

OPTIMASI ENERGI PADA CLINKER GRATE COOLER DI INDUSTRI SEMEN

Fajar Ramadhan^{1*} & Yanti Suprianti²

¹Teknik Industri, Universitas Bina Nusantara

²Teknik Konservasi Energi, Politeknik Negeri Bandung

* E-mail: fajar.ramadhan002@binus.ac.id

Abstrak: Proses pendinginan klinker di dalam *cooler* semen merupakan aspek yang sangat signifikan dalam pembuatan semen. Hal ini tidak hanya memengaruhi kualitas *clinker*, tetapi juga berperan dalam rekuperasi panas untuk mengurangi konsumsi bahan bakar pada *kiln* dan *preheater*. Di industri semen, penggunaan energi terbagi menjadi 78% listrik dan 22% termal, dan hampir seluruh konsumsi energi termal terjadi dalam proses produksi *clinker* (*preheater*, *kiln*, dan *cooler*). Kinerja *clinker cooler* ditunjukkan oleh nilai efisiensi rekuperasi pada kondisi eksisting, yaitu 69,3%, yang berada di bawah standar 70-75%. Upaya konservasi energi dalam industri semen melibatkan pemanfaatan panas hasil proses pendinginan *clinker* sebagai pasokan udara pembakaran di *kiln* dan *preheater*. Sistem *grate plate* tipe *Reduced Fall Through* (RFT) dengan kompartemen tidak mampu mengatur aliran udara pendingin dari kipas pendingin menuju permukaan *clinker bed*. Untuk mengoptimalkan proses pendinginan dan rekuperasi panas, perancangan ulang *clinker cooler* dilakukan dengan mengganti *grate plate* tipe RFT menjadi tipe *Control Flow Grate* (CFG) pada kompartemen lima, yang terletak pada baris 43 hingga 48. Simulasi digunakan untuk mendukung analisis dan perancangan ini dengan memanfaatkan ANSYS 18.2. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengkaji parameter aliran udara dan perpindahan panas. Efisiensi rekuperasi *clinker cooler* pada kondisi eksisting adalah 69,3%. Namun, setelah proses perancangan teknologi, kinerja efisiensi meningkat menjadi 72,9%.

Kata Kunci: : *Control Flow Grate, Clinker cooler, Efisiensi, Grate plate, Reduced Fall Through*

Abstract: *The clinker cooling process within the cement cooler is a highly significant aspect of cement production. It not only impacts the quality of clinker but also plays a role in heat recovery to reduce fuel consumption in the kiln and preheater. In the cement industry, energy usage is divided into 78% electricity and 22% thermal energy, with almost all thermal energy consumption occurring during the clinker production process (preheater, kiln, and cooler). The performance of the clinker cooler is indicated by the value of the recovery efficiency under existing conditions, which is 69.3%, falling below the standard range of 70-75%. Energy conservation efforts in the cement industry involve utilizing the heat generated from the clinker cooling process as a supply of combustion air for the kiln and preheater. The Reduced Fall Through (RFT) type grate plate system with compartments is unable to properly control the flow of cooling air from the cooling fan to the clinker bed surface. To optimize the cooling process and heat recovery, a redesign of the clinker cooler is carried out by replacing the RFT type grate plate with a Control Flow Grate (CFG) type in compartments five, located in rows 43 to 48. Simulations are employed to support this analysis and design, utilizing ANSYS 18.2. The goal of these simulations is to assess airflow parameters and heat transfer. The clinker cooler recovery efficiency under existing conditions is 69.3%. However, following the technological design process, the efficiency performance increases to 72.9%.*

Keywords: *Control Flow Grate, Clinker cooler, Efficiency, Grate plate, Reduced Fall Through*

PENDAHULUAN

Grate Cooler merupakan salah satu komponen penting dalam proses produksi semen (Wang, dkk., 2020). Posisi penting *grate cooler* dalam produksi semen terletak pada perannya yang krusial. *Grate Cooler* digunakan dalam rangkaian produksi semen, dan sistem pembakaran klinker meliputi tiga bagian utama, yaitu pendingin klinker, *rotary kiln*, dan *pre-heater* suspensi. Fungsi dari pendingin klinker adalah untuk menurunkan suhu klinker, menggiling klinker, serta memulihkan energi dari panas klinker dengan cara memanaskan udara yang sebelumnya telah didinginkan. Peralatan ini memiliki peran yang sangat penting dalam mendinginkan klinker, dimana proses pendinginan ini memiliki dampak signifikan terhadap kualitas semen yang dihasilkan (Ahamed, dkk., 2012). Pentingnya pendinginan klinker ini mempengaruhi berbagai aspek, termasuk

struktur, komposisi mineral, kemampuan penggilingan, dan akhirnya memengaruhi kualitas akhir dari semen yang diproduksi (Setiyana, 2007; Hongyi, dkk., 2021).

Udara hasil proses pendinginan terbagi menjadi tiga jenis, yaitu udara sekunder, udara tersier, dan udara buang. Udara sekunder digunakan sebagai udara pembakaran dalam *kiln*, udara tersier berperan dalam memanaskan awal material *raw meal* di *preheater*, sementara udara buang diarahkan menuju *elektrostatic precipitator* untuk pemisahan antara debu dan gas panas. Setelah terpisah dari debu, gas panas kemudian dilepaskan ke cerobong asap, sementara debu jatuh dan diangkut oleh konveyor ke silo klinker.

Grate cooler menghadapi permasalahan terkait adanya *false air* dalam proses pendinginan klinker, yang kuantitasnya tidak dapat terkendali. Tingginya *false air* disebabkan oleh tidak sempurnanya distribusi udara pendingin klinker dari kipas pendingin menuju permukaan *clinker bed* melalui *grate plate*. Industri semen pada umumnya menggunakan tiga jenis *grate plate*, yaitu *Fix Inlet*, *Control Flow Grate* (CFG), dan *Reduced Fall Through* (RFT). Tipe *fix inlet* digunakan pada kompartemen satu, tipe CFG digunakan pada kompartemen dua, tiga, dan empat, sementara tipe RFT digunakan pada kompartemen lima, enam, tujuh, delapan, dan sembilan.

