



Analisa Rancangan dan Modifikasi Sistem Calcine Container Untuk Meningkatkan Fiksasi Sulfur Pada Proses Produksi Nikel Matte

Yoga Kurnia^{a,*}, Muh Sarkowi^b dan Suharno^b

^a PT. Rekayasa Industri, Jl. Kalibata Timur I No.36, Kalibata, Kec. Pancoran, Kota Jakarta Selatan, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 12740

^b Program Studi Program Profesi Insinyur, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

INFORMASI ARTIKEL

ABSTRAK

Riwayat artikel:

Diterima : 18 Oktober 2024

Direvisi : 10 November 2024

Diterbitkan : 31 Desember 2024

Kata kunci:

Nikel

Close Vessel

Sulfur Injection

Fiksasi Sulfur

Matte

Batas Intensitas Emisi SO₂ yang telah ditetapkan oleh regulasi pemerintah adalah 0.80 kg SO₂/kg Ni. Untuk tetap mematuhi batas intensitas emisi SO₂ tersebut, telah dilakukan Studi Reduksi Emisi SO₂ dengan skala laboratorium dan menghasilkan rekomendasi dengan beberapa rencana yang akan dilaksanakan. Salah satu rencana atas hasil penelitian laboratorium tersebut adalah membangun sebuah sistem dengan metode *Close Vessel Sulfur Injection*. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor yang mempengaruhi kualitas dan laju reaksi fiksasi sulfur pada proses produksi nikel matte yang di pabrik pengolahan nikel milik PT. Vale Indonesia. Metodologi penelitian meliputi pelaksanaan simulasi hidrodinamika, perhitungan kinetika, perhitungan kesetimbangan dan pelaksanaan pilot test. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lokasi penempatan injektor di bagian bawah dari calcine bed akan meningkatkan distribusi sulfur yang ditunjukkan dengan intensitas yang tinggi dari sulfur di calcine bed. Karena reaksi kimia mengikuti orde pertama, fiksasi sulfur diasumsikan tidak bergantung pada ukuran scalling. Fiksasi sulfur 70% -85% pada suhu 700°C dapat diperoleh setelah waktu reaksi mencapai 10-15 menit. Fiksasi sulfur yang dicapai pada kondisi pembilasan dengan nitrogen lebih tinggi daripada dibandingkan dengan tanpa pembilasan nitrogen. Ketika dosis sulfur adalah 10 kg/ton RKP, sulfidasi suhu 700°C, dan dengan pembilasan nitrogen, fiksasi sulfur mencapai 100%. Berdasarkan pilot test, ditemukan bahwa terdapat dua faktor utama yang secara signifikan mempengaruhi proses fiksasi, yaitu waktu reaksi dan tingkat metallization RKP. Kondisi fiksasi optimal dapat dicapai ketika RKP telah mencapai tingkat metallization tinggi. Waktu fiksasi dapat dicapai dalam waktu 20 menit untuk mendapatkan tingkat konversi sulfidasi yang tinggi. Proses sulfidasi dengan variabel uji; tanpa nitrogen blanket, penambahan sulfur 10 kg/ton, EFF disimpan di reaction chamber selama 1 menit, kemudian didinginkan di closed vessel hingga <50 °C, waktu transfer EFF dari ruang reaksi ke closed vessel adalah 20 menit adalah siklus uji yang menghasilkan persentase hasil fiksasi tinggi sebesar 92,4%. Modifikasi *calcine container* dan sistem penunjang operasinya perlu dilakukan untuk mengimplementasikan variabel proses fiksasi sulfur yang optimal.

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Secara umum, proses pengolahan bijih nikel laterit pada PT Vale Indonesia ini meliputi proses pengeringan (*drying*), kalsinasi, peleburan (*smelting*), dan *converting*. Pada proses *drying* dilakukan dalam *rotary dryer* untuk menghilangkan kadar air permukaan (*moisture*) dari 40% menjadi 20%. Kemudian pada proses kalsinasi dilakukan dalam *rotary kiln* untuk penghilangan *moisture* menjadi 0%, penghilangan air kristal (*crystal water*), reduksi logam oksida dan sulfidasi. Selanjutnya proses *smelting* dalam tanur listrik (*electric furnace / SAF*) adalah peleburan kalsin dari *rotary kiln* pada temperatur operasi

1500 °C untuk menghasilkan *matte* dan terak (*slag*). *Matte* yang dihasilkan dari tanur listrik mengandung besi sekitar 50% sehingga *matte* perlu dimurnikan dengan proses oksidasi dengan udara untuk menurunkan kadar besi menjadi 0,3%. Proses ini dilakukan di *converter* terutama untuk meningkatkan kadar nikel dari sekitar 25% menjadi 76-80% dalam *matte*.

