ANALISIS EKSERGI PADA ROTARY KILN DI DALAM PROSES PRODUKSI PEMBUATAN SEMEN

EXERGY ANALYSIS OF ROTARY KILN IN CEMENT PRODUCTION PROCESS

Hendar Wirawan¹, Nazaruddin Sinaga²

¹Magister Energi, Sekolah Pasca Sarjana, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

²Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

email: hendar.wirawan@gmail.com^{1)*}; nsinaga19.undip@gmail.com²⁾

Received:
31 Mei 2021

Accepted:
26 Juni 2021

Published:
30 Juni 2021

© 2021 SJME
Kinematika All
Rights Reserved.

Abstrak

Industri semen merupakan salah satu industri yang paling intensif energi di dunia karena di dalam proses produksinya mengkonsumsi sekitar 12–15% dari total penggunaan energi dan setara dengan 30-40% dari total biaya produksi semen. Analisis eksergi diperlukan untuk mengetahui kerugian kerja pada suatu mesin atau sistem. Dalam perhitungan eksergi diperlukan data kapasitas panas. Karena massa yang masuk ke dalam *kiln* berupa senyawa kimia, maka untuk menghitung kapasitas panasnya sesuai dengan zat kimia pada senyawa tersebut. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh bahwa nilai rasio bahan baku terhadap klinker adalah 1,87 kg/kg klinker dengan nilai energi spesifik sebesar 1.753,93 kJ/kg klinker. Nilai efisiensi energinya adalah 94,16%, 89,40%, dan 72,40%. Untuk nilai efisiensi eksergi adalah 39,07%, 52,75%, dan 43,49% serta nilai efisiensi eksergetik adalah 71,79%, 49,22%, dan 65,75%. Efisiensi penggunaan bahan bakar pada *kiln* berbeda-beda antara satu dengan yang lainnya, tergantung kepada jenis *kiln* dan proses yang digunakan. Nilai energi dan eksergi pada klinker dapat dihitung per satuan massa produk klinker yang dihasilkan.

Kata kunci: eksergi, energi, kiln, klinker, semen

Abstract

The cement industry is one of the most energy intensive industries in the world because in the production process it consumes about 12-15% of the total energy use and is equivalent to 30-40% of the total cement production cost. Exergy analysis is needed to determine work losses on a machine or system. In the calculation of exergy heat capacity data is needed. Because the mass that enters the kiln is in the form of chemical compounds, to calculate the heat capacity according to the chemical substances in the compound. Based on the calculation results, it is found that the ratio of raw materials to clinker is 1.87 kg/kg clinker with a specific energy value of 1.753.93 kJ/kg clinker. The energy efficiency values are 94.16%, 89.40%, and 72.40%. The exergy efficiency values were 39.07%, 52.75%, and 43.49% and the exergetic efficiency values were 71.79%, 49.22%, and 65.75%. The efficiency of fuel use in kilns varies from one another, depending on the type of kiln and the process used. The energy and exergy values of the clinker can be calculated per unit

mass of the clinker product produced.

Keywords: *exergy, energy, kiln, clinker, cement*

DOI: 10.20527/sjmekinematika.v6i1.191

How to cite: Wirawan, H. & Sinaga, N., “Analisis Eksergi pada Rotary Kiln di dalam Proses Produksi Semen”. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 6(1), 65-84, 2021.

PENDAHULUAN

Seperti yang kita ketahui, bahwa semen adalah suatu bahan kebutuhan yang sangat penting di dalam suatu pembangunan negara. Tingkat pemakaian semen per kapita menggambarkan secara langsung laju perkembangan di negara tersebut. Kebutuhan yang semakin meningkat akan mendorong perkembangan industri semen sehingga makin banyak didirikan pabrik-pabrik semen baru guna mengisi kebutuhan semen dalam negeri dan menghilangkan ketergantungan semen impor.

Industri semen merupakan salah satu industri yang paling intensif energi di dunia karena di dalam proses produksinya mengkonsumsi sekitar 12–15% dari total penggunaan energi dan setara dengan 30-40% dari total biaya produksi semen [1]. Sejalan dengan semakin berkurangnya cadangan bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbaharui (*non-renewable energy*), maka penghematan energi melalui efisiensi penggunaan energi pada proses produksi menjadi suatu keharusan yang tidak dapat dihindari.

Dalam beberapa tahun terakhir, muncul peningkatan pada prinsip kemampuan khusus untuk mengukur berbagai jenis kinerja energi untuk yang populer dengan sebutan eksergi. Sebuah analisis eksergi menyatakan banyaknya kerugian energi yang mana analisis tersebut dapat juga menghitung konservasi energi dan menentukan prioritas pada banyaknya pengukuran untuk perbaikan. Sebuah metode tradisional pada analisis eksergi adalah menghitung keseimbangan energi (*energy balance*) yang didasari pada Hukum Termodinamika Pertama [2].

Analisis eksergi adalah suatu analisis yang didasari pada Hukum Termodinamika Kedua yang sangat bermanfaat. Sebuah fungsi termodinamika yang mana *Keenan* bermula dengan menghubungkan “ketersediaan” yang dikembangkan dengan sebuah nama baru yaitu “eksergi”. Hubungan eksergi dengan analisis energi pada sistem *kiln* diperlukan untuk mengevaluasi kinerja dari alat tersebut.

Selain aspek energi, konsep eksergi merupakan metode yang efektif untuk menganalisis suatu sistem yang akan diteliti. Eksergi merupakan salah satu konsep yang digunakan dalam berbagai analisis sistem dan dapat memberikan hasil yang lebih komprehensif dan akurat daripada analisis energi dalam hal kondisi operasi nyata pada sistem [3].

Dalam analisis ini, nilai eksergi pada campuran kimia lebih memilih berubah-ubah dan sifat eksergi seperti fungsi keadaan termodinamika sama sekali tidak terlalu dipertimbangkan. Metode ini diperlukan ketika melakukan analisis eksergi pada segala macam proses kimia. Dua fungsi eksergi yaitu standar eksergi dan eksergi referensi dalam termodinamika kimia menunjukkan keadaan standar yang stabil untuk zat padat, cair, dan gas ideal pada tekanan atmosfer dan temperatur khusus yang dipertimbangkan. Keadaan referensi didefinisikan sebagai keadaan standar pada T_o .

Banyak permasalahan yang ditemukan dalam termodinamika yang memerlukan aplikasi dari Hukum Termodinamika Kedua yang dapat diselesaikan juga hanya dengan menggunakan entropi atau dengan menggunakan konsep ketersediaan. Kedua pendekatan harus dianggap sebagai pelengkap, walaupun di dalam permasalahannya, dapat lebih sesuai dengan yang lainnya [2].

Analisis ini melibatkan penilaian masukan energi dan eksergi pada masing-masing tahap proses produksi semen. Diketahui bahwa 50% eksergi hilang walaupun sejumlah besar limbah panas sudah dimanfaatkan [4].

