



PERBANDINGAN HASIL EKSTRAKSI NIKEL DENGAN DAN TANPA TEKNIK SULFIDASI SETELAH PROSES TAPPING PADA CRUDE

COMPARISON OF NICKEL EXTRACTION RESULTS WITH AND WITHOUT SULFIDATION TECHNIQUE AFTER TAPPING PROCESS ON CRUDE

Muhamad Ismatulloh¹, Gabriel Ricardo Ananda Putra¹, dan Fahny Ardian¹.

¹Program Studi Teknologi Metalurgi, Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, Indonesia

Korespondensi: ismatullohmuhamad0@gmail.com

INFO ARTIKEL

ABSTRAK

Kata Kunci:

Ekstraksi Nikel, Sulfidasi, Ferronikel, Nikel Sulfida, Logam Cair

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efektivitas ekstraksi nikel dari bijih nikel dengan dan tanpa penambahan sulfur (sulfidasi) setelah proses tapping pada logam cair (*crude*) hasil reduksi. Proses dilakukan pada empat tungku smelter berbasis teknologi *Rotary Kiln-Electric Furnace* (RKEF), yaitu tungku 5 dan 6 (tanpa sulfur) serta tungku 7 dan 8 (dengan penambahan sulfur). Hasil menunjukkan bahwa tungku 5 dan 6 menghasilkan ferronikel berkadar rendah (18–20% Ni), sedangkan tungku 7 dan 8 menghasilkan produk berbasis nikel sulfida dengan kandungan nikel sebesar 22–24% dan sulfur 10–12%. Evaluasi menunjukkan bahwa penambahan sulfur berpotensi meningkatkan konsentrasi nikel dalam produk akhir melalui pembentukan senyawa Ni_3S_2 , meskipun belum terkonfirmasi secara mineralogi. Perbandingan ini menegaskan pentingnya teknik sulfidasi dalam peningkatan mutu

produk nikel, namun perlu kajian lebih lanjut terkait efisiensi reaksi dan aspek lingkungan dari emisi SO_x .

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Nickel Extraction,
Sulfidation, Ferronickel,
Nickel Sulfide, Crude

This study aims to compare the effectiveness of nickel extraction from nickel ore with and without sulfur addition (sulfidation) after the tapping process on molten metal (crude). The extraction process was conducted using four rotary kiln-electric furnace (RKEF) smelters, where furnaces 5 and 6 operated without sulfur, and furnaces 7 and 8 involved sulfur addition. The results showed that furnaces 5 and 6 produced low-grade ferronickel containing 18–20% Ni, while furnaces 7 and 8 yielded nickel sulfide products containing 22–24% Ni and 10–12% S. The findings suggest that sulfur addition has the potential to increase nickel concentration in the final product by forming Ni_3S_2 , although the presence of this phase has not been mineralogically confirmed. This comparison highlights the benefit of sulfidation techniques in improving product quality, but further evaluation is needed regarding reaction efficiency and the environmental impact of potential SO_x emissions.

I. PENDAHULUAN

Nikel merupakan logam strategis yang memainkan peranan penting dalam berbagai industri, terutama dalam produksi baterai kendaraan listrik dan perangkat elektronik. Seiring meningkatnya permintaan global terhadap bahan baku nikel, dibutuhkan metode ekstraksi yang tidak hanya efisien, namun juga ramah lingkungan (Tang et al., 2022). Bijih nikel

di alam umumnya ditemukan dalam dua bentuk utama, yaitu sulfida dan laterit. Sementara bijih nikel sulfida lebih mudah diolah menggunakan teknik pirometalurgi konvensional, bijih laterit yang lebih melimpah memerlukan pendekatan khusus karena kompleksitas mineraloginya.