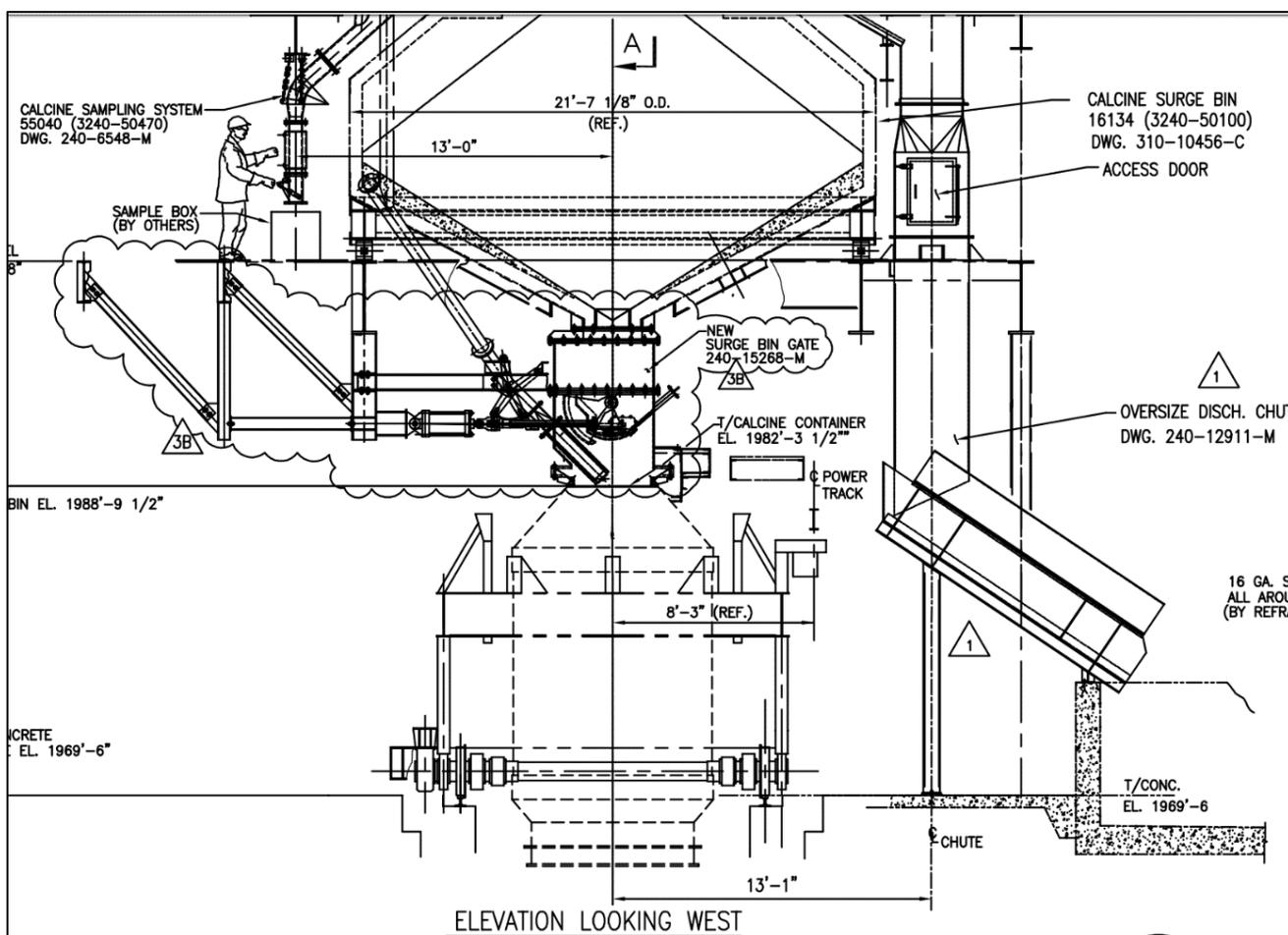
Batas Intensitas Emisi SO₂ yang telah ditetapkan oleh regulasi pemerintah adalah 0.80 kg SO₂/kg Ni. Untuk tetap mematuhi batas intensitas emisi SO₂ tersebut, telah dilakukan Studi Reduksi Emisi SO₂ dengan skala laboratorium dan menghasilkan rekomendasi dengan beberapa rencana yang akan dilaksanakan. Salah satu rencana atas hasil penelitian laboratorium tersebut adalah membangun sebuah sistem dengan