Menurut penelitian dari Zanoli, dkk. (2023) bahwa pengontrol udara bertujuan untuk mengendalikan variabel proses kritis pada *rotary kiln* dan *grate cooler*, dengan upaya meminimalkan konsumsi bahan bakar batubara khusus pada *kiln* serta mengurangi konsumsi energi listrik oleh unit kipas pendingin di dalam sistem pendingin. Penelitian menurut Sayane, dkk. (2020) menyatakan bahwa pabrik semen Mazandaran di Iran akan diretrofit untuk mengurangi penggunaan energi dan meningkatkan efisiensi, proyek ini mencakup desain pemulihan panas dari *grate cooler* (AQC boiler) dan gas buang siklon (SP boiler). Penelitian menurut Joseph, dkk. (2022) menyatakan bahwa pengaruh tinggi *bed* klinker terhadap proses pendinginan, kinerja pendingin klinker penting untuk pemulihan energi dan kualitas semen, penelitian ini membuat model tiga dimensi dari *bed* klinker dikembangkan dengan menggunakan perangkat lunak *solidworks*. Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menunjukkan bahwa tinggi tempat tidur 0,6 m memiliki pemulihan energi optimal. Kemudian studi menurut Shao, dkk. (2016) menyoroti pentingnya distribusi udara dalam pendinginan klinker untuk efisiensi dan pengurangan energi, model optimisasi berhasil menemukan solusi terbaik dengan meminimalkan entropi dan tekanan, distribusi udara dan ketebalan lapisan klinker diatur untuk mengurangi konsumsi daya kipas pendingin, dan hasilnya menunjukkan penghematan signifikan dalam volume udara, konsumsi daya, dan temperatur klinker. Penelitian selanjutnya mengusulkan model prediksi tekanan *grate cooler* semen berdasarkan analisis pengendalian otomatis saat ini, menggunakan algoritma jaringan saraf gabungan multi-model yang meningkatkan akurasi prediksi tekanan *grate* secara signifikan (Geng, dkk., 2020). Penelitian ini juga didukung oleh penelitian Taweel, dkk., (2018) ini menganalisis energi dan eksergi berdasarkan profil suhu klinker untuk memprediksi suhu udara sekunder, udara tersier, dan udara buang dalam pemulihan panas.

Distribusi udara dapat diatur dengan memilih *grate plate* yang sesuai atau dapat mengontrol aliran udara pendingin klinker. Aktualnya penggunaan *grate plate* tipe RFT kurang efektif dalam mengendalikan aliran udara pendinginan karena kurangnya sistem *ducting* untuk mengarahkan udara menuju *bed* klinker. Sedangkan penggunaan *grate plate* tipe CFG mampu mengontrol aliran udara berkat penggunaan sistem *ducting*. Penelitian ini akan membahas tentang metode retrofit untuk meningkatkan kinerja teknologi *grate cooler* di industri semen dengan mengganti *grate plate* tipe RFT pada kondisi aktual dengan tipe CFG.

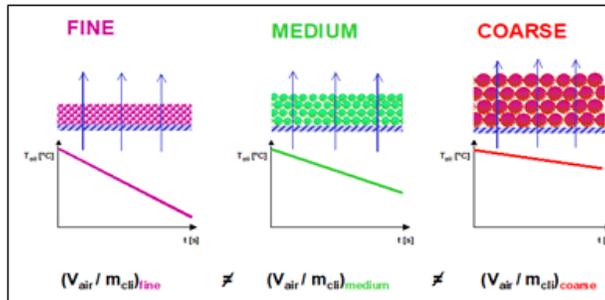
METODE

Proses Perpindahan Panas pada *Grate Cooler*

Proses perpindahan kalor antara klinker yang panas dengan udara pendingin yang disuplai oleh kipas pendingin terjadi dalam bentuk *quenching*, yaitu proses pendinginan tiba-tiba. Tujuan dari proses *quenching* adalah memastikan bahwa klinker yang keluar dari output *kiln* dalam wujud cair dapat segera mengalami perubahan fase menjadi padat. Untuk mencapai hal ini, diperlukan tekanan udara dan kecepatan udara yang tinggi yang dihasilkan oleh kipas pendingin, terutama pada zona rekuperasi. Pendekatan pendinginan yang cepat ini berperan penting dalam mengurangi risiko terbentuknya *snowman* dan *burn plates* pada *grate cooler* (Alsop, 2005). Proses pendinginan klinker berlangsung di dua zona utama, yaitu zona rekuperasi atau *recuperation zone* dan zona pendinginan

klinker atau *cooling zone*. Udara pendingin pada zona rekuperasi ini didistribusikan dengan tekanan dan kecepatan yang tinggi, dimaksudkan untuk mendinginkan klinker yang keluar dari *kiln* dengan temperature mencapai 1450°C dan memastikan perubahan fase dari wujud cair menjadi padat. Mekanisme perpindahan kalor pada *grate* tipe *reciprocating* adalah dalam bentuk *cross flow* (Holman, 1979). Udara yang disuplai oleh kipas pendingin dialirkan melalui saluran *ducting* untuk *grate plate* tipe CFG dan diarahkan ke dalam kompartemen untuk *grate plate* tipe RFT. Udara ini yang mengalir dengan baik melalui *ducting* dan kompartemen kemudian didistribusikan ke atas *bed* klinker.

Proses distribusi udara ini dipengaruhi oleh faktor resistansi yang berasal dari granulometri klinker. Semakin granule bentuk klinker, resistansi pendinginannya cenderung semakin rendah. Resistansi pendinginan ini memiliki pengaruh signifikan terhadap proses pendinginan klinker, di mana semakin rendah resistansi ini, proses perpindahan panas yang efektif antara klinker yang panas dan udara pendingin dapat terjadi dengan lebih baik. Sebaliknya, resistansi pendinginan yang tinggi akan menghambat efisiensi proses pendinginan klinker, mengakibatkan proses tersebut tidak berjalan secara optimal. Gambar di bawah ini mengilustrasikan bagaimana ukuran material klinker dalam proses pendinginan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perpindahan panas yang terjadi. Gambar II.14 membandingkan beberapa ukuran klinker dalam proses pendinginan.



