

# EVALUASI PENAMBAHAN BAHAN IMBUH SILIKA PADA PROSES CONVERTER NIKEL MENGGUNAKAN FACTSAGE DI PT VALE INDONESIA

Wanidya Ni'immallaili Hadining<sup>1)</sup>, Sabrina Mantika<sup>2)</sup>

email: wanidya.nimmallaili@upnyk.ac.id, sabrinamantika@gmail.com

<sup>1,2)</sup> Program Studi Teknik Metalurgi, Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

## Ringkasan

Proses pemurnian nikel matte di unit converter PT. Vale Indonesia melibatkan penambahan bahan imbuhan silika ( $\text{SiO}_2$ ) untuk mengikat FeO membentuk terak stabil berupa fayalite. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi penambahan fluks silika terhadap performa proses konversi menggunakan simulasi termodinamika Factsage dan log operasional lapangan. Metode yang digunakan meliputi karakterisasi kimia menggunakan XRF pada berbagai material input dan slag hasil konversi. Simulasi kesetimbangan fasa pada  $1200^\circ\text{C}$  menggunakan modul Equilib dari Factsage, serta perhitungan rasio massa slag terhadap logam hilang. Hasil menunjukkan bahwa penambahan silika menurunkan kadar Fe dan S dalam matte secara signifikan, sekaligus meningkatkan kadar Ni hingga 78%. Namun, deviasi penambahan fluks yang terlalu tinggi, khususnya pada blow ke-10 menyebabkan akumulasi  $\text{SiO}_2$  bebas dalam slag dan berpotensi meningkatkan viskositas serta menurunkan efisiensi pemisahan. Evaluasi terhadap diagram terner dan perbandingan rasio massa menunjukkan pentingnya kontrol rasio Fe/ $\text{SiO}_2$  agar posisi komposisi slag tetap berada dalam zona slag cair dan fasa fayalit.

**Kata Kunci :** silika, nikel matte, fayalit

## 1. PENDAHULUAN

Indonesia memegang peranan penting dalam industri nikel global sebagai produsen nikel terbesar di dunia. Ekosistem nikel Indonesia semakin diperkuat dengan sumber daya geologi yang luas, adanya kebijakan pemerintah tentang pelarangan ekspor bahan mentah, dan meningkatnya permintaan nikel untuk aplikasi teknologi tinggi, terutama sebagai bahan baku utama baterai kendaraan listrik. Cadangan nikel yang melimpah terutama bijih nikel laterit memungkinkan Indonesia sebagai pemain utama dalam rantai pasokan nikel [1]. Proses ekstraksi nikel dilakukan dengan dua jalur pengolahan, yaitu hidrometalurgi dan pirometalurgi. Jalur pirometalurgi merupakan jalur utama untuk memproses nikel dari bijih saprolit, dengan proses *converter* sebagai tahap penting dalam pemurnian nikel *matte* dari proses peleburan.

Proses ekstraksi nikel dari bijih saprolit dengan metode pirometalurgi melalui beberapa tahapan utama, yaitu pengeringan, kalsinasi dan reduksi, peleburan, pemurnian, dan granulasi dengan produk akhir *granulated matte* berkadar nikel tinggi. Proses dari pengeringan hingga reduksi bertujuan untuk memperoleh konsentrat nikel dengan kadar yang lebih tinggi dan mempersiapkan bijih sebelum diinput ke *electric furnace* untuk proses peleburan. Produk dari proses peleburan adalah *Electric Furnace Matte* (EFM), memiliki kadar nikel yang belum optimal dengan kandungan besi dan sulfur yang masih tinggi, sehingga dibutuhkan proses pemurnian selanjutnya di *perce smith converter* (PSC). PSC beroperasi berdasarkan peniupan gas oksigen (*blowing*) melalui lelehan *matte* untuk mengoksidasi kandungan sulfur menjadi gas  $\text{SO}_2$  dan besi menjadi FeO, sehingga dapat meningkatkan kadar nikel pada *matte*. Seiring dengan berlangsungnya proses oksidasi, fasa terak akan terbentuk sebagai tempat akumulasi berbagai komponen oksida hasil reaksi.

Penambahan bahan imbuhan silika ( $\text{SiO}_2$ ) berpengaruh pada pembentukan dan karakteristik fasa terak. Silika mampu menurunkan temperatur terak, sehingga fluiditas terak meningkat, dan dengan demikian dapat memfasilitasi pemisahan nikel dengan pengotor-pengotornya [2]. Pengotor besi pada EFM akan terkonversi menjadi FeO pada proses *blowing*, selanjutnya FeO ini akan berinteraksi dengan  $\text{SiO}_2$  untuk membentuk fasa fayalit ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ). Terbentuknya fasa fayalit ini menjadi penting karena FeO cenderung tidak stabil dan akan bereaksi dengan senyawa lain, yang dapat menurunkan kemurnian produk *matte*. Aktivitas termal yang tinggi dan komposisi campuran dalam terak dapat menyebabkan FeO menjadi reaktif [3]. Sementara itu, fasa fayalit dapat membentuk terak cair yang lebih stabil pada temperatur 1200 – 1400°C, sehingga dapat memfasilitasi pemisahan nikel dan pengotor seperti  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO, dan MgO yang lebih signifikan dan dapat dengan mudah *diskimming*. Stabilitas fayalit memungkinkan penanganan fasa cair yang lebih mudah karena memiliki densitas dan viskositas yang cukup ideal untuk pemisahan, dengan demikian dapat meningkatkan efisiensi operasional. Oleh karena itu, rasio Fe/ $\text{SiO}_2$  pada proses pemurnian menjadi hal yang penting untuk diperhatikan agar pemisahan *matte* dan terak menjadi lebih optimal.

