

**SKRIPSI – CE1M146**

ANALISIS ENERGI DAN EKSERGI PADA SISTEM ROTARY KILN RKC-2

PT. SEMEN GRESIK PABRIK TUBAN

**Oleh :**

**MUHAMMAD SALMAN ALFARISI**

**NIM :2031610032**

**NURMALINDA TOYYIBA**

**NIM :2031610034**

**DOSEN PEMBIMBING**

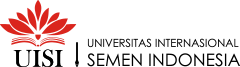
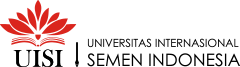
**OKKY PUTRI PRASTUTI, S.T., M.T.**

**MALA HAYATI NASUTION, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA**

**UNIVERSITAS INTERNASIONAL SEMEN INDONESIA**

**TAHUN 2020**



**SKRIPSI – CE1M146**

**ANALISIS ENERGI DAN EKSERGI PADA SISTEM ROTARY KILN RKC-2 PT. SEMEN GRESIK PABRIK TUBAN**

**Oleh :**

**MUHAMMAD SALMAN AL FARISI**

**NIM : 2031610032**

**NURMALINDA TOYYIBA**

**NIM : 2031610034**

**DOSEN PEMBIMBING**

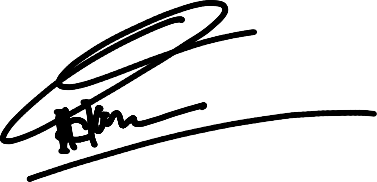
**OKKY PUTRI PRASTUTI, S.T., M.T.**

**MALA HAYATI NASUTION, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA**

**UNIVERSITAS INTERNASIONAL SEMEN INDONESIA**

**TAHUN 2020**



# 

# HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Internasional Semen Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : 1. Muhammad Salman Al Farisi

2. NurmalindaToyyiba

NIM : 1. 2031610032

2. 2031610034

Departemen : Teknik Kimia

Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Internasional Semen Indonesia **Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty- Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**“Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln RKC-2 PT. Semen Gresik PabrikTuban”**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Universitas Internasional Semen Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Gresik

Pada tanggal : 14 Agustus 2020

Yang Menyatakan,

|  |  |
| --- | --- |
| Penulis 1 | Penulis 2 |
| Dok_baru_2020-08-06_18.59.08_8-removebg-preview.png | Dok_baru_2020-08-06_18.59.08_7-removebg-preview.png |
| (Muhammad Salman Al Farisi) | (NurmalindaToyyiba) |

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.



Nama :Muhammad Salman Al Farisi

NIM :2031610032

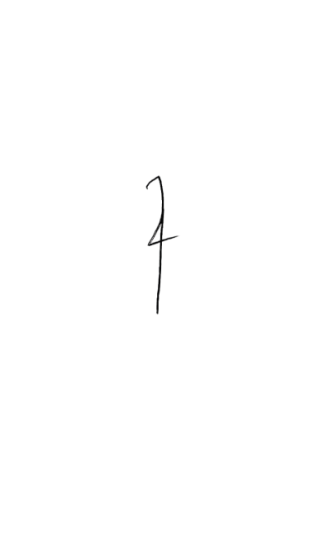
Tanda Tangan :



Nama :Nurmalinda Toyyiba

NIM :2031610034

Tanda Tangan :



Tanggal : 14 Agustus 2020

**ANALISIS ENERGIDAN EKSERGI PADA SISTEM ROTARY KILN RKC-2 PT. SEMEN GRESIK PABRIK TUBAN**

Nama : 1. Muhammad Salman Al Farisi

2. NurmalindaToyyiba

NIM : 1. 2031610032

2. 2031610034

Pembimbing : 1. Okky Putri Prastuti, S.T., M.T.

2. Mala HayatiNasution, S.T., M.T.

# ABSTRAK

Industri semen merupakan salah satu industri yang bersifat *energy intensive* karena penggunaan energi berada pada jumlah yang besar. Biaya yang digunakan untuk konsumsi energi pada sebuah pabrik semen sekitar 20-30% dari total biaya produksi semen (UNIDO,1994). Pada proses produksi semen, tahap *raw mill preparation* dan *clinker production* merupakan tahapan yang memerlukan energi paling besar. Konservasi energi pada sistem *rotary kiln* berpengaruh terhadap optimasi biaya produksi. Salah satu metode identifikasi pada konservasi energi adalah melalui analisis energi dan eksergi. Pada analisis tersebut dilakukan identifikasi kehilangan energi dan eksergi berdasarkan perhitungan neraca massa, energi, entalpi, entropi dan eksergi. Berdasarkanan analisis diperoleh nilai efisiensi energi lebih besar daripada efisiensi eksergi. Efisiensi energi dan eksergi pada sistem *rotary kiln* masing-masing adalah 79,40%dan 57,10%. Efisiensi energi dan eksergi pada unit *rotary kiln* masing-masing adalah 64,93% dan 50,48%. Nilai efisiensi eksergi pada sistem *rotary kiln* lebih besar daripada unit *rotary kiln* karena terdapat pemanfaatan energi pada *outlet suspension preheater* dan *cooler*. Efisiensi energi dan eksergi paling besar terjadi pada laju alir massa klinker maksimum dan laju alir massa batubara minimum. Irreversibilitas unit dan sistem *rotary kiln* RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban masing-masing adalah 49,52% dan 42,9%.

**Kata Kunci :** *Energi, Eksergi, Rotary Kiln*

**ENERGY AND EXERGY ANALYSIS ON THE ROTARY KILNRKC-2 PT.SEMEN GRESIK, TUBAN PLANT**

Name : 1. Muhammad Salman Al Farisi

2. NurmalindaToyyiba

Identity Number :1. 2031610032

2. 2031610034

Advisor : 1. Okky Putri Prastuti, S.T., M.T.

2. Mala Hayati Nasution, S.T., M.T.

# ABSTRACT

*The cement industry is one industry that is energy intensive because energy use is at a large amount. The cost used for energy consumption in a cement plant is around 20-30% of the total cement productioncost (UNIDO, 1994). In the cement production process, the raw mill preparation and clinker production stages are the stages that require the most energy. Energy conservation in the rotary kiln systemaffects the optimization of productioncosts. One of the identification methods in energy conservation is through energy analysis and exergy. In thisanalysis, energy losses and exergy are identifiedbased on the calculation of the massbalance, energy, enthalpy, entropy and exergy. Based on the analysis, the energy efficiency value is greaterthan the exergy efficiency. The energy efficiency and exergy in the rotary kiln system were 79.40% and 57.10%, respectively. Energy efficiency and exergy in the rotary kiln unit were 64.93% and 50,48%, respectively. The value of exergy efficiency in rotary kiln systems is greater than that of rotary kiln units because there is energy utilization at the outlet of the suspension preheater and cooler. The greatest energy efficiency and exergy occured at the maximum clinker mass flowrate and the minimum coal mass flowrate. Irreversibility of the RKC-2 rotary kiln unit and system of PT. Semen Gresik Tuban Factory were 49.52% and 42.9% respectively.*

**Keywords :** *Energy, Eksergy, Rotary Kiln*

# KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan Skripsi yang berjudul “Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Kiln Rotary Kiln RKC-2 PT Semen Gresik PabrikTuban”. Laporan ini dibuat sebagai prasyarat kelulusan di Program Sarjana Departemen Teknik Kimia, Universitas Internasional Semen Indonesia (UISI).

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu penyusunan laporan ini yaitu :

1. Ibu Mala HayatiNasution, S.T,. M.T.dan ibu Okky Putri Prastuti, S.T., M.T. sebagai dosen pembimbing atas segala bimbingan, arahan, saran dan ide.
2. Bapak Fandi Angga Prasetya, S.Si., M.Si. selaku koordinator Tugas Akhir dan Skripsi Departemen Teknik Kimia UISI.
3. Dosen pengajar Departemen Departemen Teknik Kimia, Universitas Internasional Semen Indonesia (UISI) atas segala bantuan.
4. Orang tua dan keluarga atas segala dukungan, perhatian dan doa.

Penulis senantiasa mengharapkan masukan, saran dan kritik demi peningkatan kualitas laporan. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan terutama dalam bidang Teknik Kimia di Indonesia.

Gresik, Agustus 2020

Penulis

# DAFTAR ISI

[HALAMAN JUDUL i](#_Toc27745765)

[LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI ii](#_Toc27745765)

[HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN iii](#_Toc27745765)

[HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS iv](#_Toc27745765)

[ABSTRAK v](#_Toc27745766)

[ABSTRACT vi](#_Toc27745767)i

[KATA PENGANTAR vii](#_Toc27745768)ii

[DAFTAR ISI viii](#_Toc27745769)

[DAFTAR TABEL xi](#_Toc27745770)

[DAFTAR GAMBAR xii](#_Toc27745771)ii

[BAB 1 PENDAHULUAN 1](#_Toc27745772)

[1.1 Latar belakang 1](#_Toc27745773)

[1.2 Rumusan Masalah 3](#_Toc27745774)

[1.3 Tujuan Penelitian 3](#_Toc27745775)

[1.4 Ruang Lingkup 3](#_Toc27745776)

[BAB 2 KAJIAN PUSTAKA 5](#_Toc27745777)

[2.1 Proses Produksi Semen 5](#_Toc27745778)

[2.1.1 Penyediaan Bahan Baku 5](#_Toc27745779)

[2.1.2 Penggilingan Bahan Baku 6](#_Toc27745780)

[2.1.3 *Raw Mill* 7](#_Toc27745781)

[2.1.3.1 *Shell* dan bagian-bagiannya 9](#_Toc27745782)

[2.1.3.2 *Table* 10](#_Toc27745783)

[2.1.3.3 *Roller* 10](#_Toc27745784)

[2.1.3.4 *Arm* (lengan) 10](#_Toc27745785)

[2.1.3.5 *Mill Reducer* 11](#_Toc27745786)

[2.1.3.6 *Roller-Pressing System* (Sistem Tekanan Roller) 11](#_Toc27745787)

[2.1.3.7 Sistem penyemprotan (*Water-Spraying System*) 11](#_Toc27745788)

[2.1.4 Pembakaran 11](#_Toc27745789)

[2.1.5 Penggilingan Akhir 17](#_Toc27745790)

[2.1.6 Pengemasan 18](#_Toc27745791)

[2.1.7*Coal Mill* 19](#_Toc27745792)

[2.2 Energi 19](#_Toc27745793)

[2.2.1 Konduksi 19](#_Toc27745794)

[2.2.2 Konveksi 20](#_Toc27745795)

[2.2.3 Radiasi 21](#_Toc27745796)

[2.3 Eksergi 22](#_Toc27745797)

[2.3.1 Eksergi Fisik 23](#_Toc27745798)

[2.3.2 Eksergi Kimia 23](#_Toc27745799)

[2.4 Penelitian Terdahulu 22](#_Toc27745797)

[BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 26](#_Toc27745800)

[3.1.Variabel Penelitian 27](#_Toc27745801)

[3.2 Dasar Penyusunan Neraca Massa dan Energi 2](#_Toc27745802)7

[3.3 Analisi Alat 29](#_Toc27745803)

[3.4 Dasar Penyusunan Neraca Massa dan Energi 29](#_Toc27745803)

[3.5 Perhitungan Neraca Massa 29](#_Toc27745803)

[3.5.1 Penentuan Massa sisa CaCO3 dan MgCO3 30](#_Toc27745804)

[3.5.2 Penentuan Massa Udara Pembakaran 31](#_Toc27745805)

[3.5.3Penentuan Massa Klinker 33](#_Toc27745806)

[3.6 Perhitungan Neraca Energi 34](#_Toc27745807)

[3.6.1 Perhitungan Energi Panas Batubara 35](#_Toc27745808)

[3.6.2 Perhitungan Panas Sensibel Batubara 35](#_Toc27745809)

[3.6.3 Perhitungan Panas *Kiln Feed* 36](#_Toc27745810)

[3.6.4 Perhitungan Panas dari CaO 36](#_Toc27745811)

[3.6.5 Perhitungan Panas dari MgO 36](#_Toc27745812)

[3.6.6 Perhitungan Panas Udara Pembakaran 37](#_Toc27745813)

[3.6.7 Perhitungan Panas dari Klinker 37](#_Toc27745814)

[3.6.8 Perhitungan Panas dariGas Buang Kiln 37](#_Toc27745815)

[3.6.9 Perhitungan *Losses* Dinding *Kiln Shell* 38](#_Toc27745816)

[3.7 Perhitungan Neraca Eksergi 39](#_Toc27745817)

[3.7.1 Eksergi Fisik 39](#_Toc27745818)

[3.7.2 Eksergi Kimia 40](#_Toc27745819)

[3.8 Analisis Energi dan Eksergi 40](#_Toc27745820)

[BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 43](#_Toc27745800)

[4.1.Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban 43](#_Toc27745801)

[4.1.1 Data Lapangan 43](#_Toc27745804)

[4.1.2 Hasil Analisis Energi Pada Sistem Rotary Kiln 43](#_Toc27745804)

[4.1.3 Pengaruh Laju Alir Massa Klinker Terhadap Efisiensi Energi 50](#_Toc27745804)

[4.1.4 Pengaruh Laju Alir Batubara Terhadap Efisiensi Energi 51](#_Toc27745804)

[4.1.5 Hasil Analisis Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln 53](#_Toc27745804)

[4.1.6Pengaruh Laju Alir Massa Klinker Terhadap Efisiensi Eksergi 60](#_Toc27745804)

[4.1.7 Pengaruh Laju Alir Batubara Terhadap Efisiensi Eksergi 60](#_Toc27745804)

[4.2.Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln RKC-4 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban 62](#_Toc27745801)

[4.3.Perbandingan Analisis Energi da Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln RKC-2 dan RKC-4 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban 66](#_Toc27745801)

[4.4.Perbandingan Sistem Rotary Kiln RKC-2, RKC-4 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban Dengan Pabrik Tuban Lainnya 69](#_Toc27745801)

[BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN 71](#_Toc27745800)

[DAFTAR PUSTAKA 72](#_Toc27745800)

LAMPIRAN

**DAFTARTABEL**

[**Tabel 2. 1** Profil Suhu Material dan Gas Dalam Kiln 13](#_Toc27697019)

[**Tabel 2.2** Penelitian Terdahulu 25](#_Toc27697020)

[**Tabel 3.1** Variabel Penelitian 27](#_Toc27697021)

[**Tabel 3.2** Komposisi Batubara 32](#_Toc27697021)

[**Tabel 3.3** Komposisi Klinker 33](#_Toc27697021)

[**Tabel 3.4** Komposisi Mineral *Compound Clinker* 34](#_Toc27697021)

[**Tabel 4.1** Neraca Energi Panas Pada *Suspension Preheater* 44](#_Toc27697022)

[**Tabel 4.2** Neraca Energi Panas Pada *Rotary Kiln* 46](#_Toc27697022)

[**Tabel 4.3** Neraca Energi Panas Pada *Cooler* 49](#_Toc27697022)

[**Tabel 4.4** Neraca Eksergi Total Pada *Suspension Preheater* 54](#_Toc27697022)

[**Tabel 4.5** Neraca Eksergi Total Pada *Rotary Kiln* 56](#_Toc27697022)

[**Tabel 4.6** Neraca Eksergi Total Pada *Cooler* 58](#_Toc27697022)

[**Tabel 4.7** Neraca Massa, Energi dan Eksergi Total Pada *Suspension Preheater* 63](#_Toc27697022)

[**Tabel 4.8** Neraca Massa, Energi dan Eksergi Total Pada *Rotary Kiln* 64](#_Toc27697022)

[**Tabel 4.9** Neraca Massa, Energi dan Eksergi Total Pada *Cooler* 65](#_Toc27697022)

[**Tabel 4.10** Perbandingan Efisiensi Energi dan Eksergi pada RKC2 dan RKC4 67](#_Toc27697022)

[**Tabel 4.11** Perbandingan Efisiensi Energi dan Eksergi pada RKC2, RKC4 dan Pabrik Semen Malabar 68](#_Toc27697022)

**DAFTAR GAMBAR**

[**Gambar 2.1** Tahapan Proses Produksi Semen 6](#_Toc27731895)

[**Gambar 2.2** Bagian-Bagian *Raw Mill* 8](#_Toc27731896)

[**Gambar 2.3** *Preheater Tower* 13](#_Toc27731897)

[**Gambar 2.4** Ilustrasi Perpindahan Panas Secara Konduksi. 20](#_Toc27731898)

[**Gambar 2.5** Ilustrasi Perpindahan Panas Secara Konveksi 21](#_Toc27731899)

[**Gambar 2.6** Ilustrasi perpindahan panas secara Radiasi 22](#_Toc27731900)

[**Gambar 3.1** Sistem *Rotary Kiln* 28](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.1** Blok Diagram Neraca Energi *Suspension Preheater* 45](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.2** Diagram Sankey Aliran Energi Pada *Suspension Preheater* 45](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.3** Blok Diagram Neraca Energi *Rotary Kiln* 47](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.4** Diagram Sankey Aliran Energi Pada *Rotary Kiln* 48](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.5** Blok Diagram Neraca Energi *Cooler* 49](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.6** Diagram Sankey Aliran Energi Pada *Cooler* 50](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.7** Kurva Hubungan Laju Alir Massa Produk Klinker dan Efisiensi Energi 51](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.8** Kurva Hubungan Laju Alir Batubara dan Efisiensi Energi Unit 52](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.9** Kurva Hubungan Laju Alir Batubara dan Efisiensi Energi Sistem 52](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.10** Blok Diagram Neraca Eksergi *Suspension Preheater* 55](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.11** Diagram Sankey Aliran Eksergi Pada *Suspension Preheater* 5](#_Toc27731897)5

[**Gambar 4.12** Blok Diagram Neraca Eksergi *Rotary Kiln* 57](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.13** Diagram Sankey Aliran Eksergi Pada *Rotary Kiln* 5](#_Toc27731897)7

[**Gambar 4.14** Blok Diagram Neraca Eksergi *Cooler* 59](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.15** Diagram Sankey Aliran Eksergi Pada *Cooler* 59](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.16** Kurva Hubungan Antara Laju Massa Klinker dan Eksergi 60](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.17** Kurva Hubungan Antara Laju Batubara dan Eksergi Unit 61](#_Toc27731897)

[**Gambar 4.18** Kurva Hubungan Antara Laju Batubara dan Eksergi Sistem 61](#_Toc27731897)

# BAB 1

PENDAHULUAN

## Latar belakang

Industri semen merupakan salah satu industri yang bersifat *energy intensive*, karena menyerap energi dalam jumlah yang besar. Biaya yang digunakan untuk konsumsi energi pada sebuah pabrik semen sekitar 20-30% dari total biaya produksi semen (UNIDO, 1994). Produksi semen dilakukandengan melalui 6 tahapan, yaitu : (i)raw material extraction; (ii)raw material preparation; (iii)raw mill preparation; (iv)clinker production; (v)cement grinding; dan (vi)packing. Berdasarkan keenam tahapan tersebut, raw mill preparationdan clinker productionmerupakantahapan yang memerlukan energi paling besar.

