

Tesis - TF5471

# PEMANFAATAN GAS BUANG ROTARY KILN SEBAGAI GAS PANAS COAL MILL

BAGUS CATUR PAMUNGKAS NRP. 02311650022008

DOSEN PEMBIMBING Ir. HARSONO HADI, MT., Ph. D NIP. 19600119 1986111 001

PROGRAM MAGISTER BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI TERBARUKAN DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA 2019 Halaman ini memang dikosongkan

### LEMBAR PENGESAHAN

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) di

u

# Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh Bagus Catur Pamungkas NRP: 02311650022008

Tanggal Ujian : 8 Januari 2019 Periode Wisuda/Maret 2019

Disetujui oleh:

- Ir. Harsono Hadi, MT., Ph. D NIP: 19600119 1986111 001
- Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, MSc. NIP: 19620822 1988031 001
- Dr. Dhany Arifiyanto ST., M.Eng NIP: 19731007 1998021 001

...(Pembimbing)

.....(Penguji 1)

.....(Penguji 2)

Dekan Fakultas Teknologi Industri, SE NOL GI SEPULUI of NOIDI LEMENTERIAN RIGHT r. Bambang Lelono Widjiantoro, ST, MT NIP: 19690507 1995121 001

Halaman ini memang dikosongkan

# PEMANFAATAN GAS BUANG ROTARY KILN SEBAGAI GAS PANAS COAL MILL

Nama Mahasiswa	: Bagus Catur Pamungkas
NRP	: 02311650022008
Pembimbing	: Harsono Hadi

#### ABSTRAK

Rotary kiln adalah salah satu peralatan yang paling banyak mengkonsumsi energi pada proses pirometalurgi industri pengolahan nikel. Dalam penelitian ini pemanfaatan energi dari gas buang rotary kiln dikaji untuk proses pemanasan batubara di peralatan coal mill. Analisa massa dan aliran energi dikembangkan berdasarkan hukum konservasi aliran massa dan energi yang bertujuan untuk mengidentifikasi potensi penghematan energi dari semua aliran material dan energi pada proses di rotary kiln. Pemodelan aliran massa dan energi dibuat berdasarkan data proses, data historis operasi, dan data pendukung terkait. Rotary kiln yang menjadi obyek penelitian ini dapat memproses bijih nikel laterit yang sudah dikeringkan sebanyak 241 ton per jam dengan rata-rata keluaran produksi 3500 ton calcine per hari. Sumber energi utama rotary kiln adalah pembakaran bahan bakar fosil dengan konsumsi energi spesifik 3,7 GJ/kg-calcine. Hasil analisa aliran energi menunjukkan bahwa 23,07% dari input energi total terbawa dalam aliran off-gas dan 4,14% dari input energi total terlepas ke lingkungan sekitar dalam bentuk perpindahan panas dari dinding luar rotary kiln. Selanjutnya Sankey diagram disusun berdasarkan neraca massa dan energi pada rotary kiln. Beberapa potensi pemanfaatan off-gas kiln dikaji lebih lanjut dengan memperhitungan besaran energi yang dapat dimanfaatkan, biaya yang diperlukan dan resiko-resiko. Selanjutnya pemanfaatan gas buang rotary kiln dikaji lebih lanjut untuk menggantikan sistem sirkulasi ulang gas buang coal mill. Potensi konservasi energi sebesar 14,2 GJ/jam dapat diperoleh dan penghematan konsumsi bahan bahar fosil untuk gas panas coal mill senilai 2,5 juta USD per tahun dan penurunan emisi gas rumah kaca sebesar 80.3% serta berkurangnya resiko ledakan apabila terjadi kebocoran batubara halus (pulverized coal) pada baghouse.

Kata kunci : analisa aliran energi, gas buang, konservasi energi, pengolahan nikel, *rotary kiln* 

Halaman ini memang dikosongkan

## ROTARY KILN OFF-GAS ENERGY RECOVERY FOR COAL MILL HOT GAS

Name	: Bagus Catur Pamungkas
NRP	: 02311650022008
Supervisor	: Harsono Hadi

#### ABSTRACT

Rotary kiln is one of the most energy consuming equipment in nickel pyrometallurgy processing plant. Energy recovery of waste heat from kiln off-gas was studied for preheating raw coal in the coal mill. At first, an analysis of mass and energy flow based on mass conservation and energy conservation laws was developed in order to identify potential energy saving from all material and energy streams in the kiln process. The kiln can process 241 ton per hour of semi-dried lateritic ore with an average output of 3500 ton calcine per day. Fossil fuel combustion is the main source of energy input with a specific consumption of 3.7 GJ per kg calcine produced. The analytical results showed that 23.07% of total energy input carried away in the off-gas stream and 4.14% of total energy input lost to the surrounding in the form of heat transfer from kiln shell. Sankey diagram of the material flow and energy flow in the rotary kiln was developed based on mass and energy balance in the rotary kiln. Furthermore, utilization of kiln off-gas as hot gas coal mill was studied to replace existing recirculation system of coal mill offgas. Energy recovery of 14.2 GJ/hour can be achieved and fuel cost saving for coal mill hot gas generation approximately USD 2.5 million annually with additional environmental benefit from 80.3% reduction of greenhouse gasses emission and reduction of explosion risk in the event of pulverized coal leakage in the bag-house.

Keywords — energy flow analysis, nickel processing plant, off-gas, recovery energy, rotary kiln

Halaman ini memang dikosongkan

#### **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kepada Tuhan yang Maha Esa, yang senantiasa melimpahkan rahmat karunia-Nya kepada penulis sehingga tesis dengan judul "Pemanfaatan Gas Buang Rotary Kiln Sebagai Gas Panas Coal Mill" dapat diselesaikan dengan baik. Tentunya tidak mungkin penulis dapat menyelesaikan tesis ini seorang diri. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang memberikan bantuan secara moral maupun material, terutama kepada:

- 1. Bapak Ir. Harsono Hadi, MT., Ph. D selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, saran dan motivasi dalam menyelesaikan penelitian ini.
- Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, MSc. dan Bapak Dr. Dhany Arifiyanto ST., M.Eng selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan perbaikan tesis ini.
- Bapak Dr. rer. Nat. Ir. Aulia M. T. Nasution M.Sc., selaku ketua program studi S2 Teknik Fisika ITS dan sekaligus dosen wali penulis yang telah membimbing selama proses pendidikan.
- 4. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D., selaku ketua departemen Teknik Fisika ITS.
- 5. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di departemen Teknik Fisika ITS.
- 6. Ibu Martha Hardiyah, S.Pd yang telah banyak membantu sejak awal proses pendidikan.
- 7. Rekan-rekan S2 Teknik Fisika ITS, khususnya rekan-rekan dari Vale yang senantiasa saling membantu dan bersama-sama melalui proses pendidikan ini.
- Ignata, Aini, Aino, Ibunda dan seluruh keluarga yang memberikan dukungan dan menjadi sumber motivasi bagi penulis.

Penulis menyadari bahwa penulisan ini masih memiliki kekurangan, sehingga kritik dan dan saran yang membangun penulis harapkan dari rekan-rekan pembaca sekalian. Semoga laporan thesis ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, 15 Januari 2019

Penulis

Halaman ini memang dikosongkan

# DAFTAR ISI

LEMBAR	PENGESAHAN	i
ABSTRA	ζ	iii
ABSTRAC	<i>T</i>	v
KATA PE	NGANTAR	vii
DAFTAR	ISI	ix
DAFTAR	GAMBAR	xi
DAFTAR	TABEL	xiii
BAB 1 PE	NDAHULUAN	1
1.1.	Latar Belakang	1
1.2.	Rumusan Masalah	2
1.3.	Tujuan Penelitian	3
BAB 2 DA	ASAR TEORI	5
2.1.	Proses Teknologi Pengolahan Nikel	5
2.2.	Proses di Rotary Kiln	7
2.3.	Rotary Kiln dan Sistem Pendukungnya	9
2.4.	Model Matematika Aliran Material dan Energi di Rotary Kiln	10
2.5.	Analisa Efisiensi Proses	12
2.6.	Perpindahan Panas Dari Dinding Luar Rotary Kiln	13
2.7.	Metode-metode Recovery Energy Rotary Kiln	15
BAB 3 ME	ETODOLOGI & ACUAN PUSTAKA	19
3.1.	Diagram Alir Penelitian	19
3.2.	Prosedur Penelitian	21
3.3.	Rencana dan Jadwal Penelitian	22
BAB 4 HA	ASIL DAN DISKUSI	25
4.1.	Neraca Massa Rotary Kiln	25
4.2.	Perhitungan Aliran Energi dan Neraca Energi Rotary Kiln	26
4.2.1.	Perhitungan Energi HSFO dan Coal	27
4.2.2.	Perhitungan Energi Sensibel Udara Pembakaran, Udara Air Pipe, Steam, dan Ore	
4.2.3.	Perhitungan Energi Sensibel Calcine dan Off Gas	28
4.2.4.	Perhitungan Energi Penguapan Kelembapan Ore	28

4.2.5.	Perhitungan Energi Reaksi Kimia Reduksi	.28
4.2.6.	Perhitungan Heat Loss dari Dinding Luar Kiln	. 29
4.2.7.	Neraca Energi Rotary Kiln	.35
4.3.	Potensi Peningkatan Efisiensi Energi Kiln	.36
4.3.1.	Kiln off-gas potential 122,25 GJ/jam	.37
4.3.2.	Panas yang hilang (heat loss) dari dinding luar kiln 11,1 GJ/jam	.38
4.3.3.	Kajian Recovery Energy Rotary Kiln	. 39
4.4.	Pemanfaatan off-gas kiln untuk gas panas coal mill	.40
4.5.	Potensi Ledakan Akibat Kebocoran Baghouse di Sistem Coal Mill	.41
BAB 5 KE	SIMPULAN & SARAN	.45
DAFTAR	PUSTAKA	.47

### DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema alur proses pengolahan nikel
Gambar 2.2 Skema alur proses rotary kiln
Gambar 2.3 Skema rotary kiln tampak samping yang disederhanakan9
Gambar 2.4 Potongan rotary kiln pada bagian tyre (kiri) dan bull gear (kanan)10
Gambar 2.5 Pemanfaatan off-gas kiln di industri ferronickel (Liu et al., 2016) 15
Gambar 2.6 Skema pembangkit listrik menggunakan siklus organic rankine (Guo
et al., 2015)
Gambar 2.7 Skema pemanfaatan heat loss dari dinding luar rotary kiln untuk
pemanas mula untuk udara pembakaran (Karamarkovic et al. 2013)16
Gambar 2.8 Skema pemanfaatan heat loss dari dinding luar rotary kiln untuk
pemanas air (Sogut et al., 2010)
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (lanjutan)
Gambar 4.1 Diagram Sankey untuk aliran massa rotary kiln 241 ton per Jam26
Gambar 4.2 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier 129
Gambar 4.3 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 air pipe 430
Gambar 4.4 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier 230
Gambar 4.5 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 air pipe 3
Gambar 4.6 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier 331
Gambar 4.7 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier slip ring32
Gambar 4.8 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier 3-432
Gambar 4.9 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier 433
Gambar 4.10 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 feed end33
Gambar 4.11 Temperatur dinding luar kiln dan heat loss
Gambar 4.12 Diagram Sankey aliran energi rotary kiln
Gambar 4.13 Temperatur rata-rata per jam gas buang kiln tahun 2014-201736
Gambar 4.14 Peta area rotary kiln #5 dan area sekitarnya
Gambar 4.15 Skema pemanfaatan off-gas kiln untuk gas panas coal mill41