Gambar 1. Pengaruh dari ukuran klinker dan tahanan udara (Sumber : Holcim Technology Ltd.)

Proses pendinginan klinker dapat dianggap berhasil jika hasil keluaran klinker dari tahap pendinginan memiliki temperatur antara 90 hingga 180°C, serta semakin meningkatnya pemanfaatan kalor dari udara sekunder untuk proses pembakaran dalam *kiln*. Udara sekunder yang digunakan dalam pembakaran *kiln* memiliki profil temperatur antara 1230 hingga 1450°C.

Kinerja dari sebuah alat pendingin klinker dinyatakan dalam kemampuannya dalam meregenerasi panas dari klinker yang panas (LafargeHolcim, 2016). Proses perpindahan kalor antara udara pendingin dan klinker panas juga dipengaruhi oleh luas permukaan objek perpindahan panas itu sendiri. Semakin besar luas permukaan kontak, maka proses perpindahan kalor akan berlangsung dengan lebih cepat. Sebaliknya, jika luas permukaan kontak kecil, maka proses perpindahan kalor akan berlangsung lebih lambat.

Klinker yang memasuki *grate cooler* setelah mengalami proses pembakaran di *kiln* memiliki kapasitas antara 7800 hingga 8200 ton per hari (Data Sheet Holcim Cilacap, 2012). Kedatangan klinker ke dalam clinker cooler dapat diungkapkan melalui persamaan 1.1.

$$\dot{M}_{Cl} = \frac{\text{Laju aliran massa klinker } (\frac{kg}{Jam})}{\text{Bulk density of clinker}}$$

Besarnya kalor *clinker input* dapat dinyatakan dengan persamaan 1.2.

$$Q_{Cl} = \dot{M}_{Cl} \times C_p \times (T_{Cl} - T_{ref})$$

dengan :

Q_{Cl} = Kalor *Clinker Input* (kJ/jam)

\dot{M}_{Cl} = Massa *clinker input* (kg/jam)

C_p = Kalor spesifik *clinker* (kJ/kg °C)

T_{Cl} = Temperatur *clinker input* (°C)

T_{ref} = Temperatur referensi atau temperatur pada kondisi *ambient* (32°C)

Luas *duct* atau saluran udara buang dapat dinyatakan dengan persamaan 1.3.

$$A_d = \frac{1}{4} \times \pi \times (D_d)^2$$

dengan :

A_d = Luas *duct*/saluran udara buang (m²)

D_d = Diameter *duct*/saluran udara buang (m)

Volume udara buang dapat dinyatakan dengan persamaan 1.4.

$$\dot{V}_{\text{gas}} = v_{\text{gas}} \times A_d \times 3600$$

dengan :

\dot{V}_{gas} = Volume gas/udara buang (m³/jam)

v_{gas} = Kecepatan gas/udara buang (m/s)

A_d = Luas *duct*/saluran udara buang (m²)

Laju alir massa udara buang dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai 1.5.

$$\dot{M}_{\text{WA}} = V_{\text{gas}} \times \rho_{\text{gas,din}}$$

dengan :

\dot{M}_{WA} = Massa udara buang/*waste air* (kg/jam)

V_{gas} = Volume gas/udara buang (m³/jam)

$\rho_{\text{gas din}}$ = Massa jenis udara dinamik (Kg/m³)

Kalor udara buang dapat dinyatakan dengan persamaan 1.6.

$$Q_{\text{WA}} = \dot{M}_{\text{WA}} \times C_p \times (T_{\text{WA}} - T_{\text{ref}})$$

dengan :

Q_{WA} = Kalor udara buang/*Waste Air* (kJ/jam)

C_p = Kalor spesifik udara buang (kJ/kg °C)

T_{TA} = Temperatur udara buang (°C)

T_{ref} = Temperatur referensi atau temperatur pada kondisi *ambient* (32°C)

Luas *duct* atau saluran udara tersier dapat dinyatakan dengan persamaan 1.7.

$$A_d = \frac{1}{4} \times \pi \times (D_d)^2$$

dengan :

A_d = Luas *duct*/saluran udara tersier (m²)

D_d = Diameter *duct*/saluran udara tersier (m)

Volume udara tersier dapat dinyatakan dengan persamaan 1.8.

$$\dot{V}_{\text{gas}} = v_{\text{gas}} \times A_d \times 3600$$

Dimana :

\dot{V}_{gas} = Volume gas/udara tersier (m³/jam)

v_{gas} = Kecepatan gas/udara tersier (m/s)

A_d = Luas *duct*/saluran udara tersier (m²)

Laju alir massa udara tersier dapat dinyatakan dengan persamaan 1.9.

$$\dot{M}_{\text{TA}} = \dot{V}_{\text{gas}} \times \rho_{\text{gas,din}}$$

Dengan :

\dot{M}_{TA} = Massa udara tersier (kg/jam)

\dot{V}_{gas} = Volume udara tersier (m³/jam)

$\rho_{\text{gas din}}$ = Massa jenis udara dinamik (Kg/m³)

Kalor dari udara tersier dapat dinyatakan dengan persamaan 1.10.

$$Q_{\text{TA}} = \dot{M}_{\text{TA}} \times C_p \times (T_{\text{TA}} - T_{\text{ref}})$$

dengan :

Q_{TA} = Kalor udara tersier (kJ/jam)

C_p = Kalor spesifik udara tersier (kJ/kg °C)

T_{TA} = Temperatur udara tersier ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ref} = Temperatur referensi atau temperatur pada kondisi *ambient* (32°C)

Massa udara sekunder dapat dinyatakan dengan persamaan 1.11.

$$\dot{M}_{s_A} = \dot{M}_{CA} - \dot{M}_{TA} - \dot{M}_{WA}$$

dengan :

