



Studi Literatur Menghitung Neraca Panas Dan Efisiensi Thermal Pada Rotary Kiln di PT X

Literature Study Calculating Heat Balance And Thermal Efficiency in Rotayry Kiln at PT X

Farlina Hapsari*, Yully Mulyani*, Muhammad Naufal Daffa Iskandar

D-III Teknik Kimia, Teknik, Institut Teknologi Petroleum Balongan, Jl. Soekarno Hatta, Indramayu, 45211, Indonesia

*Email: hapsari.farlina@gmail.com

Abstrak

Rotary kiln merupakan sebuah alat pembakar produk *raw meal* menjadi *clinker* di pabrik semen. Energi *thermal* sangat berpengaruh pada *rotary kiln* dalam proses pembuatan *clinker*. Tujuan studi literatur ini adalah mengetahui proses pada *rotary kiln*, menghitung neraca panas pada *rotary kiln*, menghitung efisiensi *thermal* pada *rotary kiln*. Metode yang digunakan yaitu perbandingan data hasil *study literature* dengan data lapangan hasil penelitian. Adapun beberapa data pendukung untuk menunjang perhitungan yaitu spesifikasi *rotary kiln*, cara kerja *rotary kiln*, rumus neraca panas, dan rumus efisiensi *thermal*. Data penunjang digunakan untuk melakukan analisis kuantitatif yaitu menghitung neraca panas dan efisiensi *thermal*. Hasil data perhitungan neraca panas yaitu Q_{in} rata rata 343,1479703 Kkal/kg *clinker* dan rata rata *heat loss* 97,38451173 Kkal/kg *clinker*. Hasil perhitungan efisiensi *thermal* didapat rata rata efisiensi *thermal* sebesar 71,55%. Sehingga dapat dikatakan *rotary kiln* masih beroperasi dengan baik, karena nilai efisiensi *thermal* masih berada diantara 65%-75%, yaitu sebesar 71,55%.

Kata kunci: Rotary kiln, neraca panas, efisiensi thermal

Abstract

Rotary kiln is a device for burning *raw meal* products into *clinker* in a cement factory. Thermal energy is very influential on the *rotary kiln* in the *clinker* manufacturing process. The purpose of this final literature study is to know the process in a *rotary kiln*, to calculate the heat balance in a *rotary kiln*, to calculate the thermal efficiency of a *rotary kiln*. The method used is the comparison of data from the literature study with field data from research results. There are several supporting data to support the calculation, namely the specifications of the *rotary kiln*, the workings of the *rotary kiln*, the heat balance formula, and the thermal efficiency formula. Supporting data is used to perform quantitative analysis, namely calculating the heat balance and thermal efficiency. The results of the heat balance calculation data are Q_{in} on an average of 343.1479703 Kcal/kg *clinker* and an average heat loss of 97.38451173 Kcal/kg *clinker*. The results of the calculation of thermal efficiency obtained an average thermal efficiency of 71.55%. So it can be said that the *rotary kiln* is still operating well, because the thermal efficiency value is still between 65%-75%, which is 71.55%.

Keywords: Rotary kiln, heat balance, thermal efficiency

Pendahuluan

Produksi semen melibatkan beberapa proses kompleks yang berlangsung pada suhu yang berbeda. Akibatnya, industri semen merupakan salah satu industri dengan konsumsi energi *thermal* di dunia [6]. *Rotary kiln* merupakan sebuah alat pembakar produk *raw meal* menjadi *clinker* di pabrik semen,

peranannya sangat besar sebagai komponen utama penghasil produk semen. Penggunaan energi pada unit ini meliputi energi untuk proses pembakaran. Proses pembuatan *clinker* dari *raw meal* disebut proses klinkerisasi. [1]

Energi *thermal* pada *rotary kiln* sangat berpengaruh besar terhadap *clinker* yang dihasilkan,

sehingga energi *thermal* perlu diperhatikan. Panas pada *rotary kiln* ini perlu untuk pembuatan semen matang diperlukan suatu aliran panas yang digunakan untuk membakar bahan baku semen menjadi semen yang matang dan layak digunakan, dan suhu yang digunakan untuk memasak semen tersebut mencapai suhu $\pm 1400^{\circ}\text{C}$ [15]. *Temperature* pembakaran pada alat dapat lebih tinggi karena perpindahan panas yang tidak merata. Akibatnya, bahan bakar yang dibutuhkan lebih banyak. Perlunya dilakukan pengontrolan dan analisa performa terhadap unit *rotary kiln* untuk mendapatkan proses yang lebih optimal. Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi dari *rotary kiln*. [18]

Teori

A. Rotary Kiln

Rotary kiln merupakan suatu alat yang digunakan dalam proses pembakaran, pencampuran, dan penguraian terhadap *kiln feed* yang berupa campuran *limestone*, tanah liat, pasir silika dan pasir besi menjadi *clinker*. *Clinker* adalah batuan buatan yang dihasilkan dari *kiln feed* (*raw meal*) melalui proses yang terjadi di dalam *kiln* pada suhu sekitar 1450°C . Selama proses pemanasan di dalam *kiln*, akan terjadi reaksi fisika dan kimia secara bersamaan dan interaksi antar molekul yang membentuk senyawa klinker. [20]

Rotary kiln merupakan unit operasi yang biasanya digunakan di pabrik semen ataupun pabrik pengolahan biji besi. Pada pabrik semen, unit operasi ini berfungsi sebagai pengubah semen mentah menjadi semen jadi. Sedangkan pada pabrik besi, unit operasi ini berfungsi untuk meleburkan biji besi sampai *temperature* tertentu. Prinsip kerja dari unit operasi ini yakni dengan memanfaatkan panas dari *burner* yang terdapat didalam unit operasi ini untuk membakar bahan baku yang melewati *rotary kiln*. Konstruksi *rotary kiln* di pabrik semen terbagi menjadi 4 zona, yaitu: Zona Kalsinasi: suhu $900-1000^{\circ}\text{C}$ terjadi reaksi pelepasan CO_2 pada CaCO_3 dan MgCO_3 . Zona Transisi: suhu $1000-1250^{\circ}\text{C}$ sedikit demi sedikit terjadi reaksi antara antara CaO dengan senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 . Zona Pembakaran (*Burning*): suhu $1250-1450^{\circ}\text{C}$ terjadi reaksi antara CaO dengan senyawa O_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 . Zona Pendinginan (*Cooling*): suhu $900-1250^{\circ}\text{C}$. [15]

B. Energi Panas

Konsep energi digunakan dalam termodinamika untuk menentukan keadaan suatu sistem. Bahwa energi tidak diciptakan atau dimusnahkan tetapi hanya berubah dari satu bentuk ke bentuk lain. Ilmu termodinamika berhubungan dengan hubungan antara panas dan bentuk energi lainnya, tetapi perpindahan

panas berkaitan dengan analisis laju perpindahan panas yang terjadi dalam suatu sistem. Perpindahan energi oleh aliran panas tidak dapat diukur secara langsung, tetapi konsep tersebut memiliki arti fisis karena berkaitan dengan besaran terukur yang disebut suhu. [12]

Panas dapat berpindah dari suatu tempat ke tempat lain akibat adanya perbedaan suhu. Perpindahan panas (*heat transfer*) ialah ilmu yang mempelajari tentang perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material. Ilmu perpindahan panas tidak hanya menjelaskan bagaimana energi kalor itu berpindah dari satu benda ke benda lain, tetapi juga dapat melihat laju perpindahan yang terjadi pada kondisi – kondisi tertentu. Perpindahan panas dapat dibagi menjadi beberapa jenis, berikut adalah jenis-jenis perpindahan panas: [2]

C. Jenis-Jenis Perpindahan Panas

1. Radiasi

Radiasi merupakan proses perpindahan panas dari suatu benda ke benda lain tanpa melalui medium. Dalam teori radiasi dijelaskan bahwa panas yang berpindah dari suatu benda ke benda lain dipancarkan melalui gelombang elektromagnetik sehingga dalam proses perpindahannya tidak memerlukan medium sama sekali. Bahkan jika kedua benda tersebut dipisahkan oleh ruang hampa, panas akan tetap berpindah melalui pancaran gelombang elektromagnetik. Panas matahari yang sampai ke bumi merupakan salah satu contoh nyata bentuk perpindahan panas secara radiasi. Meskipun jarak antara matahari dan bumi sangat jauh serta dipisahkan oleh ruang hampa, panas matahari tetap dapat sampai ke bumi melalui pancaran. [4]

2. Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi jika pada suatu benda terdapat gradient suhu (*temperature gradient*), maka menurut pengalaman akan terjadi perpindahan energi dari bagian bersuhu tinggi ke bagian bersuhu rendah. Kita katakan bahwa energi berpindah secara konduksi (*conduction*) atau hantaran dan bahwa laju perpindahan kalor itu berbanding dengan *gradient* suhu normal. [16]

3. Konveksi

Konveksi adalah proses perpindahan energi dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpanan energi dan gerakan mencampur. Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya diatas suhu *fluida* yang ada di sekitarnya berlangsung dalam beberapa tahap. Pertama, panas akan mengalir dengan cara konduksi ke partikel-partikel *fluida* yang berbatasan. Akibat perpindahan energi dengan cara ini, akan mengakibatkan suhu dan

energi dalam *fluida* akan meningkat yang menyebabkan partikel - partikel ini bergerak di dalam *fluida* ke daerah yang suhunya lebih rendah. Partikel - partikel *fluida* ini akan melakukan gerakan “mencampur” dan sekaligus memindahkan sebagian energinya ke partikel *fluida* lainnya.[5]

D. Jenis-Jenis Panas

1) Panas Laten

Panas laten adalah perpindahan panas sebagai akibat dari perubahan fasa yang terjadi dalam kisaran suhu sempit tertentu di materi yang relevan. Yang paling sering digunakan untuk tujuan ini adalah: garam cair, lilin parafin dan bahan air/es.

2) Panas Sensibel

Panas sensibel adalah panas yang dipertukarkan oleh sistem yang tidak mengubah fasenya tetapi mengubah suhu penyimpanan sedang. Suhu berubah secara linier dalam kaitannya dengan penyimpanan panas.[9]

E. Neraca Panas

Neraca *energy* adalah persamaan matematis yang menyatakan hubungan antara *energy* masuk dan *energy* keluar suatu system yang berdasarkan pada satuan waktu operasi.[19]

$$Q = m \times cp \times \Delta T \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.1}$$

F. Efisiensi Thermal

Efisiensi adalah salah satu indikator untuk mengetahui kinerja alat yang digunakan, dan sebagai tolak ukur *industry* untuk dapat menghemat pengeluaran pabrik sehingga mampu bersaing dipasaran. Efisiensi *Thermal* pada unit *Calcliner* merupakan suatu hal yang penting untuk diperhatikan, karena efisiensi *Thermal* merupakan tolak ukur untuk mengetahui kinerja dari alat *Calcliner*. Efisiensi *Thermal* menggambarkan seberapa baik alat tersebut bekerja yang ditinjau dari seberapa banyak *Thermal* (panas) yang hilang. Semakin banyak *Thermal* (panas) yang hilang akan menyebabkan Efisiensi *Thermal* dari *calcliner* berkurang. Hal ini tentunya menggambarkan bahwa kinerja dari *calcliner* kurang baik.[3]

$$\eta = \frac{\text{total } Q_{in} - \text{heat loss}}{\text{total } Q_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.2}$$

Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini ada 2 yaitu metode observasi dan pengambilan data.

a) Metode Observasi

Dengan cara melakukan pengamatan secara sistematis mengenai hal-hal yang terjadi dilapangan yang berkaitan dengan penelitian.

b) Pengambilan Data

Data-data diperoleh dari studi literature berbagai referensi jurnal, *e-book* dan pustaka yang menunjang penelitian ini.

Hasil

1. Proses Pada Rotary Kiln

Pada proses pembuatan semen dengan kadar air kurang dari 1% diperlukan alat yang dapat mengurangi kandungan air pada semen. Alat tersebut adalah *rotary kiln*. Reaksi pada *rotary kiln* berupa reaksi pemanasan dengan suhu mencapai 1400°C, dan terjadi reaksi kalsinasi. *Feed* berupa *raw mill* masuk kedalam *rotary kiln* untuk dipanaskan agar kandungan air pada *feed* berkurang mencapai kurang dari 1%.

Proses pembuatan *clinker* pada *rotary kiln* diawali dengan masuknya *feed* berupa padatan masuk kedalam *rotary kiln* yang berputar dengan kecepatan 3rpm dengan kemiringan 4°. *Rotary kiln* diposisikan miring bertujuan untuk *feed* yang masuk dapat terpanaskan dengan sempurna dan untuk memudahkan terjadi nya reaksi klinkerisasi didalam *rotary kiln*. *Feed* yang masuk berupa *iron sand*, *silica sand*, *clay*, dan *limestone* yang sudah digiling atau biasa disebut dengan *raw meal*. *Raw meal* yang masuk kedalam *inlet rotary kiln* memiliki suhu berkisar 900°C. *Rotary kiln* memiliki 4 zona didalamnya, dimana setiap zona memiliki peran yang berbeda – beda dalam proses pembuatan *clinker* didalam *rotary kiln*. Berikut adalah zona yang ada didalam *rotary kiln*:

a) Zona Kalsinasi (*Calcining Zone*)

Raw meal yang masuk *rotary kiln*, pertama kali akan masuk pada zona kalsinasi, dimana pada zona ini berfungsi untuk mengubah $MgCO_3$ menjadi $MgCO$ dan $CaCO_3$ menjadi CaO . Dengan kata lain pada zona kalsinasi ini terjadi reaksi pelepasan O_2 dan reaksi ini biasa disebut dengan reaksi kalsinasi. Suhu pada zona kalsinasi ini berkisar diantara 900°C - 1000°C.

b) Zona Transisi

Raw meal yang sudah melewati zona kalsinasi kemudian masuk kedalam zona transisi. Pada zona transisi ini suhu yang dihasilkan berkisar antara 1000°C - 1200°C. Proses yang terjadi adalah mulai terbentuk reaksi sedikit demi sedikit antara CaO dengan senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 . Pada zona ini padatan *raw meal* sudah mulai berubah menjadi cair.

c) Zona Pembakaran (*Burning Zone*)

Pada zona ini *raw mill* yang masuk mulai mendekati sumber panas. Suhu pada zona ini mencapai $\pm 1400^\circ C$. Pada zona ini *raw meal* yang masuk sudah berubah menjadi cairan. Reaksi yang terjadi pada zona pembakaran adalah pelelehan *raw meal* dan terjadi reaksi pembentukan *clinker*. Reaksi pembentukan *clinker* ini disebut dengan reaksi klinkerisasi. Reaksi klinkerisasi terjadi antara senyawa CaO dengan senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 . Dari reaksi klinkerisasi dihasilkan senyawa utama dalam

pembuatan semen, senyawa yang dihasilkan adalah C_2S (*belite*), C_3S (*alite*), C_3A (*celite*), dan C_4AF (*felite*).

d) Cooling Zone

Clinker cair dari hasil pembakaran di *burning zone* selanjutnya akan masuk ke *cooling zone* dan akan mengalami perubahan fasa, dari fasa cair menjadi padat. Pada zona ini *clinker* cair akan mengalami penurunan suhu, karena *clinker* cair akan menjauhi sumber panas. Suhu *clinker* cair akan turun mencapai $\pm 1000^\circ\text{C}$ yang mengakibatkan *clinker* cair berubah menjadi *clinker* padat.

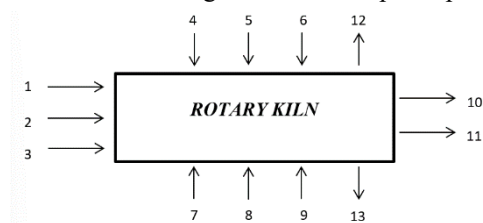
2. Neraca Panas

Dalam prosesnya *rotary kiln* sangat membutuhkan energi panas yang besar agar dapat menghasilkan *clinker* yang baik dengan kadar air kurang dari 1%. Untuk mengetahui apakah suatu *rotary kiln* sudah berfungsi dengan baik atau belum dalam menghasilkan *clinker* dapat terlihat dari *efisiensi thermal* yang ada pada *rotary kiln*. Perhitungan neraca panas pada *rotary kiln* perlu diketahui berapa jumlah *feed* yang masuk dan berapa jumlah *clinker* yang di hasilkan dari proses pembakaran di *rotary kiln*.

Tabel 1. Data *Raw Meal* dan *Clinker Rotary kiln*

Tanggal	<i>Raw Meal</i> (kg)	<i>Clinker</i> (Kkal/kg <i>clinker</i>)
1 Mei 2022	305200	258548,3488
2 Mei 2022	306800	258999,3328
3 Mei 2022	304500	257245,254
Rata-rata	305500	258264,3119

Perhitungan neraca panas disini bertujuan untuk mengetahui berapa panas yang masuk dan yang keluar dari *rotary kiln*, yang nanti nya akan digunakan untuk mencari nilai efisiensi *thermal* pada *rotary kiln*. Berikut adalah diagram alir neraca panas pada unit *kiln*.



Gambar 1. Diagram Alir Neraca Panas Rotary Kiln

Keterangan :

1. Panas sensibel *raw meal*
2. Panas sensibel batubara
3. Panas sensibel air dalam batubara
4. Panas sensibel udara pendorong batubara
5. Panas sensibel udara *primary fan*

6. Panas laten air
7. Panas pembakaran batubara
8. Panas sensibel udara pendorong *raw meal*
9. Panas pembakaran bahan bakar *reinforced suspension preheater*
10. Panas sensibel gas buang *reinforced suspension preheater*
11. Panas panas sensibel *clinker*
12. Panas reaksi
13. Panas hilang akibat radiasi dan konveksi

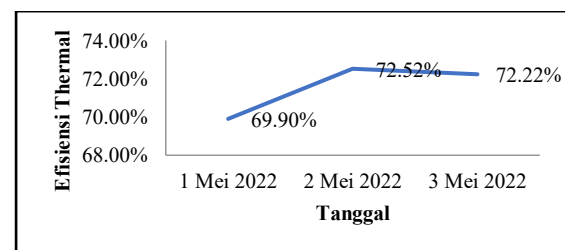
Dari diagram alir neraca panas diatas dapat dihitung total panas yang masuk dan total panas yang keluar dari *rotary kiln*. Nilai panas dari panas sensibel udara pendorong *raw meal*, panas pembakaran bahan bakar *Reinforced Suspension Preheater*, dan panas sensibel gas buang *Reinforced Suspension Preheater* diasumsikan secara berturut-turut adalah 15 Kkal/kg *clinker*, 170 Kkal/kg *clinker*, dan 150 Kkal/kg *clinker*.

Tabel 2. Data Panas Masuk Dan *Heat Loss Rotary kiln*

Tanggal	Q_{in} (Kkal/kg <i>clinker</i>)	<i>Heat loss</i> (Kkal/kg <i>clinker</i>)
1 Mei 2022	349,5307843	105,1939611
2 Mei 2022	339,1052497	93,15973808
3 Mei 2022	340,807877	93,79983599
Rata-rata	343,1479703	97,38451173

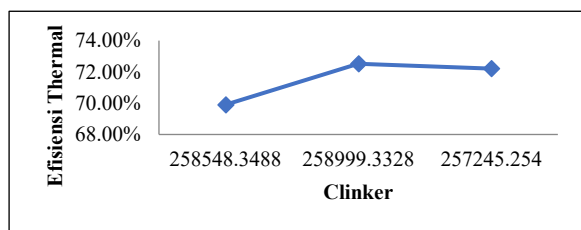
Setelah didapat total kalor yang masuk dan jumlah panas yang hilang, maka selanjutnya adalah menghitung efisiensi *thermal* selama 3 hari. Rumus untuk menghitung efisiensi *thermal* adalah

$$\eta = \frac{\text{total } Q_{in} - \text{heat loss}}{\text{total } Q_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots \text{Persamaan 2.2}$$



Gambar 2. Grafik Efisiensi Thermal

Berdasarkan gambar 4.3 grafik efisiensi *thermal* dapat dilihat bahwa efisiensi *thermal* selama 3 hari memiliki rata-rata efisiensi *thermal* sebesar 71,55%. Efisiensi *thermal* tertinggi berada pada hari kedua yaitu sebesar 72,52%.



Gambar 3. Grafik Korelasi Antara Clinker Dengan Efisiensi Thermal

Berdasarkan gambar 3 grafik korelasi antara *clinker* dengan efisiensi *thermal* menunjukkan bahwa semakin tinggi efisiensi *thermal* maka semakin besar pula *clinker* yang dihasilkan. Dikarenakan ada beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi *thermal* dari *rotary kiln*. Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi *thermal* dapat berupa laju alir *raw meal* yang masuk, panas yang dihasilkan dari bahan bakar, jumlah bahan bakar yang masuk dan cuaca.

Menurut khairani tahun 2021, "Semakin banyak *clinker* yang terbentuk maka semakin rendah efisiensi *thermal*." Sedangkan menurut Filkoski tahun 2018, "Efisiensi *thermal* berbanding lurus dengan banyak nya jumlah *clinker* yang diproduksi". Dan menurut Arumny tahun 2021, "Kenaikan dan penurunan efisiensi *thermal* dapat disebabkan oleh besarnya laju alir umpan, dimana semakin besar laju alir umpan maka akan semakin besar efisiensi *calciner*."

Tabel 3. Korelasi Antara *Feed*, *Clinker*, *Qin*, Dan Efisiensi Thermal

Tanggal	<i>Feed</i> (kg)	<i>Clinker</i> (kg)	<i>Qin</i> (Kkal/kg <i>clinker</i>)	Efisiensi Thermal
1 Mei 2022	305200	258548,34	349,53	69,90%
2 Mei 2022	306800	258999,33	339,105	72,52%
3 Mei 2022	304500	257245,25	340,807	72,22%

Berdasarkan tabel 3 menunjukkan bahwa faktor panas yang masuk berpengaruh dalam nilai efisiensi *thermal*. Semakin tinggi *feed* yang masuk maka semakin tinggi pula efisiensi *thermal*. Akan tetapi banyak faktor yang mempengaruhi efisiensi *thermal* salah satunya adalah jumlah panas yang masuk, dengan jumlah *feed* yang rendah dapat memiliki efisiensi *thermal* yang tinggi jika panas yang masuk semakin tinggi. Sehingga nilai efisiensi *thermal* berbanding lurus dengan nilai *clinker*. Semakin tinggi nilai *thermal* maka semakin tinggi pula hasil *clinker* yang dihasilkan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur dari berbagai referensi

penelitian ini dapat disimpulkan :

1. *Feed rotary kiln* berupa *raw meal* masuk kedalam *rotary kiln* dengan suhu $\pm 900^{\circ}\text{C}$. *Raw meal* yang masuk akan diaduk oleh *rotary kiln* yang berputar dengan kecepatan 3rpm dan kemiringan 4° . *Raw meal* yang masuk akan memasuki 4 zona yang ada didalam *rotary kiln*, yaitu: zona kalsinasi, zona transisi, zona pembakaran, *Cooling zone*,
2. Neraca panas pada *rotary kiln* selama 3 hari didapat hasil kalor masuk pada tanggal 1 Mei 2022 sebesar 349,5307843 Kkal/kg *clinker*, pada tanggal 2 Mei 2022 sebesar 339,1052497 Kkal/kg *clinker*, pada tanggal 3 Mei 2022 sebesar 340,807877 Kkal/kg *clinker*, dan rata-rata panas yang masuk selama 3 hari adalah 343,1479703 Kkal/kg *clinker*.
3. Efisiensi *thermal* pada *rotary kiln* selama 3 hari adalah 69,9%, 72,52%, dan 72,22%. Rata-rata efisiensi *thermal* dalam 3 hari adalah 71,55%. *Design* efisiensi *thermal rotary kiln* sebesar 65%-75%. Sehingga dapat dikatakan *rotary kiln* masih beroperasi dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] Ammarullah, M. I., et al. 2017. "Analisis Perpindahan Kalor Konveksi pada Rotary Kiln di PT. Semen Baturaja (Persero) Tbk." Jurnal Rekayasa Mesin 18.2.
- [2] Anwar, Khairil. 2011. "Analisis Perpindahan Panas pada Grate Cooler Industri Semen." MEKTEK 13.2
- [3] Arumny, Tri & Fadilah, Ahmad & Uddin, Safar. 2022. Analisis Efisiensi Thermal Pada Alat Calciner Di Pabrik Baturaja Ii Pt. Semen Baturaja (Persero) Tbk.
- [4] Burhani, Kharis, Ramelan Ramelan, and Rizqi Fitri Naryanto. 2014. "Pengembangan Media Pembelajaran Perpindahan Panas Radiasi Dengan Variasi Beda Perlakuan Permukaan Spesimen Uji." Journal of Mechanical Engineering Learning 3.2
- [5] Faisal, Muhammad, and Usman Usman. 2019. "Analisa Perpindahan Panas Pada Tungku Rocket Tipe Silinder Berbahan Bakar Biomassa." Prosiding SEMDI-UNAYA (Seminar Nasional Multi Disiplin Ilmu UNAYA). Vol. 3. No. 1.
- [6] Batlle, Feliu, V. and R. Rivas-Perez. 2020. "Design of a robust fractional order controller for burning zone temperature control in an

- industrial cement rotary kiln." IFAC-PapersOnLine 53.2: 3657-3662.
- [7] Filkoski, Risto V., Ilija J. Petrovski, and Zlatko Gjurchinovski. 2018. "Energy optimisation of vertical shaft kiln operation in the process of dolomite calcination." *Thermal Science* 22.5: 2123-2135.
- [8] Himmelblau, David M, James B. Riggs. "Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering, Eight Edition"
- [9] Jouhara, Hussam, et al. 2020. "Latent thermal energy storage technologies and applications: A review." *International Journal of Thermofluids* 5: 100039.
- [10] Khairani, Nabilah & Uddin, Safar. 2021. *Menghitung Efisiensi Termal Pada Alat Rotary Kiln Pabrik II PT. Semen Baturaja (Persero) Tbk.*
- [11] Moran, J Michael, Howard N. Shapiro, Daisie D. Boettner, dan Margaret B. Bailey. 2014. "Fundamentals Of Engineering Thermodynamics"
- [12] Ozisik, M. Necati. 1985. "Heat Transfer A Basic Approach"
- [13] Peray, Kurt. 1979. "Cement Manufacturer's Handbook". New York: Chemical Publishing Co., Inc.
- [14] Perry, Robert H., Don W. Green "Perrys Chemical Engineers Handbook, seventh edition"