Satu-satunya penggunaan yang utama dari konsep eksergi adalah kesetimbangan eksergi di dalam menganalisis sistem termal. Kesetimbangan energi adalah suatu pernyataan hukum penurunan energi. Penurunan energi berkaitan dengan ireversibel (keterbalikan) dari semua proses yang sebenarnya. Karena analisis sistem terbuka jauh lebih relevan untuk analisis sistem termal atau kimia dari pada analisis sistem tertutup.

Proses pembuatan semen dibagi menjadi dua jenis yang berbeda yaitu proses basah (*wet process*) dan proses kering (*dry process*). Perbedaan antara keduanya terletak pada ada atau tidaknya proses pengeringan material sebelum masuk proses pembakaran (*burning*) [5].

Pada proses basah material baku semen yang telah dicampur langsung masuk dalam *kiln* untuk proses pembakaran tanpa adanya proses pengeringan terlebih dahulu. Sehingga pada proses basah, bahan bakar yang digunakan relatif besar karena di samping untuk proses kalsinasi, panas yang dihasilkan bahan bakar juga digunakan untuk menguapkan air yang terkandung dalam material. Di samping itu pada proses basah diperlukan dimensi *kiln* yang lebih panjang untuk menjamin proses kalsinasi sebagai proses pembentukan semen dapat berlangsung secara sempurna [6].

Gambar 1. Proses produksi semen

Pada proses jenis ini material yang akan masuk *kiln* terlebih dahulu mendapatkan pemanasan awal di SP (*Suspension Preheater*) oleh gas pembakaran dari *kiln* serta udara panas yang keluar dari *cooler*. *Suspension Preheater* biasanya dilengkapi tungku pembakaran yang disebut dengan *calciner*. Dengan menggunakan pemanasan awal ini maka beban pemanasan di *kiln* menjadi lebih kecil sehingga cukup menggunakan *kiln* yang relatif lebih pendek dibandingkan dengan proses basah. Dengan pemanfaatan gas panas dari *kiln* dan *cooler* yang dapat dikategorikan sebagai “gas buang” maka efisiensi proses kering menjadi lebih tinggi dibandingkan proses basah [7].

Proses kalsinasi mengubah material baku menjadi klinker. Kemudian klinker tersebut keluar dari *Suspension Preheater* melalui *outlet duct* kedua siklon paling bawah. Klinker tersebut kemudian masuk ke dalam *kiln* melalui *kiln feed end* untuk melanjutkan proses kalsinasi yang telah dilangsungkan di *calciner* dan dua siklon paling bawah di *Suspension*

Preheater. Bahan bakar utama yang digunakan untuk proses pembakaran di *kiln* berupa batu bara yang disuplai dari unit *coal mill*.

Setelah selesai proses pembakaran di *kiln* maka material keluar melalui *discharge end* dari *kiln* menuju proses pendinginan yang dilakukan di *cooler*. Pendinginan klinker di *cooler* menggunakan aliran udara yang disuplai sejumlah fan.

Aliran udara pendingin tersebut masuk melalui celah-celah yang terdapat di antara *grate cooler*. Dengan proses pendinginan tersebut maka klinker yang awalnya masuk *cooler* bertemperatur sekitar 1400°C turun hingga temperatur 90-100°C, sedangkan temperatur udara pendingin naik hingga mencapai temperatur sekitar 220°C. Batas maksimum temperatur udara yang keluar dari *cooler* sekitar 250°C yang mana dapat menurunkan kemampuan *Electrostatic Precipitator*. Sehingga untuk menjamin tidak dilampauinya batasan temperatur tersebut maka *cooler* dilengkapi dengan satu unit *water spray* [8].

Selain dilewatkan *Electrostatic Precipitator* sebelum dibuang ke lingkungan, sebagian udara dari *cooler* yang masih bertemperatur tinggi diekstrak menuju *Suspension Preheater* yang digunakan sebagai udara pembakaran di *calsiner*. Udara tersebut biasa disebut sebagai *tertiary air*.

Akibat proses pendinginan di *cooler* maka klinker membeku dan membentuk gumpalan. Untuk memudahkan transportasi klinker menuju ke tempat penyimpanannya (*clinker storage silo*) maka gumpalan klinker tersebut dihancurkan terlebih dahulu di *clinker breaker* yang berada di pintu keluar *cooler*. Dengan menggunakan *clinker breaker* tersebut maka dihasilkan klinker dalam bentuk batuan dengan diameter sekitar 50 mm.

Klinker yang keluar dari *clinker breaker* kemudian diangkut dengan menggunakan *drag chain conveyor* menuju dua buah *clinker storage silo*. Klinker dengan kualitas yang baik dipisahkan di salah satu dua *clinker storage silo* tersebut. Pemisahan penyimpanan klinker berdasarkan kualitasnya dimaksudkan agar lebih mudah melakukan proses pencampuran antara kedua macam klinker tersebut sehingga dihasilkan klinker dengan kualitas yang masih masuk dalam standar [9].

Kiln merupakan tungku berbentuk silinder berongga sebagai tempat terjadinya pembakaran. *Kiln* dilengkapi dengan bata tahan api pada bagian dalamnya yang berfungsi untuk mengurangi panas yang hilang ke lingkungan. Pada awal perkembangan industri semen, tungku yang digunakan untuk membakar material adalah tungku tegak (*vertical kiln*). Pada tahun 1877 Frederick Ransome dari Inggris berhasil menciptakan *kiln* putar (*rotary kiln*). Dan pada tahun 1895 *rotary kiln* banyak digunakan di pabrik-pabrik semen di Amerika Serikat. Ukuran *kiln* yang pertama kali digunakan yaitu menggunakan diameter dalam 1,8-2 meter dengan panjang *kiln* 20-25 meter dan mempunyai kapasitas 30-50 ton/hari. *Rotary kiln* mempunyai beberapa fungsi yaitu:

- a) Melakukan proses terjadinya kalsinasi dan pembentukan klinker.
- b) Sebagai pembangkit panas karena terjadinya proses pembakaran bahan bakar yang menghasilkan panas.
- c) Merupakan tempat terjadinya perpindahan panas antara *raw mix* dengan panas hasil pembakaran.

Rotary kiln yang digunakan oleh industri semen di Indonesia adalah jenis *rotary kiln* dengan panjang 70-80 meter dan mempunyai diameter dalam sebesar 4,5 meter. *Kiln* ini digunakan untuk proses pembentukan klinker lanjutan, yang sebelumnya dilakukan di SP (*Suspension Preheater*). Reaksi pembentukan yang terjadi di dalam *kiln* adalah pembentukan C_2S , C_3S , C_3A , dan C_4AF [10]. Reaksi pembentukan klinker dan diagram alir proses pembentukan klinker di dalam *kiln* pada *kiln* dapat dilihat pada tabel dan gambar berikut ini.