metode *Close Vessel Sulfur Injection*. Berdasarkan uji skala laboratorium yang dilakukan sebelumnya, metode dan rancangan *Close Vessel* diindikasikan dapat meningkatkan fiksasi sulfur yang sebelumnya sebesar 20 - 30% (dengan kondisi pengaturan sistem *calcine container* dan *rotary kiln* saat ini) menjadi 70 - 85% (dengan pengaturan dan rancangan sistem *Close Vessel* beserta aksesorisnya). Ini menunjukkan bahwa terdapat pengaruh yang sangat signifikan atas kondisi pengaturan dan rancangan dari sistem *calcine container* serta alur proses dari *rotary kiln*. Peningkatan fiksasi sulfur akan membantu pengikatan sulfur dengan logam dan mencegah sulfur menjadi emisi SO_2 .

Dibutuhkan pelaksana untuk memberikan kajian teknis dan pengujian terhadap reaktor dengan metode dan rancangan *Close Vessel Sulfur Injection* untuk meningkatkan fiksasi sulfur melalui Proses Pemodelan, Proses Simulasi, Pilot Test, Basic Engineering. (Instruksi dan Perjanjian Kerja No. 4600069739, 2022, Vale Indonesia Tbk, Jakarta)

1.2. Maksud dan Tujuan

Adapun maksud dari kegiatan ini adalah mengidentifikasi faktor yang mempengaruhi kualitas dan laju reaksi fiksasi sulfur pada proses produksi nikel matte dan memperoleh data rinci untuk perancangan dan modifikasi sari sistem sistem *calcine container* dan *rotary kiln* saat ini. Langkah dan tahapan berikutnya adalah untuk mengimplementasikan studi pengurangan SO_2 seperti yang direkomendasikan oleh pelaksana uji skala laboratorium, berdasarkan hasil uji skala laboratorium sebelumnya di mana desain sistem *close vessel* dapat meningkatkan tingkat fiksasi sulfur. Uji coba skala *Pilot* dilakukan untuk mempelajari fiksasi sulfur dalam skala yang lebih besar dari uji laboratorium, dan untuk selanjutnya dilanjutkan dengan *preliminary basic engineering design*.



Gambar 1. General Arrangement Drawing bagian Discharge End Rotary Kiln dan Calcine Container. Area disekitar surge bin juga merupakan area target modifikasi untuk mengurangi emisi dari gas SO_2

2. Metodologi

2.1 Pengumpulan Data

Pengumpulan data ini dilakukan bersamaan dengan kegiatan operasi dan pemeliharaan pabrik pengolahan nikel matte. Hal ini

diperlukan karena terdapat beberapa data yang diperlukan yang hanya bisa didapat pada saat pabrik beroperasi, akan tetapi terdapat juga data yang diperlukan yang hanya bisa didapat saat pabrik berhenti dan dilakukan kegiatan pemeliharaan dan perbaikan. Lingkup kegiatan yang dilakukan adalah pekerjaan persiapan dan pengumpulan data penunjang serta orientasi

lapangan, dan pengumpulan data primer dan sekunder antara lain:

- Survei dan analisa data kinerja dan proses
- Pengukuran dimensi dan arrangement peralatan dan perlengkapan

2.2 Pengolahan dan Analisis Data

Data yang telah didapat dari survey langsung pada pabrik pengolahan nikel diolah menggunakan kombinasi perangkat lunak untuk mengidentifikasi data *properties* unjuk kerja proses. Simulasi data juga dilakukan untuk menentukan fenomena fiksasi sulfur yang menjadi dasar perancangan. Peralatan dan perangkat lunak yang digunakan antara lain:

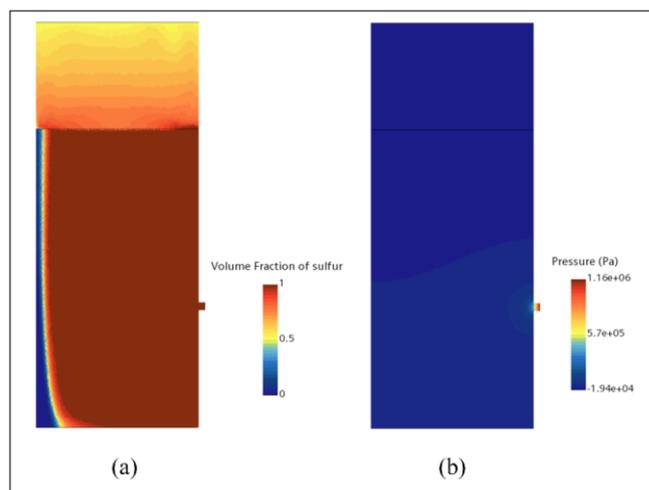
- Laptop: Digunakan sebagai perangkat utama dalam analisis dan pengolahan data
- Perangkat lunak STAR-CCM+: sebagai perangkat lunak untuk komputasi dinamika fluida.
- Perangkat lunak Microsoft Excel 2013: Untuk pengelolaan data, perhitungan statistik, dan pembuatan grafik.
- Perangkat lunak Solidworks: Untuk menghasilkan desain 3D perlengkapan yang dimodifikasi.
- Perangkat lunak Autocad: Untuk menghasilkan gambar 2D yang digunakan untuk keperluan desain skema.

