



EVALUASI KINERJA ALAT GRATE COOLER PADA PROSES PRODUKSI CLINKER DI PT XYZ

Teguh Taufiqurohima*

Program Studi D3 Teknik Kimia, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir, Desa Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kab. Bandung Barat, 40559,
Jawa Barat

E-mail: teguh.taufiqurohima@polban.ac.id

Abstract

Grate cooler is one of the main equipment in the clinker production process cement industry. It functions to rapidly reduce the temperature of clinker exiting the rotary kiln from approximately 1,400 °C to around 100 °C (quenching process). The rapid cooling process is crucial for maintaining clinker quality with high $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S) content and low free CaO content. This study aims to evaluate the performance of the grate cooler by calculating the mass and heat balance occurring in the equipment. The study also determines the efficiency of the grate cooler. The method used involves collecting operational data, including kiln feed data, fuel (coal) data, and operational temperature data. The mass balance calculation data show equilibrium at 676,982 kg/h, with cooling air requirements of 486,286 kg/h. The heat balance calculations indicate that the total heat entering and exiting the system is 306,721,361 kJ/h, with heat losses amounting to 11,600,240 kJ/h. The grate cooler efficiency was found to be 76.8%, indicating that equipment is still in good condition and effectively utilized heat energy for combustion in the rotary kiln and calciner. This performance evaluation can serve as a basis for decision making to enhance energy efficiency and productivity in clinker production.

Keywords: Clinker; Efficiency; Grate Cooler; Mass Balance; Heat Balance

Abstrak

Grate cooler merupakan salah satu peralatan utama dalam proses produksi clinker di industri semen. Grate cooler berfungsi untuk menurunkan suhu clinker yang keluar dari rotary kiln dari sekitar 1.400 °C menjadi sekitar 100 °C secara mendadak (quenching process). Proses pendinginan secara mendadak ini sangat penting untuk mempertahankan kualitas clinker dengan kandungan $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S) yang tinggi dan kandungan CaO bebas yang rendah. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi kinerja dari peralatan grate cooler dengan menghitung neraca massa dan neraca panas yang terjadi pada peralatan. Setelah itu dapat menentukan nilai efisiensi dari peralatan grate cooler. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengumpulan data operasional berupa data kiln feed, data bahan bakar (coal), dan data suhu operasi pada peralatan. Hasil perhitungan neraca massa menunjukkan seimbang pada nilai 676.982 kg/jam, dengan kebutuhan udara pendingin sebesar 486.286 kg/jam. Perhitungan neraca panas menunjukkan total panas yang masuk dan keluar sistem sebesar 306.721.361 kJ/jam dengan panas yang hilang sebesar 11.600.240 kJ/jam. Nilai efisiensi grate cooler sebesar 76,8%

yang menunjukkan bahwa peralatan masih dalam kondisi baik dan dapat memanfaatkan energi panas untuk proses pembakaran pada rotary kiln dan calciner. Evaluasi kinerja ini dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan untuk meningkatkan efisiensi energi dan produktivitas dalam proses produksi clinker

Kata Kunci: Clinker; Efisiensi; Grate cooler; Neraca Massa; Neraca Panas

1. Pendahuluan

Grate cooler merupakan salah satu jenis alat yang ada pada sistem produksi *clinker* di pabrik semen yang memiliki fungsi untuk melakukan pendinginan *clinker* secara mendadak (*quenching*). Suhu *clinker* diharapkan dapat diturunkan secara mendadak dari sekitar 1.400 °C ke sekitar 100 °C [1]. Proses pendinginan secara mendadak ini sangat penting dilakukan untuk menghasilkan kualitas clinker yang baik. Salah satu parameter kualitas clinker adalah memiliki kandungan senyawa mineral $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S) yang tinggi (sekitar >60%) dan memiliki kandungan CaO bebas yang rendah (sekitar <2%) [2]. Apabila sistem pendinginan di *grate cooler* ini bermasalah, maka akan terjadi reaksi bolak-balik (reversibel) dari senyawa mineral $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S) menjadi senyawa mineral $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S) dan CaO bebas [3]. Reaksi yang terjadi pada proses pendinginan di *grate cooler* dapat dilihat pada persamaan 1 berikut ini:



Semua jenis pendingin memiliki kesamaan bahwa udara pendingin mengalir secara langsung (searah atau lawan arah) melalui *clinker* yang kemudian menghasilkan udara panas yang diteruskan sebagai udara pembakaran di *rotary kiln* dan *calciner*. Pada proses pendinginan terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan, yaitu pertama laju pendinginan yang dipengaruhi oleh kondisi *clinker* yang masuk ke *grate cooler* yang meliputi suhu dan ukuran partikel *clinker*. Kedua efisiensi alat *grate cooler* untuk mengukur kinerja dari alat tersebut. Nilai efisiensi alat *grate cooler* dapat dihitung dengan cara membandingkan jumlah panas udara sekunder (*secondary air*) sebagai udara pembakaran yang masuk ke *rotary kiln* dan jumlah panas udara tersier (*tertiary air*) sebagai udara pembakaran yang masuk ke *calciner* dengan jumlah panas *clinker* yang masuk ke alat *grate cooler* [4]. Persamaan untuk menghitung efisiensi *grate cooler* dapat dilihat pada persamaan 2 berikut ini:

$$\text{Efisiensi } \textit{grate cooler} = \left[\frac{Q_4 + Q_5}{Q_2} \right] \times 100\% \quad (2)$$

dimana,

Q_4 = Jumlah panas udara sekunder sebagai udara pembakaran yang masuk ke *rotary kiln*

Q_5 = Jumlah panas udara tersier sebagai udara pembakaran yang masuk ke *calciner*

Q_2 = Jumlah panas *clinker* yang masuk ke alat *grate cooler*

Efisiensi merupakan salah satu indikator yang dapat digunakan untuk mengetahui kinerja dari suatu alat. Nilai hasil perhitungan efisiensi suatu alat juga digunakan sebagai menentukan kebijakan perusahaan untuk menentukan bagian mana yang harus diperbaiki dengan tujuan penghematan dan peningkatan produktivitas. Efisiensi dari alat *grate cooler* di pabrik semen merupakan hal yang sangat penting karena berkaitan

dengan kualitas *clinker* yang dihasilkan dan pemanfaatan udara panas yang digunakan pada proses pembakaran di *rotary kiln* dan *calciner* [4].

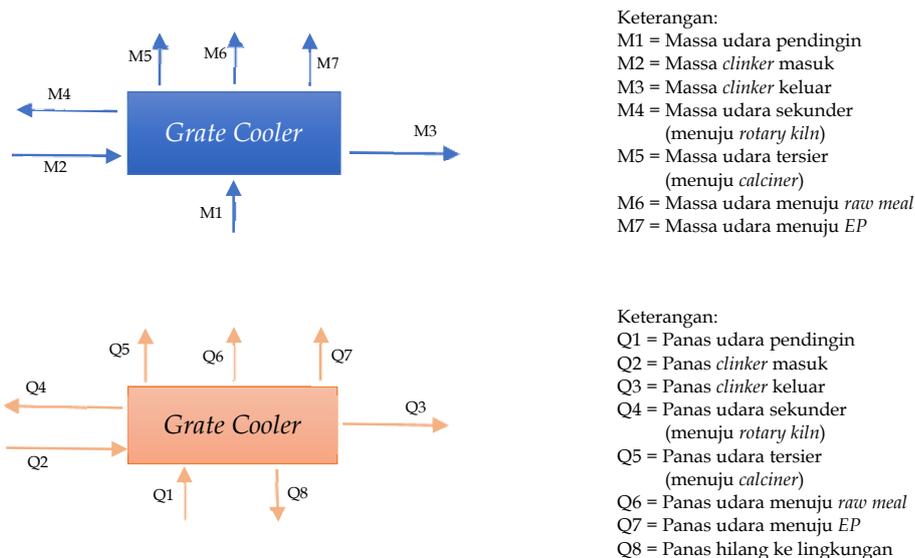
Ada beberapa bagian penting yang ada pada peralatan *grate cooler*. Bagian ini harus dipastikan berfungsi dengan baik untuk dapat mempertahankan kinerja dari peralatan. Bagian-bagian ini meliputi *casing*, *hydraulic drive*, *cooling grate*, *rooler crusher*, *hammer breaker*, *hopper*, dan *draig chain conveyer* [5]. Bagian peralatan tersebut perlu pengecekan dan perbaikan secara berkala untuk mempertahankan kinerja dari peralatan *grate cooler*.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian untuk melakukan evaluasi kinerja alat *grate cooler* dilakukan dengan cara menghitung neraca massa dan neraca panas pada alat tersebut. Untuk menghitung neraca massa, data yang diperlukan yaitu laju alir umpan *rotary kiln* (*kiln feed*), laju alir umpan bahan bakar (*coal*), dan data kinerja peralatan *fan* dan *blower*. Sementara itu, untuk menghitung neraca panas, data yang diperlukan yaitu suhu masuk (udara dan material umpan *kiln*) dan suhu keluar (udara dan *clinker*) dari peralatan *grate cooler*. Selain itu, data lain yang diperlukan adalah data dari literatur yang meliputi data panas jenis (*clinker* dan udara), konstanta spesifik udara, dan berat molekul.

