



Peningkatan Kadar Nikel Bijih Limonit Melalui Proses Reduksi Selektif dengan Variasi Temperatur dan Persen Sulfur

Tiffany Ary Prakasa^{a,1}, Andinnie Juniarsih^{b,2}, Agus Budi Prasetyo^{c,3}

^aJurusan Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Jl. Jendral Sudirman Km 3, Kotabumi Kec. Purwakarta, Kota Cilegon, Banten, 42435, Indonesia

¹E-mail:

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada Agustus
Direvisi pada September
Disetujui pada Oktober
Tersedia daring pada November

Kata kunci:

Bijih limonit, reduksi selektif, zat aditif, adar nikel

Keywords:

Limonite ore, selective reduction, additives, nickel content

ABSTRAK

Bijih nikel sulfida yang merupakan sumber utama produksi logam nikel dunia semakin hari semakin menipis. Hal ini mendorong para pelaku tambang untuk memanfaatkan bijih nikel laterit lebih optimal. Sumber daya nikel laterit dunia terhitung masih sangat besar dibandingkan dengan nikel sulfida, yaitu sekitar 72%[1]. Di Indonesia sendiri, potensi sumber daya nikel laterit termasuk dalam 4 besar dunia dengan total 1.878.550.000 ton[2]. Namun, kadar Ni yang rendah (<1,2%) serta komposisi bijih yang begitu kompleks membuat nikel laterit sulit untuk diolah. Teknologi pengolahan nikel laterit dengan proses reduksi selektif dinilai cukup menguntungkan. Temperatur reduksi serta jumlah penambahan zat aditif yang tepat ke dalam campuran pelet, akan menghasilkan konsentrat dengan kadar Ni tinggi. Zat aditif yang berfungsi baik dalam reduksi ini adalah sulfur. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh temperatur serta persen sulfur yang ditambahkan, sehingga didapatkan kadar Ni yang optimal saat proses reduksi. Penelitian ini menggunakan variasi temperatur dan persen sulfur masing-masing sebesar 800, 900, 1000, 1100°C dan 0, 7, 14, 21%. Proses reduksi selektif dilakukan selama 60 menit dengan menggunakan reduktor grafit. Analisis AAS, XRD, dan SEM dilakukan untuk melihat karakteristik konsentrat yang terbentuk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar Ni dan *recovery* optimal masing-masing sebesar 1,98% dan 96,3% pada temperatur 1100°C. Selanjutnya pada variasi persen sulfur didapat kadar sebesar 1,61% saat penambahan 7% sulfur.

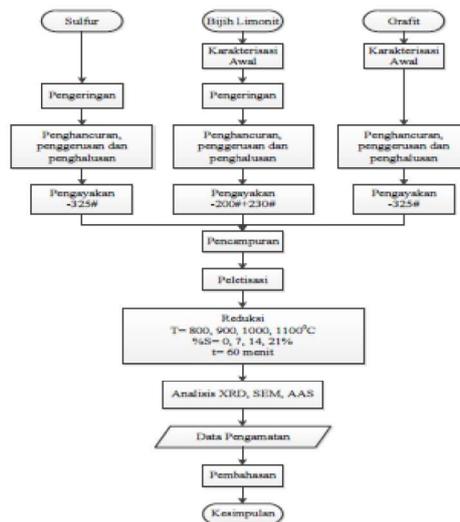
ABSTRACT

Nickel sulfide ore which is the main source of world nickel metal production is getting depleted day by day. This encourages mining players to utilize laterite nickel ore more optimally. The world's nickel laterite resources are still very large compared to nickel sulfide, which is around 72%[1]. In Indonesia alone, the potential for nickel laterite resources is included in the top 4 in the world with a total of 1,878,550,000 tons[2]. However, the low Ni content (<1.2%) and the complex ore composition make laterite nickel difficult to process. Laterite nickel processing technology with selective reduction process is considered quite profitable. The reduction temperature and the right amount of additives added to the pellet mixture will produce a concentrate with a high Ni content. The additive that works well in this reduction is sulfur. This study aims to examine the effect of temperature and the percentage of sulfur added, so that optimal levels of Ni are obtained during the reduction process. This study used variations in temperature and percent sulfur respectively 800, 900, 1000, 1100°C and 0, 7, 14, 21%. The selective reduction process was carried out for 60 minutes using a graphite reducing agent. AAS, XRD, and SEM analyzes were carried out to see the characteristics of the concentrate formed. The results showed that the levels of Ni and optimal recovery were 1.98% and 96.3%, respectively, at a temperature of 1100°C. Furthermore, in the variation of the percent sulfur content obtained by 1.61% when the addition of 7% sulfur.

