LAMPIRAN II
PERHITUNGAN

1. Menghitung Massa LPG

Basis Perhitungan = 4 Jam Operasi

Menghitung volume LPG dengan tekanan 239 atm.

T = 30^0C + 273

= 303 K

R = 0,0825 $\frac{liter\ x\ atm}{mol.K}$

Mol LPG = 67,193 mol (Sumber: Edukasi Pertamina, 2011)

BM campuran dari LPG dengan komposisi sebagai berikut:

Propana (C_3H_8) = 30%

Butana (C_4H_{10}) = 70% (Sumber: Edukasi Pertamina, 2011)

Dapat dihitungan dengan cara seperti dibawah ini:

Propana (C_3H_8)	=	44 Kg/Kmol	x 30%	= 13,2 Kg/Kmol
Butana (C_4H_{10})	=	58 Kg/Kmol	x 70%	= 40,6 Kg/Kmol +
BM Campuran				= 53,8 Kg/Kmol

Maka volume LPG yang digunakan adalah:

P.V = n.R.T (Sumber: Hougen, Hal 52)

$$V = \frac{n\ x\ R\ x\ T}{P}$$

$$= \frac{47{,}993\ mol\ x\ 0{,}0825\ \frac{liter\ \ x\ atm}{mol\ .\ K}\ x\ 303\ K}{239\ atm}$$

= 5,019 liter

Maka massa LPG yang digunakan dapat diitung dengan menggunakan persaman berikut:

P.V = n.R.T (Sumber: Hougen, Hal 52)

P.V = $\frac{m}{BM}$ x R x T

P x V x BM = m x R x T

$$m = \frac{\text{P x V x BM}}{R\ x\ T}$$

$$= \frac{239\ atm\ \ x\ 5{,}019\ liter\ \ x\ 53{,}8\ gr\ /mol}{0{,}0825\ \frac{liter\ \ x\ atm}{mol\ .\ K}\ x\ 303\ K}$$

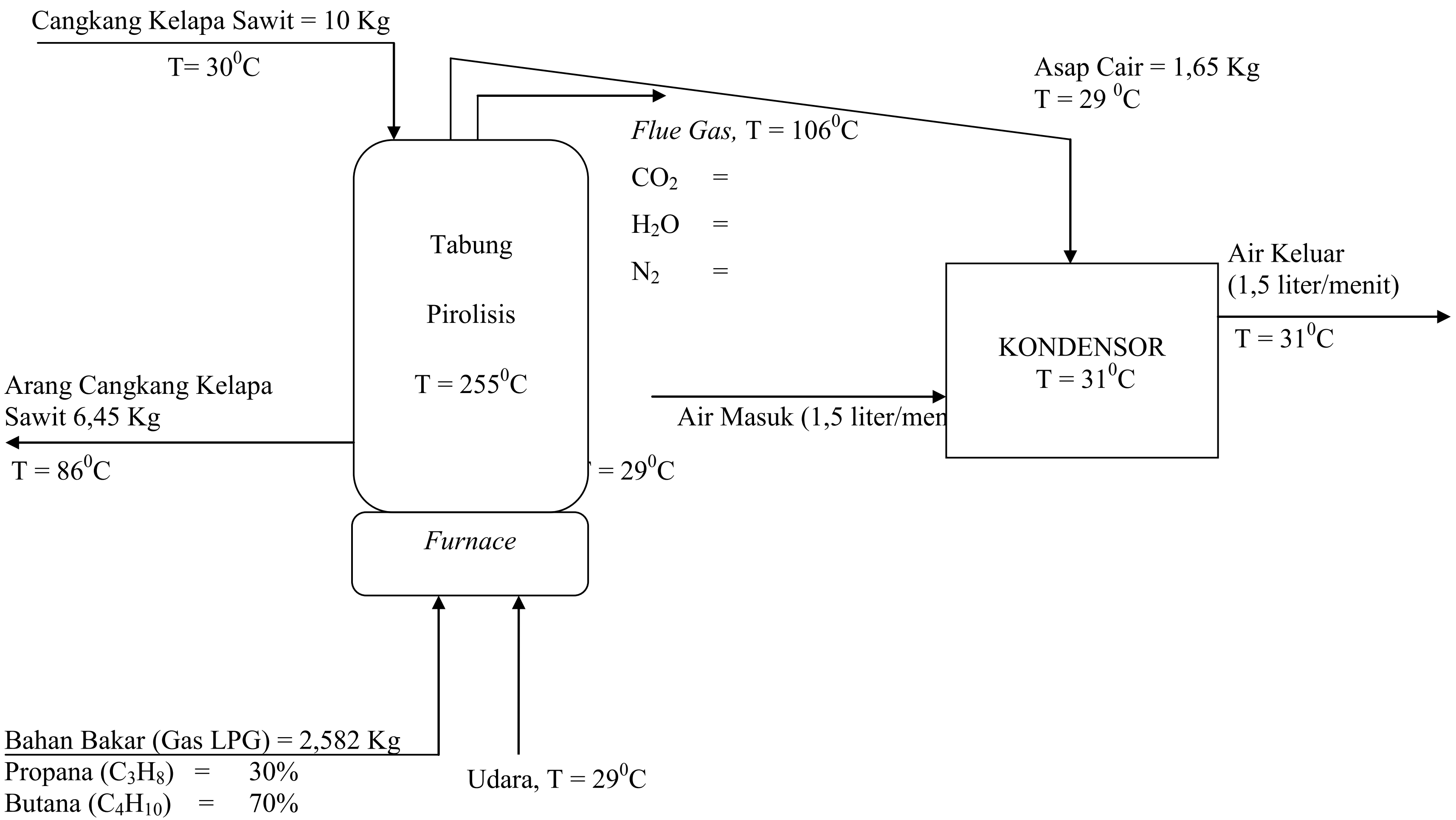
$$= 2582 \text{ gr x } \frac{Kg}{1000\ gr}$$

