

LAMPIRAN II PERHITUNGAN

1. Perhitungan Laju Alir Udara Primer

Untuk menghitung laju udara, dihitung/dikonversi satuan tekanan menjadi laju alir udara. Rumus untuk menghitung laju alir udara, yaitu:

$$Q = C_d \times A_2 \times \frac{1}{1 - \beta^4} \times \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}$$

(Sumber: Mc Cabe. 1993:221)

Dimana: d_1 = diameter luar orifice

d_2 = diameter dalam orifice

P = beda tekan udara

A_2 = luas penampang orifice

ρ = densitas udara

C_d = koefisien orifice

β = diameter orifice

a. Pada Tekanan 1 cmH₂O

Dik :

- $D_1 = 1,5 \text{ m} \times \frac{2,54 \text{ cm}}{\text{in}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0,0381 \text{ m}$

- $D_2 = 0,5 \text{ in} \times \frac{2,54 \text{ cm}}{\text{in}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0,016 \text{ m}$

- $A = \frac{1}{4} \pi d^2$

maka,

$A_1 = 0,00114 \text{ m}^2$

$A_2 = 0,000201 \text{ m}^2$

- $C_d = 0,61$ (Sumber : Mc Cabe. 1993 : 225)

- Temperatur udara = $29,7^\circ\text{C} + 273 = 302,7 \text{ K}$

Maka, ρ udara pada 302,7 K dilakukan interpolasi antara :

ρ pada $T = 300 \text{ K}$ adalah $1,1774 \text{ kg/m}^3$

(Sumber : Holman, J.P 2004: 589)

ρ pada $T = 350 \text{ K}$ adalah $0,9980 \text{ kg/m}^3$

(Sumber : Holman, J.P 2004: 589)

sehingga ρ udara pada $302,7 \text{ K}$ adalah $1,17024 \text{ Kg/m}^3$

- Data yang terbaca pada manometer :

$$h_1 = -1 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$h_2 = 1 \text{ cmH}_2\text{O}$$

maka,

$$\begin{aligned} \bullet \quad P_1 + h_1 &= P_2 + h_2 \\ P_1 + (-1) &= P_2 + 1 \\ P_1 - P_2 &= 1 + 1 \\ &= 2 \text{ cmH}_2\text{O} \times \frac{98,1 \text{ Pa}}{1 \text{ cmH}_2\text{O}} = 196,2 \text{ pa} \end{aligned}$$

$$\bullet \quad \beta = \frac{d_2}{d_1} = \frac{0,016 \text{ m}}{0,0381 \text{ m}} = 0,419947507$$

$$\bullet \quad Q = C_d \times A_2 \times \frac{1}{1-\beta^4} \times \frac{\sqrt{2(P_1-P_2)}}{\rho}$$

(Sumber : Mc Cabe. 1993:221)

$$= 0,61 \times 0,000201 \text{ m}^2 \times \frac{1}{1-(0,419947507)^4} \times \frac{2 \times 196,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}^2}}{1,170224 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$= 0,002280671 \text{ m}^3/\text{s} = 136,8402995 \text{ Lpm}$$

• Massa laju alir udara primer :

$$\dot{m} \text{ udara primer} = Q \times \rho_o$$

$$= 0,002280671 \text{ m}^3/\text{s} \times 1,170224 \text{ kg/m}^3$$

$$= 0,002668895 \text{ kg/s}$$

b. Pada $0,8 \text{ cmH}_2\text{O}$

$$\text{Dik : } h_1 = -0,8 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$h_2 = 0,8 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$\rho_o = 1,170224 \text{ kg/m}^3$$

$$A_1 = 0,00114 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,000201 \text{ m}^2$$

$$\beta = 0,419947507$$

Untuk menghitung laju alir udara pada beda tekan udara 0,8 cmH₂O digunakan rumus yang sama, sehingga laju alir yang didapat 122,4 Lpm.

c. Pada 0,6 cmH₂O

Dik : $h_1 = -0,6 \text{ cmH}_2\text{O}$
 $h_2 = 0,6 \text{ cmH}_2\text{O}$
 $\rho_o = 1,170224 \text{ kg/m}^3$
 $A_1 = 0,00114 \text{ m}^2$
 $A_2 = 0,000201 \text{ m}^2$
 $\beta = 0,419947507$

Untuk menghitung laju alir udara pada beda tekan udara 0,6 cmH₂O digunakan rumus yang sama, sehingga laju alir yang didapat 105,9961 Lpm.