Proses pemisahan *matte* dan terak dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti tegangan antarmuka, perbedaan densitas antar fasa, dan viskositas terak [4]–[6]. Tegangan antarmuka dipengaruhi oleh rasio Fe/ $\text{SiO}_2$  yang berperan penting dalam menentukan efisiensi pengendapan partikel *matte* dari fasa terak cair, sehingga memudahkan pemisahan. Apabila rasio Fe/ $\text{SiO}_2$  rendah, tegangan antarmuka akan naik dan mendorong proses pengendapan *matte* secara lebih efektif, sehingga meningkatkan densitas *matte* untuk mempercepat pemisahan gravitasi antara fasa. Waktu tinggal *matte* dalam terak menjadi lebih singkat dan meningkatkan efisiensi pemurnian. Selain itu, viskositas fasa terak akan menurun dengan meningkatnya temperatur proses dan berkurangnya kandungan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  karena pembentukan fasa fayalit yang dibantu dengan penambahan silika. Namun, kandungan silika yang terlalu tinggi akan meningkatkan viskositas terak, sehingga menurunkan efektivitas pemisahan dan pemurnian, yang berakibat pada kandungan nikel rendah pada produk *matte* [7]. Hal ini menegaskan kontrol penambahan silika untuk memperoleh kandungan yang optimal adalah faktor yang penting dalam proses pemurnian di *Peirce-Smith Converter* (PSC). Pada studi ini, produk-produk antara dalam proses pemurnian dianalisis menggunakan karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) dengan penambahan silika yang bervariasi dalam penurunan kadar Fe dan S, serta pengaruhnya terhadap kadar Ni pada *matte* dan terak.

## 2. KAJIAN PUSTAKA

### Mineralogi dan Proses Pengolahan Nikel

Bijih nikel laterit merupakan sumber utama logam nikel, terdapat sebanyak 70% dari cadangan nikel dunia. Bijih ini dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu laterit limonit dan saprolit. Masing-masing tipe memiliki komposisi mineral dan karakteristik fisik yang berbeda, yang dapat mempengaruhi proses pengolahan [8], [9]. Bijih laterit saprolit secara umum mengandung konsentrasi nikel yang lebih tinggi dan kandungan besi yang lebih rendah, membuat bijih ini cocok diolah dengan metode pirometalurgi, khususnya *reduction smelting* untuk menghasilkan feronikel [10]. Sebaliknya, bijih laterit limonit mengandung besi yang tinggi, namun kandungan nikel rendah dan lebih cocok diproses menggunakan metode hidrometalurgi seperti pelindian asam tekanan tinggi (HPAL) karena mineraloginya yang lebih kompleks [11], [12].

Proses *reduction smelting* menjadi proses yang paling umum digunakan untuk menghasilkan feronikel atau nikel *matte* dari reduksi – sulfurisasi. *Reduction smelting* feronikel menggunakan *Rotary Kiln – Electric Furnace* (RKEF) berfokus pada pengeringan dan pra-reduksi bijih sebelum peleburan untuk memperoleh kadar nikel yang lebih tinggi [13]. Selain itu, proses reduksi – sulfurisasi juga sering diaplikasikan di industri pada temperatur 1500°C untuk menghasilkan nikel *matte*.

### Bahan Imbuhan Silika ( $\text{SiO}_2$ )

Silika digunakan dalam proses ekstraksi bijih nikel laterit dan sulfida. Fungsi utamanya sebagai bahan imbuhan yang menurunkan titik temperatur leleh material yang terlebih dalam proses peleburan, sehingga memudahkan pemisahan nikel dan pengotor lain. Pada bijih nikel sulfida, silika membantu membentuk terak selama peleburan bertemperatur tinggi. Ketika konsentrasi nikel meleleh, silika bereaksi dengan oksida-oksida logam dan pengotor lainnya membentuk terak cair. Terak ini mengandung pengotor-pengotor yang tidak diinginkan, sehingga nikel dan logam berharga lainnya dapat terpisah membentuk *matte*, yang dapat dimurnikan lebih lanjut [2]. Selain itu, penambahan silika

berdampak pada kesetimbangan *matte* dan terak selama peleburan, khususnya pada pengurangan kandungan sulfur pada terak, yang dapat membatasi *recovery* dan kemurnian nikel [14]. Kondisi operasi juga dapat dioptimalkan dengan mengatur rasio  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  untuk meningkatkan perolehan nikel di *matte* [15]. Sedangkan pada ekstraksi nikel laterit, penambahan bahan imbuah perlu memperhatikan kompleksitas komposisi mineral. Penggunaan dari bahan imbuah campuran, termasuk didalamnya silika, dapat meningkatkan tingkat *recovery* nikel dengan mendorong adanya reaksi reduksi, seperti pembentukan troilit ( $\text{FeS}$ ) yang dibantu dengan adanya material bahan imbuah lain seperti  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dan mineral karbonat [16]. Penambahan silika dapat mengendalikan rasio  $\text{FeO}/\text{SiO}_2$  di terak. Rasio yang seimbang mempengaruhi fluiditas dan viskositas terak. Terak yang terlalu viskos akan menghambat aliran dan menyulitkan proses *skimming* pengotor [9]. Kandungan  $\text{SiO}_2$  dalam terak pada umumnya berkisar 24 hingga 29% berat terak, yang dapat dijaga konsentrasinya berdasarkan diagram fasa  $\text{SiO}_2 - \text{FeO}$  di sekitar temperatur  $1200^\circ\text{C}$ .