= 2,582 Kg

Dengan cara yang sama didapatkan massa gas LPG yang digunakan untuk proses pirolisis cangkang kelapa sawit dengan variasi tekanan pada LPG selama 4 jam operasi adalah sebagai berikut:

Tabel 22. Massa Gas LPG

Variasi Tekanan LPG (atm)	Massa (Kg)
239	2,582
240	3,099
241	3,615

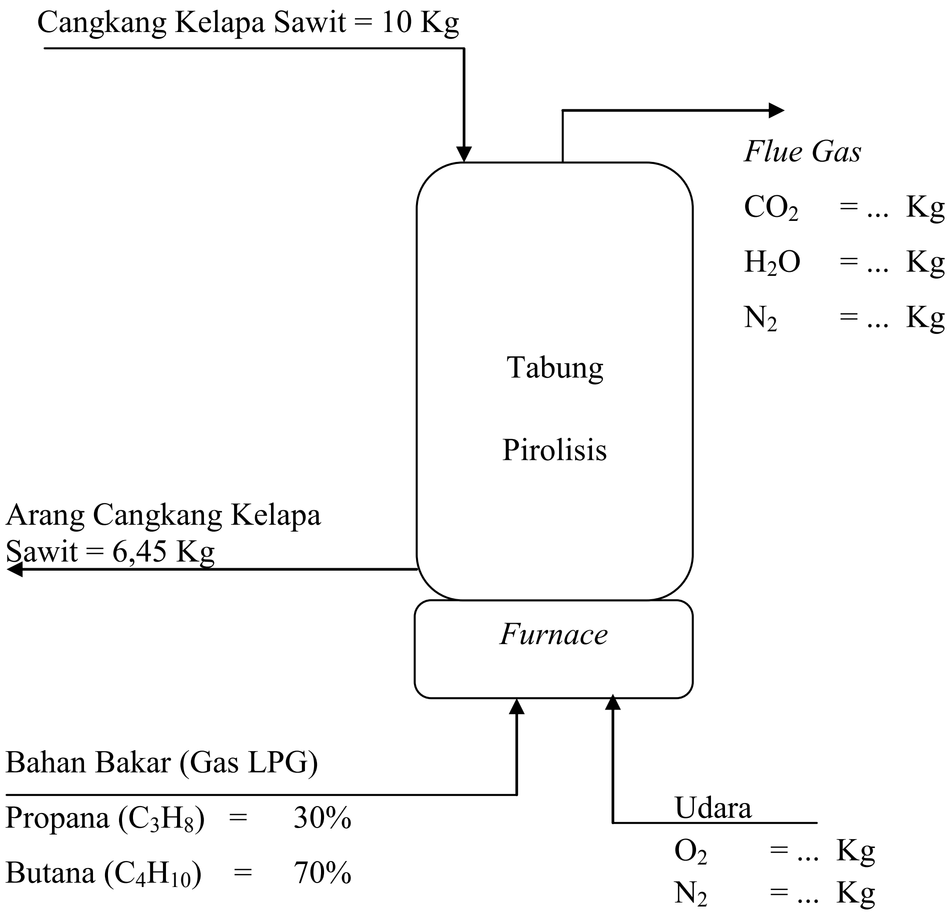


Gambar 10. Skema Alat Pirolisis dengan Tekanan LPG 239 atm

2. Neraca Massa

2.a Menghitung Neraca Massa pada *Furnace*

Basis Perhitungan 4 Jam Operasi



Gambar 11. Skema Reaktor dan *Furnace* (239 atm)

A. Menghitung Mol dan Massa dari masing-masing Komponen Gas LPG

Mol Campuran $= \frac{\text{Massa Total LPG}}{\text{BM campuran}}$ (Moran Shapiro, Hal 257)

$= \frac{2{,}582 \text{ Kg}}{53{,}8 \text{ Kg/Kmol}}$

$= 0{,}048$ Kmol

Propana (C_3H_8) = 30% x 0,048 Kmol
= 0,014 Kmol x 44 Kg/Kmol
= 0,634 Kg

Butana (C_4H_{10}) = 70% x 0,048 Kmol
= 0,034 Kmol x 58 Kg/Kmol
= 1,948 Kg

B. Reaksi Pembakaran yang Terjadi di dalam *Furnace*

Reaksi 1

$$C_3H_8 + 5\,O_2 \longrightarrow 3CO_2 + 4H_2O$$

	C_3H_8	O_2	CO_2	H_2O	
M	0,014	-	-	-	Kmol
B	0,014	0,072	0,043	0,058	Kmol +
S	0	0,072	0,043	0,058	Kmol
BM	44	32	44	18	Kg/Kmol
Massa	0	2,304	1,901	1,037	Kg

