

ANALISIS UNJUK KERJA GRATE CLINKER COOLER PADA PROSES PRODUKSI SEMEN

Budi Setiyana¹⁾

Abstract

Clinker Cooler sebagai salah satu bagian dari alat produksi semen mempunyai peranan yang cukup penting. Peralatan ini berfungsi untuk mendinginkan clinker, dan proses pendinginan di sini sangat menentukan kualitas semen yang akan diproduksi. Perhitungan efisiensi panas pada clinker cooler dapat dilakukan dalam dua tahap yaitu, yaitu perhitungan dengan neraca massa dan perhitungan dengan neraca panas. Perhitungan neraca massa diperlukan untuk perhitungan neraca panas. Dari perhitungan neraca panas maka dapat diketahui efisiensi panas dari clinker cooler baik efisiensi panas sistem maupun efisiensi panas reaksi. Nilai unjuk kerja clinker cooler dapat dicari dengan menghitung efisiensi panas reaksi dari clinker cooler, yaitu perbandingan antara jumlah panas untuk reaksi dengan jumlah panas yang disediakan. Efisiensi panas reaksi merupakan indikator baik atau tidaknya unjuk kerja dan pengoperasian clinker cooler.

Kata kunci : clinker cooler, neraca panas, neraca massa

PENDAHULUAN

Dalam proses pembuatan semen, setelah terjadi proses pembakaran (*burning process*), maka untuk tahap selanjutnya adalah dilakukan proses pendinginan material yang dilakukan oleh *clinker cooler*. Pada proses pendinginan, pertama kali clinker didinginkan didalam *kiln (cooling zone)* sampai temperatur sekitar 1350 °C. Kemudian pendinginan berikutnya dilakukan didalam *cooler*. Pendinginan klinker mempengaruhi struktur, komposisi *mineral grindability*, dan kualitas semen yang dihasilkan.

Kecepatan pendinginan clinker mempengaruhi perbandingan antara kandungan kristal dan fase cair yang ada di dalam klinker. Selama pendinginan lambat, seperti yang pada jenis *rotary cooler*, kristal dari komponen klinker akan terbentuk sekaligus menyebabkan sebagian fase cair mamadat. Sementara pada pendinginan cepat, seperti pada jenis *grate cooler*, dapat mencegah pertumbuhan lanjut dari kristal yang terbentuk.

Ada beberapa hal yang terkait dengan kecepatan pendinginan clinker jenis ini :

a. Kekuatan Semen

Kekuatan semen portland salah satunya tergantung pada ukuran kristalnya. Hidrasi dari kristal dengan ukuran lebih besar, akan lebih lambat sehingga mempengaruhi kekuatan semen. Pendinginan clinker secara lambat menghasilkan kristal dengan ukuran 60µ. Sementara batasan yang ditolerir adalah 5-8µ.

b. Kekuatan Terhadap Sulfat

Pendinginan *clinker* secara cepat juga akan meningkatkan ketahanan semen terhadap sulfat (sodium dan magnesium sulfat).

Hal ini dikarenakan kandungan C₃A, yang berhubungan dengan ketahanan semen Portland terhadap serangan sulfat, cenderung ada pada keadaan “*glassy state*” yang dihasilkan oleh pendinginan cepat.

c. *Grindability Clinker*

Clinker yang didinginkan dengan lambat akan membutuhkan tenaga untuk menggiling yang lebih besar daripada *clinker* yang didinginkan cepat. Jumlah fase cair dan ukuran kristal yang lebih kecil pada pendinginan secara cepat memungkinkan hal tersebut terjadi.

Clinker harus didinginkan secepatnya (*quenching*) dengan pertimbangan :

- Agar diperoleh klinker yang bersifat amorf sehingga mudah digiling.
- Mencegah kerusakan alat-alat transportasi dan *storage clinker*, karena material dengan suhu tinggi dapat merusak peralatan dan sulit penangannya.
- Clinker yang panas berpengaruh buruk dalam proses *grinding* nantinya.
- Pendinginan yang baik akan meningkatkan kualitas semen.
- Panas yang terkandung pada klinker dimanfaatkan kembali sebagai *recovered heat*.

DESKRIPSI PERALATAN

Suatu proses pendinginan dapat dilakukan dengan beberapa jenis *Cooler* dengan prinsip operasi hampir sama.

Jenis-jenis *Cooler* tersebut antara lain:

1. *Rotary Cooler*

Rotary Cooler merupakan drum sederhana yang berputar, mengangkat clinker kemudian menjatuhkannya pada arus udara yang masuk sehingga mengakibatkan perpindahan panas antara

¹⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP

klinker dengan udara tersebut. Jenis *Cooler* ini terbatas untuk *kiln* dalam kapasitas kecil.

2. *Planetary Cooler*

Planetary Cooler terdiri dari pipa-pipa yang berbentuk cincin dihubungkan dengan *shell kiln* dan berputar bersama kiln. Jenis *cooler* ini dapat menyebabkan masalah mekanik pada kiln. *Cooler* ini cenderung menyulitkan aerodinamika nyala api dan pada *cooler* jenis ini sulit dalam menyeimbangkan aliran klinker yang masuk ke *Cooler*.