### Proses Pemurnian Nikel

Nikel *matte* hasil peleburan dari *electric furnace* yang disebut dengan *Electric Furnace Matte* (EFM) ditransfer menggunakan *Hot Metal Crane* (HMC) menuju unit *converter* untuk dapat dimurnikan dengan *Pierce Smith Converter*. Selain EFM, terdapat fluks berbasis silika, injeksi gas oksigen, tambahan logam *High Nickel*, serta campuran logam bekas berupa *scrap boat* dan *scrap bin* yang menjadi input unit *converter*. *Scrap bin* berasal dari limbah atau sisa logam yang dihasilkan selama proses termasuk sisa nikel *matte*, terak, dan serpihan logam bekas, sedangkan *scrap boat* memiliki kandungan Ni > 2%, diperoleh dari *matte reject* proses granulasi, debu dari alat pengering granul, lumpur dari *evaporation chamber* dan *matte settling pond*. Kadar nikel *matte* dari proses peleburan yang memiliki kadar Ni sebesar 25 – 30%, dimurnikan di unit *converter* hingga nikel memiliki konsentrasi 75 – 78% [17].

Saat peniupan gas oksigen, terjadi oksidasi logam dengan urutan terbentuknya bergantung pada besaran energi bebas gibbs masing masing unsur logam yang terkandung dalam *matte*. Reaktivitas unsur terhadap oksigen dapat dilihat dari diagram Ellingham [18] yang menunjukkan kecenderungan termodinamika suatu unsur untuk bereaksi membentuk oksida pada temperatur tertentu, dimana unsur yang memiliki energi bebas gibbs lebih negatif dari unsur lainnya memiliki kestabilan membentuk oksida yang lebih tinggi. Pada kondisi temperatur proses *converter*, kecenderungan pembentukan oksida dapat dilihat pada Tabel 1. Besi (Fe) dan kobalt (Co) akan lebih dulu teroksidasi, bergantung dari seberapa besar konsentrasi dan kondisi oksidatif dalam sistem.

Tabel 1. Reaksi oksidasi dan nilai energi bebas Gibbs pada unit converter

Reaksi Oksidasi	Energi Bebas Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) (kJ/mol)
$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$	$-902,3 + 172,9T$
$2\text{Mn} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{MnO}$	$-813 + 175,8T$
$4\text{P} + 5\text{O}_2 \rightarrow 2\text{P}_2\text{O}_5$	$-3,155 + 1,10T$
$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	$228,8 - 171,6T$
$2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO}$	$-451 + 82,6T$

### 3. METODE PENELITIAN

#### Material

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan fluks silika terhadap komposisi terak dan *matte* pada proses pemurnian menggunakan *converter* di PT. Vale Indonesia Tbl. Bahan-bahan yang digunakan meliputi *Electric Furnace Matte* (EFM), *High Nickel* (HiNi), *scrap bin*, *scrap boat* serta fluks silika. Seluruh bahan diambil langsung dari jalur produksi aktual dan dianalisis menggunakan XRF untuk menentukan komposisi kimia. Selain itu, data operasional *converter* diperoleh melalui *log sheet* harian yang tercatat selama 2 bulan. Semua sampel dikeringkan dan dipersiapkan melalui homogenisasi sebelum dilakukan karakteristik kimia dan analisis termodinamika.

#### Pengambilan Sampel dan Karakterisasi

Sampel representatif dari EFM, HiNi, fluks silika, dan *scrap* dikumpulkan berdasarkan prosedur *sampling* sesuai standar ASTM. Komposisi kimia utama dianalisis menggunakan XRF PANalytical Axios untuk mengukur kandungan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ , S, Ni, Fe, Co dan FeO. Terak hasil konversi

juga dianalisis untuk memperoleh kandungan aktual SiO<sub>2</sub> yang selanjutnya dibandingkan dengan nilai teoritis sebagai acuan efisiensi penambahan fluks.

### Simulasi Termodinamika

Permodelan termodinamika dilakukan menggunakan perangkat lunak Factsage versi 8.0 untuk mensimulasikan kondisi kesetimbangan pada proses *converter*. Simulasi dilakukan pada temperatur 1200°C dalam atmosfer oksidatif untuk menyerupai kondisi operasi nyata *converter*, dengan variasi penambahan fluks sebesar 1,6 ton, 3 ton, dan 3,3 – 3,5 ton per satu siklus peleburan. Fasa-fasa kesetimbangan seperti terak cair, *matte*, serta fasa padat (seperti spinel atau olivin) dihitung menggunakan modul Equilib, dengan database FactPS dan FToxid.

### Evaluasi Penambahan Fluks Silika

Efisiensi penambahan fluks silika dievaluasi dengan membandingkan jumlah SiO<sub>2</sub> aktual yang ditambahkan di lapangan (berdasarkan *log sheet*) terhadap kebutuhan teoritis menggunakan persamaan (1) sebagai berikut:

$$\%Diferensial = \frac{SiO_2 \text{ aktual} - SiO_2 \text{ teoritis}}{SiO_2 \text{ teoritis}} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

Nilai teoritis dihitung berdasarkan perbandingan stoikiometri pembentukan fayalit dari kandungan FeO dalam input proses, dengan tujuan mengurangi FeO bebas yang dapat mempercepat keausan refraktori dan meningkatkan kehilangan logam ke terak.

