terbentuknya besi dengan lebih mudah.

SIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan warna antara warna bahan baku dan warna produk bergantung pada temperatur pemanasan. Pemanasan pada temperatur rendah tidak menyebabkan perubahan warna yang signifikan namun pemanasan pada temperatur tinggi

menyebabkan warna pelet berubah dari warna coklat menjadi abu-abu gelap.

Pemanasan pelet komposit menyebabkan terjadinya perubahan komposisi mineral yang terdapat dalam produk hasil pemanasan. Perbedaan disebabkan karena proses pemanasan dan reaksi reduksi yang disebabkan oleh terbentuknya gas reduktor dari batubara.

Perbedaan rute pemanasan menyebabkan perbedaan karakteristik produk. Logam besi lebih banyak teridentifikasi pada pemanasan temperatur tinggi yang melewati pemanasan pada temperatur rendah pada waktu yang lebih lama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Perekayasa yang terlibat dalam penulisan ini mengucapkan banyak terima kasih kepada Kemenristekdikti yang telah memberikan bantuan pendanaan dalam pelaksanaan penelitian ini selama tahun anggaran 2016.

DAFTAR PUSTAKA

1. Barkas J., Drivers and Risks for Nickel Demand, 7th International China Nickel Conference, Shanghai, 2010.
2. Kim, J., Dodbiba, G., Tanno, H., Okayaa, K., Matsuo, S., Fujita, T., *Calcination of low-grade laterite for concentration of Ni by magnetic separation*, Minerals Engineering, 23, 282-288, 2010.

3. Superiadi, A., Processing Technology vs. Nickel Laterite Ore Characteristic, PT Inco, 2007.
4. Yildirim, H., Turan, A. and Yücel, O., *Nickel Pig Iron (NPI) Production From Domestic La Teritic Nickel Oreas Using induction Furnace*, International Iron & Steel Symposium, pp. 337-344, Turkey, 2012.
5. Liu, K., Chen, Q.Y., Hu, H.P., Yin, Z.L., Wu, B.K., *Pressure acid leaching of a Chinese laterite ore containing mainly maghemite and magnetite*, Hydrometallurgy 104 (1), 32-38, 2010.
6. Rubisov, D.H. and Papangelakis, V.G., *Sulphuric acid pressure leaching of laterites-speciation and prediction of metal solubilities "at temperature"*, Hydrometallurgy 58(1), pp.13-26, 2000.
7. Oxley, Anne., Smith, Mark. E., Caceres, Omar., *Why heap leach nickel laterites?*, Minerals Engineering 88, pp. 53-60, 2016.
8. Oxley, Anne., Barcza, Nic., *Hydro-pyro integration in the processing of nickel laterites*, Minerals Engineering 54, pp. 2-13, 2013.
9. Hernández F., Medina O., Escuarda R., Acas B. Ventanilla K. Sanchez Sh., (2008), *NPI production in small blast furnace*, PGMCM, Metallurgical Process & technical Consultant, Philippines, 2008.
10. Li, G., Rao, M., Jiang, T., Zhang, Y., Li, Q., *A novel process for preparing ferronickel powder from laterite ores*, TMS – 139th Annual Meeting and Exhibition. Minerals, Metals and Materials Society, Seattle, United states, pp. 489–496, 2010.