Tabel 1. Reaksi pembentukan klinker

Panjang kiln	Temperatur (°C)	Reaksi yang terjadi
0 – 13 meter	800-900	Pembentukan $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ atau C_2S
13 – 18 meter	900-950	Pembentukan $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ atau C_3A
18 – 46 meter	950-1200	Pembentukan $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ atau C_4AF
46 – 72,5 meter	1200-1400	Pembentukan $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ atau C_3S
72,5 – 78 meter	900-1100	Pendinginan

Gambar 2. Diagram alir proses pembentukan klinker di dalam kiln

METODE PENELITIAN

Banyak permasalahan yang ditemukan dalam termodinamika yang memerlukan aplikasidari Hukum Termodinamika Kedua yang dapat diselesaikan juga hanya dengan menggunakan entropi atau dengan menggunakan konsep ketersediaan. Kedua pendekatan harus dianggap sebagai pelengkap, walaupun di dalam permasalahannya, dapat lebih sesuai dengan yang lainnya. Keseimbangan eksergi secara umum merupakan cara penting untuk mengidentifikasi sumber kerugian dalam proses produksi [10].

Analisis eksergi diperlukan untuk mengetahui kerugian kerja pada suatu mesin atau sistem. Dalam perhitungan eksergi diperlukan data kapasitas panas. Karena massa yang masuk ke dalam *kiln* berupa senyawa kimia, maka untuk menghitung kapasitas panasnya sesuai dengan zat kimia pada senyawa tersebut. Untuk memudahkan perhitungan eksergi, maka dapat dilakukan beberapa langkah:

a) Asumsi

Asumsi yang dipakai dalam perhitungan eksergi yaitu [10]

- ✓ Udara kering terdiri dari 21% O_2 dan 79% N_2
- ✓ Keadaan lingkungan ialah pada temperatur $30^\circ C$ atau 303,15 K
- ✓ Gas berperilaku seperti gas ideal

b) Data

Data literatur yang diperlukan untuk menganalisis eksergi adalah data-data hasil perhitungan neraca massa dan neraca energi pada *kiln* dan nilai kapasitas panas.

c) Diagram alir proses

Untuk lebih memudahkan perhitungan, sebelumnya membuat diagram alir prosesnya. Diagram alir proses untuk eksergi dapat dilihat pada gambar berikut ini.

Gambar 3. Diagram alir proses untuk eksergi pada *kiln*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Eksergi masuk x_{masuk} dapat ditentukan jika kerja yang dilakukan oleh *kiln* di dalam suatu proses, besarnya kerja bersih pada sistem sama dengan pemberian eksergi pada sistem. Demikian juga, selama perhitungan kerja motor yang dilakukan pada sistem menunjukkan sebuah aliran eksergi terhadap sistem dapat dianggap sebagai eksergi yang masuk ke suatu proses. Demikian pula, identifikasi mengenai eksergi produk, x_{produk} , yang didefinisikan sebagai hasil yang diinginkan proses yang dinyatakan dalam istilah eksergi dan aliran eksergi. Jika semen objeknya adalah *limestone*, *clay*, *iron sand*, dan *sand*. Pada awalnya berlaku temperatur dan tekanan ambien, eksergi produk diukur dengan mudah seperti eksergi pada produk akhir, yang mana dalam kasus ini memproduksi semen [11]

Eksergi Pada *Kiln Feed*

Perhitungan eksergi pada *kiln feed* dapat dihitung dengan mengetahui nilai kapasitas panas *kiln feed* dari masing-masing komponennya. Data kapasitas panas komposisi *kiln*

feed dapat dilihat pada tabel berikut ini. Karena *kiln feed* merupakan fasa padat, maka untuk menghitung eksergi *kiln feed* menggunakan persamaan berikut

$$x = m \cdot C_p \cdot T_o \left(\frac{T}{T_o} - 1 - \ln \frac{T}{T_o} \right) \quad (1)$$

Tabel 2. Data kapasitas panas *kiln feed*

Komponen	<i>M</i> (kg/kmol)	<i>m</i> (kg/jam)	State	Kapasitas panas, <i>C_p</i> (cal/mol.K)
CaO _(s)	56	101.953,14	Kwarsa	10,00 + 0,00484 <i>T</i> – 108000/ <i>T</i> ²
MgO _(s)	44	1.775,28	Korundum	10,86 + 0,001197 <i>T</i> – 208700/ <i>T</i> ²
SiO _{2(s)}	60	21.786,25	Kwarsa	10,95 + 0,00550 <i>T</i>
Al ₂ O _{3(s)}	102	15.062,54	Kristal	22,08 + 0,008971 <i>T</i> – 522500/ <i>T</i> ²
Fe ₂ O _{3(s)}	160	4.266,51	Kristal	24,72 + 0,01604 <i>T</i> – 423400/ <i>T</i> ²

Catatan: (s) = fasa padat

Dari hasil perhitungan dari masing-masing komponen *kiln feed*, maka dapat diketahui nilai laju alir eksergi dan nilai eksergi *kiln feed* per kg klinker dan hasil perhitungannya dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Laju alir eksergi dan eksergi *kiln feed*

Komponen	$\dot{x}$ (kW)	<i>x</i> (kJ/kg klinker)
CaO _(s)	13.234,87	336,00
MgO _(s)	253,96	6,45
SiO _{2(s)}	2.945,39	74,78
Al ₂ O _{3(s)}	2.220,56	56,37
Fe ₂ O _{3(s)}	534,78	13,58
Total	19.189,55	487,17

Catatan: (s) = fasa padat

Karena material yang masuk ke dalam *kiln* adalah senyawa kimia, maka untuk menganalisis ekserginya dapat juga menggunakan fungsi termodinamika baru yaitu eksergi referensi dan standar eksergi dengan bantuan energi Gibbs pada pembentukan senyawa. Faktor koreksi temperatur pada unsur-unsur kimia yang terkandung dalam komponen juga digunakan dalam perhitungan ini karena perhitungan eksergi menggunakan temperatur referensi 30°C atau 303,15 K, sedangkan data-data untuk menghitung eksergi referensi dan standar eksergi menggunakan temperatur referensi 25°C atau 298,15 K.

Untuk menghitung nilai eksergi referensi pada senyawa kimia terlebih dahulu menentukan beberapa ketentuan yaitu:

- 1) Menentukan unsur-unsur kimia pembentuk senyawa.
 - 2) Mengetahui persamaan reaksi pada unsur-unsur kimia pembentuk senyawa.
- Dari kedua ketentuan tersebut, maka nilai eksergi referensi dapat diketahui dengan menggunakan persamaan.

$$x^\theta(A\bar{a}B\bar{b}C\bar{c}) = \Delta G_f^\theta(T_o) + ax^\theta(A) + bx^\theta(B) + cx^\theta(C) \quad (2)$$

dimana:

ΔG_f^θ = standar pembentukan energi Gibbs pada senyawa (kcal/mol)

A, B, dan C = unsur-unsur pembentuk senyawa kimia

a, b, dan c = nilai molar dari unsur-unsur pembentuk senyawa

Setelah nilai eksergi diketahui, maka nilai standar eksergi juga dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$x^0 = x^\theta + H - T_0 S \quad (3)$$

Tabel 3. Data eksergi referensi, standar pembentukan energi Gibbs dan faktor koreksi temperatur senyawa *kiln feed*

Komponen	x^θ (kcal/mol)	ΔG_f^0 (kcal/mol)	δ_T (cal/mol.K)
CaO _(s)	26,37	- 144,3	-
MgO _(s)	12,14	- 136,1	-
SiO _{2(s)} *	-	- 190,4	-
Al ₂ O _{3(s)} *	-	- 376,87	-
Fe ₂ O _{3(s)} *	-	- 179,1	-
Ca _(s)	170,26	- 269,8	- 80,96
Mg _(s)	147,76	- 517,1	- 86,18
O _(g)	0,47	0	1,58
Si _(s)	203,81	- 204,75	- 46,67
Al _(s)	188,39	- 378,2	- 39,81
Fe _(s)	87,99	- 177,4	- 35,20

Catatan: (s) = fasa padat; (g) = fasa gas

Dari hasil perhitungan dari masing-masing komponen *kiln feed*, maka dapat diketahui nilai eksergi referensi dan nilai standar eksergi *kiln feed*.

