

PENGARUH PENAMBAHAN SILIKA FLUX PADA PROSES CONVERTING PADA TEMBAGA MATTE MENJADI BLISTER

Sahl Balbeid dan Sungging Pintowantoro
 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh
 Nopember (ITS)
 Kampus ITS, Keputih, Surabaya 60111
 E-mail: sungging@mat-eng.its.ac.id

Abstrak

Pada optimalisasi matte hasil *smelting* reaktor *mini blast furnace* maka diperlukan proses *converting*. Proses *converting* ini sendiri menggunakan gas oksigen dan silika *flux* untuk reduktor yang dapat menghilangkan slag atau pengotor pada *matte* tembaga hasil proses *smelting*. Silika *flux* digunakan sebagai flux karena jumlahnya yang banyak di alam dan mudah bereaksi dengan besi, disini tujuannya untuk menghilangkan kandungan Fe dalam *matte* hasil *smelting*. Adapun langkah-langkah penelitian yang dibuat dengan preparasi awal dari *matte* tembaga dan silika *flux*, lalu melakukan karakterisasi dengan menggunakan XRD dan XRF selanjutnya mencari persen massa dari Fe yang terkandung dalam sehingga dapat mengetahui berat optimal untuk silika *flux* yang dibutuhkan. Lalu membuat fraksi perbandingan untuk silika flux:Fe yaitu 0 ; 0.3 ; 0.5 ; 0.9 dan selanjutnya melakukan percobaan dengan menaburkan silika *flux* dipermukaan *matte* cair dan akan terbentuk *slag* dipermukaan. Dan selanjutnya melakukan uji XRD dan XRF pada blister tembaga dan *slag*. Hasil yang didapatkan pada blister maupun slag adalah grafik peningkatan kadar tembaga sejalan dengan penambahan flux silika yang dimasukkan pada hasil *converting*. Tujuan penelitian ini adalah pengaruh silika flux pada proses *converting*.

Kata Kunci: *Converting*, Silika *flux*, Matte tembaga, Blister tembaga

I. PENDAHULUAN

Indonesia adalah Negara dengan deposit mineral logam yang banyak, dan logam tembaga adalah salah satu logam yang aplikasinya didunia sangat banyak. Banyak produksi mineral tembaga di Indonesia Menurut data USGS (*United State Geological Survey*) pada *mineral year book* 2011, Indonesia menghasilkan produk tembaga (tanpa proses *smelting*) sebesar 542.700 metrik ton [5]. Tetapi, hal tersebut tidak diimbangi dengan hasil produksi tembaga hasil proses *smelting*, Indonesia hanya mampu memproduksi produk

smelting, tembaga sebesar 276.200 metrik ton [5]. Serta peraturan pemerintah melalui Undang-undang Minerba No.4 Tahun 2009 yang telah direalisasikan pada tahun 2014 tentang tidak diperbolehkannya bahan mentah mineral yang diekspor keluar Indonesia. Maka dari itu akan banyak pengolahan *smelting* yang berdiri di Indonesia, hasil dari proses *smelting* ini sendiri masih kurang optimal dilihat dari kadar hasil *smelting*. Maka dari itu produk hasil *smelting* harus melalui proses *converting* untuk menaikkan kadarnya hingga >95% sehingga nilai jual akan meningkat.