Pemodelan injeksi sulfur pada *close vessel* dilakukan dalam dua perhitungan terpisah, yaitu permodelan hidrodinamika dan perhitungan termodinamika-kinetik. Pemodelan hidrodinamika dilakukan untuk mempelajari perilaku gerak sulfur dalam bejana tertutup. Dalam hal ini, studi gerak fluida menggunakan model aliran multifase yang melibatkan kalsin (*Reduction Kiln Product*) pada kondisi berpori dan sulfur pada kondisi gas, sedangkan perhitungan termodinamika digunakan untuk memperkirakan komposisi yang terbentuk pada kondisi kesetimbangan.

3. Hasil dan pembahasan

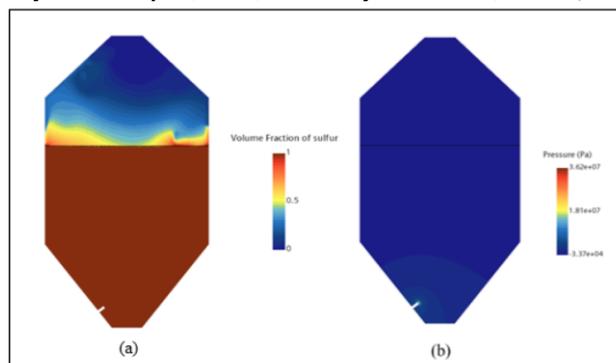
3.1 Simulasi Hidrodinamika

Simulasi hidrodinamika telah dilakukan untuk dua kasus: kasus laboratorium dan kasus percontohan, masing-masing. Tujuan simulasi adalah untuk menganalisa distribusi sulfur di dalam kalsinasi yang diwakili oleh variabel fraksi volume. Berdasarkan data fraksi volume, distribusi sulfur di lapisan kalsinasi dan kontak permukaan antara kalsin dan sulfur dapat dilihat. Sementara itu, data tekanan akan digunakan sebagai dasar desain dan pemilihan material bejana tertutup seperti yang ditunjukkan dari hasil simulasi hidrodinamika untuk kasus laboratorium sebagaimana ditunjukkan pada gambar.



Gambar 2. Hasil Simulasi Hidrodinamika Kasus Lab: (a)Fraksi Volume Sulfur dan (b)Tekanan di dalam Bejana Tertutup

Pada simulasi *pilot case*, injektor sulfur diposisikan di bagian bawah *reaction chamber*, konfigurasi yang sama dengan *pilot test* pada kondisi sebenarnya. Terlihat bahwa penempatan injektor di bagian bawah dari *calcine bed* akan meningkatkan distribusi sulfur yang ditunjukkan dengan intensitas yang tinggi dari sulfur di *calcine bed* (SO₂-E-B0-DF-003 Modeling Simulation Analysis and Report, 2022, PT. ReKayasa Industri, Jakarta).



Gambar 3. Hasil Simulasi Hidrodinamika *Pilot Case*: (a)fraksi volume sulfur dengan posisi injektor di bawah *calcine bed*, dan (b) tekanan di dalam ruang reaksi dengan posisi injektor di *calcine bed*

3.2 Perhitungan Kinetika

Selain simulasi hidrodinamika, perhitungan kinetika juga dilakukan untuk menghitung laju sulfidasi. Dasar pemodelan, seperti komposisi, diambil berdasarkan analisis hasil uji coba karena lebih representatif untuk menentukan komposisi kalsinasi sebelum sulfidasi. Perbandingan data pun dilakukan antara jurnal publikasi dan perhitungan ulang

Tabel 1. Perbandingan Energi Aktivasi (Ea) dalam Kkal/mol antara publikasi dan perhitungan ulang dalam reaksi antara Nikel dan Sulfur

No	Description	Ea based on Publication	Zero Order		First Order	
			Ea	Deviation	Ea	Deviation
1	Reaction between Ni and S	22	13.98	36.5%	28.99	31.8%

Reaksi nikel dan sulfur mengikuti reaksi orde satu. aktivasi energi reaksi orde pertama relatif dekat dengan jurnal publikasi, bersama dengan deviasi yang lebih rendah yang diperoleh dari

reaksi orde nol. Data dalam publikasi tersebut diolah untuk mendapatkan persamaan Arrhenius.