3. *Grate Cooler*

Macam-macam *Grate Cooler* :

a. *Reciprocating Grate Cooler*

Jenis ini pertama kali diperkenalkan oleh *Fuller Company*. Jenis ini terdiri dari sebuah rangkaian under-grate kompartemen dengan *cooling fan* terpisah yang memungkinkan kontrol tekanan dan volume tersendiri pada saat memasukkan udara pendingin. Di *Cooler* ini terdapat lebih dari *under-grate compartment* dan 2 atau 3 *seksi grate* yang digerakkan yang terpisah. Ukuran *grate* pertama 10ft *wide* x 35ft *long* dan *grate* kedua 12ft x 42ft. Tekanan *under-grate* kurang lebih 600mm pada kompartemen pertama makin lama makin berkurang hingga mencapai 200mm pada kompartemen terakhir.

b. *Air Beam Cooler*

Penggunaan air beam, “*Controller Flow Grates*” adalah design dengan daya tahan tinggi dimana udara lewat secara horisontal melewati lubang-lubang ke permukaan *grate*, hal ini mengurangi penurunan kehalusan semen dan membuat aliran udara berkurang tergantung pada daya tahan *bed*.

c. *Cross Bar Cooler*

Tipe yang baru-baru ini (tahun 1999) dikembangkan yaitu *Cross Bar Cooler*. Jenis ini seluruhnya terdiri dari *Static Grate* dengan transportasi klinker dipengaruhi oleh *reciprocating pusher bar* diatas permukaan *grate*. *Cooler* ini juga menggunakan pengatur aliran yang sangat bagus pada masing-masing *grate* untuk mempertahankan aliran udara konstan melalui *clinker bed* tanpa memperhatikan *porositas bed*. Efisiensi jenis *Cooler* ini yaitu 75-78%.

Sebagai sumber udara bertekanan, digunakan *fan-fan* yang terletak di luar konstruksi *cooler*. Penyuplaian udara ini dialirkan melalui pipa yang dihubungkan ke *undergrate*. Disisi samping disediakan pintu-pintu untuk dapat mengakses ke dalam *cooler*, baik untuk daerah *overgrate* maupun *undergrate*. Pada *Fuller Reciprocating Grate Cooler*, udara bertekanan ditiupkan ke ruangan kosong dibawah *grate cooler* dan udara itu naik ke atas untuk mendinginkan material, udara bertekanan itu disalurkan ke sebuah “pipa” di sepanjang *undergrate* dan akan meniupkan udara bertekanan tadi secara langsung.

Sistem ini lebih efektif karena udara yang ditiupkan dapat mendinginkan material secara lebih merata. Disepanjang *undergrate* dipasang sensor-sensor tekanan untuk memonitoring tekanan di *undergrate* tersebut yang diakibatkan oleh udara yang ditiupkan oleh *fan*, dimana hasil dari sensor ini dikirimkan ke peralatan yang selalu memantau keadaan dan akan membandingkan dengan *set point* yang telah ditentukan. Apabila tekanan di *undergrate* melebihi *set point* maka hal ini berarti terjadi penumpukan material di *grate* sehingga kecepatan *grate* harus ditambahkan. Di akhir *grate* dipasang *clinker breaker* yang berguna untuk memperkecil ukuran klinker sebelum masuk ke *finish mill* ataupun *clinker silo*. Udara panas yang dihasilkan oleh peniupan material oleh udara bertekanan ini selanjutnya akan disalurkan ke *Reinforced Suspension Preheater* dan *kiln* sehingga akan menghemat energi. Udara yang keluar dari *Cooler* dilewatkan ke *Electrostatic Precipitator (EP)* untuk mengurangi pencemaran lingkungan.

Bagian-Bagian Utama Cooler

1. *Casing*

Lining casing luar *cooler* terbuat dari konstruksi baja/*plate* dan *rip* langit-langit diperkuat dengan *beam*. *Plate* untuk dinding dilapisi dengan isolasi dan batu tahan api *castable*, untuk mengurangi kehilangan radiasi panas. Keadaan bagian dalam *cooler* dapat dilihat melalui *inspection hole* yang tersedia pada bagian atas dan samping *cooler*.

2. *Cooling Grate*

Cooling Grate terdiri dari beberapa baris *grate plate* yang disusun sejajar dengan kemiringan 10°. *Grate plate* terdiri dari dari *movable grate* dan *stationary grate* yang disusun secara longitudinal terhadap arah *cooler*. *Stationary grate* dipasang pada *support bracket plate* dan *center support* dihubungkan ke *center beam*. *Movable grate* dipasang pada *support frame* dan dihubungkan ke *moving frame*. *Grate plate* memiliki lubang pendingin. *Stationary grate plate* tidak sama bentuknya dengan *movable grate plate*, sehingga tidak dapat ditukar pemasangannya.