Dalam pengoptimalan proses *converting* maka harus adanya pengkajian tentang proses *converting* lebih lanjut, dalam penelitian ini menggunakan penambahan silika flux sebagai reduktor pengikat besi (Fe). Disini besi adalah pengotor utama dalam tembaga matte hasil *smelting* [2] maka dari itu dipilih silika flux sebagai reduktor.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Untuk melakukan penelitian ini ada beberapa alat dan bahan yang dibutuhkan antara lain logam tembaga kadar rendah dan matte. Sebelum itu logam dan matte dilakukan pengujian XRF dan XRD untuk mengetahui senyawa dan unsur yang terkandung pada bahan baku. Logam dan matte ini adalah hasil dari mini blast furnace dengan matte kadar tembaga 41% dan logam kadar 73.53%. Dalam penelitian ini perbandingan logam dan matte awal adalah 517 gr logam dan 483gr matte sehingga berat total bahan yang dimasukkan adalah 1 Kg. Serta alat yang digunakan adalah muffle furnace dengan design silinder dan menggunakan crucible grafit berukuran A3 sebagai wadah dari bahan matte. Untuk pemanas digunakan gas LPG dan udara melalui blower, untuk mengatur temperatur dilakukan melalui valve dari blower atau dari gas LPG. Temperatur operasi untuk proses *converting* ini adalah 1300°C, selain reduktor yang digunakan adalah silika flux di proses *converting* ini juga ditambahkan udara bebas untuk proses oksidasi dari sulfur yang juga sebagai pengotor pada matte hasil *smelting*.

Silika flux yang ditambahkan pada penelitian ini dijadikan variabel, sesuai dengan literatur yang ada silika flux yang ditambahkan agar perbandingan silika dan besi yang terkandung adalah 0.5 [2]. Maka variable yang digunakan adalah jumlah perbandingan silika dan besi yaitu 0 ; 0.3 ; 0.5 dan 0.9. berat [4]. Dengan adanya penambahan oksigen dari udara dan silika maka rekasi kimia pada proses ini adalah:



Slag yang terbentuk nantinya adalah ikatan Fe dan Si seperti fayalite (Fe_2O_4) dan juga Fe yang berikatan dengan O seperti magnetite (Fe_3O_4) [7].

Diakhir proses ini akan dilakukan proses tapping akhir blister produk converting serta tapping slag. Setelah itu melakukan sampling dari blister dan slag, untuk blister tembaga cara sampling dengan cara pemotongan dan untuk slag hanya perlu dilakukan penumbukan. Pengujian karakterisasi yang dilakukan untuk blister dan matte adalah pengujian XRF dan XRD [4], dan setelah itu akan terlihat perbandingan antara hasil dari masing-masing variabel dan dapat dianalisa dari kadar Cu yang terbentuk dan kadar pengotor Fe dan S yang masih ada, seperti dalam rancangan penelitian berikut:

III. HASIL DAN ANALISA DATA

A. Hasil Pengujian XRD dan XRF Bahan Awal

Logam, matte dan silika flux disini dilakukan pengujian awal untuk mengetahui kadar Cu, Fe, S dan Si pada logam dan matte, sedangkan silika flux dilakukan pengujian XRF untuk mengetahui kadar silika. Dengan diketahuinya kadar Si dan Fe pada bahan awal maka kita dapat menghitung kebutuhan dari silika yang dibutuhkan

Dari hasil XRD logam dan *matte* tembaga di gambar 1 dan 2 dapat terlihat bahwa dari logam sendiri memiliki intensitas fasa tembaga yang tinggi tetapi masih terdapat peak fasa Fe (Besi) yang terlihat. Proses *converting* yang dilakukan gunanya untuk menghilangkan pengotor Fe yang ada.

Sementara untuk hasil XRD awal dari *matte* tembaga terlihat bahwa intensitas yang tinggi adalah fasa tembaga besi (Cu_2FeS_2), fasa tembaga sulfide (CuS) dan fasa besi sulfide (FeS). Proses *converting* yang gunanya untuk menghilangkan Fe dan S yang ada didalam matte, dan untuk menghilangkannya diperlukan udara oksigen dan silika untuk mengikat pengotor. Sehingga pengotor nanti akan mengapung saat proses membentuk slag dan gas keluar SO_2 . Disini juga terdapat pengujian awal yang dilakukan dengan pengujian XRF, yang dilakukan uji XRF antara lain tembaga matte, logam tembaga serta silika yang berfungsi untuk flux.