Salah satu inovasi yang mulai diterapkan dalam industri smelter adalah teknik penambahan sulfur ke dalam logam

cair hasil peleburan (*tapping*) dengan tujuan membentuk senyawa *nickel sulfide* melalui reaksi sulfidasi. Proses ini menghasilkan produk *nickel matte*, yaitu campuran logam-logam sulfida seperti Ni_3S_2 dan Co_2S_3 , yang merupakan bahan baku utama dalam pembuatan prekursor katoda baterai (Zhou et al., 2020). Berbeda dengan proses ini, sebagian smelter di Indonesia seperti yang menggunakan teknologi *Rotary Kiln-Electric Furnace* (RKEF) masih memproduksi *ferronickel* konvensional tanpa penambahan sulfur, dengan kandungan nikel yang relatif rendah dan tidak langsung sesuai untuk industri baterai (Hutabarat, 2021).

Meskipun produksi *nickel matte* telah dilakukan secara luas di smelter besar seperti PT Vale Indonesia dan SLN Doniambo, teknik penambahan sulfur secara langsung ke dalam logam cair setelah *tapping* merupakan pendekatan baru yang belum banyak dikaji secara ilmiah. Pendekatan ini berpotensi mengurangi konsumsi energi dan bahan tambahan dibandingkan metode sulfidasi pra-reduksi, namun belum diketahui secara pasti efisiensi reaksi dan hasil akhir logam yang terbentuk.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi komparatif antara dua pendekatan ekstraksi nikel dari bijih yang sama: (1) tanpa

penambahan sulfur (konvensional), dan (2) dengan penambahan sulfur setelah proses *tapping*. Perbandingan dilakukan berdasarkan kandungan unsur nikel, sulfur, serta kualitas produk logam cair (*crude*) yang terbentuk. Hasil dari penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi terhadap optimalisasi proses peleburan nikel berbasis laterit di Indonesia dan dunia.

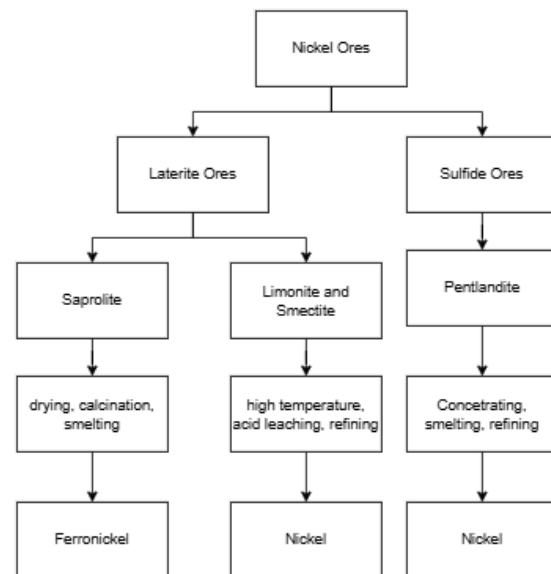
II. TINJAUAN PUSTAKA

Nikel adalah unsur kimia metalik dalam tabel periodik yang memiliki simbol Ni dan nomor atom 28. Nikel adalah logam berwarna putih keperak-perakan sedikit semburat keemasan. Nikel termasuk logam transisi, dan memiliki sifat keras serta ulet. Nikel juga tergolong dalam grup logam besi-kobalt, yang dapat menghasilkan paduan yang sangat berharga.

Terdapat dua sumber bijih yang dapat diekstrak kandungan nikelnya, yaitu bijih nikel sulfida dan nikel oksida (laterit) (Bratasena, Alfaraby, & Pramudita, 2020). Untuk di Indonesia sendiri cadangan nikel yang umum ditemukan adalah bijih laterit. Bijih Laterit sendiri memiliki 2 tipe bijihnya yaitu limonit dan saprolit yang dibedakan berdasarkan struktur lapisan tanahnya. Gambar struktur lapisan tanah nikel dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Struktur Lapisan Tanah Nikel (Sumber: Crundwell et al., 2011)

Laterite Profile	Approximate analysis (%)			
	Fe	MgO	Ni	Co
<i>Ferricrete</i>	> 50	< 0.5	< 0.8	< 0.1
<i>Limonite</i>	40-50	0.5-5	0.8-1.5	0.1-0.2
<i>Smectite</i>	10-30	5-15	0.6-2	0.02-0.1
<i>Saprolite</i>	10-25	15-35	1.5-4	0.02-0.1
<i>Bedrock</i>	5	35-40	0.3	0.01



