



Optimalisasi Pengendalian Rasio ICP Boat dengan Limbah Brick Ladle Converter Matte ($Al_2O_3-SiO_2$) Menggunakan Simulasi Factsage¹

Optimizing the Ratio Control of ICP Boat with Converter Matte Waste Brick Ladle ($Al_2O_3-SiO_2$) Using the FactSage Simulation Method

Sabrina Mantika^{a,2}, Riria Zandy Mirahati^b

^[a,b] Program Studi S1 Teknik Metalurgi, Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Jl. Babarsari 2, Tambakbayan, Depok, Sleman, Yogyakarta, 55281

ABSTRAK

Proses pemurnian untuk meningkatkan kadar nikel dilakukan didalam *converter pierce smith* dengan beberapa proses yaitu *charging, blowing, skimming, dry up* dan *casting* sehingga didapatkan kadar nikel matte 75-78%, Dari hasil casting, nikel matte ditampung dalam wadah berupa ladle, setiap satu kali proses pemanasan satu converter dapat menampung hasil *casting* sebanyak 7 ladles dengan masing-masing kapasitasnya sekitar 15,5 ton. Ladle ini terbuat dari baja karbon dengan lapisan brick, dengan bahan refraktori terdiri dari castables pada dinding dan brick alumina pada bagian bawah ladle. Penuangan matte berulang ke dalam ladle dapat menyebabkan erosi permukaan ladle akibat inputan panas yang tinggi dan gesekan matte, serta masalah kimia seperti build up. Bagian material refraktori dalam ladles ini akan menjalani skema total relining dengan melakukan chipping di setiap bagian-bagiannya dan menghasilkan limbah brick yang tergolong kedalam limbah B3. Potensi dari limbah *brick* di ladle ini masih cukup tinggi dalam menghasilkan nikel matte sisa yang tergabung secara homogen. Oleh karena itu limbah brick ladle akan menjadi suatu pertimbangan untuk dicampur oleh ICP Boat dengan komposisi dan distribusi tertentu. Hasil campuran nantinya menjadi umpan pada proses pemurnian converter dengan meninjau variasi pengaturan rasio antara limbah *brick* dengan ICP Boat yang baik dan benar menggunakan simulasi *software* FactSage lalu memvalidasi hasilnya melalui percobaan lapangan. Simulasi *software* FactSage merekomendasikan improvement rasio campuran limbah brick dengan ICP Boat sekitar 4,6-12% di suhu 1200°C guna mencegah pembentukan spinel dan olivine

Kata kunci: *Converter, ladle, brick, ICP boat, FactSage.*

ABSTRACT

The purification process to increase the nickel content is carried out in a Pierce Smith converter through several stages, including charging, blowing, skimming, dry up, and casting, resulting in a nickel matte with a 75-78% nickel content. After casting, the nickel matte is stored in ladles, with each converter being able to accommodate the casting of 7 ladles, each with a capacity of about 15.5 tons. These ladles are made of carbon steel with a brick lining, consisting of castables on the walls and alumina brick on the bottom. Repeated pouring of matte into the ladles can cause surface erosion due to high heat input and matte friction, as well as chemical issues such as build-up. The refractory material in these ladles will undergo a total relining scheme, resulting in waste brick classified as B3 waste. The potential of the waste brick in the ladles is still quite high in producing residual nickel matte in a homogenized form. Therefore, the waste brick from the ladles will be considered to be mixed with ICP Boat with specific composition and distribution. The resulting mixture will be used as feed in the converter purification process by reviewing the variation of the waste brick to ICP Boat ratio using FactSage software simulation and validating the results through field experiments. FactSage software simulation recommends an improvement in the waste brick to ICP Boat mixture ratio of about 4.6-12% at a temperature of 1200°C to prevent the formation of spinel and olivine

¹ Info Artikel: Received: 10 Januari 2024, Revised: 4 Juni 2024, Accepted: 7 Juni 2024, Published: 21 Juni 2024

² E-mail: 116200019@student.upnyk.ac.id

PENDAHULUAN

Converter merupakan proses dengan batch dimana produk matte dari furnace akan diproses lebih lanjut untuk menghilangkan kandungan besi yang akan meningkatkan kandungan produk yang diinginkan sehingga meningkatkan kadar matte. Udara untuk reaksi oksidasi dimasukkan melalui 40-55 tuyere yang terendam di dalamnya bak lelehan ($35-50 \times 103 \text{ Nm}^3/\text{jam}$) pada suhu ambient. Pierce Smith Converter atau PSC dipatenkan di Amerika Serikat pada tahun 1909, dan masih menjadi referensi untuk proses pemurnian (Pérez et al., 2018). Proses batch dihentikan ketika titik akhir, yang merupakan target besi komposisi target besi dalam matte, tercapai. Di dalam konverter operasi, matte tungku kilat (matte nikel dari *flash furnace*) diisi dan dihembuskan dengan udara ($-22.000 \text{ Nm}^3/\text{jam}$) melalui tuyeres. Setelah waktu hembusan tertentu, terak (terutama mengandung besi teroksidasi dan fluks silika) disingkirkan diikuti dengan penambahan matte tungku flash, setelah itu peniupan dilanjutkan (Coster et al., 2001). Material refraktori di sekitar tuyere mengalami tingkat serangan paling tinggi, karena penusukan dan suhu yang lebih tinggi yang terjadi di daerah ini selama proses Converting. Abrasi pada bahan tahan api dalam tungku pemurnian kurang menjadi perhatian, tetapi penggunaan fluks dasar menghasilkan slag yang sangat korosif yang dapat menyebabkan masalah khusus (Crites. M.D, et al. 2000). Terak fayalit yang bersifat asam terutama merusak komponen MgO dari batu bata tetapi tidak merusak kromit (Gregurek et al., 2021).