### Akuisisi dan Analisis Data

Data proses diperoleh dari loga harian *converter*, mencakup parameter sebagai berikut:

1. Laju aliran udara selama proses *blowing*
2. Waktu dan jumlah penambahan fluks silika
3. Temperatur *tapping matte*
4. Komposisi kimia akhir terak

Seluruh data dikompilasi dan dianalisis untuk melihat korelasi antara laju penambahan silika dengan hasil akhir SiO<sub>2</sub> dalam terak serta kadar nikel dalam *matte*. Proses pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel untuk perhitungan, visualisasi, serta validasi hasil simulasi dengan data aktual lapangan

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

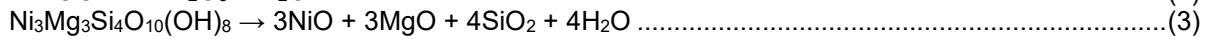
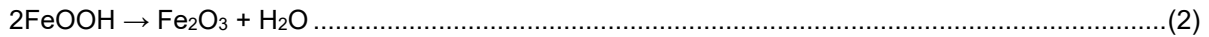
### Karakterisasi Material *Charging Converter*

Hasil XRF menunjukkan bahwa EFM sebagai produk utama dari proses peleburan memiliki kandungan nikel sebesar 22,96% seperti yang terlihat pada Tabel 2. Nilai ini dibawah nilai target kadar nikel minimal dari proses peleburan yaitu 25%. Kandungan pengotor Fe yang tinggi sebanyak 68,49% semakin membuktikan bahwa proses peleburan memerlukan proses tambahan yaitu permurnian di unti *converter*. Bersamaan dengan input lainnya yang juga dapat dimurnikan kembali hingga target nikel sebesar 75 – 78%.

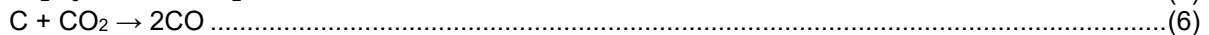
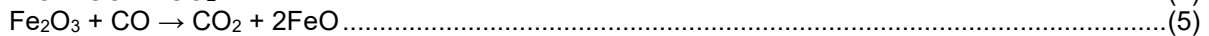
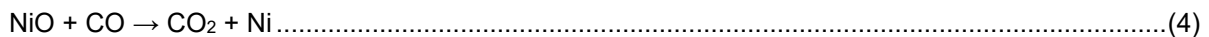
Tabel 2. Hasil karakterisasi XRF pada material input converter

Material input converter	Komposisi kimia (%)							
	SiO <sub>2</sub>	MgO	S	Ni	Fe	Co	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
EFM	-	-	7,85	22,96	68,49	0,69	-	-
Debu ( <i>Dust</i> )	47,52	0,79	6,76	25,17	18,76	0,72	-	0,25
HiNi	27,68	0,20	0,38	5,07	50,16	2,15	64,53	-
<i>Scrap Bin</i>	24,69	~0,00	1,43	3,50	54,09	0,79	69,59	-
<i>Scrap Boat</i>	22,03	~0,00	2,49	5,71	53,82	0,53	69,24	-
Fluks	99,78	-	-	0,01	-	-	-	0,21

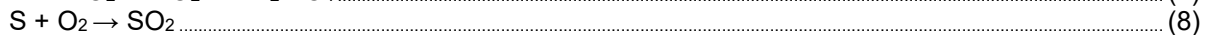
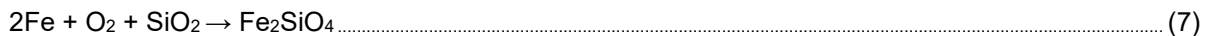
Debu atau *dust* berasal dari *rotary kiln* pada proses pengeringan dan kalsinasi. Debu ini akan diklasifikasikan oleh *multicyclone* menjadi debu halus dan debu kasar. Debu kasar ditarik oleh katoda menuju *Electrostatic Precipitator* (ESP), yang akhirnya dikumpulkan di dalam *dust bin* oleh *pneumatic gas*. Debu kasar menunjukkan kandungan nikel yang signifikan karena terjadinya reaksi pelepasan air terikat saat kalsinasi pada temperatur 700°C melalui reaksi pada persamaan (2) dan (3) sebagai berikut ....



Kemudian reaksi reduksi nikel dan besi oksida parsial oleh gas CO dari gasifikasi batubara terjadi pada temperatur 800 – 900°C yang dapat mereduksi nikel hingga 40% dan besi sekitar 5% melalui reaksi pada persamaan (4) – (6) sebagai berikut [19]:

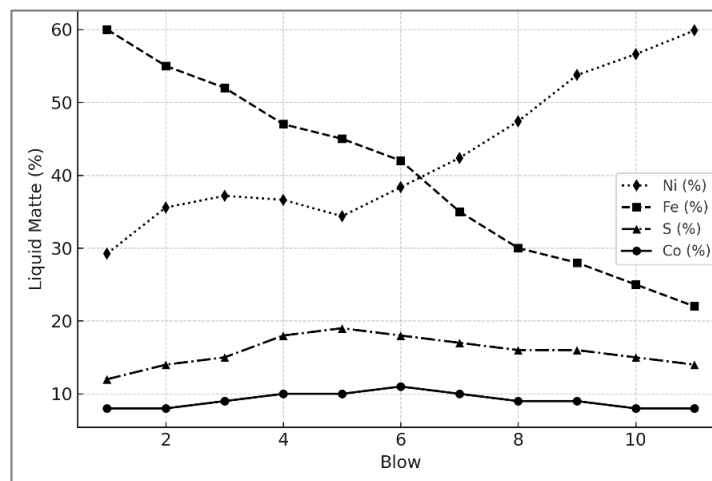


Fluks silika dengan kemurnian SiO<sub>2</sub> tinggi ditambahkan dalam proses konversi untuk mengikat unsur besi dalam *matte* melalui pembentukan fasa terak silikat fayalit. Jumlah silika yang ditambahkan disesuaikan dengan kadar besi yang ditargetkan, dan umumnya diberikan secara bertahap pada setiap tahapan *blow* hingga kadar Fe dalam *matte* mencapai sekitar 0,74%. Selain berfungsi untuk mengikat FeI, penambahan silika juga menurunkan titik lebur FeO dari 1371°C menjadi sekitar 1200°C, sehingga mendukung efisiensi proses peleburan pada temperatur operasi konverter yang lebih rendah. Reaksi utama yang terjadi adalah pembentukan fayalit (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) dari oksidasi Fe dan reaksi antara SiO<sub>2</sub> dengan FeO, serta oksidasi sulfur menjadi gas SO<sub>2</sub> berdasarkan reaksi pada persamaan (7) dan (8) sebagai berikut :

