



TESIS - TF185471

**Pemanfaatan Waste Heat Boiler untuk
Memproduksi Uap Jenuh dengan Memanfaatkan
Panas Buang dari Tungku Listrik no. 4 Peleburan
Calcine PT Vale Indonesia**

Febrin Sitorus
NRP. 02311650022021

DOSEN PEMBIMBING
Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI TERBARUKAN
JURUSAN TEKNIK FISIKA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019

LEMBAR PENGESAHAN

TESIS

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

Oleh:

Febrin Sitorus

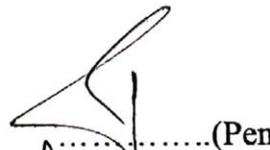
NRP: 02311650022021

Tanggal Ujian : 7 January 2019

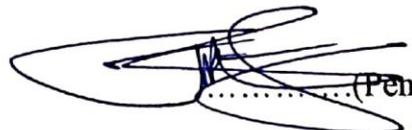
Periode Wisuda: 2019

Disetujui Oleh:

1. Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA
NIP:
2. Gunawan Nugroho, ST, MT, PhD
NIP:
3. Dr.Ir Syamsul Arifin, MT
NIP:


.....(Pembimbing)


.....(Penguji)


.....(Penguji)

Dekan Fakultas Teknologi Industri,




Bambang Lelono Widjiantoro, ST, MT

NIP. 19690507 1995121 001

Pemanfaatan *Waste Heat Boiler* untuk Memproduksi Uap Jenuh dengan memanfaatkan Panas Buang dari Tungku Listrik no.4 Peleburan *Calcine* PT Vale Indonesia

Nama Mahasiswa : Febrin Sitorus
NRP : 02311650022021
Pembimbing : Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA

ABSTRAK

Proses pengolahan *nikel matte* dengan menggunakan tanur listrik (*electric arc furnace*) menggunakan energi input yang besar dalam proses produksinya. Sisa dari proses peleburan ini akan menghasilkan limbah panas (*waste heat*) dengan kapasitas dan suhu yang masih cukup tinggi. Jika limbah panas ini dibuang langsung ke udara, disamping menjadi rugi-rugi panas, limbah panas tersebut juga akan menjadi faktor penyumbang pencemaran (*pollution*) di udara. Dengan aturan Pemerintah Indonesia yang mengharuskan setiap keluaran dari cerobong asap industri harus memenuhi standard baku mutu yang ditetapkan yaitu maksimal 150 ppm, maka banyak industri yang melakukan penanganan terhadap limbah panas tersebut sehingga dapat memenuhi standard baku yang ditetapkan sebelum dibuang ke udara.

PT Vale Indonesia (PTVI) adalah salah satu industri pengolahan nikel yang memiliki 4 tanur peleburan yang beroperasi secara terus menerus dan menghasilkan limbah panas dalam bentuk gas buang (*off gas*) dengan suhu yang masih cukup tinggi berkisar 600-800 °C. Untuk memenuhi standard regulasi gas buang, PTVI membangun fasilitas penanganan gas buang sebelum dibuang ke udara. Dimana suhu dari gas buang tersebut akan diturunkan menjadi sekitar 350 °C dengan menggunakan *spray chamber*, dan suhu akan diturunkan lagi dengan penambahan secondary air sebelum akhirnya masuk ke baghouse dan dibuang ke udara pada suhu rata-rata 50 – 60 °C.

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan kembali limbah panas dari tanur peleburan tersebut, yaitu dengan memanfaatkan energi panas dari gas buang yang dihasilkan sebelum masuk ke *spray chamber*. Energi panas dari limbah panas tersebut akan digunakan untuk menghasilkan uap jenuh dengan menggunakan *Waste Heat Boiler* (WHB) yaitu dengan cara memanaskan air dan merubah fasa air menjadi uap jenuh (*saturated steam*) akibat pipa yang berisi air dialiri gas buang dari tanur peleburan yang memiliki temperature tinggi (*water tube boiler*).

Penggunaan teknologi WHB akan menghasilkan sekitar 14.3 ton/jam uap jenuh. Pemanfaatan ini dapat menghemat penggunaan bahan bakar HSFO untuk menghasilkan uap jenuh sekitar 45,308 bbl fuel / tahun. Dengan penghematan bakar bakar tersebut, maka penggunaan WHRB tersebut akan memiliki nilai keekonomisan yang tinggi dengan tingkat pengembalian modal 4,78 tahun.

Uap jenuh yang dihasilkan oleh WHB tersebut dapat menggantikan uap jenuh yang saat ini dihasilkan oleh utilities boiler untuk kebutuhan operasional (dengan menggunakan bahan bakar) yang artinya akan menurunkan biaya untuk pembangkitan uap jenuh, pemanfaatan limbah panas ini juga akan mengurangi

beban energi dan proses untuk mendinginkan limbah panas sebelum masuk ke baghouse dan dibuang ke udara bebas

Kata kunci: Furnace, Waste Heat, Waste Heat Boiler, Off Gas.

Utilization of Waste Heat (off gas) from Electric Furnace No.4 to Generate Saturated Steam Using Waste Heat Recovery Boiler

Student's Name : Febrin Sitorus
Student's Number : 02311650022021
Advisor : Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA

ABSTRAK

The processing of nickel matte by electric furnace (electric arc furnace) are using a large input energy in the smelting process. The rest of the smelting process will result in high capacity and temperature of waste heat. When waste heat discharges directly into the air, besides being a heat loss, the waste heat will also be a contributing factor of pollution in the air. With the Indonesian Government's regulation that requires every output from industrial chimneys shall meet the specified standard quality, which is a maximum of 150 ppm, many industries has treated the waste heat to meet government regulation before discharge to the air.

PT Vale Indonesia (PTVI) is one of the nickel processing industry that have four (4) smelting electric furnaces that operates continuously and produce heat waste in the form of exhaust gas (off gas) with a high temperature in the range 600-800 °C. To meet of the exhaust gas regulation, PTVI builds exhaust gas handling facilities before discharged into the air. Temperature of the exhaust gas lowered to about 350 °C by using a spray chamber, then in the second stage temperature lowered to about 250 °C by adding secondary spray water before entering the baghouse and discharged into the air at an average temperature of 50 - 60 °C.

The main objective of this study is to recover waste heat from the electric furnace No.4 by utilizing heat energy from the exhaust gas before entering the spray chamber. The heat energy from the exhaust gas will be utilized to produce saturated steam by using Waste Heat Recovery Boiler (WHRB) by heating the water and converting the water into saturated steam 180 °C @ 10 Bar.

WHB technology application will be able to produce 14.3 ton/hour of saturated steam. This utilization will save the use of HSFO fuel to produce saturated steam around 45.308 bbl fuel / year. By saving the fuel, the WHB will have a high economic value with return of capital (ROI) of 4.78 years.

The saturated steam produced by WHRB can replace saturated steam that currently produced by boiler utilities (using fuel) for operational consumption, which means that it will reduce the cost of generating saturated steam. The waste heat utilization also will reduce the energy burden and process to cool waste heat before entering the baghouse and disposing to the air.

Keywords: Furnace, Waste Heat, Waste Heat Boiler, Off Gas.

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Tuhan Yang Maha Esa, yang senantiasa melimpahkan rahmat serta karunia-Nya kepada penulis sehingga dalam menyelesaikan penelitian dan laporan tesis dengan judul “Pemanfaatan Waste Heat Boiler untuk Memproduksi Uap Jenuh dengan memanfaatkan Panas Buang dari Tungku Listrik no.4 Peleburan Calcine PT Vale Indonesia”.

Penelitian ini merupakan salah satu penelitian yang mengangkat tema mengenai pemanfaatan panas buang dari tungku peleburan dengan menggunakan waste heat recovery boiler. Panas buang dengan temperature dan volume yang sangat tinggi akan dapat menghasilkan uap pada kondisi saturated dan dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan PT Vale Indonesia untuk menggantikan fule boiler yang saat ini digunakan.

Penelitian dan laporan tesis ini tidak dapat diselesaikan oleh penulis tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang memberikan bantuan secara moral maupun materi, terutama kepada:

1. Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, motivasi dan saran dalam menyelesaikan penelitian ini.
2. Bapak Gunawan Nugroho, ST, MT, PhD; Bapak Dr.Ir Syamsul Arifin, MT selaku dosen penguji yang telah memberikan saran-saran yang sangat bermanfaat.
3. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat.
4. Ibu Martha Hardiyah, S. Pd, selaku admin Pasca Sarjana Teknik Fisika yang telah membantu semua urusan administrasi dalam penyelesaian tesis ini,
5. Keluarga terutama istri tercinta, Pricilya A.C Rorie yang senantiasa memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis,
6. Teman-teman admin mahasiswa S2 kelas PT. Vale Indonesia: Leo, Erwin dan Musryanto yang ikut dalam membantu, memberi informasi dan mengkoordinasi semua kegiatan administrasi dan proses thesis ini,
7. Teman-teman mahasiswa S2 kelas PT. Vale Indonesia yang senantiasa ada untuk memberikan bantuan dan motivasi.
8. Semua pihak yang telah membantu dalam penelitian dan penyusunan laporan tesis ini, teruma Deny Sihombing dan Denli yang telah membagi ilmu mengenai proses peleburan di PT Vale Indonesia.

Apabila terdapat kekurangan dalam penelitian dan laporan tesis ini, penulis memohon kritik dan saran demi penelitian yang lebih baik. Semoga laporan tesis ini dapat memberikan manfaat dan ilmu bagi banyak orang.

Soroako, January 2019

Febrin Sitorus

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	6
BAB II DASAR TEORI	7
2.1 Proses Teknologi Pengolahan Nikel	7
2.2 <i>Waste Heat Recovery</i>	12
2.3. Klasifikasi dan Aplikasi	15
2.4 Teknologi <i>Waste Heat Recovery</i>	17
2.5 <i>Waste Heat Boiler</i>	18
BAB III METODOLOGI.....	37
3.1 Metodologi dan Diagram Alur Penelitian.....	37
3.2 Study Pustaka.....	39
3.3 Pengukuran Parameter off Gas	41
3.4 Analisa Energi dan Analisa Exergi	42
3.6 Process Flow Diagram – Penggunaan off Gas dengan <i>Waste Heat Boiler</i>	44
3.7 Proposal Penyambungan (Tie-in) untuk <i>Waste Heat Boiler</i>	44
3.8 Evaluasi Ekonomi	45
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
4.1 Design Parameter.....	47
4.2 Rugi-rugi Panas (<i>Furnace Heat Losses</i>).....	54
4.3 MASS BALANCE AND HEAT BALANCE.....	66
4.4 PEMBANGKITAN SATURATED STEAM	79
4.5 <i>Waste Heat Recovery Boiler</i>	83
4.6 Tinjauan keekonomisan (<i>Economic Evaluation</i>)	104
BAB 5 PENUTUP	111
5.1 Hasil Penelitian	111
5.2 Kesimpulan	113
DAFTAR PUSTAKA.....	117

LAMPIRAN.....	117
----------------------	------------

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Alur Proses Pengolahan Nikel	8
Gambar 2.2 <i>Schematic</i> Tungku Peleburan.....	9
Gambar 2.3 Control Volume Analisis Massa dan Energy	11
Gambar 2.4 Rugi-rugi energi pada tungku peleburan.....	12
Gambar 2.5 Definisi <i>Waste Heat Recovery</i>	13
Gambar 2.6 Teknologi <i>Waste Heat Recovery</i>	18
Gambar 2.7 Klasifikasi <i>Waste Heat Boiler</i>	20
Gambar 2.8 <i>Fire Tube Waste Heat Boiler</i> dengan Superheater dan Economizer.....	21
Gambar 2.9 <i>Water Tube Waste Heat Boiler</i> dengan Superheater dan Economizer.....	21
Gambar 2.11 Profile Temperature WHB (Sisi Uap dan Sisi Gas).....	26
Gambar 2.12. Daerator.....	30
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	38
Gambar 3.2 Process Flow Diagram	44
Gambar 3.3 Layout Elevation – Tie in.....	45
Gambar 4.1 Grafik Actual Operating Hours 2014-2017.....	48
Gambar 4.2 Grafik Kapasitas Produksi (TPH)	48
Gambar 4.3 Grafik Transformer Power (MW)	49
Gambar 4.4 Grafik Percentage (%) Carbon.....	50
Gambar 4.5 Grafik Percentage % xH ₂ O	51
Gambar 4.6 Grafik Pengukuran Off Gas Flow Rate.....	52
Gambar 4.7 Grafik Temperature off gas.....	53
Gambar 4.8 Model Rugi-rugi Panas pada Roof.....	57
Gambar 4.9 Model Rugi-rugi Panas Sirkulasi Air pada Beam Roof	58
Gambar 4.10 Grafik Hubungan antara Temperature Freeboard dan Air Infiltration.....	69
Gambar 4.11 Model Radiasi Freeboard.....	70
Gambar 4.12 Energy Radiasi akibat Pengaruh Temperature Freeboard.....	71
Gambar 4.13 Grafik Electric Furnace 4 Operation Record	72
Gambar 4.14 Control Volume Heat and Mass Balance	74
Gambar 4.15 Energy Balance pada Rata-Rata Aktual Operasi	78
Gambar 4.16 Energy Balance pada Design Operasi.....	78
Gambar 4.17 Grafik hubungan antara Calcine Feed Rate, Furnace Power, dan Sensible Heat.....	79

Gambar 4.18 Diagram Pembangkitan Saturated Steam	81
Gambar 4.19 Grafik Hubungan antara Feed Rate, Power, Off Gas Sensible Heat dan Kapasitas Pembangkitan Steam	83
Gambar 4.20. Diagram Alir proses WHRB	100
Gambar 4.21. Blok diagram pemasangan waste heat Boiler	101
Gambar 4.22. Gambar plan pemasangan waste heat boiler.....	104
Gambar 4.23. Gambar section pemasangan waste heat boiler	104

DAFTAR SINGKATAN

PTVI	PT Vale Indonesia
PIMS	Plant Information Management System
WHRB	Waste Heat Recovery Boiler
LOI	Loss on Ignition
LP Pump	Low Pressure Pump
HP Pump	High Pressure Pump
BMS	Burner Management system
HAZOP	Hazard and Operability
TPH	Ton per Hour
MW	Mega Watt
ACFM	Actual Cubit feet per Minute
PLTA	Pembangkit Listrik Tenaga Air
IAL	In Air Leakage
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
ANSI	American National Standards Institute
API	American Petroleum Institute
OSHA	Occupational Safety and Health Act (America)
AWS	American Welding Society
NEMA	National Electrical Manufacturers Association (America)
AISC	American Institute for Steel Construction
NFPA	National Fire Protection Association (America)
NBMA	National Boiler Manufacturer Association (America)
NEC	National Electric Code (America)
PUIL	Peraturan Umum Instalasi Listrik (2000) (Indonesia)
MCC	Motor Control Center
HMI	Human Machine Interface
PLC	Programable Logic Controller
LAN	Local Are Network

PFD	Process Flow Diagram
HSFO	High Sulfur Fuel Oil
NPV	Net Present Value
IRR	Internal Rate and Return
PV	Present Value
Capex	Capital Expenditure
Opex	Operating Expenditure

BAB I

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

PT Vale Indonesia yang bergerak dalam bidang industri pertambangan mengoperasikan 3 (tiga) pabrik pengering, 5 (lima) reduksi kiln, 4 (empat) tanur peleburan listrik, dan 3 (tiga) converter untuk menghasilkan *nikel matte*.

Tanur peleburan beroperasi secara terus menerus dan menghasilkan limbah panas dalam bentuk gas buang (*off gas*) dengan suhu yang masih cukup tinggi berkisar 600-800 °C dengan laju aliran sekitar 40.000-140.000 Nm³/h.

Off Gas adalah limbah panas yang dihasilkan dalam suatu proses dengan cara pembakaran bahan bakar dan reaksi kimia, dan kemudian "dibuang" ke lingkungan baik setelah diolah maupun sebelum diolah. Limbah panas yang dihasilkan dapat digunakan kembali untuk tujuan yang berguna untuk mendapatkan keuntungan ekonomi [2]. Cara penggunaan limbah panas ini tergantung pada suhu buangan dan sisi keekonomisannya. Jika *off gas* ini bisa digunakan kembali, maka sejumlah besar bahan bakar primer bisa dihemat penggunaannya.

Pemanfaatan kembali gas buang dari peralatan-peralatan penghasil panas ini, tidak hanya akan mendapatkan keuntungan secara ekonomis tetapi juga akan dapat mengurangi polusi udara ke atmosfer. Ketika gas buang ini digunakan kembali, maka akan dapat menghemat sekitar 20% dari biaya energi untuk peralatan tersebut, dan di beberapa kasus juga menurunkan polusi ke udara [1].

Manfaat pemanfaatan kembali gas buang dari peralatan penghasil panas dapat diklasifikasikan secara luas dalam dua kategori [2], yaitu:

Keuntungan Langsung

Pemulihan panas buangan memiliki efek langsung terhadap efisiensi proses. Hal ini tercermin dari pengurangan konsumsi utilitas & biaya, dan biaya proses.

Keuntungan tidak langsung

- **Pengurangan Polusi** : Sejumlah limbah yang mudah terbakar seperti gas karbon monoksida, gas asam, karbon hitam dari gas, lumpur minyak, akrilonitril dan bahan kimia plastik lainnya dll, jika dibakar kembali maka akan menghasilkan keuntungan ganda yaitu me-recover panas dan mengurangi level polusi ke lingkungan.
- **Pengurangan ukuran peralatan:** Pemanfaatan kembali gas buang akan mengurangi konsumsi bahan bakar, yang menyebabkan pengurangan gas buang yang dihasilkan. Hal ini menyebabkan berkurangnya ukuran peralatan yang berfungsi untuk penanganan gas buang seperti kipas angin, tumpukan, duktus, pembakar, dll
- **Pengurangan Konsumsi Energi Tambahan:** Pengurangan dalam ukuran peralatan memberi manfaat tambahan berupa pengurangan konsumsi energi tambahan seperti listrik untuk fan, pompa dll.

Beberapa penelitian sebelumnya, telah banyak membahas penggunaan kembali panas buang dari industri, khususnya panas buang yang dihasilkan dari tungku peleburan listrik. Berikut penelitian-penelitian yang membahas tentang penggunaan gas buang dari hasil peleburan khususnya tungku listrik.

Heimir Hjartarson, dkk yang dipublikasikan di *The Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future*, Helsinki (2010) [13] yang membahas tentang aspek-aspek teknis terkait dengan penggunaan panas buang dari produksi *Ferrosilikon* dengan menggunakan tungku listrik. Jurnal ini membahas tentang potensi penggunaan pemanfaatan kembali energy yang terbuang. Penelitian dilakukan di Elkam, Pabrik Grundartagi, Iceland. Pemanfaatan energy yang di studi adalah untuk sumber panas di area setempat, pembangkitan listrik dan untuk menghasilkan uap. Penelitian yang dilakukan dengan menggunakan metode analisa energy dan analisa exergy pada tungku 47 MW yang menghasilkan FeSi75. Dari hasil analisa energy yang dilakukan menunjukkan bahwa hanya 30% energy masuk yang digunakan untuk produksi Ferrosilikon, dan selebihnya adalah menjadi panas buang. Dari hasil studi yang dilakukan, jika panas buang ini digunakan maka akan menghasilkan energy sebesar 10 MW apabila digunakan untuk ORC dan 8 MW

apabila digunakan untuk steam rankine cycle. Dan jika digunakan untuk keperluan pemanasan di area tersebut maka akan menghasilkan sekitar 11800 m³/hari air pada suhu 80 °C.

Syed Amjad Ahmad, dkk yang dipublikasikan di *NFC – IEFER Journal of Engineering & Scientific Research [1]*, yang membahas tentang penggunaan panas buang dari sisa pembakaran furnace dengan menggunakan *waste heat boiler* dengan menggunakan *two pass fire tube boiler*. Penelitian yang dilakukan adalah pada pabrik peleburan besi, dimana kokas digunakan sebagai bahan bakar dengan nilai pembakaran sekitar 28000-31000 KJ/kg. Sisa gas panas hasil pembakaran atau biasa disebut dengan *flue gas* yang seharusnya terbuang ke lingkungan diarahkan ke WHRB (*Waste Heat Recovery Boiler*), sehingga panas buang tersebut digunakan untuk mengubah air menjadi uap jenuh. Untuk mengatasi debu sisa hasil pembakaran maka dipasang *dust collector* diantara tungku peleburan dan WHRB. Tulisan ini meliputi perhitungan energi yang dihasilkan dari gas buang akibat perbedaan kehilangan panas dari tungku, penggunaan panas buang dari *flue gas*, dan proses pembangkitan di WHRB. Beberapa teknik juga diperkenalkan dalam tulisan ini untuk mengurangi rugi-rugi dari panas buang. Dari hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa sekitar 21.1% panas yang terbuang dapat dimanfaatkan menjadi uap. Jumlah panas ini masih bisa ditingkatkan dengan pemasangan beberapa equipment tambahan seperti *charge pre-heater*, *feed water pre heater*, dan *air pre heater*. Dan juga ide lain untuk meningkatkan penggunaan kembali panas buang ini dapat dilakukan dengan penggunaan material yang tepat pada pipa yang digunakan di boiler, dimana material yang ideal digunakan menurut literature adalah copper krn memiliki konduktor panas yang sangat baik.

Tulisan lain yang mendukung penelitian ini adalah artikel yang ditulis oleh Arvind Thekdi [14], dkk yang mengembangkan entalpy modeling dari off gas tungku listrik. Pemodelan enthalpy ini dimaksudkan untuk menghitung ketersediaan panas total (*sensible* dan *chemical enthalpy*) dan nilai panas yang bisa digunakan kembali dari tungki listrik. Penelitian dilakukan di Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Model perhitungan *sensible heat* dan *chemical entalphy* didasarkan pada komposisi kimiawi dari off gas, temperature, dan laju aliran massa. Hasil dari

pemodelan ini dapat digunakan untuk mengestimasi temperature *pre-heat*, pembangkitan uap, dan juga pembangkitan listrik.

Dari penelitian-penelitian ini menunjukkan bahwa energi gas buang dari proses industri, dalam hal ini gas buang dari proses peleburan tanur listrik, dapat digunakan kembali untuk pembangkitan energi, baik untuk menghasilkan uap jenuh, energi listrik, dll. Dimana prinsip dasarnya adalah dengan memanfaatkan suhu dan kapasitas dari gas buang tersebut. Tetapi dari beberapa tulisan yang menjadi dasar referensi penelitian ini, belum ada yang membahas mengenai pemanfaatan gas buang dari hasil peleburan *calcine*, dengan sifat kimia dan komposisi yang berbeda dari peleburan besi pada umumnya, *calcine* adalah material biji nikel yang ditambahkan sulfur untuk membentuk nikel sulfida sebagai hasil akhir dari produknya.

Dengan proses yang unik yang dilakukan oleh PT Vale Indonesia yaitu peleburan *calcine* dengan menggunakan tanur listrik, dapat menghasilkan *off gas* dengan suhu yang masih sangat tinggi yaitu sekitar 600-800 °C dan laju aliran 40.000-140.000 Nm³/h. Dengan suhu dan kapasitas gas buang tersebut, sangat berpotensi untuk dapat dimanfaatkan kembali untuk pembangkitan energi dengan metode dan pemanfaatan panas buang yang tepat.

Waste Heat Boiler adalah salah satu opsi yang dapat digunakan untuk memanfaatkan kembali potensi gas buang ini [1] [2] [4] [11]. Dengan mendinginkan *off gas* dari temperature sekitar 600 – 800 °C sampai temperature 350 °C akan menghasilkan sekitar 6 – 12 MW tenaga thermal [4] untuk menghasilkan uap jenuh sekitar 10-18 Ton/jam pada tekanan 50 bar dan 264 °C.

Untuk memanfaatkan panas buang tersebut menjadi uap jenuh, sangat penting untuk memahami bahwa parameter *off gas* (termasuk suhu, laju aliran, dan konsentrasi oksigen) sangat bervariasi tergantung terhadap parameter pengoperasian (*Furnace Power*) dan juga variasi dari *feeding* material ke tanur peleburan yaitu Kadar Carbon dan LOI pada *Calcine*. Sehingga untuk mengetahui parameter *off gas* ini akan dilakukan pengukuran secara actual sebanyak 3 kali untuk mendapatkan parameter *off gas* yang akurat.

1.2. Rumusan Masalah

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

- Bagaimana mengetahui potensi panas buang (*Waste Heat*) dari tanur listrik peleburan *calcine* (*Electric Furnace*) dan bagaimana memanfaatkan kembali potensi panas buang tersebut?
- Bagaimana merancang WHB (*Waste Heat Boiler*) untuk menghasilkan uap jenuh (*saturated steam*) yang dapat digunakan untuk mengurangi beban steam generator dari fasilitas eksisting (*Utilities*)?
- Bagaimana menghitung keekonomisan (*Economic Evaluation*) pemanfaatan panas buang dengan menggunakan teknologi WHRB (*waste heat recovery boiler*)?

1.3. Batasan Masalah

Objektif dari penelitian ini adalah untuk memanfaatkan panas buang dari tungku peleburan no.4 milik PT Vale Indonesia. Dalam pemanfaatan panas buang ini, batasan dalam tulisan ini adalah sebagai berikut:

- Perhitungan potensi panas buang berdasarkan record data PIMS (Plant Information Management System) sejak 2014-2017.
- Pengukuran kapasitas panas buang (flow rate) dilakukan dengan metode pengukuran langsung dengan menggunakan flowmeter.
- Perhitungan rugi-rugi panas, mass/heat balance didasarkan pada parameter aktual, dan beberapa asumsi yang didasarkan pada report study yang pernah dilakukan sebelumnya.
- Perhitungan kapasitas steam didasarkan dari panduan “Fundamentals of Engineering Thermodynamics” by Moran-Saphiro.
- Perhitungan evaluasi keekonomisan berdasarkan pada asumsi-asumsi finansial yang digunakan oleh PT Vale Indonesia.
- Panas buang yang akan digunakan adalah panas buang actual dari tungku peleburan no.4, tidak mencakup review lanjutan terhadap proses di tungku peleburan untuk menghasilkan panas buang yang lebih optimal.

- Pembahasan *Waste heat boiler* dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan spesifikasi teknik sehingga equipment tersebut dapat dipilih dari market berdasarkan kebutuhan dan aplikasi di PT Vale Indonesia. Pembahasan waste heat boiler dalam penelitian ini tidak termasuk perhitungan detail dan perancangan equipment waste heat boiler. Equipment tersebut akan di pesan dari manufacturer berdasarkan *requirement* teknis yang akan dikembangkan.

1.4. Tujuan Penelitian

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

- Akan dilakukan perhitungan potensi panas buang (*Waste Heat*) dari tanur peleburan no.4, guna dimanfaatkan untuk menghasilkan uap jenuh.
- Akan dilakukan analisa spesifikasi teknik dari *waste heat boiler* yang dapat digunakan sebagai dasar melakukan *inquiry* terhadap equipment tersebut untuk menghasilkan uap jenuh yang dapat digunakan untuk mengurangi beban steam generator yang saat ini digunakan.
- Akan dilakukan analisa keekonomisan (*economic evaluation*) pemanfaatan panas buang dari off gas tungku peleburan dengan menggunakan teknologi *waste heat recovery boiler*.

BAB II

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% [21]. Proses ekstraksi pirometalurgi terdiri dari tahap pengeringan, kalsinasi, peleburan dan pemurnian.

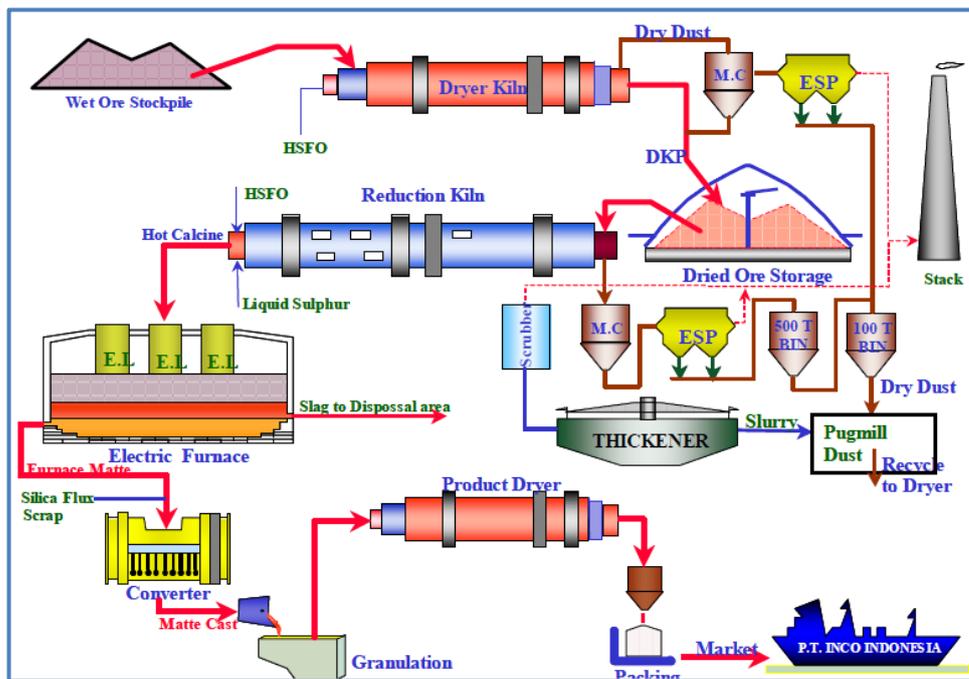
Sedangkan proses hidrometalurgi memurnikan nikel melalui pelindian (leaching) menggunakan larutan asam. Cadangan nikel di area konsesi PT Vale Indonesia termasuk jenis laterit yang memiliki kadar nikel tinggi mencapai rata-rata di atas 1,8% sehingga lebih cocok menggunakan proses pirometalurgi.

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_2O 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_2O_3) 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 nikel tinggi akan terpisah dengan yang berkadar nikel 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 nikel rendah yang disebut slag. Matte akan dimurnikan lebih lanjut di dalam Converter sedangkan slag akan dibuang.

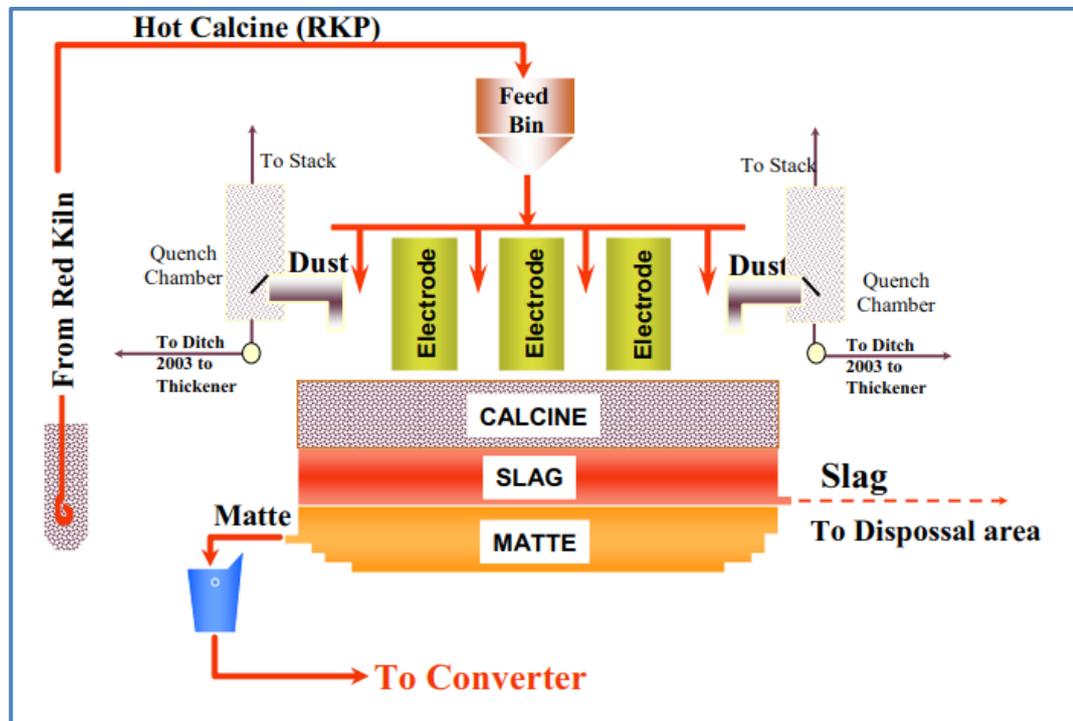
Tahap terakhir yaitu pemurnian nikel dilakukan di dalam peralatan *Pierce-Smith converter* dengan cara mengalirkan udara dan menambahkan silica. Udara bereaksi dengan besi (Fe) dan membentuk besi oksida. Besi oksida (FeO) kemudian bersatu dengan silica flux (SiO₂) menjadi slag converter yang terpisah dengan converter matte karena perbedaan berat jenis. Slag converter yang lebih ringan akan berada di lapisan atas sehingga dapat dikeluarkan dengan cara penuangan pada ladle.