Halaman ini sengaja dikosongkan

# DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian	.23
Tabel 4.1 Neraca Massa Kiln Kapasitas Feed 241 Ton Per Jam	.26
Tabel 4.2 Tabel Perhitungan Heat Losses dari Dinding Luar Kiln	. 34
Tabel 4.3 Neraca Energi Kiln Kapasitas Feed 241 Ton Per Jam	.35
Tabel 4.4 Kajian Recovery Energy Rotary Kiln	.40

Halaman ini sengaja dikosongkan

# BAB 1 PENDAHULUAN

#### 1.1. Latar Belakang

PT Vale Indonesia merupakan perusahaan pertambangan nikel terintegrasi yang menambang nikel laterit dan mengolahnya menjadi nickel matte melalui proses pirometalurgi. Proses pirometalurgi merupakan suatu proses ekstraksi logam menggunakan energi panas yang terdiri dari empat tahap utama, yaitu pengeringan, kalsinasi, peleburan, dan pemurnian.

Salah satu kebutuhan energi terbesar pada proses pirometalurgi ferronickel adalah tahap kalsinasi dan reduksi di dalam *rotary kiln*. Pada tahap ini bijih nikel dipanaskan hingga mencapai temperatur sekitar 800-900 derajat Celcius. Liu melakukan analisa aliran energi di suatu pabrik ferronickel dan menuliskan bahwa 22,66% aliran energi di *rotary kiln* terbuang dalam aliran flue gas (15,65%) dan *heat loss* (6,88%) (Liu et al., 2016). Rong melakukan analisa energi dan eksergi di salah satu pabrik ferronickel dan menuliskan bahwa sebagian pasokan energi *rotary kiln* tidak termanfaatkan dan terbuang ke lingkungan dalam bentuk flue gas (13,23%) dan *heat loss* (9,67%) (Rong et al., 2017).

Pasokan energi utama *rotary kiln* di PT Vale Indonesia berasal dari bahan bakar fosil yaitu minyak HSFO dan batubara (sebagai pereduksi) dengan laju massa masing-masing berkisar 9 ton per jam (atau sekitar 150 liter per menit) dan 7,2 ton per jam, secara berurutan. Emisi CO<sub>2</sub> global meningkat 1,4% di tahun 2017 dan mencapai level tertinggi yaitu 32,5 Giga-tonnes (International Energy Agency, 2018). Industri pengolahan baja dan metal serta semen merupakan konsumen energi fosil utama di dunia.

Harga minyak dunia yang berfluktuasi dengan kecenderungan meningkat di masa depan menuntut peningkatan efisiensi energi *rotary kiln*. Salah satu cara meningkatkan efisiensi energi di pabrik ferronickel adalah memanfaatkan gas buang *rotary kiln* sebagai input energi di rotary dryer (Liu et al., 2016). Pemanfaatan gas buang dengan cara berbeda dilakukan Guo menggunakan organic

rankine cycle untuk menghasilkan listrik (Guo et al., 2015). Metode lain dilakukan oleh Karamarkovic menggunakan recuperator sebagai alat penukar panas untuk memanfaatkan energi panas yang berasal dari radiasi dan konveksi shell *kiln* sebagai pemanas mula untuk pasokan udara pembakaran *kiln* (Karamarkovic et al., 2013).

Penelitian ini disusun untuk mengetahui potensi penghematan energi pada peralatan *rotary kiln* di PT Vale Indonesia berdasarkan analisa aliran energi. Beberapa alternatif pemanfaatan energi yang saat ini belum termanfaatkan akan dianalisa lebih lanjut dengan memperhitungkan dampak terhadap proses produksi. Lebih jauh penelitian ini akan mengevaluasi salah satu upaya konservasi energi yaitu pemanfaatan gas buang *rotary kiln* secara langsung sebagai gas panas untuk *coal mill*.

Saat ini gas panas untuk *coal mill* dihasilkan dari pembakaran bahan bakar diesel. Biaya untuk menghasilkan gas panas *coal mill* cukup tinggi karena menggunakan bahan bakar diesel yang harganya mengikuti harga pasar dunia. Saat ini sekitar 80% off gas keluaran baghouse *coal mill* disirkulasi kembali sebagai input hot gas *coal mill* dengan tujuan untuk penghematan energi. Akan tetapi sistem resirkulasi ini memiliki resiko yaitu apabila terjadi kebocoran pada filter baghouse maka batubara halus (*pulverized coal*) akan terbawa oleh aliran gas buang dan bereaksi dengan gas panas dari combustion chamber sehingga berpotensi menimbulkan ledakan apabila kadar oksigen kritis terpenuhi. Penelitian ini akan menganalisa pengaruh penerapan sistem gas buang sekali pakai (once-through) pada sistem Coal mill untuk mengurangi resiko tersebut.

#### 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah yang akan diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana tingkat efisiensi energi pada peralatan *Rotary kiln* PT Vale Indonesia?
- b. Bagaimana cara-cara melakukan konservasi energi pada peralatan *Rotary kiln* PT Vale Indonesia?

- c. Bagaimana potensi pemanfaatan gas buang *Rotary kiln* sebagai gas panas Coal mill menggantikan bahan bakar high speed diesel (HSD)?
- d. Bagaimana pengaruh penerapan sistem gas buang sekali pakai (oncethrough) pada sistem Coal mill.

#### **1.3.** Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mengetahui tingkat efisiensi energi pada peralatan *Rotary kiln* di PT Vale Indonesia.
- b. Mengetahui cara-cara melakukan konservasi energi pada peralatan *Rotary kiln* di PT Vale Indonesia.
- Mengetahui potensi pemanfaatan gas buang *Rotary kiln* sebagai gas panas Coal mill menggantikan bahan bakar diesel.
- d. Mengetahui pengaruh penerapan sistem gas buang sekali pakai (oncethrough) pada sistem Coal mill.

Halaman ini sengaja dikosongkan

# BAB 2 DASAR TEORI

#### 2.1. Proses Teknologi Pengolahan Nikel

Saat ini terdapat dua jenis teknologi pengolahan logam nikel di dunia yaitu pirometalurgi dan hidrometalurgi. Secara umum pirometalurgi digunakan untuk deposit nikel yang memiliki kadar diatas 1,7% sedangkan hidrometalurgi lebih cocok digunakan untuk kadar nikel dibawah 1,5% (Mishra, 2001). Proses ekstraksi pirometalurgi terdiri dari tahap pengeringan, kalsinasi, peleburan dan pemurnian. Sedangkan proses hidrometalurgi memurnikan nikel melalui pelindian (leaching) menggunakan larutan asam. Cadangan nikel di area konsesi PT Vale Indonesia termasuk jenis laterit yang memiliki kadar nikel tinggi mencapai rata-rata di atas 1,8% sehingga lebih cocok menggunakan proses pirometalurgi.

Tahap pertama pengolahan bijih laterite hasil kegiatan penambangan adalah proses pengeringan di dalam rotary dryer yang bertujuan untuk menurunkan kadar air dari 30-35% menjadi sekitar 19-21%. Di ujung keluaran rotary dryer dipasang trommel screen dengan lubang-lubang berdiameter 3/4 inchi untuk memisahkan bijih nikel yang berukuran lebih kecil dari 3/4 inchi. Selanjutnya bijih nikel laterit dengan ukuran di atas 3/4 inchi dimasukkan ke dalam crusher sebelum dipisahkan kembali dan akhirnya disimpan dalam storage.

Tahap kedua bijih laterite dimasukkan ke dalam *rotary kiln* untuk proses kalsinasi dan reduksi. Proses kalsinasi adalah proses untuk menghilangkan semua kandungan air bebas dan air kristal sehingga mencapai kandungan air kristal xH<sub>2</sub>O dibawah 1%. Proses reduksi di dalam *Rotary kiln* terjadi di bagian ujung akhir di dekat zona pembakaran menggunakan gas karbon monoksida (CO) hasil pembakaran yang tidak sempurna (miskin oksigen) dan penyemprotan minyak kearah bijih yang bertemperatur tinggi, sehingga terjadi reaksi reduksi pada nikel oksida (NiO) dan besi oksida (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dari bijih laterite menjadi nikel logam dan besi logam. Pada feed conveyor *rotary kiln* ditambahkan batubara dan pada discharge chute *kiln* ditambahkan sulphur untuk menstabilkan dan memudahkan proses pengolahan nikel lebih lanjut.

Tahap ketiga dalam proses pengolahan nikel adalah proses peleburan *calcine* di dalam electric furnace. Tiga buah electrode berfungsi sebagai penghantar energi listrik untuk membentuk busur listrik dengan material *calcine* di bawahnya sehingga *calcine* tersebut meleleh menjadi logam panas. Cairan yang berkadar nickel tinggi akan terpisah dengan yang berkadar nickel rendah karena perbedaan berat jenis, reaksi kimia dan sifat metalurgi logam nikel. Cairan berkadar nikel tinggi yang disebut matte akan berada dibawah cairan yang berkadar nickel rendah yang disebut slag. Matte akan dimurnikan lebih lanjut di dalam Converter sedangkan slag akan dibuang.

Tahap terakhir yaitu pemurnian nikel dilakukan di dalam peralatan Pierce-Smith converter dengan cara mengalirkan udara dan menambahkan silica. Udara bereaksi dengan besi (Fe) dan membentuk besi oksida. Besi oksida (FeO) kemudian bersatu dengan silica flux (SiO<sub>2</sub>) menjadi slag converter yang terpisah dengan converter matte karena perbedaan berat jenis. Slag converter yang lebih ringan akan berada di lapisan atas sehingga dapat dikeluarkan dengan cara penuangan pada wadah logam panas atau hot metal ladle.