Dari hasil perhitungan dari masing-masing komponen *kiln feed*, maka dapat diketahui nilai eksergi referensi dan nilai standar eksergi *kiln feed*. Hasil perhitungan eksergi referensi dan standar eksergi *kiln feed* dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Nilai eksergi referensi, standar eksergi *kiln feed*, dan faktor koreksinya

Komponen	x^θ (kJ/kg)	x^0 (kJ/kg)	δ_T (kJ/kg)
CaO _(s)	1.970,21571	2.408,00059	-40,20511
MgO _(s)	1.269,844	1.807,78286	-72,95692
SiO _{2(s)}	1.000,67333	1.443,50205	-30,66437
Al ₂ O _{3(s)}	54,14588	574,83106	-55,40882
Fe ₂ O _{3(s)}	-44,7165	373,28865	-20,03775
Total	4.250,16243	6.607,40521	-219,27292

Catatan: (s) = fasa padat

Eksergi Pada Batubara *Kiln*

Untuk menentukan nilai eksergi pada batubara perlu ditentukan nilai rasio massa oksigen dengan karbon. Perbandingan tersebut digunakan untuk menentukan persamaan untuk eksergi pada batubara.

$$\text{Rasio massa oksigen dengan karbon} = \frac{908}{6542} = 0,13879$$

Nilai eksergi batubara dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

Jika $\frac{O}{C} < 0,666$, maka nilai ekserginya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$x = (\text{LHV})_d \lambda_1 + 6,740s \text{ kJ/kg} \quad (4)$$

dan Jika $\frac{O}{C} > 0,666a$, maka nilai eksnerginya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut

$$x = (\text{LHV})_d \lambda_2 + 6,740s \text{ kJ/kg} \quad (5)$$

Tabel 5. Nilai eksergi kimia pada bahan bakar [berdasarkan kerja Szagut dan Styrylska]

Solid	Kandungan bahan bakar hanya C, H, O, N	$\frac{x}{(\text{LHV})_d} = 1,0438 + 0,0158 \frac{H}{C} + 0,0813 \frac{O}{C} + 0,0471 \frac{N}{C}$ $\frac{x}{(\text{LHV})_d} = \frac{1,0438 + 0,0158 \frac{H}{C} + 0,3343 \frac{O}{C} + 0,0471 \frac{N}{C}}{1 - 0,4043 \frac{O}{C}}$	<p>Jika $\frac{O}{C} \leq 0,5$</p> <p>Jika $\frac{O}{C} > 0,5$</p>
	Kandungan bahan bakar C, H, O, N, dan S	$\frac{x}{(\text{LHV})_d} = 1,0438 + 0,0013 \frac{h}{c} + 0,1083 \frac{o}{c} + 0,0549 \frac{n}{c}$ $\frac{x}{(\text{LHV})_d} = \frac{1,0438 + 0,0013 \frac{h}{c} + 0,4453 \frac{o}{c} \left(1 + 0,0051 \frac{h}{c} \right) + 0,0521 \frac{n}{c}}{1 - 0,5385 \frac{o}{c}}$	<p>Jika $\frac{O}{C} \leq 0,666$</p> <p>Jika $\frac{O}{C} > 0,666$</p>
Fluida	Cair	$\frac{x}{(\text{LHV})_d} = 1,0374 + 0,0159 \frac{H}{C} + 0,0567 \frac{O}{C} + 0,05985 \frac{S}{C} \left(1 - 0,1737 \frac{H}{C} \right)$	
	Gas	$\frac{x}{(\text{LHV})_d} = 1,0334 + 0,0183 \frac{H}{C} - 0,0694 \frac{1}{C}$	

Catatan: $\frac{H}{C}, \frac{O}{C}, \frac{N}{C}, \frac{S}{C}$ = rasio nilai atom; $\frac{h}{c}, \frac{o}{c}, \frac{n}{c}$ = rasio massa

x = nilai eksergi bahan bakar

$(\text{LHV})_d$ = nilai pembakaran rendah

s = fraksi massa sulfur

Untuk menghitung nilai λ dapat menggunakan data fraksi atom batubara *kiln*. Data fraksi atom batubara *kiln* dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 6. Fraksi atom batubara *kiln*

Komponen	M (kg/kmol)	Fraksi massa (%)	Fraksi atom (%)
C _(s)	12	65,42	7,85
H _{2(g)}	2	5,52	0,11
O _{2(g)}	32	9,08	2,91
N _{2(g)}	28	1,08	0,30
S _(s)	32	0,82	0,26
H ₂ O _(l)	18	4,63	83,34
Abu	–	13,45	-
Total	–	100	94,7712

Catatan: (s) = fasa padat; (l) = fasa cair; (g) = fasa gas

$$\lambda = 1,0438 + 1,882 \frac{H}{C} + 0,0610 \frac{O}{C} + 0,0404 \frac{N}{C} \quad (6)$$

sesuai dengan data-data yang didapatkan, maka:

$$\begin{aligned} \lambda &= 1,0438 + 1,882 \frac{0,0552 \times 1}{0,6542 \times 12} + 0,0610 \frac{0,0908 \times 16}{0,6542 \times 12} + 0,0404 \frac{0,0108 \times 14}{0,6542 \times 12} \\ &= 1,0691 \end{aligned}$$

(LHV)_d = nilai pembakaran rendah

$$(LHV)_d = HHV - 2400 (M + 9H_2) \quad (7)$$

$$= 23.848,8 - 2400(0,0908 + 9 \times 0,0552)$$

$$= 25.545,36 \text{ kJ/kg batubara}$$

Dengan mengetahui nilai rasio massa oksigen dengan karbon dan nilai λ , maka nilai eksergi batubara dapat diketahui.

karena $\frac{O}{C} < 0,666$, maka nilai eksergi batubara adalah:

$$\begin{aligned} x_{(batubara)} &= (LHV)_d \lambda_1 + 6,740s \text{ kJ/kg batubara} \\ &= 22.545,36 \times 1,0691 + 6,740(0,0082) \text{ kJ/kg batubara} \\ &= 24.103,30125 \text{ kJ/kg batubara} \end{aligned}$$

catatan: s = fraksi massa sulfur dan nilainya diketahui dari analisis ultimasi batubara