3. *Hydraulic Drive*

Movable frame digerakkan oleh *Cylinder Hydraulic Pump* yang dihubungkan ke *movable grate*. Bukaan pada dinding *Cooler* bagian bawah untuk pergerakan. *Hydraulic Drive* dilengkapi dengan *partition plate* sebagai sealing.

4. *Carrying Axle*

Carrying axle/running axle disupport oleh 2 buah *internal roller* dan satu buah *guide roller* yang mempunyai *flange/guide* untuk mengarahkan gerakan *movable frame*.

5. Hammer Breaker

Cooler dilengkapi dengan 2 unit *hammer breaker* yang terdiri dari *breaker rotor* dan *casing spesial wear lining* yang ditumpu oleh 2 buah *bearing housing*. Pelumasan pada bearing diberikan secara otomatis *central lubrication lube* dengan *grease pump*. *Breaker rotor*, digerakkan oleh motor listrik yang dihubungkan dengan *V-belt*. *Hammer* dipasang pada *rotor disc*, sedangkan *casing rotor* dapat diangkat dengan *hoist* untuk mempermudah perbaikan.

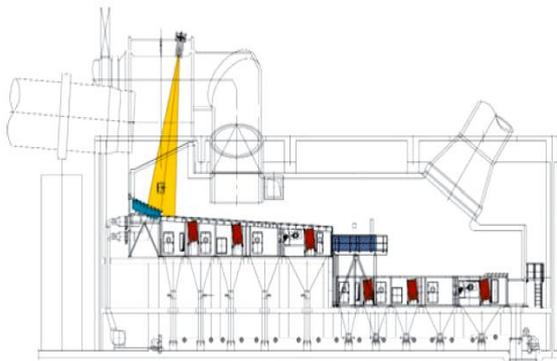
6. Hopper

Untuk menampung debu yang lolos dari lubang *grate plate*, sedangkan pengeluaran dari *hopper* diatur oleh *double tipping valve*.

7. Drag Chain Conveyor

Drag chain biasanya untuk membawa butir debu material yang lolos melewati lubang-lubang *grate cooler*.

Gambar alat selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini :



Gambar 1. Sketsa *Clinker Cooler*

Cara Kerja *Clinker Cooler*

Bahan mentah yang telah digiring di *raw mill* selanjutnya masuk ke *homogenizing silo* dan selanjutnya diberikan proses pemanasan awal sehingga suhunya menjadi 800°C sebelum masuk ke *rotary kiln* yang bersuhu sekitar 1400°C ini kemudian masuk ke unit *cooler* untuk pendinginan sehingga suhu klinker menjadi sekitar 100°C .

Clinker (terak) dengan suhu tinggi akan jatuh pada *cooler* dan didistribusikan secara seragam ke area kompartemen sesuai dengan lebar *gratenya*. Dikarenakan suhu material akan berubah menurut jarak, maka pendingin klinker dibagi menjadi beberapa kompartemen dimana semakin dekat dengan *kiln* maka panjang kompartemen semakin panjang. Udara yang telah melewati material bersuhu sekitar 200°C akan dihisap untuk kemudian digunakan sebagai sumber panas di *preheater* dan *kiln* yang bertujuan untuk meminimalkan energi yang hilang ke

lingkungan sekitar serta yang berarti pula menghemat biaya. Volume jatuhnya klinker ini akan selalu dimonitor oleh sebuah *transmitter* tekanan yang dipasang di *undergrate*. Jika volume curahan terak dari *kiln* melebihi atau kurang dari nilai yang telah disetkan maka *transmitter* tekanan akan mengirim sinyal ke pengontrol tekanan sehingga akan segera mengolah data tersebut yang selanjutnya data tersebut akan dikirim ke pengontrol kecepatan motor penggerak *grate*. Jika volume jatuhnya klinker lebih besar dari yang disetkan maka motor akan bergerak lebih cepat dengan tujuan untuk mengecilkan *bed depth* dan sebaliknya.

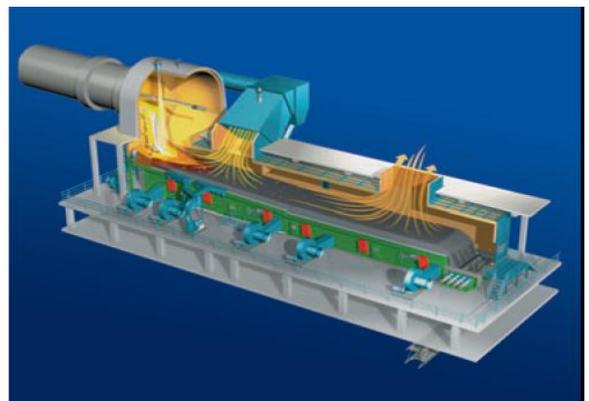
Data dari pengontrol tekanan juga akan dikirim ke pengontrol katup fan kompartemen pertama. Nilai *bed depth* yang besar akan menyebabkan laju kecepatan aliran udara yang kecil tidak cukup kuat untuk menembus klinker yang akan didinginkan. Hubungan antara beda tekanan (P), laju alir udara (v) dan percepatan gravitasi (g) ditentukan oleh hubungan:

$$P = v^2 \cdot \xi / 2g$$

dimana : ξ = densitas udara

Pertambahan nilai P akan berusaha disetkan kembali dengan menambah laju aliran udara. Suatu nilai laju kecepatan udara normal dengan open area 100% adalah sekitar 2meter/detik.