Gambar 2.1 Skema alur proses pengolahan nikel

#### 2.2. Proses di Rotary Kiln

Proses kalsinasi dan reduksi bijih laterit di dalam *rotary kiln* merupakan proses pirometalurgi yang menggunakan gas panas hasil pembakaran bahan bakar fosil HSFO dan batubara. Reaksi kimia yang terjadi di dalam *rotary kiln* adalah reaksi pembakaran dan reaksi reduksi oksida logam yang terdapat di dalam biji laterit berdasarkan reaksi persamaan berikut :

Reaksi reduksi:

$CO_2 + C \text{ (dari batubara)} \Rightarrow 2CO$ (2)	.1	l	)
--	----	---	---

 $3Fe_2O_3 + CO \Rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2$  (2.2)

$$Fe_3O_4 + CO \Rightarrow 3FeO + CO_2$$
 (2.3)

$$FeO + CO \Rightarrow Fe + CO_2$$
 (2.4)

 $NiO + CO \Rightarrow Ni + CO_2$  (2.5)

$$NiO + C (dari batubara) \Rightarrow Ni + CO$$
 (2.6)

Reaksi pembakaran:

C (dari HSFO/batubara) + 
$$O_2 \Rightarrow CO_2$$
 (2.7)

$$2CO + O_2 \Rightarrow 2CO_2 \tag{2.8}$$

Pasokan energi utama *rotary kiln* di PT Vale Indonesia berasal dari bahan bakar minyak HSFO dengan laju massa berkisar 6,05-9,14 ton per jam atau sekitar 100-150 liter per menit. Pembakaran bahan bakar di discharge end *kiln* merupakan pembakaran tidak sempurna atau miskin oksigen menciptakan kondisi untuk reaksi reduksi. Sebagian besar bahan bakar disemprotkan langsung ke arah material melalui oil lance.

Gas karbon monoksida yang terbentuk akibat proses reduksi merupakan gas *combustible* yang menghasilkan panas apabila bertemu dengan oksigen karena merupakan reaksi eksotermik. Sejumlah udara dimasukkan ke dalam *rotary kiln* dari empat *air pipe* di pertengahan *rotary kiln* untuk mereaksikan gas *combustible* dan menghasilkan panas untuk mengurangi air kristal yang terkandung dalam bijih nikel.

Sumbu putaran *rotary kiln* memiliki kemiringan sekitar 3,1% (1° 46'32") terhadap bidang horizontal sehingga material bijih laterite dari *feed end* akan bergerak menuju *discharge end* ketika *kiln* berotasi. Gas panas mengalir dalam arah

yang berlawanan dengan aliran material bijih laterite. Di permukaan bagian dalam dinding *rotary kiln* dipasang *lifter-lifter* yang berfungsi mengangkat material bijih laterite dan kemudian menjatuhkannya pada sudut yang makin tinggi membentuk tirai bijih yang bertujuan untuk meningkatkan perpindahan panas antara bijih laterite dengan gas panas. Setelah dimasukkan ke dalam *feed end rotary kiln* temperatur bijih laterite naik bertahap sampai pada temperatur diatas 500 °C di pertengahan silinder *rotary kiln* dimana semua kandungan air tersebut dihilangkan. Kandungan air pada *calcine* perlu dihilangkan serendah mungkin untuk mengurangi konsumsi listrik dan mencegah ledakan akibat terbentuknya uap air pada saat proses peleburan di dalam furnace.

Gas yang keluar dari *rotary kiln* bercampur dengan debu dan selanjutnya masuk ke dalam alat penangkap debu atau electro static precipitator (ESP). Debu yang ditangkap oleh ESP akan dimasukkan kembali ke dalam rotary dryer sedangkan gas yang sudah bersih dibuang ke udara melalui cerobong.



Gambar 2.2 Skema alur proses rotary kiln

Bahan bakar utama Kiln adalah minyak bakar HSFO (High Sulphur Fuel Oil) dengan nilai kalor sekitar 9000 kkal/kg. Secara umum HSFO termasuk heavy fuel oil yang membutuhkan temperatur minimal 40 °C untuk dapat dipompa dengan baik. Bahkan pada temperatur 15-20 °C sifat fisik HSFO menyerupai bitumen yang sangat sulit untuk dipompa. Untuk memudahkan proses pembakaran HSFO membutuhkan pemanasan mula (preheating) hingga temperatur 100-120 °C dan atomisasi menggunakan steam. Alat pemanas mula HSFO adalah penukar panas

tipe shell and tube dengan fluida panas steam pada sisi tube. Atomisasi steam di burner diperlukan untuk memecah ukuran partikel HSFO menjadi lebih kecil sehingga lebih mudah terbakar dan mengurangi potensi terbentuknya soot (jelaga) akibat partikel HSFO terlalu besar.

Pada saat ini batubara halus mulai digunakan pada beberapa *kiln* untuk mengurangi sebagian konsumsi HSFO. Walaupun nilai kalor lebih rendah yaitu sekitar 6000 kkal akan tetapi harga batubara jauh lebih murah dibandingkan HSFO sehingga biaya keseluruhan untuk bahan bakar dengan batubara lebih ekonomis.

#### 2.3. Rotary Kiln dan Sistem Pendukungnya

Kiln #5 memiliki kapasitas feed rate *ore* mencapai 240 ton per jam berbentuk silinder dengan diameter shell 6 meter dan panjang 135 meter. Berat *kiln* ditopang pada beberapa tumpuan tyre dan trunnion rollers. Tyre atau riding ring berbentuk cincin baja dengan ketebalan sekitar 50 cm dan memiliki sumbu putar yang sama dengan sumbu putar *kiln*. Pada ruang antara diameter dalam tyre dan diameter luar shell terdapat susunan supporting blocks atau pad yang merupakan landasan untuk gerakan tyre terhadap shell. Kiln berputar dengan kecepatan putaran 0,8-0,9 rpm dan untuk setiap putaran terdapat slip atau migrasi sekitar 10 mm antara tyre dengan shell Kiln. Sumbu putaran Kiln memiliki kemiringan sekitar 3,1% (10 46'32") terhadap bidang horizontal untuk memudahkan material bijih laterite bergerak dari feed end menuju discharge end. Gaya aksial akibat kemiringan *kiln* ditopang oleh thrust roller. Gaya reaksi akibat kemiringan trunnion roller (skewness) juga dapat menghasilkan gaya dorong aksial untuk mendorong *kiln* uphill atau downhill.



Gambar 2.3 Skema *rotary kiln* tampak samping yang disederhanakan Untuk melindungi baja terhadap temperatur tinggi pada bagian dalam dinding *kiln* dipasang semen cor tahan api (castable) dengan ketebalan 9 inchi (23 cm).

Keuntungan lain adalah konduktivitas panas castable jauh lebih kecil daripada baja sehingga *heat loss*es radiasi dan konveksi dari dinding luar shell juga berkurang dibandingkan tanpa penggunaan castable. Untuk meningkatkan perpindahan panas dipasang pelat baja pengangkat (lifter) pada beberapa lokasi di bagian dalam *kiln*. Terdapat beberapa bentuk dan orientasi lifter tergantung fungsi dan posisi di dalam *kiln*.



Gambar 2.4 Potongan rotary kiln pada bagian tyre (kiri) dan bull gear (kanan)

#### 2.4. Model Matematika Aliran Material dan Energi di Rotary Kiln

Berdasarkan proses yang terjadi di *rotary kiln* maka terdapat enam aliran massa masuk dan dua aliran massa keluar, dengan demikian neraca massa *rotary kiln* dapat dinyatakan dalam persamaaan konservasi massa berikut:

$$M_{K,in} = M_{K,mo} + M_{K,lo} + M_{K,bc} + M_{K,ca} + M_{K,ap} + M_{K,rkf}$$
(2.9)

$$\mathbf{M}_{\mathrm{K,out}} = \mathbf{M}_{\mathrm{K,c}} + \mathbf{M}_{\mathrm{K,fgk}} \tag{2.10}$$

dengan M<sub>K,in</sub> : jumlah laju aliran massa masuk ke *rotary kiln* 

M<sub>K,out</sub> : jumlah laju aliran massa keluar dari rotary kiln

M<sub>K,mo</sub> : laju aliran massa main oil rotary kiln

M<sub>K,lo</sub> : laju aliran massa lance oil rotary kiln

M<sub>K,bc</sub> : laju aliran massa bituminous coal rotary kiln

M<sub>K,ca</sub> : laju aliran massa combustion air rotary kiln

M<sub>K,ap</sub> : laju aliran massa udara yang masuk melalui air pipe rotary kiln

M<sub>K,rkf</sub> : laju aliran massa ore rotary kiln feed

M<sub>K,c</sub> : laju aliran massa *calcine* 

M<sub>K,fgk</sub> : laju aliran massa *flue gas kiln* 

Proses yang berlangsung di *rotary kiln* memiliki enam bentuk masukan energi dan lima keluaran energi, sehingga neraca energi dapat dinyatakan dalam persamaaan konservasi energi berikut:

$$E_{K,in} = E_{K,mo} + E_{K,lo} + E_{K,bc} + E_{K,ca} + E_{K,ap} + E_{K,rkf}$$
(2.11)

$$E_{K,out} = E_{K,c} + E_{K,fgk} + E_{K,rr} + E_{K,ev} + E_{K,hl}$$
(2.12)

dengan E<sub>K,in</sub> : jumlah laju aliran energi masuk ke rotary kiln

E<sub>K,out</sub> : jumlah laju aliran energi keluar dari *rotary kiln* 

- E<sub>K,mo</sub> : laju aliran energi main oil rotary kiln
- E<sub>K,lo</sub> : laju aliran energi lance oil *rotary kiln*
- E<sub>K,bc</sub> : laju aliran energi bituminous coal *rotary kiln*
- E<sub>K,ca</sub> : laju aliran energi combustion air *rotary kiln*
- E<sub>K,ap</sub> : laju aliran energi udara yang masuk melalui air pipe rotary kiln
- EK,rkf : laju aliran energi ore rotary kiln feed
- E<sub>K,c</sub> : laju aliran energi *calcine*
- E<sub>K,fgk</sub> : laju aliran energi *flue gas kiln*
- E<sub>K,rr</sub> : laju aliran energi reaksi reduksi
- E<sub>K,ev</sub> : laju aliran energi penguapan
- $E_{K,hl}$  : laju aliran energi *heat loss* dari shell *kiln*

Besaran input dalam bentuk energi kimia dari *high sulfur fuel oil* dan *bituminous coal* dapat dihitung menggunakan formula berikut:

$E_{K,fo} = M_{K,fo} \times LHV_{fo}$	(2.	.1	3	)
$L_{\rm K,10} = 101_{\rm K,10} \times L11_{\rm V,10}$	( <u>~</u> .	• • •	υ,	,

$E_{K,bc} = M_{K,bc} \times LHV_{bc} $	(2.	14	4)	)
--	-----	----	----	---

dengan LHV<sub>fo</sub> : low heating value high sulfur fuel oil

LHV<sub>bc</sub> : low heating value bituminous coal

Besaran energi sensible dari *steam, combustion air, air pipe,* dan *rotary kiln feed ore, off-gas kiln* dan *calcine* dapat dihitung menggunakan formula berikut:  $E_{K,st} = M_{K,st} \times H_{st}$  (2.15)

$E_{K,ca} = M_{K,ca} \times H_{ca}$	(2.16)
$E_{K,ap} = M_{K,ap} \times H_{ap}$	(2.17)
$E_{K,rkf} = M_{K,rkf} \times H_{rkf}$	(2.18)
$E_{K,ogk} = (M_{K,ogk} \times H_{ogk})_{gas} + (M_{K,ogk} \times H_{ogk})_{solid}$	(2.19)
$E_{K,c} = M_{K,c} \times H_c$	(2.20)

dengan H<sub>st</sub> : entalpi steam

H<sub>ca</sub> : entalpi combustion air atau udara pembakaran

H<sub>ap</sub> : entalpi *air pipe* atau udara peniup samping

H<sub>rkf</sub> : entalpi rotary kiln feed atau pasokan bijih laterit kiln

Hogk : entalpi off-gas kiln

H<sub>c</sub> : entalpi *calcine* atau produk kiln

#### 2.5. Analisa Efisiensi Proses

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengetahui efisiensi energi suatu proses adalah dengan melakukan analisa aliran energi. Analisa aliran energi dapat digunakan untuk mengidentifikasi aliran energi hilang yang terbesar. Hasil analisa dapat ditampilkan dalam bentuk diagram, salah satu ilustrasi yang banyak digunakan adalah diagram Sankey.