Reaksi 2

$$C_4H_{10} + 6{,}5\,O_2 \quad 4\,CO_2 + 5\,H_2O$$

	C_4H_{10}	O_2	CO_2	H_2O	
M	0,034	-	-	-	Kmol
B	0,034	0,218	0,134	0,168 +	Kmol
S	0	0,218	0,134	0,168	Kmol
BM	58	32	44	18	Kg/Kmol
Massa	0	6,988	5,913	3,024	Kg

C. Menghitung Udara Suplai

O_2 teoritis = Reaksi 1 + Reaksi 2

= (0,072+ 0,218) Kmol

= 0,290 Kmol

Syarat udara Excess yang diperbolehkan untuk pembakaran dengan menggunakan bahan bakar LPG adalah 5-10 %. (Himmeblau, 1996)

Asumsi udara excess = 8%

% Ekses $= \frac{(O_{2\ Suplai} - O_{2}\ teoritis\ )}{O_{2\ Suplai}}$ x 100% (Himmeblau, 1996)

8% $= \frac{O_{2\ Suplai} - 0{,}290\ Kmol}{O_{2\ Suplai}}$ x 100 %

$\frac{8\%}{100\ \%} = \frac{O_{2\ Suplai} - 0{,}290\ Kmol}{O_{2\ Suplai}}$

0,08 O_2 Suplai = O_2 Suplai – 0,290 Kmol

-0,92 O_2 Suplai = - 0,290 Kmol

O_2 Suplai = 0,316 Kmol x 32 Kg/Kmol

= 10,099 Kg

Asumsi komposisi udara adalah:

O_2 = 21%

N_2 = 79%

N_2 disuplai = 79/21 x O_2 disuplai

= 79/21 x 0,316 Kmol

= 1,357 Kmol x 28 Kg/Kmol

= 37,993 Kg

Total Udara disuplai = (O_2 disuplai + N_2 disuplai)

= (10,099 + 37,993) Kg

= 48,092, Kg

D. Menghitung Komposisi *Flue Gas*

CO_2 = CO_2 Reaksi 1 + CO_2 Reaksi 2

= (0,043 + 0,134) Kmol

= 0,178 Kmol x 44 Kg/Kmol

= 7,813 Kg

H_2O = H_2O Reaksi 1 + H_2O Reaksi 2

= (0,058 + 0,168) Kmol

= 0,226 Kmol x 18 Kg/Kmol

= 4,060 Kg

N_2 = N_2 disuplai

= 1,248 Kmol x 28 Kg/Kmol

= 37,993 Kg

O_2 Sisa= O_2 Suplai – O_2 Teoritis

= 0,317 Kmol – 0,290 Kmol

= 0,027 Kmol x 32 Kg/Kmol

= 0,808 Kg

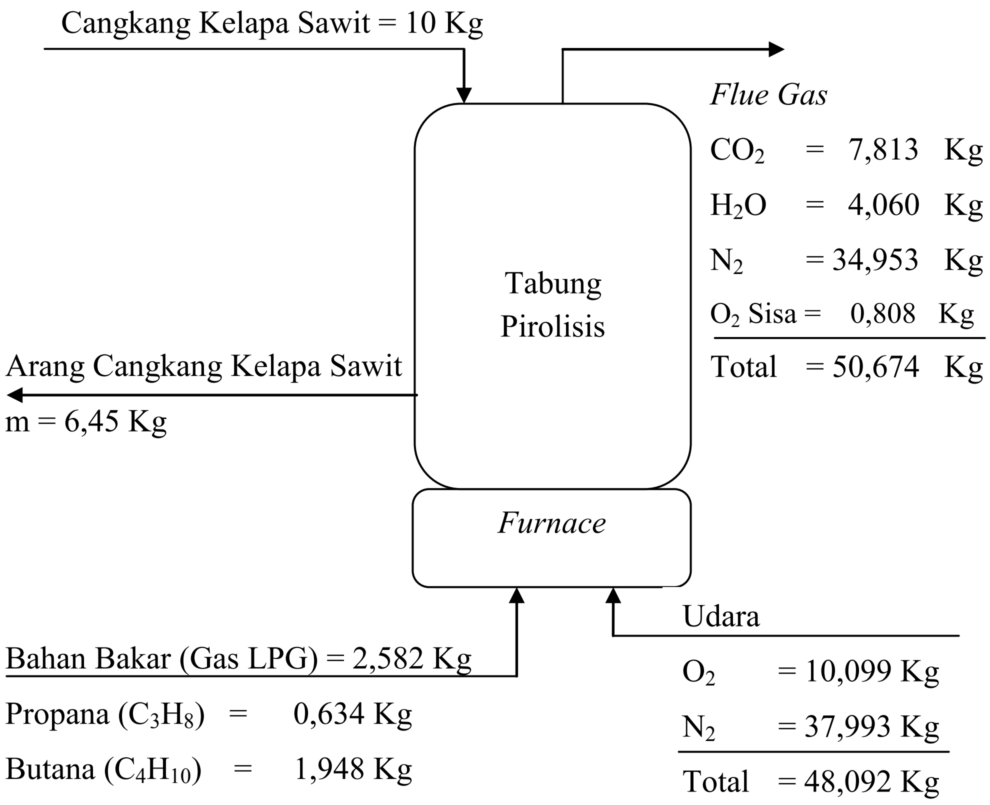
Maka, Komposisi Flue Gas Total :

CO_2	=	0.178 Kmol	= 9,947 %
H_2O	=	0,226 Kmol	= 12,635 %
N_2	=	1,357 Kmol	= 76,004 %
O_2 Sisa	=	0,025 Kmol	= 1,414 %
Total	=	1,785 Kmol	= 100 %

Tabel 23. Neraca Massa pada *Furnace* (239 atm)

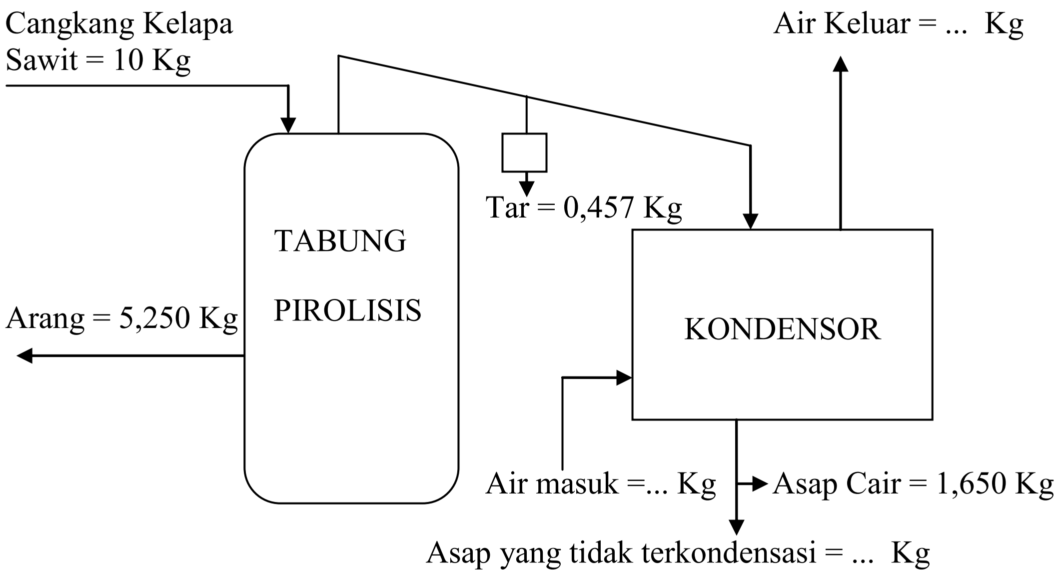
Komponen	Input		Output	
	Kmol	Kg	Kmol	Kg
C_3H_8	0.014	0,634	-	-
C_4H_{10}	0.034	1,948	-	-
O_2	0,316	10,099	-	-
N_2	1,357	37,993	0.178	34,953
H_2O	-	-	0,226	4,060
CO_2	-	-	1,248	7,813
O_2 Sisa	-	-	0,025	0,808
Total		50,674		50,674

Neraca Massa total pada *Furnace* dan Tabung Pirolisis dengan variasi tekanan LPG 239 atm dapat dilihat pada gambar 12:



Gambar 12. Blok Diagram Neraca Massa pada *Furnace* (239 atm)

2.b Menghitung Neraca Massa pada Reaktor dan Kondensor



Gambar 13. Skema Reaktor dan Kondensor (239 atm)

a. Menghitung Massa Asap yang tidak Terkondensasi

Cangkang Kelapa Sawit	= 10 Kg
Arang	= 6,450 Kg
Asap Cair	= 1,650 Kg
Tar	= 0,457 Kg

Massa asap tidak terkondensasi =Massa cangkang kelapa sawit – (Massa Arang + massa asap cair + massa tar)

=10 Kg – (6,450 Kg + 1,650 Kg + 0,457 Kg)

= 1,443 Kg

b. Menghitung Massa Kebutuhan Air Pendingin

Kebutuhan Air Pendingin (Volume) = 1,5 liter/menit x 240 menit

$= 360 \text{ liter} \times \frac{1\ m^3}{1000\ liter}$

$= 0{,}36\ m^3$

Massa Air Pendingin = Volume air x Densitas Air

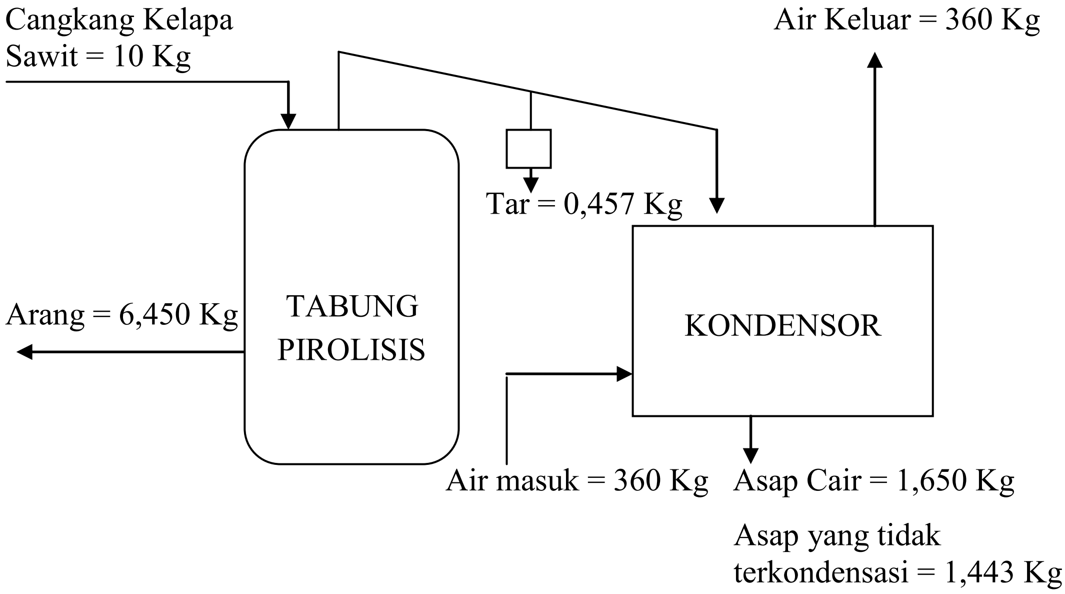
= 0,36 m^3 x 1000 Kg/m^3

= 360 Kg

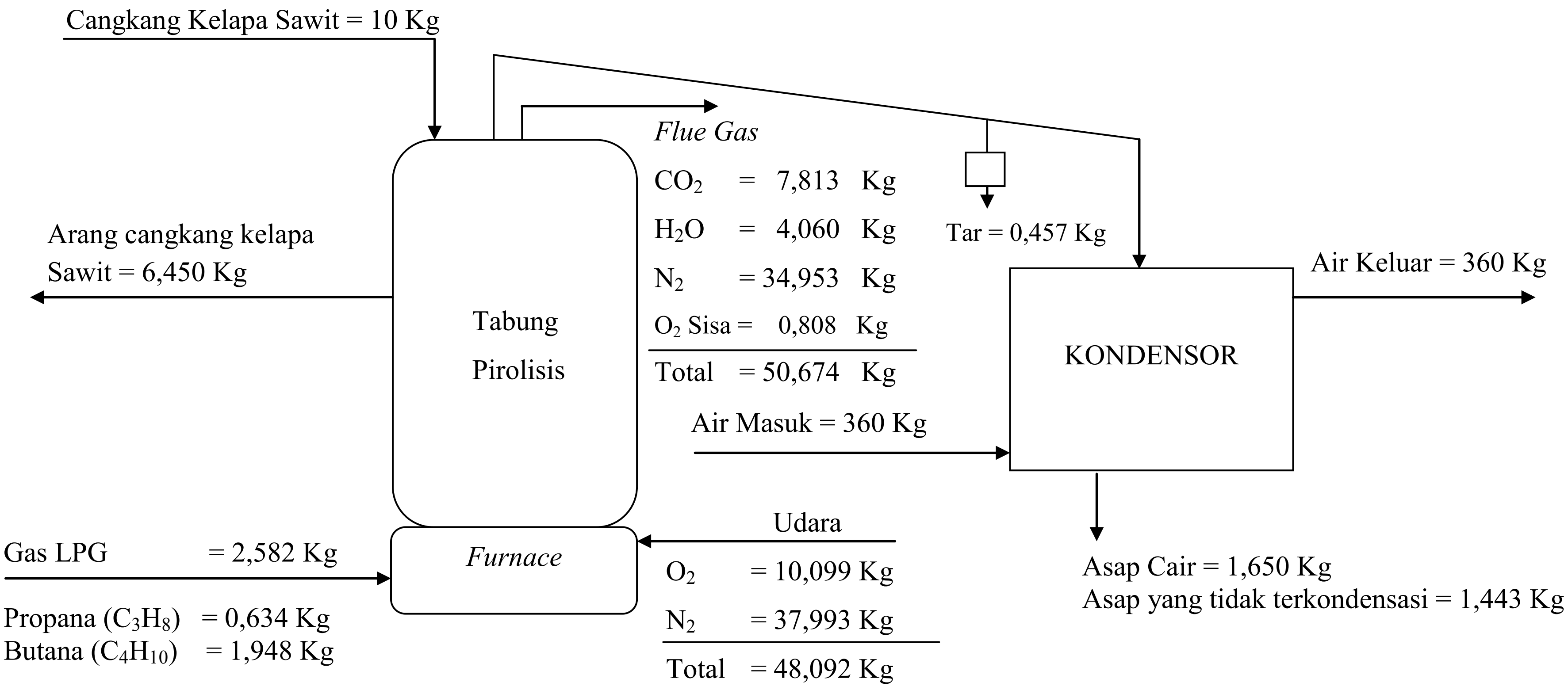
Tabel 24. Neraca Massa pada Reakor dan Kondensor (239 atm)

Komponen	Input (kg)	Output (Kg)
Cangkang kelapa sawit	10	-
Arang	-	6,450
Asap cair	-	1,650
Tar	-	0,457
Asap yang tidak terkondensasi	-	1,443
Air masuk kondensor	360	-
Air Keluar kondensor	-	360
Total	370	370

Neraca massa total pada tabung pirolisis dan kondensor dengan variasi tekanan LPG 239 atm dapat dilihat pada gambar 14.



Gambar 14. Blok Diagram Neraca Massa pada Reaktor dan Kondensor (239 atm)



INPUT

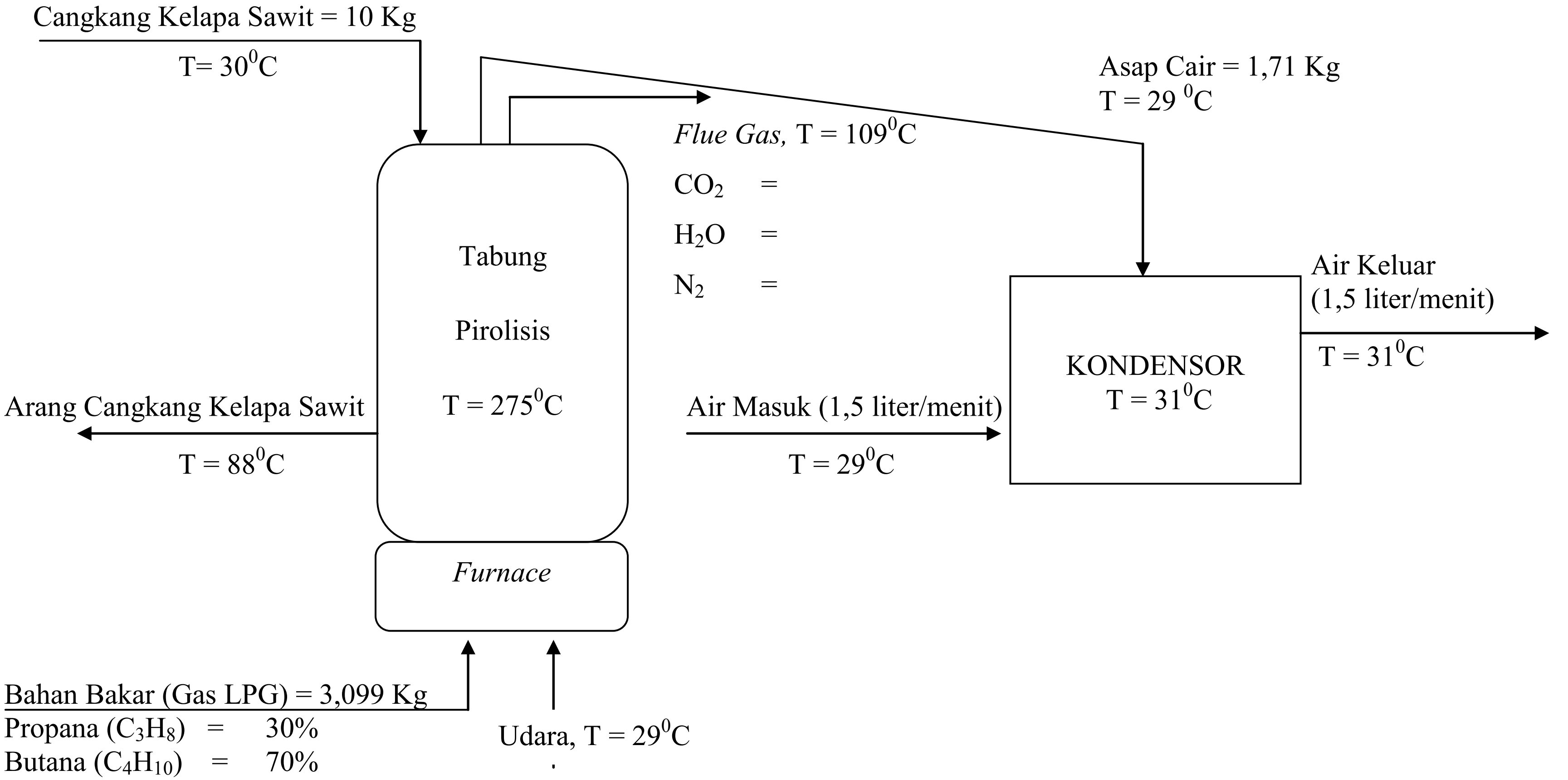
Gas LPG	= 2,582	Kg
Udara	= 48,092	Kg
Cangkang kelapa sawit	= 10,000	Kg
Air	= 360,000	Kg
Total	= 420,674	Kg

OUTPUT

Flue gas	= 50,674	Kg
Arang	= 6,450	Kg
Tar	= 0,457	Kg
Asap cair	= 1,650	Kg
Air	= 360,000	Kg
Asap tak terkonden	= 1,443	Kg
Total	= 420,674	Kg

Gambar 15. Blok Diagram Neraca Massa pada Alat Pirolisis secara Keseluruhan (239 atm)

Dengan cara yang sama, tabel dan blok diagram neraca massa pada alat pirolisis dengan tekanan LPG 240 atm dan 241 atm adalah sebagai berikut:

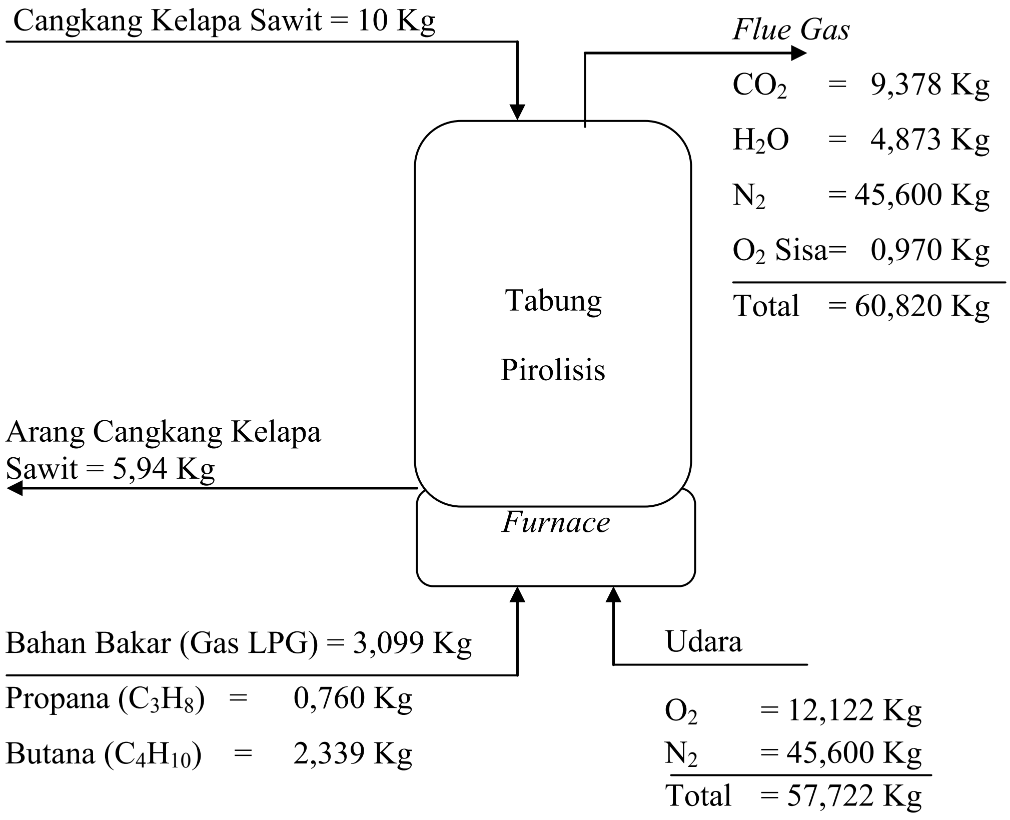


Gambar 16. Skema Alat Pirolisis dengan Laju Alir Bahan Bakar 240 atm

Tabel 25. Neraca Massa pada *Furnace* (240 atm)

Komponen	Input		Output	
	Kmol	Kg	Kmol	Kg
C_3H_8	0.017	0,760	-	-
C_4H_{10}	0.040	2,339	-	-
O_2	0,379	12,122	-	-
N_2	1,629	45,600	1,629	45,600
H_2O	-	-	0,271	4,873
CO_2	-	-	0.213	9,378
O_2 Sisa			0,030	0,970
Total		60,820		60,820

Neraca massa total pada *Furnace* dan tabung pirolisis dengan variasi tekanan LPG 240 atm dapat dilihat pada gambar 17.