2. Perhitungan Laju Pemakaian Bahan Baku

a. Laju pemakaian Bahan Baku Pada Laju Alir 105,9961 Lpm

- Jumlah bahan baku yang disuplai = 1,5 kg = 1500 gr
- Jumlah abu (ash) sisa karbonisasi = 0,025 kg = 25 gr
- Massa bahan baku terpakai = 1,5 kg – 0,025 kg = 1,475 kg = 1475 gr
- Waktu (t) = 45 menit = 2700 s

• $\square_{Bb} = \frac{m_{Bb}}{t} = \frac{1475 \text{ gr}}{2700 \text{ s}} = 0,5462 \text{ gr/s}$

b. Laju Pemakaian Bahan Baku Pada Laju Alir 122,4 Lpm

- Jumlah bahan baku yang disuplai = 1,5 kg = 1500 gr
- Jumlah abu (ash) sisa karbonisasi = 0,0431 kg = 43,1 gr
- Massa bahan baku terpakai = 1,5 kg – 0,0431 kg = 1,4569 kg = 1456 gr
- Waktu (t) = 43 menit = 2580 s

• $\square_{Bb} = \frac{m_{Bb}}{t} = \frac{1456 \text{ gr}}{2580 \text{ s}} = 0,5643 \text{ gr/s}$

c. Laju Pemakaian Bahan Baku Pada Laju Alir 136,84 Lpm

- Jumlah bahan baku yang disuplai = 1,5 kg = 1500 gr
- Jumlah abu (ash) sisa karbonisasi = 0,0482 kg = 48,2 gr

- Massa bahan baku terpakai = 1,5 kg – 0,0482 kg = 1,4518 kg = 1451 gr
- Waktu (t) = 37 menit = 2220 s
 - $\square_{Bb} = \frac{m_{Bb}}{t} = \frac{1451 \text{ gr}}{2220 \text{ s}} = 0,6536 \text{ gr/s}$

3. Perhitungan Laju Abu (ash) Sisa Pembakaran

a. Laju abu (ash) sisa karbonisasi pada laju alir 105,9961 Lpm

- Jumlah abu (*ash*) sisa karbonisasi = 0,025 kg = 25 gr
- Waktu (t) = 45 menit = 2700 s
- $\square_{abu} = \frac{m_{abu}}{t} = \frac{25 \text{ gr}}{2700 \text{ s}} = 0,0092 \text{ gr/s}$

b. Laju abu (ash) sisa karbonisasi pada laju alir 122,4 Lpm

- Jumlah abu (*ash*) sisa karbonisasi = 0,0431 kg = 43,1 gr
- Waktu (t) = 43 menit = 2580 s
- $\square_{abu} = \frac{m_{abu}}{t} = \frac{43,1 \text{ gr}}{2580 \text{ s}} = 0,0167 \text{ gr/s}$

c. Laju abu (ash) sisa karbonisasi pada laju alir 136,84 Lpm

- Jumlah abu (*ash*) sisa karbonisasi = 0,0482 kg = 48,2 gr
- Waktu (t) = 37 menit = 2220 s
- $\square_{abu} = \frac{m_{abu}}{t} = \frac{48,2 \text{ gr}}{2220 \text{ s}} = 0,0217 \text{ gr/s}$

4. Udara Stoikiometri

Udara minimum yang diperlukan untuk pembakaran sempurna, berikut komposisi massa tempurung kelapa yang digunakan:

- C = 47,89 %
- H₂ = 6,09 %
- S = 0,05 %
- O₂ = 45,75 %

Sumber : (Najib et al,2012)

- Udara stoikiometri = $\frac{1}{0,23} \frac{8}{3} C + 8H_2 + S - O_2$

Sumber : (Handika, Allin,2009)

$$= \frac{1}{0,23} \frac{8}{3} 0,4789 + 8 0,0609 + 0,005 - 0,4575$$

$$= 5,70300926 \text{ kg udara/kg Bahan baku}$$

- Massa jenis udara primer

$$\rho = 1,170224 \text{ Kg/m}^3 \text{ (}\rho_{\text{udara}} \text{ Pada } 30^{\circ}\text{C)}$$

(Sumber : Holman, J.P 2004: 589)

- Maka udara stoikiometri (AF_s)

$$AF_s = \frac{\text{Udara stoikiometri}}{\rho} = \frac{5,70300926}{1,170224} = 4,873433855 \text{ m}^3/\text{kg}$$

5. Perhitungan *Equivalent ratio (ER)*

a. Laju pemakaian Bahan Baku Pada Laju Alir 105,9961 Lpm

$$ER = \frac{\text{Jumlah udara aktual}}{\text{Jumlah udara stoikiometrik}}$$

$$ER = \frac{0,002067 \text{ kg/s}}{0,00316833 \text{ kg/s}}$$

$$ER = 0,65239$$

b. Laju Pemakaian Bahan Baku Pada Laju Alir 122,4 Lpm

$$ER = \frac{\text{Jumlah udara aktual}}{\text{Jumlah udara stoikiometrik}}$$

$$ER = \frac{0,0023872 \text{ kg/s}}{0,0033139 \text{ kg/s}}$$

$$ER = 0,72035$$

c. Laju Pemakaian Bahan Baku Pada Laju Alir 136,84 Lpm

$$ER = \frac{\text{Jumlah udara aktual}}{\text{Jumlah udara stoikiometrik}}$$

$$ER = \frac{0,002668895 \text{ kg/s}}{0,003851 \text{ kg/s}}$$

$$ER = 0,69303$$

6. Perhitungan Massa Jenis Syngas

a. Pada laju alir udara 105,9961 Lpm

Massa jenis gas campuran (kg/m^3), Persamaan

$$\rho_{\text{mix}} = \rho_1 x_1 + \rho_2 x_2 + \dots + \rho_n x_n$$

Dimana:

$$\rho_1 \dots \rho_2 = \text{massa jenis dari tiap komponen}(\text{kg/m}^3)$$

$$x_1 \dots x_2 = \text{fraksi mol dari tiap komponen gas}$$

Name	Formula	Density ρ (kg/m ³)
Carbon dioxide	CO ₂	1,977
Carbon monoxide	CO	1,25
Hidrogen	H ₂	0,09
Nitrogen	N ₂	1,25
Oksigen	O ₂	1,49
Methane	CH ₄	0,68

(Sumber: Astari, Gita:2009)

- Perhitungan massa gas hasil pada ΔP udara 1 cmH₂O

$$\rho_{\text{mix}} = \rho_1 x_1 + \rho_2 x_2 + \dots + \rho_n x_n$$

- Fraksi volume dari tiap komponen gas (x_b),

$$\begin{array}{ll} x_{\text{CO}} = 21,26 \% & x_{\text{N}_2} = 42,923 \% \\ x_{\text{CO}_2} = 11,653 \% & x_{\text{O}_2} = 8,309 \% \\ x_{\text{CH}_4} = 2,019 \% & x_{\text{H}_2} = 13,836 \% \\ \rho_{\text{mix}} = 1,1827 \text{ kg/m}^3 & \end{array}$$