Laju alir eksergi batubara *kiln* adalah:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{(batubara)} &= \dot{m}_{(batubara)} \cdot x_{(batubara)} \\ &= 10.000 \text{ kg/jam} \times 24.103,30125 \text{ kJ/kg} \\ &= 241.033.012,52 \text{ kJ/jam} \\ &= 66.953,62 \text{ kJ/s} \\ &= 66.953,62 \text{ kW} \end{aligned}$$

Eksergi batubara per kg klinker:

$$x_{(batubara)} = \frac{\dot{x}_{(batubara)}}{\dot{m}_{(klinker)}}$$

$$= \frac{66.953,61459 \text{ kJ/s}}{39,38974 \text{ kg/s}}$$

$$= 1.699,77 \text{ kJ/kg klinker}$$

Eksergi Udara Yang Masuk Ke Kiln

Udara yang masuk ke dalam *kiln* terdiri dari empat macam yaitu udara pendorong batubara, udara *primary fan*, udara nosring, dan udara sekunder. Untuk menganalisis eksergi udara yang masuk ke *kiln* diperlukan nilai kapasitas panas, entalpi, dan entropi dari masing-masing udara yang masuk ke dalam *kiln*. Tekanan udara yang masuk ke dalam *kiln* mempunyai tekanan yang sama dengan tekanan atmosfer ($P = P_o$) yaitu 1 atm atau 101,325 kPa. Udara dapat dikatakan sebagai gas ideal, maka untuk menghitung nilai eksergi udara dapat menggunakan persamaan:

$$x_{\text{gas ideal}} = m c_p T_o \left(\frac{T}{T_o} - 1 - \ln \frac{T}{T_o} \right) + m R T_o \left(\frac{P_o}{P} - 1 - \ln \frac{P_o}{P} \right) \quad (8)$$

Dari hasil perhitungan laju alir eksergi dan eksergi dari masing-masing udara yang masuk ke *kiln*, maka total laju alir eksergi dan nilai eksergi udara yang masuk ke *kiln* dapat diketahui. Hasil perhitungan laju alir eksergi dan eksergi udara yang masuk ke *kiln* dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Laju alir eksergi dan eksergi udara yang masuk ke kiln

Komponen	$\dot{x}$ (kW)	x (kJ/kg klinker)
Udara pendorong batubara	4,20	0,11
Udara <i>primary fan</i>	131,86	3,35
Udara nosring	13,21	0,34
Udara sekunder	3.649,88	96,66
Total	3.799,14	96,45

Eksergi Pada Kerja Motor

Kerja motor merupakan aliran energi mekanikal untuk melakukan perputaran yang mana ekserginya dapat diukur, eksergi tersebut merupakan kerja otomatis yang berubah menjadi aliran eksergi yang mempunyai nilai yang sama. Maka dapat dikatakan bahwa kerja motor merupakan aliran eksergi atau dapat dikatakan suatu aliran kerja (W) sebanding dengan aliran eksergi.

$$x_w = W$$

Daya motor yang diketahui = 450 kW

Laju alir eksergi pada motor sama dengan daya pada motor tersebut, maka:

Laju alir motor adalah:

$$\dot{x}_{(motor)} = \dot{W}_{(motor)}$$

$$= 450 \text{ kW}$$

Eksergi motor per kg klinker adalah:

$$x_{(motor)} = \frac{\dot{x}_{(motor)}}{\dot{m}_{\text{klinker}}}$$

$$= \frac{450 \text{ kJ/s}}{39,38974 \text{ kg/s}}$$

$$= 11,4243 \text{ kJ/kg klinker}$$

Eksergi yang keluar dari *kiln* berupa eksergi gas buang *kiln*, eksergi debu sisa pembakaran, eksergi yang hilang akibat konveksi dan radiasi, eksergi klinker (produk), dan eksergi yang digunakan untuk reaksi di dalam *kiln*.

Perhitungan Eksergi Pada Gas Buang *Kiln*

Untuk menghitung eksergi gas buang *kiln*, terlebih dahulu menentukan komposisi dan kapasitas panas gas buang tersebut. Gas buang *kiln* dapat dikatakan sebagai gas ideal. Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai eksergi pada gas buang *kiln* dapat menggunakan persamaan (3).

Tabel 8. Data kapasitas panas gas buang *kiln*

Komponen	M (kg/kmol)	$\dot{m}$ (kg/jam)	Kapasitas panas, C_p (cal/mol.K)
CO _{2(g)}	44	23.777,76055	$10,34 + 0,00274T - 195500/T^2$
CO _(g)	28	133,3645	$6,60 + 0,00120T$
H ₂ O _(g)	18	7.841,31063	$8,22 + 0,00015T - 0,00000134T^2$
SO _{2(g)}	64	164	$7,70 + 0,00530T - 0,00000083T^2$
N _{2(g)}	28	192.188,2171	$6,50 + 0,00100T$
O _{2(g)}	32	37.394,35864	$8,27 + 0,000258T - 187700/T^2$

Catatan: (g) = fasa gas

Dari hasil perhitungan laju alir eksergi dan eksergi dari masing-masing komposisi gas buang *kiln*, maka total laju alir eksergi dan eksergi gas buang *kiln* dapat diketahui dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 9.

Tabel 9. Laju alir eksergi dan eksergi gas buang *kiln*

Komponen	$\dot{x}$ (kW)	x (kJ/kg klinker)
CO _{2(g)}	801,40	20,35
CO _(g)	4,48	0,11
H ₂ O _(g)	432,16	10,97
SO _{2(g)}	3,52	0,09
N _{2(g)}	6.389,13	162,20
O _{2(g)}	1.190,16	30,22
Total	8.820,84	223,94

Catatan: (g) = fasa gas

Eksergi Pada Debu Yang Keluar Dari *Kiln*

Debu yang keluar merupakan hasil dari hilang pijar (*Loss On Ignition*) dan abu batubara. Untuk menghitung eksergi debu yang keluar dari *kiln*, harus mengetahui data kapasitas panas debu. Karena debu yang keluar dari *kiln* merupakan fasa padat, maka untuk menghitung eksergi debu tersebut dapat menggunakan persamaan (1).

Tabel 7. Data kapasitas panas debu yang keluar dari *kiln*

Komponen	M (kg/kmol)	Kapasitas panas, C_p (cal/mol.K)
CaO _(s)	56	$10,00 + 0,00484T - 108000/T^2$
MgO _(s)	44	$10,86 + 0,001197T - 208700/T^2$
SiO _{2(s)}	60	$10,87 + 0,008712T - 241200/T^2$
Al ₂ O _{3(s)}	102	$22,08 + 0,008971T - 522500/T^2$
Fe ₂ O _{3(s)}	160	$24,72 + 0,01604T - 423400/T^2$

Catatan: (s) = fasa padat

Dari hasil perhitungan dari masing-masing komponen debu yang keluar dari *kiln*, maka dapat diketahui nilai laju alir eksergi dan nilai eksergi debu per kg klinker. Nilai laju alir eksergi dan eksergi pada debu yang keluar dari *kiln* dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 8. Laju alir eksergi dan eksergi debu yang keluar dari *kiln*

Komponen	$\dot{x}$ (kW)	x (kJ/kg klinker)
CaO _(s)	89,87	2,28
MgO _(s)	1,90	0,05
SiO _{2(s)}	22,46	0,57
Al ₂ O _{3(s)}	15,37	0,39
Fe ₂ O _{3(s)}	3,36	0,09
Total	133,17	3,38

Catatan: (s) = fasa padat

Debu sisa hasil pembakaran keluar bersama-sama dengan gas buang kiln, maka temperatur debu sama dengan temperatur gas buang *kiln*. Karena debu yang keluar dari *kiln* merupakan senyawa kimia, maka untuk menganalisis ekserginya dapat juga menggunakan fungsi termodinamika baru yaitu eksergi referensi dan standar eksergi dengan bantuan energi Gibbs pada pembentukan senyawa. Faktor koreksi temperatur pada unsur-unsur kimia yang terkandung dalam komponen juga digunakan dalam perhitungan ini karena perhitungan eksergi menggunakan temperatur referensi 30°C atau 303,15 K, sedangkan data-data untuk menghitung eksergi referensi dan standar eksergi menggunakan temperatur referensi 25°C atau 298,15 K.