Converter matte yang dihasilkan melalui pemurnian converter memiliki kadar nikel minimal sebesar 75%. *Ladle* yang berisi converter matte dibawa dari converter menuju proses *granulasi* dengan menggunakan *hot metal crane*. Proses penampungan nickel matte ke dalam ladle dengan tujuan sebagai tempat penampungan sementara sebelum akhirnya dipindahkan. Penampungan fluida panas ini ditahan temperaturnya dengan lapisan pelindung seperti material refraktori dan *coating* supaya tidak berkontak dengan *shell*-nya.

Setiap satu kali proses pemanasan satu converter dapat menampung hasil *casting* sebanyak 7 *ladles* dengan masing-masing kapasitasnya sekitar 15,5 ton. Nikel matte dengan temperatur berkisar antara $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ditampung oleh *ladle* converter berbentuk tabung dengan spesifikasi wadahnya terbuat dari baja karbon dengan lapisan *brick*. Brick yang digunakan untuk ladles ada dua macam yaitu *castables* dan *brick alumina*. Biasanya *castables* terletak pada bagian dinding-dinding *ladles* sedangkan *brick alumina* berada pada bagian *bottom up*. Setiap bagian dari letak masing-masing *brick* ini memiliki keunggulan masing-masing tergantung pada kondisi yang ada.

Penuangan *matte* ke dalam *ladle converter* secara terus menerus dapat mengalami kegagalan tidak hanya secara termal tetapi juga fisik mekanis maupun kimia. Hal utama yang cukup sering terjadi pada *ladle* adalah adanya inputan panas yang sangat tinggi dan gesekan dari *matte* yang membuat *ladle* mengalami erosi permukaan. Kandungan senyawa kimia yang tidak optimal juga dapat menjadi pemicu awal terjadinya kegagalan seperti *build up* dan lainnya. Bagian material refraktori dalam *ladles* ini akan menjalani skema *total relining* dengan melakukan *chipping* di setiap bagian-bagiannya (Scacht. C. A. 2004).

Perlakuan *relining* ini dilakukan pada bagian converter dan *ladle* penampung matte sesuai dengan standar operasional prosedur masing-masing. Untuk converter, proses *relining*

dilakukan ketika panjang *tuyure* sudah mencapai target 80 *campaign* perlining-nya. Apabila pada *ladle* penampungan *matte* bergantung terhadap masa pakai-nya, umumnya *ladle* akan di perbaiki selama 3 bulan pengoperasian atau berdasarkan kondisi termal dan erosi yang diterima.

Hasil *chipping* pada *ladle* berupa limbah-limbah *bricks* yang tidak bisa dikembalikan di lingkungan. Hal tersebut dikarenakan limbah *bricks* merupakan jenis limbah B3 yang dinilai sangat *toxic* terhadap lingkungan dan perlu dikelola lebih lanjut. Oleh karena PT. X masih belum mendapatkan izin pengelolaan limbah *brick* sehingga masih dialihkan ke pihak ketiga yaitu PT Prasadha Pamunah Limbah Industri (PPLI). Pengelolaan limbah *brick* B3 menambah banyak pengeluaran perusahaan tiap tahunnya. Terkhususnya untuk bagian *ladle* dimana limbahnya secara akumulatif lebih tinggi dibandingkan limbah di bagian *converter* maupun *furnace*.

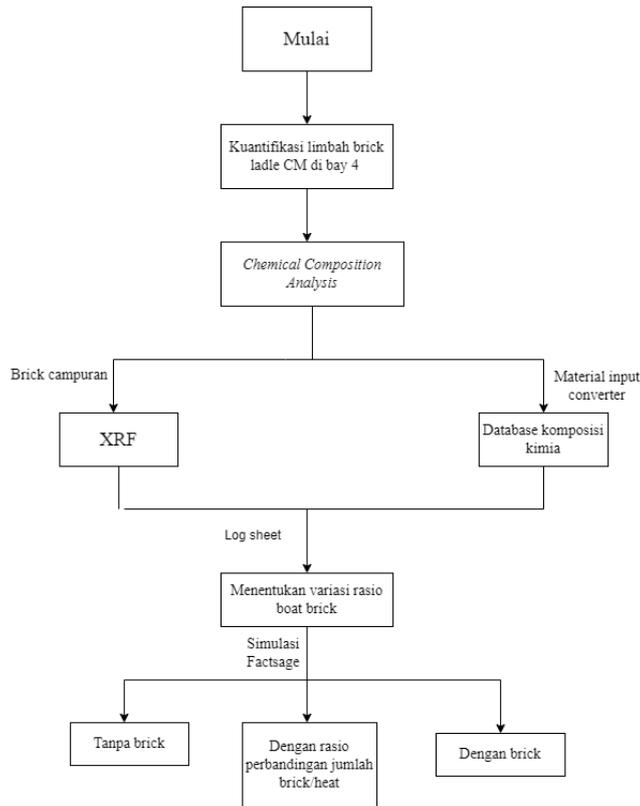
Mengetahui adanya potensi nikel yang cukup tinggi di dalam limbah *brick ladle* memicu kebijakan perusahaan dalam melakukan pemanfaatan limbah B3 *brick* untuk digunakan kembali. Hal ini disetujui karena mengikuti Peraturan Menteri LHK nomor 6 tahun 2021. Spesifiknya pada ayat 1 berbunyi “Penggunaan kembali (*reuse*) Limbah B3 (bahan berbahaya dan beracun) yang dihasilkan dari kegiatan sendiri dalam satu kesatuan sistem proses produksi secara tertutup (*closed system*)”.