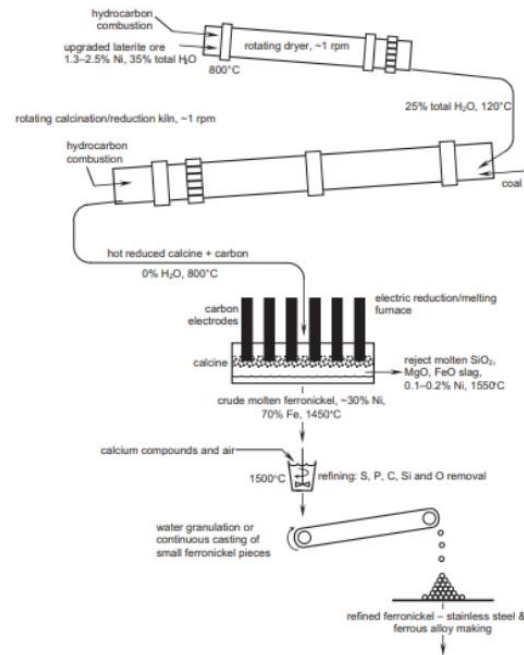
Gambar 1 Tipe Pengolahan Berdasarkan Jenis Bijih Nikel (Sumber: Crundwell et al., 2011)

Di Indonesia sendiri umumnya ditemukan bijih nikel dalam bentuk laterit yang menjadikannya salah satu negara penghasil nikel di dunia dari jenis laterit. Terdapat tiga pilihan proses pirometalurgi nikel laterit komersial saat ini yaitu pengolahan menjadi *Ferronickel* jenis *shot/ingot* dan *Ferronickel lumpen*, pengolahan nikel matte dan pengolahan menjadi *Nickel Pig Iron (NPI)* (Setiawan, 2016). Jalur metode pengolahan yang digunakan berdasarkan jenis bijih nikel dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**.



Gambar 2 Jalur-Jalur Pengolahan Nikel (Sumber: Crundwell et al., 2011)

Pada proses pembuatan *Ferronickel* metode yang digunakan adalah pirometalurgi melalui kalsinasi dan peleburan. bijih saprolit paling cocok untuk diolah dengan metode peleburan karena memiliki kandungan SiO dan MgO yang tinggi. Ikatan oksigen yang kuat dalam SiO, MgO dan oksida lainnya juga membuat metode peleburan menjadi opsi karena hanya nikel dan besi yang mudah tereduksi. Selain itu pemilihan pengolahan menggunakan metode hidrometalurgi tidak disarankan karena tingginya kadar MgO yang membuat kebutuhan asam sulfat untuk proses *leaching* ikut tinggi. Sebaliknya, pengolahan bijih limonit paling optimal menggunakan metode hidrometalurgi untuk mengambil kandungan nikel, kobalt, dan skandium di dalam bijihnya. Alur proses peleburan bijih saprolit dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3 Alur Proses Peleburan Bijih Saprolit (Sumber: Crundwell et al., 2011)

Berdasarkan Crundwell *et al.*, (2011), hasil olahan nikel saprolit umumnya mengandung ~15% besi dan ~20% – 30% nikel. Crundwell juga menyatakan biaya operasi peleburan *Ferronickel* lebih rendah dari metode *Leaching*. Peleburan *Ferronickel* memerlukan biaya sekitar 6000USD/ton Ni sedangkan metode *Leaching* memerlukan biaya 10000USD/ton Ni.

Sulfur adalah salah satu unsur *non-metal* berwarna kuning dengan nomor atom 16 dan massa atom 32g/mol. Berdasarkan jurnal dari Boyd, (2016), sulfur dapat ditemukan pada lapisan tanah gunung berapi. Salah satu penghasil sulfur di Jawa Timur berada pada Gunung Ijen Kab. Bondowoso. Sulfur umumnya digunakan

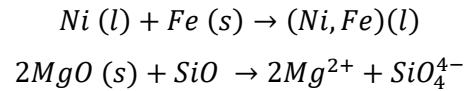
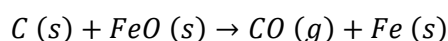
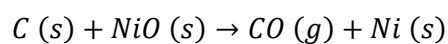
untuk proses *Natural Gas Purification* dan juga *side-product* dari penyulingan minyak. Pada produksi nikel secara pirometalurgi, sulfur juga dapat digunakan sebagai reduktor aditif untuk mengikat kandungan nikel dan besi. Tumpukan sulfur *powder* dapat dilihat pada **Gambar 4**.