Pada perhitungan neraca massa dan neraca panas, ada beberapa variabel yang dianggap konstan. Variabel tersebut yaitu kondisi aliran proses produksi dalam keadaan tunak (*steady*), proses pembakaran sempurna, tidak ada massa dari *clinker* yang terbawa oleh udara, dan kandungan air menguap seluruhnya keluar bersama dengan udara.

Perhitungan neraca massa dan neraca panas didasari oleh bagaimana massa dan panas masuk dan keluar dari sistem alat *grate cooler*. Gambar 1 menggambarkan diagram blok dari neraca massa dan gambar 2 menggambarkan diagram blok dari neraca panas. Dari diagram blok tersebut dapat tergambar bagaimana sistem kerja dari peralatan *grate cooler* yang akan dilakukan evaluasi kinerjanya dengan menghitung efisiensi dari alat tersebut.



Gambar 1. Diagram Blok Neraca Massa dan Neraca Panas *Grate Cooler*

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Neraca Massa

Data yang digunakan untuk menghitung neraca massa dari sistem *grate cooler* dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini:

Tabel 1. Data Primer Untuk Menghitung Neraca Massa di *Grate Cooler*

No.	Parameter	Nilai	Unit
1	Laju alir <i>kiln feed</i>	320.000	kg/jam
	<i>String A</i> (52%)	166.400	kg/jam
	<i>String B</i> (48%)	153.600	kg/jam
2	Laju alir bahan bakar (<i>coal</i>)	30.000	kg/jam
	<i>Calciner line</i> (60%)	18.000	kg/jam
	<i>Main burner line</i> (40%)	12.000	kg/jam
3	Laju alir udara primer (<i>primary air</i>)		
	Kapasitas	9.500	m ³ /jam
	Bukaan damper	90	%
4	Tekanan udara	160	mBar
	Laju alir udara transport <i>coal</i>		
	Kapasitas	3.500	m ³ /jam
5	Bukaan damper	90	%
	Tekanan udara	300	mBar
	Laju alir udara panas ke <i>raw meal</i>		
6	Kapasitas	214.000	m ³ /jam
	Bukaan damper	75	%
	Tekanan udara	2,8	mBar
7	Laju alir udara panas ke <i>EP</i>		
	Kapasitas	200.000	m ³ /jam
	Bukaan damper	80	%
7	Tekanan udara	3,25	mBar
	Dimensi <i>grate cooler</i>	36x5x5	m
	Luas area <i>casing grate cooler</i>	300	m ²

Data penunjang lain yang dibutuhkan adalah parameter efisiensi *cyclone preheater*, kadar air (*moisture*) dan hilang pijar (*lost of ignition*). Data tersebut dibutuhkan untuk mengetahui laju alir massa *clinker* yang masuk ke dalam sistem *grate cooler* yang berasal dari *kiln feed*. Nilai efisiensi *cyclone preheater* adalah 90%, kadar air *kiln feed* adalah 1% dan nilai hilang pijar adalah 35,19%. Dengan demikian dapat dihitung laju alir massa *clinker* yang masuk *grate cooler* yang berasal dari *kiln feed* adalah 186.019 kg/jam.

