



PERBEDAAN TEKNIK SULFIDASI PADA PT X DENGAN PT VALE TBK DALAM UPAYA PENINGKATAN EKSTRAKSI NIKEL PADA CRUDE

Gabriel Ricardo Ananda Putra¹, Muhamad Ismatulloh², dan Fahny Ardian³

¹Program Studi Teknologi Metalurgi, Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, Indonesia 40211

e-mail: ismatullohmuhamad0@gmail.com

INFO ARTIKEL

ABSTRAK

Kata Kunci:

Sulfidasi, Ekstraksi Nikel,
Kalsinasi, Proses Tapping

Kebutuhan nikel terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi dan industri, terutama dalam produksi baterai untuk kendaraan listrik dan perangkat elektronik. Proses sulfidasi menjadi penting dalam pengolahan nikel karena dapat meningkatkan efisiensi ekstraksi logam. Teknik sulfidasi yang dipakai di Smelter PT X dilakukan pada saat proses *tapping*. Sulfur Powder akan diinjeksikan pada *crude* yang mengalir pada *launder*. Beda dengan teknik sulfidasi di PT Vale Tbk yang menggunakan bahan bakar *High Sulfur Fuel Oil* (HSFO) dan penyiraman menggunakan *Molten Sulfur*. Penelitian ini melakukan analisis komparatif terhadap teknik sulfidasi yang diterapkan di PT X dan PT Vale Tbk untuk meningkatkan ekstraksi nikel dari bahan mentah. PT X menambahkan serbuk sulfur selama proses *tapping* pada tungku *Electric Arc Furnace* (EAF) 7 dan 8, sedangkan PT Vale Tbk menggunakan kombinasi *High Sulfur Fuel Oil* (HSFO) dan sulfur cair dalam *rotary kiln* selama tahap kalsinasi. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan yang nyata dalam tingkat kadar nikel, dengan PT Vale Tbk mencapai rata-rata persentase nikel yang lebih tinggi sebesar 28,00% dibandingkan dengan

23,24% di PT X. Studi ini menggarisbawahi pengaruh signifikan teknik sulfidasi terhadap efisiensi ekstraksi nikel dan menyoroti potensi untuk optimasi lebih lanjut.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Sulfidation, Nickel Extraction, Calcination, Tapping Process

The demand for nickel continues to rise in line with technological and industrial advancements, particularly in the production of batteries for electric vehicles and electronic devices. Sulfidation processes play a crucial role in nickel processing as they enhance the efficiency of metal extraction. The sulfidation technique applied at PT X Smelter is conducted during the tapping process, where sulfur powder is injected into the crude material flowing through the launder. This differs from the sulfidation technique used at PT Vale Tbk, which employs High Sulfur Fuel Oil (HSFO) as fuel and molten sulfur for spraying. This study provides a comparative analysis of the sulfidation techniques implemented by PT X and PT Vale Tbk to improve nickel extraction from raw materials. PT X utilizes sulfur powder injection during the tapping process in Electric Arc Furnace (EAF) 7 and 8, whereas PT Vale Tbk employs a combination of HSFO and molten sulfur in the rotary kiln during the calcination stage. The findings reveal a significant difference in nickel grade levels, with PT Vale Tbk achieving a higher average nickel percentage of 28.00% compared to 23.24% at PT X. This study underscores the significant impact of sulfidation techniques on nickel extraction efficiency and highlights the potential for further optimization.

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan nikel *matte* sebagai bahan baku utama untuk baterai berbasis nikel terus meningkat seiring dengan adopsi kendaraan listrik (EV) dan pergeseran menuju

energi berkelanjutan. Beberapa baterai yang mengandung nikel, seperti *lithium-nickel-cobalt-manganese oxide* (NCM) dan *lithium-nickel-cobalt-aluminium oxide* (NCA) memiliki densitas energi yang lebih tinggi

yang membuatnya pilihan yang bagus untuk kendaraan listrik.

Laporan Fan et al. (2024) menunjukkan bahwa permintaan nikel untuk aplikasi baterai di seluruh dunia diperkirakan akan mencapai lebih dari 60% dari total konsumsi nikel pada tahun 2035. Ini sejalan dengan perkiraan bahwa produksi kendaraan listrik akan meningkat setiap tahun hingga mencapai lebih dari 50 juta unit pada tahun 2030, yang menunjukkan bahwa setiap kendaraan listrik membutuhkan komponen nikel dalam jumlah besar untuk mendukung kinerja baterai. Selain itu, Zhang et al. (2024) menekankan bahwa permintaan nikel untuk sektor baterai telah meningkat lebih dari 30% selama dekade terakhir, menggarisbawahi pertumbuhan pesat kebutuhan ini di pasar global.