Limbah *brick ladle converter matte* memiliki potensi yang cukup tinggi dalam menghasilkan *nikel matte* sisa yang tergabung secara homogen. Maka dari itu, limbah *brick ladle* akan menjadi suatu pertimbangan untuk dicampur oleh *ICP boat* dengan komposisi dan distribusi tertentu. *ICP boat* atau *scrap boat* merupakan material sisa yang dihasilkan selama proses pemurnian nikel *matte*. *ICP boat* terdiri dari *matte reject* dari proses granulasi, debu dari alat pengering *granule*, lumpur dari *evaporating chamber* dan *matte settling pond*. Kandungan Nikel yang terdapat didalam *ICP boat* lebih dari 2% sehingga digunakan sebagai salah satu umpan dalam proses pemurnian di *converter*. Manfaat dari pencampuran limbah *brick* dan *ICP boat* ini tentunya akan menaikkan kadar nikel dari nikel *matte* yang dihasilkan.

Hasil campuran nantinya menjadi umpan pada proses pemurnian *converter*. Namun, setiap material input yang masuk ke dalam suatu sistem akan mempengaruhi suatu hasil atau *output*. Hal tersebut memicu tantangan dan kekhawatiran yang menghambat produksi *nickel matte*. Kemungkinan besar yang perlu dilakukan yaitu dengan meninjau rasio antara limbah *brick* dengan *ICP Boat* yang baik dan benar menggunakan simulasi software *FactSage*. Berdasarkan pada penelitian sebelumnya apabila tidak didapatkan rasio percampuran limbah *brick* dan *ICP boat* yang tepat, maka akan dapat mengganggu proses yang ada pada *converter* sehingga akan berpengaruh terhadap kadar nikel yang dihasilkan. Oleh karena itu, melalui *project* ini, kami akan bereksperimen dan menganalisis “Optimalisasi Pengendalian Rasio *ICP Boat* dengan Limbah *Brick Ladle Converter Matte* ($Al_2O_3-SiO_2$) Menggunakan Metode Simulasi *FactSage*”.

METODE PENELITIAN

Diagram alir proyek digunakan untuk menyusun langkah atau tahapan yang akan dilakukan, yaitu dimulai dari kuantifikasi limbah *brick ladle converter matte* di Bay 4 hingga simulasi *Factsage*. Diagram alir proyek dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

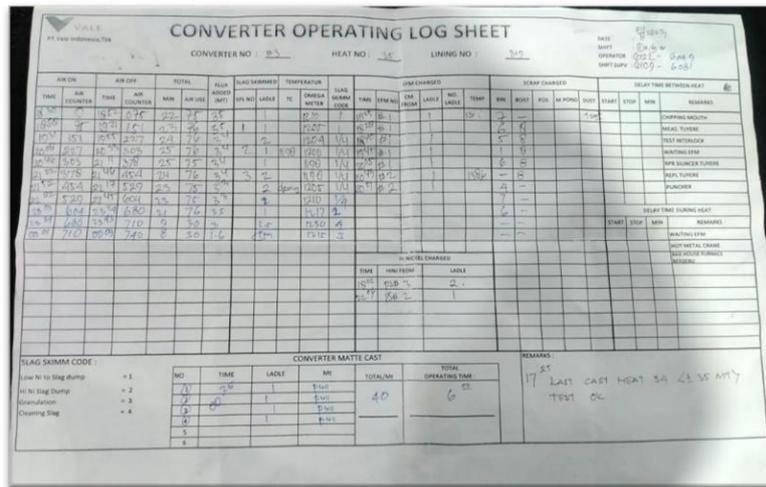
Banyaknya limbah *brick* yang digunakan dalam converter dapat dianalisis dan dihitung, dengan menggunakan data total penggantian (*repair*) *brick* pada *ladle* penampung yang telah dilakukan oleh PT. X selama tahun 2021. PT. X melakukan penggantian *brick* pada *ladle* penampung sebanyak 45 kali selama Januari hingga Desember 2021. Perhitungan *brick* per *heat* pada tahun 2021 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Perhitungan *Brick* Per *Heat* 2021

Parameter	Kuantitas
Jumlah <i>Brick</i> Dalam 1 <i>ladle</i> (kg)	14763
Akumulasi Limbah <i>Ladle Brick</i> 2021 (ton)	664,335
Jumlah <i>Heat</i>	1869
Jumlah <i>Brick</i> per <i>Heat</i> (ton/heat)	0,355

Menghitung mass balance dengan menggunakan Microsoft Excel

Pada setiap blow converter akan dilakukan proses *charging* atau *pemasukan material* antara lain *electric furnace matte* (EFM), HiNi, scrap atau ICP bin, scrap ICP boat, dan fluks silika. Setiap *charging* tersebut tercatat ke dalam converter *operating log sheet* dan dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Log Sheet heat No. 35 Tanggal 24 Agustus 2023 pada Converter 3

