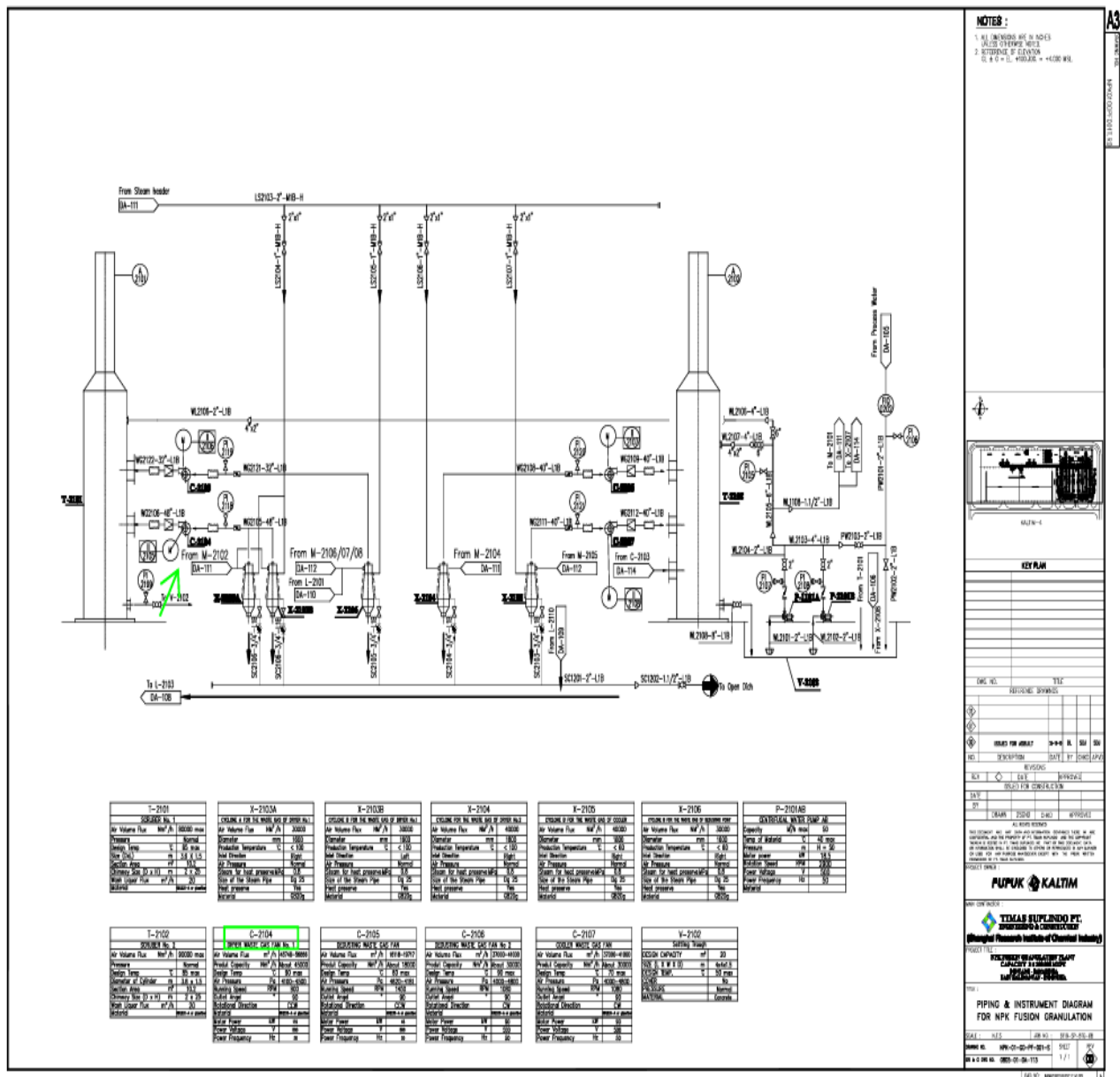
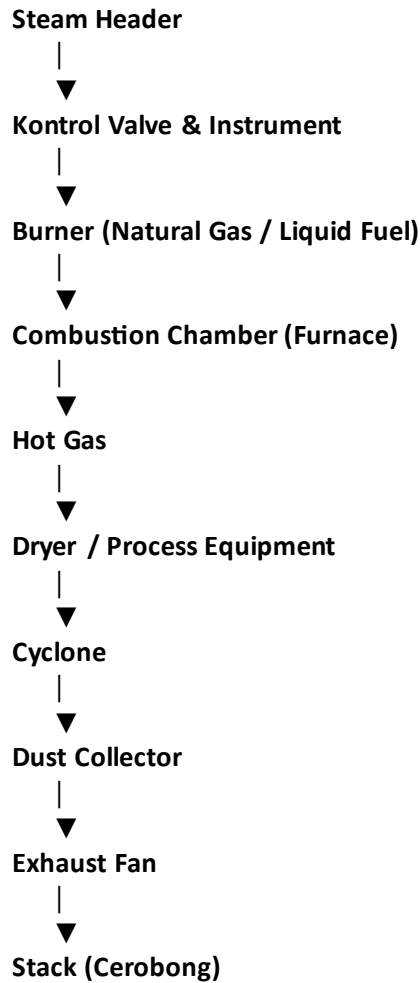


NOTES :

1. ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS UNLESS OTHERWISE NOTED.
2. REFERENCE OF STANDARD IS AS PER IS 8001-1983, EXCEPT FOR +0.00 TO +0.05 MM.



Gambaran Umum Proses Alur kerja furnace ini secara umum adalah sebagai berikut:



1. Steam Header

Fungsi

Steam Header merupakan jalur distribusi uap (steam) yang menyuplai energi panas atau tenaga pneumatik ke beberapa peralatan pada furnace. Berdasarkan P&ID, steam berasal dari **Steam Header** kemudian didistribusikan ke sistem melalui control valve dan instrumentasi.

Steam dapat digunakan untuk:

- menggerakkan control valve (bila menggunakan steam actuator),
- pemanasan awal (pre-heating),
- menjaga temperatur bahan bakar cair agar viskositasnya sesuai,
- proses atomisasi pada burner tertentu.

Prinsip Termodinamika

Energi yang dibawa steam dihitung menggunakan persamaan:

$$Q = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

dimana:

- Q = laju perpindahan panas (kW)
- $\dot{m}$ = laju aliran massa steam (kg/s)
- h_1 = entalpi steam masuk (kJ/kg)
- h_2 = entalpi steam keluar (kJ/kg)

Semakin besar debit steam maka semakin besar energi panas yang tersedia.

Persamaan Kontinuitas

Aliran steam memenuhi hukum kekekalan massa

$$\dot{m} = \rho AV$$

dengan

- ρ = densitas steam
- A = luas penampang pipa
- V = kecepatan steam

Apabila diameter pipa mengecil,

$$V_2 > V_1$$

kecepatan steam meningkat.