Produksi nikel *matte* dimulai dengan penambangan bijih laterit atau sulfida, kemudian melalui proses penggilingan dan pemrosesan awal sebelum masuk ke tahap peleburan di smelter. Di smelter, bijih dipanaskan pada suhu tinggi untuk memisahkan logam nikel dari pengotor, menghasilkan *intermediate* berupa *nikel pig iron* (NPI) atau ferronikel. Namun, sebagian besar NPI atau ferronikel ini diproses lebih lanjut untuk memenuhi spesifikasi baterai.

Terdapat Smelter yang sudah mulai menjalankan proses penambahan sulfur atau sulfidasi pada tapping tungku. Pada proses sulfidasi terjadi reaksi sulfidasi dimana nikel

akan mengikat sulfur dan membentuk *Nickel-Sulphide* yang dapat meningkatkan ekstraksi nikel di dalam *crude*. Peningkatan ekstraksi nikel bertujuan untuk pembuatan *nickel matte*, dimana *nickel matte* merupakan bahan utama dalam manufaktur baterai. Disisi lain, terdapat tungku smelter yang masih menggunakan metode *rotary kiln electric furnace* (RKEF) konvensional untuk memproduksi *ferronickel* (FeNi). Perbedaan proses FeNi dan nikel *matte* adanya penambahan sulfur sehingga berlangsung reaksi sulfidasi dan pembentukan nikel *matte* (senyawa nikel dan sulfur, $\text{Ni}_2\text{S}_3 + \text{NiS}$) dan logam *matte* lainnya (Co_2S_3).

Dengan mengatur komposisi sulfur selama proses produksi, teknik sulfidasi bertujuan untuk meningkatkan efisiensi proses ekstraksi dan meningkatkan kualitas produk akhir. Salah satu teknik baru yang dikembangkan di Tiongkok adalah dengan menginjeksikan *sulfur powder* pada *crude* yang mengalir pada *launder* selama proses *tapping*. Teknik sulfidasi baru ini berbeda dari metode sulfidasi konvensional yang menggunakan bahan bakar sulfur tinggi (HSFO) dan penyiraman dengan sulfur cair. Teknik baru ini memiliki beberapa keuntungan, termasuk kontrol komposisi sulfur yang lebih baik, pengurangan emisi gas buang, dan peningkatan efisiensi energi. Proses sulfidasi memainkan peran penting dalam mengatur reaksi kimia di *Reduction Kiln* saat nikel laterit diproses menjadi nikel *matte*.

Setelah proses kalsinasi dan reduksi bijih nikel laterit kering, *calcine* dibuat pada suhu sekitar 700°C (Yusfaldin et al., 2017).

Karena ada perbedaan dalam metode sulfidasi, peninjauan perlu dilakukan mengenai metode sulfidasi yang digunakan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk menentukan metode yang lebih efisien dan optimal dalam proses pembuatannya.

TINJAUAN PUSTAKA

Nikel (Ni), logam transisi dengan nomor atom 28, dikenal karena sifatnya yang beragam dan banyak digunakan di industri. Sifat keras, tahan karat, dan ulet nikel, logam berwarna putih keperakan dengan semburat keemasan. Kombinasi ini sangat penting untuk berbagai aplikasi, termasuk pembuatan paduan super, baterai, dan katalis industri. Nikel sering ditemukan dalam bentuk oksida, logam murni, atau paduan. Sifat kimia dan fisiknya memungkinkannya digunakan dalam berbagai teknologi canggih, seperti bahan semikonduktor dan superkapasitor (Manohar et al., 2023; Danjumma et al., 2019)..