1. Pendahuluan

Nikel termasuk bahan galian yang strategis dan memiliki nilai ekonomis yang tinggi[1]. Perkembangan komoditas nikel dunia terus mengalami peningkatan[2]. Sumber nikel dunia berasal dari bijih nikel laterit dan bijih nikel sulfida, dengan perbandingan secara berurutan sebesar 72% berbanding 28%[3]. Nikel laterit ditemukan terutama di daerah tropis seperti Indonesia, Kuba, Kaledonia Baru dan Filipina. Nikel sulfida banyak ditemukan di daerah Kanada dan Australia. Walaupun mayoritas sumber nikel terkandung dalam nikel laterit, produksi nikel dari nikel sulfida lebih dominan karena kandungan nikelnnya yang lebih tinggi dibandingkan nikel laterit. Nikel sulfida tercatat menjadi sumber produksi nikel terbesar yaitu 60% dari produksi nikel dunia[4]. Eksploitasi nikel sulfida yang terus menerus, mengakibatkan masalah penipisan cadangan nikel sulfida[5]. Oleh karena itu, pemanfaatan nikel laterit sebagai sumber nikel dunia menjadi perhatian besar beberapa tahun ke belakang[6]. Mengingat cadangan nikel laterit yang sangat besar, yaitu sekitar 72% dari total sumber nikel dunia. Potensi nikel laterit di Indonesia diperkirakan mencapai 1.878.550.000 ton dengan kandungan unsur nikel rata-rata 1,45% yang tersebar di daerah Sulawesi, Kalimantan, Maluku, dan Papua[7]. Indonesia menempati posisi keempat dunia sebagai sumber nikel laterit dunia dengan total cadangan sebesar 12%. Potensi ini menciptakan peluang bagi Indonesia karena permintaan nikel dunia mulai dari tahun 2010 sampai 2025 diproyeksikan akan terus meningkat[2]. Permen ESDM Nomor 7 Tahun 2012 tentang pelarangan bijih nikel dijual ke luar negeri, turut mendorong dilakukannya pengolahan bijih dalam negeri sebagai upaya peningkatan peran Indonesia dalam produksi nikel dunia. Hal ini menjadi peluang karena produksi nikel Indonesia pada tahun 2016 diproyeksikan mencapai 160.000 ton[8]. Nikel laterit terbentuk dari proses pelapukan batuan ultramafik dengan komposisi *olivin* dan *piroksen* yang kaya akan mineral besi-magnesium-silikat[9]. Nikel terdapat dalam kisi-kisi mineral *olivin* dan *piroksen*, sebagai hasil substitusi terhadap atom Fe dan Mg. Nikel tersebar secara halus di dalam bijih dan sulit ditingkatkan kadarnya menggunakan metode benefisiasi fisik biasa[3]. Kondisi ini menuntut para peneliti mengembangkan metode baru. Salah satu metode yang dikembangkan adalah proses reduksi *roasting* yang mereduksi NiO menjadi nikel metalik dan dilanjutkan dengan memisahkan produk berharga Ni dari pengotor besi menggunakan metode konsentrasi[10]. Pada temperatur 600°C, NiO sudah mengalami reduksi menjadi nikel metalik, namun besar partikel yang terbentuk tidak memenuhi syarat untuk proses pemisahan secara magnet[11]. Sebaliknya, ketika proses reduksi dilakukan pada temperatur 1000°C akan menghasilkan partikel metalik dengan ukuran besar, namun diikuti dengan meningkatnya laju reduksi FeO menjadi besi metalik yang tidak diinginkan[12]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa besarnya partikel nikel metalik hasil dari reduksi ditingkatkan dengan penambahan senyawa sulfur. Hal ini terjadi karena sulfur dapat menurunkan tegangan permukaan dari partikel logam, sehingga ukuran partikel dapat membesar[13]. Peneliti dari Universitas Changsha, Zhu et. al., melakukan reduksi *roasting* pada nikel laterit di temperatur 1100°C selama 60 menit, dengan penambahan 6% kalsium sulfat. Penelitian tersebut menghasilkan konsentrat feronikel dengan kadar Ni sebesar 6% dan *recovery* nikel 92,10%[14]. Peneliti dari Miner Eng., Li et. al., melaporkan bahwa kadar Ni dalam konsentrat feronikel mencapai 9,48%, namun *recovery* yang didapat hanya 83,01%. Hasil ini didapat setelah nikel laterit direduksi pada temperatur 1100°C selama 60 menit dengan penambahan 20% sodium sulfat (Na₂SO₄)[15]. Penelitian tentang ekstraksi nikel dari nikel laterit ini dilakukan dengan metode reduksi *roasting* pada temperatur 800°C hingga 1100°C. Zat aditif sulfur ditambahkan sebanyak 0% hingga 21% pada saat proses pembuatan pelet. Fasa dan perubahan struktur mikro selama proses reduksi dianalisa menggunakan *X-ray Diffraction Analysis* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh temperatur reduksi *roasting* yang dilakukan pada bijih nikel laterit dan pengaruh sulfur sebagai zat aditif dalam pelet bijih nikel laterit terhadap peningkatan kadar Ni yang didapat.