Clinker dari kompartemen pertama dengan memanfaatkan gaya gravitasi dengan memanfaatkan Hukum Newton I bahwa suatu benda akan selalu mempertahankan gerak asalnya. Dengan didinginkan oleh udara yang bersumber dari *fan* di *undergrate* tiap kompartemennya klinker bergerak ke ujung cooler dengan suhu turun menjadi sekitar 1000°C . klinker yang telah didinginkan selanjutnya diperkecil ukurannya dengan *clinker breaker* dengan maksud untuk memperluas area *clinker* yang terkena udara, sehingga mempercepat pendinginan secara alami dalam perjalanan dengan mekanisme ban berjalan ke klinker silo untuk disimpan. Debu dari pemecahan klinker dan debu selama proses pendinginan akan dihisap melalui *fan* dan direduksi oleh *EP* untuk mengurangi partikel yang akan menyebabkan pencemaran udara sebelum dilepas ke atmosfer.



Gambar 2. Cara kerja *clinker cooler*

Teori Neraca Massa dan Energi

1. Penyusunan Persamaan Neraca Massa

Input Massa

1. Clinker Keluar Kiln (M_{KI})
2. Udara Pendingin (C_A)

Output Massa

1. Clinker Keluar Cooler (M_{KO})
2. Udara Sekunder (M_{SA})
3. Udara Tersier (M_{TA})
4. Udara Buang (M_{VA})

Neraca Massa :

$$M_{KI} + M_{CA} = M_{KO} + M_{SA} + M_{TA} + M_{VA}$$

2. Penyusunan Neraca Energi

Input Panas

1. Panas Sensible Clinker keluar kiln (Q_{KI})
2. Panas Sensible udara pendingin (Q_{CA})

Output Panas

1. Panas Sensible Clinker keluar cooler (Q_{KO})
2. Panas Sensible udara sekunder (Q_{SA})
3. Panas Sensible Udara Tersier (Q_{TA})
4. Panas Sensible Udara Buang ke EP (Q_{VA})
5. Panas Lain-lain (Q_{LA})

Neraca Panas :

$$Q_{KI} + Q_{CA} = Q_{KO} + Q_{SA} + Q_{TA} + Q_{VA} - Q_{LA}$$

$$Q_{LA} = (Q_{KI} + Q_{CA}) - (Q_{KO} + Q_{SA} + Q_{TA} + Q_{VA})$$

Perhitungan Efisiensi Thermal

Efisiensi Thermal pada cooler didefinisikan sebagai : "Perbandingan antara jumlah panas yang dikembalikan lagi ke proses pembakaran dengan total panas yang dibawa oleh clinker keluar kiln "

$$\eta = \frac{Q_{in} - (Q_{VA} + Q_{KO} + Q_{LA})}{Q_{in}} \times 100\%$$

METODOLOGI

Cara Memperoleh Data

Data-data yang diperlukan untuk menghitung efisiensi *cooler* adalah sebagai berikut :

- Data Primer
 - Data temperatur udara sekunder
 - Data temperatur udara tersier
 - Data temperatur udara buang
 - Data temperatur clinker keluar *kiln*
 - Data temperatur clinker keluar *cooler*
 - Data berat clinker
 - Data komposisi *coal* masuk *RSP (Reinforced Suspension Preheater)* dan *Kiln*
 - Data kapasitas *fan* pendingin *cooler* dan *fan* udara primer
- Data Sekunder
 - Data ini diperoleh dari literatur-literatur atau study pustaka meliputi :
 - Data panas jenis (*specific heat*) dari clinker maupun udara
 - Data *relative humidity* udara
 - Data standar efisiensi pendinginan *cooler*

Pengolahan Data

Data yang diperoleh baik data primer maupun sekunder diolah sehingga diperoleh besaran-besaran operasi yang diinginkan. Data tersebut digunakan untuk menghitung efisiensi panas.

Efisiensi Thermal Cooler dapat dirumuskan, sbb:

$$\eta = \frac{Q_{KI} - (Q_{VA} + Q_{KO} + Q_R)}{Q_{KI}} \times 100\%$$

Dimana :

Q_{KI} = Panas sensibel clinker keluaran kiln

Q_{VA} = Panas sensibel udara buang (vent air)

Q_{KO} = Panas sensibel udara clinker keluar cooler

Q_R = Panas yang hilang karena radiasi, konduksi, dll (heat loss).