Untuk menghitung *mass balance* pada setiap blow, diperlukan log sheet untuk mengetahui material apa saja yang dimasukkan pada setiap blow converter. Assay dari EFM, HiNi, scrap boat, dan scrap bin dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 2. Chemical Composition EFM, HiNi, Scrap Bin, Scrap Boat, dan Dust

	SiO ₂	MgO	S	Ni	Fe	Co	FeO	Al ₂ O ₃
Bin	24,69	0,00	1,43	3,50	54,09	0,79	69,59	-
Boat	22,03	0,00	2,49	5,71	53,82	0,53	69,24	-
Hi Ni	27,68	0,20	0,38	5,07	50,16	2,15	64,53	-
EFM	-	-	7,85	22,96	68,49	0,69	-	-
Dust	47,52	0,79	6,76	25,17	18,76	0,72	-	0,25

Setelah diketahui *chemical composition* dari EFM, HiNi, Boat, bin, dust, flux, udara, kemudian melakukan perhitungan *mass balance* pada *blow* pertama hingga *blow* keempat setelah penambahan *brick* berdasarkan data pada *log sheet*. Rumus perhitungan total berat masing-masing *chemical composition* yang dimasukkan pada *mass balance*.

$$total\ berat\ (ton) = \frac{\% \text{ Assay} \times \text{jumlah ladle (ton)}}{100}$$

Penentuan Rasio Brick/Boat dengan Factsage

Dan dari data total berat (ton) masing-masing input material *blow* pertama akan dimasukkan ke dalam *factsage* dengan temperatur 1350°C sebagai *input* dan akan menghasilkan *output* berupa data fasa yang terbentuk antara lain *liquid matte*, *slag liquid*, FCC (Face Centered Cubic), dan fasa lainnya. Berikut ini adalah hasil *factsage blow* 1 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Factsage Blow 1

Jenis	Total (Ton)	Assay	%	Berat (ton)
Liquid matte	56,914	Ni	29,231	16,64
		Fe	60,952	34,69

Co	1,538	0,88
S	8,279	4,71

Perhitungan pada *blow* kedua sama dengan perhitungan *mass balance* pada *blow* pertama yaitu dengan memasukan *input* berupa *chemical composition* EFM, HiNi, *bin*, *boat*, *flux*, udara yang disesuaikan dengan data pada *log sheet*. Selain itu, dimasukan pula hasil penjumlahan *Liquid matte* dan FCC yang terbentuk dari hasil *factsage blow* pertama sebagai tambahan, berdasarkan dari hasil *factsage blow* pertama tidak terbentuk FCC.

Seperti pada *blow* pertama, untuk hasil dari perhitungan total berat (ton) masing-masing *input material* dari *blow* kedua akan dimasukan kedalam *factsage* dengan temperatur 1350°C sebagai *input* dan akan menghasilkan *output* berupa terbentuknya *liquid matte*, *slag liquid*, FCC dan fasa lainnya, namun dari hasil *factsage blow 2* tidak terbentuk FCC. Berikut ini adalah hasil *factsage blow 2* dapat dilihat pada Tabel 4

Tabel 4. Hasil *Factsage Blow 2*

Jenis	Total (ton)	Assay	%	Berat (ton)
<i>Liquid matte</i>	48,594	Ni	35,58	17,29
		Fe	53,385	25,94
		Co	1,9558	0,95
		S	9,0783	4,41

Perhitungan *mass balance* pada *blow* ketiga yaitu *input* dari *chemical composition* masing-masing material, disesuaikan dengan data *log sheet* pada *blow* ketiga, dan ditambahkan pula hasil penjumlahan *factsage liquid matte* dan FCC yang terbentuk pada *blow* kedua.

Total berat (ton) masing-masing material dari *blow* ketiga selanjutnya dimasukan kedalam *factsage* sebagai *input* dan *output*. Hasil *factsage blow 3* yaitu terbentuknya *slag liquid*, *liquid matte*, FCC, dan fasa lainnya. Namun dari hasil *factsage blow 3* tidak terbentuk FCC. Berikut ini adalah hasil *factsage blow 3* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil *Factsage Blow 3*

Jenis	Total(Ton)	Assay	%	Berat (ton)
<i>Liquid matte</i>	61,066	Ni	37,17	22,70
		Fe	51,498	31,45
		Co	1,8993	1,16
		S	9,433	5,76

Pada *blow 4* *input material* yang dimasukkan ke dalam *factsage* yaitu sama seperti *blow* sebelumnya, namun pada *input* EFM ditambahkan dengan hasil dari produk *blow* ketiga dan dengan temperatur 1350°C. Dan pada *factsage blow 4* menghasilkan produk berupa *liquid matte* dan *slag liquid*. Berikut ini adalah hasil *factsage blow 4* dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil *Factsage Blow 4*

	Total(Ton)	Assay	%	Berat (ton)
<i>liquid matte</i>	73,578	Ni	37,96	27,932
		Fe	50,75	37,340
		S	9,74	7,170
		Co	1,81	1,334
Slag	22,211	Al ₂ O ₃	0,04356	0,01
		SiO ₂	23,52	5,22
		FeO	70,10	15,57
		Fe ₂ O ₃	1,96	0,44
		CoO	0,08626	0,02
		NiO	0,0969	0,02
		Al ₂ S ₃	0,00215	0,00
		SiS ₂	1,2117	0,27
		FeS	2,8791	0,64
		Fe ₂ S ₃	0,0856	0,02
		CoS	0,00351	0,00
		NiS	0,00395	0,00