Penelitian yang dilakukan terhadap beberapa pabrik semen di Jepang pada tahun 1992 menunjukkan penggunaan energi untuk proses pembakaran klinker mencapai 91,90% dari total penggunaan energi pada sebuah pabrik semen, sisanya yaitu 7,6% untuk tenaga listrik dan 0,5% digunakan sebagai pengering bahan bakar dan batubara (UNIDO, 1994).

*Raw Mill* merupakan peralatan yang diguanakan untuk menggiling dan mengeringkan bahan mentah semen. Material yang digiling dengan mesin *Raw Grinding Mill* ini yaitu *limestone*, *clay*, *silica sand* dan *iron sand*. Mesin ini bekerja selama 24 jam sehari secara terus menerus. *Roller mill* secara umum tersusun dari *shell*, kerangka utama, *stand*, *table*, *roller arm*, *gearreducer*, *roller-pressing* unit dan separator.

*Rotary kiln* adalah sebuah silinder panjang berputar pada porosnya. Fungsi utama *rotary kiln* adalah sebagai tempat terjadinya kontak antar gas panas dan material umpan *kiln* sehingga terbentuk senyawa-senyawa penyusun semen yaitu C3S, C2S, C3A dan C4AF. *Rotary kiln* merupakan silinder dengan kemiringan horizontal 3 - 4% dan berputar 1 - 4 putaran/menit. Material masuk melalui ujung atas dan kemudian turun karena kemiringan *rotary kiln*. Aliran material berlawanan dengan aliran gas panas yang berasal dari ujung bawah.

Pada *rotary kiln* terjadi reaksi kalsinasi pada temperatur 900 – 1400 °C. Oleh karena itu, bagian dalam *rotary kiln* dilapisi batu tahan api untuk melindungi *kiln*. Batu tahan api harus bersifat tahan terhadap temperatur tinggi, tahan terhadap perubahan temperatur mendadak (Peray dan Waddell, 1972).

Energi untuk mencapai temperatur pada kiln diperoleh dari pembakaran batubara di *coal mill. Fungsi coal mill* adalah untuk menghancurkan batu bara dengan bantuan *grinding media* dan putaran *mill* sampai mencapai kehalusan tertentu.*Rotary kiln* juga dilengkapi dengan *suspension preheater*. *Suspension preheater*adalah suatu susunan empat *stagecyclone* dan satu buah *calciner* yang tersusun menjadi satu *string*. Fungsi *preheater*adalah pemanasan awal *raw mill* dan tempat terjadinya proses penghilangan kadar air bebas hingga kalsinasi. Sistem *preheater* dipasang di dalam menara yang terbuat dari baja atau beton. Alat ini merupakan alat yang digunakan untuk pemanasan awal bahan baku sebelum masuk *rotary kiln*. Pemanasan *raw mill* terjadi pada *preheater* melalui beberapa *stage cyclone* dan pemanas yang digunakan adalah gas hasil pembakaran dari *kiln*.

Konsumsi energi pada pabrik semen cukup tinggi sehingga dapat terjadi kehilangan energi yang besar. Oleh karena itu diperlukan upaya untuk dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada pabrik semen. Proses pembakaran clinker pada produksi semen memerlukan pengelolaan energi yang baik agar biaya produksi optimal.

Berbagai upaya dilakukan untuk menghadapi masalahkrisis energi karena keterbatasan sumber energi yang disediakan oleh alam (Engin, 2002). Untuk menghadapi masalah krisis energi diperlukan adanya peningkatan efisiensi penggunaan energi pada industri melalui pengembangan *energy alternative* dan peningkatan efisiensi penggunaan energi sehingga konsumsi energi dapat dikurangi.Konservasi energi pada sistem *rotary kiln* berpengaruh terhadap optimasi biaya produksi. Salah satu metode identifikasi pada konservasi energi adalah melalui analisis energi dan eksergi. Pada analisis tersebut dilakukan identifikasi kehilangan energi dan eksergi berdasarkan perhitungan neraca massa, energi, entalpi, entropi dan eksergi. Selain itu, analisis ireversibilitas juga dapat dilakukan untuk mengetahui *ireversibilitas* suatu proses.

## Rumusan Masalah

Beberapa hal yang menjadi rumusan masalah pada penelitian “Analisis Energi dan Eksergi Pada SistemRotary Kiln RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban” diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana neraca massa sistem kiln *Rotary Kiln*RKC-2 Semen Gresik Pabrik Tuban?
2. Bagaimana neraca energi, entalpi, entropi dan eksergi pada sistem kiln *Rotary Kiln* RKC-2 Semen Gresik Pabrik Tuban?
3. Berapa nilai efisiensi energi dan eksergi sistem?
4. Berapa nilai *ireversibilitas* sistem?

## TujuanPenelitian

Tujuan dari penelitian “Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Kiln Rotary Kiln RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban” adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui neraca massasistem kiln *Rotary Kiln* RKC-2 Semen Gresik Pabrik Tuban.
2. Melakukan analisis neraca energi, entalpi, entropi dan eksergi sistem *Rotary Kiln* RKC-2 Semen Gresik Pabrik Tuban.
3. Memperoleh nilai efisiensi energi dan eksergi sistem.
4. Memperoleh nilai *ireversibilitas* sistem.

## Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian “Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Kiln Rotary Kiln RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban” adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini dilakukan berdasarkan data sistem *Rotary Kiln* RKC-2PT. Semen Gresik Pabrik Tuban.
2. Penyusunan, neraca energi, neraca entalpi, neraca entropi, dan neraca eksergi dilakukan berdasarkan data neraca massa dan kondisi operasidari data laporan skripsi pada tahun 2019.
3. Perhitungan efisiensi energi dan eksergi pada sistem*Rotary Klin* RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban.
4. Analisis *ireversibilitas* pada sistem *Rotary Klin* RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban.
5. Analisis pengaruh laju alir massa klinker dan batubara terhadap efisiensi energi dan eksergi.

# BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

## Proses Produksi Semen

Bahan baku utama pada proses produksisemen adalah batu kapur (CaCO3), tanah liat dan bahan koreksi diantara lainnya yaitu *copper slag*, pasir silika (SiO2), dan bahan tambahan pembuatan semen adalah *gypsum* (CaSO4.2H2O), *Trass* (2CaO.SiO2), *Fly Ash*, *Dust*, GBFS (*Granular Blast Furnace Slag*). Pada proses produksi semen terdapat beberapa tahapan proses yaitu penyediaan bahan baku, penggilingan bahan mentah, pembakaran, penggilingan akhir dan pengemasan. Tahapan proses produksi semen disampaikan pada Gambar 2.1.

## 2.1.1 Penyediaan Bahan Baku

Bahan baku utama yang digunakan dalam proses pembuatan semen adalah batu kapur dan tanah liat. Bahan baku tersebut diperoleh dari proses penambangan. Tahapan proses penambangan adalah sebagai berikut :

1. Pengupasan tahan penutup (*stripping*)
2. Pemboran dan peledakan (*drilling and blasting*)
3. Penggalian / Pemuatan (*digging / loading*)
4. Pengangkutan (*hauling*)
5. Pemecahan (*crushing*)

Penggilingan Bahan Mentah

(Raw Mill)

Copper Slag

Pasir Silika

Preheating

(Suspension Preheater)

Pendinginan

(Cooler)

Penyediaan Bahan Mentah (Crusher dan Clay Cutter)

Pendinginan Akhir

(Finish Mill)

Pembakaran

(Rotary Kiln)

Tanah Liat

Batu Kapur

Pengemasan

Gypsum

Aditif

**Gambar 2.1** Tahapan Proses Produksi Semen

## 2.1.2 Penggilingan Bahan Baku

Unit pengolahan ini bertugas melakukan penggilingan bahan-bahan mentah *(raw material grinding*) dengan komposisi yang sesuai dengan spesifikasi umpan tanur (*kiln feed*). Unit pengolahan dibagi menjadi : *Raw Material, Reclaiming* dan *Raw Material Grinding.*

*Raw material reclaiming* merupakan sub unit yang berfungsi mengambil kembali (menggaruk) batu kapur dan tanah liat dengan menggunakan *reclaimer* masing-masing secara vertikal. Melalui metode seperti ini, maka batu kapur dan tanah liat menjadi lebih homogen. Hasil pengambilan *reclaimer* tersebut akan dibawa oleh *belt conveyor* untuk masing-masing dimasukkan kedalam *limestone bin* dan *clay bin*. Pasir silika dan pasir besi dari *silica sand* dan *iron sand storage* akan dibawa oleh *dump truck* menuju ke *hopper* secara bergantian. Pengeluaran pasir silika dan pasir besi diatur oleh *apron feeder.* Material tersebut kemudian akan dibawa *belt conveyor* menuju bin pasir silika dan bin pasir besi.

Pengeluaran semua *raw material* dari bin masing-masing diatur secara proporsional dengan menggunakan *apron wigh feeder*. Keempat material tersebut kemudian diumpankan ke *raw mill* menggunakan *belt conveyor.* Batu kapur, tanah liat, pasir silika dan pasir besi dengan proporsi tertentu, sesuai ketentuan dari pengendali proses, diumpankan ke dalam *raw mill.*

## 2.1.3 Raw Mill

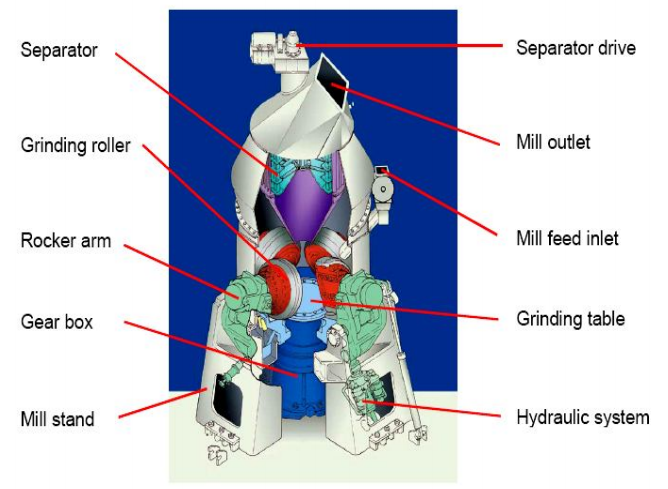
*RawMill* merupakan peralatan untuk menggiling dan mengeringkan bahan mentah semen.Material yang digiling dengan mesin *Raw Grinding Mill* ini yaitu *limestone*, *clay*, *silika sand* dan *iron sand*. Di dalam*raw mill* material-material tersebut dikeringkan dan digiling untuk memperoleh komposisi *raw mill* yang sesuai dengan standar umpan *kiln*. Ukuran material yang dikecilkan ( kecuali *iron sand* ) dari ukuran panjang 5 – 7 cm menjadi partikel debu sampai dengan 0 – 9 mikron serta mengurangi kelembaban dari material tersebut dengan cara dikeringkan. Seluruh transportasi *raw material* tersebut diatas dilakukan dengan *belt conveyor* dan dimasukkan kedalam *raw mill,* jenis *vertical roller mill,* melalui *triple gate.* Di dalam *raw mill* material akan mengalami *size reduction* dan pengeringan. Untuk pengeringan raw material yang digiling di dalam *raw mill* sistem menggunakan sisa udara panas dari *preheater* dan *clinker cooler.* Selain itu *raw mill* sistem dilengkapi pula dengan *hot air generator,* yang akan digunakan bila udara panas dari *preheater* dan *clinker cooler* tidak mencukupi atau kondisi kiln dalam keadaan *down* (tidak beroperasi) (Setiyana, 2007).

Produk *raw mill* dengan kehalusan 90% lolos ayakan 90 mikron dan kadar air maksimal 1% akan dibawa aliran udara kedalam *cyclone*, karena tarikan *mill fan*. Sekitar 93% dari material akan terpisahkan dari aliran gas. Sisa material yang lebih halus sekitar 7% akan keluar terbawa aliran gas keluar dari *cyclone*. Sisa produk akan ditangkap oleh *electrostatic precipitator* (EP). Gas yang telah bersih akan dibuang keudara bebas melalui *stack* (cerobong). Bila *raw mill* beroperasi *raw meal* dari *cyclone* dibawa oleh *air slide* digabungkan dengan *raw meal* dari EP yang dibawa melalui screw conveyor selanjutnya dengan *bucket elevator* dan air slide dimasukkan kedalam *homogenizing* silo. Bila *raw mill* tidak beroperasi debu dari EP akan digabung dengan debu dari *conditioning tower* akan dibawa oleh *screw conveyor*, kemudian dialirkan kedalam *dust bin* kemudian dikirim ke *kiln feed bin*.

Bila *raw mill* tidak beroperasi gas panas dari *preheater* dan *clinker cooler* dialirkan lewat *conditioning tower* yang dilengkapi dengan *water spray system* untuk menurunkan temperatur gas panas sampai sekitar 150oC, agar EP dapat bekerja dengan efektif. Pada kondisi normal (saat*raw mill* beroperasi) temperatur gas yang keluar dari *preheater* dan *clinker cooler* 330oC dan 397oC akan mengalami penurunan menjadi 90oC, sehingga dapat langsung di alirkan ke EP. Aliran *reject* dari *raw mill* dikembalikan ke sistem melalui *belt conveyor* dan *bucket elevator* dan menjadi umpan baru yang masuk ke dalam *raw mill.*

*Vertical mill* merupakan mesin penggilingan bahan baku dari semen. Berbeda dengan horizontal mill, prinsip kerja dan arah pergerakan materialnya adalah arah vertikal atau tegak lurus. Berbeda dengan *horizontal mill* prinsip kerjanya yaitu arah pergerakan materialnya adala harah horizontal. Saat ini yang digunakan lebih banyak yang *vertical mill* karena memliki banyak keuntungan yaitu kapasitas pengeringan lebih tinggi, ukuran material feed bisa mencapai 100 mm dan pemakaian tempat atau area lebih kecil (Setiyana, 2007).

*Raw mill* secara umum tersusun dari *shell*, kerangka utama, *stand*, *table*, *roller arm*, *gearreducer*, *roller-pressing unit* dan separator. Secara umum detail dari bagian-bagian *raw mill* ditampilkan pada Gambar 2.2



Sumber : Setyana,2007

**Gambar 2.2** Bagian-Bagian Raw Mill

## Shell dan bagian-bagiannya

1. *Shell* (Cangkang)

*Shell* atau cangkang terdiri dari tiga bagian dan setiap bagian dihubungkan dengan baut juga pada bagian atas separator dan dilas pada dudukan bagian bawah serta pada balok penghubung. Tutup dari *roller* dibaut pada *mill shell* dan tutup dibuka pada kondisi *swing out* yaitu ketika *roller* ditegakkan.

1. *Wind Box* (Kotak Udara)

*Windbox* atau tempat udara bertekanan terbuat dari plat besi yang diletakan pada sekeliling *table* dan dilas dengan dudukan/*stand* serta pada balok penghubung. Pada *windbox* ini terdapat 2 *inlet* udara panas dan 2 saluran pembuang material yang jatuh.

1. *Nozzle* dan *Armour Ring*

*Nozzle* terbuat dari plat besi dengan kelilingnya terbagi menjadi 12 bagian yang dibuat dengan keliling yang dibagi 6 bagian yang dibaut dengan *nozzle.*

* + - 1. **Kerangka Utama / Stand**

1. Kerangka Utama

Kerangka utama merupakan struktur yang dilas dari baja dan plat baja.Bautberada padapondasi dan dicor dengan semen. *Gear reducer* dibuat tetap pada bagian kerangka utama dengan tiga *stand* pada kelilingnya. Sisi luar pada *stand* dilengkapi tiga tempat untuk *swing-out cylinder*.

1. *Stand* dan Balok Penghubung

Bagian atas stand terbuat dari baja coran pada bagian bawah terbuat dari baja yang dihubungkan dengan balok penghubung. Pada permukaan bagian atas dari *stand*, sebuah *armbearing* dibaut tetap dan ujung dudukan silinder hidrolik yang terhubung dengan pin tetap pada bagian bawah *stand*. Pada *stand* dilengkapi dengan *stopper* untuk mencegah kontak langsung dari *roller* dan *table*.

1. *Motor Base*

*Motor base* merupakan struktur yang dilas pada profil baja H dan plat baja tetap dengan baut pondasi pada kerangka utama dan pondasi kemudian di cor dengan semen.

## Table

*Table* yang terbuat dari baja cor ini dihubungkan dengan *gear reducer* memakai pin dan baut. Bagian atas dari *table* terbuat dari baja cromium tingkat tinggi anti *abrasive*. *Table* linier disusun dari 16 segmen dan cekung pada permukaan atas pada sisi jalur penggiling. Pada bagian bawah permukaan *table* terdapat *scrapper* yang akan mengeluarkan material yang jatuh, juga pada bagian atas permukan *table* yang terdapat sebuah *scrapper* untuk menyeimbangkan ketebalan bubuk lapisan.

## Roller

*Roller* terbuat dari *high Chromiumcast iron* yang memiliki ketahanan terhadap gesekan dan dipasang pada hubungan silinder dan ditahan oleh *tapered ring* dari baja cor. Hubungan terpasang pada poros *roller* melalui *roller* silinder dan bantalan tipe *tapered roller. Roller* ketika berputar melakukan penggilingan material secara menjepit diantara *roller* dan *grinding table*. *Roller* diberi pelumas dengan unit pelumas bantalan *roller* dengan sistem pelumas bertekanan.

Oli pelumas dipompa dari tangki setelah melewati saringan. Oli didinginkan oleh *oil cooler* untuk mengendalikan temperatur oli tersebut, sebelum oli tersebeut dialirkan kedalam *roller*. Untuk pipa pelumasan dilengkapi beberapa unit penunjang keamanan seperti *flowmeter* untuk setiap pipa pelumasan sebelum mengalir kedalam*roller*, *termocouple*untuk setiap aliran kembali ke pompa dan *level switch* pada tangki oli. Tangki oli dilengkapi dengan pemanas untuk dapat beroperasi pada musim dingin.

## Arm (lengan)

Poros *roller* dihubungkan dengan lengan *roller* (*roller arm*) yang terbuat dari baja cor. *Roller arm* dihubungkan dengan lengan silinder (*cylinderarm*), diujung atas pasak dengan pin dan dibawah dihubungkan dengan silinder hidrolik sebagai pemberi gaya yang menekan *roller*. Pada ujung pangkal *roller arm* dilengkapi dengan *pinseat* untuk mengangkat *roller arm* dengan silinder hidrolik *swingout.*

## Mill Reducer

*Gear reducer* diletakkan pada kerangka utama, sebagai penurun kecepatan motor sesuai dengan kecepatan yang ditentukan juga ditransmisikan pada *table* pada saat yang sama untuk mendukung gaya tekan *roller*. *Reducer* terdiri dari level *gear* dan *planetary gear* dengan *input horizontal* dan *output vertical.*

## Roller-Pressing System (Sistem Tekanan Roller)

Sistem pemberi tekanan *roller* terdiri dari unit hidrolik, akumulator, silinder hidrolik penekan *roller* dan silinder hidrolik *swingout*. Unit hidrolik terdiri dari tangki oli, pompa hidrolik berbagai jenis katup, yang berfungsi sebagai pemberi tekanan pada silinder hidrolik dan sebagai pemberi tekanan pada silinder hidrolik dan sebagai pemberi gaya tekan.