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

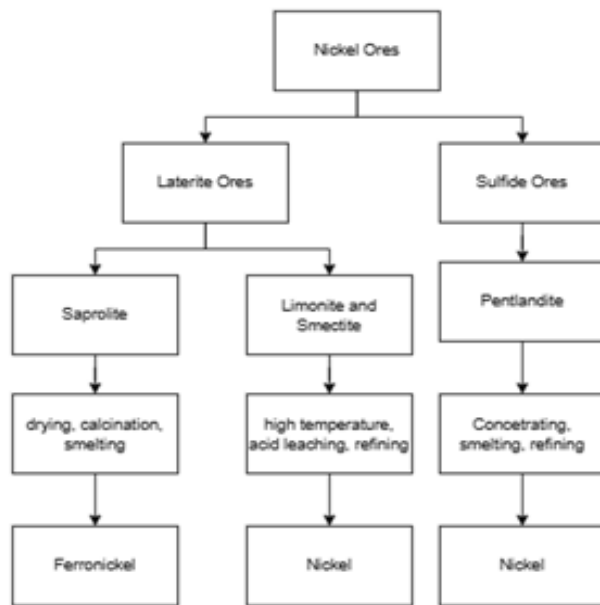
dan saprolit yang dibedakan berdasarkan struktur lapisan tanahnya. Gambar struktur lapisan tanah nikel dapat dilihat pada Tabel 1.

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

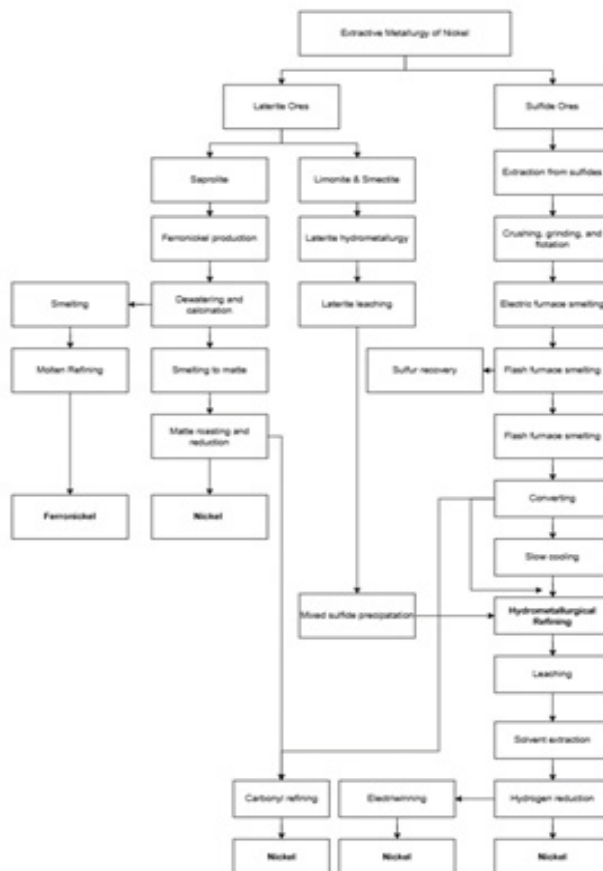
<i>Laterite Profile</i>	<i>Approximate analysis (%)</i>			
	Fe	MgO	Ni	Co
<i>Ferricrete</i>	> 50	< 0.5	< 0.8	< 0.1
<i>Limonite</i>	40-50	0.5-5	0.8-1.5	0.1-0.2
<i>Smectite</i>	10-30	5-15	0.6-2	0.02-0.1
<i>Saprolite</i>	10-25	15-35	1.5-4	0.02-0.1
<i>Bedrock</i>	5	35-40	0.3	0.01

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 luppen*, 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.

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



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



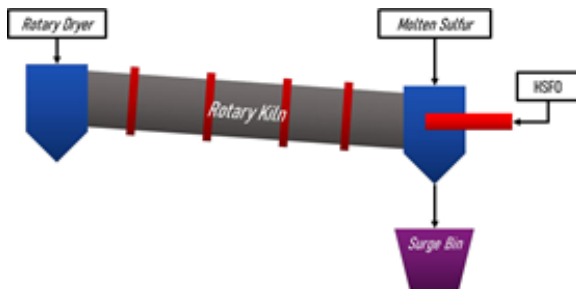
Gambar 2 Jalur-Jalur Pengolahan Nikel (Sumber: Crundwell et al., 2011)

SiO₂, 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.

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.

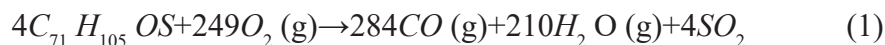
rotary kiln (RK) mengolah umpan dari *dry ore storage* (DOS) yang dicampur dengan bahan bakar *high sulfur fuel oil* (HSFO) yang memiliki kandungan sulfur sekitar 3% yang diinjeksikan di *discharge end* (Yusfaldin et al., 2017). Disebut *high sulfur fuel oil* karena mengandung residu sulfur yang tinggi. Selain itu produk kalsin akan dicampur dengan sulfur cair, sebelum masuk ke *Surge Bin*. Adapun skematik alur proses di PT Vale Tbk dapat dilihat pada Gambar 3.