Gambar 2.1 Skema Alur Proses Pengolahan Nikel (Sumber: Operation Overview – PT Vale Indonesia)

2.2. Tanur Peleburan (Electric Furnace)

Tanur adalah alat yang digunakan untuk melebur material metal atau memanaskan material untuk merubah bentuk (*rolling, forging*) atau properties (perlakuan panas).



Gambar 2.2 *Schematic* Tungku Peleburan (Sumber: Operation Overview – PT Vale Indonesia)

2.3. Model kimia untuk Tungku Peleburan – Analisis Energi

Untuk membentuk dasar analisa termodinamika, model kimia dari tungku peleburan dikembangkan yang difokuskan pada keseimbangan energi dan material dalam sistem. Asumsi yang untuk model ini adalah:

- Operasi Tanur Peleburan adalah diasumsikan steady state
- Komposisi udara terdiri dari 21% O₂ dan 79% adalah N₂ atau 3,76 : 1
- Reaksi kimia dianggap berjalan sampai selesai
- Perubahan energi kinetik dan energi potensial dari material yang keluar masuk tungku diabaikan
- Gas dianggap ideal.

Untuk proses di Tungku peleburan nikel, secara lengkap ditunjukkan oleh reaksi berikut:

Proses Reduksi:



Proses Peleburan



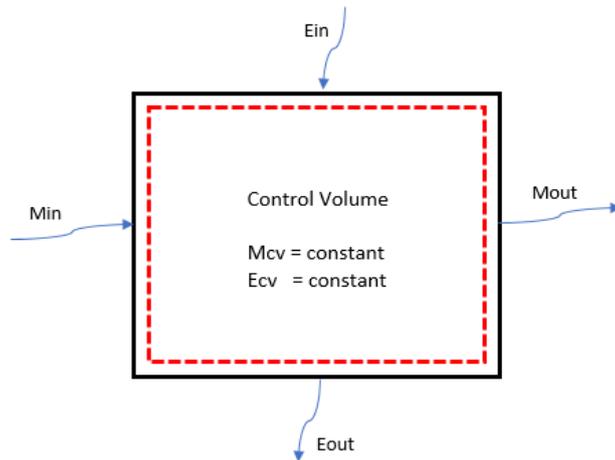
Proses Pemisahan Matte dan Slag



Pertimbangan lain yang harus diperhatikan adalah Model proses yang disederhanakan harus diaplikasikan yang meliputi rugi-rugi energi dari proses, penggunaan carbon yang tidak murni, kehilangan karbon dalam system off gas, dan penyimpangan kecil lainnya dari proses ideal.

Rugi-rugi energi yang dimaksud adalah rugi-rugi energi di air pendingin, panas dalam gas tungku, dan panas dari dinding tungku, Juga tenaga listrik dialirkan melalui pemanasan ohmik elektroda. Bagian dari Panas itu dikonsumsi dengan cara memanggang elektroda Söderberg, namun sisanya dipindahkan sebagai panas ke gas tungku. Data untuk karbon murni yang digunakan dalam model proses namun pada kenyataannya bahan karbon yang biasa digunakan adalah seperti batubara, kokas, arang dan serpihan kayu. Penggunaan bahan ini harus memperhatikan uap air, volatil, abu dan unsur yang lain dalam stochiometri.

2.4. Mass dan Energy Balance untuk Process Steady Flow



Gambar 2.3 Control Volume Analisis Massa dan Energy (Sumber: Cengel, Y.A and Boles, Thermodynamics an Engineering Approach)

Mass Balance untuk system steady – flow.

$$\Sigma m_{in} = \Sigma m_{out} \quad (\text{TPH}) \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \dots\dots\dots(2.7)$$

Energy Balance untuk system steady – flow.

$$E_{in} - E_{out} = \frac{d E_{system}}{dt} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana,

$E_{in} - E_{out}$ = Laju Transfer Energy oleh Panas, kerja, dan massa

$\frac{d E_{system}}{dt}$ = Laju perubahan Energy Internal, kinetic, potensial

$dt = 0$ dikarenakan system steady, sehingga $\frac{d E_{system}}{dt} = 0$

$$E_{in} = E_{out} \text{ (KW)} \dots\dots\dots(2.9)$$

E_{in} = Laju Transfer energy input oleh panas, kerja, dan massa

E_{out} = Laju Transfer energy output oleh panas, kerja, dan massa

$$Q_{in} + W_{in} + \sum m_{in} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = Q_{out} + W_{out} + \sum m_{out} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)$$

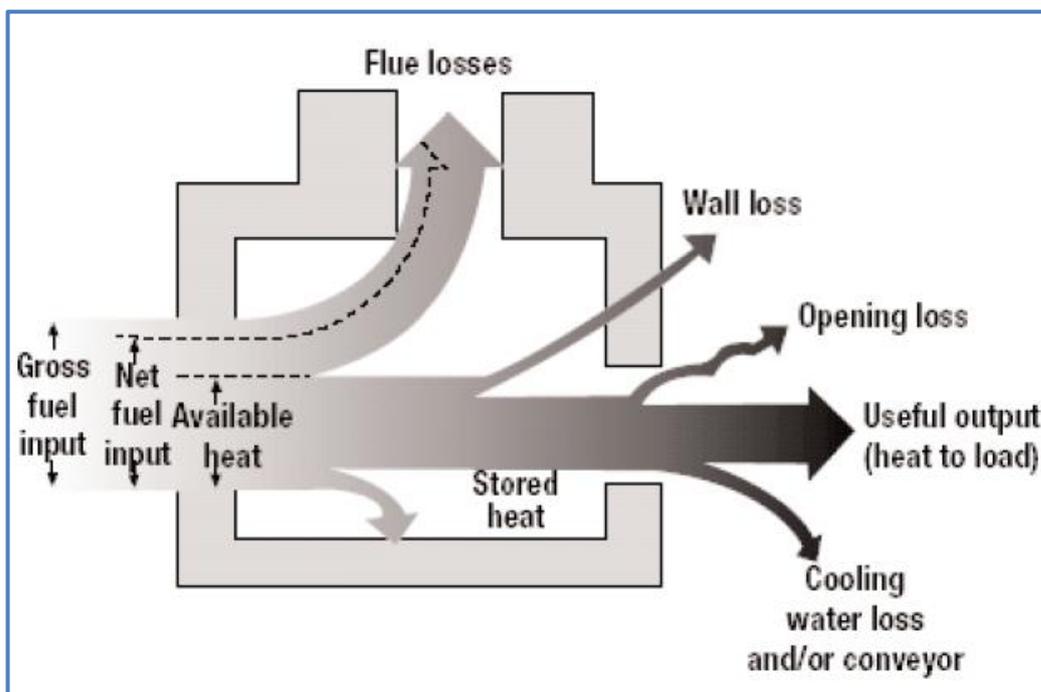
.....(2.10)

$$E_{mass} = m\theta = m \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \text{ (Kw) } \dots\dots\dots(2.11)$$

2.5. Rugi-rugi Energi pada Tungku Peleburan

Rugi-rugi energi selama proses peleburan adalah panas pada sistem pendinginan, rugi-rugi langsung dari tungku, dan rugi-rugi panas dari furnace gas. Rugi-rugi energi pada tungku peleburan meliputi:

- Rugi-rugi pada sistem pendingin
- Rugi-rugi panas pada bagian bawah tungku
- Rugi-rugi panas pada off gas
- Rugi-rugi panas pada dinding tungku

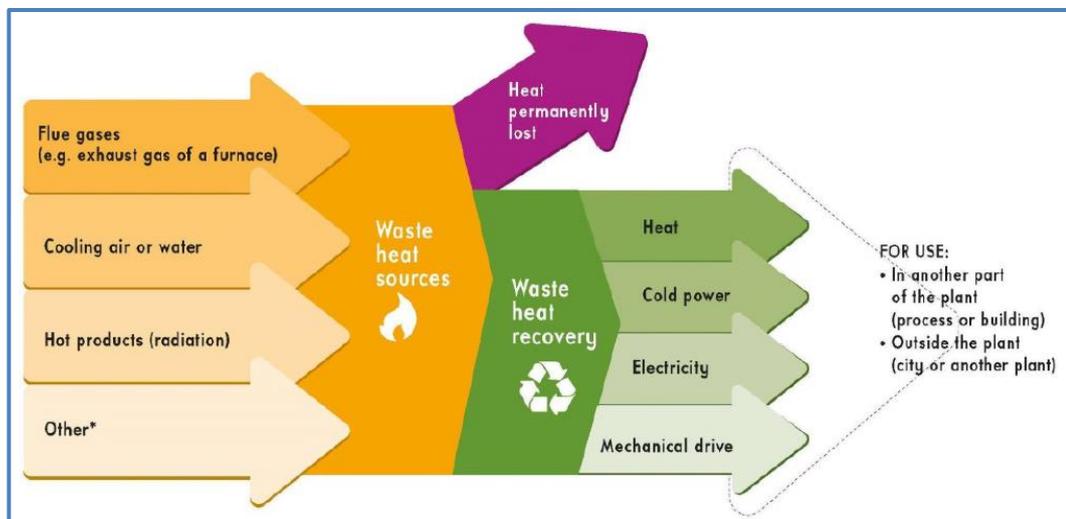


Gambar 2.4 Rugi-rugi energi pada tungku peleburan (Sumber: *Bureau of Energy Efficiency – Syllabus Furnaces*)

2.6. Waste Heat Recovery

Limbah panas adalah panas yang dihasilkan dalam proses dengan cara pembakaran bahan bakar atau reaksi kimia, dan kemudian "dibuang" ke lingkungan meskipun masih bisa digunakan kembali untuk tujuan yang berguna dan ekonomis. Parameter kualitas panas bukan jumlah melainkan "nilai" nya. Strategi bagaimana memulihkan panas ini sebagian bergantung pada suhu gas panas buangan dan tinjauan secara ke-ekonomisannya.

Sejumlah besar gas buang panas dihasilkan dari Boiler, Kiln, Oven dan Tungku. Jika limbah panas ini dapat digunakan, sejumlah besar bahan bakar utama akan bisa dikurangi. Energi yang hilang dalam limbah gas tidak bias sepenuhnya bisa digunakan, Namun sebagian besar panas bisa digunakan kembali.



Gambar 2.5 Definisi *Waste Heat Recovery* (Sumber: *Fives – A White Book on Industrial waste heat Recovery, 2016*)

Heat Loss – Kualitas

Biasanya jika suhu lebih tinggi, maka akan lebih tinggi kualitasnya dan biaya yang digunakan untuk me-recover panas tersebut akan lebih efektif. Dalam beberapa studi tentang penggunaan limbah panas, memang penting untuk memanfaatkan kembali panas tersebut. Contoh penggunaan adalah pemanasan awal untuk udara pembakaran, pemanas ruangan, atau pemanasan awal untuk air umpan boiler atau process water. Dengan pemulihan panas pada suhu tinggi, maka system

pemulihan limbah panas dapat dilakukan secara bertingkat untuk memastikan bahwa jumlah panas maksimum dapat digunakan secara maksimum. Salah satu contoh untuk teknik pemulihan limbah panas ini adalah pada saat suhu tinggi digunakan untuk pre-heating dan setelah temperaturnya rendah digunakan untuk pemanasan *process feed water* atau menghasilkan uap.

Heat Loss – Quantity

Dalam usaha untuk pemulihan panas, sangat penting untuk mengetahui jumlah panas yang bisa dihasilkan dan juga bagaimana menggunakannya.

Perhitungan Waste Heat Recovery

Total energy panas yang tersedia pada keluaran furnace dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Q = Mg \times \rho \times Cp \times \Delta T \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana

- Q = Jumlah Energy panas (kCal)
- Mg = Laju aliran dari keluaran Off Gas (m³/hr)
- ρ = Massa jenis dari off gas (Kg/m³)
- ΔT = Perbedaan temperature pada keluaran furnace – temperature ambient (0C)
- Cp = Spesific Panas dari Off Gas (kCal/kg/0C)

Sedangkan total energy panas yang tersedia pada keluaran boiler dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Q = Mg \times Cpg \times \Delta T \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana

- Q = Jumlah Energy panas (kCal)
- Mg = Laju aliran dari keluaran Off Gas (m³/hr)
- ρ = Massa jenis dari off gas (Kg/m³)

ΔT = Perbedaan temperature pada inlet boiler – temperature pada outlet boiler ($^{\circ}C$)

C_p = Spesific Panas dari Off Gas (kCal/kg/0C)

Total Panas yang dimanfaatkan di dalam boiler dapat dihitng dengan menggunakan persamaan:

Total Heat Recovered = Heat Avalaible at exhaust Furnace – Heat Avalaible at Boiler Exhaust

Persentasi dari heat yang dipulihkan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Persentasi Heat yang dipulihkan} = \frac{\text{Total Heat yang diserap di dalam boiler}}{\text{Total Heat yang tersedia pada Flue Gas}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.14)$$

2.7. Klasifikasi dan Aplikasi

Dengan mempertimbangkan potensi dari *Recovery* Panas, sangat penting untuk mengidentifikasi segala sumber panas dan dan grade dari limbah panas yang potensial untuk digunakan kembali. Berikut adalah Tabel 2.1 untuk sumber limbah panas dan kualitas dari berbagai sumber limbah panas tersebut.

Tabel 2.1 Sumber Limbah Panas dan Kualitas Panas

No	Sumber Limbah Panas	Kualitas Panas
1	Panas dari Off Gas	Temperature paling tinggi, potensi paling besar untuk pemanfaatan panas.
2	Panas dari aliran uap	Sama seperti diatas, tetapi ketika mengental, maka kalor laten juga harus di recover.

3	Konveksi dan Radiasi Panas dari Peralatan	Kualitas Rendah – Jika dikumpulkan mungkin bisa digunakan untuk pemanas udara
4	Rugi-rugi panas dan pendingin air	Kualitas rendah – berguna jika panas ditukar dengan air fresh yang masuk.
5	Kerugian panas dalam menyediakan air dingin atau di pembuangan air dingin	<ul style="list-style-type: none"> a. Kualitas tinggi jika dapat digunakan untuk mengurangi permintaan untuk pendingin b. Kualitas rendah jika unit refrigerator digunakan sebagai pompa penghasil panas
6	Panas yang tersimpan pada produk setelah proses	Kualitas tergantung dari temperature
7	Panas dalam gas dan cairan proses pembuangan limbah	Kualitas sangat rendah jika kandungan kontaminasi tinggi

Sumber: Bureau of Energy Efficiency

Tabel 2.2 dibawah memberikan rata-rata suhu pada gas buang dari proses industri pada suhu tinggi. Semua proses ini dari pembakaran langsung dengan menggunakan bahan bakar.

Tabel 2.2 Tipikal gas buang temperature tinggi

Tipe Peralatan	Temperature (°C)
Tungku peleburan Nickel	1370 –1650
Tungku peleburan Aluminium	650-760
Tungku peleburan Zinc	760-1100
Tungku peleburan Besi	925-1050
Tungku peleburan Tembaga	900-1100
Open hearth furnace	650-700
Kiln untuk Sement	620- 730
Glass melting furnace	1000-1550
Pabrik Hidrogen	650-1000
Solid waste Incinerators	650-1000
Fume Incinerator	650-1000

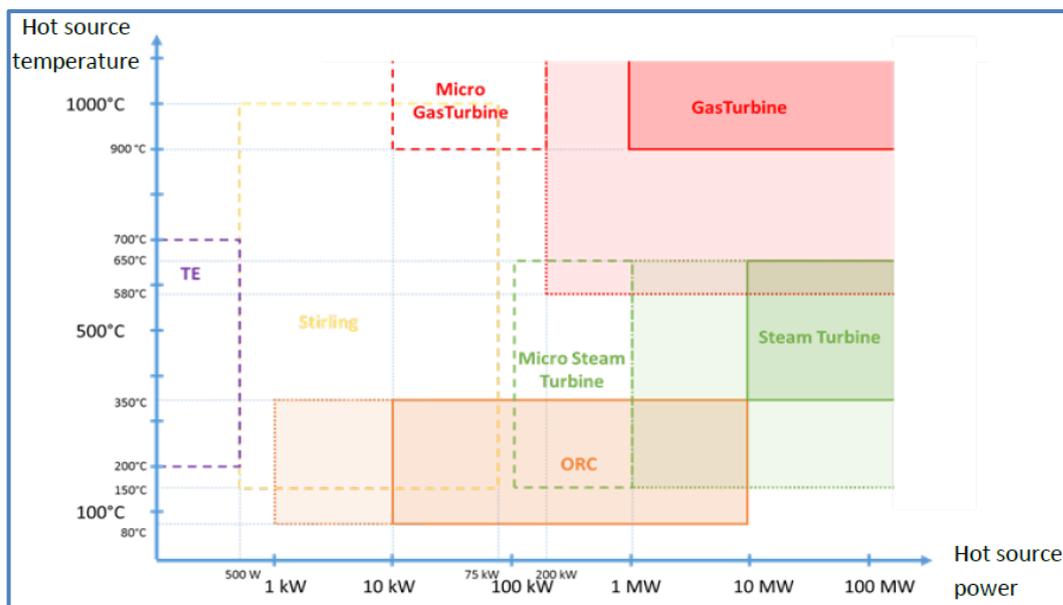
Sumber: Bureau of Energy Efficiency

2.8. Teknologi Waste Heat Recovery

Pemulihan energi terbuang (*Waste Heat Recovery*) dapat dicapai dengan menggunakan teknologi konversi energi. Teknologi ini bisa diklasifikasikan tergantung pada jenis input energi (*thermal energy* atau *waste heat*) dan pada jenis output energi. Teknologi *waste heat recovery* meliputi:

- *Heat Exchanger* dan penyimpanan panas, yang tidak mengubah energi tapi hanya mentransfernya ke media lain atau disimpan untuk membuatnya tersedia sesuai permintaan
- *Heat Pump*, yang menaikkan suhu sumber panas

- *Steam Boiler*, yang menggunakan limbah panas untuk menghasilkan uap untuk digunakan di proses (diimplementasikan secara luas di industry)
- *Classic thermodynamic cycles*,, berdasarkan perubahan fasa cairan, untuk menghasilkan listrik dengan menggunakan turbin atau secara langsung menggerakkan mesin berputar di pada proses industry(mechanical drive)
- Teknologi alternatif untuk menghasilkan listrik tanpa mesin berputar dan fasa berubah fluida (*thermoelectricity, thermoacoustics*)
- Produksi tenaga dingin, dengan mengubah panas menjadi dingin dengan berbagai fenomena fisika.



Gambar 2.6 Teknologi *Waste Heat Recovery* berdasarkan sumber panas dan Temperature Sumber Panas (Sumber: FIVES, CEA - French Alternative Energies and Atomic Energy Commission, 2016)

2.9. Waste Heat Boiler

2.9.1. Boiler

Boiler adalah bejana tertutup dimana kalor pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk uap jenuh. Uap jenuh pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk mengalirkan kalor ke suatu proses. Air adalah media yang berguna dan murah untuk mengalirkan kalor ke suatu proses. Jika air dididihkan sampai menjadi uap jenuh, volumenya akan meningkat sekitar 1.600 kali, menghasilkan tenaga yang

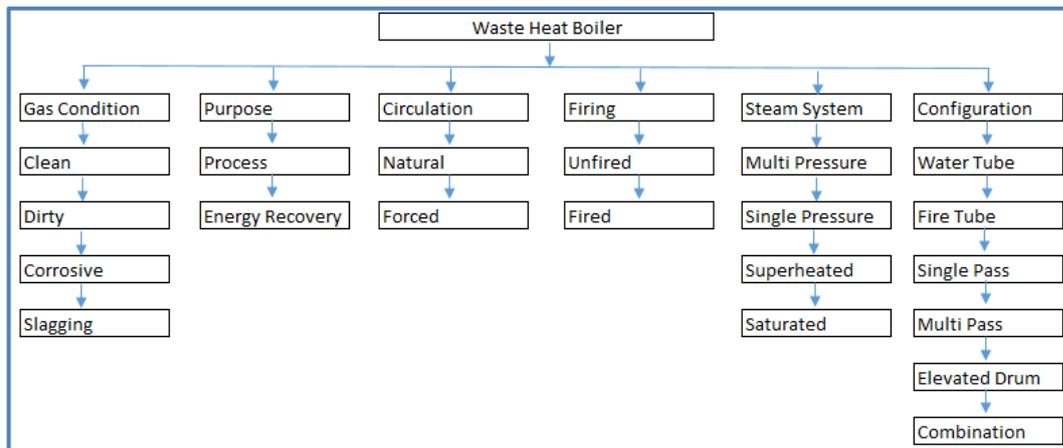
menyerupai bubuk mesiu yang mudah meledak, sehingga *boiler* merupakan peralatan yang harus dikelola dan dijaga dengan sangat baik. Sistem *boiler* terdiri dari: sistem air umpan, sistem steam dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam. Sistem steam mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Steam dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna.

Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur menggunakan valve dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan kalor yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem. Air yang disuplai ke boiler untuk dirubah menjadi steam disebut air umpan. Dua sumber air umpan adalah: (1) Kondensat atau uap jenuh yang mengembun yang kembali dari proses dan (2) Air makeup (air baku yang sudah diolah) yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan plant proses. Untuk mendapatkan efisiensi boiler yang lebih tinggi, digunakan economizer untuk memanaskan awal air umpan menggunakan limbah kalor pada gas buang.

2.9.2. Waste Heat Boiler

Waste Heat Boiler, juga dikenal sebagai *Heat Recovery Boiler* merupakan bagian dari suatu sistem proses pada industri. *Waste Heat Boiler* diklasifikasikan dalam beberapa jenis, seperti dapat terlihat pada Gambar 2.7 dapat diklasifikasikan berdasarkan aplikasi, jenis boiler yang digunakan, apakah gas buang digunakan untuk proses atau untuk pemulihan energi, kebersihan gas, dan konfigurasi boiler. Klasifikasi utamanya didasarkan pada apakah boiler digunakan untuk keperluan proses atau untuk pemulihan energi. Proses *waste heat boiler* digunakan untuk mendinginkan aliran gas buangan dari temperature masuk tertentu menjadi temperature keluaran sesuai dengan yang diharapkan untuk kebutuhan proses lanjutan. Dan yang kedua, *waste heat boiler* digunakan untuk menghasilkan uap jenuh. *Waste heat* yang digunakan bisa berasal dari *incinerator*, *Furnaces*, dan *Kiln*

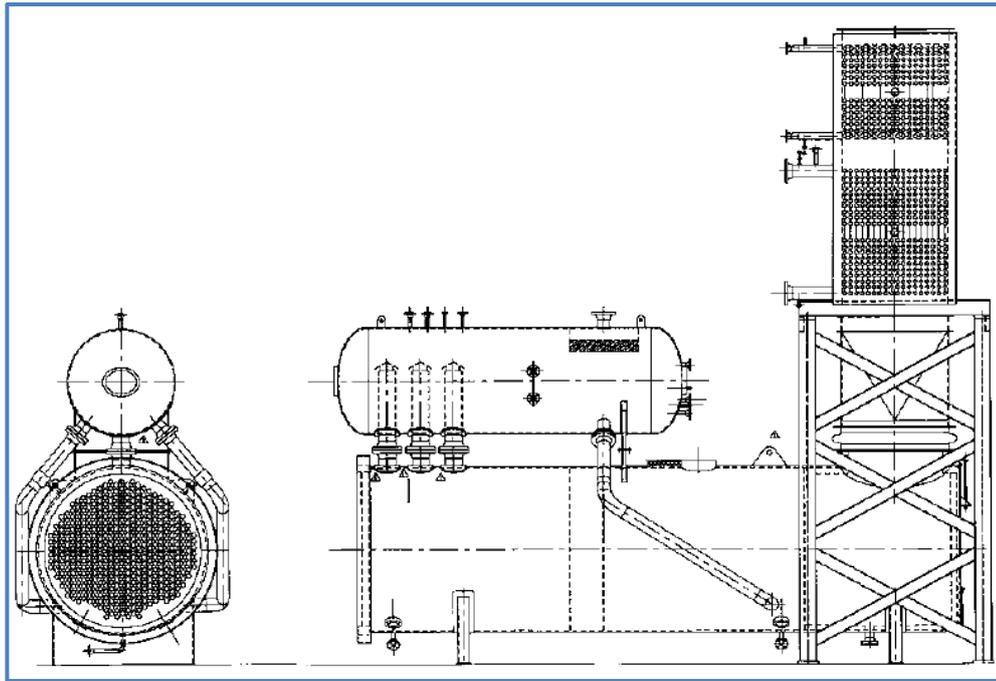
Dalam design *waste heat boiler*, hal penting lain yang harus diperhatikan adalah analisis dari gas buang. Jumlah uap air atau hidrogen yang besar akan meningkatkan *specificif heat* dan konduktivitas panas dari gas karenanya akan membebani boiler (V. Ganapathy, 2003)



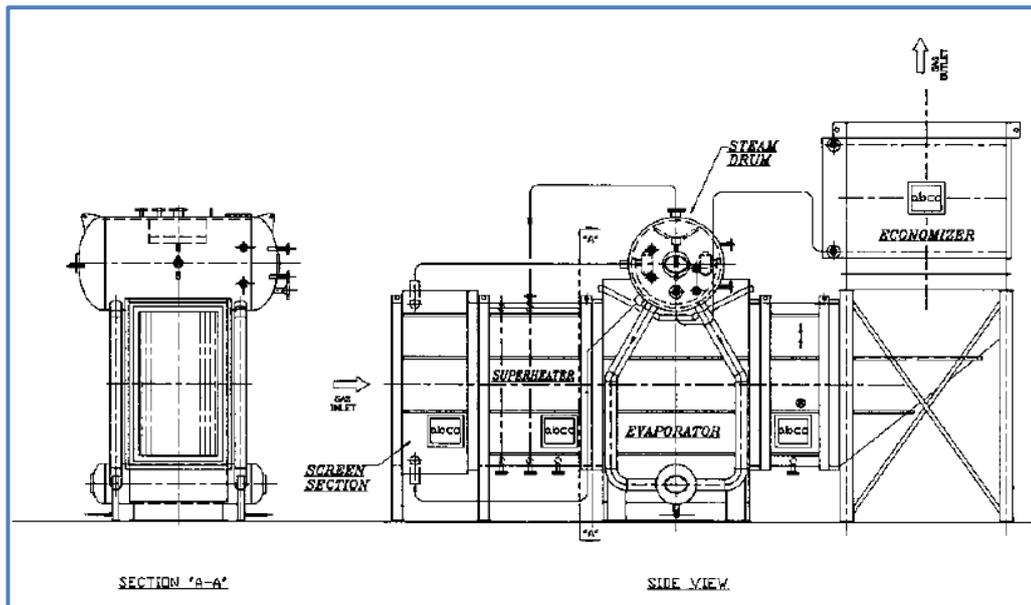
Gambar 2.7 Klasifikasi *Waste Heat Boiler* (Sumber: V Ganapathy – *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators*, 2003)

Secara umum, *waste heat boiler* dibedakan berdasarkan apakah gas mengalir didalam atau diluar pipa (*tube*).

- *Fire Tube Boiler*: Flue gas/off gas mengalir didalam pipa pipa (*tube*), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8.
- *Water Tube Boiler*: Flue gas/off mengalir diluar pipa (tube), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.8 *Fire Tube Waste Heat Boiler* dengan Superheater dan Economizer
 (Sumber: Ganapathy, *Industrial Boilers&Heat Recovery Steam Generators*, 2003)



Gambar 2.9 *Water Tube Waste Heat Boiler* dengan Superheater dan Economizer
 (Sumber: Ganapathy, *Industrial Boilers&Heat Recovery Steam Generators*, 2003)

2.10. Water Tube vs Fire Tube Boiler

Perbandingan dan pemilihan *water tube vs fire tube boiler* didasarkan pada perbandingan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.3 berikut:

Tabel 2.3 Perbandingan *Fire Tube* dan *Water Tube Boiler*

Variabel	Fire Tube Boiler	Water Tube Boiler
Gas Flow	Kecil – Kurang dari 50,000 lb/hr	50,000 – 1 Juta lb/hr
Temperature Gas Inlet	Dari rendah sampai pembakaran adiabatic	Dari rendah sampai pembakaran adiabatic
Gas Pressure	Tinggi – kadang lebih dari 2000 psig	Umumnya kurang dari 2 psig
Firing	Mungkin	Mungkin
Jenis Permukaan Pemanas	Bare Tube	Bare dan Finned Tube
Kebutuhan air	Tinggi	Rendah
Heat Flux – dari sisi uap	Umumnya rendah	Dapat tinggi dengan menggunakan Finned Tube
Tekanan Uap Bertingkat	Tidak	Ya
Lokasi Pemasangan Blower	Inlet atau Outlet Boiler	Dimana saja didalam permukaan boiler
Multiple Modules	Tidak	Ya

Sumber: V. Ganapathy, *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generator*

2.11. Penyumbatan pada Waste Heat Boiler

Penyumbatan adalah masalah yang serius baik pada fire tube boiler dan water tube boiler khususnya ketika aliran gas nya kotor (V. Ganapathy, 2003). Hal ini mempengaruhi bukan hanya performa dari *waste heat boiler*, tetapi equipment-equipment lain seperti scrubber di bagian hilir boiler. Ketika penyumbatan terjadi, maka pembangkitan uap akan menurun dan penurunan tekanan gas meningkat seiring dengan berjalannya waktu. Ada beberapa cara untuk menentukan tingkat keparahan dari penyumbatan yang terjadi, yaitu:

- Temperature gas keluaran dari boiler akan meningkat seiring waktu, jika misal temperature normal dari boiler adalah 550 deg F, dan dari hasil pengukuran menunjukkan temperature 570 – 600 deg F pada beban yang sama, maka hal ini menunjukkan telah terjadi fouling terjadi.
- Penurunan tekanan gas di bagian konveksi meningkat. Jika konsumsi power dari Fan meningkat seiring waktu, maka bisa diperkirakan bahwa telah terjadi penyumbatan pada arah aliran gas.
- Pembangkitan uap secara alami akan menurun apabila terjadi fouling.

Jika fouling dengan tingkat keparahan tinggi terjadi, maka boiler harus di stop dan dilakukan investigasi lanjutan. Fouling dalam skala normal masih bisa diterima sebelum waktu perbaikan dilakukan. Kalkulasi dari perpindahan panas, pengukuran data lapangan dan temperature dari dinding tube juga akan menunjukkan apakah fouling terjadi pada sisi gas, dari sisi uap atau dari kedua sisi. Apabila fouling terjadi pada sisi gas, maka temperature dinding dari tube tidak akan meningkat, namun jika terjadi pada sisi uap maka temperature dinding dari tube akan meningkat secara signifikan.

2.12. Pemilihan Waste Heat Boiler

Hal-hal berikut harus diperhatikan untuk menentukan penggunaan waste heat boiler sebagai heat recovery, yaitu:

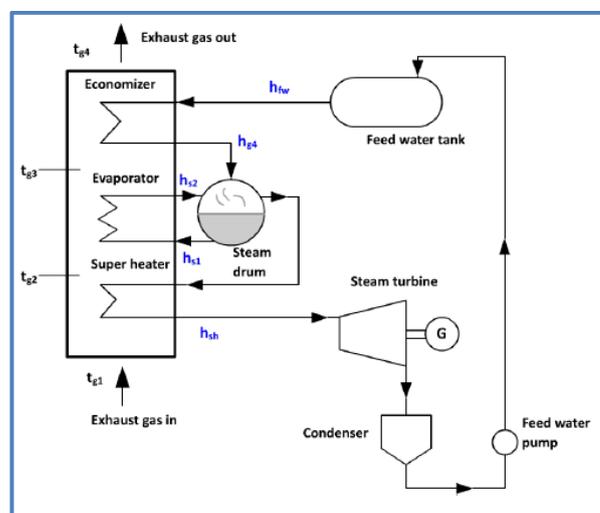
- Menentukan proses yang menghasilkan gas buang, jika gas buang yang dihasilkan cukup bersih, maka finned tube dapat digunakan spy dimensi boiler lebih compact, tetapi jika gas buang yang digunakan cukup kotor, maka *bare*

tube harus digunakan dengan ketentuan harus ada pembersihan pada permukaan tube secara regular.

- Kemurnian dari uap harus ditentukan, terutama jika uap yang dihasilkan akan digunakan pada turbine gas atau turbine uap.
- Menentukan luasan area yang tersedia untuk pemasangan *waste heat boiler*, untuk menentukan jenis dari *waste heat boiler* yang akan dipasang.
- Biasanya *feedwater* digunakan untuk *desuperating steam* untuk mengontrol suhu. Air yang digunakan ini tidak boleh memiliki kandungan material solid dan harus di demineralisasi terlebih dahulu.
- Gas Flow harus di tentukan dengan menggunakan unit massa
- Harus dilakukan analisa yang detail terhadap gas buang yang akan dimanfaatkan panasnya.
- Level emisi NOx, CO, atau pollutant lain pada *outlet waste heat boiler* harus ditentukan di awal

2.13. Prinsip Siklus Waste Heat Boiler

Waste Heat Boiler (WHB) memulihkan panas dari sumber gas panas seperti gas buang dan menghasilkan uap bertekanan. WHB dapat dioperasikan baik dalam mode *kogenerasi* atau mode siklus gabungan. Dalam mode *kogenerasi*, uap yang dihasilkan dari HRSG terutama digunakan untuk aplikasi proses, sedangkan pada mode siklus gabungan, daya dihasilkan melalui generator listrik berbasis turbin uap.