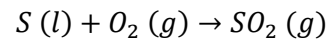
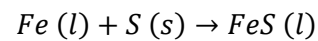
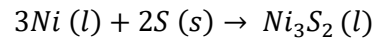
Gambar 4 Tumpukan Sulfur (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Smelter memiliki 4 unit *Electric Arc Furnace* (EAF) dengan nomor tungku 5#, 6#, 7#, dan 8#. Untuk sementara hanya tungku 7# dan 8# yang menjalankan proses sulfidasi pada saat proses tapping.

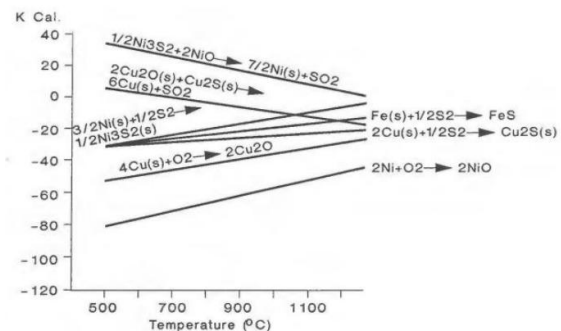
Nurjaman et al. (2020) juga mengutarakan penggunaan sulfur dapat mengikat nikel didalam *crude* yang membentuk *Nickel-Sulphide* (NiS) dan meningkatkan ekstraksi nikel di dalam *crude* yang semula 13%-16% menjadi 24%-30%. Penambahan sulfur juga mencegah besi mengalami metalisasi (*metalization*). Reaksi kimia yang terjadi di dalam *Electric Furnace* adalah sebagai berikut:



Reaksi sulfidasi *crude* pada saat proses *tapping* adalah sebagai berikut:



Terjadinya reaksi sulfidasi nikel dan besi secara teoritis mengacu pada diagram kesetimbangan termodinamika sulfidasi. Adapun diagram kesetimbangan termodinamika sulfidasi dapat dilihat pada **Gambar 5**.

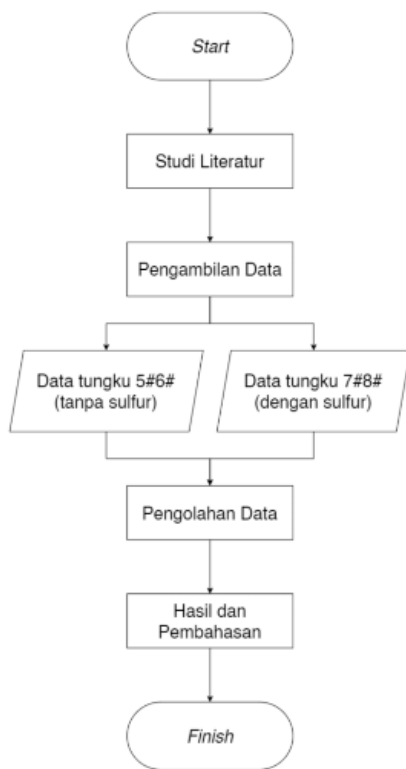


Gambar 5 Diagram Kesetimbangan Termodinamika Sulfidasi (Sumber: Diaz et al., 1988)

2. METODE PENELITIAN

Dalam proses penelitian ini diperlukan tahap-tahapan dalam penyusunannya. Dimulai dari studi literatur, pengambilan dan pengolahan data, hingga penarikan hasil dan pembahasan. Penelitian dilakukan dengan menggunakan

metode pengolahan data sekunder yang diambil pada saat proses tapping berlangsung di tungku 5#, 6#, 7# dan 8# Smelter. Data yang diambil meliputi suhu tapping, waktu tapping, hasil analisa crude, berat crude, dan total Sulfur Powder yang digunakan pada proses tapping di tungku 7# dan 8#. Adapun diagram alir proses penelitian untuk tugas akhir dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 6 Diagram Alir Penelitian

