

ANALISIS ENERGI DAN EKSERGI PADA SISTEM ROTARY KILN RKC-2 PT. SEMEN BATURAJA

Adinda Lara Sati^a Rendotian Anugrah^b, Safaruddin^c

^aProdi Tektik Kimia, Fakultas Teknik, Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang

^bSMBR Learning Development

^cJunior Manager Crusher And Raw Mill

email : safaruddintohir@gmail.com

ARTICLE HISTORY

Received:

20 September 2022

Revised

23 September 2022

Accepted:

02 October 2022

Online available:

29 October 2022

Kata Kunci : Energi,
Eksergi, Rotary Kiln RKC-2

Keyword : Energy, Exergy,
Rotary Kiln RKC-2

*Correspondence:

Name : Adinda Lara Sati

E-mail: safaruddintohir@gmail.com

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. Berdasarkan 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 Baturaja Palembang masing-masing adalah 49,52% dan 42,9%.

Abstract

The cement industry is one of the energy-intensive industries because of the large amount of energy used. The cost used for energy consumption in a cement factory is about 20-30% of the total cost of cement production (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 system affects the optimization of production costs. One method of identification on energy conservation is through energy and exergy analysis. In this analysis, energy loss and exergy were identified based on the calculation of mass balance, energy, enthalpy, entropy and exergy. Based on the analysis, the value of energy efficiency is greater than exergy efficiency. The energy and exergy efficiency of the rotary kiln system are 79.40% and 57.10%, respectively. The energy and exergy efficiency of the rotary kiln unit are 64.93% and 50.48%, respectively. The exergy efficiency value in the rotary kiln system is greater than the rotary kiln unit because there is energy utilization at the outlet of the suspension preheater and cooler. The greatest energy and exergy efficiency occurred at the maximum clinker mass flow rate and minimum coal mass flow rate. Irreversibility of rotary kiln units and systems RKC-2 PT. Semen Baturaja Palembang are 49.52% and 42.9%, respectively.

1. PENDAHULUAN

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 dilakukan dengan 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 preparation* dan *clinker production* merupakan tahapan 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).

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 *stage cyclone* 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*.

Tujuan dari penelitian “Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Kiln Rotary Kiln RKC-2 PT. Semen Baturaja Kota Palembang” adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui neraca massa sistem kiln *Rotary Kiln* RKC-2 Semen Baturaja.
2. Melakukan analisis neraca energi, entalpi, dan eksergi sistem *RotaryKiln* RKC-2 Semen baturaja
3. Memperoleh nilai efisiensi energi dan eksergi sistem.
4. Memperoleh nilai *irreversibilitas* sistem.

2. METODE PENELITIAN

Dalam penyusunan laporan ini dilakukan dengan berbagai macam metodologi yaitu:

1. Metode Kuantitatif, dalam penyusunan laporan ini dilakukan dengan sistematis, dan terstruktur. Pada pembuatannya metode riset yang dengan penggunaan angka dan tabel yang diambil pada ruang CCR (Central Control Room) PT. Semen Baturaja (Persero) Tbk.
2. Metode Konsultasi, dalam pembuatan laporan ini dilakukan metode konsultasi dengan pembimbing yang ada di PT. Semen Baturaja (Persero) Tbk. Dan melakukan bimbingan dengan Dosen yang membimbing pembuatan laporan ini
3. Metode Perhitungan

Hukum Kekekalan Energi:

$$Q = \Delta U + W$$

Keterangan :

Q : panas yang masuk atau keluar sistem

ΔU : energi internal sistem

W : usaha yang dilakukan oleh sistem atau pada sistem

Energi Eksergi Fisik

$$ex_{ph} = m(H - H_0) - [T_0x(S - S_0)]$$

Keterangan :

ex_{ph} : Eksergi Fisik (kW)

T_0 : Temperatur Lingkungan ($^{\circ}C$)

m : Laju Fluida (kg/s)

S_0 : Entropi Lingkungan (KJ/kg $^{\circ}C$)

H_0 : Entalpi Lingkungan (KJ/kg) H : Entalpi (KJ/kg)

S : Entropi (KJ/kg $^{\circ}C$)

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

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 stage III berfungsi sebagai pemanas awal *kiln feed* sedangkan pada stage IV digunakan untuk memisahkan produk yang keluar dari *calciner* 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 50-60°C. *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 gas panas masuk ke dalam *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 dominan sehingga material akan terangkat gas keluar dari *cyclone*. Profil suhu material dan gas di dalam *kiln* pada masing-masing tahap disampaikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Profil Suhu Material dan Gas Dalam *Kiln*

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

Sumber (Mahfud, 2018)

Kiln feed masuk ke *down pipe cyclone stage II* kemudian mengalami proses seperti pada stage I. Hal yang sama terjadi 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 kedalam *cyclone stage IV* dan keluar melewati *riser duct* dan selanjutnya akan diumpankan ke dalam kiln. Gambar *preheater* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. *Preheater Tower*

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 :

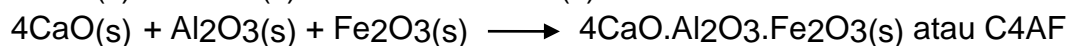
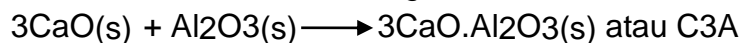
1. *Calcining Zone*.

Pada zona ini material akan mengalami proses kalsinasi lanjutan yang sebelumnya telah terjadi di *suspension preheater*. Kalsinasi yang telah mencapai 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 °C dengan reaksi sebagai berikut :



2. *Transition Zone*

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



3. *Sintering Zone*

Pada daerah ini terjadi pelelehan pada temperatur tinggi antara suhu 1250 – 1450 °C 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 :



4. *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 1300°C. 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 1400°C 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 82°C saat keluar dari *clinker cooler*, dibawa oleh *drag conveyor* dan dimasukkan ke dalam *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 klinker yang berukuran besar. Debu yang berhasil disaring dicampur dengan produk dari *cooler* ke *drag conveyor* melalui *screw conveyor* sedangkan udara bersih dibuang ke udara bebas melalui *stack*.

1. 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 :

$$Q = \Delta U + W \quad (2.1)$$

Keterangan :

Q : panas yang masuk atau keluar sistem

ΔU : 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. 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).

3. 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).

$$q = h \cdot A (T_0 - T_a)$$

Keterangan :

q : Energi kalor (W)

A : Luas area permukaan (m^2)

h : Koefisien perpindahan kalor konveksi ($W/m^2 \cdot K$)

T_0 : Temperatur permukaan (K)

T_a : Temperatur ambient (K)

4. 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. Panas yang berpindah secara radiasi akan mengalami tiga fenomena yaitu refleksi, absorpsi dan transmisi.

5. Eksergi.

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

6. Eksergi Fisik

Eksergi fisik adalah kerja yang diperoleh suatu senyawa ketika 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.

$$ex_{ph} = m(H - H_0) - [T_0x(S - S_0)]$$

Keterangan :

ex_{ph} : Eksergi Fisik (kW) m : Laju Fluida (kg/s)

H_0 : Entalpi Lingkungan (KJ/kg)

T_0 : Temperatur Lingkungan ($^{\circ}C$)

S_0 : Entropi Lingkungan (KJ/kg $^{\circ}C$)

H : Entalpi (KJ/kg)

S : Entropi (KJ/kg $^{\circ}C$)

7. 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

$$ex_{fuel} = \zeta_{fuel} \times LHV$$

Perhitungan analisis energi dan eksergi pada sistem *rotary kiln* RKC-4 PT. Semen Baturaja digunakan untuk melakukan perbandingan dengan sistem *rotary kiln* RKC-2 PT. Semen Baturaja. Sistem *rotary kiln* RKC-2 PT. Semen Baturaja 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 1. Berdasarkan Tabel 1. energi 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 234.917.827 kJ/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 2. Neraca Massa, Energi dan Eksergi dari *suspension Preheater*

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	165.286	663	14.196.808	22.405.735

kalsinasi				
O ₂ sisa GHP	738	663	61.899	43.377
Uap H ₂ O	2.184	663	368.415	403.190
N ₂ di batu bara	138	663	12.748	5.239
H ₂ O di batu bara	2.381	663	907.275	343.362
Debu keluar	55.781	663	4.862.970	2.428.160

Perhitungan neraca massa, energi dan eksergi pada unit *rotary kiln* ditampilkan pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2. energi total yang masuk sama dengan energi yang keluar dari *rotary kiln* yaitu sebesar 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 2. 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.

Tabel 3. 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 3. energi total yang masuk sama dengan energi yang keluar dari *cooler* yaitu sebesar 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 3. 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. 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	26.603.144	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

Pembahasan

1. Perbandingan Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln RKC-2 dan RKC-4 PT. Semen Baturaja

Perbandingan nilai efisiensi energi dan eksergi pada rotary kiln RKC-2 dan RKC-4 pada PT. Semen Baturaja dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Berdasarkan Tabel 4. 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 kelembaban (*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 system kiln diperoleh nilai sebesar 57,24%. Kemudian untuk RKC-4 efisiensi eksergi pada unit kiln diperoleh nilai 40,30% dan pada system kiln diperoleh nilai 59,37%. Pada system 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 system itu sendiri untuk proses pemanasan (Jijesh, 2015). Kemudian untuk efisiensi eksergi pada unit *rotary kiln* RKC-2 nilai nya lebih besar daripada RKC-4 karena penggunaan jenis batubara pada RKC-2 nilai *Net Caloric Value* nya lebih tinggi daripada RKC-4. Sedangkan untuk system *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 system rotary kiln RKC-4 ada pemanfaatan gas outlet cooler yang akan digunakan di *raw mill* dan *finish mill*.

Tabel 5. Perbandingan Efisiensi Energi dan Eksergi pada RKC-2 dan RKC-4

	RKC-2 PT. Semen Baturaja	RKC-4 PT. Semen Baturaja
Efisiensi energi unit kiln	64,93%	63,74%
Efisiensi energi system Kiln	79,40%	80,03%
Efisiensi eksergi unit kiln	50,48%	40,30%
Efisiensi eksergi system 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. *Irreversibilitas* merupakan besaran yang menyatakan jumlah eksergi yang rusak pada sistem tertutup atau jumlah kerja potensial yang terbuang. Nilai *irreversibilitas* merupakan nilai dari energi yang tidak dapat digunakan kembali. Jadi, semakin tinggi nilai *irreversibilitas* proses yang terjadi semakin tidak teratur dan mengakibatkan panayang 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 Baturaja adalah 49,52% dan 42,90%, sedangkan pada unit dan sistem *rotary kiln* RKC-4 PT.Semen Baturaja 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).

2. Perbandingan Sistem Rotary Kiln RKC-2, RKC-4 PT. Semen Baturaja Dengan Pabrik Semen Lain

Perbandingan nilai efisiensi energi dan eksergi pada rotary kiln RKC-2, RKC-4 pada PT. Semen Baturaja dengan pabrik semen lainnya dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan Tabel 5. diperoleh nilai efisiensi energi dan eksergi pada unit *rotary kiln* terbesar pada RKC-2 PT. Baturaja dibandingkan dengan RKC-4 PT. Semen Baturaja dan Pabrik Semen Malabar, sedangkan untuk nilai efisiensi energi dan eksergi pada sistem *rotary kiln* terbesar pada RKC-4 PT. Semen Baturaja dibandingkan dengan RKC-2 PT. Semen Baturaja dan Pabrik Semen Malabar.

Tabel 6. Perbandingan Efisiensi Energi dan Eksergi pada RKC-2, RKC-4 PT. Semen Baturaja dan Pabrik Semen Malabar.

	RKC-2 PT. Semen Baturaja	RKC-4 PT. Semen Baturaja	Pabrik Semen Malabar
Efisiensi energi unit kiln	64,93%	63,74%	52,03%
Efisiensi energi sistem kiln	79,40%	80,03%	,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%

4. 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 Baturaja adalah 64,93% dan 50,48%.
2. Efisiensi energi dan eksergi pada sistem *rotary kiln* RKC-2 PT. Semen Baturaja adalah 79,40% dan 57,10%.
3. Ireversibilitas unit dan sistem *rotary kiln* RKC-2 PT. Semen Baturaja 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*.

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.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Ayuningrum, Theresia V, (2013), "Laporan Kerja Praktek" *Menghitung Neraca Panas Suspension Preheater Pabrik PT. Semen Baturaja*, Prodi Teknik Kimia. Fakultas Teknologi Industri, UPN Veteran Yogyakarta.
- Bejan. A, (1996), *Entropy Generation Minimization*, New York, CRC Press.
- Budiman. A, (2005), *Analisis Termodinamika 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.
- FLSmith, (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.
- 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*, Thesis Ph.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), *Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem HTR-10 Siklus Turbin Uap. Volume 17*, Jakarta. Rasyid, I dan Rahman. D, (2019), *Analisis Energi dan Eksergi Pada Unit Rotary Kiln RKC-2 PT. Semen Gresik Pabrik Tuban*, Universitas Internasional Semen Indonesia, Gresik.
- 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 Transport Processes in a Calciner for Cement Production", *Powder Technology ELSEVIER*, No.171, hal. 81-95
- Muhammad Angga Saputra, Rendotian Anugrah, & safaruddin. (2022). Menghitung Nilai Efisiensi Thermal Pada Alat Grate Cooler PT. Semen Baturaja II. Tbk *Jurnal Multidisipliner Bharasumba*, 1(03 October), 413–421. Retrieved from <https://azramedia-indonesia.azramediaindonesia.com/index.php/bharasumba/article/view/289>
- Vinsensius Galih Adi Kurniawan. (2022). analisis persediaan bahan baku pasir besi di pt.semen baturaja. *Jurnal Multidisipliner Kapalamada*, 1(03July), 406–411. Retrieved from <https://azramedia-indonesia.azramediaindonesia.com/index.php/Kapalamada/article/view/279>