Gambar 2.10 Diagram Basis Siklus Heat Recovery

Berdasarkan posisi aliran gas, WHB dapat didesign secara vertikal dan secara horizontal, meskipun kedua design ini secara biaya manufaktur hampir sama, tetapi ada kelebihan dan kekurangan dari masing-masing design ini seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4 berikut:

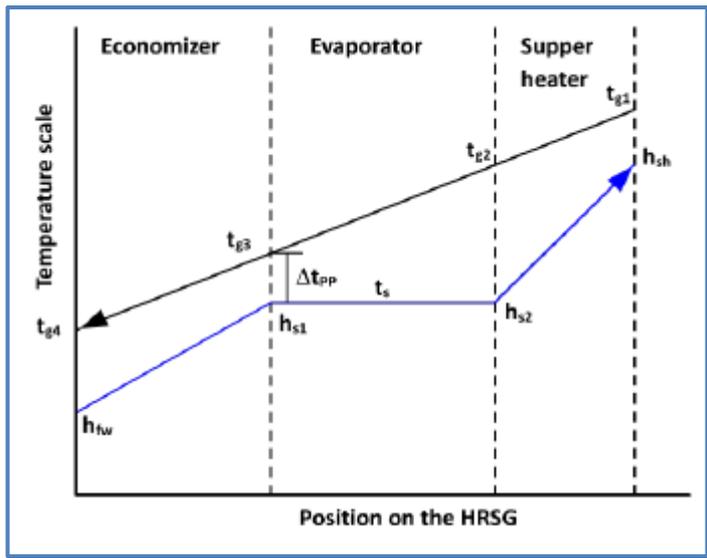
Tabel 2.4 Perbandingan WHB Vertikal dan Horizontal

Horizontal	Vertikal
Mebutuhkan 30% area lebih luas	Area yang dibutuhkan kecil
Mebutuhkan jumlah expansion joint yang lebih banyak	Jumlah expansion joint lebih sedikit
Structural lebih sedikit	Mebutuhkan structural yang complex
Susah di maintain dan di inspeksi	Mudah di maintain dan di inspeksi

Sumber: V. Ganapathy, Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generator

2.14. Profile Temperature WHB dan Pembangkitan Uap Jenuh

Dua variabel yang mempengaruhi profil suhu uap dan laju produksi uap adalah titik pendekatan dan perbedaan suhu pada *pinch point*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. *Pinch point* adalah perbedaan antara suhu uap jenuh dan suhu gas yang meninggalkan evaporator. Titik Pendekatan adalah perbedaan antara suhu air yang memasuki evaporator dan suhu uap jenuh. Pemilihan kedua variabel ini akan mempengaruhi ukuran economizer dan evaporator heat exchanger yang akan mempengaruhi biaya WHB.



Gambar 2.11 Profile Temperature WHB (Sisi Uap dan Sisi Gas).

Untuk menghitung nilai optimasi dari WHB dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

Perbedaan Suhu *Pinch Point* (Δt_{pp})

$$\Delta t_{pp} = t_{g3} - t_s \dots \dots \dots (2.15)$$

t_s diperoleh dari table saturasi untuk air/uap pada saat air memasuki *evaporator*

Dengan memasukkan Energy Balance antara t_{g1} and t_{g3} ;

$$\dot{m}_{gas} c_p (t_{g1} - t_{g3}) = \dot{m}_{st} (h_{sh} - h_{appr}) \dots \dots \dots (2.16)$$

Untuk menghitung temperature gas t_{g3} , terlebih dahulu kita perlu menghitung mass flow dari steam, dengan menggunakan persamaan:

$$P_{st} = \dot{m}_{st} (h_{sh} - h_{out}) \eta_m \dots \dots \dots (2.17)$$

- P_{st} = Steam turbine power out put
- h_{out} = Enthalpy of steam at turbine out
- \dot{m}_{st} = Steam mass flow rate
- h_{sh} = Enthalpy of super heated steam
- η_m = turbine mechanical efficiency

Enthalpy Superheated Steam didapatkan dari diagram h-s atau pada table steam, sehingga enthalpy pada outlet dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$h_{out} = h_{sh} - \eta_{is}(h_{sh} - h_{out,is}) \dots \dots \dots (2.18)$$

- h_{out} = Enthalpy of steam at turbine out
- h_{sh} = Enthalpy of superheated steam
- η_{is} = Isentropic efficiency of turbine
- $h_{out,is}$ = Isentropic outlet enthalpy of steam

Sehingga, mass Flow Steam dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_{st} = \dot{m}_{st}(h_{sh} - h_{out})\eta_m \dots \dots \dots (2.19)$$

Dengan demikian Gas Temperature t_{g3} dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\dot{m}_{gas}\bar{c}_p(t_{g1} - t_{g3}) = \dot{m}_{st}(h_{sh} - h_{appr}) \dots \dots \dots (2.20)$$

Temperature pada stack dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\dot{m}_{gas}\bar{c}_p(t_{g1} - t_{g4})(1 - h_1) = \dot{m}_{st}(h_{sh} - h_{fw}) \dots \dots \dots (2.21)$$

- h_{sh} = enthalpy of super heated steam
- h_{fw} = enthalpy of saturated water

Heat Balance pada Econimizer dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\dot{m}_{gas}\bar{c}_p(t_{g3} - t_{g4}) = \dot{m}_{st}(h_{appr} - h_{fw}) \dots \dots \dots (2.22)$$

- \dot{m}_{gas} = Flue gas mass flow rate
- \bar{c}_p = specific heat of flue gas
- t_{g3} = Flue gas temperature after evaporator
- t_{g4} = Flue gas output temperature from HRSG
- \dot{m}_{st} = Steam mass flow rate of HRSG
- h_{appr} = Enthalpy at approach point temperature
- h_{fw} = Feedwater enthalpy

Heat Balance pada Evaporator

$$\dot{m}_{gas}c_p(t_{g2}-t_{g3})=\dot{m}_{st}(h_{s2}-h_{appr})\dots\dots\dots(2.23)$$

- \dot{m}_{gas} = Flue gas mass flow rate
- \bar{c}_p = specific heat of flue gas
- t_{g2} = Flue gas temperature after economizer
- t_{g3} = Flue gas temperature after evaporator
- \dot{m}_{st} = Steam mass flow rate of HRSG
- h_{s2} = Enthalpy of steam after the evaporator
- h_{appr} = Enthalpy at approach point temperature

Heat Balance pada Superheater

$$\dot{m}_{gas}c_p(t_{g1}-t_{g2})=\dot{m}_{st}(h_{sh}-h_{s2})\dots\dots\dots(2.24)$$

- \dot{m}_{gas} = Flue gas mass flow rate
- \bar{c}_p = specific heat of flue gas
- t_{g1} = Flue gas input temperature to HRSG
- t_{g2} = Flue gas temperature after economizer
- \dot{m}_{st} = Steam mass flow rate of HRSG
- h_{sh} = Enthalpy of super heated steam
- h_{s2} = Enthalpy of steam after the evaporator

2.15. Efisiensi Boiler

Efisiensi panas dari boiler adalah persentasi dari panas yang masuk yang secara efektif digunakan untuk menghasilkan steam. Ada 2 (dua) cara untuk menghitung efisiensi dari boiler yaitu:

- Metode Langsung : Perbandingan antara panas keluaran dengan panas masukan, atau ditunjukkan dengan persamaan berikut:

$$\text{Efisiensi Boiler} = \frac{\text{Heat Output}}{\text{Heat Input}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.25)$$

$$\text{Efisiensi Boiler} = \frac{Q \times (h_g - h_f)}{M_g \times \rho \times C_p \times \Delta T} \times 100\% \dots\dots\dots(2.26)$$

Dimana:

Q = Jumlah uap jenuh yang dihasilkan per jam (kg/hr)

h_g = Entalphy pada uap jenuh (kcal/kg)

h_f = Entalphy Feed water (kcal/kg)

- Metode Tidak Langsung: Yaitu perbedaan antara rugi-rugi dan energy masukan.

Untuk menghitung efisiensi boiler dengan metode tidak langsung menggunakan standar British, BS 845:1987 dan standar Amerika ASME PTC-4-1 Power Test Code Steam Generating Unit.

Effisiensi tidak langsung dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{Efisiensi Boiler} = 100 - (i+ii+iii+iv+v+vi+vii) \dots\dots\dots(2.27)$$

Dimana:

i = off gas kering

ii = Penguapan air yang disebabkan oleh kandung H₂

iii = Penguapan dari panas off gas

iv = Kandungan air pada udara pembakaran

v = Panas dari off gas yang hilang karena debu

vi = Panas dari off gas yang tertutup debu

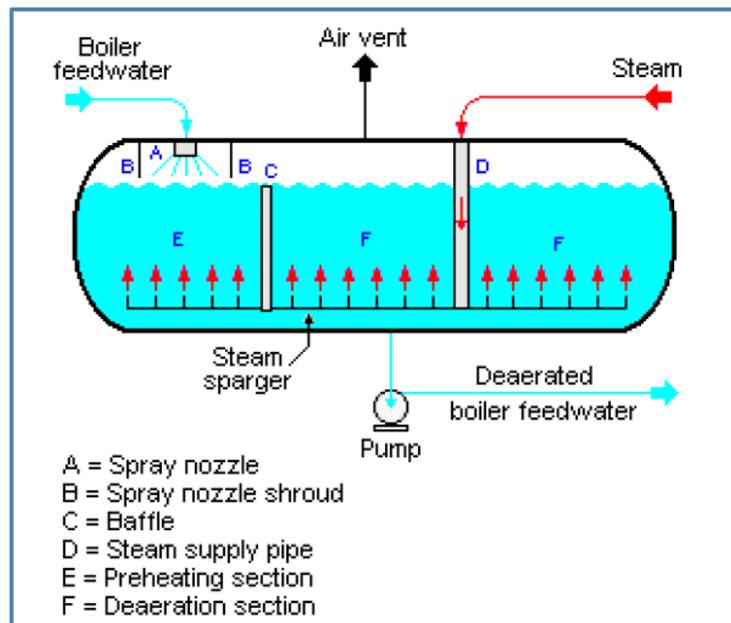
vii = Radiasi dan rugi-rugi lain yang tidak terhitung.

2.16. Komponen-komponen WHB

Waste Heat Boiler memiliki 10 komponen utama agar prosesnya dapat berjalan. Berikut penjelasan kesepuluh komponennya:

2.17. Deaerator

Deaerator merupakan suatu komponen dalam WHB yang berfungsi untuk mengurangi kandungan oksigen didalam air sebelum air dimasukkan kedalam proses WHB. Deaerator juga merupakan tangki penyimpan air dari condensator yang kemudiannakan dialirkan ke LP Drum. Dari condensor ke deaerator berbentuk fasa cair, sehingga pada deaerator terjadi hukum kesetimbangan Massa.



Gambar 2.12. Daerator

2.18. LP Drum

LP Drum merupakan tempat penampungan air pada WHB, dimana kandungan oksigen sudah berkurang dari deaerator, yang kemudian akan dialirkan ke feed water pump untuk dipompakan menuju economizer. Lp drum juga menerima suplay air dari flash vessel. Pada LP drum fasa masih dalam bentuk cair sehingga tidak terjadi perubahan fasa. Dinamakan LP (Low Pressure) drum karna masih dalam bentuk cair, sehingga tekanan didalam tangki masih rendah.

2.19. Feed Water Pump

Feed Water Pump boiler adalah tipe khusus dari pompa yang digunakan untuk memompa air hasil kondensasi menuju ke steam drum pada boiler. pompa secara normal pada unit tekanan tinggi menggunakan pengisapan dari sisitem kondensasi dan dapat menjadi tipe pompa sentrifugal. Dalam kasus lain untuk memompa air ke boiler, pompa harus memiliki tekanan yang cukup agar dapat melebihi tekanan steam pada boiler, hal ini biasanya akan terpenuhi melalui penggunaan sentrifugal pump. Feed water pump pada umumnya dijalankan atau dikendalikan oleh sebuah pelampung atau sama dengan alat untuk menyensing level, yang mana akan

mendeteksi apabila level cair pada boiler rendah, dan pompa akan memompa air hingga level air meningkat sesuai dengan keadaan yang diinginkan.

2.20. Economizer

Economizer adalah alat pemindah kalor berbentuk tubular yang digunakan untuk memanaskan air umpan boiler dari BFWP (*Boiler Feed water pump*) sebelum masuk ke steam drum. Istilah *economizer* diambil dari kegunaan alat tersebut, yaitu untuk menghemat (*to economize*) penggunaan bahan bakar dengan mengambil kalor (*recovery*) gas buang sebelum dibuang ke atmosfer. Biro Efisiensi Energi (2004) menyatakan bahwa sebuah *economizer* dapat dipakai untuk memanfaatkan kalor gas buang untuk pemanasan awal air umpan boiler. Setiap penurunan 220⁰C suhu gas buang melalui *economizer* atau pemanas awal terdapat 1% penghematan bahan bakar dalam boiler. Setiap kenaikan 60⁰C suhu air umpan melalui *economizer* atau kenaikan 200⁰C suhu udara pembakaran melalui pemanas awal udara, terdapat 1% penghematan bahan bakar dalam boiler.

Kinerja *economizer* ditentukan oleh fluida yang mempunyai koefisien perpindahan kalor yang rendah yaitu gas. Kecepatan perpindahan kalor dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan koefisien perpindahan kalor total dengan cara mengatur susunan tubing/properti fin dan meningkatkan luas kontak perpindahan kalor. Respon yang dihasilkan oleh *economizer* adalah efektifitas perpindahan kalor dan biaya operasi. Efektifitas perpindahan kalor adalah besarnya energi yang dapat diambil dari total jumlah energi yang dapat diserap. Semakin besar efisiensi perpindahan kalor pada *economizer*, maka kalor gas sisa yang diambil akan semakin banyak. Semakin besar efektifitas perpindahan kalor yang terjadi, maka alat tersebut semakin efisien.

Biaya operasi *economizer* ditentukan oleh tenaga fan dan tenaga pompa. Fan digunakan untuk mengalirkan udara pembakaran ke boiler melalui *economizer*. Semakin banyak loop dan semakin rumit susunan tubing pada *economizer* maka tenaga fan yang dibutuhkan semakin besar. Pompa digunakan untuk mengalirkan air umpan boiler ke steam drum melalui *economizer*. Semakin panjang dan semakin banyak loop pada *economizer*, maka tenaga pompa yang dibutuhkan semakin besar.

Respon yang optimum diperoleh menggunakan perancangan faktor yang mempengaruhi kinerja *economizer* sebagai berikut:

- Diameter luar tubing, yaitu besarnya diameter tube yang digunakan dalam menyusun *economizer*. Semakin besar diameter tube akan mengakibatkan efektifitas perpindahan kalor semakin berkurang.
- *Transversal spacing*, yaitu menyatakan jarak antar tube sejajar ke arah lebar *economizer*. Semakin lebar jarak antar tube mengakibatkan proses induksi kalor dalam *economizer* semakin berkurang, sehingga efektifitas perpindahan kalor menurun
- Kerapatan fin, yaitu banyaknya fin tiap inci yang dapat disusun untuk menggabungkan beberapa tube dalam *economizer*. Semakin banyak fin yang tersusun akan mengakibatkan perpindahan kalor tidak efektif karena jarak antar tube yang semakin jauh.
- Kinerja *economizer* sangat sensitif terhadap faktor noise suhu *feedwater*. Hal ini dikarenakan bila temperatur *feedwater* tidak baik maka akan mengakibatkan biaya operasi meningkat.

2.21. HP Drum

HP drum adalah tempat penampung siklus pemanasan air dalam boiler yang digunakan untuk memisahkan wujud fluida, antara yang berwujud air dengan yang berwujud uap (*steam*). Di dalam HP drum terapat peralatan pemisah uap. Campuran *feedwater* dan uap mengalir mengikuti bentuk separator sehingga uap air pada campuran akan jatuh dan masuk ke saluran *primary superheater*. Air yang jatuh akan dialirkan ke bagian bawah dari drum secara gravitasi dan mengalir ke dalam tempat penampungan kemudian keluar menuju *Flash vessel*.

2.22. Flash Vessel

Flash vessel merupakan tempat penampungan atau tangki penampungan air dari HP drum yang masih mengandung uap atau steam untuk dipisahkan dengan steam. Air yang sudah dipisahkan akan menuju ke LP drum, sedangkan uap hasil pemisahan tersebut akan menuju ke *blowdown tank*. Pemisahan pada *flash vessel*

ini dilakukan secara gravitasi sehingga tidak ada kalor yang mengalir, dan tidak terjadi perubahan temperature.

2.23. Evaporator

Evaporator berfungsi sebagai tube pemanasan pada WHB. Terdapat dua jenis evaporator, yaitu *Low Pressure* dan *High Pressure*. Berikut penjelasannya:

- LP evaporator merupakan alat untuk menguapkan air dari LP drum, selain itu LP evaporator juga berfungsi untuk mempercepat pemanasan pada proses WHB sebelum nantinya akan dialirkan ke *economizer* untuk pemanasan lebih lanjut. LP evaporator terdiri dari dua bagian, pada setiap bagian terdiri dari 2 modul, dimana pada setiap modul terdiri dari pipa-pipa pemanas. LP evaporator mendapatkan sumber kalor untuk pemanasan berasal dari *exhaust* gas hasil pembakaran pada burner. Hasil penguapan yang sudah tidak dipakai lagi atau hasil buangan pada LP evaporator akan dialirkan ke *blowdown tank*.
- Fungsi dari HP evaporator adalah sama dengan LP evaporator. Terjadi perubahan fasa disini hanya saja bedanya dengan LP evaporator laju aliran hasil dari evaporasi sudah berupa steam dengan tekanan yang tinggi. Pada HP evaporator terdiri dari 2 bagian, dimana bagian satu terdiri dari 4 modul, dan bagian 2 terdiri dari 3 modul.

2.24. Superheater

Superheter adalah tempat berupa jalur pipa-pipa sebagai proses lanjut dalam pengolahan steam yang memanfaatkan ekshaust gas hasil pembakaran, sehingga di dapat steam untuk proses ke turbin yang sesuai dengan standard yang telah di tentukan.

- **Primary Superheater (Superheater 1)**

Primary superheater menerima gas yang relatif dingin untuk dipanaskan dengan gas buang yang alirannya searah dengan aliran uap tersebut. Kemudian uap keluar melalui *primary superheater* outlet melalui pipa transfer yang dilengkapi dengan pipa spray tipe attemperator untuk mengatur temperatur uap menuju *secondary superheater*.

- **Secondary Superheater**

Secondary Superheater adalah proses lanjut pengolahan steam setelah di semprot dengan air di *spraying water desuperheater* sehingga di dapatkan temperatur yang disyaratkan suplay ke turbin yaitu pada temperatur 420 - 440 0C di sini uap juga akan dipanaskan. Uap dari final *superheater tube* keluar melalui final *superheater outlet header* untuk meninggalkan boiler menuju ke High Pressure (HP) turbine.

2.25. Burner

Burner merupakan peralatan pembakar yang bahan bakarnya terbagi menjadi bagian-bagian kecil sehingga memudahkan proses pembakaran dengan udara. Bahan bakar utamanya adalah natural gas. Penyalaan burner tergantung pada beban dari unit. Burner Management Sytem (BMS) adalah penyaluran konfigurasi penyalaan burner pada saat start up atau shut down dan load change. Jumlah burner yang menyala atau mati tergantung pada beban generator yang sebanding dengan kapasitas bahan bakar untuk memproduksi uap pada boiler. Konfigurasinya diatur supaya pemanasan dalam ruang bakar merata dan efisien. Penyalaan boiler yang tidak seimbang dengan beban generator dapat mengakibatkan tidak stabilnya tekanan dan temperatur uap.

2.26. Cerobong (Main Stack)

Cerobong adalah alat untuk membuang gas hasil pembakaran ke udara bebas.

2.27. Proses pada Waste Heat Boiler

Proses yang terjadi pada WHB pertama-tama air *demineralized* yaitu air tanpa kandungan mineral atau air murni dipompakan ke *boiler* dari *condenser* dengan pompa *feedwater* melalui pipa *economiser*, di *economiser* air menerima kalor tetapi masih dalam fasa cair (belum mengalami penguapan). Kemudian air tersebut masuk ke HP Drum dan diteruskan ke seluruh water tube evaporator, pada evaporator terjadi perubahan fasa dari air menjadi uap jenuh (saturated steam) untuk dialirkan

kembali menuju HP drum. Uap yang berada pada HP drum dialirkan (uap disalurkan melalui saluran diatas, sedangkan air melalui saluran bawah) ke *superheater tube* yg berada paling dekat dengan sumber kalor atau pembakaran yaitu burner, pembakaran pada WHB ini memanfaatkan limbah kalor dari tanur peleburan. *Superheater* digunakan untuk merubah uap jenuh menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*). *Superheated steam* kemudian dialirkan ke steam turbin untuk menggerakkan blade turbin. Setelah melalui turbin temperatur uap menurun begitu juga enthalpynya, fasanya berubah kembali ke uap jenuh dan mengalir ke *condensor*. Pada *condensor* fasanya dirubah kembali ke fasa cair dan kemudian dipompakan kembali ke boiler begitu seterusnya.

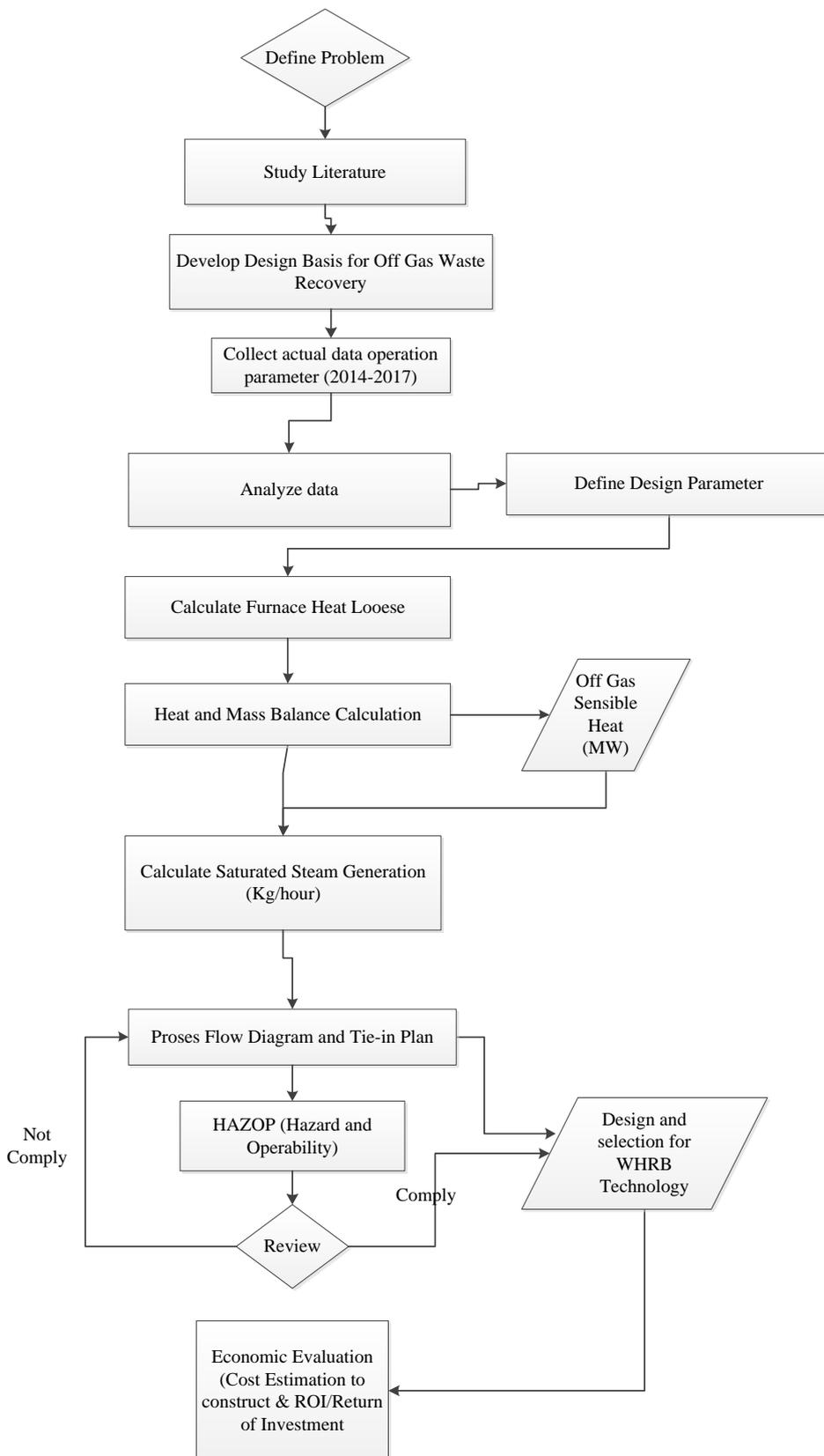
BAB III

METODOLOGI

3.1 Metodologi dan Diagram Alur Penelitian

Tabel 3.1 Metodologi Penelitian

No	Metodologi	Keterangan
1	Studi Pustaka	Melakukan kajian pustaka yaitu kajian terhadap karya-karya ilmiah yang ada, guna menelusuri relevansi dengan topik tesis. Sehingga dari rangkuman hasil studi pustaka, dapat ditunjukkan originalitas topik tesis ini
2	Studi Literature	Melakukan studi terhadap teori yang ada guna menunjang kajian <i>Waste Heat</i> dan menunjang Perancangan WHRG. Hasil studi literatur diletakkan sebagai teori dasar.
3	Perumusan Masalah	Merumuskan masalah yang menjadi dasar dilakukan penelitian ini
4	Penetapan Variabel Penelitian	Menentukan variable penelitian berdasarkan rumusan masalah yang sudah ditentukan
5	Pengumpulan data	Melakukan pengumpula data panas buang (<i>Waste Heat</i>), baik secara langsung (pengukuran) maupun tidak langsung (Hystorical data atau Recording Data)
6	Perhitungan potensi panas buang (<i>Waste Heat</i>)	Melakukan perhitungan potensi panas buang dari tungku listrik dan perhitungan energi yang diperlukan untuk memproduksi uap jenuh (<i>Saturated Steam</i>)
7	Pemilihan spesifikasi WHRB	Menentukan spesifikasi teknik untuk pemilihan WHRB (<i>Waste Heat Recovery Boiler</i>) dari pasaran.
8	Feasibility Study WHRB	Melakukan studi kelayakan dari sisi teknis guna mendapatkan data untuk menghitung investasi dan <i>Return Of Investment</i> nya (ROI)
9	Hasil dan Pembahasan	Melakukan kajian, analisa terhadap data, hasil perhitungan dan hasil penelitian yang dilakukan
10	Kesimpulan dan Saran	Mendapatkan kesimpulan dari hasil penelitian yang menjadi tujuan dilakukannya penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Study Pustaka

Sebelum penelitian ini dilakukan, terlebih dahulu telah dilakukan kajian terhadap karya-karya ilmiah yang ada guna menelusuri relevansi dengan topik tesis. Tabel 3.2 berikut adalah rangkuman dari studi pustaka yang sudah dilakukan, yaitu:

Tabel 3.2 Rangkuman Studi Pustaka

No	Jurnal	Penulis	Resume
1	<i>Waste Heat Recovery From Furnace Flue Gases using waste Heat Recovery Boiler</i>	Ahmad. SyedAmjad, Ehsa. Saqib, Usman Babar. Muhammad, Hussainb. SyedHasnain	Pemanfaatan panas buang dari tanur peleburan besi dengan menggunakan kokas sebagai bahan bakar. Pemanfaatan digunakan untuk membangkitkan steam dengan menggunakan <i>two pass fire tube waste heat boiler</i> .
2	<i>Continuous Off Gas Measurement and Energy Balance in Electric Arc Steelmaking</i>	Kuhn.Robert, Geck.Hans Gunter, Schwerdtfeger.Klaus	Penelitian ini tentang sistem yang dikembangkan untuk mengukur komposisi dari off gas secara continue selama proses peleburan. Pengukuran yang dilakukan adalah untuk mengukur dan menganalisa karbon monoksida, karbon dioksida, hidrogen, nitrogen, oksigen dan argonm dan juga mengukur suhu off gas. Data ini akan diolah untuk mendapatkan laju aliran dari chemical dan besarnya sensible heat yang dihasilkan setiap saat.
3	<i>Heat recovery from EAF off-gas</i>	Born. Carsten, Granderrath. Ralf	Tulisan ini tentang penelitian yang dilakukan untuk menghasilkan steam dengan cara menurunkan suhu gas buang, dimana penelitian ini dilakukan di beberapa industri peleburan besi. Penelitian ini sudah diaplikasikan oleh

			Tenova iRecovery Steam Generation Technology dibeberapa industri pengolahan logam.
4	<i>The Eletric Arc Furnace Off-Gasses Modeling Using CFD</i>	Karbowniczek. M, Kawalkowski. M	Penelitian ini tentang penghitungan panas buang dari tanur listrik dengan menggunakan method CFD – Computational Fluid Dynamic, sehingga dengan penggunaan model CFD ini maka akan dapat dilakukan simulisi numeric untuk menghitung panas buang dari off gas.
5	<i>A Novel Method of Waste Heat Recovery from High Temperature Furnaces</i>	Atreya, Arvind	Penelitian ini tentang penggunaan kembali energy yang terbuang pada flue gas tungku peleburan dengan cara mensirkulisikan kembali panas buang tersebut kembali ke dalam furnace untuk menghindari terbuangnya panas dalam jumlah besar, dan dengan mensirkulasikan kembali panas buang ini akan dapat menjaga kadar oksigen yang dibutuhkan dalam proses peleburan.
6	<i>Waste Heat Utilization from a Submerged Arc Furnace Producing Ferrosilicon</i>	Hjartarson.Heimir, Palsson. Halldor, Saevarsdottir. Gudrun	Penelitian tentang penggunaan panas buang dari produksi ferrosilicon dengan menggunakan tungku listrik, Pemanfaatan energy yang di study adalah untuk sumber panas di area setempat, pembangkitan listrik dan untuk menghasilkan uap. Penelitian yang dilakukan dengan menggunakan metode analisa energy dan analisa

			exergy pada tungku 47 MW yang menghasilkan FeSi75
7	<i>Design of Waste Heat Recovery System in a Sponge Iron Plant</i>	Saurav Kumar Sahu	Penulisan tesis mengenai penggunaan panas buang dari process sponge iron. Penelitian pada tesis yang dilakukan meliputi perhitungan teknikal dan perhitungan dari tinjauan ekonomi.

Dari hasil studi pustaka yang dilakukan, dapat dilihat bahwa sudah banyak studi yang dilakukan dalam hal pemanfaatan gas buang dari tungku peleburan, baik digunakan untuk menghasilkan listrik, menghasilkan uap, dan juga sebagai pemanas. Tetapi dari hasil studi pustaka ini menunjukkan bahwa belum ada penelitian mengenai pemanfaatan gas buang dari hasil peleburan calcine baik digunakan untuk pembangkitan listrik maupun untuk menghasilkan uap jenuh.

3.3 Pengukuran Parameter off Gas

Pada penelitian ini, hal paling mendasar untuk dilakukan adalah pengukuran parameter off gas yang akan di gunakan kembali (*Waste Heat Recover*). Adapun Parameter yang harus diukur adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 3.3 berikut:

Tabel 3.3 Parameter Pengukuran Off Gas

Furnace Freeboard	Kadar CO
	Temperature Freeboard
Furnace Combustion Chamber	Kadar CO
	Flow Rate Off Gas
	Static Pressure
	Temperature Off Gas

Spray Chamber Outlet	Flow Rate Off Gas
	Static Pressure
	Temperature Off Gas

Pengukuran parameter furnace dilakukan dengan mengevaluasi data record untuk operasi furnace selama beberapa tahun terakhir. Data record yang diambil berdasarkan data yang dimonitor secara continue oleh peralatan instrument yang dipasang dan juga berdasarkan data record manual yang dilakukan oleh operator.