Setelah itu dihitung juga jumlah *clinker* yang berasal dari *ash coal*. Data yang diperlukan adalah kandungan *ash* yang terdapat pada *coal* sebagai bahan bakar di proses pembakaran *rotary kiln*. Nilai *ash coal* diketahui adalah 15,59%, maka laju alir massa *clinker* dari *ash coal* adalah 4.677 kg/jam.

Jadi, jumlah *clinker* yang masuk ke dalam sistem *grate cooler* adalah jumlah *clinker* yang berasal dari *kiln feed* dan *clinker* yang berasal dari *ash coal* dengan nilai sebesar 190.696 kg/jam. Nilai *clinker* masuk diasumsikan sama dengan *clinker* yang keluar dari sistem *grate cooler*.

Dari perhitungan diatas dapat diketahui beberapa nilai *ratio*, diantaranya *clinker ratio* dan *coal to clinker ratio*. *Clinker ratio* merupakan perbandingan antara laju alir *clinker* yang dihasilkan atau *clinker* yang masuk ke dalam sistem *grate cooler* dengan laju alir *kiln feed*. Dari nilai yang diperoleh pada perhitungan sebelumnya, diperoleh nilai *clinker ratio*

adalah 1,68, yang artinya untuk menghasilkan 1 kg *clinker* dibutuhkan 1,68 kg *kiln feed*. Sementara itu, *coal to clinker ratio* adalah perbandingan antara laju alir *clinker* yang dihasilkan atau *clinker* yang masuk ke dalam sistem *grate cooler* dengan laju alir *coal*. Dari nilai yang diperoleh pada perhitungan sebelumnya, diperoleh nilai *coal to clinker ratio* adalah 0,16, yang artinya untuk menghasilkan 1 kg *clinker* dibutuhkan 0,16 kg *coal*.

Selanjutnya menghitung laju alir dari udara yang masuk dan keluar dari sistem *grate cooler*. Udara masuk yaitu udara pendingin yang berasal dari *fan* yang berjumlah 12 buah dan udara keluar yaitu udara sekunder (*secondary air*), udara tersier (*tertiary air*), udara ke *raw meal*, dan udara ke *EP*.

Dari data informasi Tabel 1 dapat menghitung beberapa laju alir dengan cara mengkonversi laju alir tersebut dari laju alir volumetrik ke laju alir massa. Perhitungan konversi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini:

Tabel 2. Perhitungan Nilai Laju Alir Massa Udara Pada Sistem *Grate Cooler*

Parameter	Udara Primer (Primary Air)	Udara Transport Coal	Udara ke <i>Raw meal</i>	Udara ke <i>EP</i>	Unit
Kapasitas	9.500	3.500	214.000	200.000	m ³ /jam
Bukaan damper	90	90	75	80	%
Laju alir volumetrik	8.550	3.150	160.500	160.000	m ³ /jam
Tekanan udara	160	300	2,8	3,25	mBar
	0,16	0,30	0,0027	0,00321	atm
Suhu udara	30	30	380	250	°C
	303	303	653	523	K
Tekanan udara absolut	1,16	1,30	1,0028	1,00321	atm
Densitas udara	1,35	1,51	0,54	0,68	kg/m ³
Laju alir massa	11.557	4.772	87.012	108.358	kg/jam

Dari perhitungan pada Tabel 2 diperoleh laju alir massa udara primer (*primary air*) yaitu 11.557 kg/jam dan udara transport *coal* yaitu 4.772 kg/jam. Data laju alir massa tersebut nantinya digunakan untuk menghitung laju alir massa udara sekunder dan udara tersier. Sementara itu, dari Tabel 2 juga langsung diperoleh laju alir massa udara ke *raw meal* yaitu 87.012 kg/jam dan laju alir udara ke *EP* yaitu 108.358 kg/jam.