2. Metode Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakterisasi Awal Bijih limonit

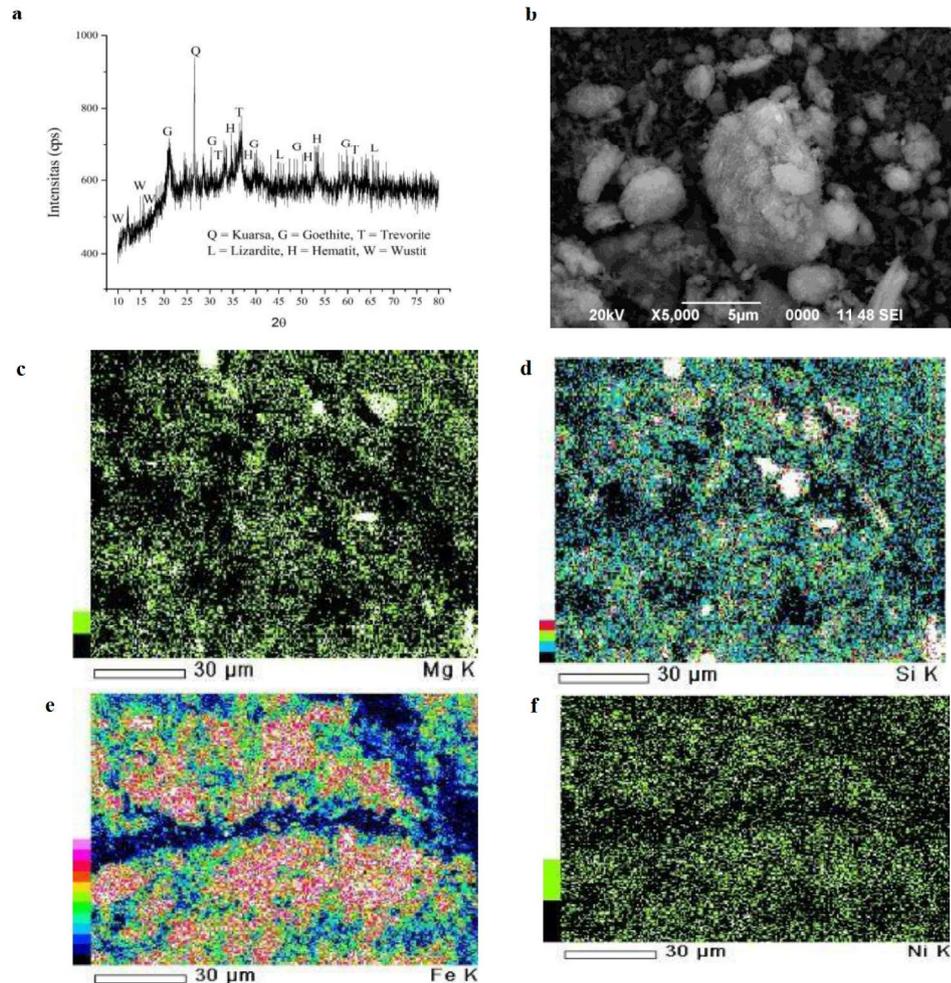
Sampel bijih yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari daerah Sangaji, Halmahera. Sebelum dilakukan proses reduksi, karakterisasi bijih dilakukan dengan menggunakan analisis XRF (*X-Ray Fluorescent*), analisis XRD (*X-Ray Diffraction*) dan analisis SEM (*Scanning Electron Microscopy*). Analisis XRF merupakan metode analisis tidak merusak yang digunakan untuk analisis unsur secara kualitatif dan kuantitatif. Hasil analisis XRF tercantum dalam Tabel 1. Hasil analisis XRF pada Tabel 1 terdiri dari komposisi kimia dalam bijih beserta dengan kadarnya. Terlihat kadar nikel oksida

dalam bijih sekitar 1,42% dan kadar Fe_2O_3 sekitar 69,55%. Hal ini menunjukkan bahwa bijih yang digunakan termasuk dalam bijih limonit dengan Ni kadar rendah (sekitar 1,11%) namun mengandung besi yang cukup tinggi (sekitar 24,32%). Selain itu, terdapat pula senyawa kuarsa yang cukup dominan dengan kadar sebesar 14,84%.

Tabel 1. Hasil Analisis XRF terhadap Bijih Limonit

Komponen	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	NiO
Kadar (%)	69,55	14,84	4,63	3,04	1,56	1,4