Tabel 1. Komposisi Cu, Fe, S dan Si pada matte dan logam awal

Jenis	Cu (%)	Fe(%)	S(%)	Si(%)
<i>Matte</i>	41.01	10.93	9.89	1.87
Logam	73.65	12.37	5.16	5.51
Silika	-	-	-	84

Hasil pengujian XRF diatas terlihat pada matte awal adalah kadar tembaga yang tidak terlalu tinggi dengan pengotor yang masih tinggi yaitu berupa besi, sulfur dan silika. Untuk mengurangi kadar dari sulfur menggunakan hembusan udara dan untuk mengurangi kadar besi menggunakan hembusan udara serta silika flux. Dan yang kedua adalah hasil pengujian XRF awal dari logam tembaga, dalam logam tembaga awal masih banyak terdapat pengotor walaupun mempunyai kadar dari tembaga yang cukup tinggi yaitu 73.65%. Tetapi dilihat dari segi pengotor besi, sulfur dan silika masih tinggi, maka dari itu diperlukan proses *converting* untuk lebih memurnikannya.

Logam dan matte ini sendiri masih memiliki banyak pengotor dikarenakan logam dan matte ini sendiri adalah hasil dari blast furnace yang menghasilkan banyak pengotor dan membutuhkan pemurnian lebih lanjut seperti *converting* serta *refining*. Besi yang berada dalam logam ataupun matte awal berasal dari ore tembaga yang diolah itu sendiri, setiap ore tembaga pasti mempunyai kandungan Fe tetapi dengan kadar yang berbeda-beda. Maka dari itu dibutuhkan adanya pengikatan Fe pada proses *converting*, yaitu menggunakan hembusan udara dan juga silika flux.

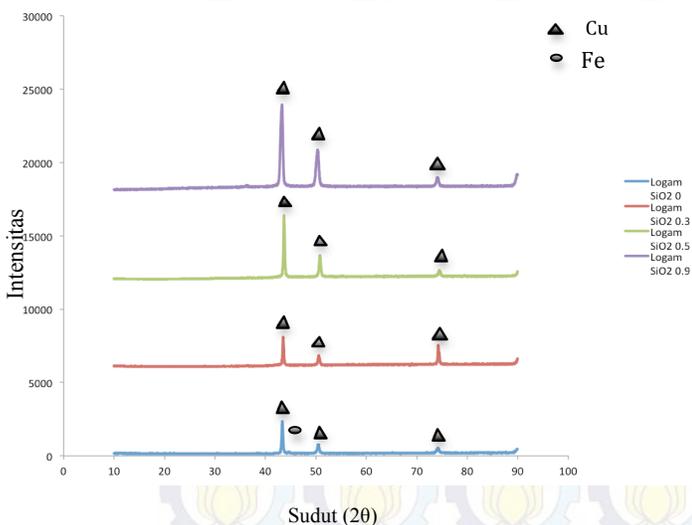
Dalam proses blast furnace dapat memperoleh hasil yaitu matte dan juga logam apabila bahan baku ore yang dimasukkan mempunyai kadar tembaga yang cukup tinggi, tetapi hasil dari blast furnace rata-rata masih mempunyai kadar S dan Fe yang tinggi pada logam hasil blast furnace. Maka dari itu untuk menghilangkannya dibutuhkan proses selanjutnya untuk mengikat pengotor dan menjadikan kadar Cu semakin tinggi.

B. Pengaruh Penambahan Silika Pada Tembaga Blister

Silika yang dimasukkan dalam penelitian ini mempunyai beberapa variasi berat, sesuai dengan yang didapatkan di literatur bahwa kadar dari silika yang terkandung dalam slag dibandingkan dengan kadar besi dalam slag mempunyai perbandingan 0.5. Dari inilah kita dapat memperkirakan variable berat silika yang kita pakai dalam penelitian ini, perbandingan yang diuji coba dalam penelitian ini dimulai dari 0, 0.3, 0.5 dan 0.9. Dari perbandingan tersebut dapat diketahui berat dari masing-masing yang harus ditambahkan dalam tiap penelitian. Untuk melihat komposisi yang tepat maka

dilakukanlah beberapa pengujian pada blister tembaga hasil converting, pengujian yang dilakukan adalah XRD dan XRF.