Dari hasil *factsage* pada *blow 4* menghasilkan *slag liquid* berserta persentase *assay* dari tiap *chemical composition*, dan dihitung massa tiap *chemical composition* tersebut. Hasil *slag liquid* selanjutnya akan digunakan sebagai *input factsage* untuk mengetahui *slag liquid* yang terbentuk dengan menggunakan temperatur 1200°C. Berikut ini adalah hasil *factsage slag liquid blow 4* dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil *Factsage Slag Liquid Blow 4*

	Total (Ton)	Assay	%	Berat (ton)
Slag	22,19	Al ₂ O ₃	4,50E-02	0,01
		SiO ₂	23,524	5,22
		FeO	69,878	15,51
		Fe ₂ O ₃	2,2259	0,49
		CoO	8,28E-02	1,84E-02
		NiO	5,67E-02	1,26E-02
		Al ₂ S ₃	2,23E-03	4,94E-04
		SiS ₂	1,212	0,268943
		FeS	2,8702	0,636897
		Fe ₂ S ₃	9,73E-02	2,16E-02
		CoS	3,38E-03	7,49E-04
		NiS	2,31E-03	5,13E-04

Penambahan *brick* sebagai *input* akan dimasukkan dalam *blow* 4, data assay *brick* didapatkan dari XRF, dan dihitung berat tiap *chemical composition*. Input yang dimasukkan ke dalam *factsage* yaitu sama seperti *blow* 4 antara lain penjumlahan dari EFM dan hasil *factsage* pada *blow* 3, *bin*, *boat*, *flux*, udara. Namun dengan temperatur yang berbeda yaitu 1200°C. Adapun penambahan *brick* ini berlandaskan pada rasio perhitungan ton/heat. Assay komponen limbah *brick* (*castable+brick alumina*) dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Assay Komponen Limbah Brick (*Castable+Brick Alumina*)

Ni	Fe	Co	S	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃
9,864	4,64	0,422	1,22	17,79	1,00	28,266	6,634	2,139	20,25	8,79

Selanjutnya untuk menentukan *ratio* yang optimal antara *brick* dengan *ICP boat* yang akan dimasukkan pada *blow* 4 menggunakan input produk sisa *blow* 3, *boat* dan *brick*. Diasumsikan bahwa *boat* dan *brick* jika dijumlahkan akan menghasilkan fraksi 100%. Untuk memudahkan, *brick* diasumsikan sebagai variabel A. Berikut ini adalah rumus perhitungan masing-masing input mass di *FactSage*.

$$\text{Boat} + \text{Brick} = 100\% \text{ atau } \text{Boat} + \text{Brick} = 1$$

$$\text{Jika } \underline{\text{Brick}} = \underline{\text{A}}, \text{ maka } \text{Boat} + \text{A} = 1 \text{ atau } \underline{\text{Boat}} = \underline{1-\text{A}}$$

$$\text{Brick} = \underline{\text{Persentase (\%)}} \times \underline{\text{A}} \times \underline{\text{Jumlah Boat}}$$

$$\text{Boat} = \underline{\text{Persentase (\%)}} \times \underline{(1-\text{A})} \times \underline{\text{Jumlah Boat}}$$

Melalui rumus di atas, masing-masing dari kandungan di input nilai persentase dari setiap total *boat* yang masuk sehingga didapatkan massa tertentu. Massa ini kemudian akan di input ke dalam simulasi *software FactSage*. Berbeda dengan *blow* sebelumnya, input penambahan rasio *brick* dengan acuan *FactSage* hanya melibatkan *assay* sisa *blow* ketiga, *assay* udara, *assay ICP Boat*, *assay brick*, dan *assay fluks*. Detail input *blow* keempat sesudah penambahan *brick* dengan rasio pada temperature 1200°C. Selanjutnya akan didapatkan produk yang terbentuk yaitu liquid matte, liquid slag, FCC, olivine, spinel, dan monoxide dalam setiap 1% nilai A (0 1 0,01). Setiap fasa yang terbentuk akan dicatat massanya dan dibandingkan datanya terhadap naik atau turunnya kadar Ni, SiO₂, serta FeO. Hasil *factsage* rasio 0 hingga 0,1 setiap 0,01 dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil *FactSage Rasio* 0 hingga 0,1 setiap 0,01

Nilai A	slag (gram)	liquid (gram)	liquid (gram)	matte	FCC (gram)	Olivine (gram)	Spinel (gram)
0	23,489		30,736		29,785	0	0
0,05	23,441		30,68		29,864	0	0
0,1	23,389		30,628		29,941	0	0
0,12	23,541		30,675		29,869	0	9,21E-03
0,19	23,2		30,684		29,906	0,100	0,111
0,2	22,998		30,703		29,902	0,269	0,128

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Rasio Perhitungan

Analisa rasio perhitungan bergantung erat dengan *blow 1*, *blow 2*, *blow 3*, dan *blow 4*. Penginputan material input berupa *HiNi*, *Boat*, *Brick*, *Bin*, *EFM* berlangsung di temperatur 1350⁰C. Hal ini berdasarkan asumsi ketika material input masuk akan berkontak dengan *tuyure* ataupun *matte*. Dan mencegah adanya pembentukan FCC di setiap blownya. Pengolahan di blow kesatu hingga keempat menggunakan simulasi *software*, dimana persentase kumulatif nikel selalu naik di setiap blownya. Dalam analisis penentuan rasio limbah Brick/ICP Boat pada blow keempat, menggunakan dua pendekatan yaitu excel dan simulasi software FactSage.