Gaya tekan yang dihasilkan dari silinder hidrolik yang ditransmisikan pada *roller* melalui lengan silinder, lengan *roller* digunakan untuk menggiling material yang dijepit antar *roller* dan *table.* Variasi gaya tekan berdasarkan kondisi penggilingan diatur oleh dua N2 sebagai kandungan gas dari akumulator yang dipasang pada setiap silinder hidrolik.

## Sistem penyemprotan (Water-Spraying System)

Jika material yang akan digiling terlalu kering maka akan sukar digiling oleh *roller mill*danakan menghasilkan getaran yang abnormal. Untuk mencegah hal ini maka disemprotkan air pada *mill tube.* Air dipompakan dari tangki air menuju pipa-pipa air dimana pipa-pipa tersebut memiliki katup yang dilengkapi dengan motor, *flowmeter,* katup selenoid, *check valve* dan alat ukur tekanan (Setyana, 2007).

## 2.1.4 Pembakaran

Unit pembakaran merupakan unit yang sangat vital sehingga perlu penanganan serius karena kualitas semen yang dihasilkan sangat ditentukan oleh keberhasilan unit ini. Proses pembakaran pada pabrik semen terdiri dari tiga tahapan yaitu pemanasan awal (*preheating*), pembakaran (*firing*) dan pendinginan (*cooling*). Uraian masing-masing proses tersebut disampaikan sebagai berikut.

**Pemanasan Awal (*Preheating*)**

Pemanasan awal bahan baku berlangsung pada *suspension preheater.Suspension Preheater* merupakan suatu susunan empat *stage cyclone* dan satu buah *calciner* yang tersusun menjadi satu string. Fungsi pokok dari *preheater* adalah pemanasan awal klinker dan tempat terjadinya proses penghilangan kadar air bebas hingga kalsinasi.

Jenis *preheater* yang digunakan adalah 4 *stage*, *double string preheater* yang dilengkapi dengan ILC dan SLC *calciner.* Aliran material berlawanan arah dengan aliran gas panas atau *counter current*. *Kiln feed* masuk dari atas *cyclone* sedangkan gas panas dialirkan dari bawah *cyclone*. Untuk meningkatkan efisiensi pemisahan antara gas panas dan material didalam *preheater* maka pada stage I dipasang *double cyclone. Stage* I sampai sampai *stage* III berfungsi sebagai pemanas awal *kiln feed* sedangkan pada *stage* IV digunakan untuk memisahkan produk yang keluar dari *calsiner* yang telah dikalsinasi (Mahfud, 2018).

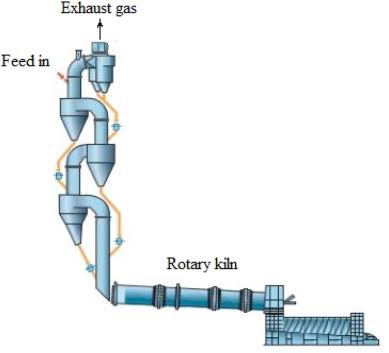
Proses pemanasan *kiln feed* pada *stage* I sampai *stage* III terjadi karena adanya perpindahan panas antara gas panas yang keluar dari kiln dan *calciner* dengan *kiln feed* masih dingin. Suhu *kiln feed* masuk *riser duct* dari *stage* I sekitar 50-60oC. Kiln feed yang masih dingin masuk kedalam *riser duct* ini kemudian bercampur dengan aliran gas panas ikut masuk kedalam *cyclone.* Di dalam *cyclone kiln feed* dipisahkan dari campuran antara gas dan material. Campuran antara *kiln feed* dan dan gas panas masuk kedalam *cyclone* dengan arah tangensial sehingga akan terjadi pusaran. Pusaran tersebut mengakibatkan terjadinya gaya sentrifugal, gaya gravitasi dan gaya angkat gas di dalam *cyclone*. Untuk material kasar, gaya gravitasi dan gaya sentrifugal lebih dominan. Gaya sentrifugal menyebabkan material menumbuk dinding *cyclone* sehingga akan jatuh ke *down pipe* karena gaya gravitasi. Untuk material halus gaya angkat gas sangat dominansehingga material akan terangkat gas keluar dari *cyclone.* Profil suhu material dan gas di dalam *kiln* pada masing-masing tahap disampaikan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Profil Suhu Material dan Gas Dalam *Kiln*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Stage* | Suhu Material | Suhu Gas |
| I | 310-330oC | 355-365oC |
| II | 500-550oC | 540-560oC |
| III | 650-690oC | 690-710oC |
| IV | 780-800oC | 820-840oC |
| Calsiner | 900-930oC | 830-870oC |

Sumber (Mahfud, 2018)

*Kiln feed* masuk ke *down pipe cyclone stage* II kemudian mengalami proses seperti pada *stage* I. Hal yang sama terjadi pada pada *stage* III dan *stage* IV. Material yang keluar dari *stage* III akan masuk ke dalam ILC dan SLC *calciner* dan mengalami kalsinasi minimal sampai 90%. Kemudian material akan terbawa aliran gas masuk ke dalam *cyclone stage* IV dan keluar melewati *riser duct* dan selanjutnya akan diumpankan kedalam kiln. Gambar *preheater* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Sumber:https://encryptedtbn0.gstatic.com

**Gambar 2.3***Preheater Tower*

Menurut Mahfud 2018, pada *suspension preheater*terjadireaksikimia pada material sebagaiberikut :

1. Pengurangan kadar air yang terkandung dalam umpan pada *stage* I pada suhu 100-200oC melalui reaksi sebagai berikut :

H2O(l)🡪 H2O(g)

1. Penguapan air hidrat yang terkandung dalam tanah liat pada suhu 500-600oC melalui reaksi sebagai berikut :

Al2O3xH2O(s)🡪 Al2O3(s)+ xH2O(g)

SiO2xH2O(s)🡪 SiO2(s) + xH2O(g)

1. Penguraian karbonat kalsium terjadi pada suhu 600-800oC melalui reaksi sebagai berikut :

CaCO3(s) 🡪CaO(l) + CO2(g)

MgCO3(s) 🡪MgO(l) + CO2(g)

1. Reaksi pembentukan senyawa 2CaO.SiO2 sebagian pada suhu 800-930oC melalui reaksi sebagai berikut :

2CaO(l) + SiO2(l) 🡪 2CaO.SiO2(l) atau C2S

**Pembakaran (*Firing*)**

Pembakaran berlangsung pada tanur putar atau *rotary kiln.* Pada *rotary kiln* juga terjadi proses kalsinasi, *sintering* dan *clinkering*. Temperatur material yang masuk ke dalam *rotary kiln* antara 800–900 °C sedangkan temperatur klinker yang keluar dari *rotary kiln* adalah 1100-1450 °C. Sumber panas dalam *rotary kiln* dihasilkan dari pembakaran batu bara. *Rotary kiln* merupakan peralatan utama di seluruh unit pabrik semen, karena di dalam *rotary kiln* terjadi semua proses kimia dalam pembentukan klinker.

Secara garis besar, di dalam *rotary kiln* terdapat empat zona yaitu zona kalsinasi, zona transisi, zona sintering dan zona *cooling*. Pada teknologi proses semen saat ini, proses kalsinasi berlangsung pada *suspension preheater* sehingga proses yang terjadi di dalam *rotary kiln* lebih efektif jika ditinjau dari konsumsi energi. Proses perpindahan panas di dalam *rotary kiln* sebagian besar ditentukan oleh proses radiasi sehingga diperlukan isolator yang baik untuk mencegah kehilangan panas (*heat loss*). Isolator tersebut adalah batu tahan api (*fire brick)* dan *coating* yang terbentuk selama proses. Batu tahan api juga berfungsi untuk menjaga agar lapisan baja pada *rotary kiln* tidak meleleh.

Pada proses klinkerisasi terbentuk senyawa-senyawa penyusun semen yaitu C3S, C2S, C3A dan C4AF. Tanur putar ini berbentuk silinder yang terbuat dari baja yang dipasang secara horizontal dengan derajat kemiringan 4%. Tanur putar mampu membakar umpan dengan kapasitas 8500 ton/hari hingga menjadi terak (*clinker*)(Mahfud, 2018).

Pada dasarnya *rotary kiln* adalah sebuah silinder panjang yang berputar pada poros setiap satu atau dua menit, sumbu ini cenderung sedikit miring. Rotasi menyebabkan umpan secara bertahap bergerak. Umpan masuk pada keadaan dingin dan keluar pada kondisi panas. Alat ini dilengkapi dengan *preheater* sebagai pemanas awal dan *calciner*. Gerakan antara material dan gas panas hasil pembakaran batubara berlangsung secara *counter current*. Proses klinkerisasi dalam kiln terbagi dalam beberapa zona, yaitu :

1. *Calcining Zone*

Pada zona ini material akanmengalami proses kalsinasilanjutan yang sebelumnyatelahterjadi di *suspension preheater*.Kalsinasi yang telahmencapai 90% di *suspension preheater* akan dilanjutkan di *kiln* sampai 100% (sempurna) dan pembentukan komponen C2S. Menurut Mahfud, 2018 pada zona ini suhu proses kalsinasi antara 900 – 1100 ᵒC dengan reaksi sebagai berikut :

CaCO3(s)🡪 CaO(s) + CO2(g)

MgCO3(s)🡪 MgO(s) + CO2(g)

2CaO(s) + SiO2(s) 🡪 2CaO.SiO2(s)atauC2S

1. *Transition Zone*

Pada zone transisi mulai terbentuk komponen-komponen dasar penyusun semen seperti C3A (Trikalsium Silikat) dan C4AF (Tetra Aluminat Ferrit), menurut Mahfud,2018 pada zona ini proses kalsinasi antara 1100-1250oC reaksi tersebut adalah sebagai berikut :

3CaO(s) + Al2O3(s)🡪 3CaO.Al2O3(s) atau C3A

4CaO(s) + Al2O3(s) + Fe2O3(s) 🡪 4CaO.Al2O3.Fe2O3(s) atau C4AF

1. *Sintering Zone*

Pada daerah ini terjadi pelelehan pada temperatur tinggi antarasuhu 1250 – 1450 ᵒC yaitu campuran kalsium alumina ferrit berubah menjadi fase cair. Bagian CaO yang tidak bereaksi dengan oksida - oksida alumina besi dan silika biasanya dalam bentuk CaO bebas atau *free lime*. Jumlah CaO tersebut dibatasi di bawah 1%. Pada temperatur tinggi ini sisa senyawa CaO mengikat C2S untuk membuat campuran C3S. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :

2CaO.SiO2(s) + CaO(s)🡪 3CaO.SiO2(s)atau C3S

1. *Cooling Zone*

Setelah umpan kiln melewati zona klinkerisasi, umpan kiln akan tetap meleleh dan bergerak ke daerah zona pendinginan. Pada zona pendinginan lelehan akan mengalami penurunan suhu dari 1450 menjadi 1300oC. klinker ini selanjutnya akan bergerak menuju clinker cooler untuk segera didinginkan (Mahfud, 2018).

**Pendinginan (*Cooling*)**

Proses pendinginan klinker berlangsung pada alat yaitu *clinker cooler*. *Clinker cooler* berfungsi sebagai pendingin klinker yang sudah terbentuk dan memproduksi udara pembakar sekunder yang digunakan dalam *rotary kiln*, *precalciner* dan *raw mill. Clinker cooler* yang digunakan terdiri dari 16 kompartemen. Sebagai media pendingin digunakan aliran udara yang dihasilkan oleh 14 buah fan. Klinker hasil pembakaran yang mempunyai suhu 1400oC keluar dari *rotary kiln* langsung jatuh ke dalam *clinker cooler* dan langsung diterima oleh *grate-grate* (sarangan). Pendinginan dilakukan secara mendadak untuk menghindari terjadinya pengerasan semen atau dekomposisi C3S menjadi C2S dan klinker yang dihasilkan menjadi *amorf* sehingga klinker mudah digiling (Mahfud, 2018).

Pendinginan dilakukan sampai suhu klinker menjadi 82oC saat keluar dari *clinker cooler*, dibawa oleh *drag conveyor* dan dimasukkan kedalam *clinker storage* silo. Dalam *clinker cooler, grate-grate* bergerak maju-mundur sehingga klinker akan terdorong menuju *outlet cooler*. Pada bagian ini *clinker cooler* dilengkapi dengan *clinker breaker/crusher* yang berfungsi untuk menghancurkan clinker yang berukuran besar. Debu yang berhasil disaring dicampur dengan produk dari *cooler* ke *drag conveyor* melalui *screw conveyor* sedangkan udara bersih dibuang keudara bebas melalui *stack.*

## Penggilingan Akhir

Proses penggilingan akhir berlangsung pada *finish mill*. Penggilingan akhir di PabrikTuban 2 menggunakan *horizontal Ball mill* dan ada *Vertical Roller Mill* dari FLS yang memanfaatkan panas dari gas panas *cooler*. Bahan baku dalam proses penggilingan akhir terdiri dari bahan baku utama, bahan baku penolong dan bahan baku aditif. Bahan baku utama adalah klinker atau terak. Bahan baku penolong adalah *gypsum*. Bahan baku aditif yaitu *trash, fly ash* dan *slag.*

*Ball mill* merupakan salah satu jenis mesin penggiling yang berbentuk silinder yang berfungsi dan digunakan untuk menggiling material keras menjadi material yang sangat halus. Mesin ini biasanya digunakan dalam proses pembuatan cat, keramik, semen, kembang api, batu bara, pigmen feldspar dan serbuk material 3Dprinting. Secara umum prinsip kerja *ball mill* adalah mengurangi ukuran material dengan memanfaatkan gerakan bola yang jatuh kebawah pada saat bola terangkat ketika silinder berputar. Perbedaan antara *ballmill* dan *tube mill* adalah rasio panjang tabung dengan diameter tabung. Untuk *tube mill* memiliki perbandingan panjang dengan diameter (3 – 6 : 1), untuk *ball mill* rasio ini adalah (<2 : 1 ) (Shabana, 2010).

*Ball Mill* berfungsi sebagai bahan pengisi yang berfungsi untuk menghancurkan bahan baku semen. Pada *Cement Mill* dilakukan penambahan aditif, seperti gypsum atau trash sebagai *retarder agent* yang berfungsi untuk memperlambat waktu pengikatan dan pengerasan semen danuntuk mendapatkan semen dengan kehalusan yang telahdipersyaratkan dalam Standard Nasional Indonesia(SNI 15-2049-2004 Semen Portland,Badan Standardisasi Nasional, 2004).

Pada *ball mill* horizontal penggilingan terak secara garis besar dibagi menjadi sistem penggilingan *open circuit* dan sistem penggilingan *closedcircuit*. Pada unit open circuit perbandingan panjang *shell* dan diameter alat kurang lebih 4:1 hingga 5:1 untuk mendapatkan kehalusan yang diinginkan. Pada unit *closedcircuit* perbandingan panjang shell dan diameter adalah 3 : 1. Material yang telah mengalami penggilingan kemudian diangkut oleh *bucket elevator* menuju separator. Separator berfungsi untuk memisahkan semen antara semen berukuran halus dan kurang halus. Semen berukuran halus dialirkan oleh udara melalui *cyclone* menuju *bag filter* dan terakhir menuju silo.

Pada proses *Vertical Roller Mill,* bahan diumpankan melalui pipa saluran masuk dan jatuh ke pusat pelat gerinda yang berputar dengan kecepatan konstan. Gayasentrifugal yang dihasilkan menyebabkan material terdistribusi secara merata di sekitar meja untuk membentuk lapisan material dengan ketebalan tertentu. Pada saat yang sama, bahan dihancurkan karena pemadatan dan tekan oleh penggulung di atas pelat gerinda. Pada bagian bawah penggerak gaya sentrifugal bergerak kontinyu.

Material terus bergerak ke tepi luar sehingga masuk ke dalam aliran gas panas dan dibawa ke bagian atas melalui bagian tengah. Kandungan air pada material di dalam*vertical roller mill* menguap dengan cepat ketika pertukaran panas penuh terjadi antara bahan dan gas panas. Kehalusan produk akhir ditentukan oleh penyaring. Partikel *oversize* ditolak dan jatuh kembali ke pelat gerinda dan partikel yang memenuhi syarat dibawa ke pengumpul, tempat produk jadi dikumpulkan dan dikirim ke silo penyimpanan.

## 2.1.6 Pengemasan

Pengemasan semen dibagi menjadi dua, yaitu pengemasan dengan menggunakan sak (*kraft* dan *woven*) dan pengemasan dalam bentuk curah. Semen dalam bentuk sak akan didistribusikan ke toko-toko bangunan dan *end user*. Semen dalam bentuk curah akan didistribusikan ke proyek-proyek yang berskala besar misalnya pada pembangunan infrastruktur, jembatan. Tahapan proses pengemasan dengan menggunakan sak yaitu meliputi silo semen tempat penyimpanan produk dilengkapi dengan sistem aerasi untuk menghindari penggumpalan (koagulasi) semen yang dapat disebabkan oleh air dari luar, dan pelindung dari udara ambient yang memiliki kelembaban tinggi. Setelah itu semen dari silo dikeluarkan dengan menggunakan udara bertekanan dari semen silo lalu dibawa ke *bin* penampungan sementara sebelum masuk ke mesin *packer* atau *loading* ke truk.

## Coal Mill

*Coal Mill* merupakan tempat penggilingan batubara menjadi serbuk batubara. Batubara dari tambang diangkut kepabrik dengan menggunakan truk dan disimpan dalam gudang beratap. Selanjutnya batu bara diangkut ke *raw coal bin* dengan menggunakan *front loader* dan *belt conveyor*. Setelah digiling dan dikeringkan didalam *coal mill*, batubara bubuk disimpan dalam *pulverized coal bin*. Untuk pengeringan didalam *coal mill* digunakan sebagian gas buang dari*p reheater*. Pada waktu *rotary kiln* tidak beroperasi akan digunakan gas panas dari *hot* gas generator yang disiapkan untuk keperluan tersebut.

## 2.2 Energi

Energi adalah besaran yang harus dipindahkan pada objek agar objek tersebut dapat melakukan kerja atau agar objek tersebut dapat mengalami pemanasan. Berdasarkan Hukum Pertama Termodinamika, atau Hukum Kekekalan Energi,energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan dalam sebuah proses namun mengalami perubahan bentuk. Energi dapat dinyatakan pada persamaan 2.1.

𝑄 = ∆𝑈 + 𝑊 (2.1)

Keterangan :

Q : panas yang masuk atau keluar sistem

∆U : energi internal sistem

W : usaha yang dilakukan oleh sistem atau pada sistem

Salah satu bentuk energi adalah energi panas. Terdapat tiga jenis mekanisme perpindahan energi panas yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Uraian mengenai ketiga mekanisme tersebut disampaikan pada sub bab berikut.

## 2.2.1 Konduksi

Perpindahan kalor yang terjadi secara konduksi berarti perpindahan kalor/panas tanpa diikuti oleh perpindahan dari molekul benda tersebut. Konduksi juga dapat dikatakan sebagai transfer energi dari sebuah benda yang memiliki energi yang cukup besar menuju ke benda yang memiliki energi yang rendah. Persamaan yang digunakan untuk perpindahan kalor konduksi dikenal dengan Hukum Fourier (Incopera, dkk 1996) yang dinyatakan sebagai berikut :

q = -KA (2.2)

Keterangan

q : Energi kalor (W)

K : Konduktivitas thermal (W/m.K)

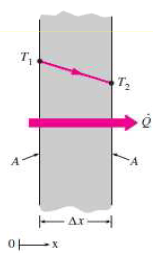
A : Luas permukaan (m2)

∆𝑥 : Tebal penampang permukaan (m)

T0 : Temperatur yang lebih tinggi ( K)

T1 : Temperatur yang lebih rendah (K)

Perpindahan panas secara konduksi secara visual disampaikan pada Gambar 2.4.Konduksi terjadi dari T1 menuju ke T2denganΔx merupakan tebal lapisanyang menjadi media perantara perpindahan panas terhadap suatu luasan bidang tertentu.



Sumber :<https://i1.wp.com/berbagienergi.com>

**Gambar 2.4** Ilustrasi Perpindahan Panas Secara Konduksi.

## 2.2.2 Konveksi

Konveksi merupakan proses perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya, dengan menggunakan media penghantar berupa fluida (cairan/gas) (Incopera, dkk 1996). Dasar dari proses konveksi adalah Hukum Newton. Konveksi adalah perpindahan kalor yang terjadi akibat adanya pergerakan molekul pada suatu zat. Gerakan tersebut yang menyebabkan perpindahan kalor. Konveksi dapat dibagi menjadi dua, yaitu konveksi bebas atau konveksi alamiah dan konveksi paksa. Konveksi bebas atau konveksi alamiah terjadi apabila pergerakan fluida disebabkan gaya apung (*bouyancy force*) akibat perbedaan densitas fluida tersebut. Perbedaan kerapatan tersebut bisa terjadi karena perbedaan temperatur akibat proses pemanasan. Pada konveksi paksa pergerakan fluida terjadi akibat oleh gaya luar seperti dari kipas (*fan*) atau pompa. Pada perpindahan kalor konveksi berlaku hukum pendinginan Newton, yaitu :

𝑞 = ℎ. A (𝑇0 − 𝑇∝) (2.3)

Keterangan :

q : Energi kalor (W)

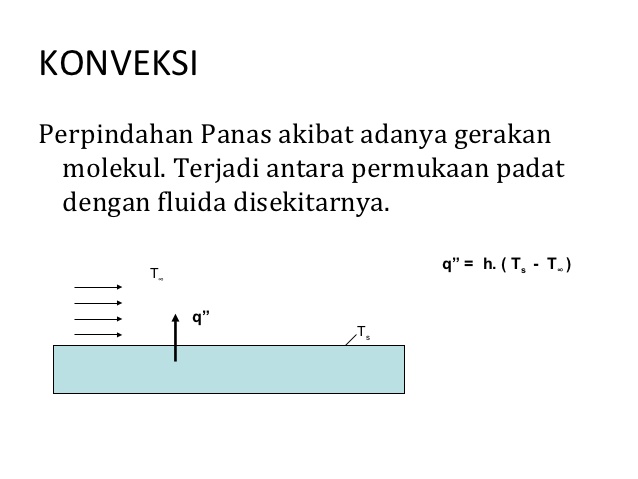
h : Koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m2 .K)

A : Luas area permukaan (m2 )

T0 : Temperatur permukaan (K)

𝑇∝ : Temperatur ambient (K)

Konveksi terjadi pada dinding luar suatu bidang luasan terhadap kontak fluida yang mengalir sehingga terjadi perpindahan panas dari temperatur rendah ke temperatur tinggi.



Sumber :[https://image.slidesharecdn.com/perpindahankalor](https://image.slidesharecdn.com/perpindahankalor-121030222224-phpapp01/95/perpindahan-kalor-9-638.jpg?cb=1351635787)

**Gambar 2.5** Ilustrasi Perpindahan Panas Secara Konveksi

## 2.2.3 Radiasi

Radiasi merupakan proses perpindahan panas yang terjadi karena pancaran/sinar/radiasi gelombang elektromagnetik tanpa memerlukan media perantara. Dasar dari proses radiasi adalah hukum Stefan-Boltzman dengan persamaan sebagai berikut :

𝑞𝑟 = 𝜀𝜎𝐴T4  (2.4)

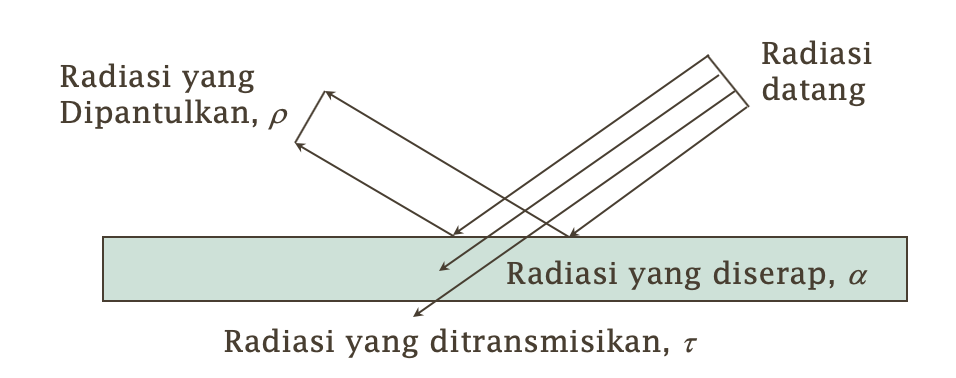
qr : Perpindahan panas karena radiasi

𝜀 : Emisivitas

𝜎 : Konstanta Boltzman ; 𝜎 = 1,38 x 10-23(J/K)

T : Temperatur Absolut

Panasyang berpindah secara radiasi akan mengalami tiga fenomena yaitu refleksi, absorbsi dan transmisi.Ilustrasi, Refleksi, Absorbsi dan transmisidisampaikan pada gambar 2.6.



Sumber :https://elkimkor.files.wordpress.com

**Gambar 2.6** Ilustrasi perpindahan panas secara Radiasi

## 2.3 Eksergi

Eksergi secara termodinamika dijelaskan sebagai jumlah kerja maksimum yang dapat dihasilkan oleh sistem ketika sistem tersebut berada dalam kesetimbangan dengan lingkungan. Analisis eksergi merupakan metode yang kuat dalam analisis parameter termodinamika di dalam suatu sistem. Kegunaan analisis eksergi diantaranya : (i)evaluasi secara kuantitatif penyebab ketidaksempurnaan proses secara termodinamika; (ii)evaluasi kinerja maksimum sistem; (iii)identifikasi peralatan yang memiliki kehilangan eksergi; dan (iv)penentuan peluangpengembangan secara termodinamika.

Eksergi merupakan besaran termodinamika yang berbeda dengan energi. Berdasarkan Hukum Termodinamika, energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan namun dapat mengalami perubahan bentuk. Sebaliknya, eksergi selalu hilang ketika proses berjalan *irreversibel*. Kehilangan eksergi sebanding dengan peningkatan entropi sistem dan lingkungan. Kehilangan eksergi disebut Anergi. Pada analisis sistem termal terdapat dua macam eksergi yaitu eksergi fisik dan eksergi kimia.

## 2.3.1 Eksergi Fisik

Eksergi fisik adalah kerja yang diperoleh suatusenyawaketika mengalami proses *reversible* dari kondisi temperatur dan tekanan awal ke kondisi yang ditentukan berdasarkan temperatur dan tekanan lingkungan. Menurut Bejan,1996 eksergi fisik dapat dihitung dengan persamaan 2.5.

𝑒𝑥,𝑝ℎ = m(𝐻 − 𝐻𝑂) − [𝑇𝑂𝑥 (𝑆 − 𝑆𝑂)] (2.5)

Keterangan :

ex’ph: Eksergi Fisik (kW)

m :LajuFluida (kg/s)

HO : Entalpi Lingkungan (KJ/kg)

TO : Temperatur Lingkungan (oC)

SO : Entropi Lingkungan (KJ/kg oC)

H : Entalpi (KJ/kg)

S : Entropi (KJ/kg oC)

## 2.3.2 Eksergi Kimia

Eksergi kimia adalah kerja yang diperoleh ketika substansi sistem dibawa kondisi lingkungan. Eksergi kimia juga didefinisikan sebagai parameter temperatur dan tekanan lingkungan ke kondisi referen yang melibatkan proses perpindahan kalor dan pergantian substansi hanya dengan lingkungan. Fenomena eksergi kimia yang terjadi pada bahan bakar dapat diperoleh berdasarkan *Lower Heating Value* (LHV) bahan bakar tersebut. Menurut Bejan,1996 hubungan antara LHV dan eksergi kimia disampaikan dalam persamaan 2.6.

𝑒𝑥,𝑓𝑢𝑒𝑙= 𝜁𝑓𝑢𝑒𝑙 × 𝐿𝐻𝑉 (2.6)

Keterangan :

exfuel : Eksergi Spesifik (kW)

𝜁𝑓𝑢𝑒𝑙 : LajuBahan Bakar (kg/s)

LHV : *Lower Heating Value* (KJ/kmol)

Nilai rasio eksergi terhadap Lower Heating Value (LHV) bahan bakar (𝜁𝑓𝑢𝑒𝑙) dapat dihitung dengan persamaan dasar komposisi atom. Nilai rasio eksergi spesifik bahan bakar hidrokarbon (𝜁𝑐𝑎𝐻𝑏 ) terhadap nilai LHV bahan bakar tersebut dapat dihitung dengan persamaan 2.7.

𝜁𝑐𝑎𝐻𝑏 = 1.033 + 0.0169 – (2.7)

Keterangan :

𝜁𝑐𝑎𝐻𝑏 : Eksergi spesifik bahan bakar hidrokarbon

a : Rantai Karbon

b : Rantai Hidrogen

**2.4** Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu mengenai Efisiensi, Energi dan eksergi ditampilkan pada Tabel 2.2.

**Tabel2.2** Penelitian Terdahulu

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| No | Peneliti | Tahun | Judul | Keterangan |
| 1 | Dian Wahyu dan Ruzita S | 2012 | Analisis Energi pada Sistem Rotary Kiln Unit Indarung IV PT Semen Padang | RKC IV Indarung, Efisiensi Energi : 93,3% |
| 2 | FarisaRidha dan Hadiyanto | 2013 | Evaluasi Efisiensi Panas dan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Rotary Kiln Pabrik Semen | Efisiensi Panas : 43,17% |
| 3 | Dedy P dan Erlan D | 2015 | Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem HTR-10 Siklus Turbin Uap | Eksergi : 61,7%, irreversibiltas reaktor : 27,9% |
| 4 | Aries Karyadi dan Chalilullah | 2016 | Analisa Energi dan Eksergi Pembangkit Listrik Tenaga Uap Banten 3 Lontar | Eksergi yang musnah : 358,1 MW |
| 5 | Irwan Rasyid S dan Darul R | 2019 | Analisis Energi dan Eksergi Pada Unit Rotary Kiln RKC 2 PT Semen Gresik PabrikTuban | Efisiensienergi : 69,2%, Efisiensi Eksergi 59,48%, Irreversibilitas : 49,52% |

# 

# *-Halaman Ini Sengaja Dikosongkan-*

# BAB 3

**METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 Alat Penelitian**

Penelitian ini dilakukan dengan bantuan aplikasi Microsoft Office Excel.

## 3.2 Variabel Penelitian

Pada penelitian mengenai “Analisis Energi dan Eksergi Pada sistem *Rotary Kiln* RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban” menggunakan beberapa variabel yaitu laju alir massa batubara dan laju alir produk klinker. Variabel penelitian disampaikan pada Tabel 3.1. Pada Tabel 3.1 terdapat basis perhitungan dimana maksud basis tersebut merupakan angka atau data yang diperoleh dari pabrik. Kemudian untuk tanda positif dan negatif merupakan *flowrate*. Tanda positif berarti penambahan sedangkan tanda negative berarti pengurangan. Misalnya +5% jadi *flowrate* batu bara yang akan masuk data dari pabrik ditambah 5% dari data pabrik.

**Tabel3.1** Variabel Penelitian

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Variabel | LajuAlir Massa Batu Bara | LajuAlir Massa Produk Klinker |
| 1 | Basis | Basis |
| 2 | +5% | Basis |
| 3 | +10% | Basis |
| 4 | -5% | Basis |
| 5 | -10% | Basis |
| 6 | Basis | +5% |
| 7 | Basis | +10% |
| 8 | Basis | -5% |
| 9 | Basis | -10% |

**3.3 Analisis Alat**

Alat yang akan dianalisis berupa sistem *rotary kiln* (*Suspension Preheater* – *Rotary Kiln* –*Cooler* ). Blok diagram sistem *rotary kiln* ditunjukkan pada Gambar 3.1

<18>Udaramenuju EP

<20>UdaraSekunder

<22>Udara Primer

<16>Ke ID Fan

Rotary Kiln

Suspension Preheater

Grate Cooler

<18>Produkkeluar Cooler

<19> Produk

<18>Produkkeluar SP

<12> Raw Meal

<52> Batubara

<17> Gas dari Rotary Kiln

<51> Batubara

<28>UdaraMasuk

<21>UdaraTersier

<21>UdaraTersier

**Gambar 3.1**Sistem*Rotary Kiln*

## 3.4 Dasar Penyusunan Neraca Massa dan Energi

Neraca massa dan neraca energi dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan termodinamika, perpindahan panas serta reaksi kimia yang berlangsung di dalam sistem. Perhitungan neraca massa merupakan tahapan awal yang harus dilakukan. Data hasil perhitungan neraca massa selanjutnya digunakan untuk perhitungan neraca energi. Asumsi-asumsi yang digunakan dalam perhitungan neraca massa dan energi adalah sebagai berikut:

1. Kondisi aliran massa *steady state*.
2. Proses pembakaran berlangsung secara sempurna.
3. Perubahan temperatur lingkungan diabaikan.
4. Kebocoran udara ke luar sistem diabaikan.
5. Kapasitas panas (Cp) gas hasil pembakaran didekati dengan Cp masing-masing gas penyusunnya.
6. Komposisi senyawa *kiln feed* dan batubara dianggap tetap.
7. Konversi yang terbentuk dalam rotary kiln sebesar 95%

## 3.5 Perhitungan Neraca Massa

Neraca massa pada proses dapat dihitung pada persamaan 3.1. Berdasarkan persamaan tersebut jumlah massa yang masuk sama dengan jumlah massa yang keluar. Data neraca massa pada unit *raw mill, rotary kiln*, dan *coal mill* diperoleh dari data operasi di *Plant* Unit RKC-2 PT. Semen Gresik PabrikTuban.

∑ 𝑚𝑖𝑛= ∑ 𝑚𝑜𝑢t (3.1)

Keterangan :

min : massa yang masuk

mout : massa yang keluar

Neraca massa pada *suspension preheater* dapat dihitung dengan menggunakan hukum kekekalan massa. Perhitungan tersebut dapat dilihat pada persamaan 3.2 dan 3.3. Pada *suspension preheater* bahan yang masuk terdiri dari *limestone*, *clay*, pasir silika dan pasir besi.

∑ 𝑚𝑖𝑛=mraw meal +mudara tersier+ mbatubara + mgas dari kiln (3.2)

∑ 𝑚𝑜𝑢𝑡 = 𝑚produk SP + 𝑚𝑔𝑎𝑠 𝑏𝑢𝑎𝑛𝑔 (3.3)

Neraca Massa di *rotary kiln* dapat dihitung berdasarkan hukum kekekalan massa. Perhitungan tersebut dapat dilihat pada persamaan 3.4 dan 3.5.

∑ 𝑚𝑖𝑛= 𝑚𝑐𝑜𝑎𝑙 + 𝑚𝑘𝑖𝑙𝑛 𝑓𝑒𝑒𝑑 + 𝑚𝑢𝑑𝑎𝑟𝑎 primer + mudara sekunder  (3.4)

∑ 𝑚𝑜𝑢𝑡 = 𝑚𝑐𝑙𝑖𝑛𝑘𝑒𝑟 + 𝑚𝑔𝑎𝑠 𝑏𝑢𝑎𝑛𝑔 (3.5)

Neraca Massa di *cooler* dapat dihitung berdasarkan hukum kekekalan massa. Perhitungan tersebut dapat dilihat pada persamaan 3.6 dan 3.7.

∑ 𝑚𝑖𝑛= mclinker + mudara (3.6)

∑ 𝑚𝑜𝑢𝑡 = 𝑚produk + 𝑚udara tersier+ mudara sekunder + m udara ke EP (3.7)

## 3.5.1 Penentuan Massa sisa CaCO3 dan MgCO3

Pada *rotary kiln* terjadi reaksi kalsinasi, di dalam *rotary kiln* reaksi yang terjadi sebesar 100% dan termasuk reaksi yang paling banyak menggunakan energi dengan massa yang masuk berupa CaCO3 dan MgCO3. Pada reaksi terjadi pelepasan CO2 dari senyawa CaCO3 dan MgCO3. Persamaan yang terbentuk adalah sebagai berikut :

CaCO3(s) → CaO(s) + CO2(g) ............ (179 kJ/mol)

MgCO3(s) → MgO(s) + CO2(g) .......... (118 kJ/mol)

Menurut Duda 1985, massa CaCO3 dan MgCO3 dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.8 dan 3.9.

𝑚𝐶𝑎𝐶𝑂3 (𝑡𝑒𝑟𝑘𝑎𝑙𝑠𝑖𝑛𝑎𝑠𝑖) = 𝑑𝑒𝑟𝑎𝑗𝑎𝑡 𝑘𝑎𝑙𝑠𝑖𝑛𝑎𝑠𝑖 × 𝑚𝐶𝑎𝐶𝑂3  (3.8)

𝑚𝑀𝑔𝐶𝑂3 (𝑡𝑒𝑟𝑘𝑎𝑙𝑠𝑖𝑛𝑎𝑠𝑖) = 𝑑𝑒𝑟𝑎𝑗𝑎𝑡 𝑘𝑎𝑙𝑠𝑖𝑛𝑎𝑠𝑖 × 𝑚𝑀𝑔𝐶𝑂3  (3.9)

Massa CaO dan MgO hasil kalsinasi dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.10 dan 3.11.

mCaO (hasil kalsinasi) = mCaCO3 (terkalsinasi) × (3.10)

mMgO (hasil kalsinasi) = mMgCO3 (terkalsinasi) × (3.11)

Massa CO2 hasil kalsinasi dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.12

mCO2 (hasil kalsinasi) = 𝑚𝐶𝑎𝐶𝑂3 (terkalsinasi) × (3.12)

## 3.5.2 Penentuan MassaUdara Pembakaran

Syarat utama dalam proses pembakaran adalah adanya udara. Udara pembakaran merupakan udara yang diperlukan pada proses pembakaran di dalam *rotary kiln*. Besarnya massa udara pembakaran dapat ditentukan dengan perhitungan pembakaran batubara teoritis. Proses pembakaran batubara menghasilkan reaksi kimia sesuai persamaan berikut :

C(s) + O2(g) → CO2(g)  (3.13)

2H + ½ O2(g) → H2O(l) (3.14)

S(s) + O2(g) → SO2(g) (3.15)

persamaan umum untuk reaksi pembakaran secarateoritis batubara berdasarkan pada persamaan 3.16.

𝐶𝑥𝐻𝑦𝑁𝑧𝑆𝑝𝑂𝑞 + 𝛼(𝑂2 + 3,762 𝑁2 ) → 𝑥𝐶𝑂2 + 𝐻2𝑂 + 𝑝𝑆𝑂2 + (3,762 𝛼 + ) 𝑁2

(3.16)

Keterangan :

𝑥 =

𝑦 =

𝑧 =

𝑝 =

𝑞 =

Jumlah mol udara untuk pembakaran teoritis (α) diperoleh dengan menyamakan jumlah mol unsur-unsur kimia pada sisi produk dan reaktan seperti pada persamaan 3.17.

𝛼 = 𝑥 + + 𝑝 − (3.17)

Jumlah mol batu bara yang masuk kedalam *rotary kiln* dapat ditentukan dengan menggunakan rumus pada persamaan 3.18.

Mol batubara = (3.18)

Komposisi batubara yang masuk ditampilkan pada Tabel 3.2 sebagai berikut :

**Tabel 3.2**Komposisi Klinker

|  |  |
| --- | --- |
| Komponen | % Berat |
| C(karbon) | 53,43 % |
| H (hidrogen) | 4,15% |
| N (nitrogen) | 0,87% |
| O (oksigen) | 23,24% |
| S (sulfur) | 0,18% |
| H2O (air) | 14,88% |
| Ash content | 3,25% |
| Total | 100% |

Sumber : Laboratorium evaluasi proses tuban 1 dan 2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban

Massa gas buang yang terbentuk untuk satuan total massa batubara yang diumpankan ke *rotary kiln* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.19, 3.20, 3.21 dan 3.22.

Perhitungan massa H2Oadalahsebagaiberikut :

MassaH2O = mol H2O × Mr H2O ton/h (3.19)

Perhitungan massa N2adalahsebagaiberikut :

MassaN2= mol N2 × MrN2 ton/h (3.20)

Perhitungan massa CO2 adalah sebagai berikut:

Massa CO2 = mol CO2 × Mr CO2 ton/h (3.21)

Perhitungan massa SO2 adalah sebagai berikut:

Massa SO2= mol SO2 × Mr SO2 ton/h (3.22)

## Penentuan Massa Klinker

*Rotary kiln* merupakan tempat terjadinya reaksi kimia akibat adanya pembakaran. Reaksi ini disebut juga reaksi pembentukan klinker. Berikut ini merupakan proses dari pembentukan klinker :

CaCO3 → CaO + CO2 (3.23)

2CaO + SiO2 → (CaO)2.SiO2 (3.24)

CaO.Al2O3 + 2CaO → (CaO)3.Al2O3 (3.25)

CaO.Al2O3 + 3CaO + Fe2O3 → (CaO)4.Al2O3.Fe2O3 (3.26)

(CaO)2.SiO2 + CaO → (CaO)3.SiO2 (3.27)

Komposisi klinker yang keluar ditampilkan pada Tabel 3.3 sebagai berikut :

**Tabel 3.3**Komposisi Klinker

|  |  |
| --- | --- |
| Komponen | % Berat |
| C3A | 9,31 % |
| C4AF | 11,34 % |
| C2S | 18,44 % |
| C3S | 58,05 % |
| Na2O | 0,01 % |
| K2O | 0,41 % |
| L O I | - |
| SO3 | 0,24 % |
| MgO | 1,24 % |
| Impuritis | 0,97 % |
| Total | 100% |

Sumber : Walter, H Duda, Cement Data Book, Macdonald & Even, London, 1985

Senyawa klinker yang terbentuk dapat dihitung dengan menggunakan rumus sesuai persamaan 3.28, 3.29, 3.30, 3.31 dan 3.32.

𝐶3𝑆 = 48% 𝐶𝑎𝑂 + 17% 𝑆𝑖𝑂2 + 0,7% 𝐴𝑙2𝑂3 + 0,5% 𝐹𝑒2𝑂3 + 0,1% 𝑆𝑂3 + 0,1% 𝐾2𝑂 + 0,1% 𝑁𝑎2𝑂 + 0,7% 𝑀𝑔𝑂 (3.28)

𝐶2𝑆 = 5,1% 𝑆𝑖𝑂2 + 0,1% 𝑀𝑔𝑂 + 0,3% 𝐴𝑙2𝑂3 + 0,2% 𝐾2𝑂 + 8,2% 𝐶𝑎𝑂 + 0,1% 𝐹𝑒2𝑂3  (3.29)

𝐶3𝐴 = 0,1% 𝑁𝑎2𝑂 + 0,1% 𝑀𝑔𝑂 + 3,2% 𝐴𝑙2𝑂3 + 0,3% 𝑆𝑖𝑂2 + 4% 𝐶𝑎𝑂 + 0,3% 𝐹𝑒2𝑂3  (3.30)

𝐶4𝐴𝐹 = 0,2% 𝑀𝑔𝑂 + 2,2% 𝐴𝑙2𝑂3 + 0,4% 𝑆𝑖𝑂2 + 5% 𝐶𝑎𝑂 + 2,1% 𝐹𝑒2𝑂3 (3.31)

𝐹𝑟𝑒𝑒𝑙𝑖𝑚𝑒 = 0,9% 𝐶𝑎𝑂 (3.32)

Jumlah mineral *compound clinker* yang terbentuk ditampilkan pada Tabel 3.4 sebagai berikut:

**Tabel 3.4** Komposisi Mineral Compound Clinker

|  |  |
| --- | --- |
| Mineral *compound* yang terbentuk | Persentase (%) |
|
| Alite | 67,2 |
| Belite | 14 |
| Aluminate | 8 |
| Ferrite | 9,9 |
| Free Lime | 0,9 |
| Total | 100 |

Sumber : Walter, H Duda, Cement Data Book, Macdonald & Even, London, 1985

Menurut FLSmidth, 2003, perhitungan massa klinker yang terbentuk dilakukan melalui persamaan 3.33.

M *clinker* = 𝑓*clinker* x *m raw mix* total (3.33)

## 3.6 Perhitungan Neraca Energi

Neraca energi adalah persamaan matematis yang menyatakan hubungan antara energi masuk dan energi keluar suatu sistem yang berdasarkan pada satuan waktu operasi. Energi dapat dipindahkan dalam bentuk panas (Q) atau dalam bentuk kerja (W).

∑ 𝐸𝑖𝑛= ∑ 𝐸𝑜𝑢𝑡 (3.34)

𝑄 + ∑ 𝑚𝑖𝑛ℎ𝑖𝑛 = 𝑊 + ∑ 𝑚𝑜𝑢𝑡ℎ𝑜𝑢𝑡 (3.35)

Keterangan :

Ein: laju energi yang masuk

Eout: laju energi yang keluar

Q : laju panas masuk dikurangi laju panas keluar

W : laju daya keluar dikurangi laju daya masuk

min : massa yang masuk

mout : massa yang keluar

h : entalpi spesifik

Perhitungan neraca energi diasumsikan tidak ada perubahan pada energi kinetik dan potensial selama perpindahan panas. Persamaan neraca energi dapat dilihat berdasarkan persamaan 3.36.

∑ 𝑚𝑖𝑛ℎ𝑖𝑛 = 𝑊 + ∑ 𝑚𝑜𝑢𝑡ℎ𝑜𝑢t (3.36)

Berikut adalah uraian perhitungan neraca energi pada unit *Rotary Kiln* RKC-2 Pabrik Semen.

## 3.6.1 Perhitungan Energi Panas Batubara

Energi Panas Batubara dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.37, 3.38dan 3.39.

𝑄𝑏𝑏 = (𝐻𝑐 × 𝑚) (3.37)

𝐻𝐻𝑉 = 33950 𝐶 + 144200 (𝐻2 − ()) + 9400 𝑆 (3.38)

𝐿𝐻𝑉 = 𝐻𝐻𝑉 − 2400 (𝑀 + 9𝐻2) (3.39)

Keteragan :

𝑄𝑏𝑏 : Panas bahan bakar (kJ/kg bahan bakar)

𝑚 : massa batu bara (kg/h)

## 3.6.2 Perhitungan Panas Sensibel Batubara

Panas sensibel batubara dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.40

𝑄𝑐 = 𝑐𝑐× 𝑚𝑏 × 𝑇𝑏 (3.40)

Keterangan :

cc : panas spesifik batubara (kJ/kg °C) ,cc : 1,2 kJ/kg°C (T = 72 °C)

mb : massa batubara (kg/h)

Tb : temperatur batubara (°C)

## 3.6.3 Perhitungan Panas *Kiln Feed*

Panas *kiln feed* dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.41.

𝑄𝑟𝑚 = 𝑚𝑘𝑓 × 𝑐𝑘𝑓 × 𝑇𝑘𝑓 (3.41)

Keterangan :

Crm : panas spesifik *kiln feed* (kJ/kg°C) , crm : 1,08 kJ/kg°C

mrm : massa *kiln feed* (kg/h)

Trm : temperatur *kiln feed* (°C)

## 3.6.4 Perhitungan Panas dari CaO

Panas dari CaO (*limestone*) dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.42.

𝑄𝐶𝑎𝑂 = 𝑚𝐶𝑎𝑂 × 𝑐𝐶𝑎𝑂 × 𝑇𝐶𝑎𝑂 (3.42)

Keterangan :

CCaO : panas spesifik CaO (kJ/kg°C) , cCaO : 0,87 kJ/kg°C

mCaO : massa CaO (kg/h)

TCaO : temperatur CaO (°C)

## 3.6.5 Perhitungan Panas dari MgO

Panas dari MgO dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.43.

𝑄𝑀𝑔𝑂 = 𝑚𝑀𝑔𝑂 × 𝑐𝑀𝑔𝑂 × 𝑇𝑀𝑔𝑂 (3.43)

Keterangan :

QMgO : panas spesifik MgO (kJ/kg°C), CMgO : 12,01 kJ/kg°C m

MgO : massa MgO (kg/h)

TMgO : temperatur MgO (°C)

## 3.6.6 Perhitungan Panas Udara Pembakaran

Panas udara yang digunakan untuk proses pembakaran dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.44.

𝑄𝑢𝑑𝑎𝑟𝑎 = 𝑚𝑢𝑑𝑎𝑟𝑎 × 𝑐𝑢𝑑𝑎𝑟𝑎× 𝑇𝑢𝑑𝑎𝑟𝑎 (3.44)

Keterangan :

Cudara : panas spesifik udara (kJ/kg°C), Cudara : 1,12 kJ/kg°C

mudara : massa udara (kg/h)

Tudara : temperatur udara (°C)

## 3.6.7 Perhitungan Panas dari Klinker

Panas yang dihasilkan oleh clinker dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.45.

𝑄𝑐𝑙𝑖𝑛𝑘𝑒𝑟 = 𝑚𝑐𝑙𝑖𝑛𝑘𝑒𝑟 × 𝑐𝑐𝑙𝑖𝑛𝑘𝑒𝑟 × 𝑇𝑐𝑙𝑖𝑛𝑘𝑒𝑟 (3.45)

Keterangan :

Cclinker : panas spesifik clinker (kJ/kg°C), cclinker : 1,1 kJ/kg°C

mclinker : massa clinker (kg/h)

Tclinker : temperatur clinker (°C)

## 3.6.8 Perhitungan Panas dariGas Buang Kiln

Panas dari gas buang *kiln* dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.46.

𝑄 = 𝑚𝐶𝑝 (𝑇)𝑑𝑇 (3.46)

Keterangan :

m : massa klinker (kg/h)

cp : kapasitas panas (J/mol K)

T : temperatur (oC)

## 3.6.9 Perhitungan *Losses* Dinding *Kiln Shell*

Kehilangan panas yang terjadi pada dinding *kiln shell* disebabkan oleh dua faktor yaitu radiasi dan konveksi dengan rumus yang dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.47, 3.48 dan 3.49.

**Radiasi**

*heat loss* akibat radiasi dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.47 sebagai berikut :

𝑄𝑟 = 𝜎𝜀𝐴𝑝𝑘(𝑇S4− 𝑇∞4) (3.47)

Keterangan :

Apk : luas permukaan *kiln* yang terdiri atas tabung dan *cone* (m2 )

σ : konstanta Stefan Boltzman = 5,67 x 10-8 W/m2K

ε : emisivitas bahan ; ε = 0,78 (*oxidized surface*)

Ts : temperatur permukaan (K)

T∞ : temperatur lingkungan (K)

**Konveksi**

*heat loss* akibat konveksi dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.48 dan 3.49 sebagai berikut :

𝑄𝑟 = ℎ𝑐𝑜𝑛𝐴𝑝𝑘(𝑇𝑠 − 𝑇~) (3.48)

ℎ𝑚 = (3.49)

Keterangan :

Ts : temperatur permukaan (K)

T∞ : temperatur lingkungan (K)

## 3.7 Perhitungan Neraca Eksergi

Hukum Termodinamika Kedua menyatakan bahwa selain memiliki kuantitas, energi juga memiliki kualitas dan suatu proses yang riil akan berlangsung pada arah kualitas energi yang semakin menurun. Jadi walaupun tidak ada kuantitas energi yang hilang, kualitas energi selalu berkurang selama proses. Besaran dari kualitas energi disebut eksergi. Neraca eksergi dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.50, 3.51 dan 3.52.

∑ 𝐸𝑥𝑖𝑛 − ∑ 𝐸𝑥𝑜𝑢𝑡 = ∑ 𝐸𝑥𝑑𝑒𝑠𝑡 (3.50)

∑ 𝐸𝑥𝑑𝑒𝑠𝑡 = ∑(1 – )𝑄𝑘 − 𝑊 + ∑ 𝑚𝑖𝑛Ψ𝑖𝑛 − ∑ 𝑚𝑜𝑢𝑡Ψ𝑜𝑢𝑡 (3.51)

Ψ = (ℎ − ℎ𝑜) − 𝑇𝑜(𝑠 − 𝑠𝑜) (3.52)

Keterangan :

Exin : laju eksergi masuk

Exout : laju eksergi keluar

Exdest : laju eksergi rusak

To : temperatur lingkungan

Tk : temperatur pada lokasi k

Qk : laju perpindahan panas pada batas Tk dan lokasi k

W : laju kerja

Ψ : aliran eksergi

s : entropi spesifik

so : entropi spesifik pada kondisi To dan Po

## 3.7.1 Perhitungan Eksergi Fisik

Eksergi fisikyaitu eksergi yang berhubungan dengan perubahan tekanan dan temperatur suatu aliran zat. Menurut Bejan, 1996, eksergi fisik dapat dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut :

EPH = m (h-ho) – To (S – So) (3.53)

Keterangan :

E PH : Eksergi Fisik (kW)

m : Laju Fluida (kg/s)

h : Entalpi Fluida (kJ/kg)

ho : Entalpi Lingkungan (kJ/kg)

To : Temperatur Lingkungan (oC)

S : Entropi Fluida (kJ/kg oC)

So : Entropi Lingkungan (kJ/kg oC)

## 3.7.2 PerhitunganEksergi Kimia

Eksergi kimia yaitu eksergi yang berhubungan dengan perubahan senyawa kimia. Menurut Bejan 1996, eksergi kimia dapat dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut :

E CH = m x eCH (3.54)

Keterangan :

ECH : Eksergi Kimia (kW)

m : Laju Fluida (kg/s)

e CH : Nilai Eksergi Molar (kJ/kmol)

## 3.8Analisis Energi dan Eksergi

Ireversibilitas merupakan besaran yang menyatakan jumlah eksergi yang rusak pada sistem tertutup atau jumlah kerja potensial yang terbuang. Untuk sistem dengan efisiensi tinggi, nilai I rendah atau sebaliknya. Jika nilai Ilebih besar dari 0 maka terjadi *ireversibilitas* di dalam sistem. Namun, jika I sama dengan 0 maka tidak terjadi ireversibilitas pada sistem. perhitungan *ireversibilitas* pada sistem tertutup dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.55.

𝐼 = ∑ 𝐸𝑥𝑑𝑒𝑠𝑡 = 𝑇𝑜X𝑠𝑔𝑒n (3.55)

Keterangan :

I : ireversibilitas

To : temperatur lingkungan

sgen : entropi yang dihasilkan sistem proses

Analisis eksergi dilakukan berdasarkan hubungan antara kerja nyata dan kerja maksimal yang dapat diperoleh pada proses *reversibel*. Hal ini dinyatakan pada persamaan 3.56.

Wact = W maks– I (3.56)

Keterangan :

wact : kerja nyata

wmaks : kerja maksimal

I : ireversibilitas

Energi maksimal dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.57.

W maks = ∆Eks = Eksin – Eksout (3.57)

Keterangan :

wmaks : kerja maksimal

Eksin : eksergi masuk

Eksout : eksergi kelu

# *-Halaman IniSengajaDikosongkan-*

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

**4.1 Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban**

Pada penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis energi dan eksergi pada sistem *rotary kiln,* melakukan identifikasi kehilangan energi dan eksergi pada *rotary kiln* serta memperoleh data efisiensi energi dan eksergi pada sistem *rotary kiln*. Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan neraca massa, neraca energi, neraca entropi dan neraca eksergi berdasarkan data yang diperoleh dari Sistem *Rotary Kiln* RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban.

**4.1.1 Data Lapangan**

Data lapangan yang diperoleh dari data *Central Control Room* (CCR) Tuban 1 & 2, data Laboratorium Evaluasi Proses Tuban 1 & 2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban (Persero), Tbk. Pada tanggal 23 April 2019, pukul 13.00 – 15.30 (Rahman dan Rasyid, 2019).

* + 1. **Hasil Analisis Energi Pada Sistem Rotary Kiln**

Perhitungan neraca energi panas pada sistem*rotary kiln* ditunjukkan pada Tabel 4.1, Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 sebagai berikut :

**Tabel 4.1**Neraca Energi Panas Pada *Suspension Preheater*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Aliran Masuk | | Aliran Keluar | |
| Komponen | Hasil (kkal/jam) | Komponen | Hasil (kkal/jam) |
| Feed dari Raw Mill | 2.579.851 | Aliran ke kiln | 87.135.707 |
| Gas hasil pembakaran kiln | 41.054.678 | Aliran ke ID fan | 53.468.700 |
| Udara Tersier | 40.390.382 | Panas latent penguapan air | 3.183.947 |
| Batubara ke kalsiner | 62.771 | Panas hilang | 207.717.398 |
| Reaksi kalsinasi | 131.917.643 |  |  |
| pembakaran Batubara | 135.120.000 |  |  |
| Total | 351.505.752 |  | 351.505.752 |

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa total energi panas yang masuk sebesar 351.505.752 kkal/jam dan energi panas yang keluar sebesar 143.788.354 kkal/jam. Berdasarkan hasil tersebut, terdapat perbedaan antara jumlah energi yang masuk dan keluar. Total energi yang masuk jauh lebih besar daripada energi yang keluar. Selisih antara antara jumlah energi yang masuk dan keluar menunjukkan adanya energi panas yang hilang atau *heat loss* sebesar 207.717.398 kkal/jam.