\dot{M}_{s_A} = Massa udara sekunder/*secondary air* (kg/jam)
 \dot{M}_{TA} = Massa udara tersier/*tertiary air* (kg/jam)
 \dot{M}_{WA} = Massa udara buang/*waste air* (kg/jam)

Kalor udara sekunder dapat dinyatakan dengan persamaan 1.12.

$$Q_{SA} = \dot{M}_{s_A} \times C_p \times (T_{SA} - T_{ref})$$

dengan :

Q_{SA} = Kalor udara sekunder (kJ/jam)
 \dot{M}_{s_A} = Massa udara sekunder (kg/jam)
 C_p = Kalor spesifik udara sekunder (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)
 T_{SA} = Temperatur udara sekunder ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ref} = Temperatur pada kondisi *ambient*, 32°C ($^{\circ}\text{C}$)

Massa *clinker* yang keluar dari *cooler* dapat dinyatakan dengan persamaan 1.13.

$$\dot{M}_{CO} = \dot{M}_{CI} - \dot{M}_{CD}$$

dengan :

\dot{M}_{CO} = Massa *clinker output* (kg/jam)
 \dot{M}_{CI} = Massa *clinker input* (kg/jam)
 \dot{M}_{CD} = Massa *clinker dust* (kg/jam)

Kalor *clinker* dapat dinyatakan dengan persamaan 1.14.

$$Q_{CO} = \dot{M}_{CO} \times C_p \times (T_{CO} - T_{ref})$$

dengan :

Q_{CO} = Kalor *clinker output* (kJ/jam)
 \dot{M}_{CO} = Massa *clinker output* (kg/jam)
 C_p = Kalor spesifik *clinker* (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)
 T_{CO} = Temperatur *clinker output* ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ref} = Temperatur pada kondisi *ambient* (32°C)

Losses akibat radiasi dan *losses* akibat konveksi dapat dinyatakan dengan persamaan 1.15 dan 1.16 (Bejan, 1987).

$$\text{Radiation losses} = e \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

dimana :

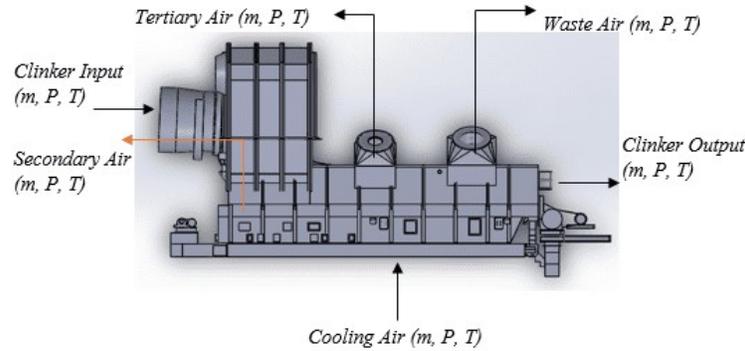
Radiation losses dalam satuan kJ/jam

e = Emisivitas bahan ($0 \leq e \leq 1$, dan $e = 1$ ketika benda hitam sempurna)
 σ = Konstanta Stefan - Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
 T = Temperatur mutlak benda (K)

$$\text{Convection Losses} = h_c A (T_w - T_s)$$

Dimana :

h_c = Koefisien konveksi ($\text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 A = Luas permukaan benda (m^2)
 T_w = Temperatur dinding ($^{\circ}\text{C}$)
 T_s = Temperatur *ambient* (32°C)

Gambar 2. Skema neraca massa dan neraca energi teknologi *clinker cooler*

Recuperation efficiency clinker cooler dapat dinyatakan dengan persamaan 1.17.

$$\eta = \frac{(Q_{\text{secondary air}} + Q_{\text{tertiary air}})}{Q_{\text{clinker input}}} \times 100\%$$

Perancangan dan Realisasi

Perancangan proses *grate cooler* di industri semen yang melibatkan penggantian *grate plate* tipe RFT dengan CFG merupakan bentuk modifikasi teknologi *grate cooler* di industri semen. Pendekatan ini melibatkan penggantian salah satu komponen utama dalam teknologi tersebut, yaitu *grate plate*. Penggantian ini khususnya dilakukan pada kompartemen lima. Tujuan dari perancangan ini adalah untuk meningkatkan performa *grate cooler* pada industri semen pada umumnya.

Data perancangan ini berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan setelah pergantian *grate plate* tipe RFT dengan CFG menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Simulasi ini menghasilkan sejumlah parameter operasional pasca perancangan, termasuk temperatur udara pendingin, temperatur udara sekunder, temperatur udara tersier, dan temperatur udara buang. Selain itu, juga diperoleh data aliran udara pendingin, aliran udara sekunder, aliran udara tersier, dan aliran udara buang.