Penurunan Tekanan

Selama steam mengalir dalam pipa terjadi pressure loss.

Menggunakan persamaan Darcy-Weisbach

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2}$$

Semakin panjang pipa,
pressure loss semakin besar.

2. Burner F-2101

Burner merupakan jantung sistem furnace.

Burner berfungsi mencampurkan:

- bahan bakar
- udara pembakaran

sehingga menghasilkan nyala api stabil.

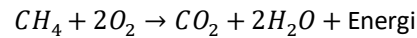
Pada diagram terlihat burner dapat menggunakan:

- Natural Gas
- Liquid Fuel

Prinsip Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi oksidasi.

Untuk natural gas (diasumsikan metana)



Energi inilah yang dipakai memanaskan dryer.

Nilai Kalor

Energi pembakaran dihitung

$$Q = \dot{m}_f \times LHV$$

dimana

- $\dot{m}_f$ = laju aliran bahan bakar (kg/s)
- LHV = Lower Heating Value

Sebagai contoh

Natural Gas

$$LHV \approx 50000 \text{ kJ/kg}$$

Jika

$$\dot{m} = 0.08 \text{ kg/s}$$

maka

$$Q = 0.08 \times 50000$$
$$Q = 4000 \text{ kW}$$

Artinya burner menghasilkan panas sekitar **4 MW**.

Efisiensi Furnace

Tidak semua energi berubah menjadi panas berguna.

Efisiensi

$$\eta = \frac{Q_{\text{berguna}}}{Q_{\text{input}}} \times 100\%$$

Misalnya

Input

4000 kW

Output

3400 kW

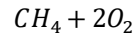
maka

$$\eta = \frac{3400}{4000} \times 100$$
$$\eta = 85\%$$

Air Fuel Ratio

Agar pembakaran sempurna diperlukan udara.

Secara teori
Untuk metana



Karena udara hanya mengandung sekitar 21% oksigen,
udara teoritis

$$17.2 \text{ kg udara/kg bahan bakar}$$

Namun operasi nyata menggunakan excess air.

Misalnya

20%

maka

$$AFR = 17.2 \times 1.2 = 20.64$$

Artinya

1 kg gas membutuhkan

20.6 kg udara.

Neraca Massa

Berlaku hukum kekekalan massa

$$\sum m_{masuk} = \sum m_{keluar}$$

Sehingga

$$m_{gas} + m_{udara} = m_{flue \text{ gas}}$$

Tidak ada massa yang hilang.

Pressure Gauge (PI)

Pressure gauge mengukur tekanan gas sebelum burner.

Tekanan dinyatakan

$$P = \frac{F}{A}$$

Misalnya

gaya

300 N

luas

0.005 m²

maka

$$P = \frac{300}{0.005} = 60000 \text{ Pa}$$

atau

60 kPa.

Tekanan harus stabil agar nyala api stabil.

Flow Control Valve

Valve mengatur debit bahan bakar.

Debit dihitung

$$Q = AV$$

Jika diameter valve dibuka lebih besar, maka luas bertambah, debit meningkat, energi pembakaran meningkat.

Persamaan Bernoulli

Ketika bahan bakar melewati valve

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = \text{konstan}$$

Jika kecepatan naik,

tekanan turun.

Karena itu setelah control valve biasanya tekanan lebih rendah dibanding sebelum valve.

Shut Off Valve

Valve ini digunakan saat

- emergency shutdown
- maintenance
- start-up
- stop operasi

Prinsipnya adalah menghentikan aliran massa

$$\dot{m} = 0$$

sehingga

reaksi pembakaran berhenti.

Temperatur Api

Temperatur nyala dapat dihitung menggunakan neraca energi

$$Q = mC_p \Delta T$$

atau

$$T_2 = T_1 + \frac{Q}{mC_p}$$

Semakin besar energi pembakaran,

temperatur furnace meningkat.

Mekanisme Perpindahan Panas

Panas dari burner berpindah ke dryer melalui tiga mekanisme:

1. Radiasi

Menggunakan hukum Stefan-Boltzmann

$$Q = \sigma \varepsilon A (T_1^4 - T_2^4)$$

Karena temperatur api sangat tinggi (900–1200°C), perpindahan panas radiasi menjadi dominan.

2. Konveksi

$$Q = hA\Delta T$$

Gas panas mengalir dan memanaskan permukaan dryer.

3. Konduksi

$$Q = kA \frac{\Delta T}{L}$$

Panas mengalir melalui dinding logam furnace menuju material di dalamnya.

Kesimpulan Analisis Fisika

Secara ilmiah, burner F-2101 bekerja berdasarkan beberapa prinsip dasar:

- **Hukum kekekalan massa**, yang memastikan massa bahan bakar dan udara sama dengan massa gas buang.
- **Hukum I Termodinamika**, yang menjelaskan konversi energi kimia bahan bakar menjadi energi panas.
- **Persamaan Bernoulli dan Darcy–Weisbach**, yang menjelaskan perubahan tekanan dan rugi-rugi aliran pada pipa serta valve.
- **Stoikiometri pembakaran**, yang menentukan kebutuhan udara agar pembakaran berlangsung sempurna.
- **Perpindahan panas** melalui radiasi, konveksi, dan konduksi untuk mentransfer energi dari nyala api ke proses pengeringan.

Dengan memahami hubungan antara debit bahan bakar, tekanan, rasio udara–bahan bakar, dan perpindahan panas, operator dapat mengoperasikan furnace secara efisien, menjaga temperatur proses tetap stabil, serta meminimalkan konsumsi bahan bakar dan emisi.

3. Combustion Air Blower (C-2101)

Fungsi

Combustion Air Blower C-2101 berfungsi menghisap udara dari atmosfer dan mengalirkannya menuju burner sebagai udara pembakaran (combustion air). Suplai udara yang cukup sangat penting untuk memperoleh pembakaran sempurna sehingga energi kimia bahan bakar dapat dikonversi menjadi energi panas secara maksimal.

Udara yang disuplai blower terdiri dari sekitar:

- $O_2 = 21 \%$
- $N_2 = 79 \%$

Oksigen merupakan komponen utama yang bereaksi dengan bahan bakar.

Prinsip Kerja

Blower bekerja dengan menaikkan tekanan udara sehingga udara dapat mengalir menuju burner.

Persamaan Bernoulli untuk aliran udara:

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gz = \text{konstan}$$

dengan:

- P = tekanan (Pa)
- ρ = densitas udara (kg/m^3)
- V = kecepatan udara (m/s)
- g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- z = elevasi (m)

Karena perubahan elevasi relatif kecil, maka kenaikan tekanan dari blower terutama digunakan untuk meningkatkan kecepatan aliran udara menuju burner.