Tabel 2. Perbandingan Energi Aktivasi (Ea) dalam Kkal/mol antara publikasi dan perhitungan ulang dalam reaksi antara Nikel dan Sulfur

No	Description	Ea based on Publication	Zero Order		First Order	
			Ea	Deviation	Ea	Deviation
1	Reaction between Fe and S	14*	12.30	12.2%	13.91	0.7%

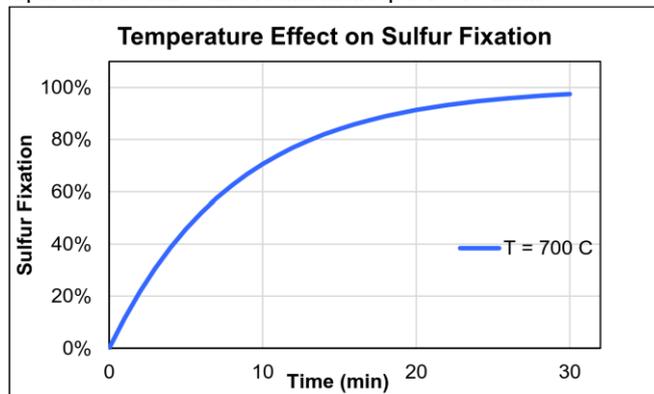
Publikasi menjelaskan bahwa kinetika besi dan sulfur teramati pada kisaran suhu 250 hingga 500°C. Sementara itu pada rentang suhu 370 hingga 500°C, produk reaksi seluruhnya terdiri dari FeS (Foroulis, Z.A. (1978), Kinetics and mechanism of the reaction of iron with sulfur vapor in the temperature range of 250 to 500°C. Materials and Corrosion, 29: 385-393)

Energi aktivasi reaksi orde pertama relatif dekat dengan publikasi, juga dengan deviasi yang lebih rendah. Konstanta laju reaksi sulfidasi logam pada suhu tersebut adalah disajikan dalam tabel di bawah ini.

Tabel 3. Konstanta Laju Reaksi Reaksi Nikel & Sulfur dan Reaksi Besi & Sulfur

Temperature (°C)	Reaction rate constant of nickel and sulfur reaction (min ⁻¹)	Reaction rate constant of iron and sulfur reaction (min ⁻¹)
700	0.118	0.0047

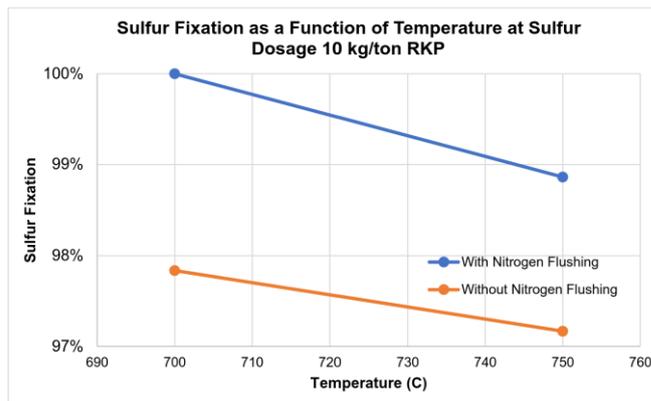
Selama 15 menit waktu reaksi dan 700°C, fiksasi sulfur diperoleh sebesar 84%. Karena reaksi kimia mengikuti orde pertama, fiksasi sulfur diasumsikan tidak bergantung pada ukuran scaling. Fiksasi sulfur 70% -85% pada suhu 700°C dapat diperoleh setelah waktu reaksi mencapai 10-15 menit.