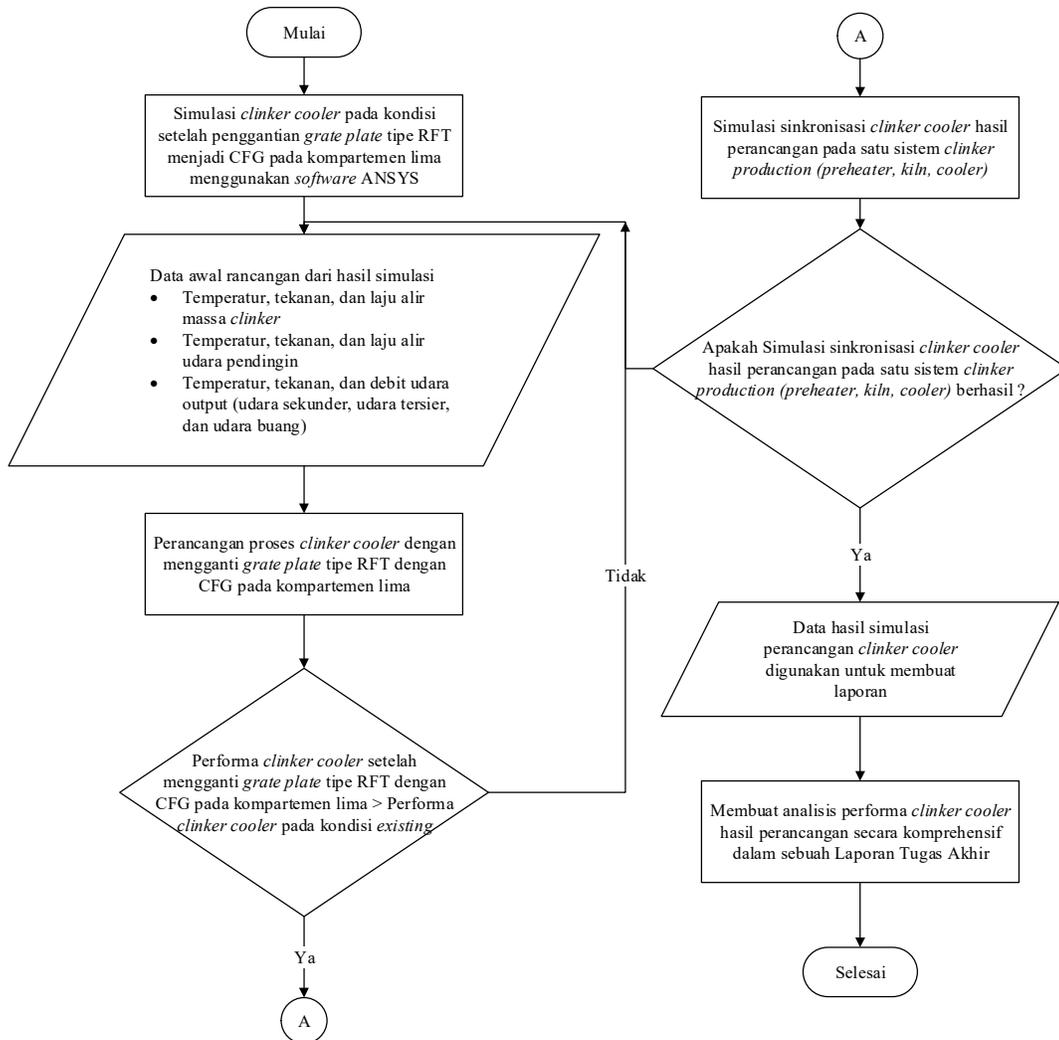
Tahap awal dalam perancangan proses ini melibatkan simulasi setelah penggantian *grate plate* tipe RFT menjadi CFG pada kompartemen lima menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent.

Tahap kedua melibatkan penentuan parameter dasar yang dibutuhkan dalam perancangan, yang diperoleh dari hasil simulasi tahap pertama menggunakan ANSYS Fluent. Parameter tersebut meliputi temperatur klinker masukan dan keluaran, laju aliran massa klinker, temperatur udara masukan dan keluaran, serta laju aliran massa udara masukan dan keluaran. Komponen udara keluaran terdiri dari udara sekunder, udara tersier, dan udara buang.

Tahap ketiga melibatkan perancangan proses *grate cooler* dengan menghitung performanya setelah penggantian *grate plate* tipe RFT dengan CFG pada kompartemen lima. Perhitungan ini menggunakan persamaan umum yang serupa dengan perhitungan performa *grate cooler* pada kondisi aktual (persamaan 1.1 hingga 1.17).

Tahap keempat melibatkan evaluasi performa *grate cooler* hasil perancangan dibandingkan dengan performa *grate cooler* pada kondisi aktual. Jika evaluasi menunjukkan bahwa performa *grate cooler* hasil perancangan lebih unggul daripada yang ada pada kondisi aktual, maka perancangan dianggap berhasil dan dilanjutkan ke tahap berikutnya. Jika performa *grate cooler* hasil perancangan lebih rendah daripada kondisi aktual, maka langkah kembali ke tahap kedua, yakni dengan melakukan modifikasi pada beberapa data awal hasil simulasi *grate cooler*.

Tahap kelima melibatkan simulasi sinkronisasi *grate cooler* hasil perancangan dengan sistem proses pembuatan klinker lengkap, yang terdiri dari *preheater*, *kiln*, dan *grate cooler*. Simulasi ini bertujuan untuk menguji apakah teknologi *grate cooler* hasil perancangan dapat diintegrasikan dalam sistem proses pembuatan klinker. Penilaian dilakukan melalui pengamatan dampak perubahan parameter operasi, seperti temperatur udara sekunder masukan *kiln*, temperatur udara tersier masukan *preheater*, dan temperatur udara buang masukan *electrostatic precipitator* (ESP), terhadap kinerja komponen-komponen tersebut.



Gambar 3. Tahap Perancangan Proses Grate Cooler

Tahap keenam melibatkan penilaian apakah teknologi *grate plate* tipe CFG dapat diterapkan atau tidak dalam sistem *grate cooler*. Jika hasil simulasi sinkronisasi tidak menunjukkan kesalahan, maka teknologi *grate plate* tipe CFG dianggap dapat diterapkan dalam sistem *grate cooler* dan perancangan dianggap berhasil. Jika terdapat kesalahan dalam simulasi sinkronisasi, langkah kembali ke tahap awal, yaitu dengan memodifikasi beberapa kondisi awal parameter operasi *grate cooler*.

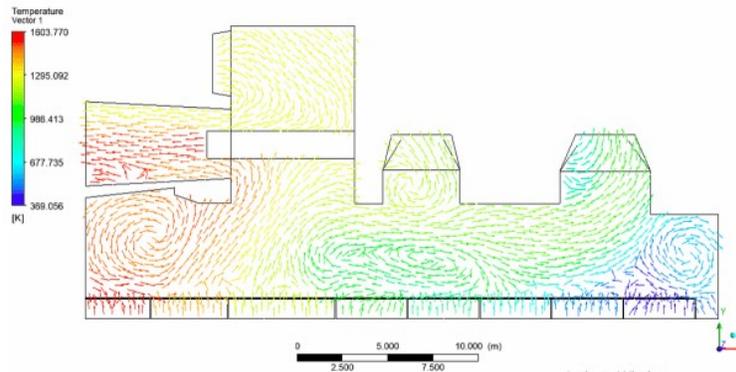
Tahap ketujuh melibatkan analisis lebih mendalam tentang perancangan proses *grate cooler* dengan penggantian *grate plate* tipe RFT menjadi CFG pada kompartemen lima di industri semen.