Efisiensi energi didefinisikan sebagai perbandingan antara energi yang digunakan untuk proses dengan pasokan energi, dinyatakan dalam persamaanpersamaan berikut:

$$\mathbf{E}_{\mathbf{F},\mathbf{E}} + \mathbf{E}_{\mathbf{S}} = \mathbf{E}_{\mathbf{A}} + \mathbf{E}_{\mathbf{U}\mathbf{n}} \tag{2.13}$$

$$\eta_{e} = E_{A} / (E_{F,E} + E_{S})$$
(2.14)

$$\eta_{ep} = E_{Avo} / (E_{F,E} + E_S)$$
(2.15)

dengan E<sub>F,E</sub> : pasokan energi dari pembakaran bahan bakar

- E<sub>s</sub> : panas sensible material yang masuk
- E<sub>A</sub> : energi available atau energi yang digunakan untuk proses
- $E_{Un}$  : energi unavailable atau energi tidak dapat digunakan untuk proses
- $E_{Avo}$  : energi avoidable loss atau rugi energi yang dapat dimanfaatkan
- $\eta_e$  : efiensi energi
- $\eta_{ep}$  : discharge rate of energy flow

Apabila energi hilang ke lingkungan dapat dihindari dengan cara memanfaatkannya untuk proses yang lain maka discharge rate of energi flow atau laju pembuangan aliran energi dapat meningkat.

#### 2.6. Perpindahan Panas Dari Dinding Luar Rotary Kiln

Sebagian besar panas hilang (*heat loss*) dari dinding luar rotary kiln terlepas ke lingkungan melalui radiasi dan konveksi. Bagian dalam rotary kiln dilapisi dengan material tahan api (*refractory*) yang berfungsi untuk mengurangi panas yang hilang sekaligus melindungi material baja dinding kiln terhadap temperatur tinggi (overheat). Ketebalan refractory akan berkurang akibat abrasi material di dalam rotary kiln dan menambah panas yang terlepas ke lingkungan sehingga dibutuhkan kegiatan perawatan secara berkala. Panas dari rotary kiln juga hilang dengan cara perpindahan panas konduksi melalui permukaan tumpuan-tumpuan kiln, akan tetapi karena jumlah seluruh permukaan kontak hanya sekitar 0,039% dari luas permukaan dinding luar kiln dan temperatur permukaan kontak relatif rendah dengan rentang 50-80° C maka *heat loss* konduksi dapat diabaikan.

Perpindahan panas secara konveksi di sekeliling dinding luar rotary kiln terjadi tanpa bantuan kipas sehingga merupakan konveksi bebas dan dapat dimodelkan sebagai aliran eksternal horizontal pada silinder yang dapat dihitung menggunakan formula berikut (Kast et al., 2010):

$$Nu_{s,i} = \left\{ 0.60 + 0.387 [Ra_{s,i} \cdot f_3 (Pr_{s,i})]^{1/6} \right\}^2$$
(2.16)

$$f_{3}(Pr) = \left[1 + \left(0.559/Pr_{s,i}\right)^{9/16}\right]^{-16/9}$$
(2.17)

$$Ra_{s,i} = g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (t_{A,i} - t_0) / (v \cdot k)$$
(2.18)

$$\alpha_{s,i} = \left( Nu_{s,i} \cdot \lambda \right) / l \tag{2.19}$$

dengan  $Nu_{s,i}$  : angka Nusselt untuk setiap section

- $Ra_{s,i}$  : angka Rayleigh untuk setiap section
- $Pr_{s,i}$  : angka Prandtl untuk setiap section
- g : percepatan gravitasi
- *l* : panjang karakteristik (characteristic length)
- $\beta$  : thermal expansion coefficient
- $t_{A,i}$  : discharge rate of energy flow
- *v* : viskositas kinematik (kinematic viscosity)
- *k* : thermal diffusivity
- $\alpha_{s,i}$  : heat transfer coefficient
- $\lambda$  : thermal conductivity

Panjang karakteristik adalah diameter luar dinding rotary kiln l = 6 meter. Fungsi f<sub>3</sub>(Pr) menjabarkan dampak angka Prandtl (Kast et al., 2010) yang menunjukkan bahwa seluruh panas yang hilang melalui konveksi adalah jumlah dari seluruh section. Menurut Delpech perpindahan panas secara konveksi dominan pada kisaran temperatur 200 °C sedangkan radiasi lebih dominan pada temperatur yang lebih tinggi (Delpech et al., 2019). Perpindahan panas secara radiasi dihitung pada section yang sama dimana diasumsikan bahwa *emissivity* dari permukaan dinding luar dapat dianggap konstan  $\varepsilon = 0.8$  untuk permukaan logam tanpa cat yang teroksidasi (Chakrabarti, 2002).

Perhitungan *heat loss* dari dinding luar kiln dilakukan secara analitik dengan cara membagi panjang kiln sebesar 135 meter menjadi 44 *section* sesuai data

pengukuran temperatur. Jumlah data pada setiap section minimal 6 titik dan selanjutnya dihitung nilai rata-rata temperatur pada setiap *section* untuk perhitungan *heat loss* pada setiap *section* mulai dari ujung *output* sampai *input* kiln. Perhitungan *heat loss* dilakukan menggunakan formula berikut:

$$\dot{Q}_{conv} = \sum_{i=1}^{44} \alpha_{s,i} A_{s,i} (t_{s,i} - t_0)$$
(2.20)

$$\dot{Q}_{rad} = \sum_{i=1}^{44} \sigma \varepsilon A_{s,i} \left( T_{s,i}^4 - T_0^4 \right)$$
(2.21)

#### 2.7. Metode-metode Recovery Energy Rotary Kiln

Pemanfaatan kembali energi sisa (*recovery energy*) adalah salah satu upaya mengurangi biaya operasional dan mengurangi konsumsi bahan bakar fosil yang menghasilkan emisi karbondioksida (CO<sub>2</sub>). Di industri ferronickel *off-gas* dari rotary kiln banyak digunakan kembali sebagai gas panas rotary dryer. Selain itu off gas furnace juga dimanfaatkan kembali sebagai gas panas untuk rotary kiln (Liu et al., 2016). Kelebihan metode ini adalah efisiensi thermal yang tinggi dan biaya investasi yang relatif rendah. Kekurangan metode ini adalah penggunaan yang terbatas untuk kebutuhan pemanasan.





Pemanfaatan *off-gas rotary kiln* yang lain adalah untuk membangkitkan energi listrik yang relative lebih luas penggunaannya. Siklus organic rankine menggunakan fluida khusus yang memiliki temperature didih lebih rendah dibandingkan sistem daya konvensional yang menggunakan air. Beberapa fluida

yang banyak digunakan antara lain *Hydrofluorocarbons* (HFC), *Hydrocarbon* (HC), *Fluorocarbons/perfluorocarbons* (PFC).



Gambar 2.6 Skema pembangkit listrik menggunakan siklus organic rankine (Guo et al., 2015).

Recovery energy rotary kiln juga dapat dilakukan dengan memanfatkan panas dari dinding luar shell rotary kiln. Di beberapa industry pengolahan mineral panas yang dipancarkan oleh dinding luar rotary kiln ini dimanfaatkan untuk memanaskan udara pembakaran. Selain berfungsi untuk menaikkan entalpi udara pembakaran, pasokan udara dari lingkungan juga berfungsi mendinginkan temperature dinding luar rotary kiln.





Selain memanaskan udara, panas yang dipancarkan oleh dinding luar rotary kiln dapat juga dimanfaatkan untuk memanaskan air. Sogut membuat model matematis untuk memanfaatkan panas dari rotary kiln di pabrik cement untuk kebutuhan penduduk sekitar. Kekurangan metode ini adalah biaya investasi yang relatif besar dan mengurangi akses untuk perawatan dan pemeliharaan rotary kiln.



Gambar 2.8 Skema pemanfaatan *heat loss* dari dinding luar rotary kiln untuk pemanas air (Sogut et al., 2010).

Halaman ini sengaja dikosongkan

# BAB 3 METODOLOGI & ACUAN PUSTAKA

### 3.1. Diagram Alir Penelitian

Secara garis besar rencana penelitian digambarkan dalam diagram alir berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (lanjutan)

#### 3.2. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitan yang akan dilaksanakan dibagi dalam beberapa tahapan berikut ini:

1. Pengumpulan data

Subyek penelitian adalah *rotary kiln* di Process Plant PT Vale Indonesia. Data utama yang diperlukan meliputi data proses dan data operasi, antara lain laju massa tiap aliran material, temperatur material dan shell Kiln, kapasitas kalor cp, enthalpy, dan entropy. Data proses, spesifikasi peralatan dan gambar teknik tersimpan dalam database dokumen elektronik eDocs dan data operasi tersimpan dalam database Process Information Management System (PIMS). Untuk memastikan validitas data maka akan dilakukan diskusi dengan pihak yang terkait, antara lain process engineer dan instrumentation engineer.

2. Penyusunan model neraca massa dan energi

Penyusunan model matematika aliran material dan energi di *rotary kiln* untuk mendapatkan model neraca massa dan energi dilakukan dengan rujukan jurnal-jurnal referensi.

3. Perhitungan neraca massa

Data yang sudah dikumpulan pada tahap pertama dimasukkan dalam model matematika yang sudah disusun pada tahap kedua untuk melakukan perhitungan neraca massa secara analitis.

4. Analisa termodinamika dan analisa perpindahan panas

Analisa termodinamika dan analisa perpindahan panas dilakukan untuk mengetahui besaran energi untuk setiap aliran material dan energi. Properties aliran material dapat diketahui melalui pendekatan analisa termodinamika berdasarkan referensi terkait dan data *thermocouple* yang terpasang di sepanjang dinding dan *inlet* serta *outlet kiln*. Besaran energi panas yang dilepaskan ke lingkungan dari dinding luar kiln dilakukan secara analitik dengan cara membagi panjang kiln menjadi 44 *section* sesuai data pengukuran menggunakan thermal camera FLIR T1020 yang dapat mengukur temperatur hingga 2000 °C.

#### 5. Perhitungan neraca energi

Setelah besaran energi untuk setiap aliran material dan energi diketahui maka neraca energi dapat disusun. Selanjutnya dapat dihitung juga tingkat efisiensi penggunaan energi di *kiln*. Aliran energi yang tidak termanfaatkan saat ini adalah gas buang *kiln* dan perpindahan panas dari dinding luar *kiln* ke lingkungan sekitar.

#### 6. Analisa potensi peningkatan efisiensi energi kiln

Peningkatan efisiensi energi *kiln* secara signifikan dapat dilakukan dengan cara memanfaatkan energi gas buang dan panas dari dinding luar *kiln*. Energi gas buang dapat dimanfaatkan secara langsung untuk menggantikan bahan bakar di peralatan lain atau sebagai pemanas ketel uap untuk process steam ataupun pembangkit listrik. Panas dari dinding luar *kiln* dapat dimanfaatkan sebagai pemanas pasokan udara pembakaran atau pemanas air. Potensi-potensi tersebut dianalisa lebih lanjut dengan mempertimbangkan besaran energi yang dapat dimanfaatkan dan perkiraan biaya serta dampak terhadap proses produksi.

7. Perhitungan pemanfaatan gas buang kiln sebagai gas panas coal mill

Perhitungan lebih lanjut dilakukan terhadap potensi pemanfaatan gas buang *kiln* sebagai gas panas *coal mill*. Secara ekonomi dapat dihitung potensi penghematan bahan bakar diesel yang saat ini digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan gas panas *coal mill*. Analisa juga meliputi dampak terhadap operasi peralatan-peralatan di sistem *coal mill* berdasarkan analisa aliran massa dan energi.

8. Analisa penerapan sistem gas buang sekali pakai pada sistem *coal mill*.

Analisa lebih lanjut dilakukan terhadap potensi peningkatan aspek keselamatan coal mill dengan cara penerapan gas buang sekali pakai. Analisa juga meliputi dampak terhadap operasi peralatan-peralatan di sistem coal mill berdasarkan analisa aliran massa dan energi.

### 3.3. Rencana dan Jadwal Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan selama 6 bulan dengan rincian pada tabel 3.1.

Tabel	3.1	Jadwal	Penelitian
-------	-----	--------	------------

No	Kagiatan	Bulan 1			Bulan 2				Bulan 3				Bulan 4				Bulan 5				Bulan 6				
INO	Keglatan	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.	Studi Literatur																								
2.	Pengumpulan data																								
3.	Penyusunan model																								
4.	Perhitungan neraca massa																								
5.	Analisa termodinamika																								
6.	Analisa per-pindahan panas																								
7.	Perhitungan neraca energi																								
8.	Analisa potensi peningkatan efisiensi kiln																								
9.	Pemanfaatan gas buang kiln untuk coal mill																								
10.	Analisa penerapan gas sekali pakai																								
11.	Analisa Data dan diskusi																								
12.	Penyusunan Laporan																								

Halaman ini sengaja dikosongkan

# BAB 4 HASIL DAN DISKUSI

#### 4.1. Neraca Massa Rotary Kiln

Kiln yang menjadi obyek penelitian ini memiliki kapasitas produksi sebesar 241 ton *ore feed* per jam. Perhitungan neraca massa disusun berdasarkan skenario komposisi *ore rotary kiln feed* (RKF) sebagai berikut:

- Kadar air ore rotary kiln feed 20,6%
- Fraksi massa nikel berdasarkan berat % Ni 2,06%
- Fraksi massa besi berdasarkan berat % Fe 21,2%
- Fraksi massa cobalt berdasarkan berat % Co 0,07%
- Fraksi massa magnesium oksida berdasarkan berat % MgO 17,63%
- Fraksi massa silikon oksida berdasarkan berat % SiO2 37,32%
- Fraksi massa sulfur berdasarkan berat % S 0,12%
- Fraksi massa carbon berdasarkan berat % C 0,1%

Berdasarkan komposisi *ore* tersebut maka ditentukan parameter operasi *kiln*, antara lain ratio *ore*/reduktan (coal), komposisi coal untuk reduktan, distribusi udara on board (air pipe), ratio oli di main burner dan oil lance, aerasi udara pembakaran, udara leakage, *calcine* LOI (loss on ignition), *calcine* pre-reduction. Untuk mendapatkan komposisi *ore* dan parameter operasi *kiln* yang stabil dilakukan proses blending di fasilitas penyimpanan *ore* yang sudah dikeringkan (*Dried Ore Storage*) sebelum *ore* ditransfer dengan conveyor ke dalam *kiln*.

Perhitungan neraca massa Kiln disusun berdasarkan Process Flow Diagram dari manufacturer yaitu FLSmidth ditampilkan dalam tabel 4.1 dan diilustrasikan dalam diagram Sankey. Selisih antara input dan output sangat kecil dibawah 0,002% sehingga dapat disimpulkan kesimbangan massa terpenuhi. Komponen terbesar dari output *kiln* adalah off gas yang mencapai 65,1%, terdiri dari gas hasil pembakaran yang bercampur uap air sebanyak 58,5% dan partikel debu halus sebesar 6,5%.

Mass In	kg/h	(%)	Mass Out	kg/h	(%)
Ore	241,000	(56,6%)	Calcine	148,931	(34,9%)
HSFO	9,140	(2,1%)	Off gas	249,500	(58,5%)
Coal	7,224	(1,7%)	Dust in off gas	27,726	(6,5%)
Steam	980	(0,2%)			
Combustion air	21,300	(5%)			
Air pipe	146,521	(34,4%)			
Total in	426,165	(100%)	Total out	426,157	(100%)

Tabel 4.1 Neraca Massa Kiln Kapasitas Feed 241 Ton Per Jam



Gambar 4.1 Diagram Sankey untuk aliran massa rotary kiln 241 ton per Jam

### 4.2. Perhitungan Aliran Energi dan Neraca Energi Rotary Kiln

Proses yang berlangsung di *rotary kiln* memiliki enam bentuk masukan energi, yaitu  $E_{K,o}$  laju aliran energi oil,  $E_{K,bc}$  laju aliran energi bituminous coal,  $E_{K,s}$  laju aliran energi steam,  $E_{K,ca}$  laju aliran energi combustion air,  $E_{K,ap}$  laju aliran energi udara yang masuk melalui air pipe dan  $E_{K,rkf}$  laju aliran energi *ore rotary kiln* feed. Energi keluar terdiri dari lima bentuk, yaitu  $E_{K,c}$  laju aliran energi *calcine*,  $E_{K,ogk}$  laju aliran energi off gas *kiln*,  $E_{K,rr}$  laju aliran energi reaksi kimia reduksi,  $E_{K,ev}$  laju aliran energi penguapan dan  $E_{K,hl}$  laju aliran energi *heat loss* dari dinding luar *kiln*.

#### 4.2.1. Perhitungan Energi HSFO dan Coal

Heating value HSFO yang digunakan dalam perhitungan adalah sebesar 9625 kcal/kg atau 40271 kJ/kg. Batubara yang digunakan dalam perhitungan memiliki gross heating value 6213 kcal/kg atau 25995 kJ/kg dan kandungan air sekitar 16,27%, sehingga low heating value as fired batubara tersebut adalah 5835 kcal/kg atau 24414 kJ/kg. Jumlah pasokan HSFO dan batubara untuk *kiln* adalah sebesar 9140 kg/h dan 7224 kg/h. Energi input HSFO dan batubara yang digunakan di Kiln #5 adalah :

- HSFO input 9140 kg/h  $\times$  40271 kJ/kg maka  $E_{K,o}$  = 368,08 GJ/h
- Coal input 7224 kg/h  $\times$  24414 kJ/kg maka  $E_{K,bc}$  = 176,36 GJ/h

### 4.2.2. Perhitungan Energi Sensibel Udara Pembakaran, Udara Air Pipe, Steam, dan Ore

Pasokan udara untuk pembakaran dan peniupan udara samping, -air pipe-, diambil dari udara sekitar yang memiliki temperatur ambient sekitar 27 °C atau 300 K. Berdasarkan tabel termodinamika Moran-Saphiro diperoleh enthalpi udara pada 300 K sebesar 300,19 kJ/kg. Dengan demikian energi input udara pembakaran di Kiln #5 adalah :

- Udara pembakaran 21300 kg/h  $\times$  300,19 kJ/kg maka E<sub>K,ca</sub> = 6,39 GJ/h
- Udara air pipe 146521 kg/h  $\times$  300,19 kJ/kg maka  $E_{K,ap} = 43,96$  GJ/h

Steam yang digunakan untuk atomisasi HSFO memiliki temperatur 185 °C dengan tekanan static 105460 mm WG atau 10,35 bar. Berdasarkan tabel termodinamika Moran-Saphiro diperoleh enthalpi steam pada kondisi tersebut sebesar 2777,1 kJ/kg. Kebutuhan steam untuk Kiln #5 adalah 980 kg/h. Dengan demikian energi input steam di Kiln #5 adalah :

• Steam 981 kg/h × 2777,1 kJ/kg maka  $E_{K,s} = 2,72$  GJ/h

Ore untuk *rotary kiln* feed memiliki temperatur sekitar 25 °C dan specific heat diasumsikan 0.8 kJ/kg-K. Pada feed rate 241 t/h diperoleh energi input *ore* di Kiln #5 adalah :

• Ore 241000 kg/h  $\times$  0.8 kJ/kg-K  $\times$  25 °C maka E<sub>K,rkf</sub> = 4,82 GJ/h

#### 4.2.3. Perhitungan Energi Sensibel Calcine dan Off Gas

Calcine yang merupakan produk *rotary kiln* feed memiliki temperatur sekitar 703 oC pada ujung discharge end *kiln*. Specific heat *calcine* diasumsikan konstan sama dengan *ore rotary kiln* feed yaitu 0.8 kJ/kg-K. Pada feed rate 241 t/h diperoleh laju output *calcine* sebesar 148931 kg/h sehingga besaran energi aliran *calcine* adalah:

• Calcine 148931 kg/h × 0.8 kJ/kg-K × 703 °C maka  $E_{K,c} = 83,76$  GJ/h

Off gas atau gas buang *rotary kiln* memiliki temperatur 257 oC terdiri dari massa udara 249500 kg/h dan debu 27726 kg/h. Berdasarkan tabel termodinamika Moran-Saphiro diperoleh enthalpi udara pada 257 oC atau 530 K sebesar 533,98 kJ/kg. Specific heat debu off gas diasumsikan konstan sama dengan *ore rotary kiln* feed yaitu 0.8 kJ/kg-K. Dengan demikian besaran energi aliran off gas adalah:

- Off gas (udara) 249500 kg/h × 533,98 kJ/kg = 133,23 GJ/h
- Off gas (debu) 27726 kg/h  $\times$  0.8 kJ/kg-K  $\times$  257 °C = 5,7 GJ/h
- Energi dalam aliran off gas (udara+debu)  $E_{K,ogk} = 138,93$  GJ/h

#### 4.2.4. Perhitungan Energi Penguapan Kelembapan Ore

Ore untuk *rotary kiln* feed memiliki kelembapan atau kandungan air sebesar 20,6%, sehingga pada feed rate 241 t/h jumlah laju massa air yang harus diuapkan adalah 49646 kg/h. Selain itu terdapat uap air untuk atomisasi HSFO sebesar 980 kg/h. Enthalpi udara pada 250 °C sebesar 2974,5 kJ/kg sehingga kebutuhan energi penguapan di Kiln #5 adalah :

•  $E_{K,ev} = 50626 \text{ kg/h} \times 2974,5 \text{ kJ/kg} = 150,59 \text{ GJ/h}$ 

#### 4.2.5. Perhitungan Energi Reaksi Kimia Reduksi

Reaksi kimia reduksi dan dekomposisi yang terjadi di dalam *rotary kiln* termasuk reaksi endotermik yaitu membutuhkan energi. Kebutuhan energi per ton

*calcine* untuk reaksi kimia sekitar 1343,35 kJ/kg sehingga kebutuhan energi untuk reaksi kimia di Kiln #5 adalah :

•  $E_{K,ev} = 148931 \text{ kg/h} \times 1343,35 \text{ kJ/kg} = 200,07 \text{ GJ/h}$ 

#### 4.2.6. Perhitungan Heat Loss dari Dinding Luar Kiln

Heat losses dari dinding luar *rotary kiln* sebagian besar terjadi secara radiasi dan konveksi. Perpindahan panas juga terjadi secara konduksi melalui tyre yang bersentuhan dengan support roller akan tetapi karena area kontak gelinding sangat kecil dibandingkan luas permukaan keseluruhan dinding luar *kiln* dan temperatur tyre relatif rendah maka *heat loss*es dari konduksi dapat diabaikan. Heat losses secara konveksi dihitung berdasarkan perpindahan panas dalam bentuk konveksi bebas dari aliran udara yang melingkupi silinder horizontal. Heat losses secara radiasi dari dinding luar *kiln* dihitung dengan asumsi emissivity permukaan dinding luar *kiln*  $\varepsilon = 0.8$ . Temperatur dinding luar *kiln* diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan camera infrared.

				Label	Value	
				SP01	244.1°C	
	1.1			SP02	258.1°C	
Spn1	8706	SP07	SP13	SP03	238.9°C	
				SP04	266.4°C	
SP5802		SP17	SP14	SP05	292.7°C	
	apost	SPUS_ +	SPM_	SP06	278.3°C	
	1. A.		SP15	SP07	289.2°C	
-SSP83	SP04	SP09+SP16+	SPILL V	SP08	301.9°C	
	Vester			SP09	301.1°C	
				SP10	280.3°C	
				SP11	292.5°C	
				SP12	294.1°C	
	Contractory of the local division of the loc		No.	SP13	126.6°C	
int soll is			/	SP14	114.4°C	
				SP15	109.3°C	
				SP16	309.2°C	
			3 2 1	SP17	314.5°C	
				SP18	179.0°C	
				SP19	175.4°C	

Gambar 4.2 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier 1



Gambar 4.3 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 air pipe 4



Label	Value	
SP01	235.0°C	- i
SP02	236.0°C	2
SP03	226.6°C	1
SP04	212.5°C	
SP05	223.2°C	8
SP06	219.6°C	1
SP07	183.9°C	
SP08	186.4°C	8
SP09	187.6°C	Ĵ.
SP10	171.0°C	
SP11	174.4°C	8
SP12	179.1°C	i l
SP13	189.1°C	
SP14	176.0°C	X
SP15	173.3°C	
SP16	80.4°C	2
SP17	79.2°C	2
SP18	88.6°C	j.
	1	- 2

Gambar 4.4 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier 2

	Label	Value	
AD. IN THE REAL PROPERTY AND A	SP01	181.7°C	
SP04 SP08 SP08 SP14	SP02	181.2°C	
	SP03	188.6°C	
	SP04	185.4°C	
SIF02. / SP06	SP05	176.0°C	
SPIG SPIG	SP06	180.6°C	
	SP07	176.6°C	
SPI1 date	SP08	131.8°C	
	SP09	137.2°C	
	SP10	159.5°C	
	SP11	137.9°C	
	SP12	134.9°C	
	SP13	137.9°C	
	SP14	146.1°C	
	SP15	138.5°C	
	SP16	183.9°C	
		·	

Gambar 4.5 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 air pipe 3

	Label	Value	
and the second of the second	SP01	132.0°C	
SP10	SP02	140.6°C	
SP01 SP07 SP08 SP13 SP14 **+	SP03	129.3°C	
	SP04	135.6°C	
	SP05	122.5°C	
CPO2 SPO2 SP12 SP16, SP1	SP06	124.2°C	
and the second	SP07	122.6°C	
······································	SP08	105.7°C	
SP10 SP11 SP11 SP11 SP11	SP09	112.8°C	
	SP10	111.2°C	
	SP11	101.8°C	
	SP12	104.1°C	
	SP13	101.7°C	
	SP14	96.5°C	
	SP15	97.7°C	
	SP16	94.3°C	
	SP17	57.2°C	
	SP18	56.2°C	
	SP19	59.1°C	

Gambar 4.6 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier 3



abel	Value	
PO1	101.7°C	
SP02	131.3°C	
6P03	132.2°C	
SP04	104.5°C	
SP05	119.9°C	
SP06	124.6°C	
SP07	118.0°C	
SP08	122.1°C	
6P09	117.9°C	
SP10	107.4°C	
SP11	110.0°C	
SP12	105.4°C	



Gambar 4.7 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier slip ring



Gambar 4.8 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier 3-4



Label	Value	
SP01	63.5°C	
SP02	65.9°C	
SP03	67.4°C	
SP04	67.5°C	
SP05	70.6°C	
SP06	68.7°C	
SP07	63.8°C	
SP08	65.0°C	
SP09	62.4°C	
SP10	40.1°C	
SP11	40.7°C	
SP12	40.2°C	
SP13	61.9°C	
SP14	62.7°C	
SP15	59.7°C	

Gambar 4.9 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 Pier 4



Label	Value	
SP01	63.4°C	2
SP02	64.2°C	-
SP03	63.7°C	8
SP04	58.3°C	ŝ
SP05	60.0°C	
SP06	58.9°C	Ĩ
SP07	52.3°C	- C
SP08	54.4°C	
SP09	43.6°C	2

Gambar 4.10 Pengambilan data temperatur dinding luar Kiln #5 feed end

Dinding luar Kiln #5 sepanjang 135 meter dibagi menjadi 44 *section* sesuai dengan dimensi antar tyre dan posisi air pipe. Temperatur untuk setiap *section* diambil dari temperatur rata-rata hasil pengukuran temperatur dinding luar *kiln*. Hasil perhitungan *heat flow rate* ditampilkan dalam tabel 4.2 berikut.

Section	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Length (m)	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	1	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
T surface (deg C)	253.3	280.2	303.7	270.6	282.2	120.8	283.5	263.5	258.2	256.9	256.1	246.7	237.0	218.5	205.3
Convection coeff (W/m2-K)	7.5	7.5	7.4	7.5	7.5	6.9	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.4	7.4	7.4
Q convection (kW)	98.6	110.3	120.4	106.2	111.2	12.2	104.6	96.4	94.3	93.7	93.4	89.5	85.5	77.7	72.1
Q radiation (kW)	181.9	226.8	271.6	210.0	230.3	13.6	217.8	185.3	177.4	175.4	174.3	160.7	147.7	124.6	109.7
Heat flow rate (kW)	280.5	337.1	392.1	316.2	341.5	25.8	322.3	281.7	271.7	269.1	267.7	250.2	233.1	202.2	181.8
Section	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Length (m)	2.9	1	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	1	3.8	3.8
T surface (deg C)	222.2	98.3	223.8	210.0	186.4	197.5	276.7	184.9	173.3	159.0	134.8	125.4	67.9	121.7	116.3
Convection coeff (W/m2-K)	7.4	6.5	7.4	7.4	7.3	7.4	7.5	7.3	7.3	7.2	7.0	6.9	5.8	6.9	6.8
Q convection (kW)	79.3	8.8	91.0	84.3	72.8	78.2	115.8	72.0	66.3	59.2	47.1	42.4	4.5	46.7	43.6
Q radiation (kW)	129.0	9.3	149.0	130.7	102.9	115.4	234.8	101.2	89.1	75.4	55.2	48.2	4.6	52.6	48.3
Heat flow rate (kW)	208.3	18.1	239.9	215.1	175.7	193.7	350.6	173.2	155.4	134.7	102.3	90.6	9.1	99.3	92.0
Section	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	Σ
Length (m)	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	135
T surface (deg C)	119.3	107.6	110.0	103.3	93.9	74.2	80.2	82.3	43.7	78.4	73.5	75.1	64.9	66.2	
Convection coeff (W/m2-K)	6.9	6.7	6.7	6.6	6.5	6.0	6.1	6.2	4.5	6.1	6.0	6.0	5.7	5.7	
Q convection (kW)	45.3	38.7	40.0	36.2	30.9	20.2	23.4	24.5	1.4	18.3	16.2	16.9	12.6	13.1	2,615.8
Q radiation (kW)	50.7	41.9	43.6	38.9	32.5	20.9	24.2	25.4	1.7	18.9	16.7	17.4	13.1	13.6	4,312.4
Heat flow rate (kW)	96.0	80.5	83.6	75.1	63.5	41.1	47.7	50.0	3.1	37.2	32.9	34.3	25.7	26.7	6,928.2

Tabel 4.2 Tabel Perhitungan Heat Losses dari Dinding Luar Kiln



Gambar 4.11 Temperatur dinding luar kiln dan heat loss

### 4.2.7. Neraca Energi Rotary Kiln

Berdasarkan hasil perhitungan aliran energi maka dapat disusun neraca energi *rotary kiln* seperti ditampilkan dalam tabel dan diagram Sankey berikut ini.