Berdasarkan (Yusfaldin et al., 2017) akan terjadi pembakaran tidak sempurna HSFO



Gambar 3 Alur Proses Pengolahan PT Vale Tbk

juga mendapatkan gas karbon monoksida (CO) untuk mereduksi sebagian nikel dan besi. Adapun reaksi pembakaran tidak sempurna HSFO dapat dilihat pada persamaan 1.

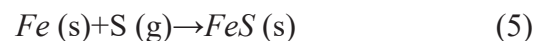
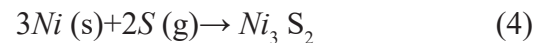


Selain penggunaan HSFO sebagai bahan bakar *Rotary Kiln*, produk kalsin akan disiram menggunakan *molten sulfur* sesaat sebelum menuju *surge bin*. Sisa dari oksida yang tidak tereduksi pada *rotary kiln* akan tereduksi pada proses peleburan. Reaksi reduksi yang terjadi di *rotary kiln* berdasarkan (Crundwell et al., 2011) dapat dilihat pada persamaan 2 dan persamaan 3.



Pernyataan ini diperkuat dengan adanya reaksi sulfidasi berdasarkan Crundwell et al., (2011) pada *chapter 8.2.2. Sulfidation in a Rotary Kiln*. Pada *chapter* tersebut juga dinyatakan jika *Ni-loss* (nikel yang hilang) dapat diminimalisir salah satunya dengan cara

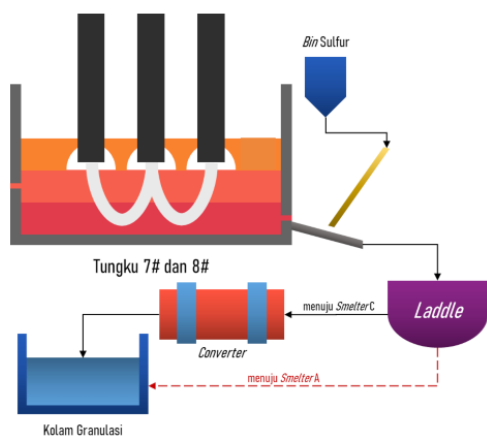
memaksimalkan *Ni-content* ke dalam *electric furnace*. Sulfur yang menguap menjadi gas akan bereaksi dengan sebagian kecil nikel oksida dan besi oksida yang sudah tereduksi. Reaksi yang disebutkan dapat dilihat pada persamaan 4 dan persamaan 5.



Kalsin yang sudah dicampur dengan sulfur akan dilebur menggunakan *electric furnace*. Di titik inilah yang mengakibatkan *recovery* nikel PT Vale Tbk lebih tinggi. Karena nikel dan besi sudah tersulfidasi maka dapat mengurangi nikel yang hilang menuju *slag*. Hal ini juga diperkuat pada *chapter 17.3.4*. Karena pada proses kalsinasi masih ada sebagian besar nikel oksida yang tidak tereduksi sehingga nikel oksida yang larut di dalam lapisan *slag* akan bereaksi dengan *molten iron-sulfide*. Reaksi yang terjadi pada lapisan *slag* dapat dilihat melalui persamaan 6.



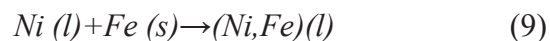
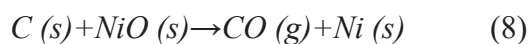
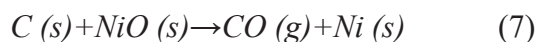
Smelter PT X mulai menggunakan metode sulfidasi per bulan November 2022. Hal ini untuk memenuhi kebutuhan produksi input



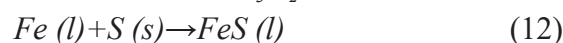
Gambar 4 Ilustrasi Proses Sulfidasi Smelter PT X

material pada converter dalam pembuatan nickel matte. Adapun ilustrasi proses sulfidasi pada tungku 7#8# Smelter dapat dilihat pada Gambar 4.