Dalam alat seperti PS converter silika ini juga ditambahkan untuk mengikat slag yang ada [2], tetapi dengan cara yang berbeda yaitu dengan menggunakan injeksi udara untuk menaburkan dan meratakan silika flux ini sendiri. Tetapi disini dengan menggunakan alat muffle furnace dapat melakukan percobaan ini tidak perlu membeli alat converter. Dapat dilihat bahwa hasil dari XRD ini sendiri adalah menandakan tiga peak dari tembaga, tetapi dengan intensitas yang berbeda. Intensitas yang berbeda ini menandakan adanya perbedaan pada jumlah fasa Cu yang terbentuk dari 4 sampel blister tembaga. Dapat dibandingkan dengan logam awal yang masih teridentifikasi besi yang terkandung pada hasil proses converting ini peak yang terlihat hanya Cu tidak ada yang lain, dengan demikian bisa dikatakan bahwa dari hasil XRD ini tidak terlihat fasa pengotor yang ada, hanya fasa Cu saja yang ada pada tembaga blister hasil proses converting. Hasil dari pengujian XRD berupa intensitas dan sudut dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 1. Hasil XRD Tembaga Blister Perbandingan 0 ; 0.3 ; 0.5; 0.9

Pengujian XRD ini menggunakan sinar X yang mempunyai range sudut $10^{\circ} - 90^{\circ}$ dan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar 1.54056 \AA . Difraktogram hasil dari pengujian XRD diatas terlihat bahwa dari keempat blister yang diujikan terdapat tembaga pada peak yang sama, tetapi ketinggian intensitas fasa yang berbeda antara satu sama lain. Peak tembaga berada pada sudut 43.5° , 50.6° dan 74.2° sesuai dengan PCPDFWIN No. 04-0836. Dengan adanya perbedaan ketinggian intensitas fasa Cu setiap blister tembaga dapat dilihat bahwa jumlah fasa tembaga yang terbentuk semakin meningkat. Ini dikarenakan adanya penambahan silika flux yang dapat mengikat Fe yang menjadi pengotor utama dalam proses converting tembaga pada umumnya, maka dari itu intensitas fasa tembaga semakin meningkat dengan adanya penambahan silika flux.

Dibandingkan dengan pengujian awal logam tembaga dan matte tembaga pada gambar 1 dan 3 maka terjadi peningkatan jumlah fasa Cu dan penurunan dari fasa pengotor yaitu Fe maupun S.

Tabel 2. Komposisi Cu dan Fe Tembaga Blister Perbandingan $\text{SiO}_2:\text{Fe}$ 0 ; 0.3 ; 0.5 ; 0.9

	Cu (%)	Fe(%)
$\text{SiO}_2:\text{Fe}$ 0	81.51	8.06
$\text{SiO}_2:\text{Fe}$ 0.3	95.82	0.046
$\text{SiO}_2:\text{Fe}$ 0.5	96.63	0.042
$\text{SiO}_2:\text{Fe}$ 0.9	96.88	0.030