Dari hasil perhitungan dari masing-masing komponen debu yang keluar dari *kiln*, maka dapat diketahui nilai eksergi referensi dan nilai standar eksergi debu yang keluar dari *kiln*. Hasil perhitungan eksergi referensi dan standar eksergi debu yang keluar dari *kiln* dapat dilihat pada tabel 9.

Tabel 9. Nilai eksergi referensi, standar eksergi debu yang keluar dari *kiln*, dan faktor koreksinya

Komponen	x^0 (kJ/kg)	x^0 (kJ/kg)	δ_T (kJ/kg)
CaO _(s)	1.970,25	2.096,05	-40,21
MgO _(s)	1.269,85	1.460,06	-72,96
SiO _{2(s)}	1.000,67	1.163,62	-30,66
Al ₂ O _{3(s)}	54,15	231,33	-55,41
Fe ₂ O _{3(s)}	- 44,72	80,44	-20,04
Total	4.250,16	5.031,50	-219,27

Catatan: (s) = fasa padat

Eksergi Akibat Konveksi dan Radiasi

Perhitungan eksergi akibat konveksi dan radiasi dapat dikatakan sebagai eksergi pada aliran panas. Eksergi akibat konveksi dan radiasi ini termasuk eksergi yang tidak digunakan. Eksergi yang diakibatkan konveksi dan radiasi dapat dihitung jika laju alir panas tersebut telah diketahui. Nilai laju alir panas akibat konveksi dan radiasi telah diketahui dari perhitungan neraca energi (*energy balance*). Dengan diketahuinya nilai laju alir panas konveksi dan radiasi, maka eksergi akibat konveksi dan radiasi dapat juga dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$x_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T_{permukaan}} \right) Q \quad (9)$$

Dari hasil perhitungan laju alir eksergi akibat konveksi dan radiasi, maka laju alir eksergi yang melewati *shell* adalah:

$$\begin{aligned}\dot{x}_{(loss)} &= \sum \dot{x}_{(konveksi)} + \sum \dot{x}_{(radiasi)} \\ &= (1.483.949,263 + 1.699.412,381) \text{ Watt} \\ &= 3.183.361,644 \text{ Watt} \\ &= 3.183,36 \text{ kW}\end{aligned}$$

Eksergi yang hilang secara radiasi dan konveksi yang melewati *shell* per kg klinker adalah:

$$\begin{aligned}x_{(loss)} &= \frac{\dot{x}_{(loss)}}{\dot{m}_{\text{klinker}}} \\ &= \frac{3.183,36164 \text{ kJ/s}}{39,38974 \text{ kg/s}} \\ &= 80,82 \text{ kJ/kg klinker}\end{aligned} \tag{10}$$

Eksergi Pada Klinker

Klinker yang keluar dari *kiln* berbentuk senyawa kimia, maka untuk menghitung kapasitas panasnya haruslah mengetahui komposisi klinker tersebut. Karena klinker berbentuk fasa padat, maka untuk menentukan nilai eksergi pada produk klinker dapat menggunakan persamaan (1).

Tabel 10. Data-data klinker

Komponen	Rumus kimia	<i>M</i> (kg/kmol)
C ₃ S _(s)	3CaO.SiO ₂	228
C ₂ S _(s)	2CaO.SiO ₂	172
C ₃ A _(s)	3CaO.Al ₂ O ₃	270
C ₄ AF _(s)	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	486
Free CaO _(s)	CaO	56
Free MgO _(s)	MgO	40

Dari hasil perhitungan masing-masing komponen klinker, maka dapat diketahui nilai laju alir eksergi dan eksergi klinker yang dihasilkan dari *kiln*. Hasil perhitungan laju alir eksergi dan eksergi pada klinker dapat dilihat pada tabel 11.

Tabel 11. Laju alir eksergi dan eksergi pada klinker yang dihasilkan dari *kiln*

Komponen	$\dot{x}$ (kW)	x (kJ/kg klinker)
C ₃ S _(s)	19.422,60	490,09
C ₂ S _(s)	7.508,71	190,63
C ₃ A _(s)	4.384,32	111,31
C ₄ AF _(s)	3.432,25	87,14
Free CaO _(s)	215,27	5,47
Free MgO _(s)	356,52	9,05
Total	35.319,68	896,67

Catatan: (s) = fasa padat

Karena senyawa kimia pembentuk klinker sama dengan *kiln feed*, maka data eksergi referensi, standar pembentukan energi Gibbs dan faktor koreksi temperatur pada klinker yang dihasilkan dari *kiln* sama dengan data pada *kiln feed*.

Dari hasil perhitungan dari masing-masing komponen klinker, maka dapat diketahui nilai eksergi referensi dan nilai standar eksergi klinker. Hasil perhitungan eksergi referensi dan standar eksergi klinker dapat dilihat pada tabel 12.

Tabel 12. Nilai eksergi referensi, standar eksergi komposisi klinker dan faktor koreksinya

Komponen	x^{θ} (kJ/kg)	x° (kJ/kg)	δ_T (kJ/kg)
$C_3S_{(s)}$	6.911,32	7.694,61	-151,28
$C_2S_{(s)}$	4.941,11	5.726,13	-111,08
$C_3A_{(s)}$	5.964,79	6.790,18	-176,02
$C_4AF_{(s)}$	7.890,29	8.685,34	-236,27
Free $CaO_{(s)}$	1.970,22	2.748,15	-40,21
Free $MgO_{(s)}$	1.269,84	2.166,97	-72,96
Total	28.947,57	33.811,38	-787,81

Catatan: (s) = fasa padat

Eksergi Pada Reaksi Pembentukan Klinker

Untuk menghitung nilai eksergi reaksi yang terjadi di dalam *kiln*, terlebih dahulu mengetahui komposisi reaktan dan produk. Dengan diketahuinya reaktan dan produk pada reaksi, maka nilai eksergi reaksi tersebut dapat diketahui.