Rumus diatas dapat dijelaskan sebagai berikut :

Efisiensi pendinginan *cooler* adalah perbandingan panas yang bisa diambil oleh udara pendingin yang digunakan kembali sebagai udara pembakaran di *kiln* dan *RSP* dengan panas yang dibawa klinker keluar *kiln* atau panas awal yang dibawa umpan menuju *cooler*.

Panas yang dibawa udara pembakaran diartikan sebagai berikut :

$$Q = m.C_p.\Delta T$$

Dimana :

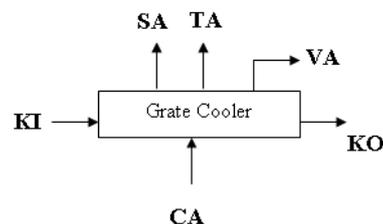
M = Volume udara pembakaran (m^3) dalam hal ini udara sekunder

C_p = Panas Jenis udara sekunder pada suhu tertentu ($kcal/m^3 \cdot ^\circ C$)

ΔT = Suhu udara sekunder masuk kiln

Untuk mengetahui massa udara sekunder, pertama dicari kebutuhan udara secara teoritis dengan cara mereaksikan komponen bahan bakar dengan O_2 , kemudian dicari kebutuhan O_2 secara stoikiometri (O_2 teoritis). Dari kebutuhan O_2 teoritis ini kemudian dicari kebutuhan udara aktual.

HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 3. Diagram alir Massa di Cooler

Dimana :

KI = Aliran clinker dari kiln

KO = Aliran clinker keluar Cooler

SA = Udara sekunder ke kiln

TA = Udara tersier ke SP

VA = Udara buang ke EP

CA = Udara Pendingin

Input Massa

- Clinker dari Kiln
 Laju Massa di Kiln = 234 ton/jam
 Faktor clinker = 1,70
 Clinker yang dihasilkan = 234 ton/1,70
 = 137,423 kg
- Udara Pendingin

Fan	Volume (m ³)
1	18.880
2	32.540
3	32.990
4	22.010
5	22.990
6	23.000
7	23.000
8	23.000
9	23.250
10	40.070
11	35.800
12	40.920
Total	338.450

Berat udara masuk
 = 338.450 m³ x 1,16 kg/m³ = 392.602 kg
 Kondisi udara luar:
 P = 1 atm, T = 30⁰ C, kelembaman 80 %
 Nilai *Relative Humidity* = 0,022 kg air/kg udara
 Berat H₂O dalam udara
 = (0,022/(1+0,022))x392.602 kg = 8.451,32 kg
 Berat udara kering
 = (392.602- 8.451,32) = 384.10,68 kg

Output Massa

- Udara Sekunder
 - Kebutuhan batu bara

Coal	Kg
RSP	14.625
Kiln	9.375

- Komposisi batubara

Komponen	% Berat
C	73,2
H	5,6
O	19,0
N	1,1
S	0,1
Ash	1,0
H ₂ O	16,5

Laju batubara kering masuk Kiln
 = 9.375 x (100 - 16,5)%
 = 7.828 kg/jam

Komposisi batubara kering umpan Kiln

Komponen	Komposisi (% berat)	Laju Massa (kg/jam)
C	73,2	5.730
H	5,60	439
O	19,0	1.487
S	0,1	8
N	1,11	86
SiO ₂	0,33	26
Al ₂ O ₃	0,19	15
Fe ₂ O ₃	0,03	3
CaO	0,40	31
MgO	0,01	1
SO ₃	0,03	2
Total	100	7.828

Menghitung kebutuhan udara untuk pembakaran di Kiln:

- $C + O_2 \rightarrow CO_2$
 Massa C
 = 0,72 x 7.828 kg = 5.730 kg
 = 730 kg/12kg/kg mol = 477,5 kg mol
 Massa O₂ yang dibutuhkan
 = 2 kg mol x 477,5 kg mol = 15.280 kg
- $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$
 Massa H
 = 0,056 x 7.828 kg = 438,368 kg
 = 438,368 kg/2 kg/kg mol
 = 219,184 kg mol
 Massa O₂
 = $\frac{1}{2}$ x 32 kg/kg mol x 219,184 kg mol
 = 3.506,944 kg
- Massa S + O₂ → SO₂
 Massa S
 = 0,001 x 7.828 kg
 = 0,245 kg mol/32/kg mol = 0,292 kg mol
 Massa O₂
 = 0,0245 kg mol x 32 kg/kg mol = 7,828 kg
- $N + O_2 \rightarrow NO_2$
 Massa N
 = 0,011 x 7.828 kg
 = 86,108 kg/14 kg/kg mol = 6,15 kg mol
 Massa O₂
 = 6,15 kg mol x 32 kg/kg mol = 196,8 kg
 Massa O₂ Total
 = (15.280 + 3.506 + 7,828 + 196,8) kg
 = 18.991,572 kg
 Massa O₂ dalam batubara
 = 0,19 x 7.828 kg = 1.487,32 kg
 Massa O₂ teoritis yang dibutuhkan
 = (18.991,572 - 1.487,32) kg
 = 17.504,252 kg
 Massa udara actual : (excess 1,5 %)
 = 100/21 x (1 + 0,015) x 17.504,252 kg
 = 84.603,88 kg