Analisis menggunakan perhitungan excel tidak hanya melalui data perhitungan hasil blow 4 (sebelum penambahan brick), tetapi juga mengacu pada rasio estimasi perhitungan jumlah limbah ladle yang di *repair* pertahun dibagi dengan data heat. Data heat tahun 2021 digunakan sebagai acuan karena limbah yang terkumpul sangat banyak, bahkan lebih banyak daripada limbah brick di *furnace* maupun *converter*. Maka dalam hal ini, setidaknya terdapat 355 kg/heat atau 0,355 ton/heat (rasio banding ICP boat sama dengan ~4,6%). Berdasarkan simulasi *FactSage*, diambil perpindahan detail rasio 1% untuk mendapatkan detail fasa yang terbentuk sehingga dalam hal ini adalah 12-19%.

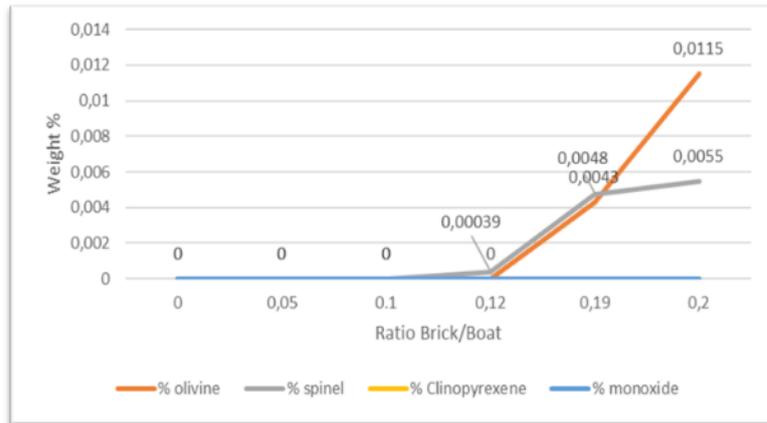
Pembentukan Fasa Setiap Rasio

Penambahan limbah brick yang dicampur oleh ICP *Boat* dapat mempengaruhi hasil akhir. Hal tersebut dikarenakan brick mengandung sebagian besar Al₂O₃ dan SiO₂. Assay campuran (*castable+brick alumina*) di prioritaskan dalam pengolahan karena, kandungan nikel yang mengalami *build up* maupun terpenetrasi sangat tinggi yakni 9,865%. Terdapat juga sebagian besar limbah MgO dan Cr₂O₃ karena saat *ladle converter matte* belum di-*reline*, ditambahkan limbah *brick converter* (campuran magnesia+chromite) sebagai eksperimen penelitian sebelumnya.

Pembentukan fasa menjadi suatu hal yang perlu diperhatikan oleh karena sifatnya yang dapat menghambat proses dan kerugian. Fasa-fasa penghambat yang kemungkinan terbentuk dalam proses antara lain olivine, spinel, clinopyroxene, dan monoxide. Selain dari olivine, fasa-fasa ini memiliki densitas yang lebih tinggi daripada slag tetapi lebih rendah daripada matte sehingga letaknya cenderung berada di pertengahan. Sebagian besar zat ini akan mengalami *build up*, terutama di bagian *hole*. Akibatnya proses *skimming* terhambat oleh karena lubang pengeluarannya tersumbat (L.A. Diaz. 2007). Grafik perbandingan fasa terhadap rasio brick/boat dapat dilihat pada Tabel 10 dan Gambar 3

Tabel 10. Perbandingan Fasa Terhadap Rasio Brick/Boat

	0	0,05	0,1	0,12	0,19	0,2
% olivine	0	0	0	0	0,0043	0,0115
% spinel	0	0	0	0,00039	0,0048	0,0055
% Clinopyroxene	0	0	0	0	0	0
% monoxide	0	0	0	0	0	0

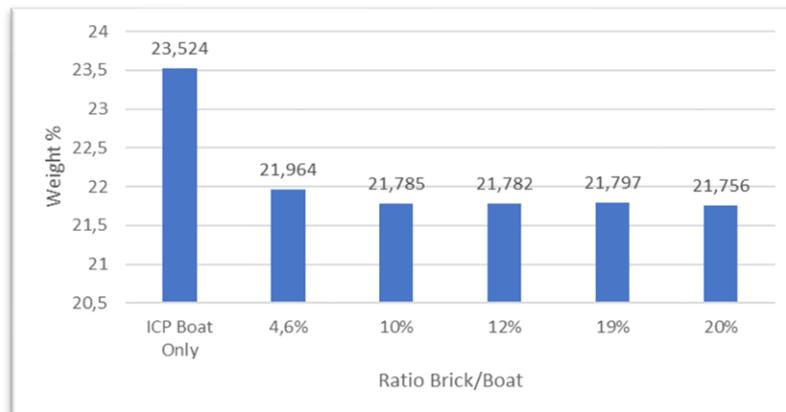


Gambar 3. Grafik Perbandingan Fasa Terhadap Rasio Brick/Boat

Terhitung dari rasio 12% sudah mulai terbentuk spinel sebanyak 0,00039 sedangkan olivine belum terbentuk. Namun di 19% sudah mulai terbentuk olivine sebanyak 0,0043 dari total fraksi (Slag + Fasa). Kemudian olivine terus meningkat lebih drastis daripada spinel di rasio 20%. Untuk clinopyroxene dan monoxide justru belum terbentuk sama sekali, bahkan ketika ditarik hingga rasio 100% pun masih belum terbentuk sama sekali. Oleh karena itu, limbah brick yang dicampur dengan ICP Boat diperkirakan optimal hingga mencapai kisaran 12%.