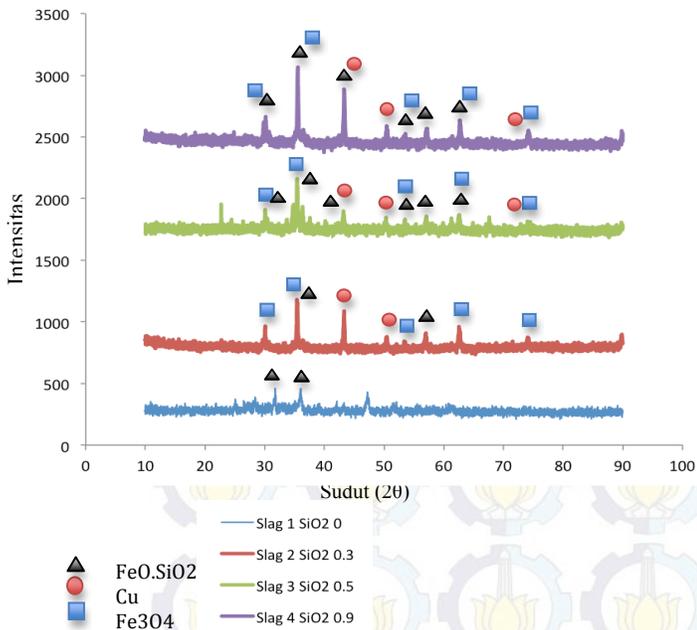
Dari hasil pengujian XRF diatas dapat dilihat bahwa terjadi tren peningkatan dari jumlah tembaga yang terkandung dan terjadi penurunan dari jumlah kadar pengotor terutama Fe. Ini dikarenakan oleh sifat silika yang sangat reaktif terhadap Fe maka Fe banyak terikat oleh silika. Peningkatan pada perbandingan 0.3 sangat signifikan dibandingkan dengan yang lainnya, antara tanpa adanya silika flux dengan perbandingan 0.3 naik 14.31% kadar tembaganya. Serta dari kadar besi pun dapat dilihat adanya penurunan yang signifikan antara tanpa penambahan silika dan perbandingan 0.3. Sementara untuk penambahan silika selanjutnya tidak terlihat signifikan karena untuk perbandingan ideal dari silika dan besi sendiri adalah 0.5. dengan penambahan silika 0.5 perbandingan dengan penambahan silika 0.3 adalah 0.81% dan antara perbandingan 0.5 dan 0.9 memiliki peningkatan kadar sebesar 0.25%. peningkatan kadar tembaga (Cu) ini dikarenakan pengotor yang kadarnya telah turun, terlihat di hasil pengujian XRF tabel 2 kadar Fe yang ada semakin turun semakin bertambahnya jumlah silika flux yang dipakai. Antara blister 1 dengan blister 2 penurunannya signifikan hingga 8.014%, dan seterusnya penurunan berlanjut hingga titik terendah ada pada blister 4 yang memiliki kadar Fe 0.030%. Jadi dapat disimpulkan bahwa dengan adanya penambahan silika semakin meningkatkan kadar Cu dalam proses converting.

Dapat dilihat grafik diatas memiliki tren peningkatan dari blister tembaga 1 hingga blister tembaga 4. Ini dikarenakan pengaruh dari penambahan silika yang semakin ditingkatkan serta penambahan udara bebas yang dilakukan. Untuk 1 kali percobaan menggunakan total 1. Kg campuran logam dan matte (51.7%:48.3%). Untuk blister tembaga pertama tanpa menggunakan tambahan silika flux, untuk yang kedua dengan perbandingan 0.3 menggunakan silika flux dengan berat 17.8 gr. Untuk komposisi ketiga dengan perbandingan 0.5 menggunakan berat silika flux 41.15 gr, dan komposisi terakhir dengan perbandingan 0.9 menggunakan silika flux 87.8 gr. Nilai dari berat silika flux didapatkan dari komposisi matte dan logam awal yang dilihat menggunakan pengujian XRF dan dihitung sesuai dengan perbandingannya, setelah itu

kita akan mendapatkan nilai perbandingan dari Si dan Fe, dan tanpa adanya penambahan silika flux nilai perbandingan dari silika dan besi yaitu 0.14, sehingga silika tidak mampu mengikat semua besi yang ada. Maka dari itu nilai komposisi dari silika ditingkatkan dari 0.3, 0.5 dan 0.9.

C. Pengaruh Penambahan Silika Pada Slag

Hasil lain dari proses converting selain blister tembaga terdapat pula slag atau pengotor yang berupa Fe yang telah berikatan dengan O dan Si. Disini kita melihat pengaruh dai Si terhadap pengikatan Fe di slag serta banyaknya kehilangan Cu yang ada pada slag. Apabila kadar Cu dalam slag tinggi maka proses pemisahan slag kurang maksimal. Pengujian yang dilakuka untuk mengidentifikasi fasa dan mengidentifikasi unsur pada slag menggunakan pengujian XRD dan XRF sama seperti pada blister tembaga. Dan hasil dari XRD adalah