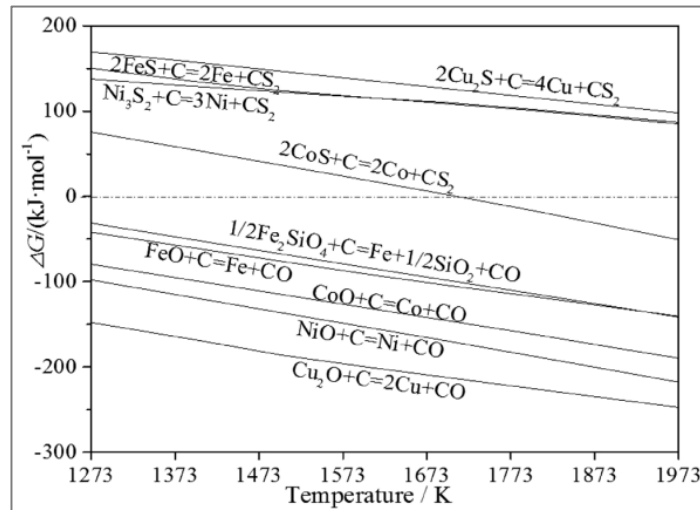


Reaksi (7) dan (8) bersifat eksotermis, sehingga dapat menghasilkan energi panas yang cukup besar untuk meningkatkan temperatur operasi tanpa memerlukan suplai panas eksternal. Proses ini memungkinkan transformasi *matte* dari *electric furnace* menjadi *matte* akhir dengan kadar nikel tinggi (~78% Ni), besi rendah (~0,74%), serta mengandung sekitar 1,54% Co dan 20% S [20].

### Evaluasi Penambahan Fluks Silika terhadap Matte menggunakan Factsage



Gambar 1. Komposisi kandungan Ni, Fe, Co, dan S dalam matte dari blow 1 hingga 11 berdasarkan simulasi Factsage



Gambar 2. Energi bebas Gibbs standar ( $\Delta G^\circ$ ) beberapa sulfida dan oksida dalam unit converter [7]

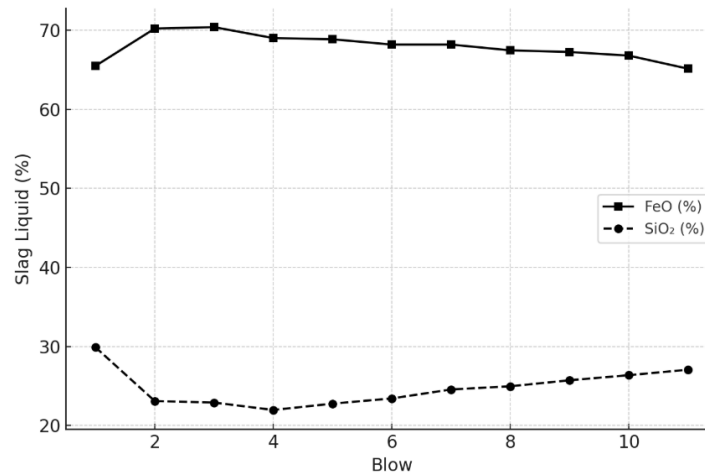
Gambar 1 menunjukkan perubahan konsentrasi Ni, Fe, Co, dan S dari *blow* 1 hingga 11 berdasarkan *Factsage* dengan penambahan bahan imbuhan silika. Kandungan Fe mengalami penurunan yang signifikan dari sekitar 60% menjadi 25%. Penurunan ini disebabkan oleh reaksi (7) dimana Fe yang teroksidasi menjadi FeO terikat oleh bahan imbuhan silika menjadi fasa fayalit yang berada pada terak, sehingga *matte* menjadi lebih murni.

Sementara itu, kandungan kobalt (Co) menunjukkan tren yang relatif stabil pada kisaran 8 – 11% sepanjang proses konversi, mengindikasikan bahwa Co tidak mengalami reaksi oksidasi atau *slagging*, dan cenderung tetap berada dalam fase *matte*. Hal ini sesuai dengan data termodinamika yang menunjukkan bahwa energi bebas Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) untuk reduksi kobalt lebih negatif dibandingkan besi seperti yang terlihat pada Gambar 2, sehingga logam kobalt lebih mudah diperoleh karena reaksinya berlangsung lebih spontan [18].

Kandungan sulfur (S) menunjukkan tren yang berbeda. Sulfur mengalami peningkatan secara bertahap dari *blow* awal hingga sekitar *blow* 5 dan 6, kemudian menurun perlahan hingga *blow* ke-10. Hal ini disebabkan karena pada awal proses pemurnian masih terdapat banyak senyawa FeS dan NiS yang belum teroksidasi, sehingga S belum banyak dilepaskan sebagai gas. Setelah sebagian Fe teroksidasi dan terak terbentuk pada *blow* 5 dan 6, reaksi oksidasi sulfur mulai terjadi bersamaan dengan juga oksidasi Fe. Reaksi oksidasi ini bersifat eksotermis dan berkontribusi besar terhadap peningkatan temperatur internal *converter*. Dengan berkurangnya kandungan Fe dan S, kualitas *matte* meningkat, sementara Co tetap terjaga dalam logam menjadi logam pengikut (*by-product*).