Untuk menghitung nilai laju alir massa udara sekunder dan udara tersier harus memperhitungkan massa udara hasil dari reaksi pembakaran yang terjadi di *calciner* dan *main burner rotary kiln*. Reaksi yang terjadi antara lain:



Dari Tabel 1 diketahui *coal* yang digunakan di *calciner* adalah 60%, sehingga dapat dihitung *coal ratio in calciner* adalah 0,094. Dari nilai tersebut dapat dihitung jumlah massa dan jumlah mol unsur yang ada pada proses pembakaran di *calciner* yang tertuang pada Tabel 3 berikut ini:

Tabel 3. Jumlah Massa dan Mol Unsur Pada Proses Pembakaran di *Calciner*

Komponen	Komposisi (%)	Berat Molekul (kg/kmol)	Massa (kg)	Jumlah Mol (Kmol)
C	61	12	0,0575785	0,0047982
H	5,1	1	0,0048139	0,0048139
O	0,9	16	0,0008495	0,0000531
N	11,03	14	0,0104113	0,0007437
S	0,6	32	0,0005663	0,0000177

Dari hasil perhitungan pada Tabel 3 diperoleh nilai jumlah massa dan jumlah mol setiap unsur pada proses pembakaran di *calciner*. Dengan menggunakan persamaan mol pada reaksi pembakaran, maka diperoleh jumlah mol gas hasil pembakaran yaitu CO₂ 0,0047982 kmol, H₂O 0,0024070 kmol, dan SO₂ 0,0000177 kmol. Sementara itu, kandungan gas O₂ dapat dilihat pada perhitungan dalam Tabel 4 berikut ini:

Tabel 4. Jumlah Gas O₂ Dalam Proses Pembakaran di *Calciner*

Sumber Gas	Gas O ₂ (kmol)
Gas pembakaran	
C + O ₂ → CO ₂	0,0047982
H + $\frac{1}{4}$ O ₂ → $\frac{1}{2}$ H ₂ O	0,0012035
S + O ₂ → SO ₂	0,0000177
Jumlah	0,0060194
Gas dari coal	0,0000265
Jumlah O₂ Theoretical	0,0059928

Dari perhitungan pada Tabel 4 diperoleh nilai O₂ secara teori yaitu 0,0059928 kmol. Dari nilai tersebut, dapat dihitung jumlah gas N₂ secara teoritis yang dapat dilihat pada Tabel 5 berikut ini:

Tabel 5. Jumlah Gas N₂ Secara Teoritis Dalam Proses Pembakaran di *Calciner*

Jumlah Gas N ₂	Nilai (kmol)
Jumlah gas N ₂ teoritis	0,0225445
Jumlah gas N ₂ coal	0,0003718
Jumlah gas N₂ pembakaran	0,0229163

Data pada Tabel 4 dan Tabel 5 merupakan gas hasil pembakaran yang terjadi di *calciner*. Dari data hasil perhitungan tersebut, dapat diperoleh jumlah total gas hasil pembakaran di *calciner* yaitu 0,0301392 kmol. Selanjutnya dapat dihitung jumlah udara yang diperlukan pada proses pembakaran di *calciner*. Perhitungan jumlah udara dapat dilihat pada Tabel 6 berikut ini:

Tabel 6. Jumlah Udara Pembakaran di *Calciner*

Jumlah Udara	Nilai (kg)
Jumlah udara pembakaran	0,8261845
Excess gas O ₂ (3%)	0,1285066
Jumlah total gas pembakaran	0,9546912

Nilai jumlah udara pembakaran pada *calciner* adalah 0,9546912 kg, artinya untuk menghasilkan *clinker* 1 kg di *calciner* membutuhkan udara pembakaran sebesar 0,9546912 kg.