HASIL DAN DISKUSI

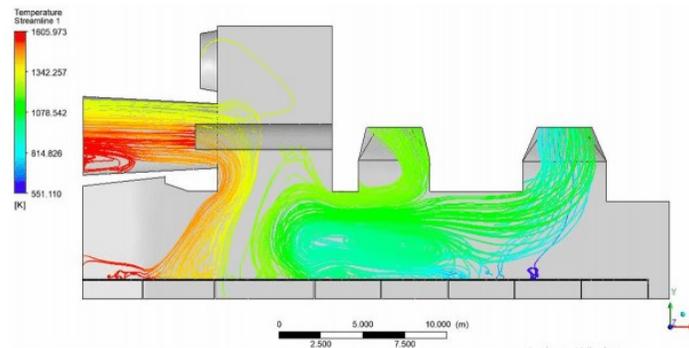
Perbaikan pada teknologi *grate cooler* di industri semen dilakukan melalui modifikasi komponen teknologi yang sudah ada, terutama pada bagian *grate plate*. Modifikasi ini bertujuan untuk mengoptimalkan proses perpindahan panas antara udara pendingin dan klinker yang panas, sehingga udara hasil dari proses pendinginan dapat dimanfaatkan secara optimal untuk pembakaran di kiln dan preheater kalsiner.

Penggantian *grate plate* tipe RFT dengan tipe CFG pada baris 43, 44, 45, 46, 47, dan 48 dipertimbangkan dengan memperhatikan bahwa jika penggantian *grate plate* dilakukan pada seluruh area kompartemen lima, maka ada potensi bahwa udara panas yang seharusnya dimanfaatkan dalam saluran udara tersier justru akan terbuang melalui saluran udara buang. Hal ini menjadi sia-sia, mengingat tujuan utama dari penggantian adalah untuk meningkatkan pasokan udara pembakaran.

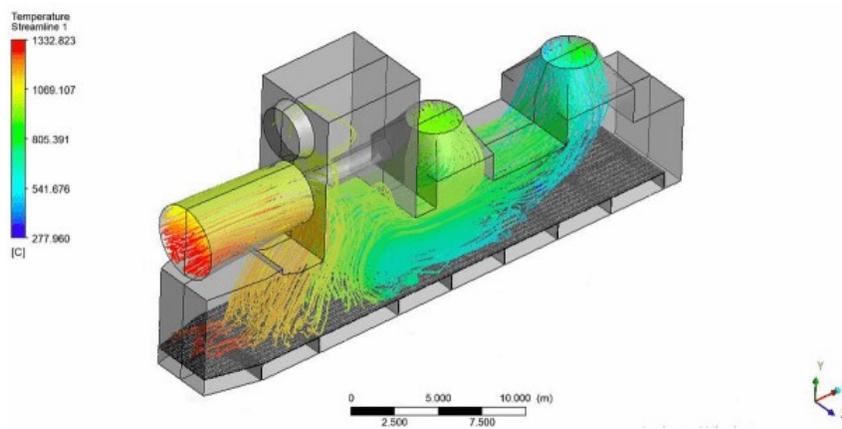
Penggantian grate plate pada kompartemen lima ini juga melibatkan investasi yang cukup besar. Hal ini terjadi karena area kompartemen lima dan enam terletak di antara saluran udara tersier dan saluran udara buang.



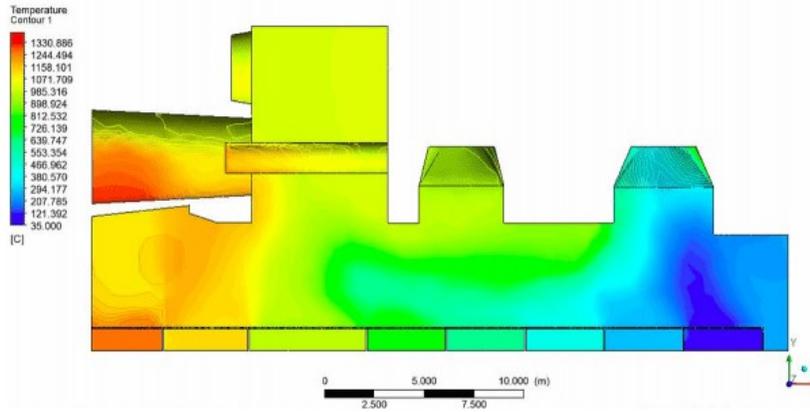
Gambar 4. *Plot vector* dari *clinker cooler* kondisi setelah penggantian



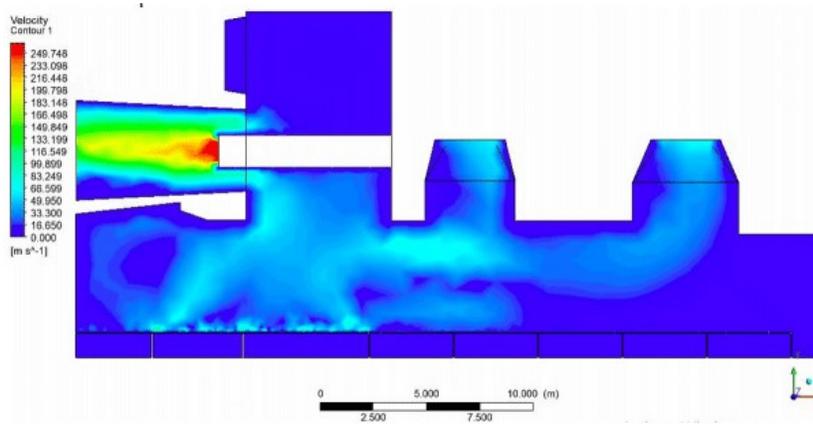
Gambar 5. *Streamline* aliran fluida udara setelah penggantian