Proses peleburan kalsin di dalam EAF bertujuan untuk memisahkan besi-nikel (*crude*) dengan *slag* silika-magnesium. Setelah itu, proses peleburan akan mereduksi kandungan oksida pada nikel dan besi sehingga nikel dan besi dapat berikatan membentuk *crude*. 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% (Nurjaman et al. 2020). Penambahan sulfur juga mencegah besi mengalami metalisasi (*metalization*). Reaksi kimia yang terjadi di dalam *electric furnace* dapat dilihat pada persamaan 7 – persamaan 10.



Reaksi sulfidasi *crude* pada saat proses *tapping* dapat dilihat pada persamaan 11 – persamaan 13.



Terjadinya reaksi sulfidasi nikel dan besi secara teoritis mengacu pada diagram kesetimbangan termodinamika sulfidasi. Adapun diagram kesetimbangan termodinamika sulfidasi yang dibuat menggunakan FactSage dapat dilihat pada Gambar 4.

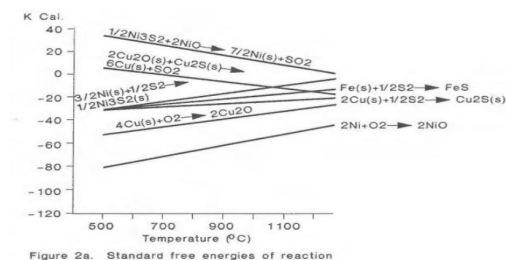


Figure 2a. Standard free energies of reaction

Gambar 2.9 Diagram kesetimbangan termodinamika sulfidasi (sumber: Diaz et al., (1988))

Gambar 5 Diagram Kesetimbangan Termodinamika Sulfidasi

2. METODE

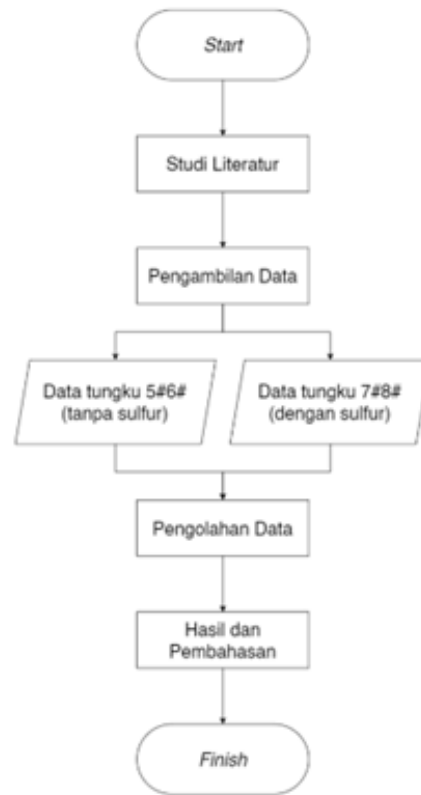
Data sekunder dikumpulkan selama proses *tapping* di tungku 7# dan 8# smelter. Data ini diambil dari *Control Room* Divisi *Furnace* Smelter PT X, yang secara otomatis mencatat semua aktivitas operasional dan parameter

proses. Data dikumpulkan dari Januari 2023 hingga Maret 2023 memberikan gambaran menyeluruh tentang kondisi proses di kedua tungku selama periode tersebut. Data proses *tapping* smelter PT X dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Data Kadar Proses Tapping Smeltter PT X

No Tungku	Hasil Analisa Laboratorium					
	Ni	Cr	Si	P	S	C
7#	20,58	0,17	0,05	0,046	10,71	0,37
7#	21,06	0,10	0,04	0,039	9,73	0,24
7#	21,59	0,16	0,05	0,042	9,84	0,29
7#	21,64	0,12	0,05	0,036	12,10	0,62
8#	22,71	0,09	0,05	0,029	8,46	0,24
8#	22,72	0,11	0,04	0,044	11,54	0,26
8#	27,72	0,11	0,04	0,044	11,54	0,26
8#	22,95	0,07	0,03	0,034	11,94	0,23

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 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 dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 6 Diagram Alir Penelitian