b. Pada laju alir udara 122,4 Lpm

- Fraksi volume dari tiap komponen gas (x_b),

$$\begin{array}{ll} x_{\text{CO}} = 20,53 \% & x_{\text{N}_2} = 41,959 \% \\ x_{\text{CO}_2} = 11,769 \% & x_{\text{O}_2} = 11,114 \% \\ x_{\text{CH}_4} = 1,833 \% & x_{\text{H}_2} = 13,196 \% \\ \rho_{\text{mix}} = 1,2037 \text{ kg/m}^3 & \end{array}$$

c. Pada laju alir udara 136,84 Lpm

- Fraksi volume dari tiap komponen gas (x_b),

$$\begin{array}{ll} x_{\text{CO}} = 19,05 \% & x_{\text{N}_2} = 42,014 \% \\ x_{\text{CO}_2} = 12,152 \% & x_{\text{O}_2} = 12,326 \% \\ x_{\text{CH}_4} = 2,415 \% & x_{\text{H}_2} = 12,042 \% \\ \rho_{\text{mix}} = 1,2145 \text{ kg/m}^3 & \end{array}$$

7. Perhitungan pada Laju Alir Syngas

a. Pada laju alir udara 105,9961 Lpm

Untuk menghitung laju udara, dihitung/dikonversi satuan tekanan menjadi laju alir udara. Rumus untuk menghitung laju alir udara, yaitu:

$$Q = C_d \times A_2 \times \frac{1}{1 - \beta^4} \times \frac{\sqrt{2(P_1 - P_2)}}{\rho}$$

(Sumber: Mc Cabe. 1993:221)

Dimana: d_1 = diameter luar orifice
 d_2 = diameter dalam orifice
 P = beda tekan udara
 A_2 = luas penampang orifice
 ρ = densitas udara
 C_d = koefisien orifice
 β = diameter orifice

Dik :

- $D_1 = 1,5 \text{ m} \times \frac{2,54 \text{ cm}}{\text{in}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0,0381 \text{ m}$
- $D_2 = 0,5 \text{ in} \times \frac{2,54 \text{ cm}}{\text{in}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0,016 \text{ m}$
- $A = \frac{1}{4} \pi d^2$

maka,

$$A_1 = 0,00114 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,000201 \text{ m}^2$$

- $C_d = 0,61$ (Sumber : Mc Cabe. 1993 : 225)
- $\rho_{\text{mix}} = 1,1827 \text{ kg/m}^3$

Data Syngas keluar yang terbaca pada manometer:

$$h_1 = -0,7 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$h_2 = 0,7 \text{ cmH}_2\text{O}$$

maka,

- $P_1 + h_1 = P_2 + h_2$
 $P_1 + (-0,7) = P_2 + 0,7$
 $P_1 - P_2 = 0,7 + 0,7$

$$= 1,4 \text{ cmH}_2\text{O} \times \frac{98,1 \text{ Pa}}{1 \text{ cmH}_2\text{O}} = 137,34 \text{ pa}$$

$$\bullet \beta = \frac{d_2}{d_1} = \frac{0,016 \text{ m}}{0,0381 \text{ m}} = 0,419947507$$

$$\bullet Q = C_d \times A_2 \times \frac{1}{1-\beta^4} \times \frac{\sqrt{2(P^1-P^2)}}{\rho}$$

(Sumber : Mc Cabe. 1993:221)

$$= 0,61 \times 0,000201 \text{ m}^2 \times \frac{1}{1-(0,419947507)^4} \times \frac{2 \times 137,34 \frac{\text{kg}}{\text{ms}^2}}{1,1827 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$= 0,001898274 \text{ m}^3/\text{s} = 113,89 \text{ Lpm}$$

b. Pada laju alir udara 122,4 Lpm

$$h_1 = -0,85 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$h_2 = 0,85 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$A_1 = 0,00114 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,000201 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{mix}} = 1,2037 \text{ kg/m}^3$$

Untuk menghitung laju alir syngas pada laju alir udara 122,4 Lpm digunakan rumus yang sama, sehingga laju alir syngas yang didapat 124,4082 Lpm.

c. Pada laju alir udara 136,84 Lpm

$$h_1 = -0,925 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$h_2 = 0,925 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$A_1 = 0,00114 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,000201 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{mix}} = 1,2145 \text{ kg/m}^3$$

Untuk menghitung laju alir syngas pada laju alir udara 136,84 Lpm digunakan rumus yang sama, sehingga laju alir syngas yang didapat 129,95 Lpm.