Dari data sekunder yang didapat akan diolah menggunakan *software*

Microsoft Excel. Data sekunder akan digunakan sebagai pembanding dari hasil tapping 5#6# (tanpa sulfidasi) dengan 7#8# (dengan sulfidasi). Dengan data yang sudah diolah akan didapatkan hasil berupa perbandingan produk dengan sulfidasi dan tanpa sulfidasi.

III. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Smelter memiliki 4 unit Electric Arc Furnace (EAF) dengan nomor tungku 5#, 6#, 7#, dan 8#. Untuk sementara hanya tungku 7# dan 8# yang menjalankan proses sulfidasi pada saat proses tapping dan untuk tungku 5# dan 6# tidak menggunakan sulfida.

Pengambilan data untuk penelitian Tugas Akhir dilakukan di *Controll Room* Divisi *Furnace* Smelter. Adapun data yang didapatkan merupakan data sekunder pada saat proses tapping di Tungku 5#, Tungku 6#, Tungku 7#, Tungku 8#. Penambahan sulfur bertujuan untuk mengikat Ni dengan S sehingga terjadi peningkatan persen nikel dalam *crude*. Peningkatan ekstraksi *crude* dapat dibuktikan dengan analisa laboratorium *Quality Control* pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Hasil Analisa Laboratorium *Nickel Tapping Quality Control*

No Tungku	Hasil Analisa Laboratorium (%)						Suhu Tapping (°C)	Waktu Tapping (Menit)	Berat Crude (Ton)	Berat Ni (Ton)	Sulfur Powder (Ton)
	Ni	Cr	Si	P	S	C					
5#	14,23	0,17	0,04	0,035	0,28	1,53	1474	68	61,04	8,69	0

5#	14,41	0,20	0,05	0,031	0,21	1,45	1512	53	80,24	11,56	0
5#	14,43	0,17	0,04	0,028	0,29	1,85	1460	42	52,62	7,59	0
5#	14,58	0,15	0,04	0,030	0,39	1,46	1461	49	44,78	6,53	0
6#	14,49	0,17	0,04	0,026	0,28	1,91	1468	53	35,92	5,20	0
6#	14,59	0,16	0,04	0,029	0,29	1,80	1465	98	39,02	5,69	0
6#	14,61	0,17	0,04	0,028	0,32	1,87	1475	53	48,10	7,03	0
6#	14,62	0,16	0,04	0,28	0,29	1,81	1474	46	43,20	6,32	0
7#	20,58	0,17	0,05	0,046	10,71	0,37	1500	35	25,80	5,31	2,86
7#	21,06	0,10	0,04	0,039	9,73	0,24	1496	52	50,40	10,61	5,32
7#	21,59	0,16	0,05	0,042	9,84	0,29	1492	59	25,99	5,61	5,27
7#	21,64	0,12	0,05	0,036	12,10	0,62	1499	54	47,58	10,30	6,13
8#	22,72	0,09	0,05	0,029	8,46	0,24	1502	38	46,05	10,46	6,54
8#	22,72	0,11	0,04	0,044	11,54	0,26	1498	54	54,20	12,31	6,40
8#	22,88	0,13	0,06	0,050	10,90	0,26	1507	53	55,38	12,67	6,99
8#	22,95	0,07	0,03	0,034	11,94	0,23	1499	53	50,40	11,57	6,71

Proses Sulfidasi ini bertujuan untuk mendapatkan *Nickel-Sulfide* dari bijih saprolit. Teknik sulfidasi yang digunakan di tungku 7#8# merupakan metode yang baru dikembangkan oleh Tiongkok. Alasan proses sulfidasi yang dilakukan pada saat proses *tapping* agar tungku 7#8# dapat sewaktu-waktu tidak melakukan sulfidasi. Beda halnya dengan injeksi sulfur pada Rotary Kiln (RK) atau Electric Furnace (EF) yang proses sulfidasinya paten.