Gambar 2. Hasil XRD Slag Perbandingan 0 ; 0.3 ; 0.5 ; 0.9

Hasil XRD dari slag yang didapatkan terlihat fasa slag yang diinginkan yaitu Fe_2SiO_4 , serta terdapat fasa Cu dan Fe_3O_4 . Terlihat peak yang tinggi ditempati oleh fasa Fe_2SiO_4 [2]. Dilihat dari hasil difragtogram perbandingan antara slag1 hingga slag 4 maka intensitas dari Fe_2SiO_4 semakin meningkat dengan adanya penambahan silika flux, ini menandakan fasa yang terbentuk semakin meningkat. Fasa ini terbentuk karena adaya silika flux yang ditambahkan sehingga silika dapat mengikat Fe yang ada dan mengapung sebagai slag [7].

Sementara itu fasa lain yang terbentuk adalah Fe_3O_4 , fasa ini memiliki ketinggian intensitas yang hamper sama di setiap variable pengujian. Tetapi di sudut (2θ) 43° terjadi intensitas yang fluktuatif, pada slag 2 dan slag 4 intensitasnya tinggi tidak sama dengan slag 1 dan slag 3 yang memiliki intensitas yang rendah. Hal ini dikarenakan tidak stabilnya udara yang

masuk saat proses peniupan udara, karena proses ini dilakukan manual. Fe_3O_4 sendiri dapat terbentuk karena adanya penambahan oksigen yang berasal dari udara bebas yang akan mengikat Fe menjadi oksida FeO , Fe_2O_3 ataupun Fe_3O_4 . Fasa Fe_3O_4 ini memiliki kerugian dalam prosesnya dikarenakan sifat Fe_3O_4 itu sendiri yang sifatnya mengerosi dari crucible.

Dan fasa ketiga yang banyak terbentuk adalah Cu itu sendiri, semakin tingginya kadar silika maka akan meningkatkan kadar Cu dalam slag, ini dikarenakan silika apabila ditambahkan saat proses converting akan menaikkan viskositas dari slag itu sendiri. Tetapi saat penelitian ini berlangsung slag yang terbentuk hanya viskositasnya tinggi saat peniupan udara saja tetapi saat selesai peniupan slag yang terbentuk viskositasnya menjadi rendah sehingga kesulitan untuk proses pengambilannya. Saat peniupan udara slag membentuk foam diatas permukaannya. Terjadinya foam karena peniupan dilakukan di permukaan CuS dan akan membentuk Fe_3O_4 dan CuO [2]. Jadi terjadinya busa diinginkan saat proses converting karena foam terjadi saat udara menembak Cu yang berikatan dengan S dan membentuk Cu dan udara keluar yaitu SO_2 . Setelah proses peniupan udara selesai dilakukan maka foam diangkat tetapi masih ada slag tersisa dan slag inilah yang akhirnya ditapping kedalam cetakan.

Selanjutnya pengujian yang dilakukan adalah pengujian XRF yang menunjukkan unsur apa saja yang terkandung pada slag. Dan disini kita melihat kadar unsur Fe dan Cu.

Tabel 3. Komposisi Fe dan Cu Slag Perbandingan $\text{SiO}_2:\text{Fe}$ 0 ; 0.3 ; 0.5 ; 0.9

	Fe (%)	Cu (%)
$\text{SiO}_2:\text{Fe}$ 0	27.76	7.47
$\text{SiO}_2:\text{Fe}$ 0.3	17.35	16.415
$\text{SiO}_2:\text{Fe}$ 0.5	17.38	16.48
$\text{SiO}_2:\text{Fe}$ 0.9	18.075	16.42