Gambar 4. Fiksasi Sulfur pada suhu 700°C sebagai Fungsi Waktu

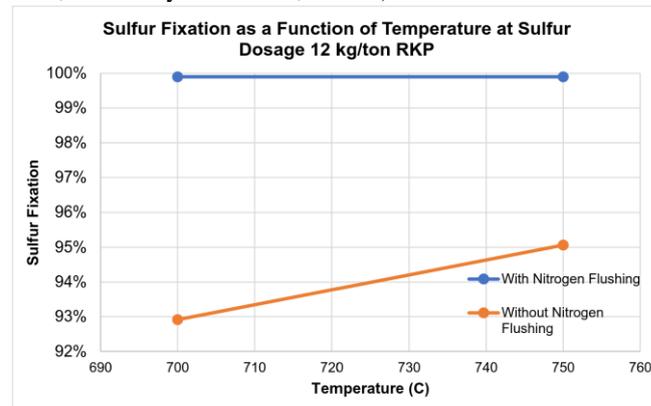
3.3 Perhitungan Kesetimbangan

Perhitungan kesetimbangan dilakukan dengan menggunakan dasar kasus percontohan, yaitu 50 kg kalsinasi. Komposisi yang dimasukkan ke dalam Factsage didasarkan pada analisis XRD dan XRF. Fasa dasar yang digunakan adalah BCC, FCC, dan A-Olivine. Hasilnya diidentifikasi berdasarkan aktivitas tersebut. Komponen dengan 1 aktivitas dipilih. Fiksasi sulfur sebagai fungsi suhu (pada kondisi dengan dan tanpa pembilasan nitrogen) ketika dosis sulfur masing-masing adalah 10 kg/ton RKP dan 12 kg/ton RKP, masing-masing.



Gambar 5. Fiksasi Sulfur sebagai Fungsi Suhu (dengan dan tanpa pembilasan Nitrogen) pada Dosis Sulfur 10 kg/ton RKP

Fiksasi sulfur yang dicapai pada kondisi pembilasan dengan nitrogen lebih tinggi daripada dibandingkan dengan tanpa pembilasan nitrogen. Ketika dosis sulfur adalah 10 kg/ton RKP, sulfidasi suhu 700°C, dan dengan pembilasan nitrogen, fiksasi sulfur mencapai 100%. Sulfidasi yang lebih tinggi suhu 750°C menghasilkan fiksasi sulfur yang lebih rendah. Ketika dosis sulfur 10 kg/ton RKP dan tanpa pembilasan nitrogen, fiksasi sulfur sekitar 97,16% hingga 97,84% pada kisaran suhu 700-750°C. Pada kondisi pembilasan nitrogen, logam sulfida yang terbentuk selama kesetimbangan adalah Ni₃S₄ dan Fe₇S₈. Di sisi lain, pada kondisi tanpa pembilasan nitrogen, logam sulfida yang terbentuk selama kesetimbangan adalah Ni₇S₆, Fe₁₁S₁₂ dan Ni₃S₂ (SO₂-E-B0-DF-003 Modeling Simulation Analysis and Report, 2022, PT. Rekayasa Industri, Jakarta).

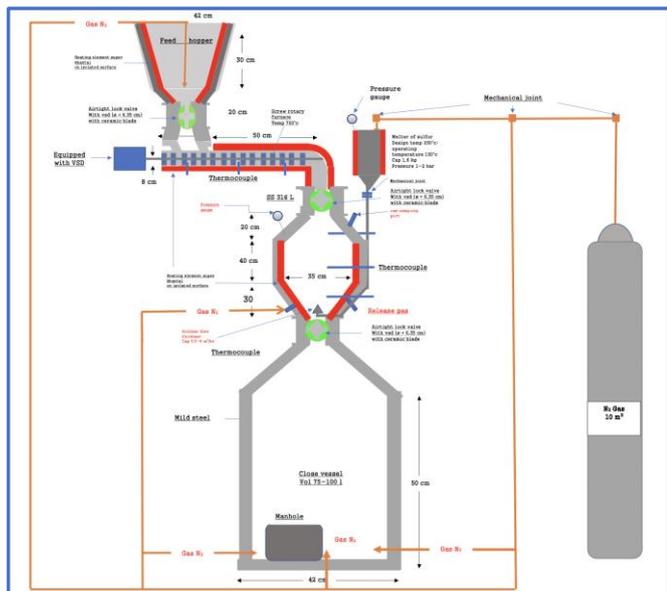


Gambar 6. Fiksasi Sulfur sebagai fungsi suhu (dengan dan tanpa pembilasan Nitrogen) pada dosis Sulfur 12 kg/ton RKP

Fiksasi sulfur tertinggi juga dicapai ketika pembilasan nitrogen diterapkan. Pada sulfur dosis 12 kg/ton RKP, fiksasi sulfur mencapai 100% terlepas dari suhu fiksasi sulfur. Tanpa kondisi pembilasan nitrogen, sekitar 93% fiksasi sulfur dicapai ketika sulfur suhu sulfidasi adalah 700°C.