Gambar 6. Temperatur Aliran Fluida Udara Setelah Penggantian



Gambar 7. Plot temperatur dinding *clinker cooler* setelah penggantian



Gambar 8. Distribusi kecepatan udara pada *clinker cooler* setelah penggantian

Tabel 2 menggambarkan data operasi *grate cooler* hasil simulasi menggunakan ANSYS Fluent setelah penggantian *grate plate* tipe RFT dengan CFG pada kompartemen lima. Data ini memungkinkan analisis terhadap performa teknologi *grate cooler*, yang menunjukkan efisiensi rekuperasi sebesar 72,9%. Performa hasil rancangan ini menunjukkan peningkatan dari nilai efisiensi rekuperasi pada kondisi aktual, yang sebelumnya mencapai 69,3%.

Perbandingan Antara Kondisi Aktual dan Hasil Perancangan

Analisis perbaikan teknologi di industri semen berfokus pada hasil analisis simulasi *grate cooler* yang menunjukkan adanya peningkatan dalam nilai temperatur udara hasil dari proses pendinginan. Udara hasil dari proses pendinginan ini meliputi udara sekunder, udara tersier, dan udara buang. Parameter operasional ini cenderung mengalami peningkatan dari kondisi aktual. Gambar IV.10 mengilustrasikan kenaikan temperatur udara sekunder, udara tersier, dan udara buang dari kondisi actual menuju kondisi setelah penggantian *grate plate*.

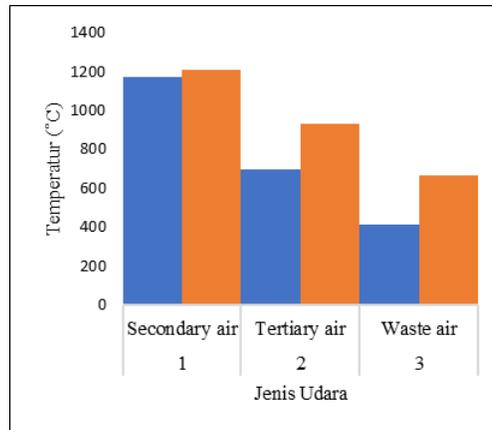
Tabel 1 Perbandingan data hasil simulasi *existing* terhadap hasil rancangan

No	Lokasi	Temperatur (°C)	
		Aktual	Modifikasi
1	Udara Sekunder	1173,57	1207,67
2	Udara Tersier	696,67	930,86
3	Udara Buang	411,30	666,56

Tabel 2 Data parameter operasi *clinker cooler* setelah penggantian

No	Parameter	Pengamatan
1	Temperatur <i>Clinker</i> Masuk ke <i>Cooler</i>	1367 °C
2	Temperatur Udara Masuk <i>Cooler</i>	35 °C
3	Temperatur Udara Keluar <i>Cooler</i> ke EP	411,304 °C
4	Temperatur Udara Keluar <i>Cooler</i> ke Kiln (<i>Secondary Air</i>)	1173,57 °C
5	Temperatur Udara Keluar <i>Cooler</i> ke Kalsiner (<i>Tertiary Air</i>)	696,678 °C
6	Temperatur <i>Clinker</i> Keluar <i>Cooler</i>	90,28 °C
7	Temperatur <i>Grate</i> 1	88,13 °C
8	Temperatur <i>Grate</i> 2	80,9 °C
9	Temperatur <i>Grate</i> 3	-
10	Temperatur Lingkungan	32 °C
11	<i>Flow Rate Kiln Feed</i>	6903 ton/hari
12	<i>Cooling Fan</i>	
	472 FAF	22410 m ³ /jam
	472 FA1	15000 m ³ /jam
	472 FA2	21340 m ³ /jam
	472 FA3	15000 m ³ /jam
	472 FA4	34000 m ³ /jam
	472 FA5	35000 m ³ /jam
	472 FA6	51240 m ³ /jam
	472 FA7	52690 m ³ /jam
	472 FA8	34980 m ³ /jam
	472 FA9	50000 m ³ /jam
	472 FAA	45000 m ³ /jam
	472 FAB	44630 m ³ /jam
	472 FAC	45010 m ³ /jam
	472 FAD	45410 m ³ /jam
	472 FAE	45410 m ³ /jam
13	Konsentrasi Debu Keluaran <i>Chimney</i>	9,9 mg/m ³
14	<i>Dynamic Pressure Tertiary</i>	1,88 Mbar
15	<i>Dynamic Pressure Secondary</i>	0,2 Mbar
16	<i>Dynamic Pressure Chimney</i>	0,51 Mbar
17	<i>Static Pressure Tertiary</i>	13 Mbar
18	<i>Static Pressure Chimney</i>	0,8 Mbar
19	<i>Bulk Density of Clinker</i>	1,282 kg/m ³

Gambar 9 memperlihatkan profil temperatur udara yang keluar dari *grate cooler*, meliputi udara sekunder, udara tersier, dan udara gas buang. Nilai-nilai temperatur ini mengalami peningkatan dibandingkan dengan kondisi aktual. Untuk udara sekunder, terjadi peningkatan dari 1173,57 °C menjadi 1207,67 °C. Kenaikan temperatur udara sekunder ini berdampak pada peningkatan efisiensi pembakaran di dalam *kiln*. Udara tersier mengalami kenaikan dari 696,678 °C menjadi 930,86 °C. Kenaikan temperatur udara tersier ini berkontribusi pada peningkatan efisiensi pada *preheater*, dengan meningkatkan kinerja proses pemanasan awal *raw meal* dan kalsinasi di kalsiner. Udara buang juga mengalami kenaikan dari 411,304 °C menjadi 666,563 °C. Udara buang ini dialirkan ke ESP untuk dipisahkan antara udara panas dan debu. Setelah itu, udara panas dibuang melalui *stack*.