Analisis XRD yang merupakan analisis secara kualitatif dari suatu mineral kemudian dilakukan untuk mengetahui komposisi senyawa kimia yang dominan. Analisis kualitatif dengan menggunakan XRD (*X-Ray Diffraction*) menghasilkan difraktogram pada Gambar 2.a. Berdasarkan hasil analisis XRD (Gambar 2.a), diketahui bahwa bijih yang akan digunakan merupakan bijih jenis limonit yang tersusun atas Kuarsa (SiO_2), Goetit [$\text{FeO}(\text{OH})$], Trevorit (NiFe_2O_4), Lizardit [$\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$], Hematit (Fe_2O_3), dan Wustit (FeO). Fasa kuarsa dan goetit merupakan fasa yang paling dominan di dalam bijih. Nikel tidak terdeteksi dalam analisis XRD dikarenakan bentuknya yang sangat halus dan sebagian besar berasosiasi dengan Fe sebagai logam pengganti. Hal ini yang menyebabkan bijih limonit dengan kadar Ni rendah tidak dapat ditingkatkan dengan proses benefisiasi fisik biasa [18]. Untuk mengetahui struktur mikro dan pola persebaran unsur dalam bijih dapat diketahui dengan menggunakan analisis SEM seperti pada Gambar 2.b. Gambar 2.b menunjukkan hasil analisis SEM bijih limonit dengan perbesaran 5000x. Butiran yang terkandung dalam bijih limonit tidak sama ukurannya [13]. Terlihat butir terbesar memiliki struktur bulat lonjong. Namun ada pula butir yang memiliki struktur persegi panjang dengan ukuran yang lebih kecil. Selanjutnya perlu diketahui pola persebaran unsur penyusun bijih seperti pada Gambar 2.c sampai 2.f. Analisis pola persebaran unsur dilakukan untuk melihat homogenitas unsur dalam bijih. Pada Gambar 2.c hingga 2.f dapat dilihat pola persebaran dari unsur-unsur yang terkandung dalam sampel bijih. Besi dan silika yang merupakan unsur dominan tersebar secara merata dalam bijih limonit. Unsur nikel, magnesium dan aluminium rata-rata berukuran kecil dan tersebar luas dalam bijih, sebagian besar berasosiasi di dalam oksida besi sebagai logam pengganti. Hasil ini sesuai dengan analisis XRD bahwa oksida besi merupakan senyawa penyusun yang paling dominan dan diikuti dengan silika dalam bentuk kuarsa.

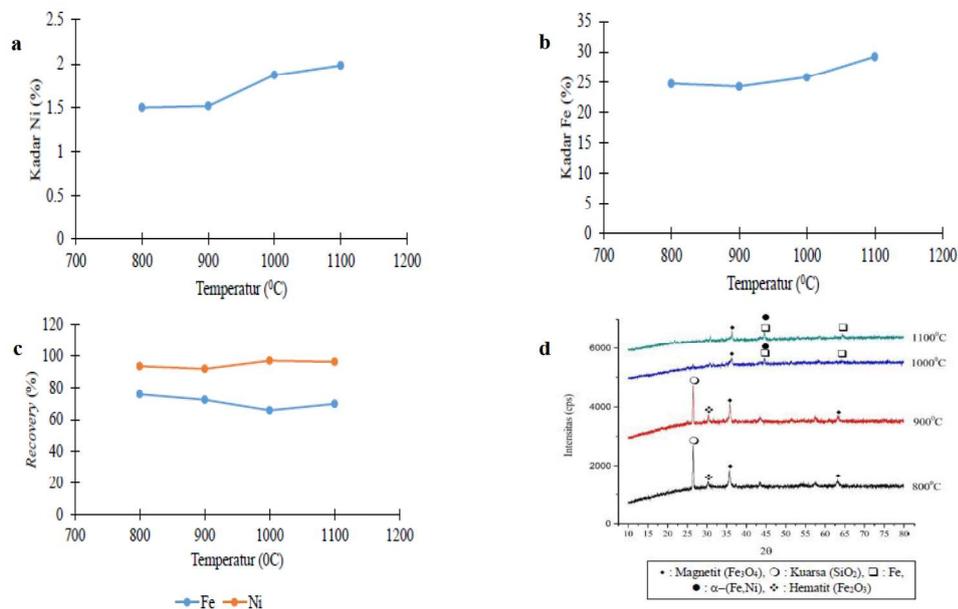


Gambar 2. (a) Hasil Analisis XRD Bijih Limonit; (b) Hasil Analisis SEM Bijih Limonit dengan perbesaran 500x; (c) Pola persebaran Mg; (d) Pola persebaran Si; (e) Pola persebaran Fe; (f) Pola persebaran Ni.

3.2 Pengaruh Temperatur Roasting

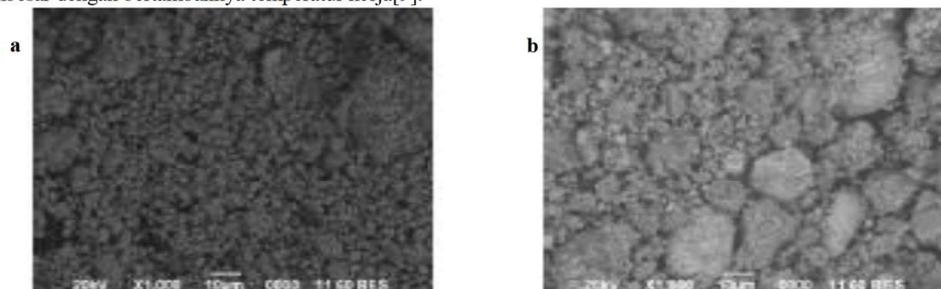
Hasil reduksi dengan variasi temperatur 800, 900, 1000 dan 1100°C selama 60 menit, dengan tambahan reduktor grafit dan zat aditif sulfur masing-masing