Dari data sekunder yang didapat akan diolah menggunakan *software Microsoft Excel*. Selain itu teknik sulfidasi yang digunakan di tungku 7#8# akan dibandingkan dengan teknik sulfidasi yang digunakan pada PT Vale melalui kajian literatur. Dengan data yang sudah diolah akan didapatkan hasil berupa perbandingan hasil dari teknik sulfidasi yang digunakan di tungku 7#8# dengan PT Vale Tbk.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebagai data pembanding, beberapa data hasil *tapping* dari PT Vale Tbk digunakan

untuk analisis. Data ini diperoleh dari berbagai sumber literatur, termasuk jurnal *JOM World Nonferrous Smelter Survey, Part III: Nickel: Laterite* oleh Warner et al. (2006), jurnal *PT INCO's Indonesian Nickel Project: An Updating* oleh Guiry dan Dalvi (1987), serta buku *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt, and Platinum-Group Metals* karya Crundwell et al. (2011). Perbandingan hasil *tapping* antara PT Vale Tbk dengan tungku 7# dan 8# Smelter B PT X disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Tabel Perbandingan hasil tapping PT Vale Tbk dengan Tungku 7#8# Smelter PT X

PT Vale Tbk (%)			Tungku 7#8# Smelter PT X (%)		
Ni	Fe	S	Ni	Fe	S
32,00	57,00	10,00	21,80	65,90	11,98
26,00	63,00	10,40	23,46	66,43	9,70
26,00	63,00	10,00	24,46	70,25	4,68
28,0	61,0	10,13	23,24	67,52	8,79

Data yang dihasilkan menunjukkan terdapat perbedaan hasil persen nikel yang didapatkan. Meskipun sama-sama menggunakan sulfur sebagai *reaktan*, PT Vale Tbk memiliki persen nikel lebih tinggi dibandingkan dengan tungku 7#8# PT X.

Berdasarkan Tabel 2, dapat dilihat bahwa kadar nikel PT Vale Tbk lebih tinggi. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh penggunaan HSFO yang mengandung sejumlah sulfur yang nantinya akan bereaksi dengan bahan umpan

dalam *rotary kiln*.

Teknik sulfidasi yang dilakukan di PT Vale Tbk yang menggunakan HSFO sebagai bahan bakar *rotary kiln* dan penyiraman *Molten Sulfur*. Sebaliknya, PT X menggunakan *Sulfur Powder* yang akan diinjeksikan melalui corong atau perangkat injeksi pada saat proses *tapping*. Pada PT X, penambahan serbuk sulfur dilakukan saat proses *tapping hot metal*, yang memiliki suhu sangat tinggi, jauh melebihi titik didih sulfur. Akibatnya, sebagian besar sulfur menguap dan bereaksi dengan oksigen di udara, membentuk sulfur dioksida (SO_2) atau oksida sulfur lainnya (SO_x). Proses ini tidak hanya berpotensi memengaruhi efisiensi sulfidasi tetapi juga dapat berdampak pada dinamika keseluruhan proses, termasuk potensi emisi gas buang.

Masing-masing teknik sulfidasi memiliki kelebihan dan kekurangannya sehingga tidak bisa menentukan mana yang lebih bagus. Pertimbangan ini harus diserahkan kepada perusahaan agar dapat menentukan *output* yang diinginkan. Berdasarkan Tabel 3 teknik ini dapat memperoleh kadar nikel lebih banyak namun, tidak dapat sewaktu-waktu dilakukan peniadaan proses sulfidasi karena menggunakan bahan bakar HSFO pada *rotary kiln*. Jika ingin meniadakan proses sulfidasi, maka harus mengganti bahan bakar yang lain untuk *rotary kiln* seperti menggunakan *pulverized coal*.

Selain dari pembahasan data didapatkan

kesimpulan dengan dua variasi yaitu, *nickel sulfide* pt x, dan *nickel sulfide* PT Vale Tbk terkait teknik sulfidasi dan emisi gas SO₂. Tabel perbandingan teknik sulfidasi dan emisi gas yang dihasilkan PT X dengan PT Vale Tbk dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 4 Perbandingan Teknik Sulfidasi dan Emisi Gas PT X dengan PT Vale Tbk

Produk & Perusahaan	<i>Nickel-Sulfide</i> PT X	<i>Nickel-Sulfide</i> PT Vale Tbk
Teknik Sulfidasi	Injeksi <i>Sulfur Powder</i> pada saat <i>tapping</i> .	Penggunaan bahan bakar HSFO di Rotary Kiln dan penyiraman <i>Molten Sulfur</i> di <i>dischargeend Rotary Kiln</i> .
Emisi SO ₂	Asap SO ₂ yang terbentuk akibat adanya proses sulfidasi cukup pekat dan menimbulkan bau yang tidak sedap	Emisi SO ₂ terdapat pada <i>off-gas Rotary Kiln</i> akibat terjadinya pembakaran tidak sempurna HSFO