Berdasarkan jurnal “*Effect Of Sulfur In The Reductants On Sulfidation Mechanism Of Nickel Laterite*” karya Nurjaman et al., (2021), harga *Ferronickel* bergantung terhadap *Nickel Grade* di dalamnya. Sedangkan kandungan besi didalamnya tidak terlalu diperhatikan.

Maka dari itu upaya untuk meningkatkan *recovery* nikel dilakukan dengan cara mengurangi *recovery* besi atau menghambat metalisasi besi. Selain itu, Nurjaman et al.. (2021) juga menyatakan pentingnya penggunaan belerang dalam proses reduksi selektif nikel laterit yang dapat menghambat metalisasi oksida besi. Hal ini dapat meningkatkan kadar nikel dan *recovery* dalam *crude*.

Penelitian dilakukan menggunakan antrasit dengan variasi kandungan sulfur 2,68% dan 5% sebagai reduktor. Dari hasil uji coba yang dilakukan ditemukan bahwa antrasit dengan kandungan sulfur 5% menghasilkan kadar nikel dan *recovery* nikel yang lebih tinggi, yaitu masing-masing 3,564 dan 95,97%. Oleh karena itu,

kandungan sulfur dalam antrasit dapat mensubstitusi penambahan sulfur secara aditif dalam reduksi selektif bijih nikel laterit.

Dari hasil pengambilan data di setiap tungku Smelter, hasil ekstraksi dari tungku 5#6# dengan tungku 7#8# memiliki *recovery* nikel yang berbeda. Hal ini disebabkan karena adanya penambahan sulfur pada tungku 7#8# sebagai pereduksi selektif. Penggunaan Teknik sulfidasi memang diperuntukkan untuk mendapatkan persen ekstraksi yang lebih tinggi. Pertimbangan ini harus diserahkan kepada perusahaan agar dapat menentukan output yang diinginkan. Karena metode yang tidak menggunakan sulfidasi pada tungku 5# dan 6# akan menghasilkan produk *Ferronickel*.

Secara kuantitatif, hasil pengolahan data menunjukkan bahwa rata-rata kadar Ni pada tungku 5# dan 6# yang tidak

menggunakan teknik sulfidasi adalah sebesar 14,50%. Sementara itu, rata-rata kadar Ni pada tungku 7# dan 8# yang menggunakan teknik sulfidasi meningkat signifikan hingga mencapai 22,02%.

Berdasarkan hasil uji t yang dilakukan menggunakan Microsoft Excel pada **Tabel 3**, diperoleh nilai $p < 0,05$ pada perbandingan kadar Ni antara tapping tanpa sulfidasi (tungku 5# dan 6#) dan tapping dengan sulfidasi (tungku 7# dan 8#). Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua kelompok data, sehingga teknik sulfidasi terbukti secara statistik meningkatkan kadar nikel dalam crude. Dengan demikian, hasil uji t memperkuat temuan awal bahwa penggunaan sulfur dalam proses tapping memberikan dampak nyata terhadap peningkatan kualitas crude.

Tabel 3 Hasil Analisis *t-test*

	Tanpa Sulfidasi	Dilakukan Sulfidasi
<i>Mean</i>	14,495	22,0175
<i>Variance</i>	0,018114286	0,844135714
<i>Observations</i>	8	8
<i>Pearson Correlation</i>	0,851437362	
<i>Hypothesized Mean Difference</i>	0	
<i>df</i>	7	
<i>t Stat</i>	-26,35666579	
<i>P(T<=t) one-tail</i>	1,44865E-08	
<i>t Critical one-tail</i>	1,894578605	
<i>P(T<=t) two-tail</i>	2,8973E-08	
<i>t Critical two-tail</i>	2,364624252	