Kandungan Silika Terhadap Slag

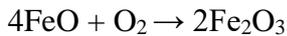
Kualitas slag menjadi salah satu hal yang perlu diperhatikan guna mencegah slag *foaming*. Salah satu komponen dalam slag yang sangat perlu diperhatikan yaitu silika (SiO_2). Berdasarkan grafik gambar 4. menunjukkan bahwa, seiring ditambahkannya limbah *brick* maka berat *slag liquid* yang dihasilkan semakin menurun. Grafik kandungan SiO_2 terhadap slag dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Kandungan SiO_2 Terhadap Slag

Menurut acuan perusahaan, di setiap standar perusahaan setidaknya komposisi SiO_2 di dalam slag berada di rentang 24-26%. Hal ini tidak menurun jauh dengan data yang dihasilkan. Pada pengolahan data menunjukkan bahwa SiO_2 berada di rentang 21,756-23,524%. Kisaran kadar tersebut bisa dikatakan masih dalam batas normal. Apabila kadar SiO_2 berlebihan maka dapat menyebabkan *foaming* pada slag. Sedangkan SiO_2 yang terlalu sedikit (<20%) juga tidak baik, karena meminimalisir reaksi pembentukan *fayalite*

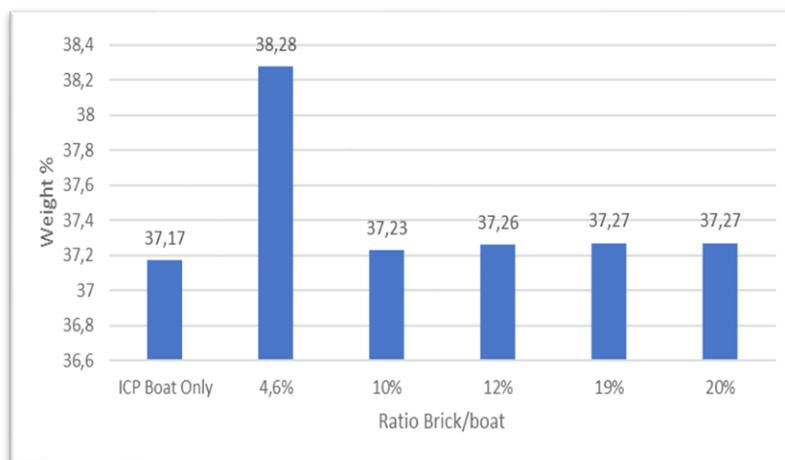
($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$). Hal tersebut berdampak pada kenaikan kadar Fe_3O_4 dikarenakan sebagian FeO yang tidak terikat akan bereaksi dengan oksigen (O_2).



Reaksi pada tersebut tidak diinginkan karena membuat slag menjadi lebih kental atau viskositasnya naik. *Magnetite* dikenal juga sebagai spinel. Magnetit memiliki densitas sebesar $5,17 \text{ g/cm}^3$, sehingga berada di pertengahan antara slag dengan matte. Maka daerah dengan viskositas di bagian pertengahan tersebut membuat pembebasan gas terhalangi. Jika terakumulasi secara terus menerus dapat menciptakan *pressure* yang tinggi di dalam converter.

Kandungan Nikel Terhadap Converter Matte

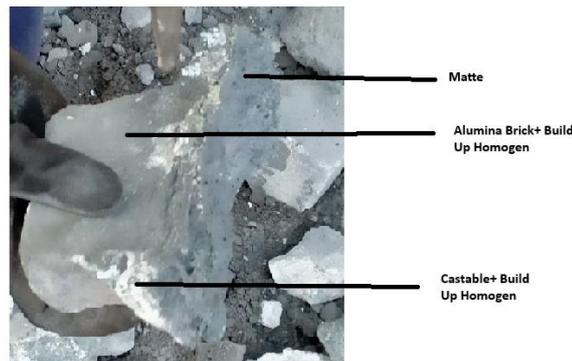
Kualitas produksi *matte* menjadi tujuan utama PT. melalui analisis rasio brick/boat, perhitungan kuantifikasi menggunakan microsoft excel (355 ton/heat atau 4,6%) memiliki kandungan nikel tertinggi. Nikel dengan kandungan paling rendah di *matte*, yaitu tanpa penambahan brick atau *ICP Boat Only*. Pada gambar 4 menunjukkan transisi dari 4,6% menuju 10-20% mengalami penurunan komposisi. Grafik ini tetap cenderung menunjukkan tren positif. Hal ini menandakan bahwa penambahan *brick* sebagai material input meningkatkan kadar nikel di dalam *matte*. Dengan demikian, tidak semua kandungan nikel dalam limbah *brick* terkonversi menjadi nikel di *matte*. Sebagian kecilnya menjadi NiO di dalam *liquid slag* ataupun kandungan nikelnya terpenetrasi di *brick* converter. Grafik kandungan Ni terhadap *matte* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Kandungan Ni Terhadap *Matte*

Analisis Faktor Kerusakan *Ladle* ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$)

Secara umum, alasan kerusakan *ladle brick* dapat disebabkan dua hal, yaitu erosi dan termal. Kerusakan akibat erosi terjadi karena penuangan converter *matte* terus-menerus menggerus permukaan dinding castable dan bagian *chute*. Sedangkan kondisi termal karena kenaikan temperatur dari *converter matte* yang sangat cepat dan tinggi. Akan tetapi dalam project penelitian ini, bagian yang sangat diperhatikan di *ladle* adalah *build-up matte*-nya.