Persamaan Kontinuitas

Debit udara yang dihasilkan blower memenuhi hukum kekekalan massa

$$\dot{m} = \rho AV$$

dimana

- $\dot{m}$ = laju aliran massa udara (kg/s)
- A = luas penampang saluran (m²)
- V = kecepatan udara (m/s)

Contoh perhitungan

Diameter duct = 0,40 m

Luas penampang

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi (0.4)^2}{4} = 0.126 \text{ m}^2$$

Jika kecepatan udara

$$V = 18 \text{ m/s}$$

dan

$$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

maka

$$\dot{m} = 1.2 \times 0.126 \times 18$$

$$\dot{m} = 2.72 \text{ kg/s}$$

Artinya blower mensuplai sekitar **2,72 kg udara setiap detik**.

Daya Blower

Energi yang dibutuhkan blower dihitung menggunakan:

$$P = \frac{Q \Delta P}{\eta}$$

dimana:

- P = daya blower (W)
- Q = debit volumetrik (m³/s)
- ΔP = kenaikan tekanan (Pa)
- η = efisiensi blower

Misalnya:

- $Q = 2.3 \text{ m}^3/\text{s}$
- $\Delta P = 3500 \text{ Pa}$
- $\eta = 0.75$

maka

$$P = \frac{2.3 \times 3500}{0.75}$$

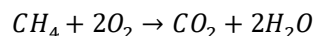
$$P = 10.73 \text{ kW}$$

Semakin besar tekanan dan debit udara, semakin besar daya motor blower yang dibutuhkan.

Hubungan dengan Pembakaran

Kebutuhan udara dihitung berdasarkan rasio udara–bahan bakar (Air Fuel Ratio).

Untuk gas metana:



Udara teoritis

$$17.2 \text{ kg udara/kg gas}$$

Jika digunakan **excess air 15%**

$$AFR = 17.2(1 + 0.15)$$

$$AFR = 19.78$$

Jadi setiap 1 kg gas membutuhkan sekitar **19,8 kg udara** agar pembakaran berlangsung sempurna.

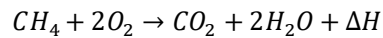
4. Furnace (F-2101)

Fungsi

Furnace F-2101 merupakan ruang pembakaran tempat terjadinya reaksi antara bahan bakar dan udara sehingga menghasilkan gas panas (hot gas) yang akan digunakan untuk proses pengeringan pupuk NPK.

Reaksi Pembakaran

Untuk Natural Gas (diasumsikan metana):



Nilai

$$\Delta H = -802 \text{ kJ/mol}$$

menunjukkan bahwa reaksi bersifat eksoterm (melepaskan panas).

Neraca Massa

Mengikuti hukum kekekalan massa:

$$\sum \dot{m}_{masuk} = \sum \dot{m}_{keluar}$$

atau

$$\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air} = \dot{m}_{flue\ gas}$$

Misalnya:

Fuel = 0,15 kg/s

Air = 2,90 kg/s

Maka

Gas buang =

$$3.05 \text{ kg/s}$$

Neraca Energi

Menurut Hukum I Termodinamika:

$$Q = \dot{m}C_p(T_2 - T_1)$$

dimana

- Q = energi panas (kW)
- C_p = panas jenis gas (kJ/kg·K)
- T_2 = temperatur keluar furnace
- T_1 = temperatur masuk

Misal

$$\dot{m} = 3.0 \text{ kg/s}$$

$$C_p = 1.05$$

$$T_1 = 30^\circ C$$

$$T_2 = 650^\circ C$$

Maka

$$Q = 3(1.05)(650 - 30)$$
$$Q = 1953 \text{ kW}$$

Artinya furnace menghasilkan energi panas sekitar **1,95 MW** yang dibawa oleh gas panas.

Efisiensi Furnace

Efisiensi termal dihitung dengan:

$$\eta = \frac{Q_{\text{berguna}}}{Q_{\text{bahan bakar}}} \times 100\%$$

Jika

Energi bahan bakar

2200 kW

Energi gas panas

1900 kW

Maka

$$\eta = \frac{1900}{2200} \times 100 = 86.4\%$$

Mekanisme Perpindahan Panas

Di dalam furnace terjadi tiga mekanisme perpindahan panas:

Radiasi

$$Q = \sigma \varepsilon A (T_1^4 - T_2^4)$$

Radiasi mendominasi karena temperatur nyala api sangat tinggi.

Konveksi

$$Q = hA(T_g - T_s)$$

Gas panas memanaskan dinding furnace dan aliran menuju dryer.

Konduksi

$$Q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L}$$

Panas mengalir melalui material logam furnace.

5. Rotary Dryer

Fungsi

Rotary Dryer merupakan alat pengering berbentuk silinder berputar yang berfungsi menurunkan kadar air pupuk NPK menggunakan gas panas dari furnace. Material bergerak sepanjang dryer akibat putaran silinder dan kemiringan alat, sehingga kontak antara gas panas dan material berlangsung secara kontinu.

Neraca Energi Dryer

Energi yang diterima material:

$$Q = \dot{m}C_p(T_2 - T_1)$$

Energi tersebut digunakan untuk:

- menaikkan temperatur material,

- menguapkan air yang terkandung di dalam pupuk.

Energi Penguapan Air

Energi pengeringan dihitung:

$$Q = \dot{m}_w h_{fg}$$

dimana

- $\dot{m}_w$ = massa air yang diuapkan (kg/s)
- h_{fg} = kalor laten penguapan air (≈ 2257 kJ/kg pada 100°C)

Misalnya

Air diuapkan

0.45 kg/s

maka

$$Q = 0.45 \times 2257$$

$$Q = 1015.7 \text{ kW}$$

Artinya sekitar **1 MW** energi panas digunakan hanya untuk menguapkan air.

Efisiensi Pengeringan

Efisiensi pengeringan dapat dihitung dengan:

$$\eta = \frac{Q_{\text{evaporasi}}}{Q_{\text{gas panas}}} \times 100\%$$

Jika

Energi gas panas

1800 kW

Energi evaporasi

1350 kW

Maka

$$\eta = 75\%$$

Keseimbangan Massa Air

Pada rotary dryer berlaku neraca massa:

$$\dot{m}_{\text{feed}} = \dot{m}_{\text{produk}} + \dot{m}_{\text{air}}$$

Sebagai contoh:

- Material masuk = 10 ton/jam
- Kadar air awal = 12%
- Kadar air akhir = 2%

Massa air awal:

$$10 \times 0.12 = 1.2 \text{ ton/jam}$$

Massa air akhir:

$$10 \times 0.02 = 0.2 \text{ ton/jam}$$

Massa air yang diuapkan:

$$1.2 - 0.2 = 1.0 \text{ ton/jam}$$

Kesimpulan

Sistem pembakaran dan pengeringan pada P&ID ini bekerja secara terintegrasi. **Blower C-2101** menyediakan udara pembakaran sesuai kebutuhan stoikiometri sehingga pembakaran di **Furnace F-2101** berlangsung stabil dan menghasilkan gas panas dengan efisiensi tinggi. Energi panas tersebut kemudian dimanfaatkan di **Rotary Dryer** untuk menaikkan temperatur material dan menguapkan kadar air pupuk NPK sesuai prinsip neraca massa dan neraca energi. Perancangan dan evaluasi ketiga peralatan ini umumnya didasarkan pada persamaan kontinuitas, Bernoulli, hukum pertama termodinamika, stoikiometri pembakaran, serta perpindahan panas secara konveksi, konduksi, dan radiasi.