sebanyak 7% dari berat sampel, dianalisis menggunakan AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*) untuk mengetahui kadar logam Ni dan Fe seperti Gambar 3.a dan Gambar 3.b. Dari Gambar 3.a dan Gambar 3.b dapat diketahui bahwa setelah proses reduksi, terjadi peningkatan kadar logam, baik logam Ni maupun logam Fe. Pada logam Ni terjadi kenaikan dari 1,49% saat 800°C menjadi 1,98% saat 1100°C, sedangkan pada logam Fe terjadi kenaikan dari 24,65% saat 800°C menjadi 29,22% saat 1100°C. Kadar Ni mencapai nilai optimal (1,98%), ketika reduksi berlangsung pada temperatur 1100°C. Pada temperatur yang sama pula kadar Fe mencapai nilai optimal (29,22%). Hal ini mengindikasikan bahwa temperatur merupakan faktor yang sangat mempengaruhi proses reduksi. Temperatur yang semakin meningkat, menyebabkan reduksi yang berlangsung semakin sempurna dan dibuktikan dengan meningkatnya kadar logam[13]. Fasa metalik besi dan nikel masing-masing semakin terkonsentrasi dan tumbuh menjadi partikel dengan ukuran yang lebih besar[9], serta meningkatkan derajat liberasi Ni dan Fe dari Silikat[12]. Peningkatan kadar Ni dan Fe tentunya berhubungan dengan nilai *recovery* yang akan didapat. Gambar 3.b memperlihatkan grafik pengaruh temperature terhadap nilai *recovery*. Gambar 3.c menunjukkan nilai *recovery* dari logam Ni cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya temperatur reduksi. Nilai *recovery* Ni yang terbaik didapat pada saat temperatur 1000°C, yaitu 97,01%. Sebaliknya, penurunan nilai *recovery* Fe terjadi seiring dengan bertambahnya temperature reduksi. Penurunan nilai *recovery* Fe mulai terjadi pada saat temperatur 900°C dengan persentase *recovery* sebesar 72,5%. Selanjutnya penurunan terus terjadi hingga mencapai nilai terendah sebesar 65,89% pada saat temperatur 1000°C. Menurunnya nilai *recovery* Fe kemungkinan besar akibat dari terbentuknya fasa FeS. Tingginya temperatur akan mempengaruhi derajat metalisasi Fe imbas dari pembentukan FeS dan pada akhirnya akan menurunkan laju pembentukan logam Fe. Menurunnya laju pembentukan logam Fe akan meningkatkan kandungan Ni dalam bijih. Analisis menggunakan XRD juga dilakukan untuk mengetahui senyawa yang terbentuk dari sampel yang telah direduksi. Hasil analisis disajikan dalam Gambar 3.d. Gambar 3.d menjelaskan perubahan-perubahan yang terjadi dari variasi temperature reduksi. Semakin tinggi temperatur reduksi, intensitas dari senyawa-senyawa oksida akan semakin menurun dan bahkan menghilang. Sebaliknya, intensitas dari logam Fe dan Ni mulai meningkat seiring dengan bertambah tingginya temperatur. Saat bersamaan, tingginya temperatur reduksi juga akan meningkatkan fluiditas Fe dan Ni, ditandai dengan bertambahnya intensitas fasa kamasit dan logam Fe. Pada temperatur 800°C hingga 900°C, fasa yang dominan berupa kuarsa, hematit, dan magnetit masih memperlihatkan intensitas yang cukup tinggi. Kuarsa terlihat sebagai fasa yang memiliki intensitas tertinggi.



Gambar 3. (a) Grafik Pengaruh Temperatur Terhadap Kadar Ni ; (b) Grafik Pengaruh Temperatur Terhadap Kadar Fe; (c) Grafik Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai Recovery; (d) Grafik XRD Dari Hasil Reduksi.

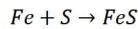
Selanjutnya pada temperature 1000°C hingga 1100°C, fasa kamasit dan logam Fe mulai terbentuk, diikuti dengan menghilangnya intensitas kuarsa dan hematit serta menurunnya intensitas magnetit sehingga menunjukkan adanya reaksi reduksi yang berlangsung. Gambar 4.a dan 4.b menunjukkan bahwa temperatur sangat mempengaruhi struktur mikro dari sampel hasil reduksi. Semakin tinggi temperatur reduksi, maka partikel dalam sampel akan semakin membesar ukurannya. Hal ini dikarenakan tingginya temperatur sekali lagi meningkatkan fluiditas dari logam Fe dan Ni. Konsentrasi logam Fe atau logam Ni yang meningkat akan menghasilkan butiran-butiran yang berukuran besar. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya bahwa ukuran partikel akan semakin membesar dengan bertambahnya temperatur kerja[9].



Gambar 4. - (a) Gambar SEM dari Hasil Reduksi Variasi Temperatur 1000°C; (b) Gambar SEM dari Hasil Reduksi Variasi Temperatur 1100°C.