Proses sulfidasi yang dilakukan pada tungku 7# dan 8# merupakan metode baru yang dikembangkan oleh Tiongkok, berbeda dengan injeksi sulfur yang dilakukan pada *Rotary Kiln* (RK) atau *Electric Furnace* (EF) yang bersifat paten. Keunggulan dari metode ini adalah fleksibilitasnya, di mana tungku dapat dioperasikan dengan atau tanpa sulfidasi sesuai kebutuhan produksi. Hal ini memberikan keleluasaan bagi perusahaan dalam menentukan output, apakah ingin menghasilkan produk *ferronickel* standar atau meningkatkan kualitas *crude* dengan kadar Ni lebih tinggi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan teori yang menyatakan bahwa sulfur dapat berfungsi sebagai pereduksi selektif yang

menghambat metalisasi besi sehingga meningkatkan pemisahan nikel dari mineral pengotor. Menurut Nurjaman et al. (2021), harga *ferronickel* ditentukan oleh kadar Ni di dalamnya, sementara kandungan Fe tidak terlalu memengaruhi nilai ekonominya. Oleh karena itu, strategi peningkatan *recovery* nikel dilakukan dengan cara menekan reduksi besi. Dalam eksperimen yang dilakukan Nurjaman et al. (2021), penggunaan antrasit dengan kandungan sulfur 5% terbukti menghasilkan kadar nikel dan *recovery* nikel yang lebih tinggi, yaitu masing-masing sebesar 3,564% dan 95,97%, dibandingkan dengan antrasit dengan sulfur 2,68%. Temuan ini mendukung hasil penelitian yang dilakukan di smelter, di mana proses *tapping* dengan

sulfidasi menghasilkan *crude* dengan kadar nikel yang lebih tinggi dibandingkan tanpa sulfidasi.

Berdasarkan hasil analisa, dapat dikatakan bahwa tanpa sulfidasi (tungku 5# dan 6#), *crude* yang dihasilkan cocok untuk produksi *ferronickel* dengan kandungan besi yang relatif tinggi. Sebaliknya, dengan sulfidasi (tungku 7# dan 8#), *crude* yang dihasilkan memiliki kadar nikel lebih tinggi sehingga lebih sesuai apabila perusahaan menargetkan peningkatan kualitas dan nilai jual produk nikel. Dengan demikian, teknik sulfidasi memiliki implikasi strategis dalam operasional smelter: perusahaan dapat memilih untuk tidak menggunakan sulfidasi jika ingin menghasilkan *ferronickel* dengan kualitas standar, atau menerapkan sulfidasi apabila tujuan utamanya adalah meningkatkan *Nickel Grade* dan nilai ekonomis produk.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan pada proses operasi tungku 5#, 6#, 7#, dan 8# Smelter dengan teknologi *Rotary Kiln-Electric Furnace* (RKEF), dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbandingan hasil ekstraksi menunjukkan bahwa tungku 5# dan 6# tanpa sulfidasi cenderung menghasilkan produk *low-grade ferronickel* (FeNi),

sedangkan tungku 7# dan 8# dengan penambahan sulfur melalui proses sulfidasi mampu meningkatkan kadar nikel dalam *crude*. Hasil uji t membuktikan adanya perbedaan signifikan pada kadar nikel $P(T \leq t) \text{ one-tail} = 1,44865 \times 10^{-8}$ $P(T \leq t) \text{ two-tail} = 2,8973 \times 10^{-8}$, sehingga dapat disimpulkan bahwa proses sulfidasi memberikan pengaruh nyata terhadap peningkatan kualitas (*grade*) nikel dalam produk.

2. Mekanisme sulfidasi yang terjadi adalah pengikatan nikel dengan sulfur membentuk fase Ni_3S_2 , sekaligus menghambat reduksi besi sehingga kadar besi dalam *crude* lebih rendah. Proses ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa sulfur berperan sebagai agen selektif dalam reduksi bijih laterit untuk memperkaya nikel dan menekan metalisasi besi (Nurjaman et al., 2021; Guo et al., 2020).
3. Aspek kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan teknik sulfidasi langsung pada tahap *tapping process* di tungku 7# dan 8#. Berbeda dengan metode konvensional yang umumnya dilakukan melalui injeksi sulfur di *Rotary Kiln* (RK) atau *Electric Furnace* (EF) secara permanen, teknik ini memungkinkan fleksibilitas operasi karena tungku dapat beroperasi dengan atau tanpa sulfidasi sesuai kebutuhan

produksi. Dengan demikian, pendekatan ini memberi alternatif operasional yang lebih adaptif bagi perusahaan.