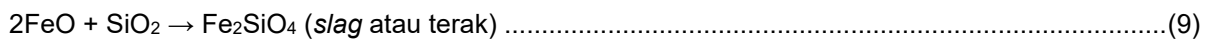
Penurunan Fe dan S diikuti dengan peningkatan kadar Ni dalam *matte* dari 29% menjadi hampir 60%. Peningkatan konsentrasi terjadi secara bertahap dengan kecenderungan lebih stabil hingga sekitar *blow* ke-6, kemudian menunjukkan lonjakan peningkatan dari *blow* ke-7 hingga 11. Hal ini sejalan dengan termodinamika dimana Fe lebih dahulu teroksidasi dan membentuk terak, kemudian penghilangan sulfur dalam bentuk gas  $\text{SO}_2$ . Seiring berkurangnya Fe dan S, komposisi *matte* didominasi oleh nikel, sehingga proses pemurnian berlangsung secara efektif karena kandungan Ni > 50% termasuk dalam *high-grade matte*. Gambar 2 juga memperlihatkan bahwa nikel lebih stabil membentuk logamnya dalam rentang temperatur operasi *converter* (~1350 – 1400°C). Akibatnya, nikel cenderung tetap berada dalam fasa logam selama proses oksidasi berlangsung. Tren perubahan komposisi *matte* ini sesuai dengan mekanisme reaksi dalam unit *converter*, yang dipengaruhi oleh perbedaan reaktivitas termodinamika antar unsur serta terdapat kontribusi fluks silika dalam membentuk terak yang stabil.

**Evaluasi Penambahan Fluks Silika terhadap Terak menggunakan Factsage**

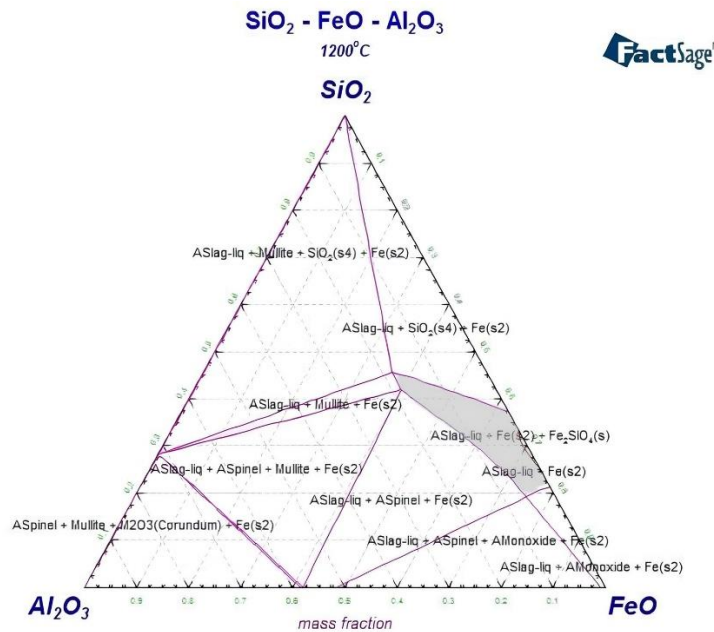


Gambar 3. Komposisi kandungan terak dari blow 1 hingga 11 berdasarkan simulasi Factsage

Gambar 3 memperlihatkan perubahan komposisi terak yang terdiri dari SiO<sub>2</sub> dan FeO dengan simulasi Factsage. Secara keseluruhan, kandungan FeO (%berat) dalam terak menunjukkan penurunan dengan sedikit fluktuasi dari sekitar 70 ke 65% dengan bertambahnya jumlah *blow*. Sebaliknya, kandungan SiO<sub>2</sub> (%berat) secara bertahap meningkat dari sekitar 23 menuju 27% pada *blow* terakhir. Kecenderungan ini mengindikasikan adanya peran penambahan bahan imbuhan silika yang bertujuan untuk mengikat FeO hasil oksidasi Fe dalam *matte* menjadi terak dalam bentuk fayalit (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) melalui persamaan (9) sebagai berikut [21]:



Persamaan (9) juga memperlihatkan bahwa rasio ideal FeO/SiO<sub>2</sub> adalah 2:1 untuk mencapai terak dengan titik lebur rendah (~1200°C), sehingga pada *blow* pertama ditambahkan bahan imbuhan dengan rasio tepat 2,19 untuk memperoleh kondisi pemisahan *matte* dan terak yang ideal. Rasio Fe/SiO<sub>2</sub> meningkat hingga *blow* 6, kemudian menurun hingga *blow* terakhir. Dengan demikian, tegangan antarmuka meningkat dari *blow* 6, menyebabkan proses pengendapan butiran *matte* berlangsung lebih efisien dari fasa terak cair, sehingga efisiensi pemisahan dan pemurnian *matte* meningkat hingga *blow* terakhir. Selain itu, rasio Fe/SiO<sub>2</sub> juga berpengaruh terhadap viskositas terak, dimana apabila rasio rendah karena terikat menjadi fayalit ke fasa terak, viskositas fasa terak akan menurun. Namun, kandungan silika yang terlalu tinggi juga akan meningkatkan viskositas terak dan menyebabkan proses *skimming* dan *tapping* menjadi sulit [7]. Hal ini juga dapat dianalisis melalui diagram terner kesetimbangan SiO<sub>2</sub> – FeO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada temperatur 1200°C pada Gambar 4.