8. Perhitungan Kecepatan Gasifikasi Spesifik (SGR)

Kecepatan Gasifikasi Spesifik dihitung menggunakan hubungan antara laju pemakaian bahan bakar (gr/s), periode operasi eksperimen dan luas potongan

melintang reaktor.

$$\text{SGR} = \frac{\text{Laju pemakaian BB}}{\text{Luas melintang reaktor}}$$

(Sumber: Handika, Allin: 2009)

a. Pada laju alir udara 105,9961 Lpm

- Laju pemakaian BB = 0,5462 gr/s
- Luas melintang reaktor = 0,00020096 m²

$$\text{SGR} = \frac{\text{Laju pemakaian BB}}{\text{Luas melintang reaktor}}$$

$$\text{SGR} = \frac{0,5462 \text{ gr/s}}{0,00020096 \text{ m}^2}$$

$$\text{SGR} = 2717,953822 \text{ gr/s m}^2$$

b. Pada laju alir udara 122,4 Lpm

- Laju pemakaian BB = 0,5643 gr/s
- Luas melintang reaktor = 0,00020096 m²

$$\text{SGR} = \frac{\text{Laju pemakaian BB}}{\text{Luas melintang reaktor}}$$

$$\text{SGR} = \frac{0,5643 \text{ gr/s}}{0,00020096 \text{ m}^2}$$

$$\text{SGR} = 2808,021497 \text{ gr/s m}^2$$

c. Pada laju alir udara 136,84 Lpm

- Laju pemakaian BB = 0,6536 gr/s
- Luas melintang reaktor = 0,00020096 m²

$$\text{SGR} = \frac{\text{Laju pemakaian BB}}{\text{Luas melintang reaktor}}$$

$$\text{SGR} = \frac{0,6536 \text{ gr/s}}{0,00020096 \text{ m}^2}$$

$$\text{SGR} = 3252,388535 \text{ gr/s m}^2$$

9. Perhitungan Kecepatan Produksi Gasifikasi Spesifik (SPGR)

Kecepatan produksi gas spesifik ialah kecepatan produksi gas hasil pada STP perluas melintang dari *gasifier*.

$$\text{SPGR} = \frac{\text{Laju alir syngas}}{\text{Luas melintang reaktor}}$$

(Sumber: Handika, Allin: 2009)

a. Pada laju alir udara 105,9961 Lpm

- Laju alir syngas = 6,833788 m³/h
- Luas melintang reaktor = 0,00020096 m²

$$\text{SPGR} = \frac{\text{Laju alir syngas}}{\text{Luas melintang reaktor}}$$

$$\text{SPGR} = \frac{6,833788 \text{ m}^3/\text{h}}{0,00020096 \text{ m}^2}$$

$$\text{SPGR} = 34005,71 \text{ m/h}$$

b. Pada laju alir udara 122,4 Lpm

- Laju alir syngas = 7,464495 m³/h
- Luas melintang reaktor = 0,00020096 m²

$$\text{SPGR} = \frac{\text{Laju alir syngas}}{\text{Luas melintang reaktor}}$$

$$\text{SPGR} = \frac{7,464495 \text{ m}^3/\text{h}}{0,00020096 \text{ m}^2}$$

$$\text{SPGR} = 37144,18 \text{ m/h}$$

c. Pada laju alir udara 136,84 Lpm

- Laju alir syngas = 7,797 m³/h
- Luas melintang reaktor = 0,00020096 m²

$$\text{SPGR} = \frac{\text{Laju alir syngas}}{\text{Luas melintang reaktor}}$$

$$\text{SPGR} = \frac{7,797 \text{ m}^3/\text{h}}{0,00020096 \text{ m}^2}$$

$$\text{SPGR} = 38798,77 \text{ m/h}$$

10. Nilai Kalor (*Heating Value*)

Dari presentase komposisi *syngas* dapat dilakukan perhitungan *Lower Heating Value* (LHV) pada *syngas* dengan persamaan :