4. Keterbatasan penelitian terletak pada cakupan data yang masih terbatas pada empat tungku (5#, 6#, 7#, dan 8#), serta hanya menggunakan data sekunder hasil *Quality Control*. Variabel proses seperti metode pengumpanan sulfur (injeksi, *spray*, atau *conveying*) maupun bentuk bahan baku sulfur (*solid* atau *liquid*) belum diuji sehingga belum dapat dievaluasi pengaruhnya terhadap efektivitas sulfidasi.
5. Usulan penelitian selanjutnya adalah melakukan pengujian eksperimental dengan variasi metode injeksi sulfur dan bentuk bahan baku sulfur untuk melihat pengaruhnya terhadap efisiensi sulfidasi dan kualitas *ferronickel* yang dihasilkan. Selain itu, analisis *life cycle cost* dan aspek ekonomi dari penerapan sulfidasi pada tahap *tapping* juga perlu dikaji agar dapat memberikan rekomendasi implementasi yang lebih komprehensif bagi industri.

5. DAFTAR PUSTAKA

Boyd, D. A. (2016). Sulfur and its Role In Modern Material Scienc. *Angewandte Chemie International Edition*, 55, 2-19.

Bratasena, M. E., Alfaraby, F., & Pramudita, R. D. (2020). Optimasi Sistem RKEF dan Bahan Bakar Alternatif pada Produksi Ferronickel untuk Meningkatkan Efektivitas Ekstraksi Industri Berbasis Nikel di Indonesia. Upaya Industri Pertambangan dalam Menghadapi Pandemi Covid-19.

Chen, Y., Wang, H., & Liu, Z. (2021). Selective reduction of nickel laterite with sulfur-bearing reductants. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(9), 2573–2584.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65756-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65756-8)

Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramachandran, V., Robinson, T. G., & Davenport, W. G. (2011). *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt, and Platinum-Group Metals*. Amsterdam: Elsevier Ltd.

Diaz, C. M., Landolt, C. A., Vahed, A., Warner, A. M., & Taylor, J. C. (1988). A Review of Nickel Pyrometallurgical Operation. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Material Society*, 211-239.

Guo, H., Li, Y., Zhang, Y., & Zhou, J. (2020). Sulfidation roasting of nickel laterite ores with elemental

- sulfur for nickel extraction. *Minerals Engineering*, 145, 106057. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106057>
- Hutabarat, I. (2021). Bahan Tayangan Kuliah Metalurgi Non-Ferrous 10. Bandung: Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung.
- Hutabarat, I. (2021). Bahan Tayangan Kuliah Metalurgi Non-Ferrous 11. Bandung: Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung.
- Li, G., Chen, J., & Rao, M. (2019). Influence of sulfur additives on the selective reduction of laterite nickel ore. *International Journal of Mineral Processing*, 183, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2019.04.002>
- Nurjaman, F., Bahfie, F., Ulin, H., Astuti, W., & Suharno, B. (2020). Kajian Literatur Parameter Proses Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit. *JMI*, 42(2), 63-71.
- Setiawan, I. (2016). Pengolahan Nikel Laterit Secara Pirometalurgi: Kini Dan Penelitian Kedepan. Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2016, (pp. 1-7). Jakarta.
- Wu, L., & Zhou, H. (2017). Recovery of Ni and Fe from laterite nickel ore using sulfurization reduction. *Hydrometallurgy*, 169, 530–538. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.12.012>
- Zhang, X., Liu, Q., & Wang, D. (2018). Effect of sulfur on reduction roasting and magnetic separation of nickel laterite ore. *Journal of Alloys and Compounds*, 742, 690–697. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.303>
- Zhou, C., Liu, Y., & Tang, J. (2022). Mechanism of nickel enrichment during the selective sulfidation of laterite ores. *Minerals*, 12(6), 699. <https://doi.org/10.3390/min12060699>