Hasil dari pengujian XRF ini menunjukkan bahwa kadar Fe yang rendah setelah penambahan silika dan penambahan kadar Cu setelah penambahan slag. Ini dipengaruhi oleh proses saat melakukan pengambilan slag, karena saat proses pengambilan slag 1 dan slag 2 hingga slag 4 berbeda. Saat pengambilan slag 1 melakukan dengan alat scooping karena viskositas dari slag yang masih tinggi. Tetapi saat pengambilan slag 2 hingga slag 4 mengalami kesulitan saat mengambil slag dengan alat scooping karena viskositas yang rendah, maka dari itu slag 2 hingga slag 4 dilakukan pengambilannya dengan cara tapping atau penuangan pada satu cetakan. Inilah yang menyebabkan Cu ikut tertuang saat tapping slag. Inilah yang menyebabkan kadar Cu pada slag 2 hingga slag 4 meningkat. Viskositas dari slag semakin tinggi itu menandakan semakin banyaknya jumlah Fe_3O_4 yang terbentuk [2] tetapi proses ini terjadi saat penginjeksian udara dilakukan dengan adanya atau

terbentuknya foam yang tingkat viskositasnya sangat tinggi. Dan ini menandakan banyaknya Fe_3O_4 yang terbentuk dan mengapung diatas sebagai slag. Setelah foam kental di scooping maka akan terlihat slag yang masih mempunyai viskositas yang rendah dan slag inilah yang langsung ditapping kedalam cetakan dan saat inilah Cu ikut tertuang dengan slag dan menjadikan kadar Cu dalam slag dengan penambahan silika tinggi hasilnya.

Untuk kadar Fe yang menurun ini juga disebabkan oleh kadar Cu yang tinggi. Tetapi dilihat dari hasil XRD intensitas dari Fe_3O_4 semakin meningkat dari slag 1 hingga slag 4. Pada slag ini mempunyai banyak sekali kandungan unsur tetapi yang paling dominan ialah Fe dan Cu, selain itu terdapat pula Ca, Ni, Pb dan lainnya tetapi dengan kadar yang kecil.

Dilihat dari segi termodinamika dari nilai energi bebas Gibbs maka akan terlihat urutan dari reaksi yang terjadi selama proses converting [3]. Dari pemisahan Cu, Fe dan S hingga terbentuknya Cu murni dan slag FeO.SiO_2 . inilah tahapannya:

1. Pemisahan ikatan FeS karena O_2 menjadi FeO dan SO_2
2. Pemisahan CuS oleh O_2 menjadi Cu dan SO_2
3. Pengikatan FeO oleh SiO_2 menjadi FeO.SiO_2 . urutan rekasinya seperti berikut:



IV. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini mendapatkan hasil peningkatan tembaga sesuai dengan peningkatan jumlah silica flux yang ditambahkan. Tetapi untuk slag terjadi peningkatan losses karena teknik tapping yang salah, dengan demikian dapat dikatakan silica dapat meningkatkan recovery tembaga pada blister. Dengan kadar tembaga pada perbandingan 0 adalah 81.51% Cu, untuk perbandingan 0.3 adalah 95.82% Cu, untuk perbandingan 0.5 adalah 96.63% Cu dan perbandingan terakhir 0.9 adalah 96.88% Cu. Titik optimum ada pada komposisi perbandingan 0.5 karena tidak terlihat signifikan perbandingan antara 0.5 dan 0.9.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chakrabati, D.J., Laughin, D.E., 1983. "The Cu-S (Copper-Sulfur) System". *Bulletin of Alloy Phase Diagram*, 4, 254-271.
- [2] Davenport, W.G., King, M., Schlesiner, M., Biswas, A.K., (2002), *Extractive Metallurgy of Copper*, 4th Edition, Tucson, Pergamon
- [3] Gaskell, R.D. 1973. *Introduction To Metallurgical Thermodynamics*. Tokyo: McGraw – Hill Kogakusha, LTD.
- [4] Horath, L., (2001), *Fundamentals of materials Science for Technologist: Properties, Testing, and laboratory Exercises*, 2nd Edition, New Jersey, Prentice Hall.
- [5] International Copper Study Group (2012), *The World Copper Factbook 2012*, ICSG, Lisbon.
- [6] Junior, C. 1982. *Copper Refining with Silica Flux*
- [7] Kaur, R., (2007), *FCS Slag For Continuous Copper Converting*, Thesis Submitted in Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy (PhD), Rio Tinto .