Sebelum menghitung eksergi reaksi yang terjadi di dalam *kiln*, terlebih dahulu menentukan beberapa ketentuan untuk mempermudah perhitungan yaitu:

- 1) Menentukan persamaan komposisi reaktan dan produk.
- 2) Menentukan temperatur reaksi dan temperatur referensi.
- 3) Menentukan nilai kapasitas panas dari masing-masing komponen reaksi

Setelah mengetahui reaktan dan produk pada reaksi, maka dengan bantuan energi Gibbs, maka nilai eksergi untuk reaksi dapat ditentukan. Untuk menentukan nilai eksergi pada reaksi dapat menggunakan persamaan berikut:

Untuk menentukan nilai eksergi pada reaktan

$$\dot{x}_{reaktan} = G_R - G_o \quad (11)$$

dimana:

G_R = Fungsi Gibbs pada reaktan

G_o = Fungsi Gibbs pada campuran

Untuk menentukan nilai eksergi pada produk

$$\dot{x}_{produk} = G_P - G_o \quad (12)$$

dimana:

G_P = Fungsi Gibbs pada produk

G_o = Fungsi Gibbs pada campuran

Nilai G_o untuk reaktan dan produk adalah sama. Laju alir eksergi pada reaksi dapat ditandai dengan $(\dot{w}_x)_{maks}$ maka persamaan eksergi untuk reaksi dapat ditulis sebagai berikut

$$\begin{aligned} (\dot{w}_x)_{maks} &= \dot{x}_{reaktan} - \dot{x}_{produk} \\ &= G_R - G_P \end{aligned} \quad (13)$$

$$= (H_R - H_P) - T_0(S_R - S_P)$$

Laju alir eksergi reaksi endotermis adalah:

$$\begin{aligned} (\dot{W}_x)_{\text{endotermal}} &= \dot{x}_{\text{reaktan}} - \dot{x}_{\text{produk}} \\ &= \dot{G}_{\text{Reaktan}} - \dot{G}_{\text{Produk}} \\ &= (\dot{G}_{(\text{kiln feed})}) - (\dot{G}_{(\text{klinker})} + (\dot{G}_{(\text{debu})} - \dot{G}_{(\text{abu hasil pembakaran})}) + \dot{x}_{(\text{konveksidan radiasi})}) \\ &= 18.909,24 - [35.770,78 + (173,69 - 63,46) + 3.183,36] \text{ kW} \\ &= -20.155,13 \text{ kW} \end{aligned}$$

Eksergi reaksi endotermis per kg klinker adalah:

$$\begin{aligned} (W_x)_{\text{endotermal}} &= x_{\text{reaktan}} - x_{\text{produk}} \\ &= G_{\text{Reaktan}} - G_{\text{Produk}} \\ &= (G_{(\text{kiln feed})}) - (G_{(\text{klinker})} + (G_{(\text{debu})} - G_{(\text{abu hasil pembakaran})}) + x_{(\text{konveksidan radiasi})}) \\ &= 480,06 - [908,124 + (4,41 - 1,61) + 80,82] \text{ kJ/kg klinker} \\ &= -511,69 \text{ kJ/kg klinker} \end{aligned}$$

Total eksergi reaksi di dalam *kiln* adalah:

$$\begin{aligned} (\dot{W}_x)_{\text{reaksi}} &= (\dot{W}_x)_{\text{eksotermal}} - (\dot{W}_x)_{\text{endotermal}} \\ &= (-3.331,36) - (-20.155,13) \text{ kW} \\ &= 16.823,77 \text{ kW} \end{aligned} \quad (14)$$

Eksergi reaksi endotermis per kg klinker adalah:

$$\begin{aligned} (W_x)_{\text{maks}} &= (W_x)_{\text{eksotermal}} - (W_x)_{\text{endotermal}} \\ &= (-84,57425) - (511,68483) \text{ kJ/kg klinker} \\ &= 427,11058 \text{ kJ/kg klinker} \end{aligned}$$

Efisiensi penggunaan bahan bakar pada *kiln* berbeda-beda antara satu dengan yang lainnya, tergantung kepada jenis *kiln* dan proses yang digunakan. *Rotary kiln* pada dasarnya merupakan suatu penukar panas padat-gas yang alirannya berlawanan dan energi yang dihasilkan banyak terbuang. Pada dasarnya masalah kehilangan panas berhubungan dengan desain pabrik. Namun pabrik yang di desain dengan baik, jika tidak dioperasikan pada kondisi terbaik tidak akan memiliki efisiensi panas yang tinggi.

Efisiensi panas pada *kiln* dapat ditentukan berdasarkan beberapa hal:

a. Secara teori (berdasarkan perhitungan neraca energi)

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{\text{Energi masuk} - \text{Energi yang hilang}}{\text{Energi yang keluar}} \times 100\% \\ &= \frac{(2.998,35066 - 185,85246)}{2986,92636} \times 100\% \\ &= 94,16\% \end{aligned}$$

b. Secara industri (berdasarkan konsumsi batubara)

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{\text{Energi batubara} - \text{Energi yang hilang}}{\text{Energi batubara}} \times 100\% \\ &= \frac{(72,10434 + 1.681,82555) - 185,85246}{(72,10434 + 1.681,82555)} \times 100\% \end{aligned}$$

$$= 89,40\%$$

c. Berdasarkan produk yang dihasilkan

$$\begin{aligned}\eta_1 &= \frac{\text{Energi klinker}}{\text{Energi batubara}} \times 100\% \\ &= \frac{1.278,39886}{(72,10434 + 1.681,82555)} \times 100\% \\ &= 72,40\%\end{aligned}$$

Efisiensi Hukum Termodinamika Kedua memperlihatkan konversi energi yang didasarkan pada memasukkan energi apakah bermanfaat atau tidak. Konsep eksergi digunakan untuk menentukan keefektifan suatu sistem untuk melakukan kerja. Keefektifan suatu sistem merupakan perbandingan kerja berguna nyata yang dihasilkan terhadap kerja berguna reversibel atau yang berdayaguna. Keefektifan yang juga disebut efisiensi Hukum Termodinamika Kedua dapat dianggap sebagai ukuran yang sesuai untuk melakukan kerja. Efisiensi Hukum Termodinamika Kedua dapat didefinisikan sebagai:

$$\eta_2 = \frac{X_{\text{output}}}{X_{\text{input}}} \times 100\% \quad (15)$$

Efisiensi Hukum Termodinamika Kedua pada *kiln* dapat ditentukan berdasarkan beberapa hal.

a) Secara teori (berdasarkan perhitungan eksergi)

$$\begin{aligned}\eta_2 &= \frac{\text{Eksergi produk klinker}}{\text{Eksergi yang masuk}} \times 100\% \\ &= \frac{896,67214}{2.294,81856} \times 100\% \\ &= 39,07\%\end{aligned}$$

b) Secara industri (berdasarkan konsumsi batubara)

$$\begin{aligned}\eta_2 &= \frac{\text{Eksergi produk klinker}}{\text{Eksergi batubara}} \times 100\% \\ &= \frac{896,67214}{1.699,67214} \times 100\% \\ &= 52,75\%\end{aligned}$$

Dalam hal perpindahan energi dalam bentuk panas, efisiensi Hukum Termodinamika Kedua merupakan perbandingan jumlah panas yang digunakan terhadap panas yang terjadi perpindahan, maka keefektifan interaksi panas adalah:

$$\begin{aligned}\eta_2 &= \frac{\text{Eksergi konveksi dan radiasi}}{\text{Panas yang hilang akibat konveksi dan radiasi}} \times 100\% \\ &= \frac{80,81703}{185,85246} \times 100\% \\ &= 43,49\%\end{aligned}$$

Tiga definisi pada efisiensi eksergetik untuk proses *steady state* yaitu efisiensi eksergetik konvensional atau sederhana, efisiensi eksergetik rasional, dan efisiensi eksergetik yang dimanfaatkan.