Tabel 4.3 Neraca Energi Kiln Kapasitas Feed 241 Ton Per Jam

Energy In	GJ/h	(%)	<b>Energy Out</b>	GJ/h	(%)
Ore	4,82	(0,80%)	Calcine	83,76	(13,91%)
HSFO	368,08	(61,11%)	Evaporation heat	150,59	(25,00%)
Coal	176,36	(29,28%)	Off gas	138,93	(23,07%)
Steam	2,72	(0,45%)	Heat loss	24,94	(4,14%)
Combustion air	6,39	(1,06%)	Chemical reaction	204,12	(33,89%)
Air pipe	43,96	(7,30%)			
Total in	602,33	(100%)	Total out	602,33	(100%)



Calcine (13,91%)

Gambar 4.12 Diagram Sankey aliran energi rotary kiln

### 4.3. Potensi Peningkatan Efisiensi Energi Kiln

Salah satu manfaat neraca energi adalah untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan energi. Energi yang terbuang dalam aliran off gas *rotary kiln* #5 mencapai 138,93 GJ/hour atau sekitar 23,07% dari keseluruhan energi input *kiln* sangat berpotensi untuk dimanfaatkan kembali. Salah satu cara meningkatkan efisiensi energi di *rotary kiln* adalah memanfaatkan gas buang *rotary kiln* sebagai input energi di rotary dryer (Liu, Li, Cheung, & Wu, 2016). Gas buang dapat juga dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik menggunakan organic rankine cycle (Guo, Du, Yang, & Yang, 2015).

Temperatur off gas Kiln #5 rata-rata setiap jam sepanjang periode 2014-2017 ditampilkan dalam Gambar 4.13. Berdasarkan data tersebut selama 93% dari total running hours Kiln #5 temperatur off gas berada di atas 180 °C dengan temperatur maksimum 324 °C. Temperatur off gas akan turun di bawah temperatur 180 °C ketika peralatan dimatikan pada saat shutdown untuk perawatan rutin dan pada saat heating up atau cooling down.



Gambar 4.13 Temperatur rata-rata per jam gas buang kiln tahun 2014-2017

Energi panas yang berasal dari radiasi dan konveksi shell *kiln* dapat dimanfaatkan sebagai pemanas mula untuk pasokan udara pembakaran *kiln* menggunakan *recuperator* sebagai alat penukar panas (Karamarkovic et al., 2013).

Heat loss dari dinding luar shell *kiln* ini mencapai 28,99 GJ/h atau sekitar 4,14% dari keseluruhan energi input *kiln*.

#### 4.3.1. Kiln off-gas potential 122,25 GJ/jam

Energi yang terkandung di dalam aliran *off-gas kiln* mencapai 138.93 GJ/jam sehingga memiliki potensi yang besar untuk pemanfaatan kembali. Berdasarkan data tahun 2014-2017, temperatur *off-gas* rata-rata pada periode waktu tersebut 214,82 °C dengan temperatur maksimum 324 °C. Dengan memperhitungkan data rata-rata ini maka potensi energi yang terkandung di dalam aliran off gas *kiln* turun menjadi 122,25 GJ/jam dengan laju massa off-gas 249500 kg per jam. Nilai ini lebih rendah sekitar 16,1% dibandingkan perhitungan awal akan tetapi besaran energi masih sangat besar untuk dimanfaatkan lebih lanjut.

Kiln off gas dapat dimanfaatkan secara langsung untuk pemanasan atau dikonversi menjadi energi listrik. Penggunaan langsung memiliki efisiensi recovery yang lebih tinggi dibandingkan dikonversi menjadi listrik, akan tetapi alternatif penggunaan terbatas pada lokasi dan jenis peralatan yang dapat memanfaatkan energi panas tersebut. Jarak dari *rotary kiln* ke peralatan penerima akan mempengaruhi jumlah investasi yang diperlukan untuk implementasi pemanfaatan energi dan rugi-rugi tekanan dan *heat loss*. Coal mill terletak di sebelah *rotary kiln* sehingga membutuhkan investasi yang murah dan rugi-rugi energi yang kecil. Temperatur gas panas yang dibutuhkan untuk *coal mill* adalah 248 °C.

Unit produksi lain yang dapat memanfaatkan gas buang *kiln* secara langsung untuk pemanasan adalah rotary dryer. Rotary dryer berjarak sekitar 250 meter dari *rotary kiln*, akibatnya investasi dan rugi-rugi tekanan dan *heat loss* cukup besar dibandingkan pemanfaatan di *coal mill*. Temperatur gas panas yang dibutuhkan untuk rotary dryer adalah 800 °C. Off-gas *kiln* dapat dimanfaatkan sebagai pemanas mula untuk combustion air dengan potensi 12 GJ/jam. Pemanfaatan lain sebagai gas panas untuk rotary dryer memiliki potensi yang mencapai 100 GJ/jam akan tetapi membutuhkan modifikasi yang cukup besar pada ruang bakar dan sistem penyalaan rotary dryer.

Off-gas *kiln* dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan siklus pembangkit daya organic Rankine. Potensi energi listrik yang dapat dibangkitkan

mencapai 8 MW. Pemanfaatan *off-gas kiln* untuk pembangkit listrik membutuhkan investasi yang besar dan lahan yang cukup besar untuk pembangunan peralatanperalatan utama yang antara lain meliputi turbin, generator, pompa, condenser dan peralatan penunjang lain.

#### 4.3.2. Panas yang hilang (heat loss) dari dinding luar kiln 11,1 GJ/jam

Dinding luar *rotary kiln* memancarkan panas 24.9 GJ/jam dari seluruh permukaannya akan tetapi hanya sekitar 22% atau 30-meter yang memiliki intensitas panas yang tinggi dan dampak operasional yang kecil. Bagian dinding luar dari ujung keluaran *kiln* sampai support 1 sepanjang 15 meter melepaskan panas secara radiasi dan konveksi mencapai 6 GJ/jam. Bagian dinding luar *kiln* ini juga tidak memiliki peralatan yang menempel selain sensor temperatur. Bagian dinding luar berikutnya dari support 1 sampai air pipe #4 sepanjang 15 meter melepaskan panas secara radiasi dan konveksi mencapai 5,1 GJ/jam. Bagian dinding luar *kiln* ini juga tidak memiliki memiliki peralatan yang menempel selain sensor temperatur. Sekitar 45% dari total *heat loss kiln* dipancarkan oleh kedua section ini. Bagian dinding luar *kiln* yang lain sepanjang 105 meter memiliki intensitas panas yang jauh lebih rendah dan tingkat kesulitan pemasangan peralatan penukar panas yang lebih tinggi akibat adanya peralatan-peralatan yang menempel di permukaan dinding luar antara lain air pipe blower, slip ring, panel listrik, bull gear, dan lain-lain.

Pemanfaatan panas dari dinding luar *kiln* dilakukan dengan memasang recurepator atau peralatan penukar panas di sekeliling dinding luar *kiln* untuk pemanasan awal udara pembakaran untuk sistem pembakaran *kiln*. Udara masuk melalui ujung-ujung recuperator dan dipanaskan oleh radiasi dan konveksi dari dinding luar *kiln*. Outlet recuperator di bagian tengah dihubungkan dengan inlet fan yang memasok udara pembakaran *kiln*. Energi sensible udara pembakaran akan meningkat dan akibatnya efisiensi *kiln* akan meningkat. Recuperator akan melingkupi permukaan *kiln* sehingga harus dipindahkan apabila ada pekerjaan maintenance untuk perbaikan dinding luar.

#### 4.3.3. Kajian Recovery Energy Rotary Kiln

Setelah potensi teknis dari alternatif-alternatif pemanfaatan energi diketahui maka evaluasi dilakukan dengan mempertimbangkan aspek biaya dan resiko. Perkiraan biaya mempertimbangkan total cost kepemilikan untuk setiap alternatif pemanfaatan energi. Faktor resiko meliputi aspek teknis, aspek lingkungan kesehatan dan keselamatan serta aspek produksi. Pemanfaatan *off-gas kiln* untuk gas panas *coal mill* adalah pilihan yang terbaik karena penghematan energi yang cukup besar, investasi yang paling kecil dan resiko yang paling kecil. Pemanfaatan *off-gas kiln* untuk pemanas mula rotary dryer juga merupakan pilihan yang menguntungkan akan tetapi membutuhkan investasi dan biaya operasional yang lebih tinggi karena jarak yang lebih jauh dibandingkan *coal mill*. Pemanfaatan *kiln off-gas* untuk gas panas rotary dryer juga merupakan pilihan yang menguntungkan akan tetapi membutuhkan investasi dan resiko yang lebih tinggi karena dibutuhkan investasi dan resiko yang lebih tinggi karena dibutuhkan modifikasi yang besar terhadap ruang bakar.



Gambar 4.14 Peta area rotary kiln #5 dan area sekitarnya

No	Recovery Energy	Potensi	Perkiraan	Resiko
		Energi	Biaya	
1.	Pemanfaatan off-gas kiln sebagai gas	14,19	Rp 1,5	rendah
	panas <i>coal mill</i>	GJ/jam	milyar	
2.	Pemanfaatan off-gas kiln untuk pemanas	13,68	Rp 3	rendah
	mula udara pembakaran rotary dryer	GJ/jam	milyar	
3.	Heat recovery dinding luar kiln untuk	11,1	Rp 3	sedang
	pemanas mula udara pembakaran <i>kiln</i>	GJ/jam	milyar	
4.	Pemanfaatan off-gas kiln sebagai gas	100	Rp 30	sedang
	panas rotary dyer	GJ/jam	milyar	
5.	Pemanfaatan off-gas kiln sebagai	28,8	Rp 300	tinggi
	pembangkit listrik menggunakan siklus	GJ/jam	milyar	
	pembangkit daya organic Rankine.	(8 MW)		

**Tabel 4.4 Kajian Recovery Energy Rotary Kiln** 

#### 4.4. Pemanfaatan off-gas kiln untuk gas panas coal mill

Pemanfaatan *off-gas kiln* secara langsung untuk pemanasan lebih menguntungkan karena efisiensi yang lebih tinggi dan investasi yang relatif rendah. Coal mill membutuhkan gas panas sebesar 77620 Nm<sup>3</sup>/jam (90670 kg/jam) dengan temperatur 248 °C untuk memanaskan batubara dan proses lain di dalam *coal mill*. Saat ini sekitar 80% gas buang *coal mill* disirkulasikan kembali ke inlet *coal mill* dan sistem pembakaran untuk mengurangi konsumsi bahan bakar. Temperatur aliran gas buang *coal mill* relatif rendah hanya sekitar 80 °C dengan penghematan energi of 4,51 GJ/h. Sistem pembakaran *coal mill* dengan bahan bakar diesel memasok tambahan energi untuk mempertahankan temperatur gas panas *coal mill* sesuai kebutuhan yaitu 248 °C. Kebutuhan energi untuk sistem pembakaran *coal mill* mencapai 17,66 GJ/jam.