Data parameter yang direcord meliputi:

- Parameter Off Gas
- Feed Rate Calcine
- Power Input
- Furnace Freeboard Temperature
- Flow Rate System Spray Water
- Flow Rate System Spray Udara

Selama pengukuran parameter furnace dan off gas, parameter berikut juga harus di evaluasi dan di catat, yaitu:

- Feed LOI dan % Karbon
- Ukuran Gap Pembakaran (Combustion Gap Size)
- Area Roof yang terbuka (estimate)

3.4 Analisa Energi dan Analisa Exergi

3.4.1 Analisa Energi

Langkah pertama dari analisis ini adalah mengembangkan model untuk mengevaluasi semua hubungan dari perbedaan kimia, massa, dan energi. Dari hubungan ini, data yang didapatkan dari proses peleburan nikel melalui tungku listrik, pengukuran lapangan untuk flow rate dan temperature, maka analisis energi dan exergi bisa dilakukan. Untuk perhitungan dan analisa energy meliputi:

- Chemical Energy Product

- Panas dalam product
- Energy dalam off Gas (Q_{og})
- Sistem Pendingin (Q_{cs})
- Rugi-rugi dari bodi tungku ($Q_{fb} + Q_{fs}$)

3.4.2 Analisa Exergi

Exergi adalah mengukur kualitas dari energi, exergi dihitung berdasarkan referensi awal sehingga disebut dengan dead state. Sistem disebut dead state ketika terjadi kesetimbangan antara termodinamika dan lingkungan. Pada analisa ini, dead state didefinisikan sama dengan state standard yaitu $t_o = 25 \text{ deg C}$ dan p_o adalah 100 kpa. Pada kalkulasi ini *exergy kinetic dan exergy potensial* diabaikan. Untuk persamaan exergy dituliskan sebagai berikut:

$$E_{ph} = (h-h_o) - T_o \cdot (s-s_o) \dots \dots \dots (3.1)$$

Dimana

H dan S = Entalpy dan Entropy dalam aliran

H_o , S_o , dan T_o adalah Entalphy, Entropy, dan Temperature pada dead state.

Untuk zat padat pada tekanan atm, standard chemical exergy E° (kJ/mol) digunakan.

Untuk campuran gas pada tekanan atm, sangat penting untuk menghitung perbedaan komposisi dari lingkungan dan menggunakan persamaan berikut:

$$E_0 = \sum X_i \cdot \varepsilon + \dot{R} \cdot T_o \cdot \sum X_i \cdot \ln(X_i) \dots \dots \dots (3.2)$$

Dimana X_i adalah porsi molar dari campuran gas pada komponen i, dan R adalah konstanta gas universal.

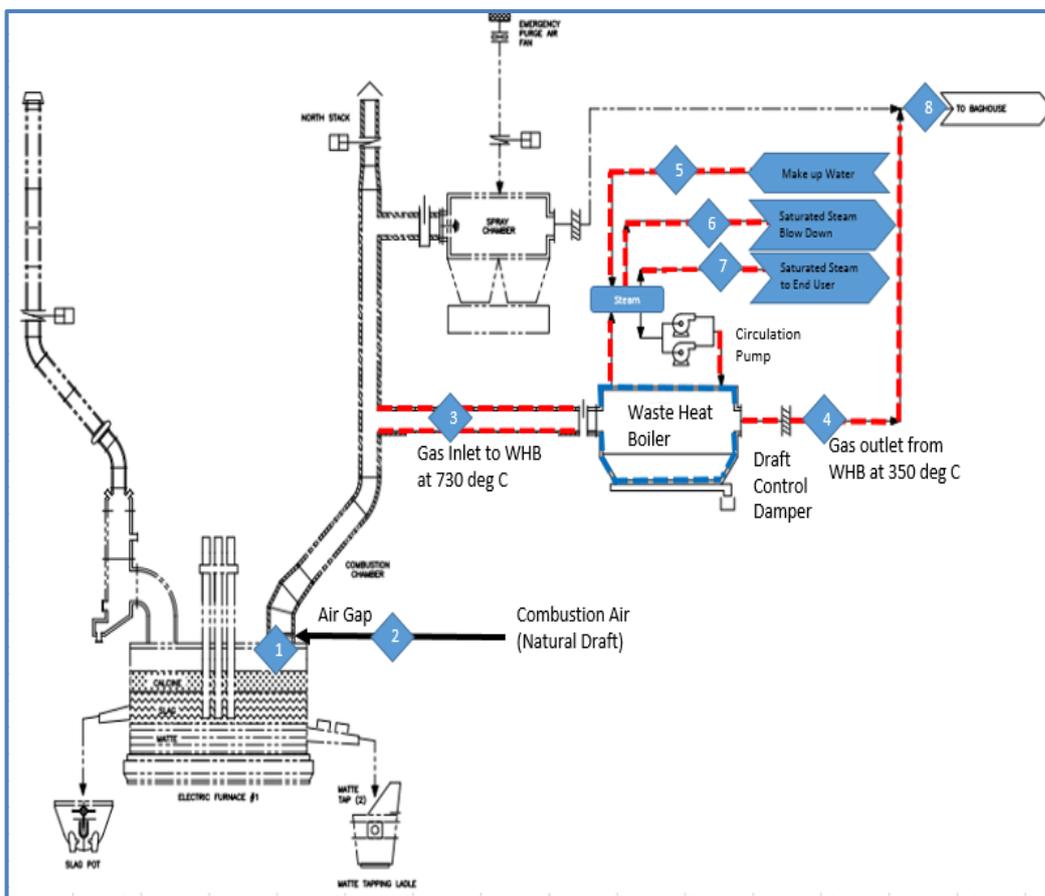
Dari analisa exergy tersebut maka akan didapatkan estimasi exergy yang diberikan ke tungku peleburan.

3.5 Parameter Design Waste Heat Boiler

Dalam pemilihan waste heat boiler ada beberapa hal yang akan dipertimbangkan, yaitu:

- Parameter dari panas buang (temperature, flow rate) yang akan digunakan untuk menghasilkan uap jenuh dengan menggunakan waste heat boiler.
- Quality dari panas buang yang akan digunakan untuk menghasilkan uap jenuh dengan menggunakan waste heat boiler.
- Kemurnian dari uap yang akan dihasilkan
- Area atau lokasi pemasangan waste heat boiler
- Level emisi dari waste heat boiler NOx, CO

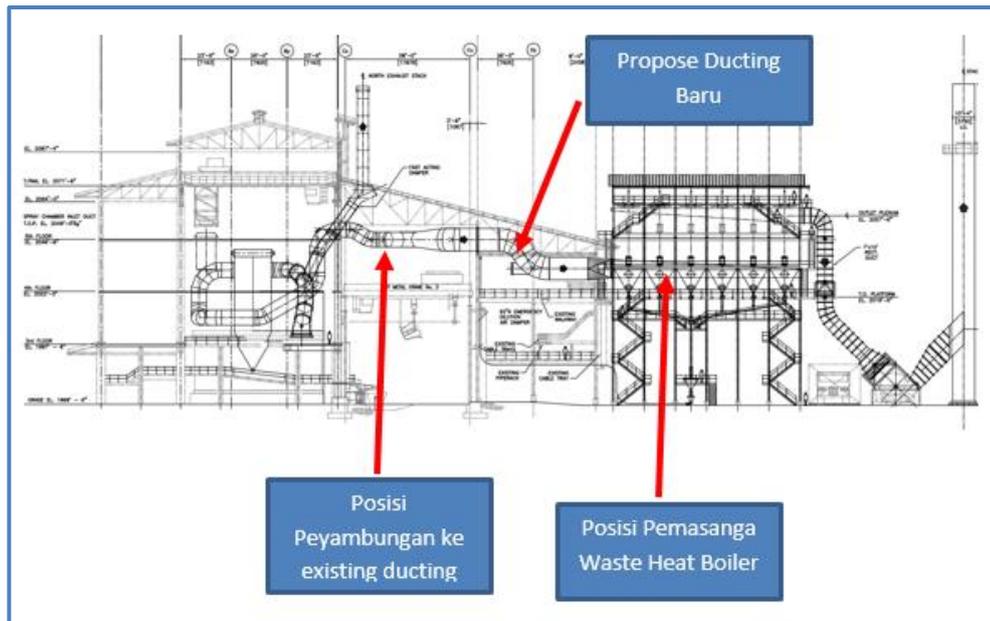
3.6 Process Flow Diagram – Penggunaan off Gas dengan Waste Heat Boiler



Gambar 3.2 Process Flow Diagram

3.7 Penyambungan (Tie-in) untuk Waste Heat Boiler

Ducting untuk pemasangan waste heat boiler ini akan di sambung dari eksisting stack seperti ditunjukkan Gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.3 Layout Elevation – Tie in

3.8 Evaluasi Ekonomi

3.8.1 Perhitungan Biaya Investasi

Perhitungan biaya investasi untuk pemanfaatan panas buang dari furnace dengan menggunakan waste heat boiler didasarkan atas asumsi biaya dari penawaran supplier, historical data, perhitungan standar bangunan dan asumsi-asumsi lainnya. Maginute perhitungan biaya diperkirakan +/- 20% akurasi. Adapun parameter-parameter perhitungan biaya investasi yang akan digunakan meliputi:

- Biaya Langsung (Direct Cost), yang meliputi:
 - ✓ Harga equipment waste heat boiler
 - ✓ Harga Ductworks, Dampers, Expansion Joint, Insulation
 - ✓ Piping, Electrical, Instrumentation
 - ✓ Spares
 - ✓ Biaya Installation
- Biaya Tidak Langsung (Indirect Cost)
 - ✓ Engineering, and Management Projects
 - ✓ Freight
 - ✓ Contingency

3.8.2 Perhitungan Potensi Penghematan

Perhitungan potensi penghematan tahunan (*Potential Yearly saving*) dapat dilakukan dengan asumsi sebagai berikut:

- 100% uap yang dihasilkan digunakan untuk menggantikann produksi uap jenuh yang sekarang.
- Boiler yang sekarang beroperasi pada efficiency 80%
- Harga HSFO : US\$ 55.67/bbl
- Jam operasi dari waste heat boiler: 8322 jam/tahun (Utilisasi 95%)
- Rugi-rugi, termasuk blow down (2%), rugi-rugi panas melalu WHB 1%

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk dapat memanfaatkan panas buang dari dari proses peleburan PT Vale Indonesia adalah dengan mengetahui besarnya potensi panas buang yang dapat dimanfaatkan dan memilih equipment yang tepat sehingga panas buang tersebut dapat dimanfaatkan secara efisien.

Potensi panas buang ini dapat diperoleh dengan mengevaluasi parameter operasi peleburan tungku no #4 (Jam operasi, kapasitas produksi, power, persentasi karbon, LOI, dan parameter off gas), menghitung rugi-rugi panas dari proses peleburan tungku tersebut, dan menganalisa kesetimbangan massa / kesetimbangan panas pada proses peleburan.

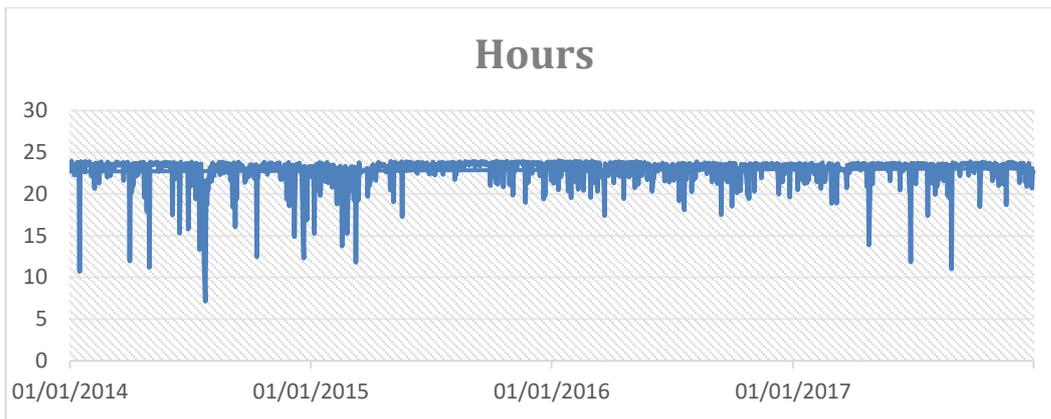
Dari hasil analisa ini maka akan didapatkan besarnya potensi panas buang yang dapat digunakan untuk menghasilkan uap (kg/hr) dalam kondisi saturated (10 Bar@ 180 °C) dengan menggunakan *waste heat recovery boiler*.

4.1.Design Parameter

Perihal penting dalam perhitungan besarnya energi panas buang dari proses peleburan furnace 4 PT Vale Indonesia adalah dengan menentukan design parameter yang akan digunakan menjadi acuan perhitungan. Design parameter ini diperoleh melalui record operasi dari mulai tahun 2014 sampai dengan tahun 2017, sehingga didapatkan nilai optimum operasi yang dapat digunakan sebagai dasar perhitungan. Adapun data-data untuk design parameter meliputi data jam operasi, power listrik yang digunakan, kapasitas produksi, % Carbon, dan LOI (% xH₂O).

4.6.1. Jam Operasi Aktual (*Operating Hours*)

Jam operasi adalah waktu efektif furnace beroperasi dengan supply power tertentu untuk melebur calcine. Gambar 4.1 berikut menunjukkan jam operasi furnace selama tahun 2014 – 2017. Perhitungan jam operasi ini diluar waktu perawatan yang sudah ditentukan (*maintenance schedule*).



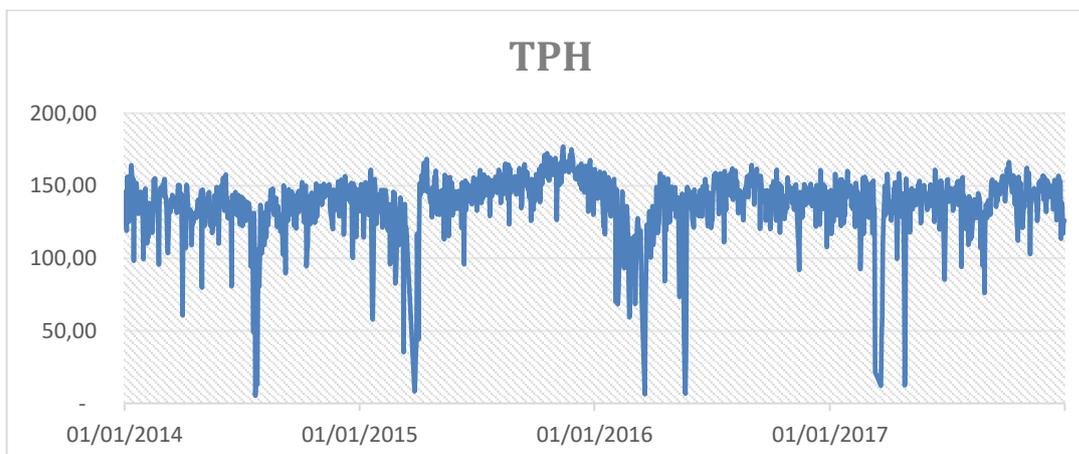
Gambar 4.1 Grafik Actual Operating Hours 2014-2017

Dari grafik diatas, dapat dilihat data operasi furnace 4 dari tahun 2014-2017 sebagai berikut:

Total waktu tersedia	: 35040 Jam
Total Perawatan yang di rencanakan	: 2342 Jam
Total Jam Operasi	: 32697.06 Jam
Rata-rata operating hour / hari	: 22.36 Jam

4.6.2. Kapasitas Produksi Aktual (TPH)

Kapasitas produksi (TPH) adalah jumlah (Ton) calcine yang dapat di lebur dalam waktu 1 jam. Gambar 4.2 berikut menunjukkan kapasitas produksi actual selama tahun 2014 – 2017.



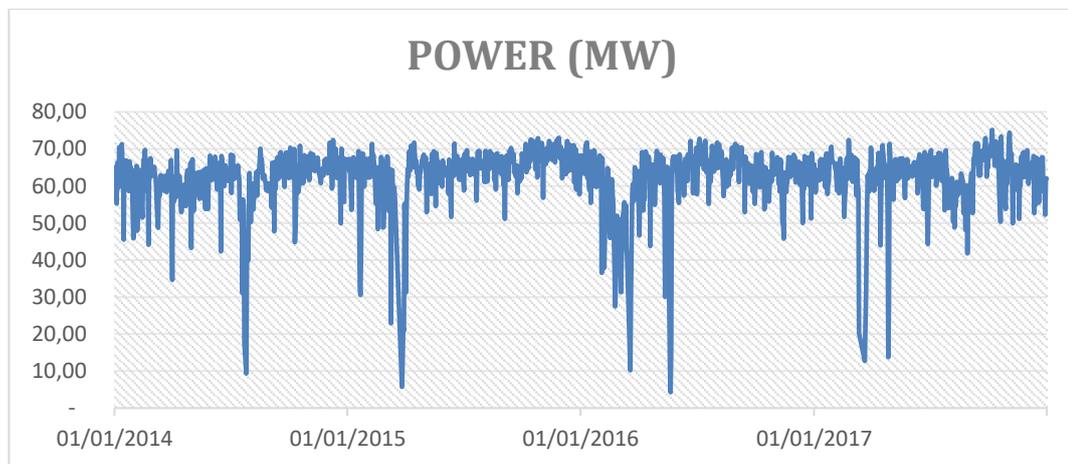
Gambar 4.2 Grafik Kapasitas Produksi (TPH)

Dari grafik diatas, dapat dilihat actual kapasitas produksi Electric Furnace 4 dari tahun 2014-2017 sebagai berikut:

Maksimum Kapasitas Output / hari (TPH) : 177 Ton Calcine
Rata-rata Kapasitas / hari (TPH) : 137.3 Ton Calcine

4.6.3. Transformer Power Aktual (MW)

Besarnya power yang digunakan didasarkan pada kebutuhan operasi dan kemampuan furnace untuk melebur calcine, ada banyak faktor yang menjadi parameter kontrol yang menentukan besarnya power yang digunakan, diantaranya adalah temperature maksimum roof, kondisi dinding furnace, dan juga stability supply power yang dihasilkan dari pembangkitan. Gambar 4.3 berikut menunjukkan besarnya power yang digunakan oleh furnace 4 selama tahun 2014-2017.



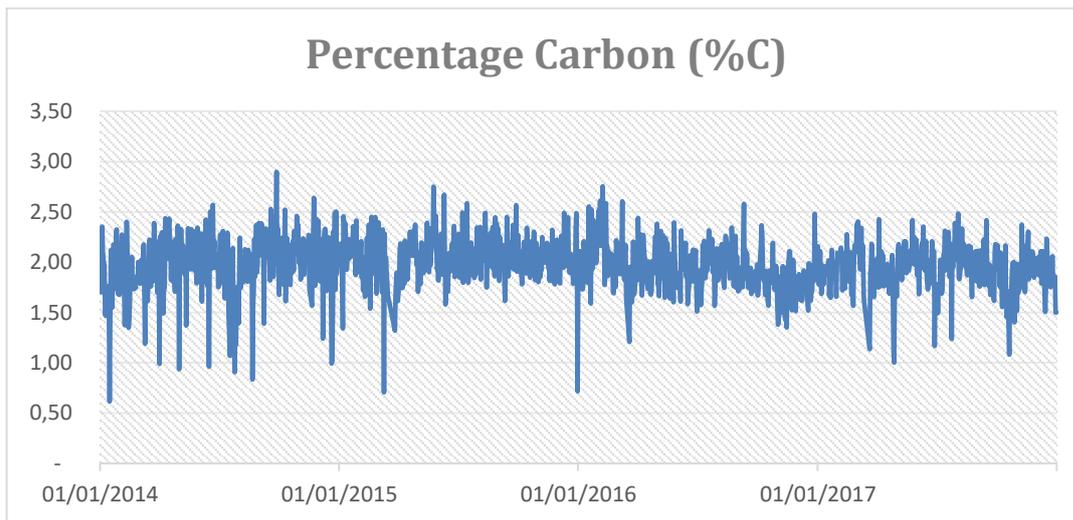
Gambar 4.3 Grafik Transformer Power (MW)

Dari grafik diatas, dapat dilihat actual Transformer Power Electric Furnace 4 dari tahun 2014-2017 sebagai berikut:

Maksimum Power (MW) : 75 MW
Rata-rata Power (MW) : 62.35 MW

4.6.4. Percentage (%) Carbon Aktual

Persentase karbon adalah salah satu parameter yang harus dikontrol pada proses peleburan di electric furnace, kadar karbon akan menentukan apakah transformer power dapat dinaikkan atau harus diturunkan untuk melebur calcine. Gambar 4.4 berikut menunjukkan rata-rata persentasi karbon per hari di proses peleburan furnace 4 selama tahun 2014-2017.



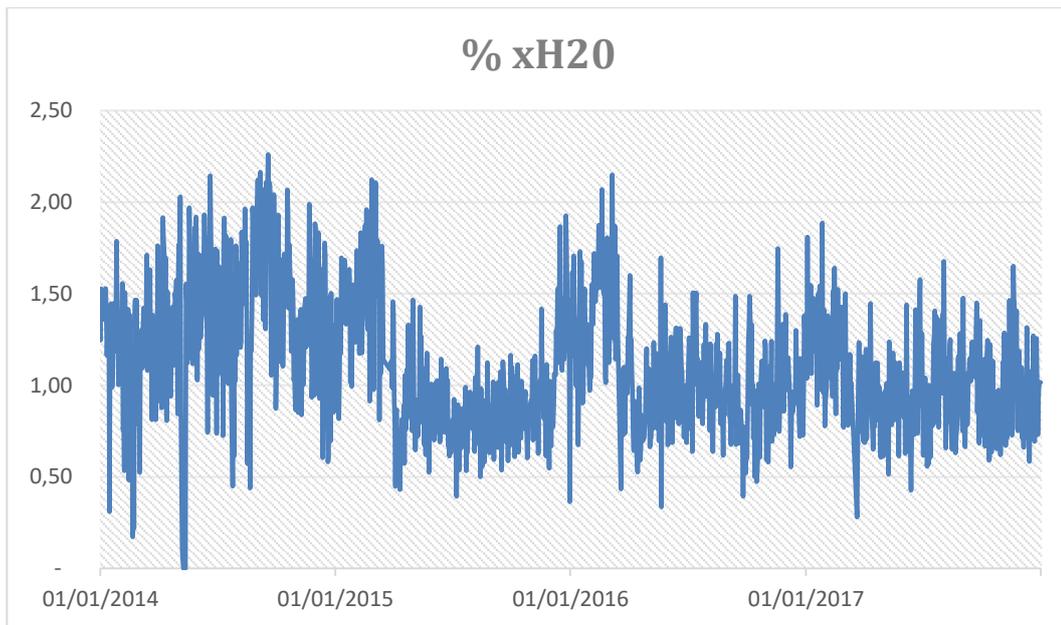
Gambar 4.4 Grafik Percentage (%) Carbon

Dari grafik diatas, dapat dilihat actual persentase carbon Electric Furnace 4 dari tahun 2014-2017 sebagai berikut:

Maksimum % Carbon	: 3 %
Rata-rata % Carbon	: 1.97 %

4.6.5. LOI (% xH₂O) Aktual

Sama halnya dengan pengontrolan kadar karbon pada proses peleburan, % xH₂O juga merupakan parameter yang harus dijaga di sepanjang operasi. Gambar 4.5 berikut menunjukkan rata-rata persentasi xH₂O per hari di proses peleburan furnace 4 selama tahun 2014-2017.



Gambar 4.5 Grafik Percentage % xH2O

Dari grafik diatas, dapat dilihat actual persentase xH2O Electric Furnace 4 dari tahun 2014-2017 sebagai berikut:

Maksimum % xH2O	: 2 %
Rata-rata % xH2O	:1.1 %

4.6.6. Parameter Operasi off Gas

Parameter operasi off gas meliputi flow rate off gas dan temperature off gas. Untuk pengukuran flow rate dilakukan dengan cara manual sedangkan temperature off gas didapat dari online proses control.

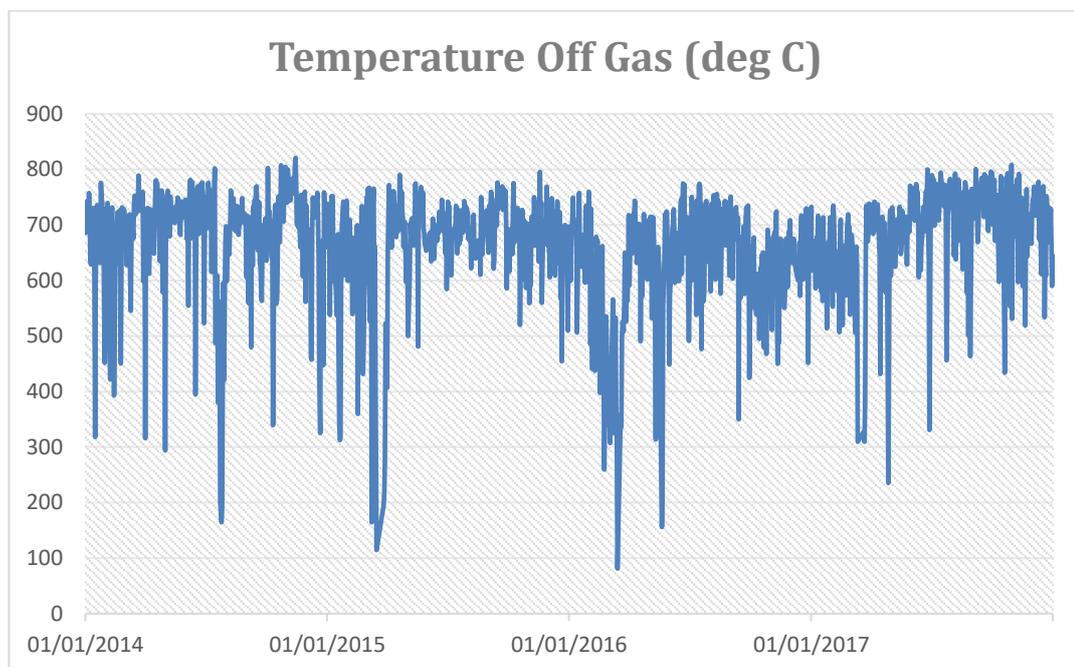
4.1.6.1 Flow Rate off Gas

Pengukuran flow rate off gas dilakukan dengan pengukuran manual yaitu dengan menggunakan alat gas flowmeter. Adapun hasil pengukuran flow rate off gas ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut, yaitu pengukuran Flow Rate off gas yang dilakukan pada 3 April 2018.

Average Flow ACFM : 133999
 Nm³/min : 1008

4.1.6.2 Temperature off Gas

Temperature off gas adalah salah satu parameter kontrol kritikal yang di monitoring secara online. Temperature off gas adalah temperature udara buangan dari furnace sebelum masuk ke spray chamber. Gambar 4.7 berikut menunjukkan rata-rata temperature off gas pada proses peleburan furnace 4 selama tahun 2014-2017.



Gambar 4.7 Grafik Temperature off gas

Dari grafik diatas, dapat dilihat actual kapasitas produksi Electric Furnace 4 dari tahun 2014-2017 sebagai berikut:

Maksimum Temperature off Gas : 821 deg C
Rata-rata Temperature off Gas : 664 deg C
Minimum Temperature off Gas : 81.21 deg C

Dari grafik-grafik diatas, bahwa parameter-parameter kontrol di off gas furnace sangat berfluktuasi (temperature, flowrate), hal ini disebabkan oleh

fluktuasi di furnace power yang diakibatkan oleh beberapa faktor, diantaranya adalah stability supply power dari pembangkitan listrik (PLTA), kadar Carbon, dan kadar LOI (xH₂O) di calcine.

4.2. Rugi-rugi Panas (Furnace Heat Losses)

4.6.1. Parameter

Furnace Heat Looses adalah rugi-rugi panas yang terjadi pada proses peleburan. Rugi-rugi panas ini diakibatkan oleh proses konduksi, konveksi dan radiasi yang diakibatkan oleh perbedaan temperature didalam furnace akibat proses peleburan dan temperature ambient. Besarannya heat looses yang terjadi dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah konfigurasi dan ketebalan lapisan dinding furnace (lapisan dinding luar/steel, lapisan refractory dan castabel), dan material yang digunakan untuk melapisi dinding.

Berikut adalah design parameter yang digunakan oleh fasilitas peleburan PT Vale Indonesia untuk mengurangi rugi-rugi panas yang terjadi pada proses produksinya.

Tabel 4.2 Parameter Perhitungan Rugi-Rugi Panas – Electric Furnace 4

No	Parameter	Value	Unit
1	Freeboard Temperature	1000	⁰ C
2	Ambient Temperature	40	⁰ C
3	Roof Thickness	0.343	m
4	Roof Surface Area	254.34	m ²
5	Thermal Cond. Of Roof Brick	1.2	W/m K
6	Roof Surface Heat Transfer Coeff	22.7	W/m ² K
	Roof Beam		
7	Thickness of Steel	2.5	cm
8	Thickness of Castable	23	cm
9	Thermal Cond. of Steel	28.83	W/m K
10	Thermal Cond. of Castable	5	W/m K
11	Coff Heat Transfer to Water	2838	W/m ² K
12	Stefen Boltzman Coef (10 ⁻⁸)	5.67	W/m ² K ⁴
13	Beam Water Temp	40	⁰ C

14	Beam Roof Surface Area	22	m ²
15	S/M Ratio to Slag	2	
16	Electrode Current	23	KA
17	Matte Hole (MH) to Slag Hole Distance (SH)	0.01	m
18	Furnace Perimeter	55	m
	Other Looses		
19	Electrode Cooling / Recirculation	0.6	
20	Vent / Roof	0.4	
21	SH-MH / Sidewall	0.3	
	Sidewall Looses (Surface)		
22	Ratio to Slag Zone Looses	0.035	
	Shell Looses (Top)		
23	Thickness Magnesite Brick	0.575	m
24	Thickness Electrode Pasta	0.051	m
25	Thickness Shell	0.025	m
26	Thickness Kawool	0.3	m
27	Thermal Cond Magnesite Brick	4.6	W/m K
28	Thermal Cond Electrode Pasta	3.3	W/m K
29	Thermal Cond Shell	29	W/m K
30	Thermal Cond Kawool	0.2	W/m K
31	Heat Transfer Coeff Dry Shell	40	W/m ² K
32	Heat Transfer Coeff falling Film	5675	W/m ² K
33	Height Kawool Zone	1.3	m
34	Height Magnetic Zone (Dry)	0.988	m
35	Height Magnetic Zone (Wet)	2.622	m
	Dry Shell		
36	Ratio to Bottom Shell	0.003	
37	Feed Pipe	380	KW
38	Electrical Looses	500	KW
39	Matte Temp	1360	⁰ C
40	Calcine Temp	700	⁰ C
41	Bottom Temp	200	⁰ C

	Bottom		
42	Matte Temperature	1360	⁰ C
43	Furnace Bottom Temperature	200	⁰ C
44	Thickness of Ferronickel	0.457	m
45	Thickness of Heart (Magnesite)	0.838	m
46	Thickness of Rammix (Magnesit)	0229	m
47	Thickness of Sub Heart (Fireclay)	0.76	m
48	Thickness of bottom Shell	0.025	m
49	Thermal conductivity Ferronickel lined	17.3	W/m K
50	Thermal conductivity Heart	3.6	W/m K
51	Thermal conductivity Rammix	2.6	W/m K
52	Thermal conductivity Sub Heart	1.15	W/m K
53	Thermal conductivity Bottom Shell	43.2	W/m K
54	Bottom diameter	18	m
55	Bottom Surface Area	254.34	m ²

Sumber: White Book (Electric Furnace #4 Design and Operation)

4.6.2. Perhitungan Rugi-rugi panas di Furnace (*Furnace Heat Looses*)

Furnace Heat Looses dibagi menjadi beberapa category sebagai berikut:

- Roof Looses
- Sidewall Looses
- Bottom Looses
- Feed end vent pipe Looses
- Electrical Looses

4.2.2.1 Rugi-Rugi panas akibat konveksi dan radiasi pada lapisan refractory atap (*Furnace Roof*)

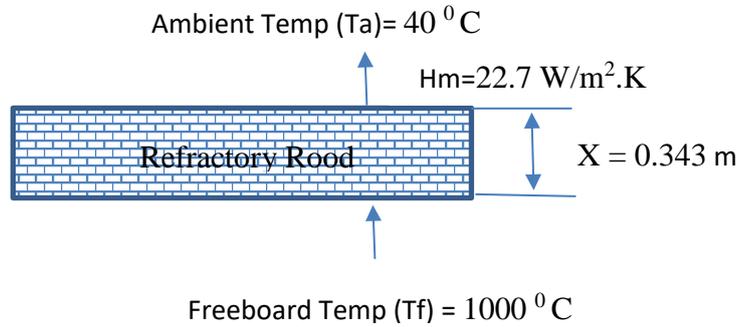
Rugi-rugi pada lapisan refractory atap (*furnace roof*) tergantung dari temperature freeboard furnace, ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\frac{Q}{A} \left(\frac{w}{m^2} \right) = \frac{T_f - T_A}{\frac{x}{k} + \frac{1}{hm}} \dots\dots\dots(4.1)$$

Dimana:

- T_f : Freeboard Temperature : 1000 ⁰C
T_A : Ambient Temperature : 40 ⁰C

Hm	: Koef Heat Transfer refractory roof	: 22.7 W/m ² .K
K	: Thermal Conductivity	: 1.2 W/m.K
X	: Ketebalan refractory roof	: 0.343 m
A	: Roof Surface Area	: 254.3 m ²



Gambar 4.8 Model Rugi-rugi Panas pada Roof

Total rugi-rugi dari Roof refractory adalah:

$$Q = \frac{T_f - T_a}{\frac{\mu}{K} + \frac{1}{hm}} \times A$$

$$Q = \frac{1000 - 40}{\frac{0.343}{1.2} + \frac{1}{22.7}} \times 254.3$$

$$Q = 740153 \text{ Watt}$$

$$= 740.15 \text{ KW}$$

4.2.2.2 Heat Looses to Ventilation System

Perhitungan *Heat looses* ini berhubungan dengan dengan sirkulasi udara pada roof (*air infiltration*). Perbandingan Heat looses pada ventilation system dan looses pada refractory roof ditetapkan sebesar 0.4 (Dalvi. A.D, Processing of Laterite Ores, 1987).