Udara yang masuk Kiln terdiri dari :

1. Udara Primer
 Kapasitas Blower = 9.000 m^3
 Berat Udara
 $= 9.000 \text{ m}^3 \times 1,16 \text{ kg/m}^3 = 10.440 \text{ kg}$
2. Udara pendorong batubara
 Kapasitas Blower = 3.300 m^3
 Berat Udara
 $= 3.300 \text{ m}^3 \times 1,16 \text{ kg/m}^3 = 3.828 \text{ kg}$
3. Udara Nose ring
 Kapasitas Blower = 9.000 m^3
 Berat Udara
 $= 9.000 \text{ m}^3 \times 1,16 \text{ kg/m}^3 = 10.440 \text{ kg}$
 Berat udara sekunder
 $= (804.603,88 - 1.440 - 3.828 - 10.440)$
 $= 59.895,88 \text{ kg}$
 Berat H₂O dalam udara
 $= 0,022/1+0,022 \times 59.895,88 \text{ kg}$
 $= 1.289,34 \text{ kg}$
 Berat udara sekunder kering
 $= (59.895,88 - 1.289,34) \text{ kg} = 58.606,54 \text{ kg}$
4. Udara Tersier
 Menghitung kebutuhan udara untuk pembakaran di RSP
 Batubara kering masuk SP
 $= 14.625 \times (100 - 16,5) \% = 12.212 \text{ kg}$

Komposisi Batubara kering umpan SP

Komponen	Komposisi (% berat)	Laju Massa (kg/jam)
C	73,2	8.929
H	5,60	684
O	19,0	2.320
S	0,1	12
N	1,11	135
SiO ₂	0,33	40
Al ₂ O ₃	0,19	23
Fe ₂ O ₃	0,03	4
CaO	0,40	49
MgO	0,01	2
SO ₃	0,03	4
Total	100	12.212

- a. $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$
 Massa C
 $= 0,732 \times 12.212 \text{ kg} = 8.939,184 \text{ kg}$
 $= 9.939,184 \text{ kg} / 12 \text{ kg/kg mol}$
 $= 744,932 \text{ kg mol}$
 Massa O₂ yang dibutuhkan
 $= 32 \text{ kg/kg mol} \times 744,932 \text{ kg mol}$
 $= 23.837,824 \text{ kg}$
- b. $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
 Massa H = $0,056 \times 12.212 \text{ kg}$
 $= 683,872 \text{ kg} = 683,872 \text{ kg} / 2 \text{ kg/kg mol}$
 $= 341,936 \text{ kg mol}$
 Massa O₂
 $= \frac{1}{2} \times 32 \text{ kg/kg mol} \times 341,936 \text{ kg mol}$
 $= 5.470,976 \text{ kg}$

- c. $\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$
 Massa S
 $= 0,001 \times 12.212 \text{ kg} = 12,212 \text{ kg}$
 $= 12,212 \text{ kg} / 32 \text{ kg/kg mol} = 0,3816 \text{ kg mol}$
 Massa O₂
 $= 0,3816 \text{ kg mol} \times 32 \text{ kg /kg mol}$
 $= 12,212 \text{ kg}$

- d. $\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2$
 Massa N
 $= 0,011 \times 12.212 \text{ kg}$
 $= 134,332 \text{ kg} / 14 \text{ kg/kg mol} = 9,595 \text{ kg mol}$
 Massa O₂
 $= 9,595 \text{ kg mol} \times 32 \text{ kg/kg mol}$
 $= 307,04 \text{ kg}$

Massa O₂ total
 $= (23.837,824 + 5.470,976 + 12,212 + 307,04) \text{ kg}$
 $= 29.628,052 \text{ kg}$
 Massa O₂ dalam batubara
 $= 0,19 \times 12.212 \text{ kg} = 2.320,28 \text{ kg}$
 Massa O₂ teoritis yang dibutuhkan
 $= (29.628,052 - 2.320,28) \text{ kg} = 27.307,772 \text{ kg}$
 Massa udara aktual (excess 1,5 %)
 $= 100/21 \times (1 + 0,015) \times 27.307,772 \text{ kg}$
 $= 131.987,57 \text{ kg}$

Udara yang masuk RSP

Udara Pendorong batubara
 Kapasitas Blower = 3.300 m^3
 Berat udara = $3.300 \text{ m}^3 \times 1,16 \text{ kg/m}^3 = 3.828 \text{ kg}$
 Berat udara tersier
 $= (131.987,57 - 3.828) \text{ kg} = 128.19,57 \text{ kg}$
 Berat H₂O dalam udara
 $= [0,022 / (1 + 0,022)] \times 128.19,57 \text{ kg}$
 $= 2.758,82 \text{ kg}$
 Berat udara tersier kering
 $= (131.987,57 - 2.758,82) \text{ kg} = 129.228,75 \text{ kg}$