Bentuk yang paling sederhana dari efisiensi eksergetik adalah efisiensi eksergetik konvensional. Untuk persamaan efisiensi ini, kesetimbangan eksergi pada aliran masuk dan aliran keluar *kiln* telah ditentukan.

$$\dot{x}_{masuk} + \dot{W}_{motor} = \dot{x}_{keluar} + \dot{I} + \dot{x}_Q$$

Efisiensi eksergetik tradisional adalah perbandingan total aliran eksergi yang keluar total aliran eksergi yang masuk.

$$\begin{aligned}\eta_e &= \frac{\sum x_{keluar}}{\sum x_{masuk}} \times 100\% \\ &= \frac{1.647,55102}{2.294,81856} \times 100\% \\ &= 71,79\%\end{aligned}$$

Efisiensi eksergetik rasional didefinisikan oleh Kotas (1985) sebagai perbandingan eksergi keluaran yang diinginkan (eksergi produk) terhadap eksergi yang digunakan atau dikonsumsi. Efisiensi eksergetik rasional dapat digunakan untuk sistem apapun, dengan harapan secara alamiah hilang dari sistem.

$$\psi = \frac{x_{keluaran \text{ yang diinginkan}}}{x_{yang \text{ digunakan}}} \times 100\%$$

dimana:

$x_{keluaran \text{ yang diinginkan}}$ = jumlah dari semua eksergi memindahkan dari sistem, yang harus dihubungkan seperti bentuk keluaran yang diinginkan, yang dihasilkan dari sistem.

$x_{yang \text{ digunakan}}$ = eksergi yang diperlukan mengkonsumsi untuk proses untuk dilakukan.

$$\begin{aligned}\psi &= \frac{x_{keluaran \text{ yang diinginkan}}}{x_{yang \text{ digunakan}}} \times 100\% \\ &= \frac{x_{(gas \text{ buang kiln} + debu + klinker)}}{x_{(kiln \text{ feed} + batubara + udara)}} \times 100\% \\ &= \frac{(223,93761 + 3,3807 + 896,67214)}{(487,1712 + 1699,77307 + 96,44999)} \times 100\% \\ &= 49,23\%\end{aligned}$$

Brodyansky, Sorin menghubungkan koefisien eksergi yang bermanfaat. Bentuk efisiensi ini adalah suatu peningkatan efisiensi eksergetik tradisional, karena mengurangi komponen yang tidak berubah dari aliran yang masuk dan aliran yang keluar.

$$\eta_u = \frac{x_{keluar} - x_{yang \text{ dipindahkan}}}{x_{masuk} - x_{yang \text{ dipindahkan}}} \times 100\%$$

$$= \frac{X_{\text{keluar}} - X_{\text{yang dipindahkan}}}{X_{(\text{kiln feed} + \text{batubara} + \text{udara})} - X_{\text{yang dipindahkan}}} \times 100\%$$

$$= \frac{(1647,55102 - 427,44045)}{(487,1712 + 1699,77307 + 96,44999) - 427,44045} \times 100\%$$

$$= 65,75\%$$

KESIMPULAN

Efisiensi penggunaan bahan bakar pada *kiln* berbeda-beda antara satu dengan yang lainnya, tergantung kepada jenis *kiln* dan proses yang digunakan. Nilai energi dan eksergi pada klinker dapat dihitung per satuan massa produk klinker yang dihasilkan. Peningkatan efisiensi di industri semen dapat juga dengan mengoptimalkan sistem pemulihan panas yang mana didasarkan pada teknologi rotary kiln proses kering dengan 2 (dua) sumber limbah panas utama adalah:

- 1) Gas buang hasil pembakaran batubara dalam rotary kiln, yang setelah melewati preheater bahan baku pada suhu sekitar 300°C.
- 2) Limbah panas dari pendingin klinker berupa udara panas dengan laju dengan suhu rata-rata sekitar 250°C.

REFERENSI

- [1] Parmar Mohit, Solanki Dipak, Vegada Bhavin, “*Energy and Exergy Analysis of Cement Rotary Kiln*”, e-ISSN (O): 2348-4470, p-ISSN (P): 2348-6406, International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD) (2016), Volume 3, Issue 4.
- [2] Fellaou S., Bounahmidi T., “*Analyzing thermodynamic improvement potential of a selected cement manufacturing process: Advanced exergy analysis*”, Energy 154 (2018) 190-200, Elsevier.
- [3] P. John John “*Parametric Studies of Cement Production Processes*”, Journal of Energy Volume 2020, Article ID 4289043, Indawi.
- [4] Atmaca A., Yumrutas R., “*The effects of grate clinker cooler on specific energy consumption and emissions of a rotary kiln in cement industry*”, Int. J. Exergy, Vol. 18, No. 3, 2015, pp.367–386.
- [5] S. Fellaou, T. Bounahmidi, “*Analyzing thermodynamic improvement potential of a selected cement manufacturing process: Advanced exergy analysis*”, Energy 154 (2018) 190-200, Elsevier.
- [6] Satsangi P.S., Singh Gurjeet, Singh Dilpreet, “*Thermodynamic Analysis of Cement Processing Unit: A Comprehensive Review*”, e-ISSN: 2455-2585 (2018): International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science (IJTIMES) Volume 4, Issue 7.
- [7] Thwe Ei, Khatiwada Dilip, Gasparatos Alexandros, “*Life cycle assessment of a cement plant in Naypyitaw, Myanmar*”, Cleaner Environmental Systems 2 (2021) 100007, Elsevier.
- [8] Ghoudi Ghada, Maghrebi Fourat, Magherbi Mourad, “*Exergetic assessment and pollutants emission of a rotary kiln in a tunisian cement manufacturing plant*”, ISSN 1737-9296 (2019): International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET) Vol.9 pp.1-7.
- [9] N.A. Madloola, R. Saidura, N.A. Rahimb, M.R. Islama, M.S. Hossian, “*An exergy analysis for cement industries: An overview*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 921– 932, Elsevier.
- [10] Getasetegn Beniam Emyat “*Energy Audit and Heat Recovery on the Rotary Kiln of the Cement Plant in Ethiopia: A case study*”, ISSN: 2454-1311 (2019): International Journal of Advanced Engineering, Management and Science (IAEMS) Vol -5, Issue-5.

- [11] S. B. Nithyananth, H. Rahul, “*Thermal Energy Audit of Kiln System in a Cement Plant*”, ISSN: 2249–6645, Vol. 5, Iss. 12 (2015): International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER).