

## Analisis Efisiensi Energi Pada Penerapan *Burner Tube* Di Industri Keramik (Studi Kasus PT EFG)

Rudy Effendi Listyanto<sup>1</sup>, Ikhsan Romli<sup>2</sup>, Tri Ngudi Wiyatno<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Pelita Bangsa

Koresponden Email : rudyel.rel2020@pelitabangsa.ac.id

### Abstract

*Cost energy in ceramics industries consist of cost gas energy and cost electrical energy. Energy cost that needed for producing floor tile ceramics is about 40% of totally production cost. Kiln is one of production machine in the industry that use most of gas energy around 51% of totally gas consumption needed in ceramics production process. The importance issues wich is faced that gas consumption of kilns still not according to the company's Key Performance Indicator (KPI). This research try to support management for looking for energy consumption problem in kilns. Burner tube is designed so that air temperature in the burner could increase and its pressure more stable so that it will easy to burn and finally consumption of gas become lower than the original design burner. Using burner tube has impact on reducing pressure of firing chamber kiln, to keep kiln operates as its standard operational it need to reduce power of motor smoke air fan and it will reduce electrical energy of kiln.*

**Keywords :** *Efficiency Energy, Kiln, Burner Tube, Smoke Air Fan*

### Abstrak

Biaya energi pada industri keramik terdiri dari biaya energi gas dan biaya energi listrik. Biaya energi yang dibutuhkan untuk memproduksi keramik lantai adalah sekitar 40% dari total biaya produksi. Kiln merupakan salah satu mesin produksi di industri yang menggunakan sebagian besar energi gas yaitu sekitar 51% dari total konsumsi gas yang dibutuhkan dalam proses produksi keramik. Permasalahan penting yang dihadapi adalah konsumsi gas kiln masih belum sesuai dengan Key Performance Indicator (KPI) perusahaan. Penelitian ini mencoba untuk mendukung pihak manajemen dalam mencari permasalahan konsumsi energi pada kiln. Tabung burner didesain sedemikian rupa sehingga temperatur udara di dalam burner dapat meningkat dan tekanannya lebih stabil sehingga mudah terbakar dan pada akhirnya konsumsi gas menjadi lebih rendah dibandingkan desain burner aslinya. Penggunaan burner tube berdampak pada penurunan tekanan ruang bakar kiln, agar kiln tetap beroperasi sesuai standar operasionalnya maka perlu dilakukan pengurangan daya motor kipas angin asap sehingga akan mengurangi energi listrik kiln.

**Kata Kunci :** Efisiensi Energi, Kiln, Burner Tube, Smoke Air Fan

### Pendahuluan

PT EFG adalah merupakan salah satu perusahaan keramik dalam negeri yang juga mempunyai permasalahan untuk tetap eksis dan sustain dalam persaingan usaha khususnya dibidang manufaktur keramik. PT EFG memproduksi tiga macam produk keramik yaitu keramik lantai, keramik dinding, dan genting keramik. Sebagai salah satu pemain yang cukup lama lebih kurang seperempat abad usia berdirinya, PT EFG senantiasa melakukan berbagai *improvement* dan inovasi untuk bisa beroperasi lebih efisien. Diantaranya adalah melakukan penelitian dan pengembangan terhadap komposisi bahan material, management dan teknologi dalam rangka untuk menurunkan biaya produksi dan operasionalnya dengan tetap menjaga standard kualitas produknya.

Diantara Inovasi yang dibutuhkan dalam industri keramik adalah teknologi untuk bisa menurunkan biaya pemakaian energi. Biaya energi dalam memproduksi keramik adalah lebih kurang sebesar 40% dari keseluruhan biaya produksi. Untuk setiap meter persegi produk keramik diperlukan energy dari gas bumi sebesar 0.19 m<sup>3</sup>.

Beberapa aktivitas dilakukan diantaranya mengganti peran dari *variator gear box* pada motor penggerak dengan *inverter* untuk mencapai titik optimum pemakaian energi listrik pada motor penggerak, pemanfaatan panas buangan mesin pembakaran keramik (Kiln) untuk digunakan pada proses *drying*. Pengolahan air limbah untuk bisa digunakan kembali dalam proses produksi. Melakukan *recycling reject* produksi dan lain – lain. Termasuk upaya untuk bisa mengurangi konsumsi energi gas pada proses pembakaran dan *drying*.

Tabel 1. Variabel Cost Produksi ( dalam persen ) Produk 40 x 40

<b>Raw Material</b>	<b>Cost</b>	
Body	15	%
Engobe	9.3	%
Glaze	15.2	%
Pasta	4.3	%
Packing Material	4.2	%
<b>Sub Total</b>	<b>48</b>	<b>%</b>
<b>Energy</b>		
Electricity	8.8	%
Natural Gas	33.2	%
<b>Sub Total</b>	<b>42</b>	<b>%</b>
<b>Assigned</b>		
Overtime	1.8	%
Maintenance	4	%
Stores & Supplies Misc	4.2	%
<b>Sub Total</b>	<b>10</b>	<b>%</b>
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>%</b>

Sumber : Variabel Cost PT EFG, 2021

Tabel 1 menggambarkan komposisi *variabel cost* produksi untuk produk keramik berukuran 40cmx40cm. Pada tabel tersebut diketahui bahwa besarnya *cost energy* yang meliputi energi gas dan energi listrik adalah sebesar 42% dari keseluruhan biaya produksi.

Tiga bagian dari proses produksi keramik yang menggunakan energi gas adalah bagian *Spray drier*, *Horizontal drier* dan *KILN*. *Spray drier* adalah bagian yang menghasilkan *powder* yang setelah dilakukan proses *pressing* akan menjadi media *body* untuk keramik. *Horizontal drier* adalah mesin produksi yang berfungsi untuk mengurangi kandungan air di dalam media bodi keramik. *KILN* adalah mesin *Oven* yang digunakan untuk membakar *green tile* menjadi keramik jadi siap dijual. *Spray drier* memakai 31 % dari total konsumsi Gas, *Horizontal drier* mengkonsumsi 18% sedangkan *Kiln* menggunakan 51%. (Managemen Produksi PT EFG, 2021).

*Kiln* adalah *equipment* dalam industri keramik yang berfungsi disamping untuk terjadinya reaksi kimia pada proses pembakaran juga untuk melakukan transformasi secara fisik pada bahan keramik mentah sehingga menjadi produk keramik yang siap jual. Berfungsi untuk mentransformasi material yang masih rapuh secara fisik menjadi produk yang bernilai secara ekonomis. Dalam melaksanakan proses pembakaran keramik Kiln membutuhkan 51% dari total konsumsi energi gas yang dipakai oleh proses produksi keramik. Sehingga menjadi amat strategis jika manajemen produksi berinisiatif untuk melakukan *improvement* dan inovasi untuk bisa mengurangi konsumsi gas pada *Kiln*.



Gambar 1. Konsumsi energy gas Kiln tahun 2020 - 2021 Sumber : Management Report PT EFG, 2021

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah disampaikan, maka dapat dikemukakan rumusan masalah sebagai berikut :

1. Apakah modifikasi pada *burner Kiln* memiliki kontribusi terhadap penurunan konsumsi energi gas pada proses pembakaran keramik di mesin *Kiln* ?
2. Apakah penurunan konsumsi gas pada mesin *Kiln* juga berdampak pada penurunan konsumsi energi yang lain ?

Tujuan dari penelitian ini untuk :

1. Menganalisis dampak aplikasi *burner tube* terhadap konsumsi energi pada mesin *Kiln* plant FTK – PT EFG
  2. Mengevaluasi penghematan biaya energi setelah penerapan *burner tube* pada produksi *Kiln* – PT EFG
- Manfaat Penelitian :

Sedangkan manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sejauh mana usaha meredesain burner pada mesin kiln mampu memberi kontribusi terhadap usaha menurunkan biaya produksi dari sektor energi yang dipakai pada mesin *Kiln*.

## KILN

*Kiln* dalam industri Keramik adalah suatu perangkat yang berfungsi sebagai tungku pembakar material bahan keramik mentah untuk dikonversi melalui proses kimia dan fisika menjadi keramik siap jual. Secara fisik dapat digambarkan bahwa *Kiln* berbentuk lorong sepanjang 119,7 meter yang dilengkapi dengan 120 unit *burner* terpasang berjajar yang berfungsi memanaskan ruangan sesuai dengan standard *curva temperatur* yang ditetapkan. Dilengkapi dengan beberapa unit *blower* yang mempunyai fungsi diantaranya untuk menjaga tekanan didalam ruang bakar, dan fungsi pendinginan, terdapat 3000 unit *roll* berbahan keramik beserta sistem penggerak yang fungsinya untuk melewati material *green tile* keseluruhan tahapan pembakaran didalam *Kiln*.

Pembakaran di *Kiln* dilakukan selama 40 hingga 60 menit sesuai dengan jenis materialnya serta dimensinya dan dilakukan bertahap dimulai dari temperatur 100°C hingga temperatur tertingginya 1150°C – 1200°C. Setiap tahapan proses mempunyai fungsi tersendiri.

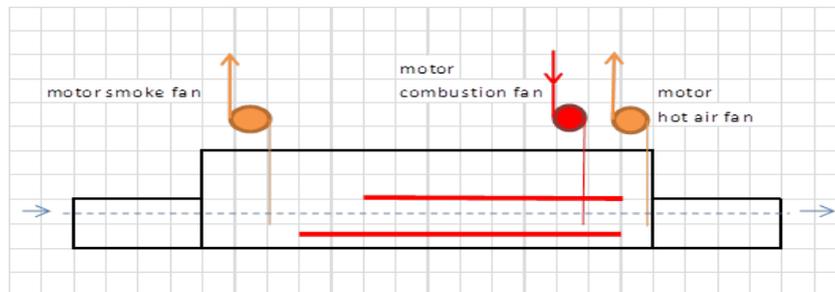
Pada proses pembakaran oleh kiln hasil yang diharapkan adalah produk keramik yang mempunyai standard ukuran dan kelurusan, kekuatan, resapan air dan warna motif yang sesuai dengan standard yang ditetapkan. Untuk menjaga kestabilan kualitas produk yang diproses maka selain pengendalian temperatur juga perlu diperhatikan parameter tekanan didalam ruang bakar kiln.

Untuk menjaga kestabilan tekanan ruang bakar *Kiln* dilengkapi dengan satu unit set *blower smoke fan*. Disamping masih ada 3 unit *blower motor* yang lain dengan fungsi masing untuk supply udara pada burner *combustion fan*, untuk membuang udara panas sisa pembakaran *hot air fan* dan *blower motor* untuk pendinginan produk *cold air fan*.

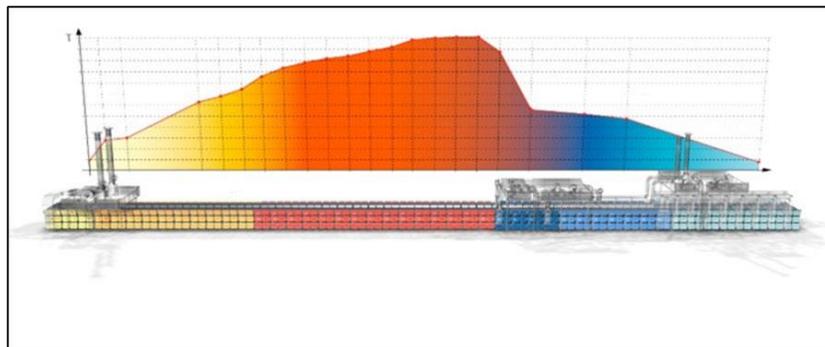
Bahan bakar yang digunakan pada kiln adalah campuran gas metana ( $\text{CH}_4$ ) dengan udara. Tekanan gas yang *disupply* pada kiln adalah 2 – 3 Bar dengan kaloritas berkisar antara 8,500 hingga 8,800 kilocalori per Nm<sup>3</sup> (normal meter kubik). (PT EFG – Kiln Dept, 2022)

Volume gas yang dikonsumsi pada *kiln* sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut :

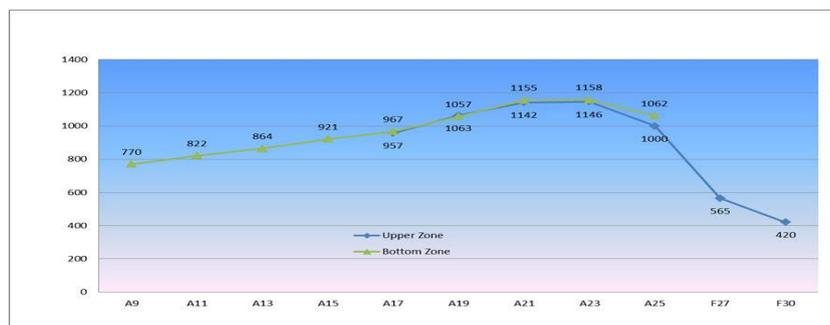
1. Karakteristik dari material bahan keramik yang diproduksi
2. *Cycle time* dari mesin kiln
3. Parameter operasional kiln
4. *Downtime* mesin
5. Parameter Lingkungan
6. Kinerja *burner*.



Gambar 2. Bagan Kiln ( Sumber : PT EFG, 2022)



Gambar 3. Linierisasi kurva temperatur dengan fisik kiln



Gambar 4. Kurva temperatur Kiln (PT EFG)

### Perhitungan Konsumsi Gas pada mesin KILN

Penghitungan konsumsi gas pada mesin kiln di ukur dengan satuan meter kubik (m<sup>3</sup>) sementara untuk mengetahui efisiensi mesin Kiln ditentukan dengan satuan Kilokalori per kilogram (Kcal/Kg), dimana

$$\text{Kcal / Kg} = \frac{\text{Konsumsi gas ( NM3 ) x Kaloritas gas ( Kilokalori/NM3 )}{\text{Material terproses ( M2 ) x Berat Material ( Kg / M2 )}} \quad \text{..... (1)}$$

$$\text{NM3} = \text{M3 x ( P actual / P ref ) x ( T actual / T ref )} \quad \text{..... (2)}$$

Standard yang dipakai oleh manajemen PT KIA untuk menentukan konsumsi energi adalah menggunakan satuan GigaJoule/Ton ( GJ/Ton ). Sehingga perlu mengkonversi satuan Kcal/Kg dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} 1 \text{ kilo kalori ( Kcal )} &= 4,184 \quad \text{Joule} \\ &= 4.184 \times 10^{-6} \quad \text{Giga Joule (GJ)} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$1 \text{ Kilo gram ( Kg )} = 1 \times 10^{-3} \quad \text{Ton} \dots\dots\dots (4)$$

Sehingga

$$1 \text{ Kcal/Kg} = 4.184 \times 10^{-3} \quad \text{GJ/Ton} \dots\dots\dots (5)$$

### Burner Gas

Burner adalah perangkat yang berfungsi *generate flame* (lidah api) untuk memanaskan product menggunakan bahan bakar gas seperti acetylene, gas alam atau propane. Untuk mendapatkan manfaat yang maksimal dari proses pembakaran, dibutuhkan proses pembakaran yang sempurna. Syarat-syarat agar dapat terjadi pembakaran sempurna pada burner yaitu:

1. Kuantitas udara (oksigen) yang disupply ke bahan bakar cukup.
2. Oksigen dan bahan bakar benar-benar tercampur.
3. Turbulance bahan bakar-udara terjaga di atas temperatur pengapiannya.
4. Waktu yang cukup bagi campuran bahanbakar-udara untuk terbakar sempurna.
5. Adanya Pemantik sebagai *pentrigger*.



Gambar 5. Burner Gas

### Burner Tube / Bushing

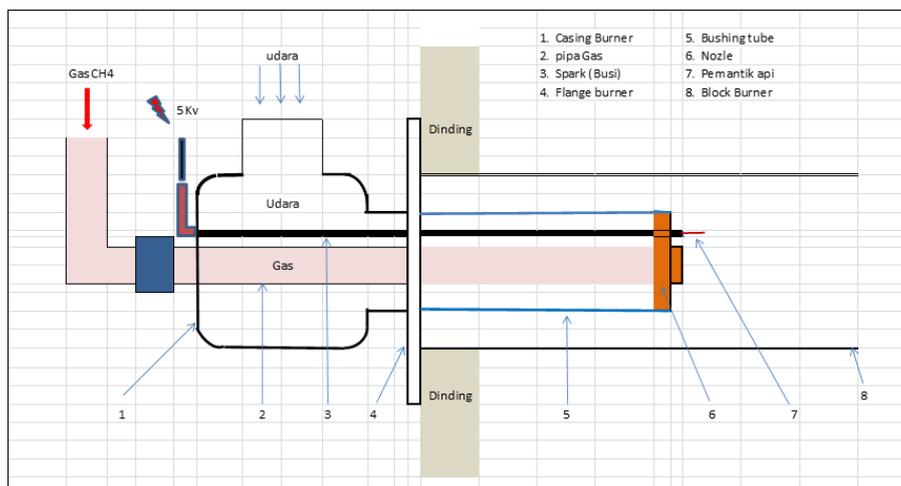
Konsep dari desain tube pada burner adalah menciptakan ruang tertutup untuk udara sehingga tekanannya lebih stabil dan temperaturnya lebih naik. Udara yang disupply kedalam burner sedemikian hingga diakumulasi di dalam ruang tertutup sehingga ketika keluar melalui nozle akan mempunyai tekanan yang relatif stabil meski supply nya relatif kecil. Dengan menahan udara didalam ruang tertutup yang ditempatkan didalam ruang bakar kiln yang mempunyai temperatur diantara 600 C – 1200 C akan

membuat temperatur udara dalam tube menjadi naik. Udara dengan temperatur tinggi akan mempermudah terjadinya pembakaran ketika bercampur dengan bahan bakar dan pemantik.

*Key Succes* dari desain tube pada burner adalah panjang dari bushing/tube dan diameter lubang untuk pendingin blockburner diluarnya. Dibandingkan dengan burner existing maka burner tube tidak berbeda secara opsional. Posisinya didalam ruang bakar kiln tetap sama dan operasionalnya dikendalikan secara otomatis dimana jumlah supply gas didasarkan pada temperatur pembacaan temperatur dengan *setting* tempertur yang diinginkan. ( Team Peneliti dan Penulis PT EFG, 2022)

### Prinsip Kerja Burner Tube / Bushing

Burner tube bekerja dengan menggunakan campuran bahan bakar udara dan gas metana ( $CH_4$ ). Udara didapat dari supply combustion blower fan yang berfungsi untuk memberi supply udara pada setiap burner dengan tekanan 100 – 200 mbar dan temperatur 80 – 120 °C. Udara disupply pada tiap burner dengan tekanan yang diturunkan pada jangkauan 20 – 160 mmwc (*milimeter water coloum*) melalui *aluminium flexible pipe* yang terpasang pada badan burner – (*konversi 1 mbar = 10 mmwc*). Gas metana disupply pada tiap burner secara automatic sesuai dengan setting temperatur yang dikehendaki. Kualitas lidah api yang dihasilkan akan sangat dipengaruhi oleh perbandingan tekanan udara dan gas yang disupply pada *burner*.



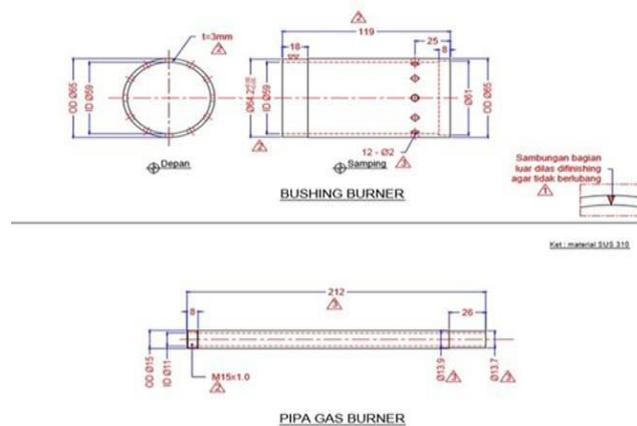
Gambar 6. Arsitektur Burner Tube (Sumber : PT EFG - 2022)

Pada *burner tube* udara yang disupply akan lebih distimulasi temperatur dan tekanannya sehingga temperatur akan lebih tinggi dan tekanan lebih stabil. Demikian pula posisi pipa gas yang diperpanjang dalam media yang lebih tinggi temperturnya membuat temperatur dari gas akan lebih tinggi. Campuran dari bahan bakar yang mempunyai temperatur lebih tinggi akan membuatnya lebih mudah terbakar.

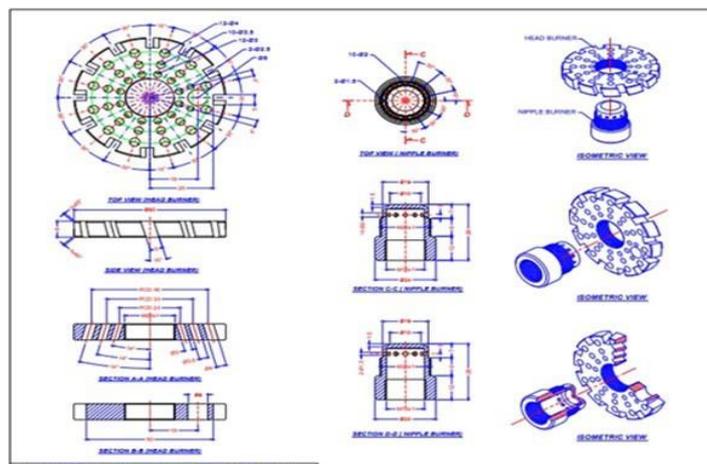
*Triger* (pemicu) dari proses pembakaran dilakukan oleh *spark* (busi) yang terpasang tepat diujung *nozle*. *Nozle* adalah perangkat yang berfungsi untuk membuat turbulensi campuran udara dan gas. Campuran gas dan udara yang keluar dari lobang nozle akan dipercik dengan api yang dihasilkan oleh busi bertegangan 5000 Volt yang akan bekerja selama 5 detik per menitnya.

Api yang dihasilkan oleh burner selanjutnya akan diarahkan lidahnya oleh *block burner* yang berbahan *silicon carbide* dan berstruktur seperti laras. Lidah api perlu diarahkan agar tidak berinteraksi secara langsung dengan produk keramik tetapi akan didistribusi keseluruhan ruang pembakaran sehingga tercapai distribusi panas yang homogen selebar luas ruang bakar *kiln*.

Desain dari *burner tube* pada prinsipnya adalah mencari titik optimum dari fungsi stimulasi temperatur dan kestabilan tekanan udara dengan tidak mengurangi fungsi blockburner sebagai pengarah lidah api yang dihasilkan oleh burner. ( Team Peneliti dan Penulis PT EFG - 2022)



Gambar 7. *Bushing burner tube* (Sumber PT EFG - Engineering Dept, 2022)



Gambar 8. *Nozle burner* (Sumber PT EFG, 2022)



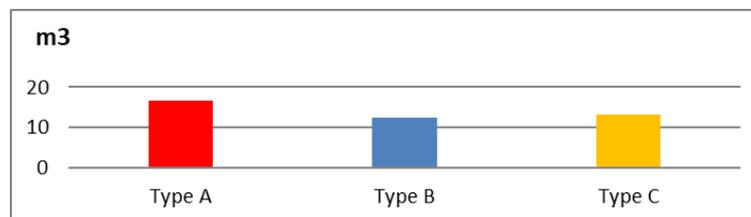
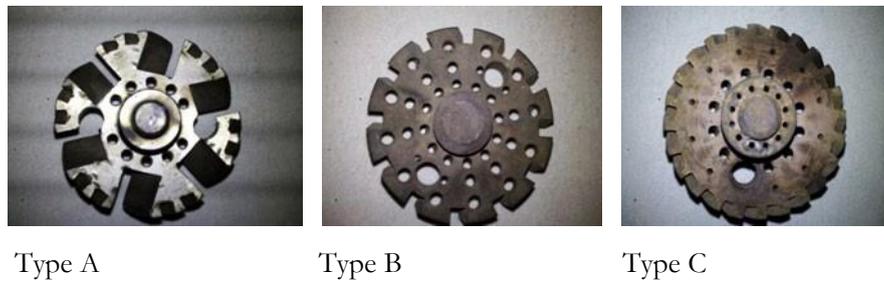
Gambar 9. perspektif burner tube (Sumber : PT EFG-Kiln Dept, 2022)

### Penentuan Disain *Burner Tube*

Keseluruhan pemilihan desain modifikasi *burner* meliputi dimensi panjang *tube* dan pemilihan desain *nozle* ditentukan berdasarkan percobaan. Untuk penentuan *nozle* dipilih berdasarkan jenis *nozle* yang ada pada seluruh *nozle burner* yang dipakai pada lingkup perusahaan. Sementara untuk disain panjang tube dilakukan uji coba dengan beberapa macam panjang tube yaitu panjang (L) 40 mm, 80 mm, 120 mm dan 160 mm. Percobaan dilakukan pada lingkup laboratorium dengan melakukan 12 kali percobaan untuk masing-masing jenis *nozle* dan 4 macam *tube* dengan panjang berbeda.

Hasil percobaan menunjukkan bahwa *nozzle type B* menunjukkan performa paling unggul berdasarkan volume bahan bakar yang dikonsumsi selama 30 menit pada *opening valve 50%*.

Sementara jenis tube dengan panjang 120 mm menunjukkan unjuk kerja yang terbaik dilihat dari panjang flame api nya pada opening valve 50%.



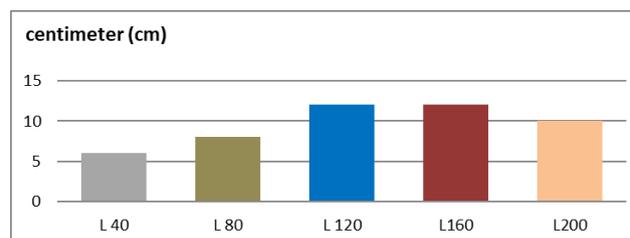
Gambar 10. perbandingan unjuk kerja nozzle (Sumber : PT EFG-Kiln Dept, 2022)

Tabel 2. Hasil Test Nozle

No	Jenis Burner	Konsumsi Gas (m3)
1	Type A	16.7
2	Type B	12.5
3	Type C	13.2

(Sumber : PT EFG-Kiln Dept, 2022)

Sementara Hasil test untuk menentukan panjang tube yang akan digunakan pada desain burner adalah sebagai berikut :



Gambar 11. Grafik hasil test panjang flame vs panjang tube (Sumber : PT EFG-Kiln Dept, 2022)

Tabel 3. Perbandingan Panjang Tube dengan Panjang Flame

No	Panjang Tube ( mm )	Panjang Flame ( cm )
1	40	6
2	80	8
3	120	12
4	160	12
5	200	10

Tabel 3 menunjukkan bahwa panjang tube 120 mm dan 160 mm sama-sama mempunyai unjuk kerja yang paling tinggi dari panjang flame (lidah api) yang dihasilkan. Pemilihan disain tube dengan panjang 120 mm dilakukan dengan pertimbangan biaya investasi yang diperlukan lebih rendah daripada memilih disain tube dengan panjang 160 mm.

### Penghematan Energi Gas

Pembakaran yang efisien didapatkan bila terdapat perbandingan berat bahan bakar dan udara yang optimal sesuai perbandingan optimal stokhiometrinya. Pada burner semakin besar udara yang disupply akan mengakibatkan supply gas yang dibutuhkan untuk menghasilkan api dengan flame yang dibutuhkan juga besar berbanding lurus dengan besarnya udara.

Untuk itu diupayakan untuk mendapatkan supply udara yang seminimal mungkin untuk bisa menghasilkan pembakaran didalam burner, sehingga diharapkan volume gas yang disupply juga sekecil-kecilnya. Untuk mendapatkan udara kecil yang mampu menghasilkan pembakaran didesain ulang burner PL7 yang existing dipakai menjadi Burner Tube. Prinsip dari re desain adalah menaikkan temperatur udara didalam burner sebelum bercampur dengan gas dan memperbesar tekanan pada udara didalam burner.

Variable yang diperhatikan pada desain adalah : Panjang selongsong (L), Diameter lubang (d) selongsong, Tekanan Udara burner (Pu.b) dan Volume Gas (Pg)

Secara matematis  $f(L, d) \rightarrow P_{u.b}$   
 $f(P_{u.b}) \rightarrow V_g$

Volume Gas mempengaruhi secara langsung Cost Energy Gas (Cost.g) pada mesin Kiln

$f(V_g) \rightarrow \text{Cost.g}$  (Team Peneliti dan Penulis PT EFG, 2022)

### Penghematan Energi Listrik

Tekanan Chamber (ruang bakar) Kiln disyaratkan sebesar 0,2 – 0,5 mmH<sub>2</sub>O. Tekanan chamber ini dikontrol oleh :

1. Tekanan udara dalam burner (P<sub>ub</sub>) yang disupply oleh :
2. Motor combustion blower (P<sub>c.f</sub>) (30Kw)
3. Tekanan Smoke fan (P<sub>sf</sub>) (motor electr 37 Kw)
4. Tekanan Hot fan (P<sub>hf</sub>) (motor electr 37 Kw)

Hubungan antar variabel dapat dinyatakan sebagai berikut

$f(P_{ub}) \rightarrow (P_{sf}, P_{hf}, P_{cf})$

Dengan turunnya tekanan udara burner maka konsumsi daya motor combustion fan, motor smoke fan dan combustion fan akan turun. Variabel (P<sub>sf</sub>), (P<sub>hf</sub>) dan (P<sub>cf</sub>) akan mempengaruhi secara langsung Cost Energy Electricity (Cost.el) pada mesin Kiln

$f(P_{sf}, P_{hf}, P_{cf}) \rightarrow \text{Cost.el}$  (Team Peneliti dan Penulis PT EFG, 2022)

## METODOLOGI

Alasan utama yang mendasari pemilihan objek ini adalah

1. Mesin Kiln merupakan salah satu mesin dalam proses produksi keramik yang menggunakan 51% dari total pengguna energi gas pada industri ini, sehingga amatlah setrategis jika perusahaan berusaha meningkatkan efisiensi konsumsi energi kiln dengan berbagai *improvement*.

2. Mesin Kiln ini memiliki karakteristik penggunaan energi yang berbeda dibandingkan dengan mesin berbasis energi gas yang lainya diantaranya bahwa penggunaan energi tidak berbanding lurus dengan jumlah produk yang dihasilkan. Maka cukup mendesak kiranya bagi perusahaan untuk bisa membuat langkah-langkah penghematan sehingga bisa menurunkan biaya energi sebagai salah satu komponen biaya produksi yang terus naik harganya. Pendekatan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif, karena penelitian ini disajikan dengan angka- angka.

#### Variabel Operasional Penelitian :

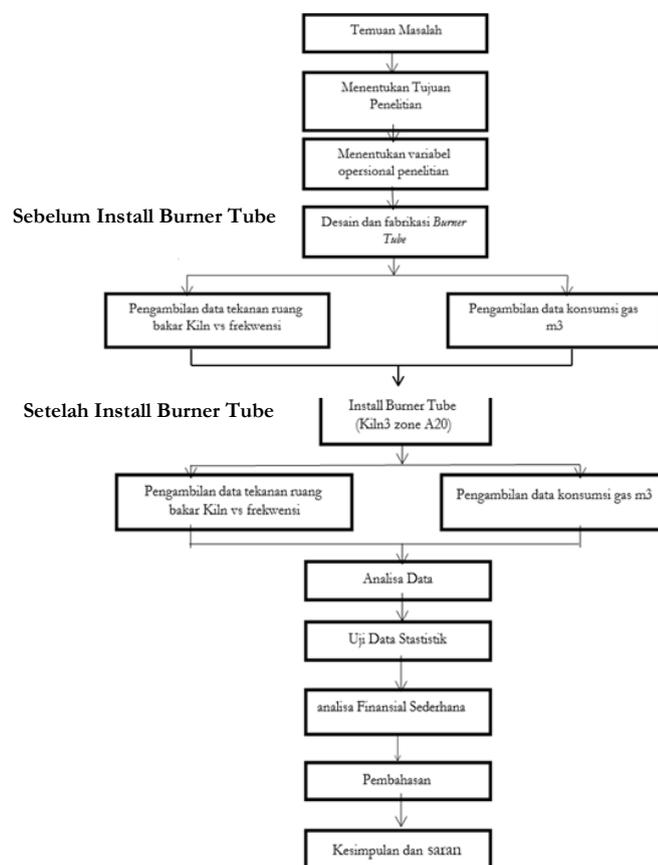
Tabel 4. Variabel Operasional

Variabel	Definisi	Indikator
Energi Gas Gjoule / Ton	Jumlah energi gas yang dibutuhkan untuk mem proses produk keramik lantai seberat 1 ton.	Volume gas (m <sup>3</sup> ) Jumlah produksi (m <sup>2</sup> ) Berat produk (Kg) Kaloritas Gas (Kcal/m <sup>3</sup> )
Energi Listrik Gjoule / Ton	Jumlah energi Listrik yang dibutuhkan untuk memproses produk kera mik lantai seberat 1 ton.	Daya listrik ( Kwh) Jumlah produksi (m <sup>2</sup> ) Berat produk (Kg)

Sumber : Peneliti, 2022

#### Langkah-langkah Penelitian

Tahapan – tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini diterangkan pada Gambar 3.1 dibawah ini :



Gambar 12. Desain Penelitian  
 Sumber : Peneliti, 2022

### Data Primer

Pada penelitian ini data primer adalah data volume gas yang dikonsumsi dalam m<sup>3</sup> (meter kubik) dan jumlah produk diproses dalam m<sup>2</sup> (meter persegi) yang diambil dari pengukuran dengan menggunakan *flowmeter* dan penghitungan visual. Pengukuran dilakukan pada dua keadaan berbeda yaitu pada saat masih menggunakan burner yang terpasang *burner existing* dan burner hasil modifikasi *burner tube*.

Pengambilan data pertama kali dilakukan pada satu zone pembakaran Kiln yaitu di zone A20. Dua kondisi berbeda akan dibandingkan, kondisi saat pembakaran masih menggunakan *burner existing* dan pada saat menggunakan *burner tube*. Mula-mula dilakukan penghitungan konsumsi gas pada zone pembakaran ini selama 10 menit dengan menggunakan *individual flowmeter*. Disamping data konsumsi gas maka juga diambil data jumlah produk yang masuk dengan penghitungan visual. Dari pengambilan data akan didapat berapa konsumsi gas dalam satuan m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (meter kubik per meter persegi), ini menggambarkan berapa konsumsi gas yang diperlukan oleh 1 m<sup>2</sup> produk pada zone A20 pada saat menggunakan *burner existing* dan saat menggunakan *burner tube*.

### Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari laporan tahunan konsumsi energi kiln tahun 2019, 2020 dan 2021 manajemen PT EFG. Pada data akan diketahui secara umum konsumsi energi kiln dalam satuan Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (Normal meter kubik per meter persegi) pada saat menggunakan *burner existing* dan setelah mengaplikasikan *burner tube*.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini ditentukan lokasi yang akan digunakan untuk sample pengukuran adalah di Kiln no3 zone A20 dengan setting temperatur 1100 C. Pengukuran dilakukan sebanyak 30 kali dengan durasi 10 menit untuk setiap pengukuran. Durasi 10 menit dipilih guna mendapatkan kondisi yang tidak banyak dipengaruhi oleh variabel kekosongan kiln terhadap *supply* material dan parameter tekanan dan temperatur gas yang mempengaruhi volume yang dikonsumsi. Untuk mendapatkan pengaruh yang sama dari temperatur dan tekanan gas maka pengukuran tiap periode dilakukan pada jam yang sama untuk setiap 30 hari pengambilan data yaitu pada jam 10.00 pagi.

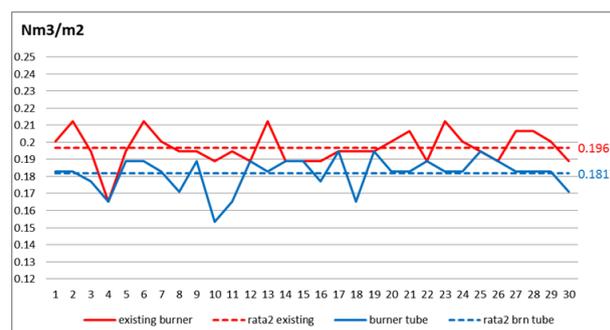
Pertama dilakukan pengukuran dengan menggunakan *burner existing* yang terpasang pada kiln. Setelah data konsumsi gas dan jumlah produk didapat maka berikutnya adalah mengganti jenis *burner existing* dengan *burner tube* pada zone A20 Kiln . Hasil Pengukuran konsumsi gas untuk ke dua type burner ini terangkum dalam Tabel 5 dan Gambar 12.

Tabel 5. Data konsumsi gas pada zone A20 – Kiln3

Burner existing					Burner Tube				
Periode	m <sup>3</sup>	Nm <sup>3</sup>	m <sup>2</sup>	Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	Periode	m <sup>3</sup>	Nm <sup>3</sup>	m <sup>2</sup>	Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
1	3.4	10.83	54	0.2006	1	3.1	9.88	54	0.1829
2	3.6	11.47	54	0.2124	2	3.1	9.88	54	0.1829
3	3.3	10.51	54	0.1947	3	3	9.56	54	0.177
4	2.8	8.92	54	0.1652	4	2.8	8.92	54	0.1652
5	3.3	10.51	54	0.1947	5	3.2	10.2	54	0.1888
6	3.6	11.47	54	0.2124	6	3.2	10.2	54	0.1888
7	3.4	10.83	54	0.2006	7	3.1	9.88	54	0.1829
8	3.3	10.51	54	0.1947	8	2.9	9.24	54	0.1711
9	3.3	10.51	54	0.1947	9	3.2	10.2	54	0.1888

10	3.2	10.2	54	0.1888	10	2.6	8.28	54	0.1534
11	3.3	10.51	54	0.1947	11	2.8	8.92	54	0.1652
12	3.2	10.2	54	0.1888	12	3.2	10.2	54	0.1888
13	3.6	11.47	54	0.2124	13	3.1	9.88	54	0.1829
14	3.2	10.2	54	0.1888	14	3.2	10.2	54	0.1888
15	3.2	10.2	54	0.1888	15	3.2	10.2	54	0.1888
16	3.2	10.2	54	0.1888	16	3	9.56	54	0.177
17	3.3	10.51	54	0.1947	17	3.3	10.51	54	0.1947
18	3.3	10.51	54	0.1947	18	2.8	8.92	54	0.1652
19	3.3	10.51	54	0.1947	19	3.3	10.51	54	0.1947
20	3.4	10.83	54	0.2006	20	3.1	9.88	54	0.1829
21	3.5	11.15	54	0.2065	21	3.1	9.88	54	0.1829
22	3.2	10.2	54	0.1888	22	3.2	10.2	54	0.1888
23	3.6	11.47	54	0.2124	23	3.1	9.88	54	0.1829
24	3.4	10.83	54	0.2006	24	3.1	9.88	54	0.1829
25	3.3	10.51	54	0.1947	25	3.3	10.51	54	0.1947
26	3.2	10.2	54	0.1888	26	3.2	10.2	54	0.1888
27	3.5	11.15	54	0.2065	27	3.1	9.88	54	0.1829
28	3.5	11.15	54	0.2065	28	3.1	9.88	54	0.1829
29	3.4	10.83	54	0.2006	29	3.1	9.88	54	0.1829
30	3.2	10.2	54	0.1888	30	2.9	9.24	54	0.1711
rata - rata				0.1966	rata – rata				0.1817

Sumber : Data primer, 2022



Gambar 13. Konsumsi Gas per m2 zone A20 Sumber : Data diolah, 2022

Gambar 13 memperlihatkan *trend* konsumsi gas pada zone A20 yang menggunakan *burner existing* dan bagaimana *performance burner* dilihat dari konsumsi bahan bakar pada temperatur yang sama menggunakan *burner tube*. Kondisi operasional pada saat pengambilan data dari kedua *type burner* berada pada keadaan yang sama. Dari grafik terlihat bahwa dalam 30 kali pengambilan sampel pengukuran menunjukkan kecenderungan konsisten bahwa terdapat penurunan konsumsi ketika zone A20 menggunakan *burner tube*. Berdasarkan kedua data diatas dapat diamati bahwa penggunaan *burner tube* pada zone A20 kiln3 mampu mengurangi konsumsi sebanyak 7.6 % per meter persegi produk yang dibakar pada zone tersebut yaitu sebesar 0.015 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.

### Pengukuran Konsumsi Gas Skala Satu Mesin Kiln

Berdasarkan percobaan tahap awal diatas yang menunjukkan adanya penurunan konsumsi energi gas pada saat *burner tube* diaplikasikan pada zone A20, penelitian dilanjutkan ketahap berikutnya yaitu untuk melakukan percobaan penggantian seluruh *burner existing* yang terpakai pada mesin kiln dengan *burner tube* berarti sebanyak 12 zone pembakaran yang terdiri dari 120 unit *burner existing* diganti menggunakan *burner tube*. Maka sebelum dilakukan instalasi *burner tube* untuk seluruh zone kiln no 3 terlebih dahulu dilakukan pengukuran konsumsi gas untuk kiln no 3 dalam durasi 10 menit dengan pengambilan sample selama 30 kali dalam 30 hari. Kemudian dilanjutkan dengan melakukan pengukuran terhadap konsumsi gas kiln no 3 setelah seluruh *burner tube* terpasang.

Pada zone A20 konsumsi kondisi tekanan *chamber* bertekanan positif artinya tidak ada infiltrasi udara dingin yang mempengaruhi konsumsi gas. Sementara pada pengukuran di seluruh *chamber* kiln ada zone pembakaran yang tekanannya negatif sehingga dimungkinkan adanya perbedaan besaran konsumsi gas rata-rata dari dua sample pengukuran ini.

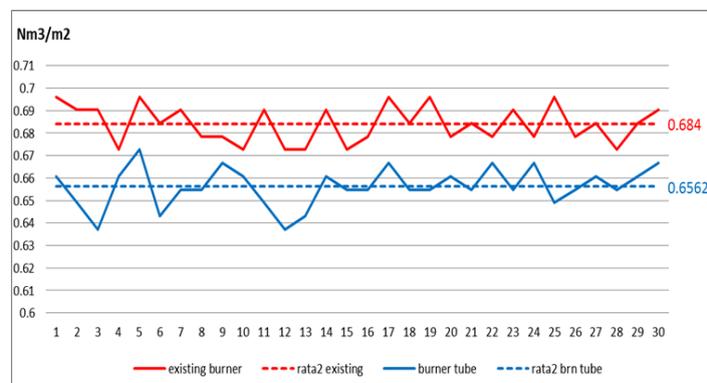
Hasil pengukuran konsumsi gas per meter persegi kiln dengan menggunakan ke dua jenis burner diatas terangkum dalam Tabel 6 dan Gambar 14.

Tabel 6. Konsumsi Gas Kiln (zone lengkap)

Burner Existing					Burner Tube				
Periode	m3	Nm3	m2	Nm3/m2	Periode	m3	Nm3	m2	Nm3/m2
1	11.8	37.59	54	0.6962	1	11.2	35.68	54	0.6608
2	11.7	37.28	54	0.6903	2	11	35.05	54	0.649
3	11.7	37.28	54	0.6903	3	10.8	34.41	54	0.6372
4	11.4	36.32	54	0.6726	4	11.2	35.68	54	0.6608
5	11.8	37.59	54	0.6962	5	11.4	36.32	54	0.6726
6	11.6	36.96	54	0.6844	6	10.9	34.73	54	0.6431
7	11.7	37.28	54	0.6903	7	11.1	35.36	54	0.6549
8	11.5	36.64	54	0.6785	8	11.1	35.36	54	0.6549
9	11.5	36.64	54	0.6785	9	11.3	36	54	0.6667
10	11.4	36.32	54	0.6726	10	11.2	35.68	54	0.6608
11	11.7	37.28	54	0.6903	11	11	35.05	54	0.649
12	11.4	36.32	54	0.6726	12	10.8	34.41	54	0.6372
13	11.4	36.32	54	0.6726	13	10.9	34.73	54	0.6431
14	11.7	37.28	54	0.6903	14	11.2	35.68	54	0.6608
15	11.4	36.32	54	0.6726	15	11.1	35.36	54	0.6549
16	11.5	36.64	54	0.6785	16	11.1	35.36	54	0.6549
17	11.8	37.59	54	0.6962	17	11.3	36	54	0.6667
18	11.6	36.96	54	0.6844	18	11.1	35.36	54	0.6549
19	11.8	37.59	54	0.6962	19	11.1	35.36	54	0.6549
20	11.5	36.64	54	0.6785	20	11.2	35.68	54	0.6608
21	11.6	36.96	54	0.6844	21	11.1	35.36	54	0.6549
22	11.5	36.64	54	0.6785	22	11.3	36	54	0.6667

23	11.7	37.28	54	0.6903	23	11.1	35.36	54	0.6549
24	11.5	36.64	54	0.6785	24	11.3	36	54	0.6667
25	11.8	37.59	54	0.6962	25	11	35.05	54	0.649
26	11.5	36.64	54	0.6785	26	11.1	35.36	54	0.6549
27	11.6	36.96	54	0.6844	27	11.2	35.68	54	0.6608
28	11.4	36.32	54	0.6726	28	11.1	35.36	54	0.6549
29	11.6	36.96	54	0.6844	29	11.2	35.68	54	0.6608
30	11.7	37.28	54	0.6903	30	11.3	36	54	0.6667
rata-rata				0.6840	rata-rata				0.6562

Sumber : Data primer, 2022



Gambar 14. Konsumsi Gas pada keseluruhan zone Kiln3 Sumber : Data diolah, 2022

Dua data diatas menunjukkan bahwa terjadi penurunan konsumsi gas per meter persegi produk dari 0.684 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> rata-rata selama 30 hari ketika kiln3 menggunakan burner existing menjadi 0.6562 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> ketika kiln3 diubah mengganti burner tube. Terdapat penurunan konsumsi energi gas sebesar 4.15% atau sebesar 0.028 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Sehingga penghematan energi gas pada Kiln adalah

$$\begin{aligned}
 \text{Kcal/Kg} &= \frac{\text{Nm}^3}{\text{m}^2} \times \frac{\text{Kaloritas Gas Kcal / Nm}^3}{\text{Berat material (Kg)/ m}^2} \\
 &= 0.028 \text{ Nm}^3/\text{m}^2 \times \frac{8,987 \text{ kcal / Nm}^3}{16.1 \text{ kg/m}^2} \\
 &= 15.629 \text{ Kcal/Kg}
 \end{aligned}$$

Nilai ini setara dengan

$$\begin{aligned}
 &= 15.629 \times 4.184 \cdot 10^{-3} \text{ Gjoule/Ton.} \\
 &= 0.0654 \text{ Gjoule/Ton.}
 \end{aligned}$$

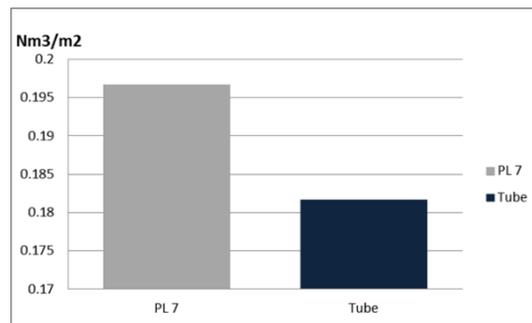
### Penghematan Energi Gas

Data yang diperoleh dari penelitian dilapangan menunjukkan adanya penghematan pemakaian energi gas ketika Kiln no 3 beralih menggunakan burner tube. Tabel 6 dan Gambar 13 memperlihatkan data konsumsi gas pada zone pembakaran A20 sebelum menggunakan burner tube dan setelah aplikasi burner tube.

Rata-rata konsumsi gas pada zone A20 dalam pengambilan sampel selama 30 hari adalah :

1. Burner existing ( sebelum aplikasi burner tube ) = 0.1967 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>
2. Burner Tube = 0.1817 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>
3. Data diatas menunjukkan adanya penghematan konsumsi gas sebesar 7.6 %. Jadi untuk setiap meter persegi terjadi penghematan konsumsi gas sebesar 0.015 Nm<sup>3</sup>.

Pemakaian burner tube pada zone pembakaran A20 memungkinkan terjadinya penghematan konsumsi gas untuk setiap 1 m<sup>2</sup> produk yang diproses pada zone A20 tersebut sebesar 7.6% dari sebelumnya.



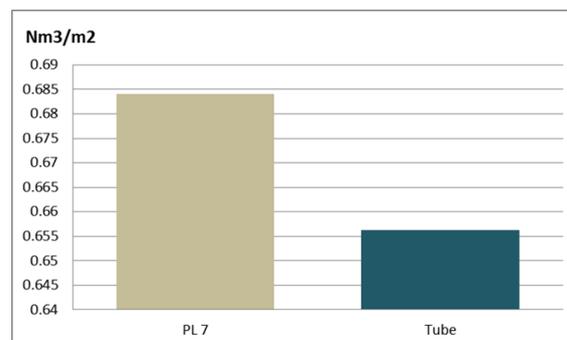
Gambar 15. Konsumsi Gas zone A20 dengan 2 burner yang berbeda Sumber : Data diolah, 2022

Berdasarkan hasil test skala 1 zone pembakaran tersebut dimana diketahui adanya penghematan konsumsi gas, selanjutnya dilakukan test skala 1 kiln penggunaan burner type tube. Tabel 6 dan Gambar 14 memperlihatkan perbandingan konsumsi gas kiln pada saat menggunakan burner existing dan burner tube. Rata-rata konsumsi gas pada kiln dalam pengambilan sampel selama 30 hari adalah :

1. Burner existing ( sebelum aplikasi burner tube ) = 0.6840 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>
2. Burner Tube = 0.6562 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>

Perbandingan pengukuran konsumsi gas dengan penggunaan burner existing dan burner tube menunjukkan adanya penghematan sebesar 4.15% konsumsi gas dalam Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Artinya setiap m<sup>2</sup> produk yang diproses dalam kiln terdapat penghematan sebesar 4.15% senilai dengan 0.028 Nm<sup>3</sup>.

Pada pengukuran skala satu mesin Kiln penghematan energi gas lebih kecil dibanding ketika pengukuran skala 1 zone di A20 saja. Hal ini bisa dijelaskan bahwa pada percobaan skala satu zone pengukuran dilakukan pada zone firing dimana tekanan ruang bakar adalah positif yang berarti dalam usaha mencapai temperatur sett point burner relatif tidak memerlukan volume lebih besar. Berbeda dengan pada percobaan skala 1 kiln dimana tidak hanya zone firing yang dilakukan pengukuran tetapi termasuk zone preheating yang memiliki tekanan ruang bakar negatif. Untuk zone dimana tekanan ruang bakarnya negatif diperlukan volume gas yang lebih besar untuk mencapai temperatur yang diinginkan sehingga hal ini berpengaruh pada nilai efisiensi yang dapat dicapai.



Gambar 16. Perbedaan konsumsi gas Kiln3 dengan 2 burner berbeda Sumber : Data diolah, 2022

### Pengukuran Energi Listrik *Motor Smoke Fan*

Sesuai standard pengoperasian mesin kiln, tekanan ruang bakar kiln mempunyai standard operasional sebesar 0.2 – 0.5 mmWc (milimeter watercoloum) pada posisi zone firing. Dengan turunnya tekanan udara yang keluar menuju ruang bakar kiln pada tiap burner meyebabkan tekanan ruang bakar menjadi turun.

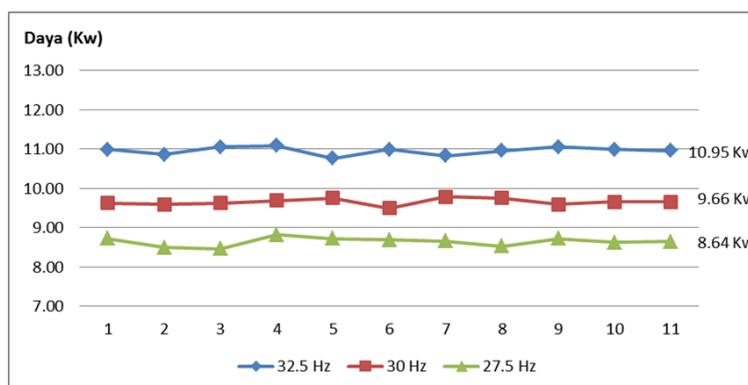
Untuk mempertahankan agar tekanan ruang bakar tetap sesuai standard maka perlu dilakukan perubahan parameter pada motor *Smoke Air Fan* . Untuk mengimbangi turunnya tekanan udara combustion pada tiap burner dan untuk mempertahankan tekanan ruang bakar agar tetap sesuai standard maka putaran atau Rpm (*radiant per minute* ) motor smoke air fan perlu diturunkan.

Penurunan Rpm motor dilakukan dengan menurunkan frekwensi dari tegangan motor. Penurunan frekwensi ini mempengaruhi nilai dari arus listrik yang digunakan oleh motor. Berikut adalah data dari setup beberapa nilai frekwensi ( f ) yang mempunyai korelasi dengan arus listrik ( A ).

Tabel 7. Pengukuran Arus Listrik dan penghitungan Daya Listrik Motor

Sampel	Arus Listrik pada motor (A)			Daya Listrik pada motor(Kw)		
	32.5 Hz	30 Hz	27.5 Hz	32.5 Hz	30 Hz	27.5 Hz
1	34	29.8	27	10.98	9.63	8.72
2	33.6	29.7	26.3	10.85	9.59	8.49
3	34.2	29.8	26.2	11.05	9.63	8.46
4	34.3	30	27.3	11.08	9.69	8.82
5	33.3	30.2	27	10.76	9.75	8.72
6	34	29.4	26.9	10.98	9.50	8.69
7	33.5	30.3	26.8	10.82	9.79	8.66
8	33.9	30.2	26.4	10.95	9.75	8.53
9	34.2	29.7	27	11.05	9.59	8.72
10	34	29.9	26.7	10.98	9.66	8.62
<b>rata-rata</b>	<b>33.90</b>	<b>29.90</b>	<b>26.76</b>	<b>10.95</b>	<b>9.66</b>	<b>8.64</b>

Sumber : Data primer, 2022



Gambar 17. Daya Motor pada frekwensi 32.5 Hz , 30 Hz dan 27.5 Hz Sumber : Data diolah, 2022

Frekwensi tegangan awal motor ketika masih menggunakan burner existing adalah 32.5 Hz dan tekanan ruang bakar pada zone A19 ( zone firing ) adalah + 0.3 mmWc. Setelah burner tube di instalasi pada seluruh zone di kiln tekanan udara pada burner zone preheating yaitu dimulai dari zone A10 hingga A18 diturunkan dari 60 mmWc menjadi 30 mmWc dan tekanan udara di zone firing dari 90 mmWc diturunkan menjadi 70 mmWc. Hal ini menyebabkan tekanan ruang bakar pada zone A19 turun menjadi – 0.1 mmWc.

Untuk mengembalikan tekanan ruang bakar tersebut pada angka + 0.3 mmWc maka *suction pressure* dari

motor smoke fan harus diturunkan. Penurunan suction pressure dilakukan dengan mengurangi *set point* parameter frekwensi tegangan pada inverter yang akan menurunkan putaran (Rpm) dari motor. Sebelum instalasi burner tube, frekwensi dari tegangan listrik motor adalah 32.5 Hertz (Hz), kemudian setelah instalasi, untuk mendapatkan tekanan sesuai standard operasional mesin kiln *set point* frekwensi pada inverter diturunkan menjadi 30 Hz dan tekanan ruang bakar menjadi +0.1 mmWc. Sehingga perlu dilakukan penyesuaian lagi dengan me reset frekwensi motor pada inverter kembali. Tekanan ruang bakar + 0.3 mmWc dicapai pada frekwensi 27.5 Hz.

**Tabel 8. Tekanan ruang bakar kiln vs frekwensi tegangan motor**

Frekwensi (Hz)	Tekanan ruang bakar (mmWc)	Daya Listrik ( Kw )
32.5	-0.1	10.95
30	0.1	9.66
27.5	0.3	8.64

Sumber : Data diolah, 2022

Penurunan nilai parameter frekwensi tegangan motor menyebabkan nilai arus listrik yang bekerja pada motor smoke fan turun. Turunnya arus listrik yang bekerja pada motor menyebabkan daya listrik yang diperlukan untuk mengoperasikannya mengalami penurunan juga.

Data arus listrik yang bekerja pada motor didapat dari pengukuran dengan alat ukur Avometer, dan nilai daya listrik yang bekerja didapat dari perhitungan matematis.

Tabel 8 dan Gambar 15 menunjukkan bahwa terjadi penghematan daya listrik yang digunakan oleh motor smoke fan dari rata-rata 10.95 Kw sebelum dilakukan instalasi burner tube menjadi 8.64 Kw. Penurunan daya sebesar :

$$2.31 \text{ Kw atau sebesar } 21\%.$$

Pengambilan data dilakukan dalam rentang waktu 10 menit tiap sample sehingga Kwh yang didapat adalah sebesar :

$$2.31 \text{ Kw} \times (10/60) \text{ hr} = 0.385 \text{ Kwh}.$$

Jumlah produk yang diproses dalam rentang waktu sampling adalah 54 m<sup>2</sup>. Sehingga penghematan energi listrik tiap m<sup>2</sup> produk adalah sebesar :

$$0.385 \text{ Kwh} / 54 \text{ m}^2 = 7.1 \times 10^{-3} \text{ Kwh/m}^2.$$

Selama rentang pengambilan data jumlah material yang diproduksi adalah sebanyak 54 m<sup>2</sup>. Jika berat material per m<sup>2</sup> adalah = 15.9 kg , maka penghematan energi listrik yang pada motor smoke fan adalah sebesar :

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{7.1 \times 10^{-3} \times 3.6 \times 10^{-3}}{15.9 \times 10^{-3}} \\
 &= 1.693 \times 10^{-3} \text{ GigaJoule/Ton}
 \end{aligned}$$

### Implikasi Industri

Pada Industri Keramik penghematan konsumsi energi gas dan listrik sangat signifikan mengurangi *variabel cost* produksi karena *cost energy* mempunyai besaran 40% dari total cost yang digunakan untuk produksi keramik lantai. Oleh karena itu usaha – usaha untuk meningkatkan efisiensi energi menjadi aktivitas yang penting.

Modifikasi burner kiln merupakan salah satu aktifitas untuk menaikkan efisiensi energi gas dan listrik yang cukup penting. Kiln merupakan mesin dalam industri keramik yang mengkonsumsi 51% dari total konsumsi gas pada industri keramik lantai. Burner modifikasi yang diberi nama burner tube mampu memberikan nilai tambah berupa adanya penurunan konsumsi gas sebesar 4.15% atau 0.0654 Gjoule/ton atau terjadi penghematan volume gas sebesar 0.028 Nm<sup>3</sup> tiap 1 meter persegi keramik yang diproduksi. Jika saat ini harga energi gas adalah sebesar Rp4,200/Nm<sup>3</sup> maka setiap meter persegi keramik yang diproduksi penggunaan burner tube telah menghemat biaya produksi sebesar :

$$0.028 \text{ Nm}^3/\text{m}^2 \times \text{Rp } 4,200/\text{Nm}^3 = \text{Rp } 117.6/\text{m}^2$$

Disamping penghematan dari energi gas, aplikasi burner tube pada kiln juga memberikan manfaat penghematan pada penggunaan energi listrik pada motor smoke fan. Untuk setiap meter persegi keramik lantai yang diproduksi ada penghematan energi sebesar 7.1x10<sup>-3</sup> Kwh. Jika harga energi listrik tiap Kwh adalah sebesar Rp 1,300 maka penghematan untuk setiap meter persegi keramik yang diproduksi adalah sebesar :

$$7.1 \times 10^{-3} \text{ Kwh}/\text{m}^2 \times \text{Rp } 1300/\text{kwh} = \text{Rp } 9.23/\text{m}^2$$

Sehingga penghematan energi total dari setiap meter persegi keramik yang diproduksi adalah :

$$\text{Rp } 117.6/\text{m}^2 + \text{Rp } 9.23/\text{m}^2 = \text{Rp } 126.83 / \text{m}^2$$

### Kesimpulan

Dari hasil analisis data dan pembahasan pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Implementasi burner tube pada mesin kiln mampu menurunkan pemakaian energi gas sebesar 4.15 %.
2. Disamping menurunkan pemakaian energi gas, penggunaan burner tube juga berdampak positif pada turunya energi listrik yang digunakan pada motor smoke fan sebesar 21%.

### Daftar Rujukan

- [1] Abuelnuor, A.A.A., Hosseini S.E., & Wahid M.A. Pollutant reduction and energy saving in industrial sectors by applying high temperature air combustion method. *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E)*, 6(7), 1667-1672. 2012.
- [2] Atmawinata, A. *Gas Alam Bakal Jadi Energi Utama Industri Nasional*. Retrieved from <http://kemenperin.go.id>. March 2016
- [3] Alleman, J. Opportunities in Industrial Boiler Efficiency. *Northwest Food Processors Association*. 2010.
- [4] Biantoro, E. *Cadangan Minyak Indonesia Tinggal 3,7 Miliar Barrel*. Retrieved from <http://bisniskeuangan.kompas.com>. Jan 2016.
- [5] Cho, S.W., Kim, Y.S., Jeon, C.H., & Cang, Y.J. An experimental study on the performance optimization of a radiant burner with a surface flame structure. *Journal on Mechanical Science and Technology*, 24 (4),923-929. 2009.
- [6] Guo, H., Yan, B., Zhang, J., Liu, F., & Pei, Y. Optimization of the Number of Burner Nozzles in a Hot Blast Stove by the Way of Simulation, *Journal on The Minerals, Metals & Materials Society JOM*, 66(7), 1241-1252. 2014.
- [7] CERAMIC INDUSTRY (CI) – PPP DRYING & FIRING: Questions & Answers . Harman Jr, G.C. (August 1, 2004) .
- [8] Hassan, M.I., & Al Kindi, R. Feasibility Study of Regenerative Burners in Aluminum Holding Furnaces. *Journal on The Minerals, Metals & Materials Society*, 66(9), 1603-1611. 2014.
- [9] Putra Is, dewata., dkk. Analisa teknik evaluasi kinerja boiler type IHI FW SE Single Drum akibat kehilangan panas di PLTU PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November. 2011.
- [10] Yulita, Chartika G., dkk. Boiler Ketel Uap Pipa Api. Pekanbaru: Teknik Kimia Universitas Riau. 2010.
- [11] W. S. Winanti dan T. Prayudi, “Perhitungan Efisiensi Boiler Pada Industri Tepung Terigu,” J. Tek. Lingkungan., hal. 58–65, 2006.
- [12] N. T. Sahda, J. M. Sentosa, dan L. Adhani, “Analisis Efisiensi Boiler menggunakan Metode

- Langsung di Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Bantargebang,” *J. Eng. Environmental Energy Sci.*, vol. 1, no. 1, hal. 39–48, 2022, doi: 10.31599/joes.v1i1.979.
- [13] G. P. A. Gumelar, M. N. Dewi, A. Miftah, W. Endranaka, dan B. A. F. Eka, “Analisis Efisiensi Boiler Berbahan Bakar Gas di PT XYZ Menggunakan Metode Langsung dan Tidak Langsung,” *Technol. Renew. Energy Dev.*, vol. 2, no. 1, hal. 22–28, 2022.
- [14] D. Aprilia dan Hardjono, “Penentuan Efisiensi Boiler Dengan Menggunakan Metode Langsung Di Pt X Lumajang,” *Distilat J. Teknol. Separasi*, vol. 7, no. 2, hal. 421–426, 2021, doi: 10.33795/distilat.v7i2.237.
- [15] K. Rahmawati, “Perancangan Desain Boiler pada Mini Plant Steam Engine untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap,” *Progr. Stud. DIII Teknol. Instrumentasi Dep. Tek. Instrumentasi Fak. Vokasi Inst. Teknol. Sepuluh Nop. Surabaya*, hal. 1–96, 2018.
- [16] S. Shah dan D. M. Adhyaru, “Boiler Efficiency Analysis Using Direct Method,” *Nirma Univ. Int. Conf. Eng. Ahmedabad, India*, 2011, doi: 10.1109/NUiConE.2011.6153313.