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = \sum_{i=1}^n (Y_i \cdot \text{LHV}_i)$$

Sumber : Anil Kr., 2000

Dimana :

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = \text{Lower Heating Value (LHV) syngas (kJ/Nm}^3\text{)}$$

$$Y_i = \text{Fraksi volume (konsentrasi) dari unsur syngas (\%)}$$

$$\text{LHV}_i = \text{Lower Heating Value (LHV) dari unsur syngas (kJ/Nm}^3\text{)}$$

a. Pada laju alir udara 105,9961 Lpm

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = \% \text{CO} \times \text{LHV}_{\text{CO}} + \% \text{CH}_4 \times \text{LHV}_{\text{CH}_4} + \% \text{H}_2 \times \text{LHV}_{\text{H}_2}$$

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = (0,2126 \times 12,63 + 0,02019 \times 35,88 + 0,13836 \times 10,78) \text{ MJ/m}^3$$

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = 4,901076 \text{ MJ/m}^3$$

b. Pada laju alir udara 122,4 Lpm

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = \% \text{CO} \times \text{LHV}_{\text{CO}} + \% \text{CH}_4 \times \text{LHV}_{\text{CH}_4} + \% \text{H}_2 \times \text{LHV}_{\text{H}_2}$$

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = (0,2053 \times 12,63 + 0,01833 \times 35,88 + 0,13196 \times 10,78) \text{ MJ/m}^3$$

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = 4,537469 \text{ MJ/m}^3$$

c. Pada laju alir udara 136,84 Lpm

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = \% \text{CO} \times \text{LHV}_{\text{CO}} + \% \text{CH}_4 \times \text{LHV}_{\text{CH}_4} + \% \text{H}_2 \times \text{LHV}_{\text{H}_2}$$

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = (0,1905 \times 12,63 + 0,02415 \times 35,88 + 0,12042 \times 10,78) \text{ MJ/m}^3$$

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = 4,5706446 \text{ MJ/m}^3$$

11. Efisiensi Gasifikasi

$$\square = \frac{\text{flowrate syngas (m}^3 \text{ s}^{-1}) \times \text{LHV syngas (kkal m}^{-3}\text{)}}{\text{mass flowrate bahan bakar (kg s}^{-1}) \times \text{LHV bahan bakar (kkal kg}^{-1}\text{)}}$$

Dimana :

$$\text{Flowrate syngas} = \text{laju alir syngas (m}^3\text{/s)}$$

$$\text{LHV syngas} = \text{Lower Heating Value (LHV) syngas (kkal/m}^3\text{)}$$

Mass flowrate bahan bakar = Laju alir massa bahan bakar (kg/s)

LHV bahan bakar = *Lower Heating Value* (LHV) bahan bakar
(kkal/kg)

a. Pada laju alir udara 105,9961 Lpm

$$\eta = \frac{0,0018982 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 1176,25824 (\text{kkal m}^3)}{0,0005462 (\text{kg s}) \times 5013,6 (\text{kkal kg})}$$

$$\eta = 81,53\%$$

b. Pada laju alir udara 122,4 Lpm

$$\eta = \frac{0,002073 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 1088,99256 (\text{kkal m}^3)}{0,0005643 (\text{kg s}) \times 5013,6 (\text{kkal kg})}$$

$$\eta = 79,81\%$$

c. Pada laju alir udara 136,84 Lpm

$$\eta = \frac{0,002166 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 1096,95471 (\text{kkal m}^3)}{0,0006536 (\text{kg s}) \times 5013,6 (\text{kkal kg})}$$

$$\eta = 72,50\%$$