Blok diagram neraca energi pada *Suspension Preheater* ditampilkan pada Gambar 4.1. Berdasarkan gambar tersebut, energi panas masuk terdiri dari *panas feed* dari raw mill sebesar 2.579.851 kkal/jam, panas udara pembakaran kiln sebesar 41.054.678 kkal/jam, panas udara tersiersebesar 40.390.382 kkal/jam, panas dari batubara sebesar 62.771 kkal/jam,panas dari reaksi kalsinasi sebesar 131.917.643 kkal/jamdan panas sensibel batubara sebesar 135.120.000 kkal/jam. Panas reaksi ini digunakan untuk proses pemanasan awal dan proses pre-kalsinasi.

53.468.700

Suspension Preheater

41.054.678

62.771

2.579.851

40.390.382

Q Raw meal

Q GHP kiln

Q Udara Tersier

Q Batubara

QAliranke ID Fan

Q Alir ke kiln

Qloss

QReaksi Kalsinasi

Q Sensibel Batubara

135.120.000

131.917.643

87.135.707

207.717.398

**Gambar 4.1** Blok Diagram Neraca Energi*Suspension Preheater*

Diagram Sankey yang menunjukkan aliran energi pada *Suspension Preheater* ditunjukkan pada Gambar 4.2. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa energi panas yang masuk paling besar berasal dari energi hasil pembakaran batubara yaitu sebesar 38,45%. Energi yang dihasilkan cukup besar dibandingkan dengan yang lain karena pembakaran batubara membutuhkan jumlah panas yang besar. Energi panas yang paling banyak digunakan adalah energi untuk proses pembakaran batubara yaitu sebesar 38,45 % dari total energi panas yang masuk ke dalam *suspension preheater*.

Q Pembakaran kiln (11,45%) H Pembakaran kiln Pembakaran kiln

Q Batubara (0,12 %) H BatubaraBatubara

Q *Feed* dari *raw mill* (0,73 %)

Q Udara Tersier (11,67 %)

Q Sensibel Batubara (38,45%)

Q Reaksi Kalsinasi (37,51 %)

Q Ke kiln (24,78 %)

Q Loss (59,1 %)

Q ke ID Fan (15,20 %)

***Suspension Preheater***

Q Latent (0,9 %)

**Gambar 4.2** Diagram Sankey Aliran Energi Pada *Suspension Preheater*.

**Tabel 4.2**Neraca Energi Panas Pada *Rotary Kiln*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Aliran Masuk | | Aliran Keluar | |
| Komponen | Hasil (kkal/jam) | Komponen | Hasil (kkal/jam) |
| *Kiln feed* | 87.135.707 | Gas buang | 35.976.043 |
| Udara Sekunder | 28.622.893 | Klinker | 151.243.897 |
| Udara Primer | 11.653 | Panas hilang | 104.448.925 |
| Batubara | 263.281 |  |  |
| Reaksi Klinkerisasi | 99.670.331 |  |  |
| Sensibel Batu Bara | 75.005.000 |  |  |
| Total | 291.708.865 | Total | 291.708.865 |

Berdasarkan Tabel 4.2 dapat diketahui bahwa total energi panas yang masuk sebesar 291.708.865kkal/jam dan energi panas yang keluar sebesar 187.219.940kkal/jam. Berdasarkan hasil tersebut, terdapat perbedaan antara jumlah energi yang masuk dan keluar. Total energi yang masuk jauh lebih besar daripada energi yang keluar. Selisih antara antara jumlah energi yang masuk dan keluar menunjukkan adanya energi panas yang hilang atau *heat loss* sebesar104.448.925 kJ/jam.Berdasarkan penelitian, panas yang hilang terjadi karena tiga faktor yaitu radiasi, konveksi dan konduksi. Perhitungan kehilangan panas karena radiasi, konveksi dan konduksi disampaikan pada Lampiran B. Jumlah panas yang hilang karena radiasi, konveksi dan konduksi masing-masing sebesar 2.694.766 ; 88.903.753 dan 10.709.053 kkal/jam.Persentase kehilangan panas karena faktor radiasi, konveksi dan konduksi masing-masing 0,92%; 30,47% dan 3,67%.

Faktor konduksi bisa terjadi pada permukaan dinding dalam atau luar pada alat *rotary kiln*. Dinding *rotary kiln* dilapisi batu tahan api yang berfungsi untuk menjaga agar lapisan baja pada *rotary kiln* tidak meleleh. Faktor konveksi disebabkan oleh perpindahan panas melalui zat perantara fluida (gas dan cair). Pada proses ini terjadi kontak langsung antara udara panas pembakaran dan material *kiln feed* dalam *rotary kiln* yang dapat menyebabkan kenaikan temperatur disetiap titik pada alat *rotary kiln*. Faktor radiasi disebabkan karena adanya pancaran panas dari tungku atau perapian yang terbuka, sehingga energi panas tersebut lolos ke lingkungan (Rahman dan Rasyid, 2019).

Berdasarkan hasil tersebut, diketahui bahwa faktor kehilangan panas secara konveksi lebih dominan dibandingkan secara radiasi dan konduksi. Total kehilangan energi panas tersebut sebesar 88.903.753 kkal/jam jika dikonversikan menjadi panas pembakaran batubara *low rank coal* setara dengan 545,2 ton batubara per hari. Upaya pemanfaatan energi yang optimum pada *rotary kiln* dapat menghemat konsumsi batubara.

Blok diagram neraca energi pada *rotary kiln* ditampilkan pada Gambar 4.3 Berdasarkan gambar tersebut, energi panas masuk terdiri dari *kiln feed* sebesar 87.135.707 kkal/jam, panas udara pembakaran primer dan sekunder sebesar 28.634.546 kkal/jam, panas dari batubara sebesar 263.281 kkal/jam, panas dari reaksi klinkerisasi sebesar 99.670.331 kkal/jam dan panas sensibel batubara sebesar 75.005.000 kkal/jam. Panas reaksi klinkerisasi digunakan untuk pembentukan senyawa C4AF, C3A, C2S dan C3S.

35.976.043 kkal/jam

Rotary Kiln

28.622.893 kkal/jam

263.281kkal/jam

87.135.707 kkal/jam

11.653 kkal/jam

Q*Kiln feed*

QUdara Sekunder

QUdara Primer

QBatubara

Q Gas buang

QKlinker

Qloss

QReaksi Klinkerisasi

Q Sensibel Batubara

75.005.000 kkal/jam

99.670.331kkal/jam

151.243.897kkal/jam

104.448.925kkal/jam

**Gambar 4.3** Blok Diagram Neraca Energi *Rotary Kiln*

Berdasarkan Gambar 4.3 sebesar 187.219.940 kkal/jammerupakan jumlah panas yang keluar dari *rotary kiln*. Energi panas sebesar 151.243.897kkal/jam digunakan untuk proses pembentukan klinker. Sedangkan energisebesar 35.976.043 kkal/jam dalam bentuk gas buang. Panas dari gas buangan diumpankan kembali menuju ke *Suspension Preheater* sebagai udara pemanasan awal *kiln feed*. Selain itu, terdapat panas yang hilang atau *heat loss* sebesar 104.448.925 kkal/jam. Berdasarkan hasil perhitungan diatas, menunjukkan bahwa energi pembentukan klinker merupakan energi yang paling banyak digunakan dalam *rotary kiln*. Berdasarkan penelitian yang telah kami lakukan, diperoleh nilai energi yang dibutuhkan untuk memproduksi 1 ton klinker adalah sebesar 441.864kkal. Menurut data dari *(cement data book)*, energi yang dibutuhkan dalam proses produksi 1 ton klinker adalah minimal 429.922kkal.

Diagram Sankey sistem *rotary kiln* disampaikan pada Gambar 4.4 Berdasarkan Gambar tersebut energi *input* paling besar berasal dari energi dari proses klinkerisasi yaitu sebesar 34,16%. Energi yang dihasilkan cukup besar karena pada kiln terjadi reaksi eksotermis pada batubara dan udara sehingga melepas panas dari sistem kelingkungan.

*Heat loss* pada *rotary kiln* adalah 35,06% sedangkan pada *suspension preheater* adalah 59,1% sehingga efisiensi energi pada *rotary kiln* lebih besar dari pada *suspension preheater*. *Heat loss* pada *suspension preheater* terjadi reaksi kalsinasi sebesar 85% yaitu pada proses tersebut membutuhkan energi yang cukup besar (Mahmud, 2018). Berdasarkan penelitian Engin, 2002, efisiensi sistem kiln yang optimal sebesar 50%.

Q Udara Sekunder (9.81 %)

Q Batubara (0,09 %)

Q *Kiln feed* (29.87 %)

Q Udara Primer (0,004 %)

Q Sensibel Batubara (26,06 %)

Q Reaksi Klinkerisasi(34,16%) %)

Q Klinker (52,6 %)

Q Loss (35,06 %)

Q Gas Buang (12,33 %)

***Rotary Kiln***

**Gambar 4.4** Diagram Sankey Aliran Energi Pada *Rotary Kiln*.

**Tabel 4.3**Neraca Energi Panas Pada *GrateCooler*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Aliran Masuk | | Aliran Keluar | |
| Komponen | Hasil (kkal/jam) | Komponen | Hasil (kkal/jam) |
| *Clinker* dari kiln | 151.243.897 | Udara tersier | 39.875.855 |
| Udara masuk | 760.075 | Udara sekunder | 28.622.893 |
|  |  | Menuju ke EP | 14.569.525 |
|  |  | Ke *roller crusher* | 9.153.816 |
|  |  | Panas hilang | 59.781.884 |
| Total | 153.003.973 | Total | 153.003.973 |

Berdasarkan Tabel 4.3 dapat diketahui bahwa total energi panas yang masuk sebesar 153.003.973 kkal/jam dan energi panas yang keluar sebesar 92.222.089 kkal/jam. Berdasarkan hasil tersebut, terdapat perbedaan antara jumlah energi yang masuk dan keluar. Total energi yang masuk jauh lebih besar daripada energi yang keluar. Selisih antara antara jumlah energi yang masuk dan keluar menunjukkan adanya energi panas yang hilang atau *heat loss* sebesar 59.781.884 kkal/jam.

Blok diagram neraca energi pada *Cooler* ditampilkan pada Gambar 4.5Berdasarkan gambar tersebut, energi panas masuk terdiri dari panasklinker dari kiln sebesar 151.243.897 kkal/jam, panas udara masuk cooler sebesar 3.180.232 kJ/jam

28.622.893

Q Udara Sekunder

39.875.855

Q Udara tersier

14.569.525

Grate Cooler

151.243.897

760.075

Q Klinker dari kiln

Q Udara masuk

Q ke EP

Q Ke roller crusher

Qloss

9.153.816

59.781.884

**Gambar 4.5** Blok Diagram Neraca EnergiGrate *Cooler*

Diagram Sankey yang menunjukkan aliran energi pada *Grate Cooler* ditunjukkan pada Gambar 4.6 Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa energi panas yang masuk paling besar berasal dari energi hasil dari proses pembentukan klinker yaitu sebesar 99,50 % dari total energi panas yang masuk ke dalam *Grate Cooler.*

Q Udara Masuk (0,5 %)

Q klinker dari kiln (99,50 %)

Q Ke roller crusher (5,93 %)

Q Loss(40,20 %)

Q ke EP(9,44 %)

***Grate Cooler***

Q Udara tersier(25,85 %)

Q Udara sekunder(18,55 %)

**Gambar 4.6** Diagram Sankey Aliran Energi Pada *Grate Cooler*.

**4.1.3 Pengaruh LajuAlir Massa Produk KlinkerTerhadap Efisiensi Energi**

Hasil yang didapatkan dari penelitian inidiperoleh berdasarkan data *daily report* PT.Semen Gresik Pabrik Tuban. Data yang digunakan dalam perhitungan adalah data-data *inlet dan outlet* dari sitem *rotary kiln.* Penelitian ini menggunakan variabel bebas dan variabel tetap. Variabel bebas yang digunakan adalah laju alir batubara dan laju alir massa produk klinker. Hubungan pengaruh variabel laju alir massa produk klinker ditunjukkan pada Gambar 4.7.

Berdasarkan Gambar 4.7 pada rentang laju alir massa 320 – 352 ton/jam.Pada sistem *rotary kiln* semakin tinggi laju alir massa produk klinker maka efisiensi energi semakin tinggi. Efisiensi energi tertinggi terdapat pada laju alir massa produk klinker sebesar 351.919,77 kg/jam dengan nilai efisiensi energi 88,58 %. Sedangkan pada unit *rotary kiln* semakin tinggi laju alir massa produk klinker maka efisiensi energi semakin tinggi. Efisiensi energi tertinggi terdapat pada laju alir massa produk klinker sebesar 351.919,77 kg/jam dengan nilai efisiensi energi 68,44%. Semakin tinggi laju alir produk klinker maka pemanfaatan panas hasil pembakaran batubara semakin optimal sehingga kehilangan energi semakin rendah dan efisiensi energi semakin tinggi.

Kapasitas desain *rotary kiln* adalah 352 ton/jam. Hal ini menunjukkan, pada proses produksi klinker dengan kapasitas produksi yang mendekati kapasitas desain memiliki nilai efisiensi energi tinggi. Efisiensi energi pada sistem *rotary kiln* memiliki nilai lebih tinggi dari pada unit *rotary kiln* hal ini dikarenakan adanya pemanfaatan energi gas *outlet suspension preheater* dan gas *outlet grate cooler* sehingga dapat meningkatkan kinerja proses dengan menghubungkan ke sistem itu sendiri untuk proses pemanasan ( Jijesh, 2015).

**Gambar 4.7** Kurva Hubungan Laju Alir Massa Produk Klinker dan Efisiensi Energi.

**4.1.4 Pengaruh LajuAlir Massa Batubara Terhadap Efisiensi Energi**

Kurva hubungan pengaruh efisiensi energi terhadap laju alir batubara ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan 4.9. Gambar 4.8 merupakan kurva hubungan antara laju alir batubara dan efisiensi energi pada unit *rotary kiln* dengan variasi laju alir batubara 16,87 hingga 20,62 ton/jam. Gambar 4.9 merupakan kurva hubungan antara laju alir batubara dan efisiensi energi pada sistem *rotary kiln* dengan variasi laju alir batubara 46,87 ton/jam hingga 50,62 ton/jam. Berdasarkan Gambar 4.8 pada unit *rotary kiln* semakin tinggi laju alir batubara maka efisiensi energi semakin rendah. Efisiensi energi tertinggi terdapat pada laju alir batubara sebesar 16.875 kg/jam dengan nilai efisiensi energi 64,93%. Gambar 4.9 menunjukkan pada sistem *rotary kiln* semakin tinggi laju alir batubara maka efisiensi energi juga semakin rendah. Laju alir batubara sebesar 46,88 kg/jam menghasilkan efisiensi energi paling tinggi yaitu 79,4%. Hal ini menunjukkanpada proses produksi semen dengan laju alir batubara minimum yang sesuai dengan kapasitas desain akan menghasilkan efisiensi energi yang maksimum.

**Gambar 4.8** Kurva Hubungan Laju Alir Batubara dan Efisiensi Energi

Pada Unit Kiln

**Gambar 4.9** Kurva Hubungan Laju Alir Batubara dan Efisiensi Energi

Pada Sistem Kiln

Batubara yang digunakan pada *coal mill* RKC-2 yaitu *low rank coal* dengan nilai *Net Calorific Value* 4504 kkal/kg batubara. Batubara ini memiliki kandungan air tinggi sebesar 14,88%. Pada proses pembakaran batubara *low rank coal* terdapat kebutuhan energi untuk penguapan air selain energi pembakaran batubara. Semakin rendah laju alir batubara maka kebutuhan energi untuk penguapan air selain pembakaran batubara juga akan semakin rendah sehingga nilai *heatloss* yang terjadi juga akan semakin rendah. Sebaliknya jika laju alir batubara semakin tinggi maka kebutuhan energi pada pembakaran batubara juga akan meningkat dan *heatloss* yang terjadi semakin banyak sehingga efisiensi energi pada sistem *rotary kiln* semakin tinggi. Berdasarkan perhitungan diperoleh indeks batubara sebesar 0,133. Hal ini berarti setiap produksi 1 ton klinker/jam jumlah kebutuhan batubara adalah 0,133 ton/jam.

Selain pengaruh dari jenis batubara, terdapat adanya faktor lain yaitu excess udara. Pembakaran batubara terjadi karena reaksi yang sangat cepat antara bahan bakar batubara dengan udara. Karbon dioksida yang terbentuk setara dengan kadar karbon yang terkandung dalam batubara, karena karbon membutuhkan oksigen untuk terbakar. Tingginya udara pembakaran menyebabkan kebutuhan O2 untuk pembakaran juga semakin tinggi. Kebutuhan O2 pembakaran dapat meningkatkan jumlah excess udara yang masuk. Semakin rendahnya temperatur yang dihasilkan pada proses pembakaran berpotensi meminimalisir produksi NOx yang merupakan gas beracun (Wicaksono dkk., 2017). Semakin tinggi jumlah excess udara maka akan semakin banyak energi panas hasil pembakaran yang terbuang. Sehingga penambahan excess udara baik pada laju alir batubara minimum dengan efisiensi energi tertinggi. Didapatkan hasil penelitian pada laju alir batubara minimum sebesar 46,88 ton/jam menghasilkan efisiensi energi paling tinggi yaitu 79,4%.

**4.1.5Hasil Analisis Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln**

Eksergi didefinisikan sebagai potensi pengggunaan kerja (work) maksimum dalambentuk materi (Cengel, 2005). Potensi kerja ini diperoleh melalui proses reversibel.Eksergi dapat ditransfer di antara sistem dan dapat dihancurkan oleh irreversibilitasdi dalam sistem. eksergi berhubungan dengan kerja ideal (ideal work), sehingga besar kerugian eksergi juga berhubungan dengan besar kehilangan kerja (*work*) pada sistem (Truls,2009). Perhitungan neraca eksergi pada sistem *rotary kiln* ditunjukkan pada Tabel 4.4, Tabel 4.5 dan Tabel 4.6.

Komponen neraca eksergi pada alat *Suspension Preheater* terdiri dari eksergi yang masuk berupa eksergi panas batubara, eksergi panas *kiln dari raw mill* dan eksergi panas udara untuk pembakaran. Eksergi yang keluar meliputi eksergi panas klinker dan keluar ID Fan. Hasil perhitungan eksergi yang meliputi eksergi fisik dan kimia ditunjukkan pada Tabel 4.4. Perhitungan neraca eksergi fisik dan kimia disampaikan pada Lampiran C.

**Tabel 4.4**Neraca Eksergi Total Pada *Suspension Preheater*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Aliran Masuk | | Aliran Keluar | | |
| Komponen | Hasil (kkal/jam) | Komponen | Hasil (kkal/jam) | |
| Feed dari Raw Mill | 48.826.644 | Aliran ke kiln | | 178.377.154 |
| Gas hasil pembakaran kiln | 30.098.173 | Aliran ke ID fan | | 50.203.806 |
| Udara Tersier | 22.835.771 | Eksergi rusak | | 127.433.605 |
| Batubara | 254.253.975 |  | |  |
| Total | 356.014.565 |  | | 356.014.565 |

Berdasarkan Tabel 4.4 total eksergi panas yang masuk sebesar 356.014.565 kkal/jam dan total eksergi panas yang keluar sebesar 228.580.960 kkal/jam. Eksergi input memiliki nilai yang lebih besar dari nilai eksergi output, berdasarkan hasil tersebut, terdapat perbedaan antara jumlah eksergi yang masuk dan keluar. Hal ini Karena adanya eksergi yang rusak atau yang biasa disebut dengan eksergi destruksi yaitu sebesar 127.433.605 kkal/jam. Eksergi merupakan ukuran kualitas energi yang dapat dimusnahkan dalamsistem termal karena sifat ireversibilitas. Hukum termodinamika keduamenggunakan neraca eksergi dalam analisis sistem termal. Eksergi dapat dimusnahkan, pemushanan eksergi merupakan derajat ketidakaturan sistem atau entropi (Regulagadda dkk, 2010).

Blok diagram perhitungan neraca eksergi pada *Suspension Preheater* disampaikan pada Gambar 4.10. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa aliran eksergi panas yang masuk ke alat *Suspension Preheater* meliputi eksergi panas *Feed dari Raw Mill* sebesar 48.826.644 kkal/jam, eksergi panas dari gas pembakaran kiln sebesar 30.098.173 kkal/jam, eksergi panas udara tersier sebesar 22.835.771 kkal/jam dan eksergi panas batubara sebesar 254.253.975 kkal/jam. Sedangkan eksergi panas yang keluar meliputi eksergi panas keluar ID Fan sebesar 50.203.806 kkal/jam, eksergi panas keluar kiln sebesar 178.377.154 kkal/jam dan eksergi panas yang rusak sebesar 127.433.605 kkal/jam.

254.253.975

22.835.771

127.433.605

30.098.173

48.826.644

178.377.154

50.203.806

Suspension Preheater

EX*Feed dari Raw mill*

Ex Pembakaran kiln

EXUdaratersier

EXBatubara

EX ID fan

EX Ke kiln

EXDestruksi

**Gambar 4.10**Blok Diagram Aliran Eksergi *Suspension Preheater*

Berdasarkan Gambar 4.9 diatas, dapat ditunjukkan aliran eksergi pada *Suspension Preheater* ditunjukkan dalam diagram Sankey seperti tampak pada Gambar 4.11.

***Suspension Preheater***

EX Batubara (71,4 %)

EX Aliran ke kiln (50,1 %)

EX Aliran ke ID Fan (14,1 %)

EX Destruksi (35,79 %)

EX *Feed dari Raw mill* (13,7 %)

Ex Gas Pembakaran kiln (8,45 %)

EX Udara Tersier (6,4 %)

**Gambar 4.11** Diagram Sankey Aliran Eksergi Pada *Suspension Preheater*

Berdasarkan Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa eksergi panas yang masuk paling besar berasal dari eksergi batubara yaitu sebesar 71,4 % hal ini dikarenakan batubara digunakan untuk proses pembakaran dalam kiln. Total eksergi panas secara fisik dan kimia yang masuk ke dalam *suspension preheater* dengan eksergi panas yang keluar paling banyak digunakan adalah eksergi menuju ke kiln yaitu sebesar 50,1% .

Komponen neraca eksergi pada alat *suspension preheater* terdiri dari eksergi yang masuk berupa eksergi panas batubara, eksergi udara tersier, eksergi panas gas dari pembakaran kiln dan eksergi panas produk *raw mill*. Eksergi yang keluar meliputi eksergi panas aliranke kiln dan eksergi panas aliran ke ID fan. Hasil perhitungan eksergi yang meliputi eksergi fisik dan kimia ditunjukkan pada Tabel 4.5. Perhitungan neraca eksergi fisik dan kimia disampaikan pada Lampiran C.

**Tabel 4.5**Neraca Eksergi Total Pada *Rotary Kiln*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Aliran Masuk | | Aliran Keluar | |
| Komponen | Hasil (kkal/jam) | Komponen | Hasil (kkal/jam) |
| *Kiln feed* | 178.378.588 | Gas buang | 27.275.270 |
| Udara Sekunder | 17.641.839 | Klinker | 132.448.848 |
| Udara Primer | 111.612 | Eksergi rusak | 179.421.471 |
| Batubara | 143.013.549 |  |  |
| Total | 339.145.588 | Total | 339.145.588 |

Berdasarkan Tabel 4.5 dapat diketahui bahwa total eksergi panas yang masuk sebesar 339.145.588 kkal/jam dan eksergi panas yang keluar sebesar 159.724.118 kkal/jam. Eksergi *input* memiliki nilai yang lebih besar dari nilai eksergi *output*, berdasarkan hasil tersebut, terdapat perbedaan antara jumlah eksergi yang masuk dan keluar. Hal ini Karena adanya eksergi yang rusak atau yang biasa disebut dengan eksergi destruksi yaitu sebesar179.421.471 kkal/jam.

Blok diagram perhitungan neraca eksergi pada *rotary kiln* disampaikan pada Gambar 4.12. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa aliran eksergi panas yang masuk ke *rotary kiln* terdiri dari eksergi panas *Kiln Feed* sebesar 178.378.588 kkal/jam, eksergi panasbatubara sebesar 143.013.549 kkal/jam, eksergi panas udara sekunder sebesar 17.641.839 kkal/jam dan eksergi panas udara primer sebesar 111.612 kkal/jam. Sedangkan eksergi panas yang keluar meliputi eksergi panas gas buang yang dialirkan kembali menuju ke *Suspension Preheater* sebagai udara pemanasan awal *kiln feed* sebesar 27.275.270 kkal/jam, eksergi panas pembentukan klinker sebesar 132.448.848 kkal/jam dan eksergi panas yang rusak sebesar 179.421.471kkal/jam.

27.275.270

Rotary Kiln

17.641.839

143.013.549

178.378.588

11.612

EX*Kiln feed*

EXUdara Sekunder

EXUdara Primer

EXBatubara

EX Gas buang

EXKlinker

EXDestruksi

132.448.848

179.421.471

**Gambar 4.12** Blok Diagram Aliran Eksergi *Rotary Kiln*

Berdasarkan Gambar 4.11 diatas, dapat ditunjukkan aliran eksergi pada *rotary kiln* ditunjukkan dalam diagram Sankey seperti tampak pada Gambar 4.13.

***Rotary Kiln***

EX Udara Sekunder (5,20 %)

EX Batubara (42,17 %)

EX*Kiln feed* (52,60 %)

EX Udara Primer (0,03 %)

EX Klinker (39,05 %)

EXDestruksi (52,9 %)

EX Gas Buang (8,04 %)

**Gambar 4.13** Diagram Sankey Aliran Eksergi Pada *Rotary Kiln*

Berdasarkan Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa eksergi panas yang masuk paling besar berasal dari eksergi *kiln feed* yaitu sebesar 52,60 %. Nilai tersebut paling besar jika dibandingkan aliran *inlet* yang lain. Hal ini menunjukkan pemanfaatan paling besar pada sistem *rotary kiln* untuk pembentukkan klinker dalam *rotary kiln*. Total eksergi panas secara fisik dan kimia yang masuk ke dalam *rotary kiln* dengan eksergi panas yang keluar paling banyak digunakan adalah eksergi untuk pembentukan klinker yaitu sebesar 39,05% .

Komponen neraca eksergi pada alat *Cooler* terdiri dari eksergi yang masuk berupa eksergi panas klinker, eksergi panas panas udara yang masuk . Eksergi yang keluar meliputi eksergi panas udara tersier,eksergi panas udara sekunder, eksergi panas menuju ke EP, dan eksergi panas menuju ke *roller crusher*. Hasil perhitungan eksergi yang meliputi eksergi fisik dan kimia ditunjukkan pada Tabel 4.6. Perhitungan neraca eksergi fisik dan kimia disampaikan pada Lampiran C.

**Tabel 4.6** Neraca Eksergi Total Pada *Grate Cooler*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Aliran Masuk | | Aliran Keluar | |
| Komponen | Hasil (kkal/jam) | Komponen | Hasil (kkal/jam) |
| *Clinker* dari kiln | 132.448.848 | Udara tersier | 22.463.719 |
| Udara masuk | 7.279.845 | Udara sekunder | 17.641.839 |
|  |  | Menuju ke EP | 7.396.665 |
|  |  | Ke roller crusher | 42.089.903 |
|  |  | Eksergi rusak | 50.136.565 |
| Total | 139.728.693 | Total | 139.728.693 |

Berdasarkan Tabel 4.6 total eksergi panas yang masuk sebesar 139.728.693 kkal/jam dan total eksergi panas yang keluar sebesar 89.592.128 kkal/jam. Eksergi *input* memiliki nilai yang lebih besar dari nilai eksergi *output,* berdasarkan hasil tersebut, terdapat perbedaan antara jumlah eksergi yang masuk dan keluar. Hal ini Karena adanya eksergi yang rusak atau yang biasa disebut dengan eksergi destruksi yaitu sebesar 50.136.565 kkal/jam.

Blok diagram perhitungan neraca eksergi pada *grate cooler* disampaikan pada Gambar 4.14. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa aliran eksergi panas yang masuk ke alat *grate cooler* meliputi eksergi panas dari klinker sebesar 132.448.848 kkal/jam, dan eksergi panas udara masuk sebesar 7.279.845 kkal/jam. Sedangkan eksergi panas yang keluar meliputi eksergi panas ke EP sebesar 7.396.665 kkal/jam, eksergi panas ke *rollrer crusher* sebesar 42.089.903 kkal/jam, eksergi panas udara sekunder sebesar 17.641.839 kkal/jam dan eksergi panas tersier sebesar 22.463.719 kkal/jam.

42.089.903

50.136.565

7.279.845

7.396.665

22.463.719

22.463.719

132.448.848

Ex Udara sekunder

Ex Udara tersier

Grate Cooler

ExKlinker

Ex Udara masuk

Ex ke EP

Ex Ke roller crusher

ExDest

**Gambar 4.14** Blok Diagram Aliran Eksergi *Grate Cooler*

Berdasarkan Gambar 4.14 diatas, dapat ditunjukkan aliran eksergi pada *Cooler*  ditunjukkan dalam diagram Sankey seperti tampak pada Gambar 4.15.

Ex Udara Masuk(5,2 %)

Ex klinker dari kiln(94,7 %)

Ex Ke roller crusher (30,12 %)

***Cooler***

Ex ke EP (5,29 %)

Ex Destruksi (35,88 %)

Ex Udara tersier (16,07%)

Ex Udara sekunder (12,62 %)

**Gambar 4.15** Blok Diagram Aliran Eksergi *Grate Cooler*

Berdasarkan Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa eksergi panas yang masuk paling besar berasal dari eksergi produk klinker yaitu sebesar 94,7 % yang diperoleh dari panas pembakaran dari *rotary kiln*. Total eksergi panas secara fisik dan kimia yang masuk kedalam *rotary kiln* dengan eksergi panas yang keluar paling banyak digunakan adalah eksergi menuju ke *roller crusher* yaitu sebesar 30,12%.

**4.1.6 Pengaruh Laju Alir Massa Produk Klinker Terhadap Efisiensi Eksergi**

Perhitungan efisiensi eksergi pada sistem *rotary kiln* disampaikan pada Lampiran C. Berdasarkan hasil perhitungan nilai efisiensi eksergi pada sistem *rotary kiln* adalah sebesar 57,24 % pada saat laju aliran batubara 46,88 ton/jam dan laju aliran massa produk klinker yang keluar *rotary kiln* 351,91 ton/jam. Berdasarkan hasil perhitungan nilai efisiensi eksergi, kemudian diperoleh hubungan antara laju alir massa produk klinker dengan efisiensieksergi yang ditunjukkan pada Gambar 4.16. Berdasarkan Gambar 4.16, semakin besar laju alir massa produk klinker yang dihasilkan maka nilai eksergi destruksi semakin tinggi. Hal ini karena pada proses produksi semen dengan laju alir massa klinker maksimum sesuai dengan kapasitas desain. Oleh karena itu, proses produksi klinker pada kapasitas produksi yang mendekati kapasitas desain akan menambah nilai efisiensi eksergi dan mengurangi jumlah eksergi panas yang rusak.

**Gambar 4.16** Kurva Hubungan Antara Laju Massa Produk Klinker

dan Efisiensi Eksergi

**4.1.7 Pengaruh Laju Alir Massa Batubara Terhadap Efisiensi Eksergi**

Kurva hubungan antara laju alir massa batubara dengan efisiensi eksergi yang ditunjukkan pada Gambar 4.17 dan 4.18. Gambar 4.17 merupakan kurva hubungan antara laju alir batubara dan efisiensi ekergi pada unit *rotary kiln* dengan variasi laju alir batubara 16,87 hingga 20,62 ton/jam. Dapat dilihat pada grafik semakin besar laju alir batubara maka nilai efisiensi eksergi semakin rendah. Gambar 4.18 merupakan kurva hubungan antara laju alir batubara dan efisiensi ekergi pada sistem *rotary kiln* dengan variasi laju alir batubara 46,88 hingga 50,63 ton/jam. Berdasarkan hasil perhitungan nilai efisiensi eksergi pada sistem *rotary kiln* tertinggi sebesar 57,24% pada saat laju aliran batubara 46,88 ton/jam. Hal ini menunjukkan pada proses produksi semen dengan laju alir batubara minimum yang sesuai dengan kapasitas desain akan menghasilkan efisiensi eksergi yang maksimum. Sehingga penggunaan batubara yang minimum dapat mengurangi biaya produksi pada pembuatan semen. Perbandingan hasil analisis eksergi berdasarkan unit kiln dan sistem kiln didapatkan eksergi pada sistem kiln lebih besar dibandingkan dengan unit kiln. Untuk meminimalkan eksergi maka dapat dilakukan dengan pemanfaatan gas buang dari kiln dan *cooler* untuk pemansan awal di *suspension preheater*, selain itu pemanfaatan gas *outlet cooler* yang bisa digunakan pada *raw mill* dan *finish mill*.

**Gambar 4.17** Kurva Hubungan Antara Laju Massa Alir Batubara

dan Efisiensi Eksergi Pada Unit *Rotary Kiln*

**Gambar 4.18** Kurva Hubungan Antara Laju Massa Alir Batubara

dan Efisiensi Eksergi Pada Sistem *Rotary Kiln*

* 1. **Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln RKC-4 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban**

Perhitungan analisis energi dan eksergi pada sistem *rotary kiln* RKC-4 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban digunakan untuk melakukan perbandingan dengan sistem *rotary kiln* RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban. Sistem *rotary kiln* RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban memiliki perbedaan dengan sistem *rotary kiln* RKC-4. Sistem*rotary kiln* RKC-2 memiliki dua buah *calciner* sedangkan sistem *rotary kiln* RKC-4 memiliki satu buah *calciner*.

Perhitungan neraca massa, energi dan eksergi pada unit *preheater* ditampilkan pada Tabel 4.7. Berdasarkan Tabel 4.7energi total yang masuk sama dengan energi yang keluar dari *rotary kiln* yaitu sebesar 228.921.194 kkal/jam. Total energi masuk sebesar 228.921.194 kkal/jam digunakan untuk energi pemanasan *raw meal,* gas gas hasil pembakaran dan panas yang hilang atau *heat loss*. *Heat loss* pada *suspension preheater* disebabkan karena adanya perpindahan panas konveksi, konduksi maupun radiasi. Panas konveksi terjadi karena adanya aliran udara dipermukaan unit *suspension preheater* sehingga menyerap panas dari *suspension preheater*. Panas konduksi disebabkan karena adanya debu maupun kerak yang menempel pada permukaan unit *suspension preheater*, sehingga debu dan kerak yang menempel menyerap panas dari permukaan unit *suspension preheater*. Panas radiasi terjadi karena adanya perbedaan suhu yang cukup besar antara permukaan *suspension preheater* dengan lingkungan sekitarnya (Ayuningrum, 2013).

Eksergi input dan eksergi output pada unit *suspension preheater*mempunyai nilai yang tidak sama yaitu 234.917.827kJ/kg pada eksergi masuk dan 194.216.143 kkal/kg pada eksergi keluar. Eksergi input memiliki nilai yang lebih besar dari nilai eksergi output, hal ini Karena adanya eksergi yang rusak atau yang biasa disebut dengan eksergi destruksi.

**Tabel 4.7** Neraca Massa, Energi dan Eksergi dari *suspensionPreheater*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Input | Massa (kg/jam) | Temperatur (K) | Energi (kkal/jam) | Eksergi (kkal/jam) |
| Raw meal | 560.000 | 323 | 2.854.088 | 39.280.955 |
| Udara tersier | 117.371 | 1171 | 25.485.660 | 16.472.761 |
| Batu bara | 16.090 | 343 | 285.571 | 138.462.427 |
| Panas kalsinasi | - | - | 130.014.755 | - |
| Panas reaksi batubara | - | - | 70.281.120 | - |
| Total | 693.461 |  | 228.921.194 | 234.917.827 |
| Output |  | | | |
| Produk SP | 337.505 | 1173 | 84.351.178 | 174.111.435 |
| GHP | 129.446 | 663 | 7.410.095 | 35.177.329 |
| CO2 hasil kalsinasi | 165.286 | 663 | 14.196.808 | 22.405.735 |
| O2 sisa GHP | 738 | 663 | 61.899 | 43.377 |
| Uap H2O | 2.184 | 663 | 368.415 | 403.190 |
| N2 di batu bara | 138 | 663 | 12.748 | 5.239 |
| H2O di batu bara | 2.381 | 663 | 907.275 | 343.362 |
| Debu keluar SP | 55.781 | 663 | 4.862.970 | 2.428.160 |
| Panas laten | - | - | 2.598.191 | - |
| Heat loss | - | - | 114.151.615 | - |
| Total | 693.461 |  | 228.921.194 | 194.216.143 |

Perhitungan neraca massa, energi dan eksergi pada unit *rotary kiln*ditampilkan pada Tabel 4.8.Berdasarkan Tabel 4.8energi total yang masuk sama dengan energi yang keluar dari *rotary kiln* yaitusebesar 299.015.599 kkal/jam. Total energi masuk sebesar 299.015.599 kkal/jam digunakan untuk energi pembentukan *clinker,* gas buang dan panas yang hilang atau *heat loss*. *Heat loss* merupakan Selisih antara jumlah energi yang masuk dan keluar. Panas yang hilang terjadi karena tiga faktor yaitu konveksi, konduksi dan radiasi. Faktor konveksi disebabkan oleh perpindahan panas melalui zat perantara fluida (gas dan cair). Pada proses ini terjadi kontak langsung antara udara panas pembakaran dan material *kiln feed* dalam *rotary kiln* yang dapat menyebabkan kenaikan temperatur disetiap titik pada alat *rotary kiln*. Faktor konduksi bisa terjadi pada permukaan dinding dalam atau luar pada alat *rotary kiln*. Dinding *rotary kiln* dilapisi batu tahan api yang berfungsi untuk menjaga agar lapisan baja pada *rotary kiln* tidak meleleh. Faktor radiasi disebabkan karena adanya pancaran panas dari tungku atau perapian yang terbuka, sehingga energi panas tersebut lolos ke lingkungan (Rahman dan Rasyid, 2019).

Tabel 4.8 menunjukkan adanya selisih antara eksergi yang masuk dan eksergi yang keluar. Eksergi yang masuk yaitu bernilai 368.549.790 kkal/jam dan eksergi yang keluar bernilai 156.585.373 kkal/jam. Selisih antara jumlah eksergi yang masuk dan keluar menunjukkan adanya eksergi yang rusak atau yang biasa disebut dengan eksergi destruksi.

**Tabel 4.8** Neraca Massa, Energi dan Eksergi dari *rotary kiln*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *Input* | Massa (kg/jam) | Temperatur (K) | Energi (kkal/jam) | Eksergi (kkal/jam) |
| Produk SP | 337.505 | 1623 | 84.351.178 | 166.320.638 |
| Batubara | 23.500 | 343 | 556.464 | 202.229.152 |
| Udara sekunder | 155.336 | 1.171 | 35.208.013 | 20.449.597 |
| Udara primer | 20.928 | 303 | 25.018 | 227.751 |
| Panas reaksi pembentukan | - | - | 91.418.829 | - |
| Panas batubara | - | - | 87.456.097 | - |
| Total |  |  | 299.015.599 | 368.549.790 |
| *Output* |  | | | |
| Klinker | 324.385 | 1.292 | 139.337.707 | 122.082.705 |
| GHP | 192.884 | 1.171 | 47.132.965 | 30.468.710 |
| CO2 hasil kalsinasi | 11.603 | 1.171 | 2.786.128 | 2.711.641 |
| O2 sisa GHP | 2.095 | 1.171 | 462.695 | 308.634 |
| N2 di batubara | 202 | 1.171 | 47.563 | 26.533 |
| H2O di batubara | 3.478 | 373 | 263.407 | 69.995 |
| Debu terbawa udara | 2. 620 | 1.171 | 564.469 | 917.155 |
| Heat loss | - | - | 108.431.001 | - |
| Total |  |  | 299.015.599 | 156.585.373 |

Perhitungan neraca massa, energi dan eksergi pada unit *cooler* ditampilkan pada Tabel 4.9. Berdasarkan Tabel 4.9energi total yang masuk sama dengan energi yang keluar dari *cooler* yaitusebesar 140.194.538 kkal/jam. Total energi masuk sebesar 140.194.538 kkal/jam digunakan untuk energi *clinker* keluar *cooler,* udara primer, udara sekunder, udara ke *raw mill* dan *finish mill* dan panas yang hilang atau *heat loss*.

Tabel 4.9 menunjukkan adanya selisih antara eksergi yang masuk dan eksergi yang keluar. Eksergi yang masuk yaitu bernilai 129.637.287 kkal/jam dan eksergi yang keluar bernilai 96.464.790 kkal/jam. Selisih antara jumlah eksergi yang masuk dan keluar menunjukkan adanya eksergi yang rusak atau yang biasa disebut dengan eksergi destruksi.

**Tabel 4.9** Neraca Massa, Energi dan Eksergi dari *cooler*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *Input* | Massa (kg/jam) | Temperatur (K) | Energi (kkal/jam) | Eksergi (kkal/jam) |
| Klinker | 324.385 | 1.292 | 139.342.006 | 122.082.704 |
| Udara masuk | 694.184 | 303 | 852.532 | 7.554.583 |
| Total |  |  | 140.194.538 | 129.637.287 |
| *Output* |  | | | |
| Produk klinker | 324.375 | 353 | 9.245.838 | 39.264.520 |
| Udara tersier | 117.371 | 1.171 | 26.603144 | 15.451.698 |
| Udara sekunder | 155.336 | 1.171 | 35.208.013 | 20.449.597 |
| Udara ke RM dan FM | 421.476,54 | 616 | 44.154.449 | 21.296.564 |
| Debu keluar EP | 9,73 | 501 | 407 | 2.411 |
| Heat loss | - | - | 24.982.686 | - |
| Total |  |  | 140.194.538 | 96.464.790 |

* 1. **Perbandingan Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln RKC-2 dan RKC-4 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban**

Perbandingan nilai efisiensi energi dan eksergi pada rotary kiln RKC-2 dan RKC-4 pada PT. Semen Gresik Pabrik Tuban dapat dilihat pada Tabel 4.10. Berdasarkan Tabel 4.10 diperoleh nilai efisiensi energi pada RKC-2 sebesar 64,93% pada unit kiln sedangkan pada sistem kiln diperoleh nilai sebesar 79,40%. Kemudian untuk RKC-4 efisiensi energi pada unit kiln diperoleh nilai 63,74% dan pada sistem kiln diperoleh nilai 80,03%. Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi efisiensi energi lebih besar yaitu salah satunya penggunaan jenis batubara, jenis batubara yang digunakan pada RKC-2 yaitu termasuk golongan batubara kelas rendah (*low rank coal*) dengan nilai *Net Calorific Value* 4504 kkal/kg batubara, yang mana nilai*Net Caloric Value*nya lebih besar dari pada penggunaan jenis batubara pada RKC-4. Nilai *Net Caloric Value* pada RKC-4 yaitu 4368 kkal/kg batubara. Sehingga dari penggunaan jenis batubara ini dapat mempengaruhi nilai efisiensi energi unit *rotary kiln* pada RKC-2 lebih besar daripada RKC-4. Menurut standar ASTM D-388, semakin tinggi kualitas batubara, maka kadar karbon akan meningkat, sedangkan hidrogen dan oksigen akan berkurang. Batubara bermutu rendah, seperti *lignite* dan *sub-bituminous*, memiliki tingkat kelembapan (*moisture*) yang tinggi dan kadar karbon yang rendah, sehingga energinya juga rendah. Selain itu Karena pada RKC-2 menggunakan sistem pemanas awal dengan 2 jenis kalsiner yaitu In-Line Calciner (ILC) dan Separate-Line Calciner (SLC). Derajat kalsinasi material pada ILC – SLC adalah lebih dari 90% dan mengkonsumsi bahan bakar sekitar 60% dari total bahan bakar, sehingga dapat menyebabkan ketika pada sistem *rotary kiln* nilai efisiensi energinya lebih kecil daripada RKC-4 (Nielsen, 2012). Proses kalsinasi dilakukan di luar rotary kiln. Kontrol terhadap proses kalsinasi yang terjadi pada ILC – SLC merupakan hal yang penting karena peralatan ini memberikan dampak langsung kepada konsumsi bahan bakar, emisi polusi dan kualitas akhir semen yang dihasilkan (Vlachos, dkk, 2006).

Nilai efisiensi eksergi pada RKC-2 sebesar 47,10% pada unit kiln sedangkan pada sistem kiln diperoleh nilai sebesar 57,24%. Kemudian untuk RKC-4 efisiensi eksergi pada unit kiln diperoleh nilai 40,30%dan pada sistem kiln diperoleh nilai 59,37%. Pada sistem kiln nilainya lebih besar daripada pada unit kiln karena adanya pemanfaatan energi gas outlet *preheater* dan gas outlet *cooler* dapat meningkatkan kinerja proses dengan menghubungkan ke sistem itu sendiri untuk proses pemanasan (Jijesh, 2015). Kemudian untuk efisiensi eksergi pada unit *rotary kiln* RKC-2 nilainya lebih besar daripada RKC-4 karena penggunaan jenis batubara pada RKC-2 nilai *Net Caloric Value* nya lebih tinggi daripada RKC-4. Sedangkan untuk sistem *rotary kiln* pada RKC-4 nilai efisiensi ekserginya lebih besar dari pada RKC-2, yaitu 59,37% pada RKC-4 dan 57,24% pada RKC-2 hal ini dikarenakan pada sistem rotary kiln RKC-4 ada pemanfaatan gas outlet cooler yang akan digunakan di *raw mill* dan *finish mill*.

**Tabel 4.10** Perbandingan Efisiensi Energi dan Eksergi pada RKC-2 dan RKC-4

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | RKC-2 PT. Semen Gresik | RKC-4 PT. Semen Gresik |
| Efisiensi energi unit kiln | 64,93% | 63,74% |
| Efisiensi energi sistem kiln | 79,40% | 80,03% |
| Efisiensi eksergi unit kiln | 50,48% | 40,30% |
| Efisiensi eksergi sistem kiln | 57,10% | 59,37% |
| Irreversibilitas unit kiln | 49,52% | 59,70% |
| Irreversibilitas eksergi sistem kiln | 42,90% | 40,63% |

Efisiensi eksergi memiliki nilai lebih rendah daripada efisiensi energi. Hal ini menunjukkan adanya *irreversibilitas* dalam sistem. *Ireversibilitas* merupakan besaran yang menyatakan jumlah eksergi yang rusak pada sistem tertutup atau jumlah kerja potensial yang terbuang. Nilai ireversibilitas merupakan nilai dari energi yang tidak dapat digunakan kembali. Jadi, semakin tinggi nilai ireversibilitas proses yang terjadi semakin tidak teratur dan mengakibatkan panas yang digunakan pada proses adanya panas yang hilang. Untuk sistem dengan efisiensi tinggi, nilai *irreversibilitas* rendah begitupun sebaliknya (Jijesh, 2015). Dapat dilihat pada Tabel 4.10 nilai irreversibilitas pada unit dan sistem *rotary kiln* RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban adalah 49,52% dan 42,90%, sedangkan pada unit dan sistem *rotary kiln* RKC-4 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban nilai irreversibilitasnya adalah 59,70% dan 40,63%.

Faktor yang mempengaruhi nilai efisiensi eksergi adalah temperatur udara yang digunakan untuk pembakaran. Udara yang dipanaskan terlebih dahulu akan menambah sempurnanya hasil pembakaran dikarenakan entalpi semakin tinggi dan entropinya turun. Selain itu faktor yang mempengaruhi nilai efisiensi energi, eksergi dan laju destruksi adalah temperatur lingkungan, tekanan pada lingkungan serta laju aliran massa pada masing-masing komponen ( Yongki dll, 2015).

* 1. **PerbandinganSistem Rotary Kiln RKC-2, RKC-4 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban Dengan Pabrik Semen Lain**

Perbandingan nilai efisiensi energi dan eksergi pada rotary kiln RKC-2, RKC-4 pada PT. Semen Gresik Pabrik Tuban dengan pabrik semen lainnya dapat dilihat pada Tabel 4.11. Berdasarkan Tabel 4.11 diperoleh nilai efisiensi energi dan eksergi pada unit *rotary kiln* terbesar pada RKC-2 PT. Semen Gresik dibandingkan dengan RKC-4 PT. Semen Gresik dan Pabrik Semen Malabar, sedangkan untuk nilai efisiensi energi dan eksergi pada sistem *rotary kiln* terbesar pada RKC-4 PT. Semen Gresik dibandingkan dengan RKC-2 PT. Semen Gresik dan Pabrik Semen Malabar.

**Tabel 4.11** Perbandingan Efisiensi Energi dan Eksergi pada RKC-2, RKC-4 dan Pabrik Semen Malabar.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | RKC-2 PT. Semen Gresik | RKC-4 PT. Semen Gresik | Pabrik Semen Malabar |
| Efisiensienergi unit kiln | 64,93% | 63,74% | 52,03% |
| Efisiensi energi sistem kiln | 79,40% | 80,03% | 76,15% |
| Efisiensi eksergi unit kiln | 50,48% | 40,30% | 31,21% |
| Efisiensi eksergi sistem kiln | 57,10 % | 59,37 % | 44,19% |
| Irreversibilitas unit kiln | 49,52% | 59,70% | 68,79% |
| Irreversibilitas eksergi sistem kiln | 42,90% | 40,63% | 55,81% |

# *-Halaman Ini Sengaja Dikosongkan-*

**BAB 5**

**KESIMPULAN DAN SARAN**

* 1. **Kesimpulan**

Berdasarkan pada hasil penelitian yang sudah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Efisiensi energi dan eksergi pada unit *rotary kiln* RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban adalah 64,93% dan 50,48%.
2. Efisiensi energi dan eksergi pada sistem *rotary kiln* RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban adalah 79,40% dan 57,10%.
3. Ireversibilitas unit dan sistem *rotary kiln* RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban masing-masing adalah 49,52% dan 42,90%.
4. Efisiensi energi paling besar terjadi pada laju alir massa klinker maksimum dan laju alir massa batubara minimum.
5. Efisiensi eksergi paling besar terjadi pada laju alir massa clinker maksimum dan laju alir massa batubara minimum.
6. Efisiensi energi dan eksergi pada sistem *rotary kiln* lebih besar daripada unit rotary kiln karena adanya pemanfaatan gas *outlet* dari *suspension preheater* dan *cooler*.
   1. **Saran**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran-saran yang dapat disampaikan adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan studi perhitungan analisis energi dan eksergi dengan penggunaan batubara yang memiliki nilai kalor lebih tinggi.
2. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan analisis efisiensi energi dan eksergi untuk penggunaan jenis bahan bakar di kiln semen dan emisi gas CO2 yang dihasilkan.

**DAFTAR PUSTAKA**

Ayuningrum, Theresia V, (2013),“Laporan Kerja Praktek”*Menghitung Neraca Panas Suspension Preheater Pabrik Tuban 1PT. Semen Gresik Pabrik Tuban*, Prodi Teknik Kimia. Fakultas Teknologi Industri, UPN VeteranYogyakarta.

Bejan. A,(1996),*Entropy Generation Minimization*, New York, CRC Press.

Budiman. A,(2005), *Analisis Thermodinamika Secara Grafis Dengan Konsep Eksergi*,Vol. 9, No. 2, hal. 107-111.

Duda, H.W,(1985),*Cement Data Book*,Bauverlag, Berlin.

Engin, Tahsin dan Vedat Ari, (2002),*Energy Auditing and Recovery for Dry Type Cement Rotary Kiln System-A Case Study*, University of Sakarya, Turkey.

FLSmidth, (2003), *Process Cement Hand Book*, International Cement Production Seminar.

Incropera. F. P, (1996), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*,Jhon Wiley and Sons, New York.

Jijesh dll, 2015, *Energy and exergy analysis in a cement plant Volume 4*, International Journal Of Science, India.

Karyadi, A dan Chalilullah, (2015),*Analisa Energi dan Eksergi Pembangkit Listrik Tenaga Uap Banten 3 Lontar.* Teknik Mesin. UniversitasTrisakti.

Kurt, E Peray, Joseph, J Waddell, (1972),*The Rotary Cement Kiln*, Chemical Publishing CO, New York.

Mahfud, dan Zabara Zakir,(2018),*Industri Kimia Indonesia*, Deepublish publisher, Yogyakarta.

Nielsen.Anders, (2012), *Combustion of Large Solid Fuels in Cement Rotary Kilns*, ThesisPh.D, Technical University of Denmark, Denmark.

Peray, K.E and Waddell, J.J, (1972),*The Rotary Kiln*, Chemical Publishing Co. Inc, New York.

Priambodo. P dan Dewita. E, (2015),A*nalisis Energi dan Eksergi Pada Sistem HTR-10 SiklusTurbinUap. Volume 17,*Jakarta.

Rasyid, I dan Rahman. D, (2019),*Analisis Energi dan Eksergi Pada Unit Rotary Kiln RKC-2 PT. Semen Gresik PabrikTuban*, UniversitasInternasional Semen Indonesia, Gresik.

Regulagadda, dkk, (2010),*Exergy Analysis of a Thermal Power Plant With Measured Boiler and Turbine Losses*, Applied Thermal Engineering.

Ridha, F dan Hadiyanto, (2013),*EvaluasiEfisiensiPanas dan Emisi Gas RumahKaca Pada Rotary Kiln Pabrik Semen,* UniversitasDiponegoro, Semarang.

Setiyana, Budi, (2007),*AnalisisEfisiensi Raw Grinding Mill Pada Proses Pembuatan Semen*, Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP, Semarang.

Shabana. N,(2010),*Cement Mill Notebook*. Doha: Qatar national cement company

SNI 15-2049-2004

United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), (1994),*Output of a Seminar on Energy Conservation in Cement Industri*, Japan.

Vlachos, N.S., Fidaros, D.K., Baxevanou, C.A., Dritselis, C.A. (2006), “*Numerical Modeling of Flow and Traansport Processes in a Calciner for Cement Production* ”, Powder Technology ELSEVIER, No.171, hal. 81-95.

BIOGRAFI PENULIS

**MUHAMMAD SALMAN AL FARISI** dilahirkan di Gresik, Jawa Timur pada 06 Januari 1998. Penulis merupakan anak kedua dari 2 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di Madrasah Ibtidaiyah Islamiah Bulaklo, Sekolah Menengah Pertama Negeri 2 Balen, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Sumberrejo. Pada tahun 2016 penulis menempuh pendidikan S1 di Departemen Teknik Kimia Universitas Internasional Semen Indonesia. Penulis melakukan kerja praktek di PT.

Indonesia Power UP Semarang, Jawa Tengah dibawah bimbingan Bapak Anni Rahmat, S.T., M.T. Penulis melakukan Pra Desain Pabrik berjudul “ Pupuk Amonium Sulfat dari *AmmoniumSulfate dan Asam Sulfate*” dibawah bimbingan Ibu Mala Hayati Nasution, S.T., M.T. Penulis melakukan penelitian Tugas Akhir berjudul “ Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban“ di PT. Semen Gresik (persero) Tbk, dibawah bimbingan Ibu Mala Hayati Nasution, S.T., M.T. dan Ibu Okky Putri Prastuti S.T., M.T. Penulis dapat dihubungi melalui email :[alfarisisalman36124@gmail.com](mailto:alfarisisalman36124@gmail.com)atau [muhammad.farisi16@student.uisi](mailto:alfarisisalman36124@gmail.com).ac.i[d](mailto:muhammad.farisi16@student.uisi.ac.id)

BIOGRAFI PENULIS

**NURMALINDA TOYYIBA** dilahirkan di Lamongan, Jawa Timur pada 16 Juni 1998. Penulis merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di Sekolah Dasar Negeri Sidomukti, Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 Kembangbahu, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 2 Lamongan. Pada tahun 2016 penulis menempuh pendidikan S1 di Departemen Teknik Kimia Universitas Internasional Semen Indonesia. Penulis melakukan kerja praktek di PT. Madubaru Yogyakarta, Jawa Tegah dibawah bimbingan Ibu Yuni Kurniati, S.T.,

M.T. Penulis melakukan Pra Desain Pabrik berjudul “ Pupuk Amonium Sulfat dari *AmmoniumSulfate dan Asam Sulfate*” dibawah bimbingan Ibu Mala Hayati Nasution, S.T., M.T. Penulis melakukan penelitian Tugas Akhir berjudul “ Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban“ di PT. Semen Gresik (persero) Tbk,dibawah bimbingan Ibu Mala Hayati Nasution, S.T., M.T. dan Ibu Okky Putri Prastuti S.T., M.T. Penulis dapat dihubungi melalui email:[nurmalindatoyyiba98@gmail.com](mailto:nurmalindatoyyiba98@gmail.com)atau [nurmalinda.toyyiba16@student.uisi.ac.id](mailto:%20%20nurmalinda.toyyiba16@student.uisi.ac.id)