$$\frac{\text{Heat Looses (Roof Ventilation)}}{\text{Heat Looses (Roof Refractory)}} = 0.4 \dots \dots \dots (4.2)$$

$$\text{Heat Looses (Roof Ventilation)} = 0.4 \times 740 \text{ KW}$$

$$= 296 \text{ KW}$$

4.2.2.3 Sirkulasi Air pada Beam Roof

Rugi-rugi panas paling tinggi adalah sirkulasi air untuk kebutuhan pendinginan beam pada structure roof. Perpindahan panas pada beam roof dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{Q}{A} = C \times \left(\frac{T_{fk}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{sk}}{100}\right)^4 \dots\dots\dots(4.3)$$

Dimana,

Tsk = Hot surface temperature pada castabel (K)

Tfk = Freeboard Temperature (K)

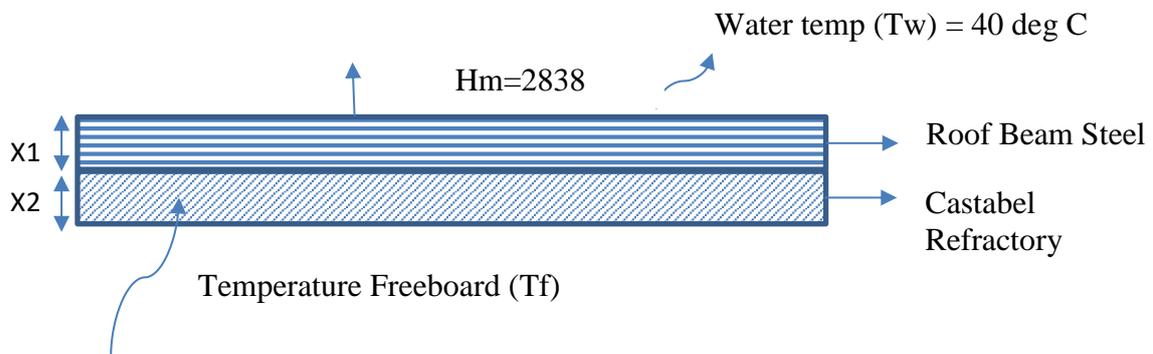
C = Konstanta Stephen Beltzman (5.67×10^{-8})

Pada kondisi steady state, rugi-rugi panas yang terjadi sama dengan dengan nilai konduksi yang terjadi pada castabel dan steel terhadap air, yaitu yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$\frac{Q}{A} = \frac{(T_{sk} - (273 + T_w))}{\frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{1}{h_m}} \dots\dots\dots(4.4)$$

Dimana

- Tw : Temperature air pendingin : 40 °C
- X1 : Ketebalan Castabel Refractory : 23 cm
- X2 : Ketebalan roof beam steel : 2.5 cm
- K1 : Thermal conductivity Castabel refractory : 5 W/m.K
- K1 : Thermal conductivity roof steel beam : 28.8 W/m.K
- Hm : Koef Heat Transfer pada castabel refractory : 2838 W/m².K



Gambar 4.9 Model Rugi-rugi Panas Sirkulasi Air pada Beam Roof

$$\frac{Q}{A} = \frac{(Tsk-(273 + 40))}{\frac{0.23}{5} + \frac{0.025}{28.8} + \frac{1}{2838}}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{(Tsk-303)}{0.047}$$

Dengan memasukkan persamaan 4.3, maka

$$C \times \left[\left(\frac{Tfk}{100} \right)^4 - \left(\frac{Tsk}{100} \right)^4 \right] = \frac{(Tsk-303)}{0.047}$$

$$5.67 \times \left[\left(\frac{1000 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{Tsk}{100} \right)^4 \right] = \frac{(Tsk-303)}{0.047}$$

$$[5.67 \times 0.047] \left(\frac{1000 + 273}{100} \right)^4 - [5.67 \times 0.047] \left(\frac{Tsk}{100} \right)^4 = (Tsk-303)$$

$$[0.27](12.73)^4 - [0.27] \left(\frac{Tsk}{100} \right)^4 = (Tsk-303)$$

$$(12.73)^4 - \left(\frac{Tsk}{100} \right)^4 = 3.7 \times Tsk - 1122$$

$$\left(\frac{Tsk}{100} \right)^4 + 370 \times \frac{Tsk}{100} = 27,383$$

Dengan menggunakan solusi persamaan kuadrat, maka diperoleh

$$\frac{Tsk}{100} = 12.29$$

Dengan menstutitisi nila ini ke persamaan 4.3, maka diperoleh:

$$\frac{Q}{A} = 5.67 \times \left(\frac{1273}{100} \right)^4 - \left(\frac{899}{100} \right)^4$$

$$\frac{Q}{A} = 111864 \text{ W/m}^2$$

Dengan menghitung total luasan area permukaan roof beam, didapat 30 m², maka total rugi-rugi akibat sirkulasi air pada roof beam adalah:

$$\begin{aligned} Q &= 111864 \times 30 \text{ Watt} \\ &= 429956.6079 \text{ watt} \\ &= \mathbf{429.95 \text{ KW}} \end{aligned}$$

4.2.2.4 Sirkulasi Air pada Komponen Electroda

Perbandingan Heat losses pada komponen electrode dan heat losses pada permukaan roof beam ditetapkan sebesar 0.6 (*Dalvi. A.D, Processing of Laterite Ores, 1987*).

$$\frac{\text{Heat Losses (Electrode Component)}}{\text{Heat Losses (Roof Beam)}} = 0.6 \dots\dots\dots(4.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Heat Losses (Electrode Component)} &= 0.6 \times 429.95 \text{ KW} \\ &= \mathbf{257.974 \text{ KW}} \end{aligned}$$

4.2.2.5 Rugi-rugi panas pada sidewall pada Slag Zone

Persamaan empirical untuk menghitung side wall heat flux dapat menggunakan persamaan berikut (*M.Y Solar to J.A.E Bell, side wall heat flux calculation*):

$$\frac{Q}{A} \left(\frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2} \cdot \text{h} \right) = \left(3200 \times \frac{S}{M} - 3500 \right) + \left(115 \times \frac{S}{M} - 125 \right) \times IE \dots\dots\dots(4.6)$$

S/M adalah ratio antara sidewall heat flux dan slag superheated yang dipengaruhi oleh komposisi slag (*Arc Power Ratio to Bath Power Ratio*). Menurut J.A.E Bell, untuk electrode dengan arus sekitar 37 KA, maka nilai S/M adalah 2, sehingga:

$$\begin{aligned} \frac{Q}{A} \left(\frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2} \cdot \text{h} \right) &= (3200 \times 2 - 3500) + (115 \times 2 - 125) \times 23 \\ \frac{Q}{A} &= 5315 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2} \cdot \text{h} \right) \\ \frac{Q}{A} &= 16766.65 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Dengan total keliling furnace adalah 55 m, dan slag hole elevation adalah 31.5 in (0.8 m), maka total luasan area slag zone adalah

$$\begin{aligned} A \text{ (Luasan area slag zone)} &= 55 \text{ m} \times 0.81 \text{ m} \\ &= 44.005 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Sehingga Total Rugi-rugi pada side wall adalah:

$$\begin{aligned} Q &= 16766.65 \times 44.005 \text{ W} \\ Q &= 737824 \text{ W} \\ Q &= 738 \text{ KW} \end{aligned}$$

4.2.2.6 Rugi-rugi pada slag hole dan Matte Hole Copper Cooling Circuit.

Perbandingan Heat losses pada side wall slag zone dan copper cooling sirkuit ditetapkan sebesar 0.3 (*Dalvi. A.D, Processing of Laterite Ores, 1987*).

$$\frac{\text{Looses to slag hole and Matte Hole Copper Cooling Sidewall}}{\text{Looses in the slag zone}} = 0.3 \dots\dots\dots(4.7)$$

Sehingga,

Rugi-rugi pada slag hole dan matte hole copper cooling = 0.3 x Looses pada slag Zone

$$= 0.3 \times 738 \text{ KW}$$

$$= \mathbf{221.34 \text{ KW}}$$

4.2.2.7 Dry Sidewall Looses (Slag Zone)

Perbandingan Heat losses pada side wall slag zone dan dry sidewall ditetapkan sebesar 0.035 (*Dalvi. A.D, Processing of Laterite Ores, 1987*).

$$\frac{\text{Dry Sidewall Looses}}{\text{Looses in the slag zone}} = 0.035 \dots\dots\dots(4.8)$$

Sehingga,

Dry sidewall losses = 0.035 x 738 KW

$$= \mathbf{25.82 \text{ KW}}$$

4.2.2.8 Rugi-Rugi Dinding (Bagian Atas)

Rugi-rugi pada dinding shell dibagi menjadi 3 bagian yaitu:

a. Rugi-Rugi pada Kawool Zone

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_c - T_a}{\frac{X_2}{K_3} + \frac{X_3}{K_3} + \frac{X_4}{K_4} + \frac{1}{hmf}} \dots\dots\dots(4.9)$$

b. Rugi-Rugi pada Magnetic Zone (Dry)

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_c - T_a}{\frac{X_2}{K_3} + \frac{X_3}{K_3} + \frac{X_4}{K_4} + \frac{1}{hmf}} \dots\dots\dots(4.10)$$

c. Rugi-rugi pada Magnetic Zone (Wet)

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_c - T_a}{\frac{X_1}{K_1} + \frac{X_2}{K_2} + \frac{X_3}{K_3} + \frac{1}{hmf}} \dots\dots\dots(4.11)$$

Dimana

Tc	: Temperature Calcine	: 700 °C
Ta	: Temperature Ambient	: 40 °C
X1	: Thickness Magnesite Brick	: 0.575 m
X2	: Thickness Electorde Pasta	: 0.051 m
X3	: Thickness Shell	: 0.025 m
X4	: Thickness Kawool	: 0.3 m
K1	: Thermal Cond Magnesite Brick	: 4.6 W/m.K
K2	: Thermal Cond Electrode Pasta	: 3.3 W/m.K
K3	: Thermal conductivity shell plate	: 29 W/m.K
K4	: Thermal Cond Kawool	: 0.2 W/m.K
Hmf	: Koef Heat Transfer pada falling film	: 5675 W/m ² .K
Hmd	: Koef Heat Transfer pada dry shell	: 40 W/m ² .K
Tkz	: Tinggi Kawool Zone	: 1.3 m
Tmz1	: Tinggi Magnetic Zone (Dry)	: 0.988 m
Tmz2	: Tinggi Magnetic Zone (Dry)	: 2.622 m

4.2.2.8.1 Rugi-rugi pada Kawool Zone

Dengan menggunakan persamaan 4.9, maka rugi-rugi pada Kawool Zone dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{Q}{A} = \frac{700-40}{\frac{0.051}{3.3} + \frac{0.025}{29} + \frac{0.3}{0.2} + \frac{1}{40}}$$

$$\frac{Q}{A} = 428.2 \text{ W/m}^2$$

Dengan total keliling furnace 55 m, elevasi dinding bagian kawool adalah 1.3 m, maka total luasan dinding pada kawool zone adalah

$$\begin{aligned} A \text{ (Luasan area dinding bagian atas)} &= 55 \text{ m} \times 1.3 \text{ m} \\ &= 71.5 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Sehingga Total Rugi-rugi pada kawool zone adalah:

$$Q = 428.2 \frac{W}{m^2} \times 71.5 \text{ m}^2$$

$$Q = 30616 \text{ W}$$

$$Q = 30.6 \text{ KW}$$

4.2.2.8.2 Rugi-rugi pada Magnetic Zone (Dry)

Dengan menggunakan persamaan 4.10, maka rugi-rugi pada magnetic zone dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{Q}{A} = \frac{700-40}{\frac{0.051}{3.3} + \frac{0.025}{29} + \frac{0.3}{0.2} + \frac{1}{40}}$$

$$\frac{Q}{A} = 428.2 \text{ W/m}^2$$

Dengan total keliling furnace 55 m, elevasi dinding bagian magnetic dry adalah 0.988 m, maka total luasan dinding pada magnetic zone (dry) adalah

$$\begin{aligned} A \text{ (Luasan area dinding bagian atas)} &= 55 \text{ m} \times 1.3 \text{ m} \\ &= 54.34 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Sehingga Total Rugi-rugi pada magnetic dry zone adalah:

$$Q = 428.2 \frac{W}{m^2} \times 54.34 \text{ m}^2$$

$$Q = 23268.68 \text{ W}$$

$$Q = 23.268 \text{ KW}$$

4.2.2.8.3 Rugi-rugi pada Magnetic Zone (Wet)

Dengan menggunakan persamaan 4.11, maka rugi-rugi pada magnetic zone dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{Q}{A} = \frac{700-40}{\frac{0.575}{4.6} + \frac{0.051}{3.3} + \frac{0.025}{29} + \frac{1}{5675}}$$

$$\frac{Q}{A} = 4664.547 \text{ W/m}^2$$

Dengan total keliling furnace 55 m, elevasi dinding bagian magnetic dry adalah 2.622 m, maka total luasan dinding pada bagian magnetic zone (wet) adalah

$$A \text{ (Luasan area dinding bagian atas)} = 55 \text{ m} \times 2.622 \text{ m} \\ = 144.21 \text{ m}^2$$

Sehingga Total Rugi-rugi pada magnetic dry zone adalah:

$$Q = 428.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 144.21 \text{ m}^2$$

$$Q = 672674 \text{ W}$$

$$Q = 672.674 \text{ KW}$$

4.2.2.9 Rugi-Rugi pada Bottom Furnace

Pada bagian bottom furnace terdiri dari 5 lapisan yaitu lapisan ferronickel (lapisan paling atas yang kontak langsung dengan matte), lapisan heart (magnesit), lapisan rammix (magnesit), lapisan sub hearth (fireclay), dan bottom shell (steel). Perhitungan Rugi-rugi pada dinding shell dipengaruhi oleh temperature matte, ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_M - T_a}{\frac{X_1}{K_1} + \frac{X_2}{K_2} + \frac{X_3}{K_3} + \frac{X_4}{K_4} + \frac{X_5}{K_5}} \dots \dots \dots (4.12)$$

Dimana

Tc	: Temperature Matte	: 1360 °C
Ta	: Temperature Furnace Bottom	: 200 °C
X1	: Ketebalan Lapisan Ferronickel	: 0.457 m
X2	: Ketebalan Heart (Magnesite)	: 0.838 m
X3	: Ketebalan Rammix (Magnesit)	: 0.229 m
X4	: Ketebalan Sub Heart (Fireclay)	: 0.76 m
X5	: Ketebalan Bottom Shell	: 0.025 m
K1	: Thermal conductivity Lapisan Ferronickel	: 17.3 W/m.K
K2	: Thermal conductivity Heart (Magnesite)	: 3.6 W/m.K
K3	: Thermal conductivity Rammix (Magnesit)	: 2.6 W/m.K
K4	: Thermal conductivity Sub Heart (Fireclay)	: 1.15 W/m ² .K
K5	: Thermal conductivity Bottom Shell	: 43.2 W/m ² .K
D	: Diameter Bottom Shell	: 18 meter

A : Luas Area Bottom : 254.4 m²

Sehingga,

$$\frac{Q}{A} = \frac{1360-200}{\frac{0.457}{17.3} + \frac{0.838}{3.6} + \frac{0.229}{2.6} + \frac{0.76}{1.15} + \frac{0.025}{43.2}}$$

$$\frac{Q}{A} = 1149.973 \text{ W/m}^2$$

$$\begin{aligned} Q &= 292484 \text{ Watt} \\ &= 292.484 \text{ KW} \end{aligned}$$

4.2.2.10 Rugi-Rugi Shell (Bottom)

Rugi-rugi shell (bottom) tergantung terhadap besarnya rugi-rugi pada bottom furnace, Ratio antara rugi-rugi shell (bottom) dan bottom furnace adalah sekitar 0.003 (*Dalvi. A.D, Processing of Laterite Ores, 1987*).

$$\begin{aligned} \text{Sehingga rugi-rugi shell (bottom)} &= 0.003 \times \text{Rugi-rugi bottom furnace} \\ &= 0.003 \times 292.484 \text{ KW} \\ &= 0.877 \text{ KW} \end{aligned}$$

4.2.2.11 Electrical Looses

Electrical looses dibagi dibedakan menjadi:

$$\begin{aligned} \text{Live Looses} &= 200 \text{ KW} \\ \text{Neutral Looses} &= 100 \text{ KW} \\ \text{Transformer Looses} &= 200 \text{ KW} \end{aligned}$$

4.6.3. Summary Rugi-rugi Panas (Heat looses) pada Electric Furnace 4

Summary perhitungan rugi-rugi panas (Heat looses) pada electric furnace 4 adalah sesuai tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3 Summary Rugi-rugi Panas Electric Furnace 4

Area	Sub Area	Looses (KW)	Total Looses (KW)
Roof	Roof Refractory	740.2	1724.1
	Ventilation System	296.1	
	Recirculation Water (Beam)	430.0	
	Recirculation Water (Elect Component)	258.0	
Sidewall	Slag Zone	737.8	2424.4
	Slag and Matte Hole	221.3	
	Shell Looses (Slag Zone)	737.8	
	Shell Looses (Top)		
	Kawooll Zone	30.6	
	Magnetic Zone (Dry)	23.3	
	Magnetic Zone (Wet) / Falling Zone	672.7	
	Shell Looses (Bottom)	0.9	
Bottom		292.5	292.5
Electrical Looses	Live Looses	200	500
	Neutral Looses	100	
	Transformer Looses	200	
Total Looses		4941.1	4941.1

4.3.MASS BALANCE AND HEAT BALANCE

4.6.1. Parameter

Perhitungan kesetimbangan massa dan panas dari furnace dilakukan untuk mengetahui besarnya perbandingan energy/massa yang masuk dan energy/massa yang keluar dari proses peleburan calcine termasuk dengan besarnya potensi panas buang (waste heat) yang dihasilkan oleh Off gas Furnace.

Perhitungan kesetimbangan massa dan panas dari furnace dilakukan untuk kondisi actual operasi furnace saat ini (*currently operation condition*) dan untuk parameter furnace pada optimum operasi (*optimum or design operation condition*).

Untuk perhitungan kesetimbangan massa dan kestimbangan energy panas, parameter-parameter yang harus diperhatikan meliputi kapasitas calcine yang masuk ke tungku peleburan (calcine feed rate / TPH), temperature calcine (° C), temperature freeboard (° C), kapasitas udara masuk (air infiltration), kapasitas dan

temperature matte, kapasitas dan temperature slag, dan kapasitas/temperature off gas yang dihasilkan dari hasil peleburan.

4.3.1.1 Calcine

Calcine adalah produk yang dihasilkan dari hasil reduksi kiln. Temperature calcine berkisar antara 700 – 750 °C. Temperature calcine sangat mempengaruhi kesetimbangan energy dalam proses peleburan. Jika temperature calcine lebih rendah maka akan dibutuhkan energi listrik yang lebih besar untuk proses peleburan, dan sebaliknya jika temperature calcine lebih tinggi akan mengakibatkan tingkat radiasi yang lebih tinggi, yang mana tingga radiasi panas yang lebih tinggi akan menghasilkan efek yang signifikan pada proses peleburan.

Komposisi calcine yang dihasilkan dari hasil reduksi kiln pada proses di PT Vale Indonesia ditunjukkan pada Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4 Komposisi Calcine

SUMMARY OF STREAM ASSAYS, WT.% - CURRENT OPERATION													
STREAM	H ₂ O	Ni	Co	Fe	S	C	LOI	O	SiO ₂	MgO	S/M	Rock	
INPUT SOLIDS													
Calcine	100.0	0.00	2.01	0.08	20.25	0.95	1.26	1.10	6.96	33.30	16.13	2.06	17.95

4.3.1.2 Slag dan Matte

Slag adalah kumpulan oksida dalam keadaan lebur dan terpisah dari fasa logam cair selama proses peleburan, sedangkan matte adalah produk dalam keadaan lebur yang dihasilkan selama proses peleburan. Adapun temperature slag adalah sekitar 1540 °C dan temperature matte adalah sekitar 1360 °C

Komposisi slag dan matte sebagai output solid dan molten stream ditunjukkan pada Tabel 4.5 berikut:

Tabel 4.5 Komposisi Slag dan Matte

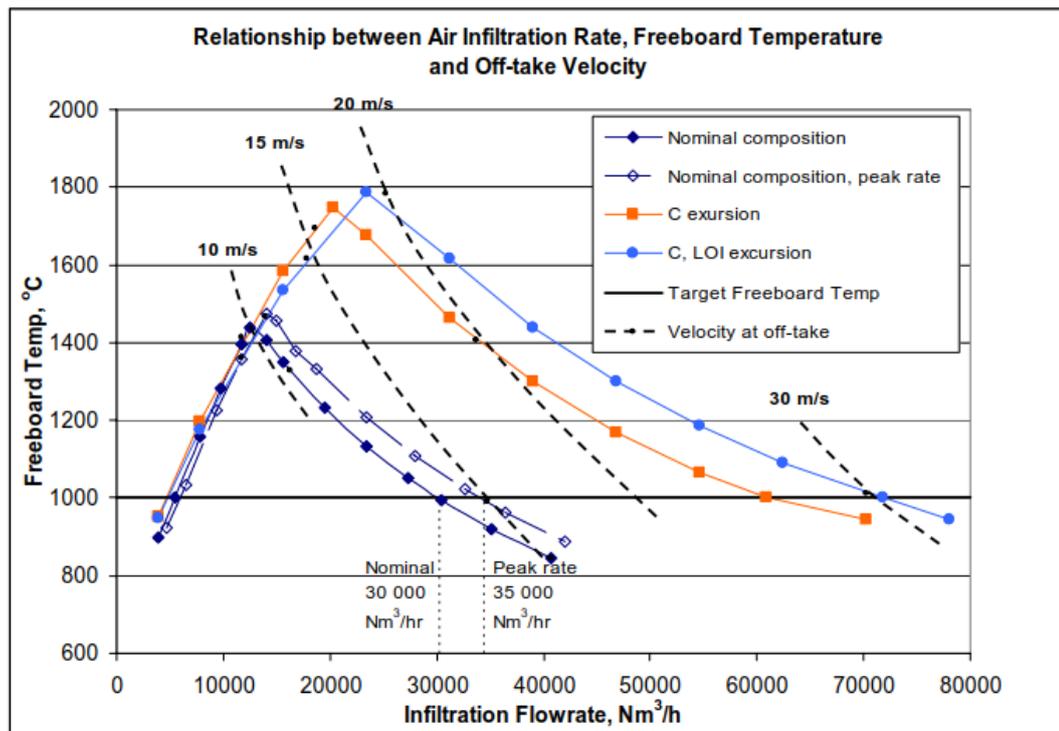
SUMMARY OF STREAM ASSAYS, WT.% - CURRENT OPERATION												
STREAM	H ₂ O	Ni	Co	Fe	S	C	LOI	O	SiO ₂	MgO	S/M	Rock
OUTPUT SOLIDS AND MOLTEN STREAMS												
Furnace Matte	100.0	0.00	25.89	0.89	63.90	9.19	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00
Furnace Slag	100.0	0.00	0.000	0.15	0.03	17.76	0.01	0.00	5.27	37.83	18.34	2.06

4.3.1.3 Temperature Freeboard dan Air Infiltration

Nilai nominal dari temperature freeboard yang di harapkan dalam suatu proses peleburan akan menentukan kapasitas air infiltration yang dibutuhkan. Untuk mendapatkan temperature freeboard yang lebih rendah akan membutuhkan infiltration yang lebih tinggi sehingga akan mempengaruhi volume off gas yang akan dibuang ke udara semakin besar, sebaliknya air infiltration lebih rendah maka akan mengakibatkan temperature freeboard lebih tinggi, dan temperature freeboard yang lebih tinggi. Temperature freeboard yang lebih tinggi akan mengakibatkan life time dari roof furnace lebih rendah dan temperature gas buang yang lebih tinggi.

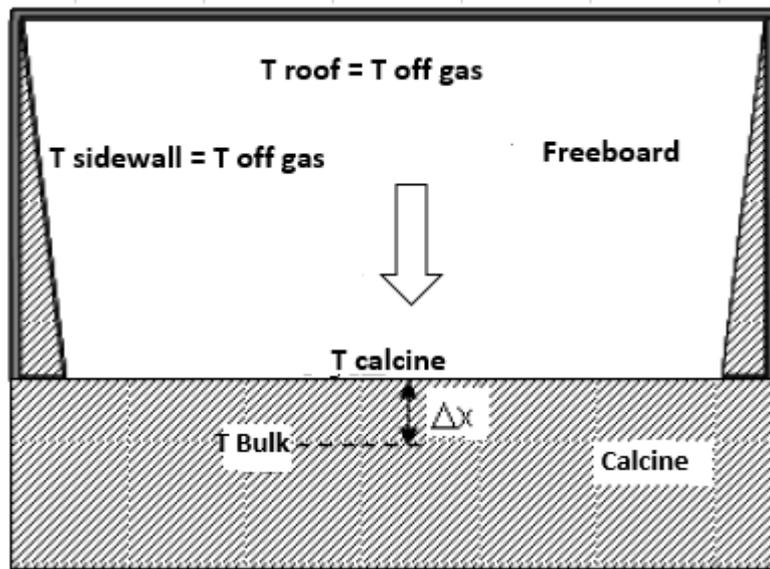
Oleh karena itu perlu didapatkan temperature nominal dari freeboard sehingga diharapkan terjadi kesetimbangan dengan volume off gas yang dihasilkan dan disisi lain juga memastikan jumlah air infiltration kedalam furnace dapat menghasilkan pembakaran yang maksimum (atau oksidasi) dari komponen debu, CO, dan sisa sulfur di dalam freeboard.

Berdasarkan model yang dikembangkan oleh HATCH, dengan melakukan simulasi dengan menggunakan METSIM© (process modelling software), menunjukkan hubungan antara temperature freeboard dan air infiltration seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10 berikut:



Gambar 4.10 Grafik Hubungan antara Temperature Freeboard dan Air Infiltration

Pada temperature freeboard yang lebih tinggi dapat mengakibatkan kemungkinan energy panas pada freeboard (off gas) kembali ke lapisan calcine dengan radiasi. Berikut adalah model efek radiasi yang diakibatkan oleh temperature freeboard dimana energy panas dari freeboard akan akan dialirkan ke calcine melalui radiasi dari roof dan melalui proses konduksi pada lapisan calcine dengan kedalama tertentu (Δx).



Gambar 4.11 Model Radiasi Freeboard

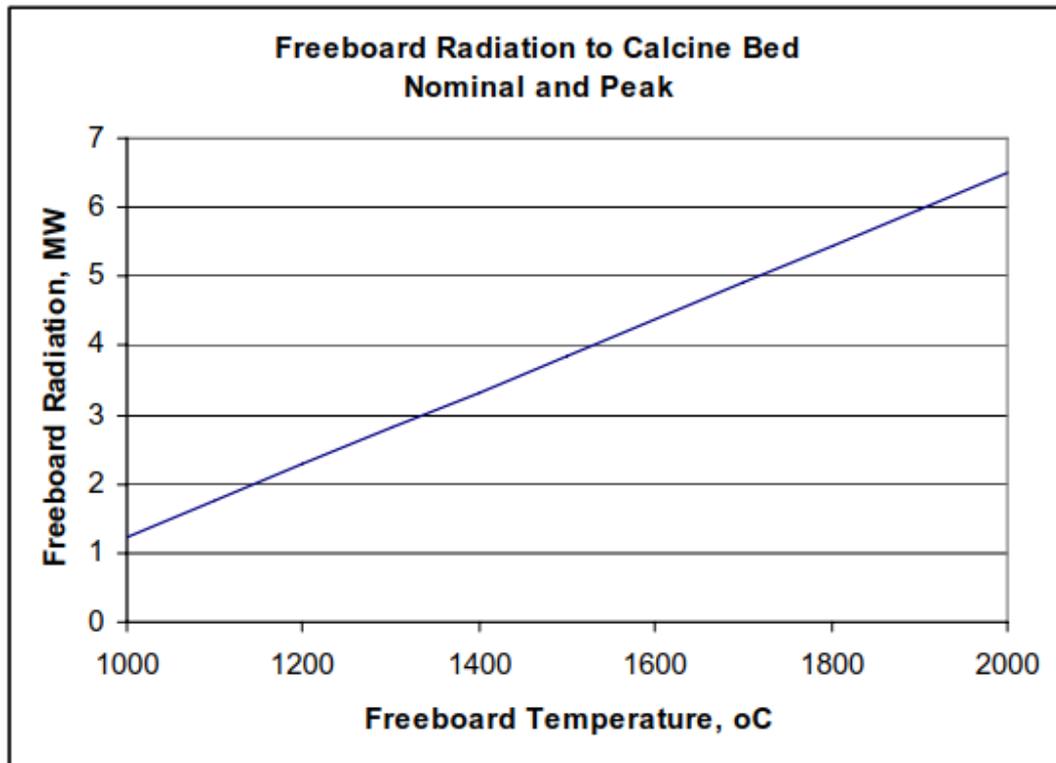
Besarnya heat transfer dari radiasi ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{net} = \frac{([T_{roof}^4 - \frac{Q_{net} RT}{\sigma}]^4 - T_{in}^4) 1000 \times m \times C_p}{1 + \frac{1000 \times m \times C_p \Delta x}{kA_2}} \dots\dots\dots(4.13)$$

Dimana,

- T_{in} : Temperature inlet calcine
- C_p : Specific Heat capacity dari calcine, KJ/kg.K
- m : Mass flow rate calcine (Kg/s)
- σ : Konstanta Stefan-Boltzmann = 5.67 x 10⁻⁸ W/m² K⁴
- K : Thermal Conductivity calcine = 0.634 W/m.K
- RT : Total radiative resistance pada system

Berdasarkan analisis sensifity yang dilakukan pada proses peleburan PT Vale Indonesia, berikut adalah grafik hubungan antara temperature freeboard dan radiasi yang dihasilkan oleh freeboard.



Gambar 4.12 Energy Radiasi akibat Pengaruh Temperature Freeboard.

4.3.1.4 Off Gas

Off gas adalah panas buang (waste heat) yang dihasilkan dari proses peleburan. Pada proses peleburan di PT Vale Indonesia, temperature gas buang berkisar antara 650 – 750 °C tergantung kepada besarnya air infiltration yang dibutuhkan untuk menjaga temperature freeboard dan juga besarnya power yang dibutuhkan untuk melebur calcine. Adapun kandungan dari Off gas yang dihasilkan dari proses peleburan di PT Vale Indonesia adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 4.6 berikut:

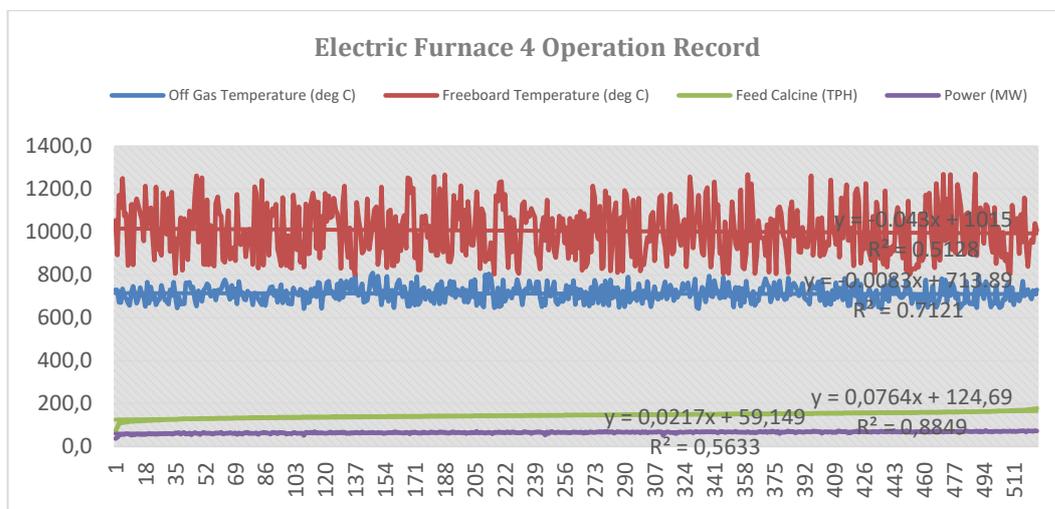
Tabel 4.6 Komposisi Off Gas

Composition	Percentage (%)
Vol. % N ₂	65.7
Vol. % O ₂	10.1

Vol. % CO	1.3
Vol. % CO ₂	11.4
Vol. % H ₂	0.0
Vol. % SO ₂	1.4
Vol. % H ₂ O	10.0
Dust content (g/Nm ³)	61.9

4.6.2. Kestimbangan Massa dan Kestimbangan Energy (*Mass Balance and Heat Balance*)

Perhitungan kestimbangan massa pada proses peleburan Electric Furnace 4 meliputi perhitungan kestimbangan berdasarkan parameter operasi actual saat ini (actual existing parameter operation) dan juga berdasarkan peak design dari proses peleburan Electric Furnace 4. Parameter operasi actual saat ini berdasarkan record parameter sejak tahun 2014-tahun 2017 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.13 berikut:



Gambar 4.13 Grafik Electri Furnace 4 Operation Record

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa rata-rata power yang digunakan pada proses peleburan di Furnace 4 adalah sekitar 65 MW, dengan rata-rata produksi 145 TPH, dan menghasilkan off gas dengan temperature rata-rata 700 °C untuk menjaga temperature rata-rata freeboard sekitar 1000 °C.