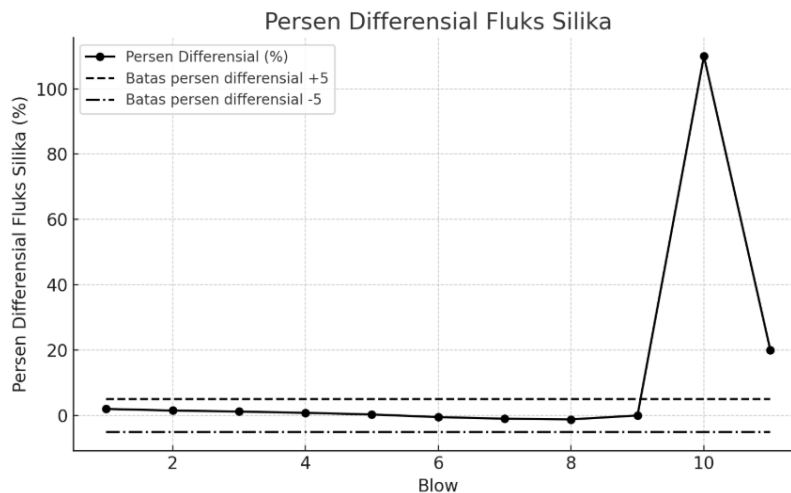


Gambar 4. Diagram terner kesetimbangan terak  $\text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  pada temperatur  $1200^\circ\text{C}$

Gambar 4 juga memperlihatkan daerah kestabilan fasa terak cair ( $A_{\text{slag-liq}}$ ) dan fasa fayalit (daerah arsir) yang masih berada dalam rasio  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  ideal, dimana diluar area ini ketika disertai juga dengan peningkatan kandungan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  menyebabkan terbentuknya fasa solid lain seperti mullit, spinel, dan  $\text{SiO}_2(\text{s})$ . Terbentuknya fasa solid yang terkristalisasi ini dapat meningkatkan viskositas fasa terak dan menghambat aliran, serta menyulitkan pemisahan *matte* dari terak.

#### Evaluasi Penambahan Fluks Silika terhadap Performa Converter

Gambar 5 menunjukkan data persen diferensial fluks silika antara nilai aktual dengan nilai teoritis berdasarkan standar perhitungan stoikiometri  $\text{SiO}_2$  yang terdapat pada persamaan (1). Sebagian besar nilai deviasi berada dalam rentang toleransi  $\pm 5\%$ , menunjukkan bahwa sebagian besar tahapan *blow* dikontrol dengan cukup baik. Namun, *blow* ke-10 menunjukkan %diferensial yang sangat tinggi, mengindikasikan kelebihan penambahan bahan imbuhan silika yang signifikan terhadap estimasi teoritis. Peningkatan kadar silika ini apabila tidak disertai dengan ketersediaan  $\text{FeO}$  yang cukup untuk membentuk fasa fayalit, akan menyebabkan akumulasi  $\text{SiO}_2$  bebas dalam terak.  $\text{SiO}_2$  merupakan oksida dengan struktur *tetrahedral network former*, dimana ketika tidak bereaksi dengan  $\text{FeO}$ , akan memperkuat struktur jaringan terak dan meningkatkan viskositasnya [22]. Ketika diplot pada Gambar 4, posisi komposisi terak pada *blow* ke-10 dapat bergeser keluar dari area  $A_{\text{slag-liq}} + \text{Fe}(\text{s}2) + \text{Fe}_2\text{SO}_4(\text{s})$ . Pergeseran ini dapat menyebabkan peningkatan viskositas terak dan menurunkan efisiensi pemisahan antara *matte* dan terak karena pergerakan butiran *matte* terhambat.



Gambar 5. Persen differensial penambahan bahan imbuhan silika pada unit converter di PT. Vale Indonesia

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN-SARAN

### Kesimpulan

Penambahan fluks silika dalam proses konversi berperan penting dalam mengikat FeO hasil oksidasi menjadi fasa terak stabil berupa fayalit, yang berdampak langsung pada penurunan kadar Fe dan S serta peningkatan kemurnian nikel *matte*. Hasil karakterisasi dan simulasi termodinamika menunjukkan bahwa peningkatan kadar silika yang dikontrol dengan baik dapat menjaga slag tetap berada dalam fasa cair, menurunkan viskositas, dan meningkatkan efisiensi pemisahan *matte*. Namun, deviasi tinggi pada penambahan silika *blow* ke-10 dapat menyebabkan akumulasi SiO<sub>2</sub> bebas, yang dapat mendorong sistem keluar dari kestabilan termodinamika dan menurunkan efisiensi pemurnian. Oleh karena itu, rasio massa slag terhadap *metal loss* serta posisi komposisi pada diagram terner menjadi indikator penting dalam proses optimasi pemurnian di konverter.