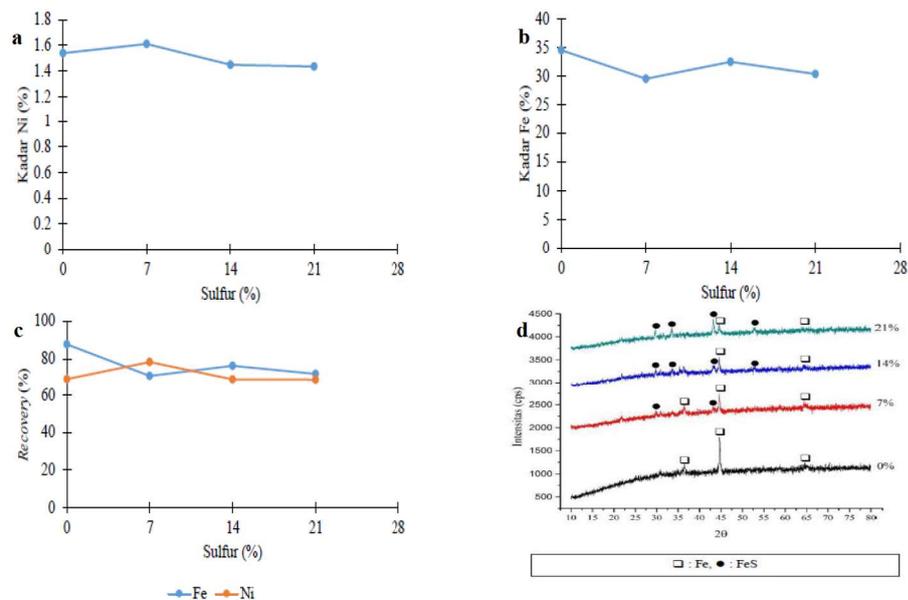
3.3 Pengaruh Jumlah Zat Aditif

Sampel limonit selain dicampurkan dengan reduktor, juga dicampurkan dengan zat aditif berupa sulfur. Sulfur yang ditambahkan bervariasi jumlahnya dari 0, 7, 14, dan 21% dari berat sampel limonit. Setelah itu, hasil pencampuran dibentuk menjadi pelet dan direduksi pada temperatur 1100°C selama 60 menit. Zat aditif dalam penelitian ini memiliki peranan penting dalam proses reduksi yang dilakukan sebagai agen pengikat Fe seperti persamaan 1.



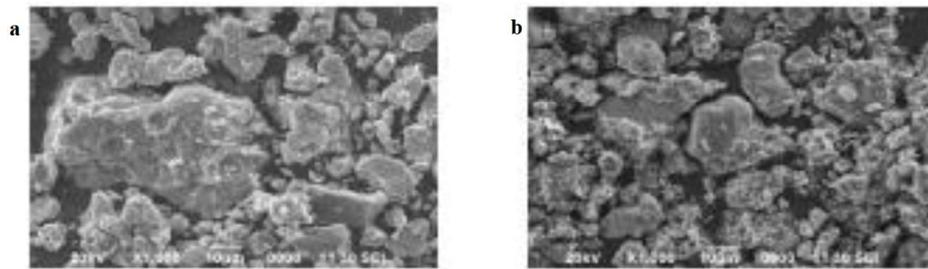
(1)

Penambahan zat aditif sulfur diharapkan akan menurunkan laju pembentukan logam Fe dengan cara mengikat logam Fe menjadi FeS. Selanjutnya menurunkan nilai *recovery* dari logam Fe dan meningkatkan kadar Ni. Gambar 5.a, 5.b, menunjukkan pengaruh penambahan zat aditif terhadap peningkatan kadar logam Fe dan Ni dalam sampel. Gambar 5.a menunjukkan bahwa seiring bertambahnya zat aditif sulfur, kadar Ni cenderung fluktuatif atau berubah-ubah. Kadar Ni mengalami peningkatan dari 1,53% menjadi 1,62% pada saat penambahan sulfur sebanyak 7%. Namun, kadar nikel terus menurun drastis seiring dengan penambahan sulfur sebanyak 14% dan 21%. Nilai optimum kadar nikel yang didapat adalah 1,62% pada saat penambahan sulfur sebanyak 7% dan yang terendah adalah 1,43% pada penambahan sulfur sebanyak 21%. Kecenderungan yang sama juga terjadi pada kadar Fe yang didapat. Kadar Fe mengalami penurunan dari 34,52% menjadi 29,55% pada saat penambahan sulfur sebanyak 7% dan menjadi kadar Fe terendah yang didapat. Nilai optimum kadar Fe didapat ketika tidak ditambahkan zat aditif sulfur sama sekali yaitu 34,52%. Dilihat dari nilai *recovery*, penambahan sulfur sebanyak 7% merupakan pilihan terbaik dalam melakukan proses reduksi. Pada kondisi ini, nilai *recovery* dari logam Fe bernilai paling rendah, yaitu 70,87%, dibandingkan saat kondisi penambahan sulfur sebanyak 14% dan 21%. Sebaliknya, nilai *recovery* logam Ni menunjukkan hasil optimal yaitu 78,29%. Hasil analisis pada Gambar 5.a, 5.b, dan 5.c menunjukkan bahwa sulfur memiliki peranan yang penting dalam proses reduksi bijih limonit. Sulfur akan mengikat logam Fe menjadi senyawa FeS. Hal ini akan mengakibatkan derajat metalisasi logam Fe menurun[9]. Selain itu, senyawa FeS teridentifikasi sebagai pengotor dan menurunkan nilai *recovery* dari logam Fe. Gambar 5.d memperlihatkan bahwa seiring bertambahnya jumlah sulfur maka intensitas logam Fe akan semakin berkurang. Hal ini mengindikasikan bahwa zat aditif sulfur memiliki kemampuan untuk menekan laju pembentukan logam Fe. Fasa FeS akan mengalami peningkatan intensitas seiring dengan bertambahnya jumlah sulfur.