Gambar 9. Profil kenaikan temperatur udara *output clinker cooler*

Kebutuhan udara sekunder dan udara tersier untuk mendukung proses lain dalam pembuatan semen sangatlah krusial, karena terdapat ketergantungan dan kaitan erat di antara proses-proses tersebut. Jika kebutuhan udara untuk proses pembakaran tidak terpenuhi, dampaknya bisa mengganggu proses lainnya, bahkan dapat berdampak pada kualitas produk akhir yang dihasilkan (Perry, 1979).

Hasil dari analisis ini menunjukkan peningkatan efisiensi grate cooler dari 69,3% menjadi 72,9% atau mengalami peningkatan efisiensi sebesar 3,6%. Kondisi ini sejalan dengan penelitian Oyepata (2020) yang memodelkan sistem pendingin klinker dengan skala lebih kecil dalam rasio 25:1 dan simulasi CFD untuk meneliti kinerja pendingin klinker dengan variasi parameter geometri, menunjukkan peningkatan kinerja hingga 15% dalam hal energi dan 10% dalam efisiensi energi dibandingkan pendingin yang sudah ada.

SIMPULAN

Perancangan proses *grate cooler* di industri semen, yang melibatkan penggantian *grate plate* tipe RFT dengan CFG pada kompartemen lima, menghasilkan kesimpulan bahwa suhu udara output dari *grate cooler*, yang mencakup udara sekunder, udara tersier, dan udara buang, mengalami peningkatan setelah dilakukan penggantian. Temperatur udara sekunder meningkat dari 1173,57 °C menjadi 1207,67 °C, udara tersier mengalami peningkatan dari 696,678 °C menjadi 930,86 °C, dan suhu udara buang meningkat dari 411,304 °C menjadi 666,563 °C. Selain itu, efisiensi *grate cooler* pada kondisi eksisting mencapai 69,3%, sementara hasil perancangan cooler menghasilkan efisiensi yang lebih baik, mencapai 72,9%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada pimpinan PT Solusi Bangun Indonesia dan Jurusan Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Bandung atas fasilitas yang telah diberikan dalam mendukung penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Ahamed, J. U., Madloul, N. A., Saidur, R., Shahinuddin, M. I., Kamyar, A., & Masjuki, H. H. (2012). Assessment of energy and exergy efficiencies of a grate clinker cooling system through the optimization of its operational parameters. *Energy*, 46(1), 664–674. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.074>
- Alsop, P. A. 2005. *Cement Plant Operation Handbook for Dry Process Plant*. 4th edition. Tradeship Publication, Ltd.
- Bejan, Adrian. 1987. *Convection Heat Transfer*. New York : Mc. Graw Hill Book Company.
- Duda, Walter H. 1985. “Cement Data Book” Vol 1 3rd Edition. Bauverlag GmbH. Berlin.

- Geng, Y., Wang, X., & Jiang, P. (2020). Prediction of the Cement Grate Cooler Pressure in the Cooling Process Based on a Multi-Model Fusion Neural Network. *IEEE Access*, 8, 115028–115040. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002768>
- Hongyi, W., Kun, Z., Xinjun, Z., Limei, S., & Feng, D. (2021). Multi-objective optimization design of cement grate cooler control system based on improved long short-term memory network. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43(15), 3399–3412. <https://doi.org/10.1177/01423312211023017>
- Holman, J.P. 1978. *Perpindahan Kalor*. Terjemahan oleh E. Jasjfi. 1984. Jakarta : Erlangga.
- Joseph, S. O., Dahunsi, O. A., Idowu, E. T., Aremu, A. M., Akintunde, D. O., Swanru, Y. S., & Idowu, T. E. (2022). Effect of Clinker Bed Height on Clinker Cooling Process on Clinker Grate Coolers Used in Cement Plant Ergonomic Evaluation of dynamic and post effects of vibration on earthmoving equipment operators View project Aerodynamic Optimization Using Genetic Algorithms View project Effect of Clinker Bed Height on Clinker Cooling Process on Clinker Grate Coolers Used in Cement Plant. In *International organization of Scientific Research* (Vol. 12). Page. www.iosrjen.org
- LafargeHolcim. 2016. *Reference Guide for Thermal Technology*. Swiss: Holcim.
- Oyepata, J. S., Akintunde, M. A., Dahunsi, O. A., Yaru, S. S., & Idowu, E. T. (2021). Modelling of clinker cooler and evaluation of its performance in clinker cooling process for cement plants. *Nigerian Journal of Technology*, 39(4), 1093–1099. <https://doi.org/10.4314/njt.v39i4.16>
- Perry, K. E. 1979. “*Cement Manufacturer’s Hand Book*”. Chemical Publishing Co., Inc., New York.
- Sanaye, S., Khakpaay, N., Chitsaz, A., Hassan Yahyanejad, M., & Zolfaghari, M. (2020). A comprehensive approach for designing, modeling and optimizing of waste heat recovery cycle and power generation system in a cement plant: A thermo-economic and environmental assessment. *Energy Conversion and Management*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112353>
- Setiyana, B. (2007). *Analisis Unjuk Kerja Grate Clinker Cooler pada Proses Produksi Semen* (Vol. 9).
- Shao, W., Cui, Z., & Cheng, L. (2016). Multi-objective optimization design of air distribution of grate cooler by entropy generation minimization and genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 108, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.088>
- Taweel, T. J. B., Sokolova, E., Sergeev, V., & Solovev, D. B. (2018). Energy and Exergy Analysis of Clinker Cooler in the Cement Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 463(3). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032101>
- Wang, S., Yu, H., Lu, S., Wang, X., & Liu, H. (2020). Application of least square support vector machine with adaptive particle swarm parameter optimization in grate pressure optimization setting of grate cooler. *Proceedings - 2020 35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, YAC 2020*, 632–637. <https://doi.org/10.1109/YAC51587.2020.9337619>
- Zanoli, S. M., Pepe, C., & Astolfi, G. (2023). Advanced Process Control for Clinker Rotary Kiln and Grate Cooler †. *Sensors*, 23(5). <https://doi.org/10.3390/s23052805>