Pada proses pembakaran pada *rotary kiln main burner* dapat dihitung dari basis nilai yang sudah diperoleh pada proses pembakaran di *calciner*. Pada Tabel 1 diketahui *coal* yang digunakan pada proses pembakaran *rotary kiln main burner* sebesar 40%, oleh karena itu dapat dihitung jumlah udara pembakaran pada *rotary kiln main burner* adalah 0,5507897 kg. Dengan perhitungan yang sama, jumlah udara hasil pembakaran dapat dilihat pada Tabel 7 berikut ini:

Tabel 7. Jumlah Udara Hasil Pembakaran di *Rotary Kiln Main Burner*

Jumlah Udara	Nilai (kg)
Jumlah gas CO ₂	0,0031988
Jumlah gas H ₂ O	0,0016046
Jumlah gas SO ₂	0,0000118
Jumlah gas N ₂	0,0152776
Jumlah total gas pembakaran	0,0200928

Selanjutnya dapat dihitung jumlah udara yang diperlukan pada proses pembakaran di *rotary kiln main burner*. Perhitungan jumlah udara dapat dilihat pada Tabel 8 berikut ini:

Tabel 8. Jumlah Udara Pembakaran di *Rotary Kiln Main Burner*

Jumlah Udara	Nilai (kg)
Jumlah udara pembakaran	0,5507897
Excess gas O ₂ (3%)	0,0856711
Jumlah total gas pembakaran	0,6364608

Nilai jumlah udara pembakaran pada *main burner* adalah 0,6364608 kg, artinya untuk menghasilkan *clinker* 1 kg di *rotary kiln main burner* membutuhkan udara pembakaran sebesar 0,6364608 kg.

Setelah menghitung jumlah udara pembakaran pada *calciner* dan *rotary kiln main burner*, selanjutnya dapat dihitung laju alir massa udara sekunder (*secondary air*) dan udara tersier (*tertiary air*). Perhitungan parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 9 dan Tabel 10 berikut ini:

Tabel 9. Perhitungan Laju Alir Massa Udara Sekunder (*Secondary Air*)

Parameter	Nilai	Unit
Jumlah udara pembakaran pada <i>main burner</i>	0,6364608	kg/kg <i>clinker</i>
Laju alir massa <i>clinker</i>	190.696	kg <i>clinker</i> /jam
Laju alir massa udara primer (<i>primary air</i>)	11.557	kg/jam
Laju alir massa udara transport <i>coal</i> (40%)	1.909	kg/jam
Laju Alir Massa Udara Sekunder (<i>Secondary Air</i>)	111.723	kg/jam

Tabel 10. Perhitungan Laju Alir Massa Udara Tersier (*Tertiary Air*)

Parameter	Nilai	Unit
Jumlah udara pembakaran pada <i>main burner</i>	0,9546912	kg/kg <i>clinker</i>
Laju alir massa <i>clinker</i>	190.696	kg <i>clinker</i> /jam
Laju alir massa udara transport <i>coal</i> (60%)	2.863	kg/jam
Laju Alir Massa Udara Sekunder (<i>Secondary Air</i>)	179.193	kg/jam

Semua laju alir massa yang keluar dari sistem *grate cooler* telah diketahui. Oleh karena itu, laju alir udara pendingin yang dibutuhkan dapat diketahui dengan cara menjumlahkan semua laju alir udara keluar dari sistem *grate cooler*. Laju alir udara

pendingin adalah sebesar 486.286 kg/jam. Tabel 11 dibawah ini menggambarkan laju alir massa masuk dan keluar dari peralatan *grate cooler*.