Off-gas *kiln* yang memiliki laju aliran sebesar 224570 Nm<sup>3</sup>/jam (249500 kg/jam) dan temperatur rata-rata 214,6 °C dapat digunakan untuk menggantikan sistem sirkulasi *off-gas coal mill* sepenuhnya. Potensi pemanfaatan energi dari *off-*

*gas kiln* sebesar 14,19 GJ/jam dapat dicapai dengan mengalirkan 81000 Nm<sup>3</sup>/jam (90000 kg/jam) *off-gas kiln* untuk gas panas *coal mill*. Kebutuhan energi untuk sistem pembakaran *coal mill* akan turun dari 17,66 GJ/jam menjadi 3,48 GJ/jam, atau berkurang sebanyak 80,3%. Dengan asumsi harga diesel sebesar 0,83 USD per liter dan heating value 36900 kJ/liter maka penghematan biaya bahan bakar mencapai USD 319,4 per jam atau sekitar USD 2,5 juta per tahun.



Gambar 4.15 Skema pemanfaatan off-gas kiln untuk gas panas coal mill

#### 4.5. Potensi Ledakan Akibat Kebocoran Baghouse di Sistem Coal Mill

Batubara yang sudah dihaluskan (pulverized coal) sangat mudah terbakar karena memiliki luas permukaan yang sangat besar. Peralatan-peralatan kritis di jalur batubara halus dilengkapi katup pelepas tekanan lebih (*explosion vent*) dan sistem pemadam kebakaran untuk mengurangi dampak apabila terjadi ledakan. Tiga prasyarat kondisi yang memungkinkan terjadinya ledakan adalah:

- konsentrasi debu batubara (*combustible*) 30-2000 gram per m<sup>3</sup> udara,
- kadar oksigen diatas konsentrasi kritis 14%,
- sumber penyalaan (*ignition source*) diatas energi penyalaan minimum.

Saat ini sistem resirkulasi off gas coal mill memiliki resiko ledakan pada kondisi abnormal yaitu ketika terjadi kegagalan sistem proteksi. Faktor prasyarat ledakan yang pertama yaitu konsentrasi debu batubara (*combustible*) 30-2000 gram

per m<sup>3</sup> udara dapat terpenuhi ketika terjadi kebocoran pada baghouse yang memungkinkan batubara halus terbawa oleh aliran resirkulasi gas buang. Kebocoran pada baghouse dapat terjadi melalui filter-filter yang berlubang dan kerusakan sekat-sekat antara ruang udara kotor dan besih. Sistem monitor kebocoran yang digunakan saat ini adalah sensor opacity yang akan menghentikan operasi coal mill ketika melebihi ambang batas yang sudah ditentukan.

Faktor prasyarat ledakan yang kedua adalah kadar oksigen diatas konsentrasi kritis 14% dapat terpenuhi ketika terjadi intrusi udara atmosfer yang masuk ke dalam sistem coal mill melalui celah sekat-sekat di *coal mill, ducting,* ataupun peralatan lain di sepanjang jalur off gas. Sistem monitor kadar oksigen yang digunakan saat ini adalah sensor O<sub>2</sub> yang akan menghentikan operasi coal mill ketika melebihi ambang batas yang sudah ditentukan.

Faktor prasyarat ledakan yang ketiga adalah adanya sumber penyalaan (*ignition source*) diatas energi penyalaan minimum batubara halus yang dibawa oleh udara (*airborne*). Norman meneliti karakteristik ledakan batubara jenis *high volatile bituminous* Indonesia (Sebuku) dan mendapatkan bahwa energi penyalaan minimum sebesar 60 mJ dengan *minimum cloud ignition temperature* (MCIT) sebesar 540 °C (Norman et al., 2012). Faktor ketiga ini dapat terpenuhi pada area keluaran ruang bakar yang memiliki temperatur sekitar 800 °C.

Dari ketiga prasyarat ledakan yang dapat dikendalikan pada kondisi normal operasi adalah mencegah combustible masuk ke sistem resirkulasi dan menjaga konsentrasi oksigen dibawah kadar kritis. Namun pada kondisi abnormal resiko ledakan masih bisa terjadi, misalnya ketika ada kebocoran combustible, intrusi oksigen dari udara atmosfer, dan kegagalan sistem proteksi. Dengan demikian pencegahan ledakan yang paling baik adalah dengan metode eliminasi satu atau dua faktor prasyarat ledakan tersebut. Pemanfaatan gas buang rotary kiln untuk menggantikan resirkulasi off gas coal mill akan meminimalkan dua faktor prasyarat ledakan, yaitu *combustible* dan oksigen yang berlebih.

Pemanfaatan gas buang rotary kiln akan memungkinkan penerapan sistem gas buang sekali pakai (once-through) pada sistem coal mill sehingga tidak ada lagi aliran resirkulasi off gas coal mill yang berpotensi membawa batubara halus. Selain itu off gas kiln memiliki kadar oksigen dibawah konsentrasi kritis 12% sehingga akan membantu menurunkan resiko ledakan di coal mill.

Halamn Ini Sengaja Dikosongkan

# BAB 5

### **KESIMPULAN & SARAN**

Berdasarkan pada hasil penelitian ini, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1. Hasil analisa energi pada *rotary kiln* menunjukkan bahwa penggunaan energi untuk kebutuhan proses pirometalurgi pada suatu fasilitas pengolahan nikel memiliki efisiensi energi 72,79%. Energi yang tidak termanfaatkan terdiri dari energi di dalam aliran *off-gas kiln* (23,07%) dan perpindahan panas dari dinding luar *kiln* (4,14%).
- 2. Konservasi energi pada peralatan *Rotary kiln* di PT Vale Indonesia dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu pemanfaatan off gas *kiln* sebagai gas panas *coal mill*, pemanfaatan off gas *kiln* untuk pemanas mula udara pembakaran rotary dryer, pemanfaatan panas dinding luar *kiln* untuk pemanas mula udara pembakaran *kiln*, pemanfaatan off gas *kiln* sebagai gas panas rotary dyer dan pemanfaatan off gas *kiln* sebagai pembangkit listrik menggunakan siklus pembangkit daya organic Rankine.
- 3. Potensi pemanfaatan energi dari off-gas kiln sebesar 14,19 GJ/jam dapat dicapai dengan mengalirkan 81000 Nm<sup>3</sup>/jam (90000 kg/jam) off-gas kiln sebagai gas panas coal mill dengan cara menggantikan sistem sirkulasi ulang off-gas coal mill. Kebutuhan energi untuk sistem pembakaran coal mill turun 80,3% dari 17,66 GJ/jam menjadi 3,48 GJ/jam dan penghematan biaya bahan bakar mencapai USD 319,4 per jam atau sekitar USD 2,5 juta per tahun.
- 4. Penerapan sistem gas buang sekali pakai (once-through) pada sistem coal mill akan mengurangi potensi ledakan karena konsentrasi oksigen off gas kiln di bawah konsentrasi kritis 12% dan tidak ada aliran resirkulasi yang berpotensi membawa bahan mudah terbakar (*combustible*).

Cukup banyak potensi pemanfaatan energi di rotary kiln yang belum dikaji lebih lanjut. Beberapa hal yang dapat dikaji dalam penelitian selanjutnya antara lain:

- Pemanfaatan off gas kiln sebagai gas panas untuk *rotary dryer* mengingat potensi pemanfaatan energi yang masih cukup besar. Beberapa hasl yang perlu dikaji lebih detail antara lain kebutuhan modifikasi yang besar terhadap ruang bakar dan investasi yang dibutuhkan.
- 2. Dampak kandungan unsur-unsur kimiawi off-gas terhadap proses produksi di coal mill ataupun *rotary dryer*.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2011). Performance modeling of radiant heat recovery exchangers for rotary kilns. *Applied Thermal Engineering 31*, 2578-2589.
- Chakrabarti, B. K. (2002). Investigations on heat loss through the kiln shell in magnesite dead burning process: a case study. *Applied Thermal Engineering* 22, 1339–1345.
- Delpech, B., Axcell, B., & Jouhara, H. (2019). Experimental investigation of a radiative heat pipe for waste heat recovery in a ceramics kiln. *Energy 170*, 636-651.
- Guo, C., Du, X., Yang, L., & Yang, Y. (2015). Organic Rankine cycle for power recovery of exhaust flue gas. *Applied Thermal Engineering* 75, 135-144.
- International Energy Agency. (2018, March). *Global Energy & CO2 Status Report 2017*. Retrieved from International Energy Agency: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GECO2017.pdf
- Kabir, G., Abubakar, A., & El-Nafaty, U. (2010). Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant. *Energy*, 1237–1243.
- Karamarkovic, V., Marasevic, M., Karamarkovic, R., & Karamarkovic, M. (2013). Recuperator for waste heat recovery from rotary kilns. *Applied Thermal Engineering* 54, 470-480.
- Kast, W., Klan, H., & Thess, A. (2010). Heat Transfer by Free Convection: External Flows. In *VDI Heat Atlas* (pp. 667-672). Berlin: Springer.
- Khoo, J. Z., Haque, N., Woodbridge, G., McDonald, R., & Bhattacharya, S. (2017). A life cycle assessment of a new laterite processing technology. *Journal of Cleaner Production 142*, 1765-1777.
- Liu, P., Li, B., Cheung, S. C., & Wu, W. (2016). Material and energy flows in rotary kilnelectric furnace smelting of ferronickel alloy with energy saving. *Applied Thermal Engineering 109*, 542-559.
- Mishra, B. (2001). Cobalt and Nickel Production. In *Encyclopedia of Materials: Science* and Technology (Second Edition) (pp. 1288-1294). Elsevier.
- Norgate, T., & Jahanshahi, S. (2011). Assessing the energy and greenhouse gas footprints of nickel laterite processing. *Minerals Engineering* 24, 698-707.
- Norman, F., Berghmans, J., & Verplaetsen, F. (2012). The dust explosion characteristics of coal dust. Beijing: Elsevier.

- Rong, W., Li, B., Liu, P., & Qi, F. (2017). Exergy assessment of a rotary kiln-electric furnace smelting of ferronickel alloy. *Energy 138*, 942-953.
- Sogut, Z., Oktay, Z., & Karakoc, H. (2010). Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln. *Applied Thermal Engineering 30*, 817-825.
- Yin, Q., Du, W.-J., Ji, X.-L., & Cheng, L. (2016). Optimization design and economic analyses of heat recovery exchangers on rotary kilns. *Applied Energy 180*, 743-756.