5. Udara Buang (Vent Air)

Bukaan Damper 10 %
 Spesifikasi alat :
 $Q = 8.800 \text{ m}^3/\text{min}$ pada 260°C 150 mm H₂O
 Setara dengan : $V = 270.046,3249 \text{ Nm}^3/\text{jam}$
 Laju udara buang = $\sqrt{\text{bukaan damper}} \times V$

$V_1 = \sqrt{10/100} \times 270.046,3249$
 $= 85.396,15 \text{ Nm}^3/\text{jam}$
 $V_2 (329^\circ\text{C}, 1 \text{ atm}) = 160.152,9 \text{ m}^3/\text{jam}$
 Berat udara
 $= 160.152,9 \text{ m}^3/\text{jam} \times 0,16 \text{ kg/m}^3$
 $= 25.624,464 \text{ kg/jam}$
 Berat H₂O dalam udara = 551,6 kg
 Berat udara kering
 $= 25.624,464 - 551,6 = 25.072,864 \text{ kg}$
 Volume udara buang kering
 $= 156.705,4 \text{ m}^3/\text{jam}$

6. Clinker keluar Cooler

Clinker yang dihasilkan = 234 ton/1,70
 $= 137,423 \times 1000 \text{ kg/ton} = 137.423 \text{ kg}$

Neraca Massa di Cooler

Aliran Massa	Input (kg)	Output (kg)
KI	137.423	-
CA	384.150,68	-
SA	-	58.606,54
TA	-	129.228,75
VA	-	156.705,4
KO	-	137.423
Jumlah	521.573,68	481.963,69
Loss Air		39.609,99
Total	521.660,41	521.660,41

PENYUSUNAN NERACA PANAS

Neraca Panas di Cooler

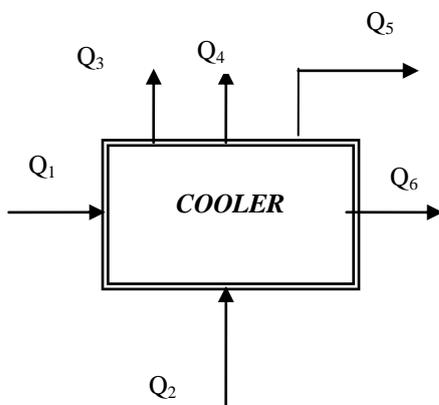


Diagram Alir Panas Cooler

Input panas

1. Panas Sensibel Clinker keluar Kiln
 Berat clinker = 137.423 kg
 Suhu clinker = 1350⁰ C
 Cp clinker = 0,257 kcal/kg⁰C
 $Q_{KI} = m \times Cp \times \Delta T$
 $= 137.42 \text{ kg} \times 0,257 \times (1350 - 30) ^0\text{C}$
 $Q_{KI} = 46.619.387,52 \text{ kcal}$
2. Panas Sensibel Udara Pendingin
 Berat udara masuk = 384.150,68 kg
 Suhu udara masuk = 50⁰C
 Cp udara = 0,24 kcal/kg⁰C
 $Q_{CA} = m \times Cp \times \Delta T$
 $= 384.150,68 \text{ kg} \times 0,24 \times (50 - 30) ^0\text{C}$
 $Q_{CA} = 1.834.923,264 \text{ kcal}$

Output Panas

1. Panas sensible udara sekunder
 Berat sekunder udara kering = 58.606,54 kg
 Suhu udara sekunder = 900⁰C
 Cp udara sekunder = 0,251 kcal/kg⁰C
 $Q_{SA} = m \times Cp \times \Delta T$
 $= 58.606,54 \text{ kg} \times 0,251 \times (900 - 30) ^0\text{C}$
 $Q_{SA} = 12.797.910,14 \text{ kcal}$
2. Panas sensible udara tersier

Berat udara tersier kering = 129.228,75 kg
 Suhu udara sekunder = 720⁰C
 Cp udara tersier = 0,248 kcal/kg⁰C
 $Q_{TA} = m \times Cp \times \Delta T$
 $= 129.228,75 \text{ kg} \times 0,248 \times (720 - 30) ^0\text{C}$
 $Q_{TA} = 22.113.623,7 \text{ kcal}$

3. Panas sensible udara buang
 Berat udara buang kering = 156.705,4 kg
 Suhu udara buang = 239⁰C
 Cp udara buang = 0,24 kcal/kg⁰C
 $Q_{VA} = m \times Cp \times \Delta T$
 $= 156.705,4 \text{ kg} \times 0,24 \times (239 - 30) ^0\text{C}$
 $Q_{VA} = 7.860.342,864 \text{ kcal}$
4. Panas sensible clinker keluar Cooler
 Berat clinker keluar Cooler = 137.423 kg
 Suhu clinker keluar Cooler = 87⁰ C
 Cp Klinker = 0,186 kcal/kg⁰C
 $Q_{KO} = m \times Cp \times \Delta T$
 $= 137.423 \text{ kg} \times 0,186 \times (87 - 30) ^0\text{C}$
 $Q_{KO} = 1.456.958,646 \text{ kcal}$