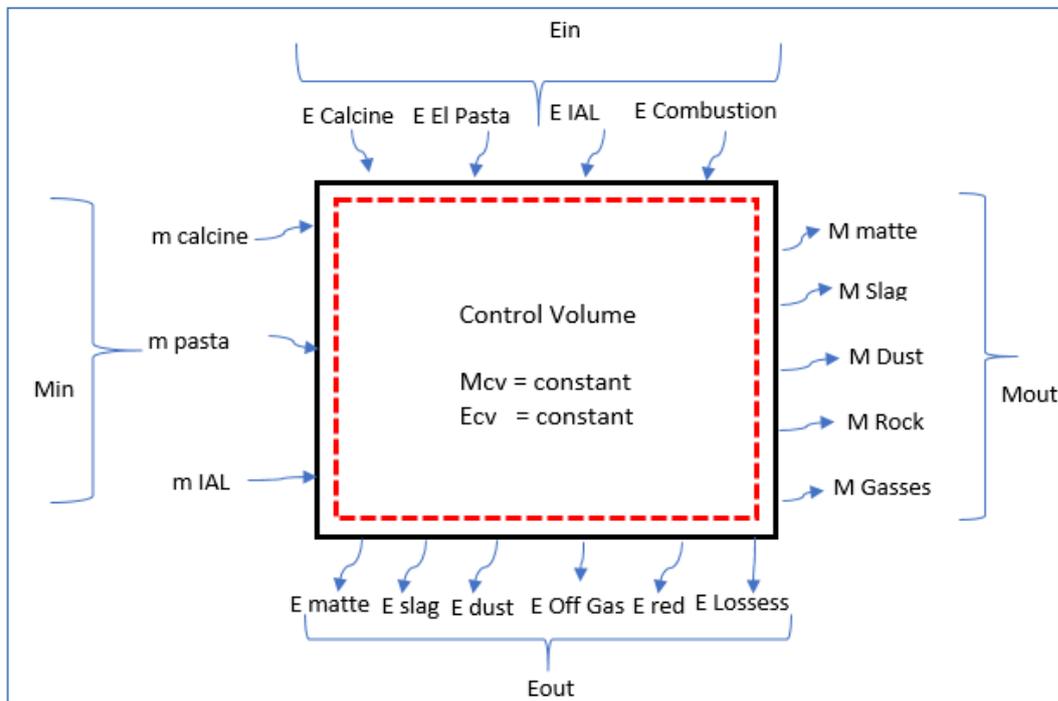
Berdasarkan data aktual diatas, Tabel 4.7 berikut adalah tabel yang menunjukkan parameter input untuk perhitungan mass balance. Adapun parameter operasi yang menjadi dasar perhitungan kesetimbangan massa dan kesetimbangan energy pada proses peleburan meliputi:

- Laju calcine masuk ke furnace (Furnace Feed Rate – TPH)
- Laju penambahan Scrap (Scrap Addition Rate – fraction)
- Laju aliran debu yang masuk ke furnace (Furnace Dusting Rate – fraction)
- Konsumsi Carbon Pasta (El Pasta Carbon Consumption – Kg/t Calcine)
- Kadar Ni pada Slag
- Perbandingan CO/CO₂, H₂/H₂O pada Furnace Gas
- Sulfur Fixation
- In Leaked Air (Air Infiltration)
- Temperature (Ambient, Calcine, Off Gas, Matte, Slag, Scrap)
- Specific Heat (O₂, N₂, H₂O, SO₂, CO, CO₂, H₂, Calcine, Molten Slag, Molten Matte)
- Molecular Weight (C, O₂, N₂, H₂O, SO₂, CO, CO₂, H₂, Ni, NiO, Co, CoO, Fe, FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, Ni₃S₂, FeS)
- Heat Content H₂O
- Heat Evaporation of Water
- Heat of Dissociation of LOI
- Furnace Heat Loss

Tabel 4.7 Input Parameter Electric Furnace 4

INPUT PARAMETER ELECTRIC FURNACE 4 - CURRENT OPERATION														
No.	Operating Parameters & Metallurgy	Designation	Value	Units	No.	Molecular Weights	Designation	Value	Units	No.	Heat Balance Parameters	Designation	Value	Units
1	Furnace Feed Rate	F(s)	129.78	t/h	18	C		12.01			Temperatures:			
2	Scrap Addition Rate	f(S)	0.00	fr	19	H ₂		2.02		39	-Ambient		35.00	°C
3	Furnace Dusting Rate	f(D)	0.0010	fr	20	S		32.06		40	-Calcine		750.0	°C
4	El Paste Carbon Consump.		1.50	kg/t calc.	21	O ₂		32.00		41	-Off-Gas		700.0	°C
5	Ni Rec. (Initial value)		0.950	fr	22	N ₂		28.01		42	-Matte		1360.0	°C
6	Co Rec. (Initial value)		0.700	fr	23	H ₂ O		18.02		43	-Slag		1540.0	°C
7	Ni Partition				24	SO ₂		64.06		44	-Scrap		700.00	°C
	Y=A1+A2*EXP(A3*X)		0.094	%	25	CO		28.01		Specific Heats:				
	A1:		0.09		26	CO ₂		44.01		45	O ₂		0.94	J/g.K
	A2:		0.00		27	AIR				46	N ₂		1.04	J/g.K
	A3:		0.11		28	OFF GAS				47	H ₂ O(<100 oC)		4.20	J/g.K
8	Ni in Slag (Intermediate value)		0.095	%	29	Ni		58.71		48	H ₂ O(>100 oC)		1.91	J/g.K
9	Co Partition Coefficient		29.0		30	NiO		74.70		49	SO ₂		0.67	J/g.K
10	CO/CO ₂ Ratio in Fce Gas		9.00		31	Co		58.93		50	CO		1.05	J/g.K
	H ₂ /H ₂ O Ratio in Fce Gas		6.96		32	CoO		74.93		51	CO ₂		0.91	J/g.K
11	O/C Ratio		1.10		33	Fe		55.85		52	H ₂		14.50	J/g.K
12	Fr. of C as CO		0.080		34	FeO		71.85		53	Calcine		0.98	J/g.K
13	Fr. of H ₂ O as H ₂		0.080		35	Fe ₂ O ₃		159.69		54	Molten Matte		0.92	J/g.K
14	Ni/S Ratio in Matte		2.82		36	Fe ₃ O ₄		231.54		55	Molten Slag		1.50	J/g.K
15	Fraction of Input S oxidized		0.095	fr	37	Ni ₃ S ₂		240.22		56	Heat Content: H ₂ O(25-->100 oC)		314.88	J/g
16	Sulfur Fixation		0.70	fr	38	FeS		87.91		57	Heat of Evap. of Water		2268.44	J/g
17	In-Leakage Air		500.00	Nm ³ /min						58	Heat of Dissociation of LOI		4180.00	J/g
										59	Furnace Heat Loss		5.00	MW
													18000.00	MJ/h

4.3.2.1 Perhitungan Kestimbangan Massa dan Energy Untuk Process Steady Flow



Gambar 4.14 Control Volume Heat and Mass Balance

Mass Balance:

$$M_{in} = M_{out}$$

$$\text{Berat Stream Input Solid}|_x + \text{In leakage Air (IAL)} =$$

$$\text{Berat Stream Output Solid}|_x + \text{Berat Stream Gases}|_x$$

$$\text{Berat (Calcine + Electrode Paste)}|_x + \text{Berat IAL} = \text{Berat(Matte + Slag +$$

$$\text{Dust + Rock)}|_x + \text{Berat(Dry Air + Wet Air + Stack Gas)}$$

$$\text{Calcine}*\%x + \text{Electrode Paste}*\%x + \text{IAL}*\%x = \text{Matte}*\%x + \text{Slag}*\%x +$$

$$\text{Dust}*\%x + \text{Rock}*\%x + \text{Gases}*\%x$$

Heat Balance:

$$E_{in} = E_{out}$$

$$E_{\text{Calcine}} + E_{\text{scrap}} + E_{\text{El Paste}} + E_{\text{IAL}} + E_{\text{Combustion}} = E_{\text{matte}} + E_{\text{slag}} + E_{\text{dust}} + E_{\text{off gas}} + E_{\text{dissosiasi}} + E_{\text{red}} + E_{\text{losses}}$$

4.3.2.2 Perhitungan Kesetimbangan Massa Electric Furnace 4 (EF4 Mass Balance)

Perhitungan kesetimbangan massa adalah untuk dengan menghitung Massa Input (Wet MT dan Dry MT) dan Massa Output (Wet MT dan Dry MT).

Massa Input meliputi Massa Calcine (EFF), massa scrap, massa electrode paste carbon, dan massa udara yang masuk (Air Infiltration) sedangkan massa output meliputi Massa Furnace Matte, Massa Furnace Slag, Massa Debu, dan Off Gas (H₂O, O₂, N₂, CO, CO₂, H₂, SO₂).

Tabel 4.8 berikut adalah summary perhitungan kesetimbangan massa (mass balance) pada kondisi existing (normal operation) dan pada kondisi design operation.

Tabel 4.8 Perhitungan Mass Balance Electric Furnace 4

STREAM	Existing Normal Operation						Design Operation					
	Wet MI	Dry MI	%H2O	MT H2O	%Ni	MT Ni	Wet MI	Dry MI	%H2O	MT H2O	%Ni	MT Ni
INPUTS												
Calcine (EFF)	129.78	129.78	0.00	0.00	2.01	2.60	149.25	149.25	0.00	0.00	2.01	3.00
Scrap	0.00	0.00	0.00	0.00	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.75	0.00
Electrode Paste Carbon	0.19	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00
In-Leakage Air	38.20	37.48	1.90	0.72	0.00	0.00	38.20	37.48	1.90	0.72	0.00	0.00
TOTAL	168.174	167.5	1.895	0.7	4.8	2.60	187.67	186.94	1.90	0.72	4.76	3.00
OUTPUTS												
Furnace Matte	9.37	9.37	0.00	0.00	25.89	2.43	10.78	10.78	0.00	0.00	25.89	2.79
Furnace Slag	114.11	114.11	0.00	0.00	0.15	0.18	131.23	131.23	0.00	0.00	0.15	0.20
Dust	0.13	0.13	0.00	0.00	2.50	0.00	0.15	0.15	0.00	0.00	2.50	0.00
Off-Gas												
-H2O	1.98			1.98			2.18			2.18		
-O2	7.12	7.12					6.88	6.88				
-N2	28.75	28.75					28.75	28.75				
-CO	0.34	0.34					0.39	0.39				
-CO2	6.13	6.13					7.05	7.05				
-H2	0.02	0.02					0.02	0.02				
-SO2	0.23	0.23					0.27	0.27				
Sub-Total	44.57	42.59	0.00	1.98			45.53	43.35	0.00	2.18		
TOTAL	168.185	166.2	0.000	1.98	28.5	2.60	187.68	185.51	0.00	2.18	28.54	2.99
Water Evaporated			0.00						0.00			
LOI Removed			1.43						1.64			

4.3.2.2 Perhitungan Keseimbangan Energy Electric Furnace 4 (EF4 Energy Balance)

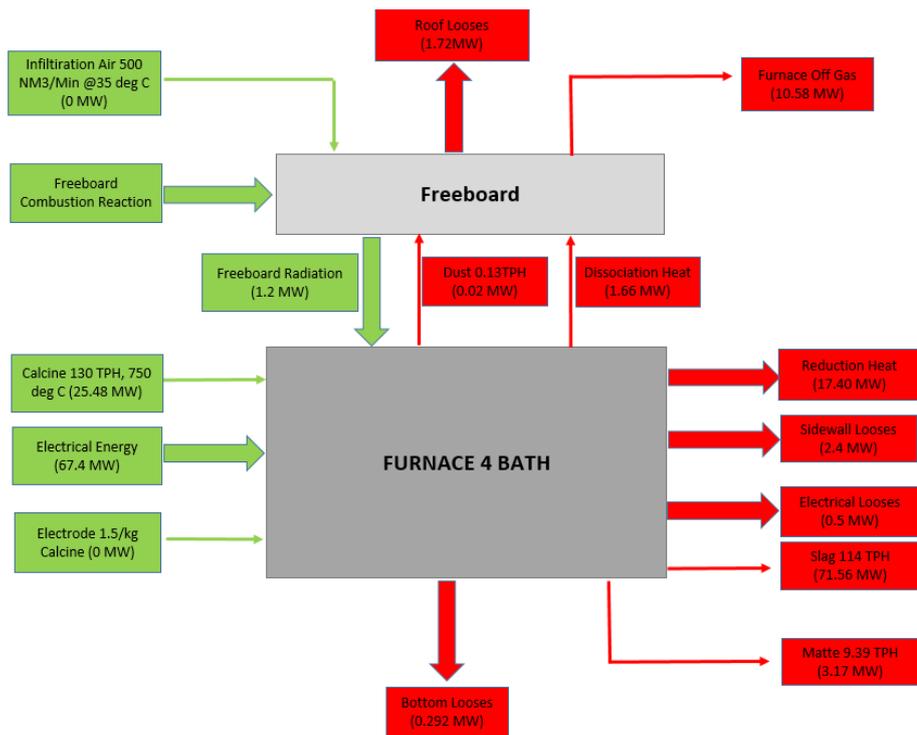
Perhitungan keseimbangan energy meliputi perhitungan energy input (Heat Content Input) pada calcine, scrap, El Paste Carbon, Freeboard Radiation, dan udara masuk (Air Infiltration), panas pembakaran (heat of combustion) dan energy output (Heat content output) pada Furnace Matte, Furnace Slag, Dust, Off Gas, Dissociation Heat (Panas untuk reduksi), dan juga heat loss akibat rugi-rugi panas.

Tabel 4.9 berikut adalah summary perhitungan keseimbangan energy (energy balance) pada kondisi existing (normal operation) dan pada kondisi design operation.

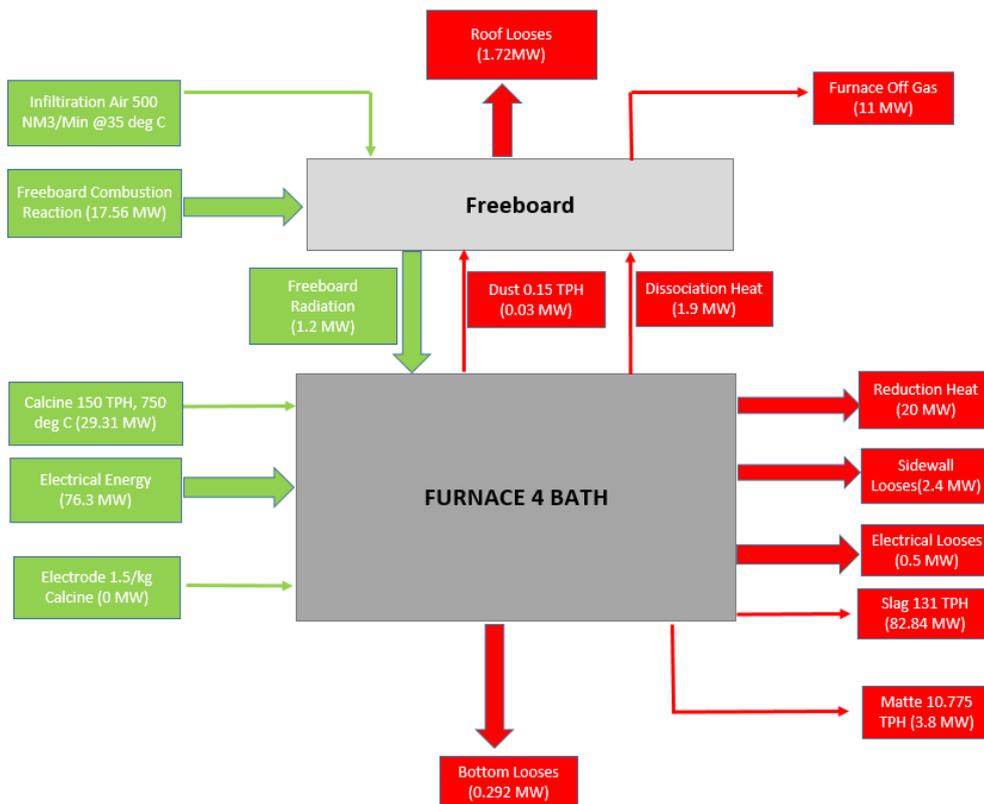
Tabel 4.9 Perhitungan Energy Balance Electric Furnace 4

STREAM	Rata-rata Actual Operation						Design Operation					
	WT, t/h	TEMP oC	ENTHALPY kJ/g	HEAT CONT MJ/h	%	MW	WT, t/h	TEMP oC	ENTHALPY kJ/g	HEAT CONT MJ/h	%	MW
INPUTS												
Calcline (EFF)	129.779	750.0	0.707	91737.4		25.48	149.246	750.0	0.707	105498.0		29.31
Scrap	0.000	750.0	0.725	0.0			0.000	750.0	0.725	0.0		
El. Paste Carbon	0.195	750.0		0.0			0.220	750.0		0.0		
Freeboard Radiation		1000.0		4392.0		1.22		1000.0		4392.0		1.22
In-Leakage Air	38.201	35.0		0.0			38.201	35.0		0.0		
Sub-Total	168.174			96129.4	24.4	26.70	187.666			109890.0	24.5	30.53
Heat of Combustion												
C-->CO	0.145		9.200	1338.5		0.37	0.167		9.200	1539.3		0.43
C-->CO2	1.673		32.760	54811.3		15.23	1.924		32.760	63033.0		17.51
S-->SO2	0.117		12.340	1441.2		0.40	0.134		12.340	1657.4		0.46
H2O-->H2	0.019		-141.500	-2730.2		-0.76	0.021		-141.500	-3002.0		-0.83
Sub-Total				54860.8	13.9	15.24				63227.7	14.1	17.56
TOTAL HEAT INPUT				150990.2	38.4	41.94				173117.8	38.6	48.09
OUTPUTS												
Furnace Matte	9.369	1360.0	1.219	11421.4	2.9	3.17	10.775	1360.0	1.228	13234.2	3.0	3.68
Furnace Slag	114.113	1540.0	2.258	257610.5	65.4	71.56	131.230	1540.0	2.273	298219.7	66.6	82.84
Dust	0.130	700.0	0.658	85.4	0.0	0.02	0.149	700.0	0.658	98.2	0.0	0.03
Oil-Gas												
-H2O	1.979	700.0	5.418	9082.9		2.52	2.176	700.0	5.418	10150.4		2.82
-O2	7.124	700.0	0.635	4520.2		1.26	6.875	700.0	0.635	4362.5		1.21
-N2	28.747	700.0	0.702	20180.1		5.61	28.747	700.0	0.702	20180.1		5.61
-CO	0.339	700.0	0.709	240.5		0.07	0.390	700.0	0.709	276.6		0.08
-CO2	6.131	700.0	0.614	3766.0		1.05	7.051	700.0	0.614	4330.9		1.20
-H2	0.019	700.0	9.788	188.8		0.05	0.021	700.0	9.788	207.6		0.06
-SO2	0.233	700.0	0.452	105.5		0.03	0.268	700.0	0.452	121.4		0.03
Sub-Total - Sensible	44.573	0.0		38084.1	9.7	10.58	45.529	0.0		39629.4	8.8	11.01
Dissociation Heat	1.428		4.180	5967.2	1.5	1.66	1.642		4.180	6662.3	1.5	1.91
Heats of Reduction:												
Fe2O3-->Fe3O4	-0.003		0.720	-19		0.00	-0.003		0.720	-2.1		0.00
F3O4-->FeO	8.951		2.510	22466.4		6.24	10.296		2.510	25842.8		7.18
Fe3O4-->Fe	4.755		7.380	35031.2		9.75	5.485		7.380	40333.9		11.20
NiO-->Ni	1.179		4.080	4811.2		1.34	1.356		4.080	5532.9		1.54
CoO-->Co	0.064		4.040	257.6		0.07	0.076		4.040	308.7		0.09
Sub-Total - Reduction Heat				62624.5	15.9	17.40				72016.1	18.3	20.00
Heat Loss				18000.0	4.6	5.00				18000.0	4.6	5.00
TOTAL OUTPUT HEAT				393767.7	100.0	109.4				447961.6	113.8	124.4
Electrical Energy			Energy Deficit	242717.5	61.6	67.4			Energy Deficit	274843.9	61.4	76.3
			kWh/MT Calcine	519.5		0.144			kWh/MT Calcine	511.5		0.142
			Useful Work	85.7	%				Useful Work	87.1	%	

Keseimbangan Energy pada Furnace 4 dapat di modelkan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.15 dan 4.16 berikut:



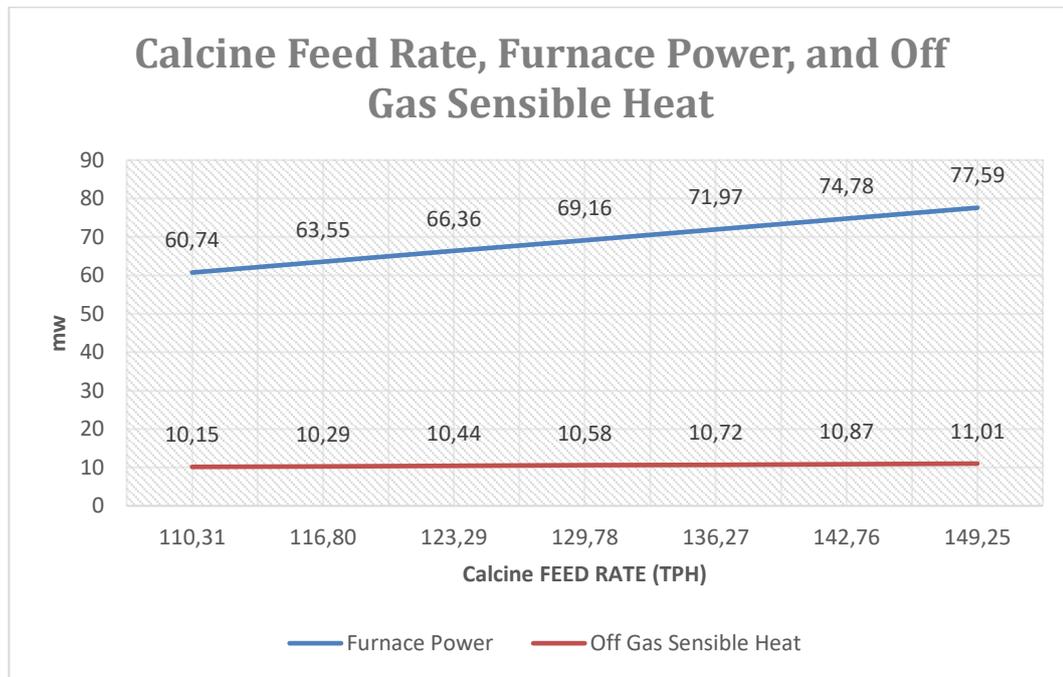
Gambar 4.15 Energy Balance pada Rata-Rata Aktual Operasi



Gambar 4.16 Energy Balance pada Design Operasi

4.6.3. Hubungan Antara Calcine Feed Rate, Furnace Power dan Off Gas Sensible Heat

Dari hasil simulasi dengan menggunakan perhitungan energy balance electric furnace 4, dapat dilihat hubungan antara calcine feed rate, furnace power, dan off gas sensible heat seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17 berikut



Gambar 4.17 Grafik hubungan antara Calcine Feed Rate, Furnace Power, dan Sensible Heat

Dari grafik 4.17 diatas dapat dilihat bahwa semakin tinggi jumlah calcine yang akan dilebur (TPH) maka semakin tinggi power yang akan digunakan, sehingga akan menghasilkan sensible heat pada off gas yang lebih tinggi.

4.4. PEMBANGKITAN SATURATED STEAM

4.6.1. Parameter Operasi

Untuk kebutuhan operasinya, PT Vale Indonesia menggunakan saturated steam yang saat ini dihasilkan oleh Boiler dengan menggunakan bahan bakar fuel

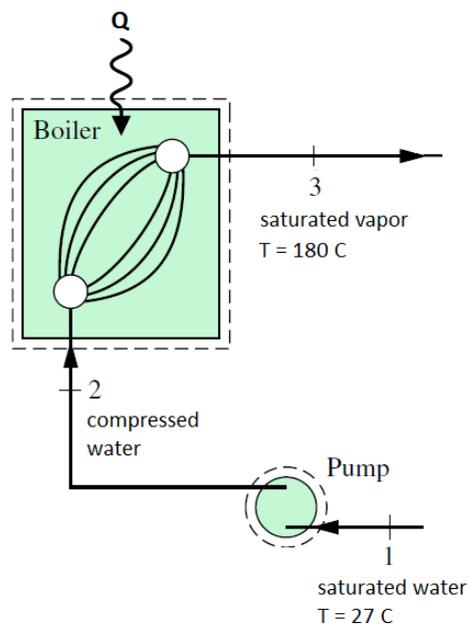
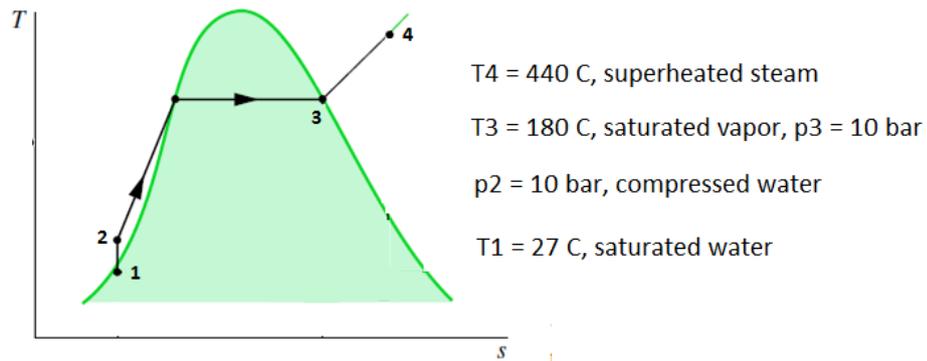
(HSFO). Tabel 4.10 dibawah adalah design basis untuk penggunaan steam di PT Vale Indonesia.

Tabel 4.10 Parameter Operasi Saturated Steam

		Unit	Value
Saturated Water			
Inlet air Temperature	T1	$^{\circ}\text{C}$	27
Inlet air pressure	PI	Atm	1
		Pa	101325.00
Specific Volume	Vf1	m^3/kg	0.0010035
Enthalpy	h1	kJ/kg	113.25
		kkal/kg	27.07
Saturated Water			
Outlet Steam Air Pressure	P2	Bar	10
		Pa	1000000
Enthalpy	h2	kkal/kg	28.07
Saturated Steam			
Steam Temperature	T3	$^{\circ}\text{C}$	180
Steam Pressure	P3	Atm	10
		Pa	1000000
Enthalpy	h3	kJ/kg	2778
		kkal/kg	663.97
Off Gas Sensible Heat	Qh	MW	10.15
		kCal/hr	8727142.323

4.6.2. Perhitungan Kapasitas Steam

Untuk kebutuhan operasinya, PT Vale Indonesia menggunakan saturated steam (10 Bar@ 180 deg C). Berikut adalah perhitungan kapasitas steam yang dihasilkan dengan menggunakan sensible heat yang tersedia dari off gas furnace.



Gambar 4.18 Diagram Pembangkita Saturated Steam

Proses 1-2 Kompresi isentropik di pompa ke pressure 10 bar

Proses 2-3 Heat transfer di dalam boiler pada tekanan tetap 10 bar dari kondisi compressed water hingga mencapai kondisi uap air jenuh (saturated vapor) pada temperatur 180 °C

Dengan merujuk ke buku “Fundamentals of Engineering Thermodynamics” karangan Moran-Saphiro, Tabel A-2, A-3, A-4, maka dapat diperoleh properties untuk kondisi 1, 2, 3, 4 sebagai berikut:

Kondisi 1 saturated water temperatur 27 °C

$$h_1 = 113,25 \text{ kJ/kg} = 27,07 \text{ kkal/kg}$$

$$v_{f1} = 0,0010035 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$p_1 = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$$

Kondisi 2 compressed water pressure 10 bar

$$p_2 = 10 \text{ bar} = 1000000 \text{ Pa}$$

$$h_2 = h_1 + v_{f1} (p_2 - p_1) = 114,15 \text{ kJ/kg} = 27,28 \text{ kkal/kg}$$

Kondisi 3 saturated vapor 180 °C

$$T_3 = 180 \text{ °C}$$

$$P_3 = 10 \text{ bar}$$

$$h_3 = 2778,1 \text{ kJ/kg} = 663,97 \text{ kkal/kg}$$

$$Q_H = m_w \times (h_3 - h_2)$$

Dimana

Q_H : Energy yang tersedia dari panas buang furnace

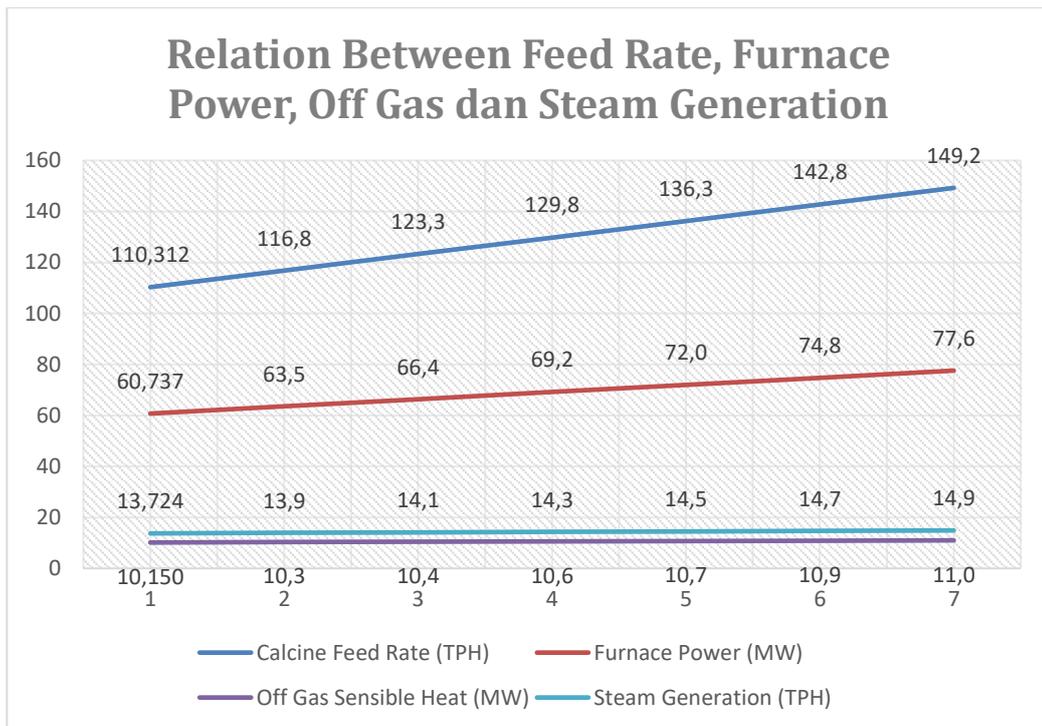
m_w : Kapasitas steam yang dihasilkan

Untuk setiap MW (859845 kCal/hr) sensible heat yang dihasilkan oleh off gas Furnace, maka akan menghasilkan saturated steam sebagai berikut:

$$\begin{aligned} m_w &= Q_H / (h_3 - h_2) \\ &= 859845 \text{ kCal/hr} / (663.97 \text{ kkal/kg} - 28.07 \text{ kkal/kg}) \\ &= 1352.18 \text{ Kg/hr} \\ &= 1.3 \text{ Ton / hr} \end{aligned}$$

4.6.3. Hubungan Antara Feed Rate, Power, Off Gas Sensible Heat dan Kapasitas Pembangkitan Steam

Dengan kondisi operasi Electric Furnace 4, PT Vale Indonesia Tbk, maka besarnya kapasitas steam yang dapat dibangkitkan dipengaruhi oleh Feed Rate, Power dan Off Gas Sensible Heat. Gambar 4.19 berikut menunjukkan hubungan antara Feed Rate, Power dan Off Gas Sensible Heat dengan kapasitas pembangkitan uap.



Gambar 4.19 Grafik Hubungan antara Feed Rate, Power, Off Gas Sensible Heat dan Kapasitas Pembangkitan Steam

Dari grafik 4.19 diatas dapat dilihat bahwa kenaikan furnace power akibat kenaikan feed calcine akan meningkatkan kapasitas uap jenuh yang dihasilkan tetapi kenaikan kapasitas pembangkitan uap jenuh tidak signifikan terhadap kenaikan per KW furnace power.