3.4 Pilot Test

Pilot Test dilakukan dengan persiapan sampel, reduksi, proses injeksi sulfur dan penentuan fiksasi sulfur (Pilot Test Report, SO₂-G-G0-RP-002, 2022, PT. Rekayasa Industri, Jakarta). Beberapa variasi variabel uji dilakukan pada saat Pilot Test, seperti dengan dan tanpa nitrogen purging, dosis sulfur, waktu penahanan, dan lokasi pendinginan EFF (di Reaction Chamber atau dalam Close Vessel).



Gambar 7. Skema perlengkapan Pilot Test

Peralatan untuk Pilot Test terdiri dari:

- Isolated brick-lined Surge Bin
- Screw rotary furnace
- Isolated brick-lined reaction chamber
- Closed Vessel
- Sulfur Melter
- Nitrogen gas

Proses injeksi sulfur dilakukan dengan mencampurkan RKP dengan sulfur cair dalam reaction chamber. Sulfur Melter dirancang untuk tahan hingga 250°C, sementara suhu operasi melter ditetapkan sama seperti yang telah dipraktekkan pada pabrik (130 hingga 140°C) (Technical Memo; Liquid S Injection into Closed Vessel, 2011, VTec Vale, Canada). Kemudian, produk output dianalisis untuk menghitung tingkat fiksasi sulfur.

Berdasarkan pilot test, ditemukan bahwa terdapat dua faktor utama yang secara signifikan mempengaruhi proses fiksasi, yaitu waktu reaksi dan tingkat metallization RKP. Kondisi fiksasi optimal dapat dicapai ketika RKP telah mencapai tingkat metallization tinggi. Waktu fiksasi dapat dicapai dalam waktu 20 menit untuk mendapatkan tingkat konversi sulfidasi yang tinggi.

Tabel 4. Hasil uji fiksasi sulfur

Cycle	Reduction Test Temperature (°C)	Sulfidation Holding time (minutes)	Nitrogen Blanketing During Sulfidation	Cooling Location Until <50°C	Initial Mass of Calcine (kg)	Initial Total Sulfur (%)	Sulfur addition (kg)	Final Mass of Calcine (kg)	Final Total Sulfur (%)	Sulfur Fixation
Cycle 1	700	20	12 l/minute	Closed Vessel	50	0.18	0.6	50	0.81	51.67%
Cycle 2	700	20	--	Closed Vessel	50	0.18	0.6	50	0.77	49.17%
Cycle 3	700	20	12 l/minute	Reaction Chamber	50	0.18	0.6	50	0.61	35.83%
Cycle 4	850-900	20	12 l/minute	Reaction Chamber	50	0.046	0.6	50	0.88	69.50%
Cycle 5	850-900	20	--	Closed Vessel*	50	0.046	0.6	50	0.58	44.50%
Cycle 6	850-900	20	12 l/minute	Closed Vessel*	50	0.046	0.6	50	0.76	59.50%
Cycle 7	850-900	33	12 l/minute	Closed Vessel*	50	0.046	0.6	50	1.03	82.00%
Cycle 8	850-900	10	12 l/minute	Closed Vessel*	50	0.046	0.6	50	1.21	97.00%
Cycle 9	850-900	1	--	Closed Vessel*	50	0.046	0.5	50	0.97	92.40%
Cycle 10	850-900	1	12 l/minutes	Closed Vessel*	50	0.046	0.5	50	0.77	72.40%

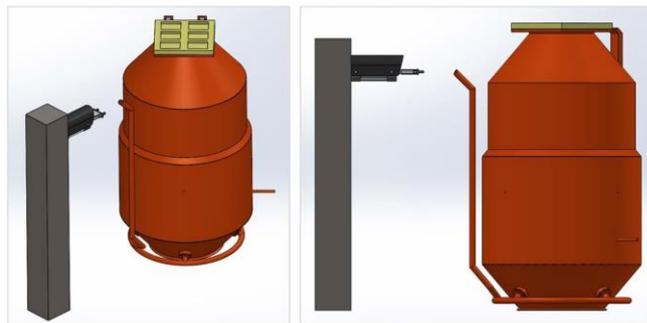
Berdasarkan hasil pilot test, disimpulkan bahwa tingkat metallization memainkan peran penting dalam fiksasi sulfur.