6. Cyclone

Fungsi

Cyclone Separator berfungsi memisahkan partikel debu dari aliran gas panas yang keluar dari rotary dryer. Pemisahan dilakukan dengan memanfaatkan **gaya sentrifugal**, sehingga partikel yang memiliki massa jenis lebih besar daripada gas terdorong menuju dinding cyclone dan kemudian jatuh ke hopper akibat gaya gravitasi. Gas yang telah mengalami pengurangan kandungan debu keluar melalui bagian atas cyclone menuju tahap berikutnya.

Prinsip Kerja

Gas masuk secara tangensial sehingga membentuk aliran berputar (**vortex**). Ketika gas berputar, partikel mengalami gaya sentrifugal.

Gaya Sentrifugal

$$F_c = \frac{mv^2}{r}$$

dengan:

- F_c = gaya sentrifugal (N)
- m = massa partikel (kg)
- v = kecepatan tangensial (m/s)
- r = jari-jari lintasan (m)

Semakin besar kecepatan putar gas, semakin besar gaya sentrifugal sehingga efisiensi pemisahan meningkat.

Gaya Hambat (Drag Force)

Partikel juga mengalami gaya hambat akibat aliran gas.

Untuk partikel kecil (aliran Stokes):

$$F_d = 3\pi\mu d_p V$$

dimana:

- μ = viskositas gas (Pa.s)
- d_p = diameter partikel (m)
- V = kecepatan relatif gas terhadap partikel (m/s)

Pemisahan akan efektif apabila:

$$F_c > F_d$$

Diameter Potong (Cut Size)

Ukuran partikel minimum yang dapat dipisahkan dinyatakan sebagai diameter potong (**cut diameter**).

Persamaan Lapple:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi N_e \rho_p V_i}}$$

dimana:

- d_{50} = diameter partikel yang tertangkap 50%
- b = lebar inlet cyclone
- N_e = jumlah putaran efektif
- ρ_p = densitas partikel
- V_i = kecepatan masuk

Semakin kecil nilai d_{50} , semakin baik kemampuan cyclone menangkap partikel halus.

Pressure Drop Cyclone

Kerugian tekanan dihitung:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho V^2}{2}$$

dengan:

- ξ = koefisien pressure loss
- ρ = densitas gas
- V = kecepatan gas

Pressure drop biasanya berkisar **500–1500 Pa**, tergantung desain cyclone.

Efisiensi Cyclone

Efisiensi pemisahan:

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

Contoh:

Konsentrasi debu masuk

$$C_{in} = 1200 \text{ mg/Nm}^3$$

Konsentrasi keluar

$$C_{out} = 180 \text{ mg/Nm}^3$$

Maka

$$\eta = \frac{1200 - 180}{1200} \times 100 = 85\%$$

Artinya cyclone mampu menangkap sekitar **85% partikel debu**.

7. Dust Collector

Fungsi

Dust Collector berfungsi menangkap partikel halus yang masih lolos dari cyclone. Pada industri pupuk NPK umumnya digunakan **bag filter**, sehingga gas yang dilepas ke atmosfer memenuhi baku mutu emisi.

Mekanisme Filtrasi

Partikel ditangkap melalui beberapa mekanisme:

- inertial impaction,
- interception,
- diffusion,
- electrostatic attraction (bila ada).

Kecepatan Filtrasi

$$V_f = \frac{Q}{A}$$

dimana:

- V_f = filtration velocity (m/s)
- Q = debit gas (m³/s)
- A = luas total media filter (m²)

Nilai V_f yang terlalu tinggi akan meningkatkan pressure drop dan mempercepat penyumbatan filter.

Pressure Drop Bag Filter

$$\Delta P = \frac{\mu L V}{K}$$

dengan:

- μ = viskositas gas
- L = ketebalan lapisan debu
- V = kecepatan filtrasi
- K = permeabilitas media

Semakin tebal lapisan debu, semakin besar pressure drop sehingga bag filter perlu dibersihkan secara berkala menggunakan pulse jet.

Efisiensi Penyaringan

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

Misalnya:

Debu masuk

150 mg/Nm³

Debu keluar

3 mg/Nm³

$$\eta = 98\%$$

Efisiensi bag filter dapat mencapai **99–99,9%** untuk partikel halus.

8. Exhaust Fan**Fungsi**

Exhaust Fan berfungsi menghisap gas hasil pembakaran dari cyclone dan dust collector, menjaga tekanan negatif di dalam furnace, serta mendorong gas menuju stack. Tekanan negatif mencegah kebocoran gas panas keluar dari furnace dan menjaga kestabilan pembakaran.

Debit Udara

Debit volumetrik:

$$Q = AV$$

dimana:

- A = luas penampang duct (m²)
- V = kecepatan gas (m/s)

Persamaan Kontinuitas

Laju massa gas:

$$\dot{m} = \rho Q$$

Contoh:

$$\begin{aligned} Q &= 8 \text{ m}^3/\text{s} \\ \rho &= 1.05 \text{ kg/m}^3 \\ \dot{m} &= 8.4 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Daya Fan

$$P = \frac{Q \Delta P}{\eta}$$

Misalnya:

- Debit = 8 m³/s
- Pressure = 2500 Pa
- Efisiensi = 0.75

$$P = \frac{8 \times 2500}{0.75} = 26.7 \text{ kW}$$

Total Pressure Loss

Fan harus mengatasi seluruh kerugian tekanan sistem:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{duct} + \Delta P_{cyclone} + \Delta P_{bagfilter} + \Delta P_{stack}$$

Jika:

- Duct = 300 Pa
- Cyclone = 900 Pa
- Bag Filter = 1200 Pa
- Stack = 200 Pa

Maka

$$\Delta P_{total} = 2600 \text{ Pa}$$

Nilai ini menjadi dasar pemilihan kapasitas exhaust fan.

9. Stack (Cerobong)

Fungsi

Stack merupakan saluran terakhir yang mengalirkan gas buang ke atmosfer. Cerobong dirancang agar gas buang tersebar dengan baik sehingga konsentrasi polutan di permukaan tanah tetap berada di bawah baku mutu lingkungan.

Kecepatan Gas

$$V = \frac{Q}{A}$$

Jika:

Diameter stack
0.8 m

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 0.503 \text{ m}^2$$

Debit

$$Q = 7 \text{ m}^3/\text{s}$$

Maka

$$V = 13.9 \text{ m/s}$$

Kecepatan gas yang cukup diperlukan untuk mencegah aliran balik (downdraft).

Draft Cerobong

Perbedaan tekanan akibat efek cerobong dihitung:

$$\Delta P = gH(\rho_a - \rho_g)$$

dengan:

- H = tinggi cerobong (m)
- ρ_a = densitas udara luar (kg/m^3)
- ρ_g = densitas gas panas (kg/m^3)

Semakin tinggi cerobong dan semakin besar perbedaan densitas, semakin besar gaya tarik alami (natural draft).

Laju Emisi

Laju emisi polutan:

$$E = CQ$$

dimana:

- E = laju emisi (mg/s atau g/s)
- C = konsentrasi polutan (mg/Nm^3)
- Q = debit gas (Nm^3/s)

Contoh:

$$C = 40 \text{ mg/Nm}^3$$

$$Q = 6 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$E = 240 \text{ mg/s}$$

Nilai ini dibandingkan dengan baku mutu emisi yang berlaku.

Kesimpulan

Pada sistem gas buang Furnace NPK, **cyclone** memanfaatkan gaya sentrifugal untuk memisahkan partikel kasar dari gas panas, sedangkan **dust collector (bag filter)** menangkap partikel halus melalui mekanisme filtrasi sehingga efisiensi penghilangan debu dapat mencapai lebih dari 99%. **Exhaust fan** menghasilkan gaya hisap untuk mempertahankan tekanan negatif di furnace dan mengalirkan gas melewati seluruh sistem pengendalian debu hingga ke **stack**. Di cerobong, gas buang dilepas ke atmosfer dengan kecepatan dan ketinggian yang dirancang agar dispersi polutan berlangsung efektif dan memenuhi persyaratan lingkungan. Seluruh sistem dianalisis menggunakan persamaan kontinuitas, Bernoulli, gaya sentrifugal, hukum Darcy untuk media berpori, serta persamaan daya fan dan draft cerobong.

Berikut contoh perhitungan untuk setiap tahapan operasi menggunakan asumsi yang masih realistis pada sistem Furnace NPK.

1. Pressure Indicator (PI)

PI digunakan untuk mengukur tekanan gas atau udara sebelum masuk burner.

Persamaan tekanan

$$P = \frac{F}{A}$$

Dimana:

- P = tekanan (Pa)
- F = gaya (N)
- A = luas penampang (m^2)

Contoh

Misal gaya fluida

$$F = 450 \text{ N}$$

Diameter pipa

$$D = 0.10 \text{ m}$$

Luas penampang

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$
$$A = \frac{\pi (0.10)^2}{4} = 0.00785 \text{ m}^2$$

Maka tekanan

$$P = \frac{450}{0.00785} = 57\,325 \text{ Pa}$$

atau

$$P = 57.3 \text{ kPa}$$

Nilai inilah yang ditampilkan oleh Pressure Indicator (PI).

2. Temperature Indicator (TI)

TI mengukur temperatur furnace.

Energi panas dihitung:

$$Q = m C_p \Delta T$$

Misal

massa gas

$$m = 2.5 \text{ kg/s}$$

Panas jenis

$$C_p = 1.05 \text{ kJ/kgK}$$

Temperatur masuk

$$T_1 = 35^\circ C$$

Temperatur keluar

$$T_2 = 650^\circ C$$

Maka

$$Q = 2.5(1.05)(650 - 35)$$
$$Q = 1614 \text{ kW}$$

Artinya furnace menghasilkan panas sekitar **1,61 MW**.

3. Flow Indicator (FI)

FI mengukur debit aliran gas.

Persamaan kontinuitas

$$Q = AV$$

Misal

Diameter pipa

0.15 m

Luas

$$A = 0.0177 \text{ m}^2$$

Kecepatan gas

18 m/s

Maka

$$Q = 0.0177 \times 18 = 0.319 \text{ m}^3/\text{s}$$

Jika

densitas gas

0.8 kg/m³

Maka

$$\dot{m} = 0.319 \times 0.8 = 0.255 \text{ kg/s}$$

FI akan membaca debit sekitar

$$0.319 \text{ m}^3/\text{s}$$

4. Control Valve

Valve mengatur debit bahan bakar.

Persamaan valve

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{SG}}$$

Misal

Cv = 30

Pressure drop

$$\Delta P = 1.5 \text{ bar}$$

Specific Gravity Natural Gas

0.65

Maka

$$Q = 30 \sqrt{\frac{1.5}{0.65}}$$
$$Q = 45.6$$

Semakin besar bukaan valve,
semakin besar debit gas menuju burner.

5. Motor Blower

Motor menggerakkan blower.

Daya

$$P = \frac{Q\Delta P}{\eta}$$

Misal

Debit udara

$$Q = 3.2m^3/s$$

Pressure

$$2500Pa$$

Efisiensi

75%

Maka

$$P = \frac{3.2 \times 2500}{0.75}$$
$$P = 10.67kW$$

Motor minimal dipilih

11 kW.

6. Damper

Damper mengatur jumlah udara.

Debit udara

$$Q = A \times V$$

Misal

Damper dibuka

100%

Area

0.20 m²

Kecepatan

16 m/s

$$Q = 3.2m^3/s$$

Jika damper ditutup menjadi 50%

Area

0.10 m²

$$Q = 1.6m^3/s$$

Debit turun 50%.

PERHITUNGAN ALUR OPERASI

Step 1

Blower menyuplai udara

Diameter duct

0.45 m

Kecepatan

20 m/s

Luas

$$A = \frac{\pi(0.45)^2}{4} = 0.159m^2$$

Debit

$$Q = 0.159 \times 20 = 3.18m^3/s$$

Jika

p udara

1.2 kg/m³

Massa udara

$$\dot{m} = 3.18 \times 1.2 = 3.82kg/s$$

Step 2

Natural Gas dibuka

Debit gas

0.18 kg/s

LHV

50000 kJ/kg

Energi masuk

$$Q = 0.18 \times 50000 = 9000kW$$

Burner menerima energi

9 MW.

Step 3

Ignition

Temperatur ignition

sekitar

700°C

Temperatur auto ignition methane

$$537^\circ C$$

Karena

700°C

537°C

maka

api terbentuk.

Step 4

Furnace menghasilkan Hot Gas

Energi gas

$$Q = mC_p\Delta T$$

Misal

$$m = 4kg/s$$

$$C_p = 1.05$$

$$\Delta T = 650 - 35 = 615$$

$$Q = 4 \times 1.05 \times 615 = 2583kW$$

Hot gas membawa

2.58 MW.

Step 5

Rotary Dryer

Material

12 ton/jam

Moisture

10%

Target

2%

Air awal

$$12 \times 0.10 = 1.2 \text{ ton/jam}$$

Air akhir

$$12 \times 0.02 = 0.24 \text{ ton/jam}$$

Air diuapkan

$$1.2 - 0.24 = 0.96 \text{ ton/jam}$$

Energi evaporasi

$$\begin{aligned} Q &= m h_{fg} \\ &= 960 \times 2257 \\ &= 2\,166\,720 \text{ kJ/jam} \end{aligned}$$

atau

$$602 \text{ kW}$$

Step 6

Cyclone

Debu masuk

1000 mg/Nm³

Keluar

180 mg/Nm³

Efisiensi

$$\eta = \frac{1000 - 180}{1000} \times 100 = 82\%$$

Step 7

Bag Filter

Masuk

180 mg/Nm³

Keluar

4 mg/Nm³

$$\eta = \frac{180 - 4}{180} \times 100 = 97.8\%$$

Step 8

Exhaust Fan

Debit gas
8 m³/s
Pressure
2600 Pa
Efisiensi
78%

$$P = \frac{8 \times 2600}{0.78}$$

$$P = 26.67 \text{ kW}$$

Motor exhaust fan dipilih sekitar
30 kW.

Ringkasan Hasil Perhitungan

Tahapan	Persamaan	Hasil Contoh
Tekanan gas (PI)	$P = \frac{F}{A}$	57,3 kPa
Temperatur furnace (TI)	$Q = \dot{m}C_p\Delta T$	1.614 kW
Debit gas (FI)	$Q = AV$	0,319 m ³ /s
Daya blower	$P = \frac{Q\Delta P}{\eta}$	10,67 kW
Energi pembakaran	$Q = \dot{m}_f \times LHV$	9 MW
Energi hot gas	$Q = \dot{m}C_p\Delta T$	2,58 MW
Energi pengeringan	$Q = \dot{m}_w h_{fg}$	602 kW
Efisiensi cyclone	$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$	82%
Efisiensi bag filter	$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$	97,8%
Daya exhaust fan	$P = \frac{Q\Delta P}{\eta}$	26,67 kW

Catatan: Angka-angka di atas merupakan **contoh perhitungan** dengan asumsi yang realistis untuk menjelaskan metode analisis. Untuk perhitungan desain atau evaluasi operasi yang sebenarnya, gunakan data operasi aktual dari plant, seperti laju alir bahan bakar, temperatur, tekanan, dimensi duct, kapasitas blower/fan, dan spesifikasi peralatan pada P&ID maupun datasheet.

pembahasan yang lebih **detail**, menggunakan **persamaan teknik yang benar** sesuai ilmu **Termodinamika, Mekanika Fluida, Perpindahan Panas, dan Unit Operation**. Rumus-rumus ini merupakan rumus standar yang digunakan dalam perancangan maupun analisis operasi furnace dan sistem pengering pada industri pupuk NPK. Seluruh penjelasan mengacu pada rangkaian peralatan yang terlihat pada P&ID Furnace NPK Plant 2.

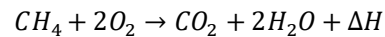
1. Furnace F-2101

Fungsi

Furnace (F-2101) merupakan sumber energi panas utama yang menghasilkan gas panas (hot gas) melalui pembakaran bahan bakar (Natural Gas atau Liquid Fuel) dengan udara pembakaran. Gas panas ini digunakan sebagai media pemanas pada rotary dryer untuk menguapkan kadar air pupuk NPK.

Prinsip Kerja

Reaksi pembakaran gas metana:



Energi panas yang dihasilkan dihitung menggunakan nilai kalor bahan bakar:

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \times LHV$$

Keterangan:

- $\dot{Q}$ = laju panas (kW)
- $\dot{m}_f$ = laju massa bahan bakar (kg/s)
- LHV = Lower Heating Value (kJ/kg)

Contoh Perhitungan

Misalkan:

- Debit gas = 0,16 kg/s
- LHV Natural Gas = 50.000 kJ/kg

$$\dot{Q} = 0.16 \times 50000$$

$$\dot{Q} = 8000 \text{ kW}$$

Artinya furnace menghasilkan energi panas sebesar **8 MW**.

Neraca Energi Furnace

Menurut Hukum I Termodinamika:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})$$

Misalkan:

- $\dot{m} = 4.5 \text{ kg/s}$
- $C_p = 1.08 \text{ kJ/kg.K}$
- $T_{out} = 700^\circ C$
- $T_{in} = 35^\circ C$

$$\dot{Q} = 4.5(1.08)(700 - 35)$$

$$\dot{Q} = 3231 \text{ kW}$$

Energi tersebut dibawa oleh gas panas menuju rotary dryer.

2. Combustion Air Blower C-2101

Fungsi

Blower menyuplai udara pembakaran ke furnace. Jumlah udara harus memenuhi kebutuhan stoikiometri dan excess air agar pembakaran berlangsung sempurna.

Persamaan Kontinuitas

$$\dot{m} = \rho AV$$

Misalkan:

Diameter duct

0.50 m

Luas

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 0.196 \text{ m}^2$$

Kecepatan udara

18 m/s

Densitas udara

1.2 kg/m³

$$\dot{m} = 1.2 \times 0.196 \times 18 = 4.23 \text{ kg/s}$$

Daya Blower

$$P = \frac{Q\Delta P}{\eta}$$

Misal:

Debit udara

3.53 m³/s

Pressure

2800 Pa

Efisiensi

0.78

$$P = \frac{3.53 \times 2800}{0.78} = 12.67 \text{ kW}$$

3. Process Fan C-2102

Fungsi

Process Fan (C-2102) mengalirkan gas panas dari rotary dryer menuju cyclone dan sistem pengendalian debu. Fan ini mempertahankan tekanan negatif sehingga gas tidak bocor keluar dari sistem.

Persamaan Bernoulli

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = \text{konstan}$$

Persamaan ini menunjukkan hubungan antara tekanan, kecepatan aliran, dan energi potensial sepanjang saluran.

Daya Fan

$$P = \frac{Q\Delta P}{\eta}$$

Misal:

Debit gas

7.5 m³/s

Pressure loss

2600 Pa

Efisiensi

0.80

$$P = \frac{7.5 \times 2600}{0.80} = 24.38 \text{ kW}$$

4. Rotary Dryer

Fungsi

Rotary Dryer mengurangi kadar air pupuk menggunakan gas panas dari furnace melalui perpindahan panas konveksi dan penguapan air.

Neraca Massa

$$\dot{m}_{feed} = \dot{m}_{produk} + \dot{m}_{air}$$

Misal:

Feed

15 ton/jam

Moisture awal

12%

Moisture akhir

2%

Air awal

$$15 \times 0.12 = 1.8 \text{ ton/jam}$$

Air akhir

$$15 \times 0.02 = 0.3 \text{ ton/jam}$$

Air diuapkan

$$1.8 - 0.3 = 1.5 \text{ ton/jam}$$

Energi Pengeringan

$$Q = m_w h_{fg}$$

dengan:

- $h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}$

Konversi massa air:

$$1.5 \text{ ton/jam} = 1500 \text{ kg/jam} = 0.417 \text{ kg/s}$$

$$Q = 0.417 \times 2257 = 941 \text{ kW}$$

5. Cyclone

Fungsi

Cyclone memisahkan partikel debu berdasarkan gaya sentrifugal.

Gaya Sentrifugal

$$F_c = \frac{mv^2}{r}$$

Misalkan:

massa partikel

$$5 \times 10^{-9} \text{ kg}$$

Kecepatan

18 m/s

Radius

0.25 m

$$F_c = \frac{5 \times 10^{-9} (18)^2}{0.25} = 6.48 \times 10^{-6} \text{ N}$$

Semakin besar kecepatan putaran, semakin besar gaya sentrifugal sehingga pemisahan lebih efektif.

Efisiensi Cyclone

$$\eta = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100\%$$

Misalkan:

Masuk

900 mg/Nm³

Keluar

150 mg/Nm³

$$\eta = 83.3\%$$

6. Dust Collector

Fungsi

Dust Collector (bag filter) menangkap partikel halus yang masih lolos dari cyclone.

Kecepatan Filtrasi

$$V_f = \frac{Q}{A}$$

Misalkan:

Debit

6 m³/s

Luas filter

120 m²

$$V_f = 0.05 \text{ m/s}$$

Efisiensi Bag Filter

$$\eta = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100$$

Masuk

150 mg/Nm³

Keluar

3 mg/Nm³

$$\eta = 98\%$$

Pressure Drop

$$\Delta P = \frac{\mu LV}{K}$$

Pressure drop meningkat seiring bertambahnya debu yang menempel pada media filter, sehingga diperlukan sistem pembersihan (pulse jet cleaning).

7. Conveyor L-2103 s.d. L-2107

Fungsi

Conveyor memindahkan material padat (NPK) antarperalatan secara kontinu.

Kapasitas Conveyor

Untuk belt conveyor:

$$Q = 3600 A V \rho$$

dengan:

- Q = kapasitas (kg/jam)
- A = luas penampang material di belt (m^2)
- V = kecepatan belt (m/s)
- ρ = massa jenis curah material (kg/m^3)

Misal:

- $A = 0.03 m^2$
- $V = 1.2 m/s$
- $\rho = 1100 kg/m^3$

$$Q = 3600 \times 0.03 \times 1.2 \times 1100 = 142\,560 \text{ kg/jam}$$

atau sekitar **142,6 ton/jam**.**8. Rotary Valve V-2101****Fungsi**

Rotary valve mengatur laju keluaran material padat dari hopper dan menjaga agar udara tidak bocor antarbagian sistem (air lock).

Kapasitas Rotary Valve

$$Q = V_p N \eta_f$$

dengan:

- V_p = volume perpindahan per putaran (m^3/rev)
- N = putaran per detik (rev/s)
- η_f = faktor pengisian

Misalkan:

- $V_p = 0.004 m^3/\text{rev}$
- $N = 0.5 \text{ rev/s}$
- $\eta_f = 0.85$

$$Q = 0.004 \times 0.5 \times 0.85 = 0.0017 m^3/s$$

Jika densitas material $1100 kg/m^3$:

$$\dot{m} = 0.0017 \times 1100 = 1.87 \text{ kg/s}$$

9. Stack**Fungsi**

Stack merupakan cerobong yang membuang gas hasil pembakaran ke atmosfer setelah melewati cyclone, dust collector, dan exhaust fan.

Kecepatan Gas

$$V = \frac{Q}{A}$$

Misalkan:

Diameter

1 m

Luas

$$A = 0.785m^2$$

Debit

8 m³/s

$$V = 10.2m/s$$

Draft Cerobong

$$\Delta P = gH(\rho_a - \rho_g)$$

Misalkan:

- $H = 30 \text{ m}$
- $\rho_a = 1.20 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_g = 0.80 \text{ kg/m}^3$

$$\Delta P = 9.81 \times 30 \times (1.20 - 0.80) = 117.7 \text{ Pa}$$

Draft ini membantu aliran gas menuju atmosfer.

Kesimpulan Teknis

Berdasarkan P&ID, sistem bekerja sebagai satu rangkaian yang saling terhubung. **Blower C-2101** menyuplai udara pembakaran sesuai kebutuhan stoikiometri, kemudian **Furnace F-2101** mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas melalui reaksi pembakaran. Energi tersebut dimanfaatkan oleh **Rotary Dryer** untuk menguapkan air dari pupuk NPK berdasarkan neraca massa dan neraca energi. Gas buang selanjutnya melewati **Cyclone**, yang memanfaatkan gaya sentrifugal untuk memisahkan partikel kasar, kemudian **Dust Collector** yang menyaring partikel halus dengan efisiensi tinggi. **Process Fan C-2102** menjaga tekanan negatif dan mengatasi rugi-rugi tekanan pada seluruh sistem, sedangkan **Stack** melepaskan gas yang telah memenuhi persyaratan emisi ke atmosfer dengan memanfaatkan draft cerobong.

Seluruh analisis menggunakan persamaan dasar teknik, yaitu **persamaan kontinuitas** ($\dot{m} = \rho AV$), **Hukum I Termodinamika** ($\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T$), **persamaan daya fan/blower** ($P = Q\Delta P/\eta$), **gaya sentrifugal** ($F_c = mv^2/r$), **efisiensi pemisahan** ($\eta = (C_i - C_o)/C_i$), serta **kapasitas conveyor, rotary valve, dan draft cerobong** yang umum digunakan dalam analisis dan perancangan peralatan proses industri.

Studi Kasus dan **Studi Banding** yang dapat dimasukkan ke dalam **Bab IV (Pembahasan)** atau **Bab V (Analisis)** pada laporan Kerja Praktik/Skripsi berdasarkan P&ID **Furnace NPK Plant 2 (F-2101)** yang telah dibahas sebelumnya. Angka-angka yang digunakan merupakan **contoh analisis** dengan asumsi operasi yang realistis. Untuk laporan akhir, gantilah dengan data aktual dari pabrik apabila tersedia.

STUDI KASUS

Analisis Penurunan Efisiensi Pengeringan pada Rotary Dryer Akibat Berkurangnya Suplai Udara Pembakaran

Latar Belakang

Pada proses pengeringan pupuk NPK, temperatur gas panas dari Furnace F-2101 sangat dipengaruhi oleh jumlah udara pembakaran yang disuplai oleh Blower C-2101. Apabila udara pembakaran berkurang akibat penurunan performa blower atau bukaan damper yang terlalu kecil, maka pembakaran menjadi tidak sempurna. Kondisi ini menyebabkan temperatur gas panas turun sehingga proses pengeringan menjadi kurang efektif.

Data Operasi

Kondisi Normal

Parameter	Nilai
Debit Natural Gas	0,16 kg/s
Debit Udara	4,20 kg/s
Temperatur Furnace	700°C
Temperatur Dryer Inlet	650°C
Kapasitas Produksi	15 ton/jam
Moisture Produk	2%

Kondisi Gangguan

Terjadi penurunan putaran blower sebesar 20%.

Akibatnya:

Debit udara turun menjadi

$$\dot{m}_{air} = 4.20 \times 0.80 = 3.36 \text{ kg/s}$$

Air Fuel Ratio menjadi

$$AFR = \frac{3.36}{0.16} = 21$$

Walaupun secara angka AFR masih cukup, distribusi udara dan pencampuran di burner dapat memburuk sehingga pembakaran tidak lagi optimal. Pada operasi nyata, hal ini dapat menyebabkan terbentuknya CO, peningkatan jelaga, dan penurunan temperatur gas panas.

Analisis Energi

Energi bahan bakar

$$Q_{fuel} = 0.16 \times 50000 = 8000 \text{ kW}$$

Misalkan efisiensi furnace turun dari

85%

menjadi

75%

Energi panas

Kondisi Normal

$$Q = 8000 \times 0.85 = 6800 \text{ kW}$$

Gangguan

$$Q = 8000 \times 0.75 = 6000kW$$

Terjadi kehilangan energi

$$6800 - 6000 = 800kW$$

Dampak terhadap Rotary Dryer

Energi pengeringan

$$Q = m_w h_{fg}$$

Misalkan

air diuapkan

1.5 ton/jam

$$= 0.417kg/s$$

Energi yang diperlukan

$$Q = 0.417 \times 2257 = 941kW$$

Karena energi furnace turun,

temperatur gas turun dari

650°C

menjadi

560°C.

Akibatnya:

- laju evaporasi menurun,
- waktu tinggal material bertambah,
- kadar air produk meningkat.

Misalnya

Moisture naik

2%

↓

4%

Produk tidak memenuhi spesifikasi.

Dampak terhadap Cyclone

Temperatur gas turun.

Densitas gas meningkat.

Kecepatan gas menurun.

Persamaan kontinuitas

$$Q = AV$$

Kecepatan lebih kecil

↓

gaya sentrifugal

$$F_c = \frac{mv^2}{r}$$

menurun.

Misalnya

Kecepatan gas

20 m/s

↓

16 m/s

Maka

$$\frac{16^2}{20^2} = 0.64$$

Gaya sentrifugal turun sekitar

36%.

Efisiensi cyclone ikut turun.

Dampak Dust Collector

Karena cyclone tidak optimal,
debu masuk bag filter meningkat.

Misalnya

Masuk

150

↓

300 mg/Nm³

Pressure drop

$$\Delta P = \frac{\mu LV}{K}$$

meningkat.

Motor fan bekerja lebih berat.

Dampak Exhaust Fan

Pressure loss sistem

Normal

2600 Pa

Gangguan

3300 Pa

Daya fan

$$P = \frac{Q \Delta P}{\eta}$$

Normal

$$P = 26kW$$

Gangguan

$$P = 33kW$$

Konsumsi listrik naik sekitar

27%.

Kesimpulan Studi Kasus

Gangguan kecil pada blower pembakaran dapat menyebabkan efek berantai pada seluruh sistem, yaitu:

- efisiensi pembakaran menurun,
- temperatur furnace turun,
- kapasitas pengeringan berkurang,

- kadar air produk meningkat,
- beban cyclone bertambah,
- pressure drop bag filter meningkat,
- konsumsi daya exhaust fan naik,
- efisiensi keseluruhan plant menurun.

STUDI BANDING

Perbandingan Operasi Furnace pada Dua Kondisi

Parameter	Kondisi Normal	Kondisi Gangguan
Debit Udara	4.20 kg/s	3.36 kg/s
AFR	26.25	21.00
Temperatur Furnace	700°C	560°C
Efisiensi Furnace	85%	75%
Energi Hot Gas	6800 kW	6000 kW
Moisture Produk	2%	4%
Efisiensi Cyclone	85%	78%
Debu ke Bag Filter	150 mg/Nm ³	300 mg/Nm ³
Pressure Drop Bag Filter	1200 Pa	1800 Pa
Daya Exhaust Fan	26 kW	33 kW

Analisis Perbandingan

Temperatur Furnace

Energi panas
Normal
6800 kW
Gangguan
6000 kW
Penurunan

$$\frac{6800 - 6000}{6800} \times 100 = 11.8\%$$

Efisiensi Cyclone

Normal
85%
Gangguan
78%
Penurunan
7%.

Hal ini terjadi karena gaya sentrifugal bergantung pada kuadrat kecepatan:

$$F_c = \frac{mv^2}{r}$$

Konsumsi Energi Fan

Normal
26 kW
Gangguan

33 kW

Kenaikan

$$\frac{33 - 26}{26} \times 100 = 26.9\%$$

Kadar Air Produk

Produk normal

2%

Gangguan

4%

Artinya

moisture naik dua kali lipat.

Analisis Teknik

Berdasarkan hasil studi banding dapat disimpulkan bahwa **Combustion Air Blower (C-2101)** merupakan salah satu peralatan yang paling berpengaruh terhadap performa sistem. Penurunan kapasitas blower menyebabkan pembakaran tidak optimal sehingga temperatur furnace turun. Dampaknya menjalar ke seluruh unit operasi, mulai dari **Rotary Dryer** (penurunan kemampuan pengeringan), **Cyclone** (penurunan efisiensi pemisahan debu), **Dust Collector** (kenaikan beban filtrasi dan pressure drop), hingga **Exhaust Fan** (peningkatan konsumsi daya).

Secara teknis, hubungan antarperalatan tersebut dijelaskan melalui persamaan **kontinuitas** ($\dot{m} = \rho AV$), **neraca energi** ($\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T$), **gaya sentrifugal** ($F_c = mv^2/r$), dan **daya fan** ($P = Q \Delta P / \eta$). Hasil analisis menunjukkan bahwa pengendalian laju udara pembakaran, temperatur furnace, dan tekanan sistem merupakan parameter operasi yang paling penting untuk menjaga kualitas produk NPK, efisiensi energi, dan keandalan operasi keseluruhan.