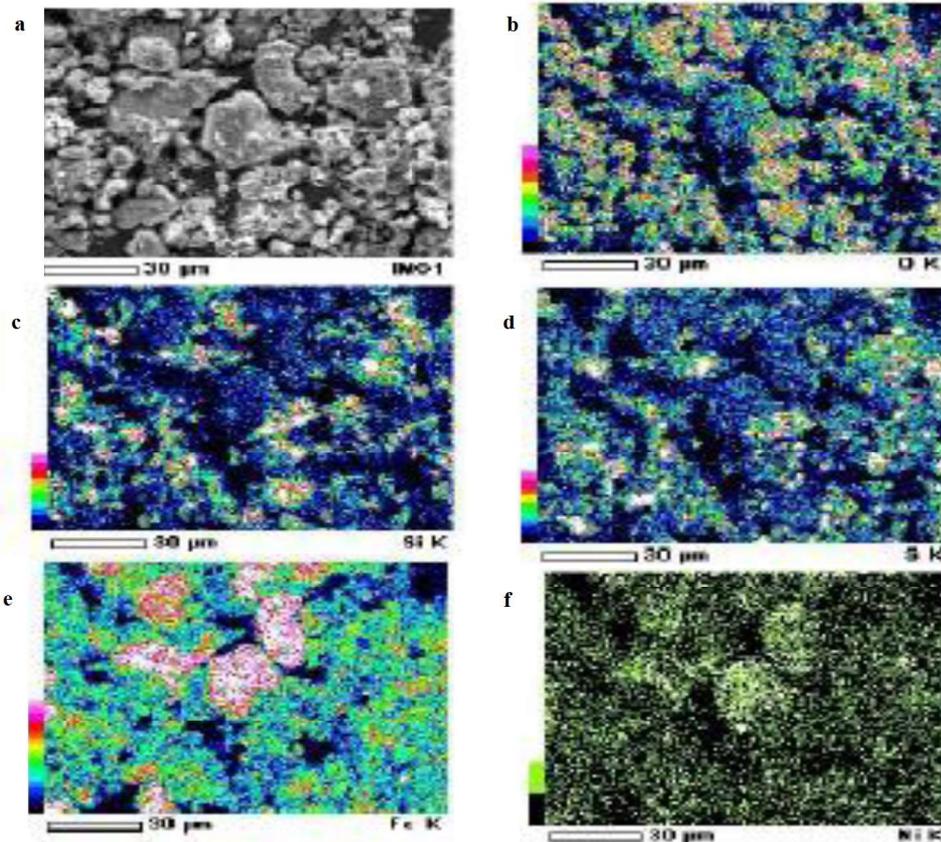


Gambar 5. - (a) Pengaruh Zat Aditif Sulfur terhadap Kadar Ni; (b) Pengaruh Zat Aditif Sulfur terhadap Kadar Fe; (c) Pengaruh Zat Aditif Sulfur terhadap Nilai Recovery; (d) Grafix XRD Hasil Reduksi.

Namun, seperti pada Gambar 5.c, semakin banyak jumlah sulfur yang ditambahkan tidak selalu akan menurunkan nilai *recovery* logam Fe. Hal ini disebabkan oleh adanya penumpukan konsentrasi sulfur sehingga mengurangi kemampuan sulfur untuk mengikat logam Fe menjadi FeS. Struktur mikro dari sampel diketahui dari analisis menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) seperti Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan bahwa struktur mikro dari sampel tanpa tambahan zat aditif cenderung tidak seragam dibandingkan dengan sampel yang ditambahkan sulfur. Sulfur yang ditambahkan akan memenuhi permukaan logam dan mengurangi tegangan permukaan dari logam. Serta akhirnya membentuk senyawa FeS. Hal ini pula yang menyebabkan partikel logam tumbuh dengan ukuran yang cenderung seragam[19]. Selanjutnya, pola persebaran logam unsur dalam sampel dapat dilihat pada Gambar 7. Komponen Fe dan Si masih teramati diikuti unsur O, S, dan Ni. Persebaran O yang masih merata mengindikasikan bahwa sebagian kecil logam oksida masih ada. Selanjutnya, cakupan persebaran Fe terlihat tidak terlalu luas dan sebagian membentuk ikatan Fe-Ni. Persebaran Fe ini mengindikasikan bahwa sulfur mampu untuk menekan laju pembentukan logam Fe dan membentuk senyawa FeS. Dengan mendorong Fe menjadi komponen non-magnetik melalui reduksi *roasting* diharapkan bisa meningkatkan selektivitas logam Ni, pada saat dilakukan proses pemisahan secara magnet.