Proses sulfidasi siklus 9; tanpa nitrogen blanket, penambahan sulfur 10 kg/ton, EFF disimpan di reaction chamber selama 1 menit, kemudian didinginkan di closed vessel hingga <50 ° C, waktu transfer EFF dari ruang reaksi ke closed vessel adalah 20 menit adalah siklus uji yang menghasilkan persentase hasil fiksasi tinggi sebesar 92,4%. Implementasi hasil percobaan

dengan pilot plant dapat diperluas hingga skala yang lebih besar, seperti skala demo plant menggunakan jumlah data feed sekitar 10-20 kali lipat dari data feed yang digunakan dalam skala pilot.

3.5 Rancangan Modifikasi Calcine Container

Calcine container dimodifikasi untuk memungkinkan injeksi sulfur ke dalam calcine container. Calcine container dimodifikasi dengan pemasangan sulfur lances di bagian bawah calcine container. Sulfur ring pipe dipasang di luar calcine container untuk memungkinkan suhu sulfur berada pada suhu pemindahan yang direkomendasikan. Penutup calcine container dimodifikasi untuk meminimalkan masuknya udara ke dalam calcine container atau sulfur yang tidak bereaksi yang dilepaskan dari calcine container yang menjadi gas emisi SO₂.



Gambar 8. Modifikasi calcine container dengan menambahkan sulfur lances dengan geometri cincin, menggunakan aktuatur pneumatik untuk menghubungkan pipa fleksibel sulfur ke calcine container

Konsep rancangan ini serupa dengan proses injeksi sulfur pada close vessel yang digunakan dalam pilot test, di mana injeksi sulfur terjadi di reaction chamber atau calcine container dalam skala nyata. Dalam konsep ini, calcine container bergerak di bawah surge bin dan kalsin diturunkan ke dalam calcine container. Setelah itu, tutup calcine container akan ditutup dan pindah ke stasiun berikutnya. Stasiun berikutnya adalah injeksi sulfur. Injeksi sulfur terjadi di calcine container yang telah ditutup dengan tutup yang dimodifikasi. Tujuan modifikasi penutup adalah untuk meminimalkan masuknya udara ke dalam wadah kalsium atau sulfur yang tidak bereaksi yang dilepaskan dari calcine container. Setelah beberapa waktu, calcine container bergerak dan tutup dibuka dan wadah terhubung ke sistem pengolahan sulfur yang tidak bereaksi.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi bahwa terdapat dua faktor utama yang secara signifikan mempengaruhi proses fiksasi, yaitu waktu reaksi dan tingkat metallization RKP. Kondisi fiksasi optimal dapat dicapai ketika RKP telah mencapai tingkat metallization tinggi. Waktu fiksasi dapat dicapai dalam waktu 20 menit untuk mendapatkan tingkat konversi sulfidasi yang tinggi.

Diperlukan modifikasi calcine container dan sistem penunjang operasinya, untuk mengimplementasikan variabel proses fiksasi sulfur yang optimal. Modifikasi tersebut harus memperhatikan aspek keselamatan, kemudah-operasian dan kondisi peralatan pendukung lainnya dalam sistem supaya tercapainya unjuk kerja proses fiksasi sulfur.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada semua rekan rekan anggota tim proyek Engineering Study dari Rekeyasa Industri, LAPI ITB dan tekMIRA untuk kerjasama dan

dedikasinya. Penghargaan juga diberikan kepada Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Lampung atas dukungan dan saran yang membangun. Semoga artikel ini dapat memberikan kebermanfaatan untuk semua pihak.

Daftar pustaka

- Basic Equipment Drawing, Specification or Data Sheet of Closed Vessel Package SO₂-E-B0-DE-001 (2022), PT. Rekayasa Industri, Jakarta.
- Czerski, L., Mrowec, S., & Werber, T. (1962), Kinetics and Mechanism of Nickel-Sulfur Reaction. *Journal of The Electrochemical Society*, Volume 109, Number 4.
- Foroulis, Z.A. (1978), Kinetics and mechanism of the reaction of iron with sulfur vapor in the temperature range of 250 to 500°C. *Materials and Corrosion*, 29: 385-393.
- Instruksi dan Perjanjian Kerja No. 4600069739 (2022), Vale Indonesia Tbk, Jakarta.
- Modeling Simulation Analysis and Report SO₂-E-B0-DF-003 (2022), PT. Rekayasa Industri, Jakarta.
- Pilot Test Report SO₂-G-G0-RP-002 (2022), PT. Rekayasa Industri, Jakarta.
- Taieb, Dalila & Brahim, Ammar. (2013). Electrochemical method for sulphur dioxide removal from flue gases: Application on sulphuric acid plant in Tunisia. *Comptes Rendus Chimie*. 16. 39–50.