Gambar 6. Limbah *Brick* dan Bagian-Bagian di Dalamnya

Pada Gambar 6. di atas adalah gambaran batu yang telah mengalami *build up* dimana daerah bercak hitam menandakan sifat homogen antara *matte* dengan limbah *brick*. Terbentuknya *build up* di bagian *ladle* disebabkan oleh variabel yang sulit untuk dikontrol yaitu titik perbedaan temperatur dan tekanan. Setiap fluida (*converter matte*) yang berkontak langsung dengan *brick* berlangsung di titik varian yang tidak sama. Daerah di bagian pertengahan, biasanya memiliki temperatur yang paling panas dibandingkan dengan bagian ujung dinding. Hal ini karena daerah bagian dinding atau permukaan *brick* secara tidak langsung mengalami kontak dengan sisi yang lebih dingin. Perbedaan temperatur ini menghasilkan *build-up* yang menempel baik pada *brick* jenis *castable* maupun alumina. Selain itu, daerah yang terlalu panas juga menjadi suatu masalah terutama di bagian *bottom*. Bagian *bottom* tidak hanya memiliki temperatur yang tinggi, tetapi juga tekanan totalnya masif yaitu 212,8 KPa. *Brick* yang lama kelamaan terkena panas dan tekanan tinggi akan mengelupas dan partikelnya mengapung di atas *converter matte*.

Evaluasi Keuntungan Operasional

Material refraktori yang digunakan oleh ladle penampung *converter matte* adalah *brick* alumina silika dengan *castable*. Pada *furnace* menggunakan material refraktori berupa *brick* magnesia alumina dan pada *converter* menggunakan material refraktori *brick* magnesia chromite. Saat dilakukannya proses *reline*, terdapat banyak nikel yang *build-up* sekaligus juga batu-batu *brick* yang telah terkikis. Hasil ini lalu dilakukan *chipping* dan diletakkan pada tempat pembuangan sementara, contohnya daerah Bay 4. Limbah hasil *chipping* bersifat B3 sehingga berpotensi sangat berbahaya ketika bereaksi dengan lingkungan. Sehingga harus mengeluarkan biaya operasional tambahan dalam hal mengelola limbah dengan bantuan PT. Prasadha Pamunah Limbah Indonesia (PPLI). Biaya yang dikeluarkan oleh PT. X untuk mengirimkan limbah *brick* ke PPLI sangat besar terutama untuk ladle *converter matte* yang jumlahnya sangat melimpah jika dibandingkan dengan *furnace* maupun *converter*. Biaya operasional pengolahan limbah tahunan dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Biaya Operasional Pengolahan Limbah Tahunan

Furnace (Rp)	Converter (Rp)	Ladle CM (Rp)
1.062.112.093,00	4.230.785.787,00	19.639.219.080,00

KESIMPULAN

Simulasi *FactSage* merekomendasikan improvement rasio campuran limbah *brick* dengan ICP *Boat* sekitar 4,6-12% di temperatur 1200°C guna mencegah pembentukan spinel dan olivine. Melalui total limbah/ heat tiap tahunnya (355 kg/heat), perusahaan dapat mengurangi pengeluaran dalam pengelolaan limbah brick sebesar 19,6 milyar rupiah. Untuk melakukan trial atau perobaan langsung dilapangan sebaiknya, trial rekomendasi limbah *brick* 355 kg, dilakukan sesuai dengan *Log Sheet* blow ke-2, ke-4, dan ke-6. *Crushing* dengan bukaan 1 inch dan ½ inch pada limbah brick untuk mengamati perbedaan pengaruh luas permukaan. Agar didapatkan hasil yang representatif pada converter, perlu melakukan trial di rasio 11% (880 Kg Limbah Brick).

DAFTAR PUSTAKA

- Coster, A., Kam, K. M., & van Deventer, J. S. J. (2001). *Modelling of the Dynamics of an Industrial Nickel Converter*. IFAC Proceedings Volumes, 34(18), 285-290.
- Crites, M.D, et al. 2000. *Interaction of Chrome-free Refractories with Copper Smelting and Converting Slags*. Canadian metallurgical quarterly, vol (39) no.2: 129-134
- Gregurek, D., Schmidl, J., & Spanring, A. (2021). *Refractory Challenges in Nickel and Cobalt Processing Furnaces*. In Ni-Co 2021: The 5th International Symposium on Nickel and Cobalt (pp. 251-258). Springer International Publishing.
- L.A. Diaz. (2007). *Effect of spinel content on slag attack resistance of high alumina refractory castables*. Journal of the ceramic Society (4623-4631)
- Pérez, I., Moreno-Ventas, I., & Ríos, G. (2018). *Thermochemical calculations supported the post-mortem study of magnesia-chromite refractory used in Peirce-Smith Converter for copper-making process*. Ceramics International, 44(12), 13476-13486.
- Scacht, C. A. (2004). *Refractories Handbook*. Marcell Dekker Inc: Pennsylvania. USA