Gambar 6. (a) Perbandingan Sampel Tanpa Zat Aditif; (b) Perbandingan Sampel dengan Penambahan Sulfur 7%.



Gambar 7. (a) Gambar SEM; (b) Pola Persebaran O dalam Sampel Hasil Reduksi 7%; (c) Pola Persebaran Si dalam Sampel Hasil Reduksi 7%; (d) Pola Persebaran S dalam Sampel Hasil Reduksi 7%; (e) Pola Persebaran Fe dalam Sampel Hasil Reduksi 7%; (f) Pola Persebaran Ni dalam Sampel Hasil Reduksi 7%.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Temperatur reduksi memiliki pengaruh besar terhadap peningkatan kadar Ni serta *recovery* dari Ni. Kadar Ni sebesar 1,98% dan *recovery* proses sebesar 89,30% dapat dihasilkan ketika temperatur reduksi mencapai 1100°C
2. Zat aditif sulfur secara efektif dapat meningkatkan kadar Ni sekaligus menurunkan kadar Fe. Penambahan sulfur sebanyak 7% dari berat sampel dapat menghasilkan kadar Ni optimum sebesar 1,61% dan *recovery* proses sebesar 79,21%. Pada kondisi yang sama, kadar Fe yang didapat sebesar 29,55% dan *recovery* proses sebesar 70,87%.

DAFTAR PUSTAKA

- [114]Moskalyk, R. R., Alfantazi, A.M., 2002 “*Nickel Laterite Processing and Electrowinning Practice*”. Miner. Eng.
 [115]Kuck P. H., 2012 “*Nickel*” [R]. Reston: U. S. Geological Survey.
 [116]Dr. Ashok D. Dalvi, et al., 2004. “*The Past and The Future of Nickel Laterite*”, PDAC : Canada.
 [117]Kim, J. et. al., 2010., “*Calcination of Low Grade Laterite for Concentration of Ni by Magnetic Separation*”, Miner. Eng. .
 [118]Norgate, T., Jahanshashi, S., 2011. “*Assesing the Energy and Greenhouse Gas Footprints of Nickel Laterite Properties*”, Mimmer. Eng.

- [119]Mudd, G. M., 2009. “*Nickel Sulfide Versus Laterite: The Hard Sustainability Challenge Remains*”, Canadian Institute of Mining : Sudbury.
- [120]Pusat Data Informasi ESDM., 2012. “*Kajian Supply Demand Mineral*”, Kementerian ESDM : Jakarta.
- [121]INSG. 2016.“*Nickel Forecast and Analysis*”. Fast Market.
- [122]Landers. M., et. al., 2011. “*Nickel Distribution and Speciation*”. Australian Journal of Earth Sciences.
- [123]Harris, C.T., et. al., 2010. “*Selective Sulfidation of a Nickelferrous Lateritic Ore*”. Miner. Eng.
- [124]Purwanto, H. Et al., 2001. “*Reduction Rate of Cement Bonded Laterite*”, ISIJ International. 40
- [125]Valix, M., Cheung, W.H., 2002a. “*Study of Phase Transformation of Laterite Ores at High Temperature*”. Miner. Eng.
- [126]Valix, M., Cheung, W.H., 2002b. “*Effect of Sulfur On the Mineral Phase of Laterite Ore at High Temperature Reduction*”. Miner. Eng.
- [127]Zhu, D. Q., et. al., 2012. “*Upgrading Low Nickel Content Laterite Ores Using Selective Reduction Followed by Magnetic Separation*”. Int. J. Miner. Process.
- [128]Li, G. H., et. al., 2012. “*Beneficiation of Nickelferrous Laterite by Reduction Roasting in the Presence of Sodium Sulfate*”. Miner. Eng.
- [129]Jiang Man., 2013.. “*Mechanism of Sodium Sulfate in Promoting Selective Reduction of Nickel Laterite Ore During Reduction Roasting*”. University of Science and Tech.: Beijing, China.
- [130]Forster, J., H, 2015. “*Microwave Vacuum Carbothermic Reduction and Sulphidation of A Low Grade Nickelferrous Silicate Laterite Ore*”. Queens University Kingston, Ontario, Canada.
- [131]Zhu, D. Q., et. al., 2011. “*Mineralogy and Crystal Chemistry of a Low Grade Nickel Laterite Ore*”. Central South University, Changsa : China.
- [132]Nagata, K. Bolsaitis., 1986. “*Selective Removal of Iron Oxide From Laterite Ore by Sulfurization*”, Int. J. Milner. Process.
- [133]Mayangsari, Wahyu., 2016. “*Proses Reduksi Selektif Bijih Nikel Limonit Menggunakan ZAt Aditif CaSO4*”, Pusat Penelitian Metalurgi dan Material-LIPI : Serpong, Tangerang Selatan.