Neraca Panas Pada Cooler

Aliran panas	Input (kcal)	Output (kcal)
KI	46.619.378,52	-
CA	1.843.923,264	-
SA	-	12.797.910,14
TA	-	22.113.623,7
VA	-	7.860.342,864
KO	-	1.456.958,646
Jumlah	48.463.301,78	44.228.835,35
Panas hilang		4.234.466,434
Total	48.463.301,78	48.463.301,78

Loss Heat pada *Clinker Cooler* :

$$= \frac{\text{panas yang hilang}}{\text{total panas}} \times 100 \%$$

$$= \frac{4.234.466,434}{48.463.301,78} \times 100\% = 8,74 \%$$

EFISIENSI TERMAL CLINKER COOLER :

1. Efisiensi Thermal Sistem dari Cooler (η_1)
 $= \frac{\text{total panas input} - \text{panas yang hilang}}{\text{total panas input}} \times 100\%$
 $= \frac{48.463.301,78 - 4.234.466,434}{48.463.301,78} \times 100\%$
 $= 91,26\%$
2. Efisiensi Thermal Reaksi dari Cooler

$$\eta_2 = \frac{Q_{KI} - (Q_{VA} + Q_{KO} + Q_R)}{Q_{KI}} \times 100\%$$

$$= 70,93 \%$$

Dari hasil perhitungan di atas diperoleh *Loss Heat Cooler* sebesar 8,74%, *Efisiensi Thermal Sistem* sebesar 91,26% dan *Efisiensi Thermal Reaksi* sebesar 70,93%. Dari harga *Efisiensi Thermal Reaksi* tersebut, maka efisiensi ini sudah mengalami penurunan. Penurunan efisiensi tersebut merupakan hal yang wajar mengingat alat tersebut sudah beroperasi selama bertahun – tahun.

Efisiensi yang tidak mencapai harga maksimal ini disebabkan oleh adanya panas yang hilang ke lingkungan. Kehilangan panas disebabkan oleh :

1. Adanya perpindahan panas konduksi dimana terjadi perpindahan panas dari dalam cooler menembus isolasi sampai dinding cooler dan perpindahan panas konveksi yaitu perpindahan panas dari dinding cooler ke lingkungan.
2. Adanya kebocoran atau kemungkinan masuknya udara luar ke dalam cooler yang kemudian membawa panas dari dalam cooler. Selain itu castable yang berfungsi sebagai isolasi akan terkikis seiring dengan waktu sehingga sebagian panas akan hilang.

Pada unit *Cooler* besarnya *Lost Heat Cooler* adalah sebesar 8,74 % dari panas pembakaran. Hal ini menunjukkan bahwa bagian-bagian pada *Grate Cooler* tersebut masih berfungsi dengan baik, karena besarnya kehilangan panas masih dibawah batas toleransi yaitu sebesar 12 – 22 % dari panas pembakaran.

Dengan *Efisiensi Thermal Reaksi* sebesar 70,93 %, maka dapat dikatakan bahwa unjuk kerja *Cooler* masih cukup baik karena masih diatas efisiensi minimal yang layak untuk dioperasikan yang besarnya 50 %.

KESIMPULAN

Dari hasil analisa dan perhitungan neraca massa dan neraca panas yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan :

- 1) Besarnya *Loss Heat Cooler* sebesar 8,74%
- 2) Besarnya *Efisiensi Thermal Sistem dari Clinker Cooler* sebesar 91,26%
- 3) Besarnya *Efisiensi Thermal Reaksi dari Clinker Cooler* sebesar 70,93%

Maka dengan nilai *Efisiensi Thermal Reaksi Cooler* seperti memberikan kesimpulan bahwa unjuk kerja *Clinker Cooler* masih sangat baik dan benar-benar layak digunakan di dalam proses produksi semen.

DAFTAR PUSTAKA

1. Alsop, P. A., “*Cement Plant Operation Handbook for Dry Process Plant*”. 4th edition, Tradeship Publication, Ltd., 2005.
2. Duda, W.H.,”*Cement data Book: International Process Engineeering in The Cement Industries*”, 3rd ed., Bauverlag GMBH Weis Baden and Berlin, Mc. Donald and Evan, London, 1976.
3. Perray, K.E., “*Cement Manufacturer’s Hand Book*”, Chemical Publishing Co., Inc., New York, 1979.
4. Perry, R.H. and Clinton, C.H., “*Chemical Engineer’s Hand Book*”, 5th edition, International Student, Mc. Graw Hill, Kogakhusa. Ltd., 1973.
5. Wijaya,Handi., “*Cement Technology*”, Industrial Relation Division Training&Development departement, PT. Indocement tunggal Prakarsa Tbk., 1994.
6. Chapman,AJ, “ *Heat Transfer* ”,4th edition, Macmillan Publishing Company, New York, 1984