Tabel 11. Neraca Massa Pada Peralatan *Grate Cooler*

Masuk		Keluar		Unit
Laju alir massa udara pendingin	486.286	Laju alir massa clinker	190.696	kg/jam
Laju alir massa clinker	190.696	Laju alir massa udara sekunder	111.723	kg/jam
		Laju alir massa udara tersier	179.193	kg/jam
		Laju alir udara ke raw meal	87.012	kg/jam
		Laju alir udara ke EP	108.358	kg/jam
Total	676.982	Total	676.982	kg/jam

3.2 Neraca Panas

Perhitungan neraca panas dapat dilakukan setelah perhitungan neraca massa selesai. Data pendukung yang diperlukan adalah data variabel untuk menentukan kapasitas panas (C_p) yang dipengaruhi oleh suhu. Tabel 12 merupakan data variabel untuk menghitung kapasitas panas (C_p) [6].

Tabel 12. Data Ketetapan Variabel A, B, dan C

Material	A	B	C
Clinker	0,186	54	0
Udara	0,237	23	0

Kapasitas panas (C_p) dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$C_p = A + BT \cdot 10^{-6} + CT^2 \cdot 10^{-9} \tag{6}$$

Persamaan untuk menentukan nilai panas (Q) adalah sebagai berikut:

$$Q = M \times C_p \times (T - T_{\text{referensi}}) \tag{7}$$

Keterangan:

- Q = Nilai panas material atau udara (kj/jam)
- M = Massa material atau udara(kg/jam)
- C_p = Kapasitas panas material atau udara (kj/kg °C)
- T = Suhu material atau udara (°C)
- T referensi = Suhu referensi bernilai 0 °C

Dengan menggunakan persamaan 7, dapat dihitung nilai panas dari setiap material atau udara masuk dan keluar dari sistem *grate cooler*. Perhitungan tersebut digambarkan pada Tabel 13 berikut ini:

Tabel 13. Perhitungan Neraca Panas Pada Sistem *Grate Cooler*

Parameter	Nilai	Unit
Udara pendingin masuk		
Laju alir massa (M)	486.286	kg/jam
Kapasitas panas (C_p)	0,2377	kcal/kg °C
	0,9945	kJ/kg °C
Suhu (T)	30	°C
Nilai Panas (Q1)	14.508.275	kJ/jam
Clinker masuk		

Parameter	Nilai	Unit
Laju alir massa (M)	190.696	kg/jam
Kapasitas panas (Cp)	0,2616	kcal/kg °C
	1,0945	kJ/kg °C
Suhu (T)	1.400	°C
Nilai Panas (Q2)	292.213.086	kJ/jam
Clinker keluar		
Laju alir massa (M)	190.696	kg/jam
Kapasitas panas (Cp)	0,1914	kcal/kg °C
	0,8008	kJ/kg °C
Suhu (T)	100	°C
Nilai Panas (Q3)	15.271.293	kJ/jam
Udara sekunder keluar		
Laju alir massa (M)	111.723	kg/jam
Kapasitas panas (Cp)	0,2600	kcal/kg °C
	1,0878	kJ/kg °C
Suhu (T)	1.000	°C
Nilai Panas (Q4)	121.536.416	kJ/jam
Udara tersier keluar		
Laju alir massa (M)	179.193	kg/jam
Kapasitas panas (Cp)	0,2497	kcal/kg °C
	1,0445	kJ/kg °C
Suhu (T)	550	°C
Nilai Panas (Q5)	102.945.468	kJ/jam
Udara ke raw meal		
Laju alir massa (M)	87.012	kg/jam
Kapasitas panas (Cp)	0,2451	kcal/kg °C
	1,0253	kJ/kg °C
Suhu (T)	350	°C
Nilai Panas (Q6)	31.224.609	kJ/jam
Udara ke EP		
Laju alir massa (M)	108.358	kg/jam
Kapasitas panas (Cp)	0,2421	kcal/kg °C
	1,0128	kJ/kg °C
Suhu (T)	220	°C
Nilai Panas (Q7)	24.143.335	kJ/jam

Pada aktual operasi peralatan *grate cooler*, terdapat panas yang keluar dari sistem yaitu panas yang hilang ke lingkungan. Nilai panas yang hilang ke lingkungan merupakan selisih perhitungan panas masuk dan panas keluar dalam sistem *grate cooler*. Dari data Tabel 13 diperoleh nilai panas yang hilang (Q8) adalah 11.600.240 kJ/jam. Tabel 14 berikut ini merupakan neraca panas yang terjadi pada peralatan *grate cooler*.

Tabel 14. Neraca Panas Pada Peralatan Grate Cooler

Masuk		Keluar	Unit
Panas udara pendingin	14.508.275	Panas <i>clinker</i>	15.271.293 kJ/jam
Panas <i>clinker</i>	292.213.086	Panas udara sekunder	121.536.416 kJ/jam
		Panas udara tersier	102.945.468 kJ/jam
		Panas udara ke <i>raw meal</i>	31.224.609 kJ/jam
		Panas udara ke EP	24.143.335 kJ/jam

		Panas hilang ke lingkungan	11.600.240	kJ/jam
Total	306.721.361	Total	306.721.361	kg/jam

3.3 Efisiensi Grate Cooler

Nilai efisiensi *grate cooler* dapat dihitung dengan cara membandingkan panas udara sekunder (*secondary air*) dan panas tersier (*tertiary air*) yang dimanfaatkan pada proses pembakaran di *rotary kiln* dan *calciner* dengan panas dari *clinker* yang masuk pada sistem *grate cooler*. Diperoleh nilai efisiensi *grate cooler* yaitu 76,8%, artinya panas yang dapat dimanfaatkan pada proses pembakaran di *rotary kiln* dan *calciner* adalah sebesar 76,8%. Nilai tersebut dapat menggambarkan bahwa peralatan *grate cooler* masih dalam keadaan baik karena masih diatas 50%. Ada beberapa parameter yang dapat di kontrol untuk mempertahankan atau meningkatkan nilai efisiensi *grate cooler*, diantaranya laju alir udara pendingin, laju alir dan suhu *clinker* masuk, suhu *clinker* keluar peralatan, laju alir dan suhu udara sekunder, dan laju alir dan suhu udara tersier.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi peralatan *grate cooler*, kinerja peralatan masih dalam keadaan baik dengan nilai efisiensi sebesar 76,8%. Nilai tersebut menggambarkan panas yang dimanfaatkan masih besar untuk proses pembakaran di *rotary kiln* dan *calciner*. Perhitungan nilai efisiensi ini menjadi sangat penting untuk mengambil langkah lanjutan apa saja yang perlu ditingkatkan untuk mempertahankan atau meningkatkan nilai efisiensi tersebut dengan tujuan menciptakan proses produksi yang efisien.

Referensi

- [1] Ansori, Faris Akbar. (2022). "Perpindahan Panas Clinker Pada Grate Cooler di PT. Indocement Tunggal Prakarsa Tbk". *Sigmat - Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Volume 02 No. 02: 18-27
- [2] Wirawan, Hendar & Sinaga, Nazaruddin. (2021). "Analisis Eksergi Pada Rotary Kiln di Dalam Proses Produksi Pembuatan Semen". *SJME Kinematika* Vol. 6 No. 1: 65-84
- [3] Ramadhan, Fajar & Suprianti, Yanti. (2023). "Optimasi Energi Pada Clinker Grate Cooler di Industri Semen". *STEAM Engineering (Journal of Science, Technology, Education, and Mechanical Engineering)* Artikel 7, pp. 53-64
- [4] Chen, Wei, et al. (2024). "Multi-Objective Set Point Optimization Control of Grate Cooler Considering Energy Efficiency Evaluation". *ISCME Journal of Physics: Conference Series* 2741 (2024) 012011
- [5] Tanthowy, Thoriq Verel, dkk. (2022). "Evaluasi Kinerja Pada Alat Grate Cooler di Pabrik Baturaja II PT Semen Baturaja (Persero) Tbk". *Azramedia Indonesia* Volume 01 No. 3: 2828-4186
- [6] Peray, K.E. (1979). *Cement Manufacture's Handbook*. New York: Chemical Publishing