Untuk mengurangi hilangnya sulfur akibat penguapan dan oksidasi selama proses sulfidasi, beberapa strategi optimasi dapat diterapkan. Salah satu pendekatan utama adalah menyesuaikan parameter operasi, seperti suhu dan tekanan, agar tetap berada dalam rentang yang meminimalkan volatilitas sulfur. Selain itu, penggunaan gas pelindung seperti nitrogen atau argon dapat membantu mengurangi kontak langsung antara sulfur yang menguap

dengan oksigen di udara, sehingga mengurangi pembentukan sulfur dioksida (SO₂) (Wu et al., 2021). Pendekatan lain melibatkan desain ulang sistem injeksi sulfur agar lebih terlokalisasi di zona proses dengan reaktivitas tinggi, sehingga mengoptimalkan efisiensi reaksi sulfidasi.

Teknologi terkini juga merekomendasikan penggunaan katalis tertentu untuk meningkatkan reaktivitas sulfur dengan bahan umpan pada suhu lebih rendah, yang tidak hanya mengurangi emisi SO₂ tetapi juga meningkatkan efisiensi bahan baku (Zheng et al., 2019). Dengan penerapan langkah-langkah ini, diharapkan efisiensi proses sulfidasi dapat ditingkatkan sekaligus mengurangi dampak lingkungan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal yaitu.

1. Teknik sulfidasi yang dilakukan di Smelter PT X dilakukan di tungku 7# dan 8# pada saat proses *tapping*, *sulfur powder* diumpankan melalui corong pada saat *molten crude* mengalir melalui *launder*. Sedangkan teknik sulfidasi di PT Vale Tbk menggunakan HSFO dan *molten sulfur* saat proses kalsinasi di *Rotary Kiln*.
2. Perbedaan teknik sulfidasi berpengaruh terhadap persen nikel yang didapat, pada tungku 7# dan 8# PT X memiliki rata-rata

persen nikel sebanyak 23,24% sedangkan PT Vale Tbk memiliki rata-rata persen nikel sebanyak 28,00%.

3. Kedua teknik sulfidasi memiliki kelebihan dan kekurangannya sehingga tidak bisa menentukan mana yang lebih bagus. Pertimbangan ini harus diserahkan kepada perusahaan agar dapat menentukan *output* yang diinginkan.

DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- 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.
- Danjumma, S. G., Abubakar, Y., & Suleiman, S. (2019). Nickel oxide (NiO) devices and applications: a review. Journal of Engineering Research and Technology.
- 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.
- Fan, Q., Yuan, S., Wen, J., & He, J. (2024). Review on comprehensive utilization of nickel laterite ore. Minerals Engineering.
- Guiry, J., & Dalvi, A. (1987). P.T. INCO's Indonesian Nickel Project: An Updating. International Journal of Mineral Processing, 19, 199-214.
- Manohar, A., Vijayakanth, V., & Vattikuti, S. V. P. (2023). Electrochemical investigation on nickel-doped spinel magnesium ferrite nanoparticles for supercapacitor applications. Materials Chemistry and Physics.
- 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.
- Warner, A., Díaz, C. M., Dalvi, A. D., Mackey, P. J., & Tarasov, A. V. (2006). JOM World Nonferrous Smelter Survey, Part III: Nickel: Laterite. JOM, 58(4), 11-20.
- Wu, Q., Sun, X., Su, Y., Wen, M., Li, G., Xu, L., & Zhang, Z. (2021). Behavior of sulfur

oxides in nonferrous metal smelters and implications on future control and emission estimation. *Environmental Science & Technology*.

Yusfaldin, Widodo, S., & Jafar, N. (2017, April). Analisis Konsumsi Energi Rotary Kiln #1 Pada Proses Pengolahan Nikel Kabupaten Luwu Timur Sulawesi Selatan. *Jurnal Geomine*, 5(1), 35-41.

Zhang, Z., Zhang, W., & Chen, X. (2024). Nickel extraction from nickel laterites: Processes, resources, environment and cost. *China Geology*.

Zheng, Y., Lv, J., Lai, Z., Lan, Z., & Wang, H. (2019). Innovative methodology for separating copper and iron from Fe-Cu alloy residues by selective oxidation smelting. *Journal of Cleaner Production*