4.5. Waste Heat Recovery Boiler

4.6.1. Data Plant

Untuk pemilihan dan design WHRB, maka diperlukan data-data kondisi plant PT Vale Indonesia di soroako, yang meliputi:

4.5.1.1. Data Plant General

Ketinggian dari permukaan laut	: 610 m
Suhu udara ambient (dalam 5 tahun terakhir)	: 35 °C
a. Maks. Dry bulb	: 37.5 °C
b. Min. dry bulb:	: 25 °C

c. Rata-rata. dry bulb: : 27 °C

Kelembapan (dalam 5 tahun terakhir)

a. Maksimum : 96%

b. Minimum : 60%

c. Rata-rata : 70%

Curah Hujan (dalam 5 tahun terakhir)

a. Maksimum : 596 mm/ month

b. Minimum : 321 mm/ month

c. Rata-rata : 381 mm/ month

Data Gempa

a. Apakah site potensi terjadi gempa bumi : Ya

b. Rata-rata potensi gempa pertahun : 6

c. Maksimum intensitas gempa : 3.6 SR

d. Zona Gempa dalam kategori : Zone 4

e. Koef dasar gempa : 0.15 g

f. Important factor I : 1.5

g. Koef foundasi untuk faktor tanah : 1.5

Data Angin (dalam 5 tahun terakhir), seperti ditunjukkan pada tabel 4.11 berikut

Tabel 4.11 Data angin di area PT Vale Indonesia

	Frekuensi	Total Kecepatan	%Frekuensi	Kecepatan
Calm	105	0	7.08%	0.00
N	368	306.3	24.80%	0.83
NE	480	201.4	32.35%	0.42
E	70	19.4	4.72%	0.28
SE	228	22	15.36%	0.10
S	31	6	2.09%	0.19
SW	137	84.2	9.23%	0.61
W	13	0.4	0.88%	0.03

NW	52	13.3	3.50%	0.26
	1484	653	100.00%	

Potensi terjadi badai debu : Tidak ada, tetapi jumlah debu yang dihasilkan dari operasi proses plant sangat tinggi.

Type alami dari sub-soil : clay

Beban tanah : 100 kPa

4.5.1.2. Data Plant spesifik dan ketersediaan services

Dimensi dari boiler : TBA by Vendor

Space yang tersedia : 7.5 m x 52 m

Rencana lokasi pemasangan WHRB : Area Dust Handling EF#4

Konstruksi : Steel

Aplikasi : Individual to boilers

Tinggi Chimney : 45 m Maksimum, TBA by Vendor

Lokasi Chimney : Vendor to specify

Tekanan udara plant tersedia : 5.6 – 7 kgf/cm²

Udara Instrument:

Tekanan : 5.6 – 7 kgf/cm²

Temperature : 25 – 45 0C

Tekanan dew point : <14 0C

Spesifikasi Raw water : Tabel 4.12

Tabel 4.12 Spesifikasi Raw Water di PT Vale Indonesia

Parameter	Nilai
pH	8.6
Konduktivitas, micro mhos	200 – 218
Total Hardness, ppm CaCO ₃	90
Alkalinity, ppm CaCO ₃	70 - 80

Calcium Hardness, ppm CaCO ₃	30
Carbon Dioxide (CO ₂), ppm	-
Fluoride F , ppm	0.05
Chloride Cl , ppm	0.03
Iron Fe , ppm	0.02
Nitrate , Nitrogen N , ppm	0.04
Dissolved Oxygen DO , ppm	-
Silica , ppm	23.7
Phosphate Ortho & Meta , ppm	0.15
Sulfate SO ₄ , ppm	0.8
Turbidity	2

Power Listrik, MT & HT : 3.3 and 11 kV, 50 Hz, 3 phase

Power listrik, LT : 220V, 50Hz single phase and 380 V, 50 Hz, 3 phase
or 2 phase

Power Listrik, DC : 125 V

4.5.1.3. Exhaust gas data

Sumber dari exhaust gas : Off gas, 75 MW Electric Furnace

Exhaust gas temperature : Rata-rata 650 °C, Max 821 °C

Exhaust gas quantity : Rata-rata 1008 Nm³/min, Max 1429 Nm³/min

4.5.1.4. Codes dan standard

Design, fabrikasi, dan testing dari peralatan WHRB ini harus berdasarkan codes dan standard edisi terakhir yang dipublikasikan. Codes dan standard yang harus diikuti adalah:

ASME	-	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
ANSI	-	American National Standards Institute
API	-	American Petroleum Institute
OSHA	-	Occupational Safety and Health Act (America)
AWS	-	American Welding Society
NEMA	-	National Electrical Manufacturers Association (America)

AISC	-	American Institute for Steel Construction
NFPA	-	National Fire Protection Association (America)
NBMA	-	National Boiler Manufacturer Association (America)
NEC	-	National Electric Code (America)
PUIL	-	Peraturan Umum Instalasi Listrik (2000) (Indonesia)

4.6.2. Equipment dan Services

Paket WHRB ini akan di sediakan oleh vendor termasuk dengan design, supply material, fabrikasi, dan testing. Adapun detail part dari WHRB ini adalah seperti ditunjukkan tabel 4.13 berikut:

Tabel 4.13 Detail Part dan Auxiliary WHRB

Detail Equipment	Jumlah dibutuhkan
Raw Water reservoir dan sistem penyaringan	1 Set
Water softener system	1 unit
Softened water pumps	2 x 100% kapasitas
Deaerator	1 unit
Boiler feed pumps	2 x 100% kapasitas
Boilers	1 unit
Economizers	1 unit
Steam drums	1 unit
Steam flow meter	1 unit, di area downstream dari steam drum
Ducting	1 set mulai dari ducting furnace ke inlet WHRB
Damper unit dengan gas diverter bypass	Dipasang di inlet ducting WHRB

Stack dengan silencer, lengkap dengan ducting	1 set
Rapper cleaner and control	1 set
Chemical injection	
Sistem sampling, lengkap dengan pendingin dan rack.	
Insulation dan lagging for boiler, piping	Untuk semua komponen boiler termasuk dengan pipa
Pipa dan Valves untu boiler, water, steam, udara instrument, dan pipa uap	1 Set
System proteksi kebakaran	1 Set
Motor Control Centre (MCC)	1 Set
Main Boiler Control Panel	1 Set
Local instruments and gauges panel	1 Set
Power, lighting, instrument, control, and network cables	1 Set
Grounding and bonding system	1 Set
Lightning, surge, EMI / RFI protection system.	1 Set
Clean power supply (UPS)	1 Set
24 VDC Battery Bank and Charger	1 Set
Stainless steel 304 cable tray	1 Set
Lighting system	1 Set
Air Conditioned for control centre room	1 Set
PLC equipment (AB ControlLogix).	1 Set

HMI panel (AB Panel ViewPlus 15 inch).	1 Set
Software for PLC and HMI and programming the system	1 Set
PC with LCD computer panel for operator control (in existing thermal control room)	1 Set
Ethernet LAN Network equipment and cable	1 Set

4.6.3. Design, Pemasangan, Performa, dan Kebutuhan Operasi

4.5.1.1. Design Requirement

Untuk waste heat boiler yang akan dipasang untuk kebutuhan ini, harus mengikuti requirement berikut:

- 1 Unit raw water reservoir dan system penyaringan untuk mensupply kebutuhan akan raw water ke waste heat boiler
- 1 Unit softener system
- 2 Unit softened water pumps, dimana 1 akan beroperasi dan 1 akan standby (redundant system)
- 1 Unit daerator
- 2 Unit boiler feed pump, dimana 1 akan beroperasi dan 1 akan standby (redundant system)
- 1 Unit boiler
- 1 Unit Economizer
- 1 Unit Steam Drums

4.5.1.2. Kapasitas / kebutuhan operasi

Kapasitas uap (Steam flow) : 15 TPH

Tekanan Uap (Steam pressure) : 10 kgf/cm² (g)

Temperature outlet uap (Steam outlet temperature) : 180 °C

Steam purity required:

TDS	: < 7 ppm
Silica	: 0.02 ppm
pH	: 8.5 to 9
Conductivity	: 1 μ S (maximum 10 μ S)
Exhaust gas emission requirement	:Berdasarkan World Bank Recommendation Guideline (Lampiran)

4.5.1.3. Performance requirement

Performa dari boiler harus di garansi dan di design berdasarkan *American Boiler Manufacturers Association (ABMA)*

Vendor harus meng-garansi output steam dari WHRB sesuai dengan kebutuhan operasi di PT Vale Indonesia sesuai dengan yang telah disebutkan di section 4.5.3.2 diatas.

Boiler uap dan peralatan-peralatan yang digunakan harus memenuhi kebutuhan operasi dan sesuai dengan standards yang dipersyaratkan. Vendor harus memberikan sertifikat dari origin manufacture untuk semua equipment yang akan digunakan. Vendor juga harus dapat menunjukkan pengalaman supply dan design untuk type boiler dengan kapasitas dan model sejenis, termasuk dengan tanggal instalasi, type, model, kapasitas dan lokasi pemasangan waste heat boiler tersebut.

4.6.4. Detail Specification/Requirements

4.5.1.1. Umum

- Boiler harus di design, fabrikasi, dan di test berdasarkan ASME Boiler dan Pressure Vessel code, Section I and Section IX.
- Semua unit penggerak harus dilengkapi dengan pelindung, dimana pelindung akan difabrikasi dengan menggunakan lembaran steel atau expanded steel berdasarkan standard OSHA, pemasangan pelindung drive harus dengan menggunakan baut.
- Bantalan (Bearings) harus mudah dilumasi, type ball atau tapered roller yang digunakan harus lengkap dengan pelindung debu (dust seal), dan jika

bantalan ekpose langsung ke cairan, maka harus dilengkapi dengan pelindung percikan (splashguards)

- Semua komponen untuk pneumatic dan fastener harus tahan terhadap korosi, termasuk dengan regulator, filter, dan kombinasi untuk lubrikasi.
- Akses platform harus di sediakan untuk semua peralatan dan komponen yang memerlukan perawatan rutin dan juga untuk peralatan yang akan dioperasikan secara rutin dan berada diatas ketinggian lebih dari 1.5 m diatas permukaan tanah.
- Untuk semua valves dan equipment lain yang harus dioperasikan secara rutin atau harus dioperasikan pada saat emergency harus dipasang di area yang mudah diakses.
- Sampling system and cooler rack harus didesign mudah dan aman diakses.
- Setiap interlock seperti yang disebutkan dibawah harus dihubungkan dengan system isolasi dan dapat di reset manual jika dibutuhkan, yaitu:
 - o Low water level
 - o Loss of electrical power or phase failure

4.5.1.2. Boiler dan Auxiliary

a. Boiler

- Lengkap dengan flow, pressure, temperature dan level gauges sign glass sesuai dengan ASME Boiler dan Vessel Code. Gauges harus dilengkapi dengan indikasi local dan lengkap dengan enclosure Provide flow, pressure, temperature and level gauges sight glass at the boiler as specified in ASME Boiler and Vessel Code.
- Lengkap dengan safety valves, devices, dan switches untuk alarm, shutdown ketika boiler beroperasi secara tidak normal. Sesuai dengan standard dan requirement ASME Boiler dan Pressure Vessel Code
- Lengkap dengan fitting, drain valves, drain piping, feed piping, feed valves, stop valves, check valves, safety valves, dan fitting-fitting lain untuk boiler
- Boiler harus lengkap dengan equipment-equipment dibawah, yaitu:
 - a) Boiler fittings
 - b) Water column.

- c) Low water cutoff
- d) Feed and check valve.
- e) Continuous blow down valve.
- f) Safety valve.
- g) Steam nonreturn valves.
- h) Feedwater regulator
- i) Rapper Cleaning

b. Raw water reservoir dan system penyaringan

- System penyaringan harus dilengkapi dengan indicator perbedaan tekanan (pressure difference indicator) dan transmitter untuk mengidentifikasi blockage atau perbedaan tekanan yang berlebihan dari kisaran nilai yang direkomendasikan.

c. System Water softener

- Operasi harus full otomatis dengan menggunakan PLC
- Analisis air harus ditempatkan di output line untuk menganalisa parameter softened air dan terkoneksi dengan dosing pump untuk secara otomatis menyeimbangkan dosing rate untuk mendapatkan kualitas air yang diharapkan.
- Vendor harus menentukan jumlah water input dan jumlah kehilangan air pada kondisi normal dan kondisi maksimum.
- Kritikal komponen seperti pompa, control valve, dll harus memiliki redundant system untuk memastikan tidak ada interupsi ketika komponen tersebut di repair atau di periksa secara berkala.
- Semua tanki/vessels harus didesign dan difabrikasi berdasarkan ASME Section VIII Division I
- Semua material untuk pompa (shaft, casing, impeller) harus menggunakan stainless steel kecuali jika ada pertimbangan lain.
- Penggerak pompa harus menggunakan VSD (Variable speed drive) untuk mengantisipasi fluktuasi permintaan.
- Motor pompa harus menggunakan frame NEMA.
- Motor harus memiliki standard proteksi untuk temperature dan arus listrik.

d. Softened water pumps.

- Pompa harus dapat memenuhi kebutuhan operasi boiler pada semua kondisi dari mulai kondisi operasi paling rendah sampai operating kondisi maksimum.
- Motor pompa harus menggunakan frame NEMA.
- Semua material untuk pompa (shaft, casing, impeller) harus menggunakan stainless steel kecuali jika ada pertimbangan lain.
- Motor harus memiliki standard proteksi untuk temperature dan arus listrik.
- Besaran vibrasi motor pada setiap arah tidak boleh lebih dari 4.0 mm/s
- Sejalan dengan API 610, coupling harus memiliki toleransi besar terhadap misalignment dengan menggunakan flexible coupling.

e. Deaerator

- Design dan fabrikasi pressure vessel harus berdasarkan ASME Code, Section VIII, Division 1, untuk Unfired Pressure Vessels dengan code stamp, and standard HEI untuk deaerators.
- Vacuum breaker(s) harus di sediakan dan didesign untuk mencegah daerasi collapse ketikan aliran stem terganggu.
- Vessels harus di design dengan menggunakan minimum 3.2 mm corrosion allowance. Pipa harus di design dengan minimum 1.6 mm corrosion allowance.
- Pressure relief valve harus di design berdasarkan standard ASME.
- Feedwater pumps, jalur pipa, control box harus disediakan sebagai bagian dari daerator.
- Kapasitas daerator harus di design 1.25 kali kapasitas yang dibutuhkan.
- Daerator harus dilengkapi dengan monitor kadar oksigen di feed water dan system control melalui process control utama dari boiler. Sistem ini akan mengontrol jumlah uap yang diinjeksikan ke system daerator.
- Daerator harus dilengkapi dengan level indicator, switch untuk Hi-Low Level, overflow traps, indicator tekanan dan transmitter, indikator suhu dan transmitter, system control untuk venting, automatic water inlet valve dan pressure reducing valve, dan internal fittings

f. Boiler feed pumps.

- Type harus horizontal split case, multistage, dan detail spesifikasi dan kualitas harus berdasarkan API 610.
- Sistem pompa harus memenuhi kebutuhan operasi boiler pada setiap kondisi mulai dari kapasitas operasi minimum sampai dengan kapasitas operasi maksimum.
- Motor pompa harus menggunakan frame NEMA. Motor harus dilengkapi dengan RTD untuk tujuan monitoring dan proteksi.
- Motor shall have standard protection against temperature and current
- Motor harus memiliki standard proteksi untuk temperature dan arus listrik.
- Besaran vibrasi motor pada setiap arah tidak boleh lebih dari 4.0 mm/s
- Sejalan dengan API 610, coupling harus memiliki toleransi besar terhadap misalignment dengan menggunakan flexible coupling.
- Parameter motor harus dapat di monitor dari ruang control (control room).
- Boiler feed water flow control dengan menggunakan pump variable speed control atau discharge flow control valve.
- Setiap feed water pump harus dilengkapi dengan flow meter dengan indikasi langsung ke main boiler process controller.
- Untuk feed water pump dengan power lebih besar dari 150HP harus dilengkapi dengan monitoring vibrasi di pompa dan motor dengan indikasi langsung ke main boiler process controller.

g. Economizer

- Design, Fabrikasi, dan konstruksi harus berdasarkan ASME Code Section 1
- Harus dilengkapi dengan ducting untuk inlet dan outlet gas, inlet dan outlet air, lengkap dengan bypass air, frame, lagging, dan isolasi.
- Harus di design sehingga pengecekan tube bisa dilakukan dari economizer
- Harus dilengkapi dengan drain secara gravity.

h. Steam drum

- Material dengan menggunakan carbon steel dan sesuai dengan ASTM A516 Grade 70 atau dengan menggunakan spesifikasi yang lebih tinggi.
- Semua material, procedure pengelasan, NDT harus sesuai dengan ASME Code Section V.
- Drum harus dilengkapi dengan akses manhole pada kedua sisi.
- 2 unit Pressure-matic harus diinstall pada posisi upstream mechanical relief valves. Pressure-matic harus power actuated dan dapat dioperasikan secara remote maupun local.
- Level control steam drum akan berasal dari main boiler process controller dan termasuk dengan pengukuran dan input dari instrument lapangan sebagai berikut:
 - o Level Steam Drum level
 - o Boiler steam, mass flow correct, discharge flow
 - o Boiler feed water flow (termasuk indikasi pressure dan temperature)

i. Steam flow meter

- Steam flow indicator/transmitter harus ANSI flanged dan dilengkapi dengan bypass line dan valves.
- Indikasi flow harus dapat dilihat melalui MMI.

j. Damper

- Damper harus dapat dioperasikan baik dari local maupun dari control room.
- Material blades harus berdasarkan aplikasi yang akan di handle.
- Aktuator damper dapat menggunakan pneumatic atau electric.
- Aktuator harus di design 400% dari maksimum torsi dan gaya pada saat operasi.
- Material blades, gasket, dan seal harus didesign berdasarkan temperature kerja dan properties dari exhaust gas.
- Posisi actual dari damper harus ditunjukkan di control room.

k. Stack and ducting

- Ducting dengan menggunakan steel, sesuai dengan NFPA 211 untuk metal connector untuk aplikasi panas medium, dan difabrikasi dengan menggunakan sambungan welded beam.
- Menyediakan akses untuk pembersihan dan akses tersebut harus dilengkapi dengan non-asbestos gasket antara akses doors dan frame.
- Ducting harus di design untuk mengakomodasi ekspansi dan kontraksi maksimum.
- Expansion joint harus type metallic, SS316 bellow.
- Design Stack harus sesuai venting flue gas dari boiler pada saat beroperasi.
- Silincer harus didesign untuk mengurangi noise yang dihasilkan oleh exhaust gas sehingga noise dari boiler tidak lebih dari 85 dB.

l. Dust Rapper

- Operasi otomatis untuk membersihkan tumpukan debu didalam boiler.
- Manual control juga harus disediakan

m. Chemical injection system

- Pompa dan driver harus sesuai untuk continues full load duty.
- Metering pump harus memiliki double valve untuk bagian suction dan discharge.
- Pompa harus dapat di adjust untuk kapasitas mulai dari 0 persent sampai 100 persent pada saat beroperasi.
- External relief valve dengan pipa kembali ke supply tank harus disediakan.

n. Insulation and Lagging dibutuhkan untuk proteksi bagi personal dan operator dan juga untuk mengurangi rugi-rugi panas yang dapat mempengaruhi efisiensi kerja dari waste heat boiler.

- Material insulasi dan lagging harus menggunakan rock wool dan harus asbestos-free.
- Insulation/lagging cover/sheet material harus menggunakan SS316
- Insulasi harus diaplikasikan dengan metode yang benar untuk valve, pipe dengan hanger dan saddle, fitting, dll.

o. Pipe, fittings, valves, and bolting

- Process and pressurized piping harus di design, fabrikasi, dan ditest berdasarkan ASME B31.1.
 - Koneksi pipa untuk pipa ukuran 50mm dan lebih besar harus menggunakan flanges. Flanges harus sesuai dengan standard ANSI/ASME B16.5.
 - Untuk ukuran lebih kecil dari 50 mm, koneksi pipa adalah dengan menggunakan sambungan ulir. Sambungan ulir harus sesuai dengan ANSI/ASME B1.20.1.
 - Semua pipa harus di support secara benar.
 - Valves harus disesuaikan dengan temperature fluida, flow, pressure dan properties harus berdasarkan ASME Rated (stamped).
 - Control valve yang akan digunakan harus specific untuk aplikasi waste heat boiler.
 - Semua control valves harus memiliki bypass valve dengan block dan bleed.
- p. Fire Protection system dan design emergency evakuasi** harus berdasarkan standard international dan spesifik untuk aplikasi boiler/thermal plant.
- Fire protection system, jika dibutuhkan, harus interlock dengan Boiler Management System untuk menyediakan proteksi maksimum dan untuk mengurangi potensi kerusakan equipment dan bahaya bagi pekerja di sekitar pemasangan WHRB.
 - Sirine harus disediakan di lokasi yang bisa dengan mudah dilihat oleh pekerja disekitar pemasangan WHRB.
- q. Surface Preparation and Painting**
- Structural steel surface preparation and painting harus berdasarkan kondisi dengan kandungan sulfur tinggi.
 - Permukaan material carbon steel yang di machining harus di coating dengan heavy rust prevention coating.

4.6.5. Parameter Kontrol WHRB

Operasi dari WHRB harus dapat di monitor baik secara local maupun remote. Tabel 4.14 berikut menunjukkan parameter kontrol WHRB yang harus dikontrol baik melalui lokal dan remote:

Tabel 4.14 Parameter Kontrol WHRB

No	Lokasi	Level	Temp	Pressure	Flow	Local	Ctrl room
1	Steam drum	mm	⁰ C	kgf/cm ²	-	Ya	Ya
2	Mud drum	mm	⁰ C	kgf/cm ²	-	Ya	Ya
3	Deaerator	mm	⁰ C	kgf/cm ²	TPH	Ya	Ya
4	Economizer	-	⁰ C				Ya
5	Water side	-	⁰ C	kgf/cm ²	TPH	N/R	Ya
6	Flue gas side	-	⁰ C	mmH ₂ O	-	N/R	Ya
7	BFP suction/discharge	-	⁰ C	kgf/cm ²	TPH[1,2]	Ya	Ya
8	Steam outlet	-	⁰ C	kgf/cm ²	TPH	N/R	Ya
9	Softened water	-	⁰ C	kgf/cm ²	TPH	Ya	Ya
10	Conductivity / pH	-	-	-	-	Ya	Ya
11	Bleed steam	-	⁰ C	kgf/cm ²	TPH	Ya	Ya
12	Blowdown Continuous	-	⁰ C	-	kg/hr	Ya	Ya
13	Raw Water Supply (demin)	-	-	kgf/cm ²	LPM	N/R	Ya

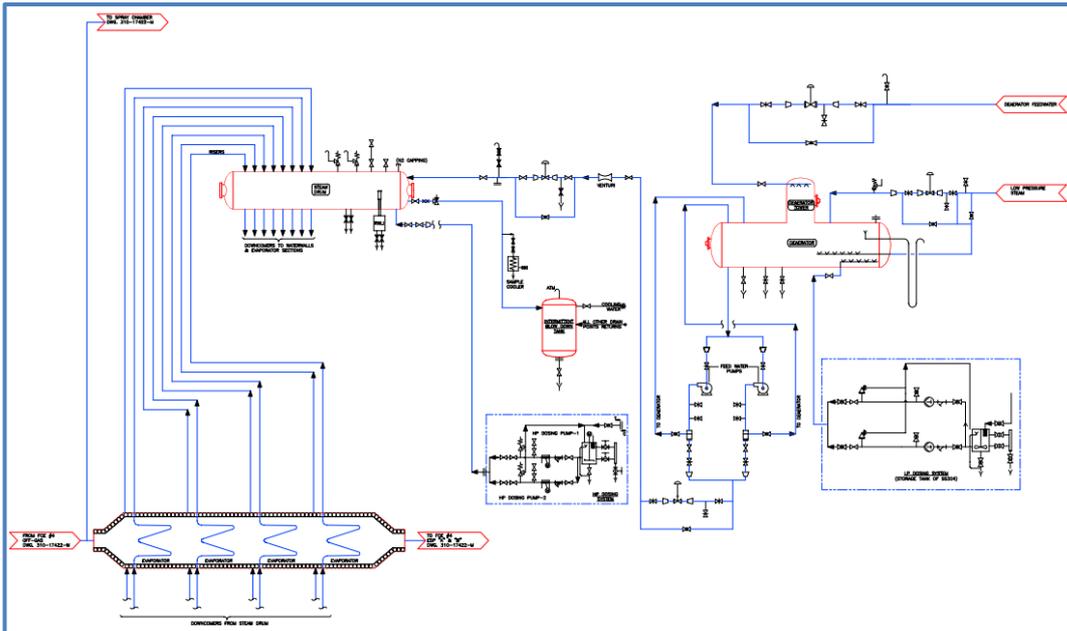
4.6.6. Diagram Alir Proses WHRB

Panas buang dari off gas electric furnace 4 akan masuk ke bagian evaporator dimana pada bagian ini panas buang akan membantu pemanasan air yang berada pada tanki LP drum (LP evaporator) dan HP drum (HP evaporator). LP drum merupakan tempat penampungan air pada waste heat boiler, yang kemudian akan

dialirkan ke feedwater pump untuk dipompakan menuju economizer. LP drum juga menerima supply air dari flash vessel. Pada LP drum fasa masih dalam bentuk cair sehingga tidak terjadi perubahan fasa, sehingga tekanan didalam tanki masih rendah.

HP drum adalah tempat penampung siklus pemanasan air dalam boiler yang digunakan untuk memisahkan wujud fluida, antara yang berwujud air dengan yang berwujud uap (steam). Di dalam HP drum terdapat peralatan pemisah uap. Campuran feed water dan uap mengalir mengikuti bentuk separator sehingga uap air pada campuran akan jatuh dan masuk ke saluran primary saturated. Air yang jatuh akan dialirkan ke bagian bawah dari drum secara gravitasi dan mengalir ke dalam tempat penampungan kemudian keluar menuju Flash vessel. Dalam Flash vessel air dari HP drum yang masih mengandung uap atau steam akan dipisahkan, air yang dipisahkan akan menuju ke LP drum sedangkan uap hasil pemisahan tersebut akan menuju ke blowdown tank.

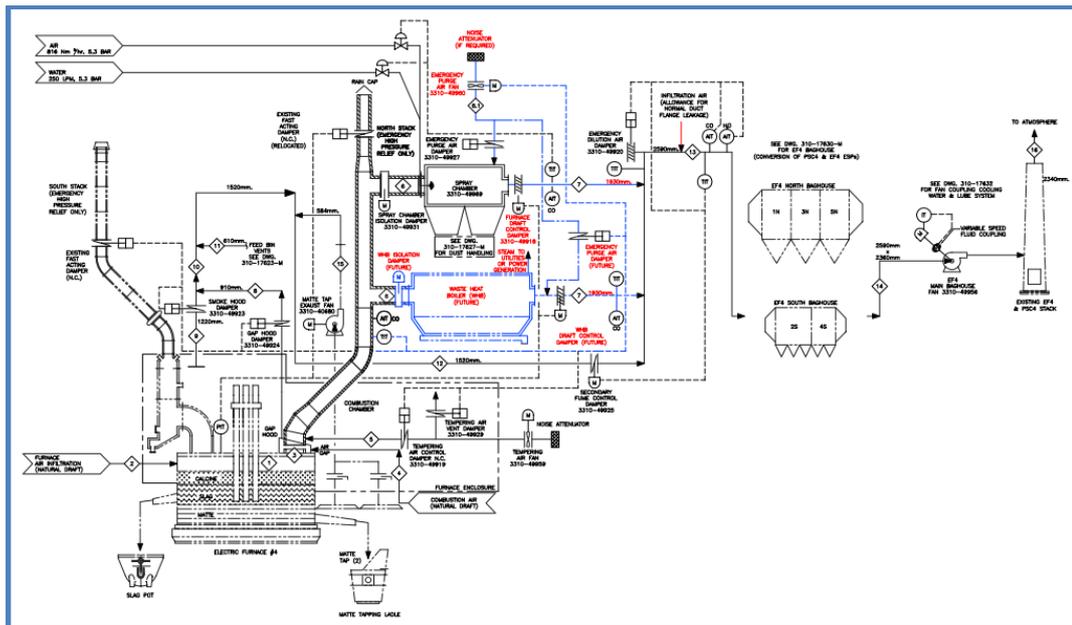
Untuk proses mengubah air menjadi uap, kandungan oksigen dalam air harus dikurangi. Untuk proses tersebut, sebelum air dimasukkan ke proses waste heat boiler, air akan dipompa ke daerator sehingga kadar oksigen dalam air berkurang. Disamping menurunkan kadar oksigen, air umpan untuk proses waste heat boiler juga akan melalui proses pretreatment di softener sebelum dipompakan ke economizer dengan menggunakan softener water pump. Gambar 4.20 berikut adalah digram alir yang menunjukkan proses pemanfaatan panas buang dari electric furnace 4 untuk menghasilkan saturated steam dengan menggunakan waste heat boiler.



Gambar 4.20. Diagram Alir proses WHRB

4.6.7. Posisi Pemasangan (Tie-in)

Off gas dari electric furnace 4 akan di tie-in dari ducting eksisting sebelum spray chamber. Dengan memasang ducting baru, off gas akan diarahkan ke fasilitas pemanfaatan off gas menjadi uap saturated. Fasilitas ini disebut dengan WHRB (Waste Heat Recovery Boiler), dimana WHRB ini terdiri dari beberapa kumpulan tubing sehingga memungkinkan terjadinya perpindahan panas secara konveksi. Panas dari off gas pada bagian inlet sekitar 700°C akan dimanfaatkan dengan cara mendinginkan sehingga terjadi perpindahan panas, panas buangan hasil perpindahan panas adalah sekitar 200°C . Gas buangan dari WHRB akan di arahkan ke fasilitas penyaringan debu eksisting (baghouse) sebelum akhirnya dibuang keudara pada suhu $50\text{-}60^{\circ}\text{C}$. WHRB akan dipasang parallel dengan fasilitas pengolahan off gas eksiting (spray chamber) sehingga kedua system ini dapat digunakan sebagai redundant jika dibutuhkan maintenance terhadap fasilitas WHRB tanpa harus menghentikan proses peleburan di furnaces. Gambar 4.21 dibawah menunjukkan blok diagram untuk pemasangan waste heat boiler, dan gambar 4.22 dan gambar 4.23 menunjukkan area plan dan section pemasangan WHRB.



Gambar 4.21. Blok diagram pemasangan waste heat Boiler

4.6.8. Pertimbangan Pemilihan Design Waste Heat Boiler

4.5.1.1. Penggunaan Uap

Waste heat boiler dapat menghasilkan uap pada berbagai tekanan dan suhu dari uap jenuh suhu rendah sampai uap super panas bertekanan tinggi. Pemilihan kondisi keluaran uap harus dibuat berdasarkan penggunaan akhir uap. Untuk pembangkit listrik melalui turbin, uap harus dipanaskan pada tekanan tinggi untuk menyediakan tenaga penggerak turbin. Untuk proses dengan menggunakan uap, maka uap jenuh dengan tekanan yang lebih rendah dapat digunakan. Oleh karena itu, pemilihan waste heat boiler ini didasarkan pada penggunaan yaitu untuk menghasilkan uap jenuh pada suhu 180 °C dan tekanan 10 Bar.

4.5.1.2. Konfigurasi Horizontal dan Vertical

Konfigurasi waste heat boiler baik konfigurasi horizontal dan vertical sudah dipasang pada banyak aplikasi, dan berdasarkan diskusi dengan vendor bahwa kedua konfigurasi ini, baik horizontal maupun vertical akan dapat diaplikasikan di PT Vale Indonesia. Namun demikian, konfigurasi boiler horizontal memiliki beberapa keuntungan, yaitu:

- Lebih umum dalam aplikasi tungku metalurgi (metallurgical furnaces)

- Lebih banyak vendor yang menawarkan konfigurasi ini (hanya Alstom dan kemungkinan Oschatz yang menawarkan konfigurasi vertical)
- Lebih murah (Konfigurasi vertical lebih mahal sekitar 23%)
- Akses platform yang lebih simple dan level platform bertingkat yang akan digunakan lebih sedikit
- Dapat difabrikasi dalam section yang lebih kecil untuk memfasilitasi kemudahan dalam pengiriman dan pemasangan.

Kekurangan utama dari konfigurasi horizontal adalah membutuhkan area pemasangan yang lebih luas. Namun demikian, hal ini tidak menjadi issue dikarenakan area yang tersedia untuk pemasangan waste heat boiler dengan konfigurasi horizontal ini masih tersedia. Oleh karena itu, untuk aplikasi ini akan dipilih waste heat boiler dengan konfigurasi horizontal

4.5.1.3. Mekanisme Pembersihan Waste Heat Boiler

Dikarenakan kandungan debu yang tinggi pada off gas, maka untuk menghindari penumpukan debu pada waste heat boiler, maka harus dipasang mekanisme pembersih, dimana mekanisme ini akan membersihkan tumpukan debu secara periodic maupun secara continue. Ada 2 type mekanisme pembersih yang digunakan secara luas di boiler dan juga sudah diaplikasikan pada waste heat boiler, yaitu mekanisme rapper dan soot blowers. Berdasarkan diskusi dengan beberapa vendor boiler, mekanisme rapper menyediakan keuntungan untuk waste heat boiler type horizontal, yaitu:

- Membersihkan lebih bersih untuk debu kering (dry dust)
- Biaya operasi rendah tanpa ada kehilangan uap
- Operasi continue, tidak ada debu yang menumpuk pada interval pembersihan seperti yang terjadi pada soot blower
- Kontrol pembersihan yang lebih baik dengan pengaturan kecepatan ketukan (rapping speed)
- Rapper mungkin akan membutuhkan lebih banyak maintenance tetapi part yang aus dan rusak lebih mudah diganti
- Rapper tidak meningkatkan laju abrasi pada tubing

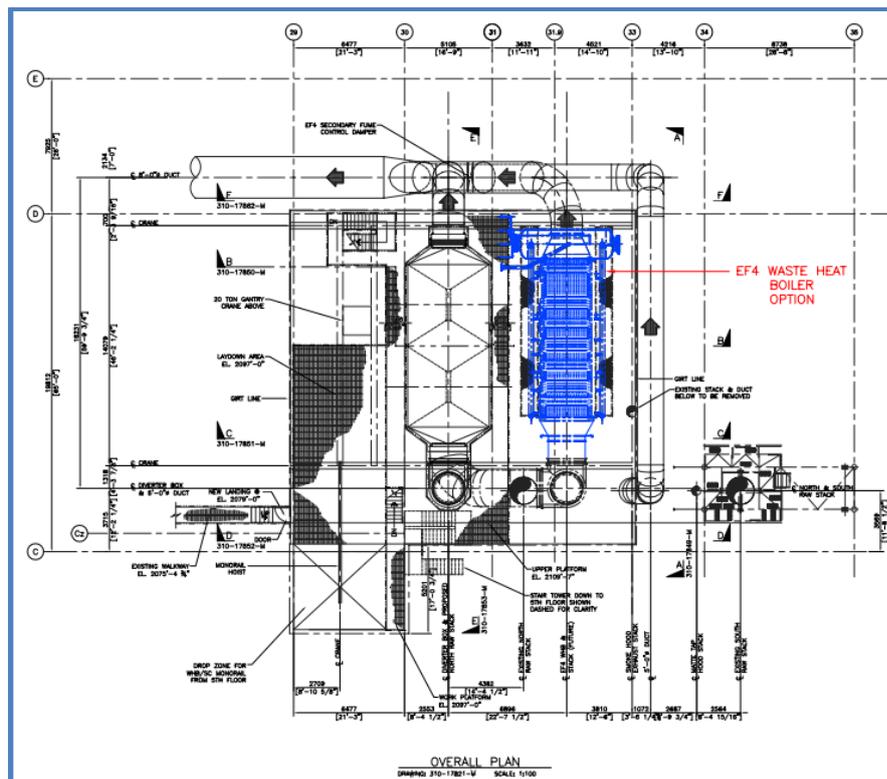
Dengan berbagai keuntungan ini, maka untuk pembersihan waste heat boiler akan menggunakan mekanisme rapper.

4.5.1.4. Lokasi Pemasangan Waste Heat Boiler

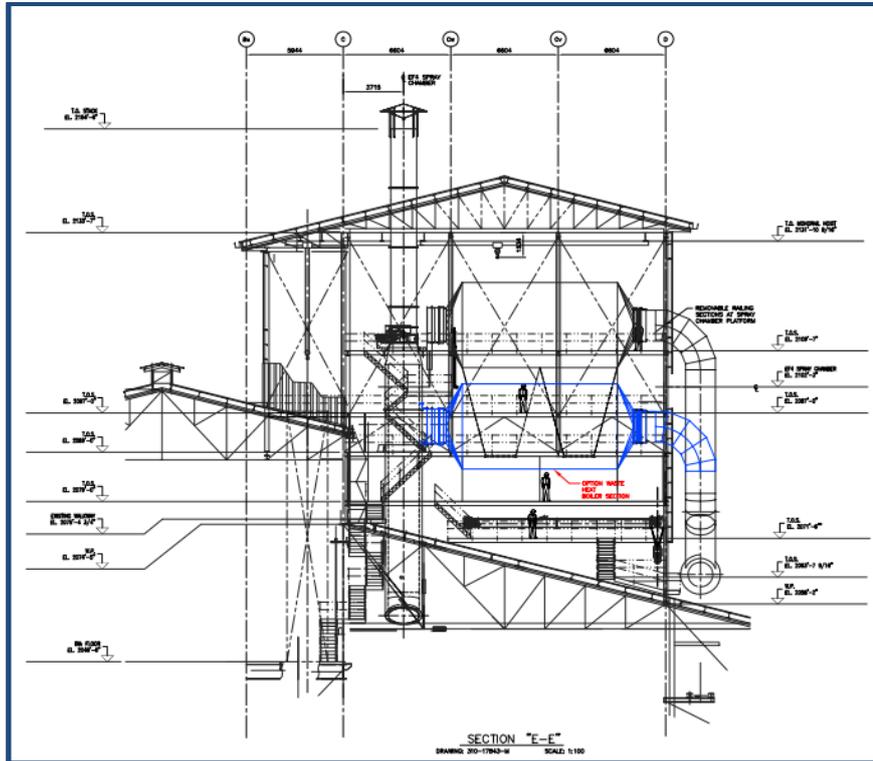
Beberapa lokasi tersedia untuk pemasangan waste heat boiler ini. Kriteria utama yang digunakan untuk menentukan lokasi yang ideal adalah:

- Lokasi yang sama tersedia di area furnace lain sehingga ketika akan diaplikasikan di furnace lain akan lebih mudah.
- Biaya capital untuk pemasangan
- Konsen untuk akses dan maintenance
- Jarak terhadap furnace (tungku) sumber off gas
- Jarak terpendek untuk lined ducting, dengan meminimalkan belokan dan bagian horizontal

Setelah mengevaluasi beberapa option, maka lokasi paling idel untuk pemasangan waste heat boiler ini adalah diatas area converter aisle roof. Gambar 4.22 dan gambar 4.23 berikut area plan dan section pemasangan waste heat boiler.



Gambar 4.22. Gambar plan pemasangan waste heat boiler



Gambar 4.23. Gambar section pemasangan waste heat boiler

4.6. Tinjauan keekonomisan (Economic Evaluation)

Selain peninjauan secara engineering, berjalannya untuk project sangat dipengaruhi oleh peninjauan keekonomisan, apakah project tersebut akan memiliki dampak ekonomis yang baik atau tidak. Peninjauan keekonomisan meliputi besarnya biaya investasi (*capital cost*) yang akan dilakukan untuk melakukan engineering design, membeli peralatan, dan memasang peralatan peralatan tersebut dan biaya operasi (*operating cost*) yang meliputi biaya yang dibutuhkan untuk mengoperasikan dan merawat peralatan tersebut, sehingga selalu bisa digunakan untuk menghasilkan uap saturated.

Perhitungan tinjauan keekonomisan akan menghasilkan jangka waktu pengembalian modal (*return of investement*), yaitu dengan memperhitungkan nilai biaya investasi dan biaya operasi dari pemasangan waste heat boiler dan

dibandingkan dengan total biaya operasi dari eksisting fasilitas penghasil uap dengan menggunakan bahan bakar HSFO.

4.6.1. Biaya Investasi untuk Pemasangan WHRB (Capital Cost)

Biaya investasi untuk pemasangan WHRB dihitung berdasarkan beberapa tinjauan dengan memberikan kontigensi untuk mengantisipasi kenaikan harga, perubahan kondisi (ekonomis, sosial, politik), dan kemungkinan perubahan design setelah detail perhitungan dan engineering dilakukan. Berdasarkan beberapa factor tersebut, maka untuk perhitungan biaya investasi dilakukan dengan memberikan kontigensi sebesar $\pm 20\%$. Besarnya nilai kontigensi ini didasarkan pada pengalaman dari beberapa project untuk type sejenis. Tinjauan-tinjauan yang dilakukan untuk perhitungan biaya investasi adalah sebagai berikut:

- Harga penawaran untuk dari vendor untuk peralatan –peralatan utama yang akan dipasang.
- Perhitungan biaya untuk fabrikasi dan pemasangan
- Harga penawaran untuk peralatan-peralatan electrical dan instrumentasi.
- Harga penawaran untuk peralatan-peralatan minor berdasarkan sejarah pembelian

Besarnya biaya investasi untuk pemasangan WHRB adalah seperti ditunjukkan pada tabel 4.14 berikut.

Tabel 4.14 Biaya Investasi Pemasangan Waste Heat Boiler

Item	Cost
Waste Heat Boiler	\$ 1,785,000.00
Expansion Joint	\$ 191,000.00
Damper	\$ 265,000.00
Screw conveyors	\$ 21,600.00
Explosion Vent	\$ 309,000.00
Refractory Lined Ductwork	\$ 268,000.00
Dry Ductworks	\$ 532,000.00
3.3 kV Fan Motors	\$ 96,000.00
Control & PLC Panels	\$ 84,000.00
Misc Demolition	\$ 40,000.00

Foundations	\$	171,000.00
Misc Electrical, Misc Instrumentation, Controls & PLC	\$	205,000.00
Waste Heat Boiler Installation	\$	536,000.00
Refractory-lined Ductwork Installation	\$	188,000.00
Dry Ductwork Installation	\$	198,000.00
Piping Supply and Installation	\$	85,000.00
Insulation & Jacketing Supply & Installation	\$	239,000.00
Crane Rental	\$	188,000.00
Spare Parts	\$	531,000.00
Total Direct Costs	\$	5,932,600.00
Indirect Costs (30%)	\$	1,779,780.00
Total Project Cost	\$	7,712,380.00

4.6.2. Biaya Operasi Waste Heat Boiler

Perhitungan biaya operasi waste heat boiler dilakukan untuk menganalisa besarnya biaya yang harus direncanakan untuk mengoperasikan waste heat boiler ini yang diakibatkan oleh adanya penambahan peralatan dan system. Tinjauan-tinjauan yang dilakukan untuk menganalisa besarnya biaya untuk mengoperasikan waste heat boiler meliputi:

- Biaya listrik yaitu harga listrik/MHh, untuk biaya listrik ini didasarkan oleh biaya beban listrik di PT Vale Indonesia yaitu \$76.11/ MWh
- Efisiensi dari motor static yaitu 70%
- Efisiensi dari motor listrik yaitu 95%
- Jam operasi dalam satu tahun yaitu 8040 jam/tahun
- Biaya yang dibutuhkan untuk dosing chemical

Dengan memperhitungkan tinjauan-tinjauan diatas, maka besarnya biaya operasi untuk pengoperasian waste heat boiler adalah seperti ditunjukkan pada tabel 4.15 berikut:

Tabel 4.15 Biaya Operasi Waste Heat Boiler

Power Cost Estimate	Qty	Power Draw		Hour per Year	Energy KWh	\$/kwh	Unit Cost	Total Cost
		HP	KW					
Tempering Air Fan	1	21	15.660	8,040	125,903.99	0.076	9,582.55	\$ 9,582.55
Feedwater Pumps	1	102	76.061	8,040	611,533.66	0.076	46,543.83	\$ 46,543.83
Deaerator Feed Pumps	1	14	10.440	8,040	83,935.99	0.076	6,388.37	\$ 6,388.37
HP Dosing Agitator	1	0.45	0.336	8,040	2,697.94	0.076	205.34	\$ 205.34
HP Dosing Pump	2	0.45	0.336	8,040	2,697.94	0.076	205.34	\$ 410.68
LP Dosing Agitator	1	0.45	0.336	8,040	2,697.94	0.076	205.34	\$ 205.34
LP Dosing Pump	2	0.45	0.336	8,040	2,697.94	0.076	205.34	\$ 410.68
Screw Conveyors	1	5	3.729	8,040	29,977.14	0.076	2,281.56	\$ 2,281.56
Total Operating Cost/Years								\$66,028.35

4.6.3. Heat Recovery Saving

Pemanfaatan gas buang dari electric furnace 4 akan menguntungkan secara ekonomis karena adanya penghematan terhadap pemakaian bahan bakar minyak (HSFO). Besarnya penghematan dengan pemanfaatan gas buang ini ditunjukkan pada tabel 4.16. Besarnya penghematan dari pemanfaatan panas buang ini didasarkan pada:

- Kapasitas uap saturated yang dihasilkan oleh WHRB dengan memanfaatkan panas buang dari electric furnace no 4.
- Harga HSFO berdasarkan perencanaan biaya dari PTVI (Forcast Price) yaitu \$55.67/bbl
- Nilai kalor pembakaran HSFO (NHV) yaitu 10577 kcal/kg
- Konsumsi bahan bakar dari eksisting boiler untuk menghasilkan per ton saturated steam yaitu 0.39 bbl HSFO/ton steam
- Jam kerja waste heat boiler per tahun yaitu 8,040

- Semua steam yang dihasilkan oleh WHRB akan digunakan untuk memenuhi kebutuhan uap pada proses peleburan (100% utilization)

Tabel 4.16 Heat Recovery Saving

Furnace Capacity	110 TPH	130 TPH	150 TPH	Unit
Waste Heat Boiler				
Heat Recovered	8727142.32	9096228.11	9465313.89	kCal/hr
Boiler Operating Hours	8040	8040	8040	Hour / Year
Steam Generated	13.72	14.30	14.89	TPH
	110342.34	115008.90	119675.47	TPY
Package Boiler:				
Fuel	HS Fuel Oil			
API	15.5			
Specific Gravity	0.98			
Fuel Cost	55.67			\$ / barrel
	0.771			\$ / kg
Fuel Heat Rating	155			Btu/Usgal net
Gross	10557			Kcal/Kg
Net	10557			Kcal/Kg
Heat Required to Boil Water				
Sensible Heat (l) 100-27C	306,600			J/kg
Latent Heat of evaporation	2,300,000			J/kg
Sensible Heat (g) 180-100C	160,000			J/kg
Total Heat Required	2,766,600			J/kg
	661.23			Kcal/kg
Fuel Required				
	0.063			Kg Fuel / kg steam
	0.394			bbl fuel / ton steam
Fuel Saving				
Daily Fuel Saving	5.407	5.635	5.864	bbl Fuel
	496.883	517.897	538.911	\$ / day
Annual Saving Fuel	43470.476	45308.916	47147.357	bbl Fuel
	\$ 2,343,551.91	\$ 2,445,457.18	\$ 2,445,457.18	\$ / Year

4.6.4. NPV, IRR, dan Pengembalian Modal Investasi (Return of Investment)

Dari tinjauan ekonomis yang dilakukan (perhitungan biaya investasi, biaya operasi, dan potensi penghematan dengan menggunakan waste heat boiler), maka dapat dilakukan perhitungan *Net Present Value (NVP)*, *Internal Rate and Return (IRR)*, dan pengembalian modal investasi (return of investment).

NVP adalah merupakan arus kas yang diperkirakan pada masa yang akan datang yang didiskontokan pada saat ini, sedangkan IRR adalah metode perhitungan investasi dengan menghitung tingkat bunga yang menyamakan nilai sekarang investasi dengan nilai sekarang dari penerimaan-penerimaan kas bersih dimasa yang akan datang. Perhitungan NVP, IRR, dan pengembalian modal investasi ini didasarkan pada:

- Masa umur peralatan yang akan dipasang (lifetime) 20 tahun.
- Tax rate 25%
- PV discount factor 7.5%
- Tahun project akan dimulai (initial Capex) 2019
- Tahun project akan di kapitalisasi tahun 2021

Perhitungan NVP, IRR, dan payback period berikut didasarkan pada kapasitas furnace untuk menghasilkan panas buang. Tabel 4.17 berikut menunjukkan besarnya NVP, IRR, dan payback period untuk pemanfaatan panas buang furnace dengan menggunakan waste heat recovery boiler.

Tabel 4.17 NVP, IRR dan Pengembalian Modal Investasi (Return of Investment)

Furnace Capacity	110 TPH	130 TPH	150 TPH
Capital Investemet	\$ 7,712,380.00	\$ 7,712,380.00	\$ 7,712,380.00
Operating Cost/Year	\$ 66,028.35	\$ 66,028.35	\$ 66,028.35
Fuel Saving/Year (average)	\$ 2,409,580.26	\$ 2,511,485.53	\$ 2,511,485.53
Saving/Year (average)	\$ 2,343,551.91	\$ 2,445,457.18	\$ 2,445,457.18
Net Present Value (NPV) in \$US	\$ 13,586,812.57	\$ 14,122,841.82	\$ 14,658,871.05
Internal Rate of Return (IRR)	18%	19%	20%
Undiscounted Payback Period (year)	4.93	4.78	4.64

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Hasil Penelitian

Electric Furnace 4 adalah salah satu fasilitas peleburan yang dimiliki oleh PT Vale Indonesia. Fasilitas peleburan ini di design dengan kapasitas 75 MW, dan beroperasi dengan rata-rata kapasitas 65 MW dan dapat meleburkan calcine sekitar 130 sampai 150 ton per jam.

Perhitungan heat dan mass balance dapat dilakukan dengan melakukan perhitungan terhadap parameter-parameter operasi seperti laju peleburan calcine, laju penambahan material scrap, koefisien partisi dari Ni dan Co, disposisi C dan S, berat molekul, temperature, kandungan heat spesifik, rugi-rugi aliran udara, dan rugi-rugi panas dari furnace. Perhitungan kesetimbangan massa meliputi semua aliran massa masuk dan massa keluar termasuk dengan aliran massa gas. Aliran massa off gas terdiri dari dari produk proses reduksi dan pembakaran CO dan S dan juga H₂O dari udara dan material input (feed). Sedangkan perhitungan kesetimbangan panas terdiri dari input panas yang masuk ke tungku peleburan yang berasal dari panas dari energi listrik, panas calcine, dan panas reaksi pembakaran, sedangkan output panas dari tungku peleburan terdiri dari panas pada matte, panas pada slag, panas pada off gas (exhaust gas), panas pada proses reduksi, dan rugi-rugi panas selama proses peleburan.

Distribusi input panas pada proses peleburan adalah 38.6 % berasal dari calcine dan reaksi pembakaran, dan 61.4% dari energi listrik. Sedangkan distribusi dari panas output adalah 3% panas pada produk matte, 66.6% panas pada slag, 8.8% pada off gas, 9.9% pada dissociation dan proses reduksi, dan 4.6% menjadi rugi-rugi panas. Dengan distribusi input panas dan output panas tersebut, maka efisiensi proses peleburan electric furnace 4 adalah sekitar 87.1%

Persentase kandungan panas buang pada off gas adalah sekitar 8.8% atau sekitar 10.15 MW to 11.01 MW. Besarnya kandungan panas pada off gas ini dipengaruhi oleh temperature off gas dan laju udara luar yang dimasukkan untuk membantu proses peleburan. Semakin tinggi laju udara luar yang digunakan untuk proses peleburan maka akan semakin rendah temperature off gas dan sebaliknya.

Udara luar diperlukan untuk menjaga temperature dari freeboard, dimana jika laju udara luar rendah, maka temperature freeboard akan tinggi dan secara proses temperature freeboard yang semakin tinggi akan mempengaruhi structural dari tungku peleburan (atap tungku) dan akan meningkatkan rugi-rugi panas dari tungku peleburan. Tingginya temperature pada area freeboard juga akan memungkinkan radiasi terhadap proses peleburan. Sehingga disamping mengontrol jumlah udara luar yang masuk, juga sangat penting untuk mengontrol temperature udara di freeboard untuk memaksimalkan proses pembakaran (oksidasi) komponen debu, CO, dan sulfur yang masih tersisa dari proses peleburan.

Disamping temperature freeboard, besarnya sensible heat pada off gas juga dipengaruhi oleh temperature calcine pada saat masuk ke proses peleburan, laju masuk calcine ke proses peleburan, dan besarnya energy listrik yang digunakan untuk proses peleburan. Namun perlu juga diperhatikan, jika temperature input calcine lebih tinggi, maka akan dibutuhkan fuel yang lebih banyak pada proses sebelumnya (reduksi kiln), sehingga saat penting untuk beroperasi pada parameter optimum antara furnace dan reduksi kiln.

Pemanfaatan panas buang dari Tungku peleburan no 4 akan dapat menghasilkan uap jenuh pada tekanan 10Bar dan temperature 180 °C dengan kapasitas 13.7 sampai 14.9 ton per jam, tergantung dari power input laju input calcine ke tungku peleburan.

Unutuk memanfaatkan panas buang dari tungku peleburan ini adalah dengan menggunakan waste heat boiler. Waste heat boiler akan didesign dan disupply oleh vendor berdasarkan detail kebutuhan PTVI. Berdasarkan spesifikasi teknikal yang sudah dikembangkan, maka type WHRB yang akan digunakan adalah type WHRB dengan design konfigurasi horizontal, dimana type ini lebih umum pada aplikasi tungku peleburan dikarenakan karakteristik debu yang sticky, sehingga dengan pengaplikasian type ini akan memudahkan untuk proses pembersihan. Type pembersihan yang akan digunakan adalah dengan menggunakan type rapper, dimana type ini memiliki keuntungan yang lebih dibandingkan mekanisme lain seperti soot blower sistem. Type rapper akan lebih mudah membersihkan pada WHRB konfigurasi horizontal, operating cost lebih rendah dan tidak ada kehilangan steam, beroperasi secara continue sehingga tidak

kecil kemungkinan debu akan menumpuk, pengontrolan pembersihan lebih mudah dengan setting kecepatan rapper. Kekurangan dari sistem ini adalah akan membutuhkan penggantian rapper lebih sering, tetapi penggantian rapper relative lebih mudah dan rapper tidak menyebabkan keausan pada tube konveksi.

Disamping isu debu, hal lain yang harus diperhatikan pada pemasangan waste heat boiler adalah design dan pemasangan expansion joint pada sambungan transisi, korosi yang diakibatkan oleh kebocoran, dan bagaimana menjangkau WHRB pada saat kondisi panas.

Kualitas air yang tinggi akan sangat penting untuk menjaga keberlangsungan proses menghasilkan steam, dikarenakan laju, tekanan, dan kualitas dari de-mineralized akan menjamin korosi, kesetimbangan panas, dan ketersediaan peralatan lebih terprediksi.

Kapasitas dari uap jenuh yang dihasilkan oleh WHRB tersebut akan dapat mensupply sekitar 70-75% dari kebutuhan total uap jenuh untuk proses peleburan di PT Vale Indonesia. Sehingga untuk memenuhi kebutuhan, maka eksisting Fuel Boiler akan tetap beroperasi dengan kapasitas yang lebih kecil untuk memenuhi 25 – 30 % dari total kebutuhan uap jenuh.

5.2 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini, pemanfaatan panas buang dari tungku peleburan no 4 PT Vale Indonesia dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Parameter operasi untuk proses peleburan di PT Vale Indonesia adalah sebagai berikut:

Jam Operasi /day	: 22.36 jam
Kapasitas produksi	: 137.3 TPH Calcine
Power Operasi	: 62.35 MW
Persentasi Karbon	: 1.97 %
LOI (% xH ₂ O)	: 1.1 %
Laju aliran off gas	: 133999 (ACFM), 1008 (Nm ³ /min)
Temperature off gas	: 664 °C
Freeboard Temperature	: 1000 °C

- Total rugi-rugi panas pada proses peleburan adalah sekitar 4941.1 KW, dengan distribusi sebagai berikut:

Rugi-rugi panas pada roof (atap)	: 1724 KW
Rugi-rugi panas pada sidewall	: 2424 KW
Rugi-rugi panas pada bottom	: 292.5 KW
Rugi-rugi listrik	: 500 KW

- Dengan perhitungan mass dan heat balance untuk proses peleburan, maka energy input dan energy output untuk proses peleburan tungku no 4 adalah sebagai berikut:

Energi Input:

Energi dari power listrik	: 67.4 MW
Energi dari panas calcine	: 25.58 MW
Energi dari radiasi freeboard	: 1.2 MW

Energi Output:

Bottom Losses	: 0.292 MW
Electrical Losses	: 0.5 MW
Sidewall Losses	: 0.2424 MW
Roof Losses	: 1.72 MW
Reduction Heat	: 17.4 MW
Dissociation Heat	: 1.66 MW
Debu	: 0.02 MW
Panas pada matte	: 3.17 MW
Panas pada slag	: 71.56 MW
Furnace off gas	: 10.58 MW

- Dari hasil perhitungan heat dan mass balance tersebut, maka diperoleh potensial sensible heat dari panas buang off gas yaitu sekitar 10.58 MW, dan jika digunakan untuk menghasilkan uap maka akan menghasilkan sekitar 1.3 Ton/jam/MW atau sekitar 14.3 ton per jam uap jenuh.
- Untuk menghasilkan saturated steam adalah dengan menggunakan waste heat boiler, dimana waste heat boiler akan di order dari vendor WHRB berdasarkan requirement PTVI. Vendor harus mengirimkan spesifikasi

dari WHRB yang ditawarkan sesuai dengan dengan form spesifikasi teknis (terlampir)

- Tinjauan ekonomis dari pemanfaatan panas buang dari tungku peleburan ini adalah sebagai berikut:

Biaya Investasi (Capital Investment)	: \$ 7,712,380
Biaya operasi (Operating cost)	: \$ 66,028.35 / Tahun
Heat Recovery Saving	: \$ 2,445,457 / Tahun
Net Present Value (NVP)	: \$ 14,122,841
Internal Rate of Return	: 19%
Pengembalian modal investasi (ROI)	: 4.78 Tahun

5.3 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

- Peningkatan Quality panas buang dari furnace dapat dilakukan dengan mengurangi rugi-rugi dari proses peleburan.
- Untuk memenuhi 100% kebutuhan uap jenuh dari proses plant dapat dilakukan dengan memanfaatkan panas buang dari EF#4 dan EF#3 dengan pemasangan single WHRB yaitu dengan cara mengganti WHRB dengan kapasitas yang lebih besar ataupun pemasangan series dengan memperhitungkan tingkat keefisienan dalam pemasangan.
- Selain untuk menghasilkan uap jenuh, pada penelitian selanjutnya, panas buang dapat digunakan untuk menghasilkan listrik dengan menggunakan siklus rankine dan atau pre-heat di proses pengeringan dryer dan proses reduksi kiln.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahmad. SyedAmjad, Ehsa. Saqib, Usman Babar. Muhammad, Hussainb. SyedHasnain, (2012) "Waste Heat Recovery From Furnace Flue Gases using waste Heat Recovery Boiler", *NFC-IEFR Journal of Engineering &Scientific Research*.
- [2] Bureau of Energy Efficiency, "Classification, Advantages and applications, Commercially viable waste heat recovery devices, Saving potential", *Waste Heat Recovery*, Chapter 8.
- [3] www.energyefficiencyasia.org, (2006), "Energy Efficiency Guide for Industry in Asia", *Copyright © United Nations Environment Programme*.
- [4] Fives, Waste heat recovery,(2016), "Technologically and economically viable solutions for industrial businesses", *A white book on industrial waste heat recovery*.
- [5] Ganapathy.V, (2003), " Design, Application, and Calculation", *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generator*, AMBCO Industries, Abilene, Texas, USA.
- [6] Weerasiri. Udayana Priyadarshana (2014), "A waste heat recovery steam power generation system for ACE Power Embilipitiya (Pvt) Ltd", *Master of Science Thesis*, Sri Lanka.
- [7] Kuhn.Robert, Geck.Hans Gunter, Schwerdtfeger.Klaus, (2005), "Continuous Off Gas Measurement and Energy Balance in Electric Arc Steelmaking", *ISIJ International*, Vol 45, No. 11, pp.1587-1596.
- [8] LOGAR.Vito, Dovzan.Dejan,Skrjanc.Igor,(2012), "Modeling and Validation of an Electric Arc Furnace: Part 1", *Heat and Mass Transfer, ISIJ International*, Vol. 52,No.3, pp.402-412.
- [9] Born. Carsten, Granderath. Ralf, (2013), "Heat recovery from EAF off-gas", *A new benchmark, Steelmaking and Casting*, Millenium Steel.
- [10]. Karbowniczek. M, Kawałkowski. M, (2007), "The Electric Arc Furnaces Off-Gases Modeling Using CFD", *16th IAS Steelmaking Conference*,Rosario, Argentina.

- [11] BCS. Incorporated, (2008), "Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry", *Industrial Technology Program*, US Department Energy.
- [12] Atreya, Arvind, (2007), "A Novel Method of Waste Heat Recovery from High Temperature Furnaces", *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan.
- [13]. Hjartarson.Heimir, Palsson. Halldor, Saevarsdottir. Gudrun, (2010) "Waste Heat Utilization from a Submerged Arc Furnace Production Ferrosilicon", *The Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future*, Finland.
- [14] Thekdi,.Arvind, Nimbalkar.Sachin, Keiser. James, Storey. John, (2014), "Preliminary Results from Electric Arc Furnace Off-Gas Enthalpy Modeling", *US Department of Energy's Advanced Manufacturing office (AMO)*.
- [15] WorleyParson GCT, (2007) ,"PT International Nickel - Hot Commissioning and System Evaluation," *T4628 Off Gas Cleaning Project*, Soroako.
- [16] PT Vale Indonesia, (2013), "Operation Overview," Soroako.
- [17] Gas Cleaning Technologies (GCT), (2013), "Electric Furnace Off-Gas Heat Recovery," *Screening Study Report*, Soroako.
- [18] Gas Cleaning Technologies (GCT), (2004), "PT Inco EF4 Off-Gas Cleaning and Heat Recovery System", *Basic Engineering Report*, Soroako.
- [19] Ganapathy. V, (1992), "Heat Transfer", ABCO Industries Inc, Abilene, Texas.
- [20] Testo, (2004), "Practical Guide for Emission and Process Measurements", *Flue Gas Analysis in Industry*, 0981.2773/hd/R/08
- [21] Huang.Feng, Zheng.Jie, Baleynaud.J.M, Lu.Jun, (2016), "Heat Recovery Potential and Technologies in industrial Zones", Energy Institute.

- [22] Mishra, B. In: K.H.J.B., Robert,W.C., Merton, C.F., Bernard, I., Edward, J.K., Subhash, M.,Patrick, V. (Eds.), (2001)," Cobalt and nickel production", *Encyclopaedia of Materials: Science and Technology, second ed. Elsevier*, Oxford, pp. 1288-1294
- [23] Kumar.Saurav Sahu, (2011), *Design of Waste Heat Recovery System in a Sponge Iron Plant*, Thesis of Bachelor of Technology, National Institute of Technology Rourkela, India.
- [24] Dalvi, A.D, "Processing of Laterite Ores Theory and Overview", PT International Nickel Indonesia, Soroako, South Sulawesi, 1987.
- [25] Dalvi, A.D, "Process Plant Metallurgy Course", PT International Nickel Indonesia, Soroako, South Sulawesi, October 1987.
- [26] Koehler.T, Rodd.L, "PT International Nickel PT Inco Furnace No 2 Rebuilt Study", Hatch, March 2019
- [27] Russel.M, Becht.N, Concha F, "Electrical Furnace 4 Baghouse Conceptual Improvement Study", GCT, July 2015
- [28] International. Davy, "PT International Nickel Indonesia Fourth Line Expansion", Plant Record Manual, Soroako, Indonesia, Book 35 – 41, October 1998.
- [29] Jastrzebski.M, "Furncae Sidewall Configuration and Thermal Design", PT Inco Furnace No.2 Rebuilt Study, Hatch, February 2009.

LAMPIRAN

1. Data Parameter Record Electric Furnace #4 dari tahun 2014 sampai 2017
2. Dasar perhitungan Mass Balance and Heat Balance
3. Technical Data Sheet Waste Heat Recovery Boiler
4. Spreadsheet Perhitungan Financial Evaluation
5. Evaluasi HAZOP
6. Drawing SK-0001 – Process Flow Diagram – Off Gas Cleaning System
7. Drawing SK-0002 – Process Flow Diagram – Waste Heat Boiler
8. Drawing SK-0003 – Piping & Instrumentation Diagram – Waste Heat Boiler
9. Drawing SK-0004 – Mech – Overall System Plan GA
10. Drawing SK-0005 - Mech – Overall System Section A-A
11. Drawing SK-0006 – Mech – WHB and SC Area
12. Drawing SK-0007 - Mech – Overall System Section A-A
13. Drawing SK-0008 - Mech – Overall System Section A-A



FEBRIN SITORUS

Contact:

Cell : 0811-4603-986
Address : PT. Vale Single Housing, Dormitory B23, Pontada, Sorowako
Email : febrin.sitorus@vale.com or febrin_sitorus@yahoo.com

Personal Data

- Place & Date of Birth : Lumban Lobu, February, 14th, 1986
- Religion: Christian
- Marital status: Married

Summary of Specialization

- Project Management.
- Project Engineering.
- Mechanical Engineer.

Working experience

- PT Inti Ganda Perdana (Astra Otoparts Group) – Production Supervisor (Dec 2008 – Nov 2011)
- PT Vale Indonesia - Mechanical Design Engineer (Nov 2011 – July 2017)
- PT Vale Indonesia – Project Engineer (July 2017 – now)

Professional Certification

- Professional Engineer – IPM (Indonesia Engineer Association)
- Pengawas Operasional Madya (POM)