### Saran

Penambahan fluks silika sebaiknya dikontrol ketat berdasarkan stoikiometri pembentukan fayalit dan komposisi aktual FeO dalam input *converter*. Deviasi aktual terhadap kebutuhan SiO<sub>2</sub> teoritis harus diminimalkan agar komposisi *slag* terjaga dalam zona terak cair pada diagram terner dan menghindari akumulasi SiO<sub>2</sub> padat bebas yang dapat meningkatkan viskositas. Pengembangan model prediktif penambahan bahan imbuhan berbasis data *real-time* dan integrasi kontrol proses dengan permodelan termodinamika berbasis perangkat lunak seperti Factsage dibutuhkan untuk penelitian selanjutnya.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

1. X. Zhou *et al.* 2022. Risk Transmission of Trade Price Fluctuations from a Nickel Chain Perspective: Based on Systematic Risk Entropy and Granger Causality Networks. *Entropy*. Vol. 24. No. 9.
2. D. Sukhomlinov, O. Virtanen, P. Latostenmaa, A. Jokilaakso, and P. Taskinen. 2019. Impact of MgO and K<sub>2</sub>O on Slag-Nickel Matte Equilibria. *J. Phase Equilibria Diffus.* Vol. 40. No. 6. Page 768–778.
3. L. ming Ma *et al.* 2023. Phase transition mechanism of high-silica fluxed pellets during consolidation. *Ironmak. Steelmak.* Vol. 50. No. 6. Page 637–647.
4. M. Chen and B. Zhao. 2014. Viscosity Measurements of SiO<sub>2</sub>-FeO-CaO System in Equilibrium with Metallic Fe. *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.* Vol. 46. No. 2. Page 577–584.
5. M. Chen, S. Raghunath, and B. Zhao. 2013. Viscosity of SiO<sub>2</sub>-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> System in Equilibrium with Metallic Fe. *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.* Vol. 44. No. 4. Page 820–827.
6. H.-R. Lee, H. Shin, S.-C. Shim, and Y. Kang. 2024. Viscosity Measurement of FeO-SiO<sub>2</sub> Based Slags Under Controlled Oxygen Partial Pressures. Page 91–99.

7. Y. Wang, R. Zhu, Q. Chen, G. Wei, S. Hu, and Y. Guo. 2018. Recovery of Fe, Ni, Co, and Cu from Nickel Converter Slag Through Oxidation and Reduction. *ISIJ Int.* Vol. 58. No. 12. Page 2191–2199.
8. Z. Huang, Z. Xing, G. Cheng, J. Liu, X. Xue, and X. Ding. 2022. Preparation and Consolidation Mechanism of Nickel Laterite Carbon Composite Hot Briquette. *J. Phys. Conf. Ser.* Vol. 2300. No. 1.
9. R. F. da Silveira, O. J. C. Fernandez, P. T. S. da Luz, and J. H. B. da Costa. 2020. Thermal Transformations of The Nickel Laterite Agglomerate Phases and Their Metallurgical Influence. *Mater. Sci. Forum.* Vol. 1012 MSF. Page 337–342.
10. P. Ju, K. Ryom, and K. Hong. 2018. Separation of Iron-Nickel Alloy Nugget from Limonitic Laterite Ore Using Self-Reduction. *J. Min. Metall. Sect. B Metall.* Vol. 54. No. 3. Page 385–392.
11. D. Zhao, B. Ma, B. Shi, Z. Zhou, P. Xing, and C. Wang. 2020. Mineralogical Characterization of Limonitic Laterite from Africa and Its Proposed Processing Route. *J. Sustain. Metall.* Vol. 6. No. 3.
12. Z. Huang, Z. Xing, J. Liu, G. Cheng, X. Ding, and X. Xue. 2024. The Influence of Basicity on the Softening and Melting Behaviors of Limonitic Laterite Ore Sinter. *Steel Res. Int.*
13. Utilization of Limonite Nickel Laterite to Prepare Ferronickel by the Selective Reduction Smelting Process,” *Sustain.* 2023. Vol. 15. No. 9.
14. A. M. Amdur, S. A. Fedorov, and V. V. Yurak. 2021. Transfer of gold, Platinum and Non-Ferrous Metals from Matte to Slag by Flotation. *Metals (Basel)*. Vol. 11. No. 10.
15. K. Laungsakulthai, T. Chandakhiaw, N. Wongnaree, J. Thampiryanon, W. Kritsarikun, and S. Khumkoa. 2020. Smelting Reduction of Spent Catalyst Containing Nickel: a Preliminary Study. *Mater. Sci. Forum.* Vol. 1009 MSF. Page 162–167.
16. B. Widyartha, Y. Setiyorini, F. Abdul, T. J. Subakti, and S. Pintowantoro. 2020. Effective beneficiation of low content nickel ferrous laterite using fluxing agent through Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> selective reduction. *Materwiss. Werksttech.* Vol. 51. No. 6. Page 750–757.
17. M. S. Moats and W. G. Davenport. 2024. Nickel and Cobalt. *Treatise Process Metall.* Page 575–604.
18. M. Hasegawa. 2014. Ellingham Diagram. *Treatise Process Metall.* Vol. 1 Process Fundam. Page 349–355.
19. J. M. Romero *et al.* 2022. Improving the Rotary Kiln-Electric Furnace Process for Ferronickel Production: Data Analytics-Based Assessment of Dust Insufflation Into the Rotary Kiln Flame. *Alexandria Eng. J.* Vol. 61. No. 4. Page 3215–3228.
20. F. Crundwell, M. Moats, V. Ramachandran, T. Robinson, and W. G. Davenport. 2011. Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals. *Extr. Metall. Nickel, Cobalt Platin. Gr. Met.*
21. Y. X. Liu, Y. G. Wei, S. W. Zhou, B. Li, and H. Wang. 2023. Matte-Slag Separation Behavior As a Function of Iron Phase Reduction in Copper Slag. *J. Min. Metall. Sect. B Metall.* Vol. 59. No. 1. Page 27–37.
22. W. Xuan, H. Wang, and D. Xia. 2019. Deep Structure Analysis on Coal Slags with Increasing Silicon Content and Correlation with Melt Viscosity. *Fuel.* Vol. 242. Page 362–367.