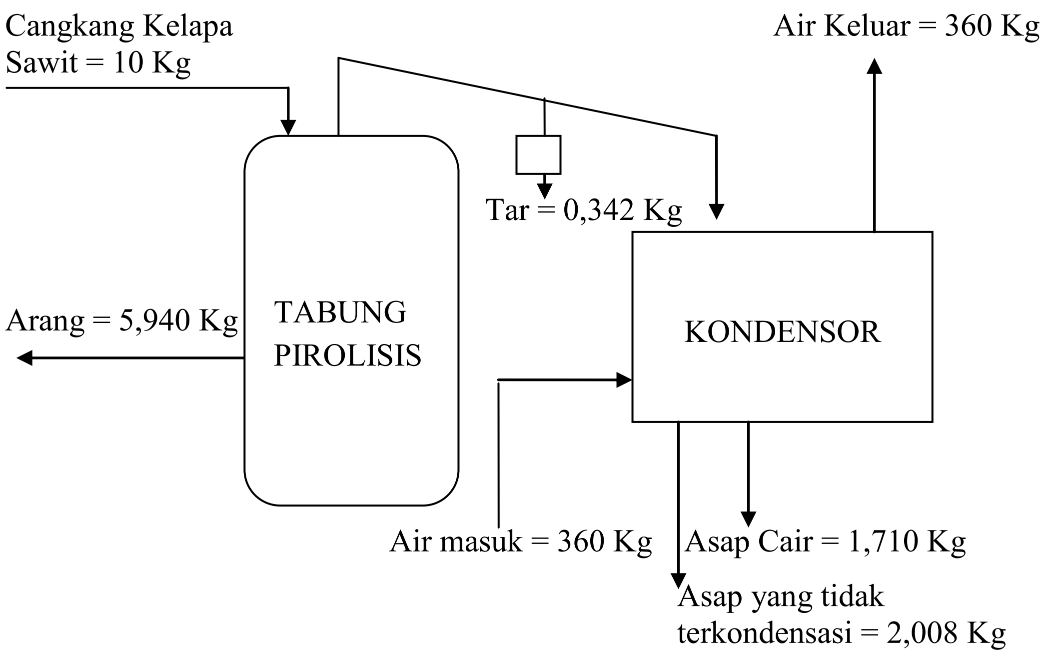


Gambar 17. Blok Diagram Neraca Massa pada *Furnace* (240 atm)

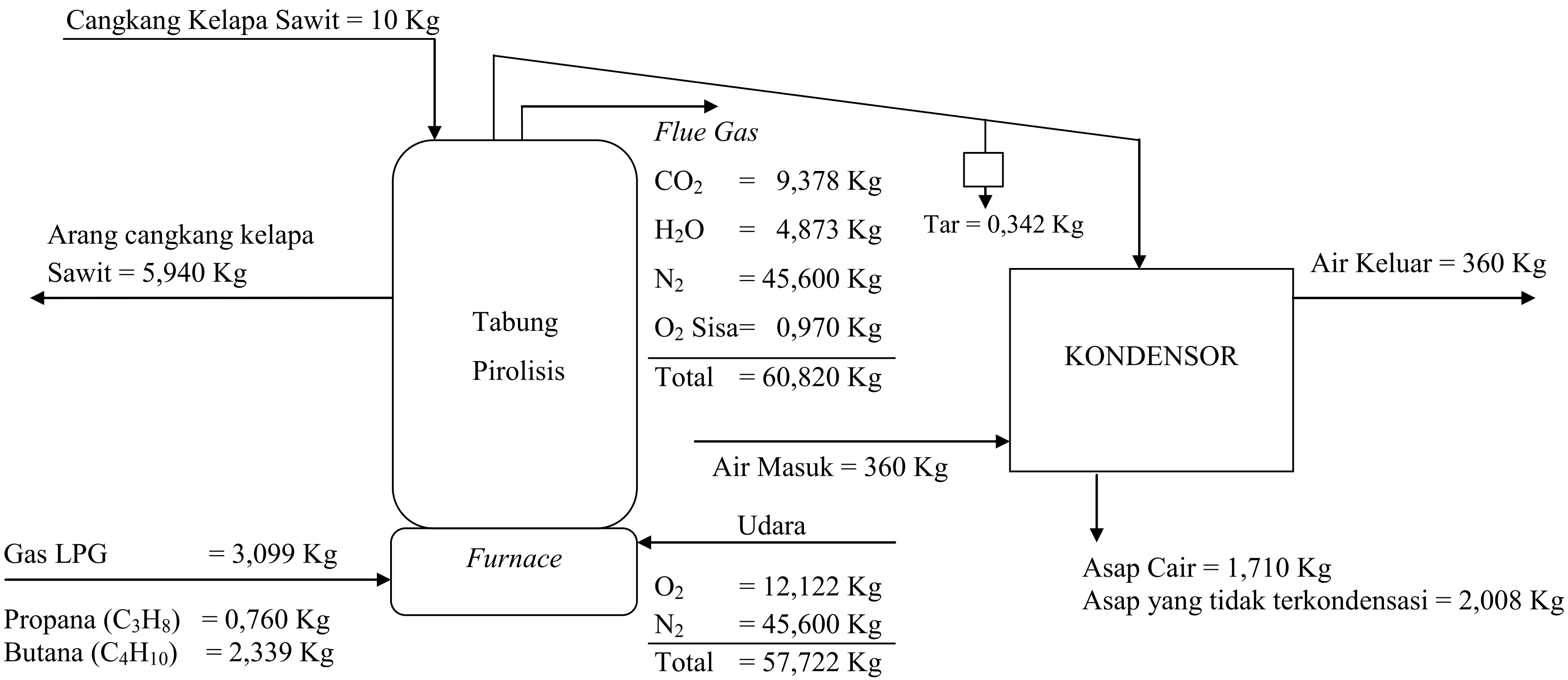
Tabel 26. Neraca Massa pada Reakor dan Kondensor (240 atm)

Komponen	Input (kg)	Output (Kg)
Cangkang kelapa sawit	10	-
Arang	-	5,940
Asap cair	-	1,710
Tar	-	0,342
Asap yang tidak terkondensasi	-	2,008
Air masuk kondensor	360	-
Air Keluar kondensor	-	360
Total	370	370

Neraca massa total pada tabung pirolisis dan kondensor untuk variasi tekanan LPG 240 atm dapat dilihat pada gambar 18.



Gambar 18. Blok Diagram Neraca Massa pada Reaktor dan Kondensor (240 atm)



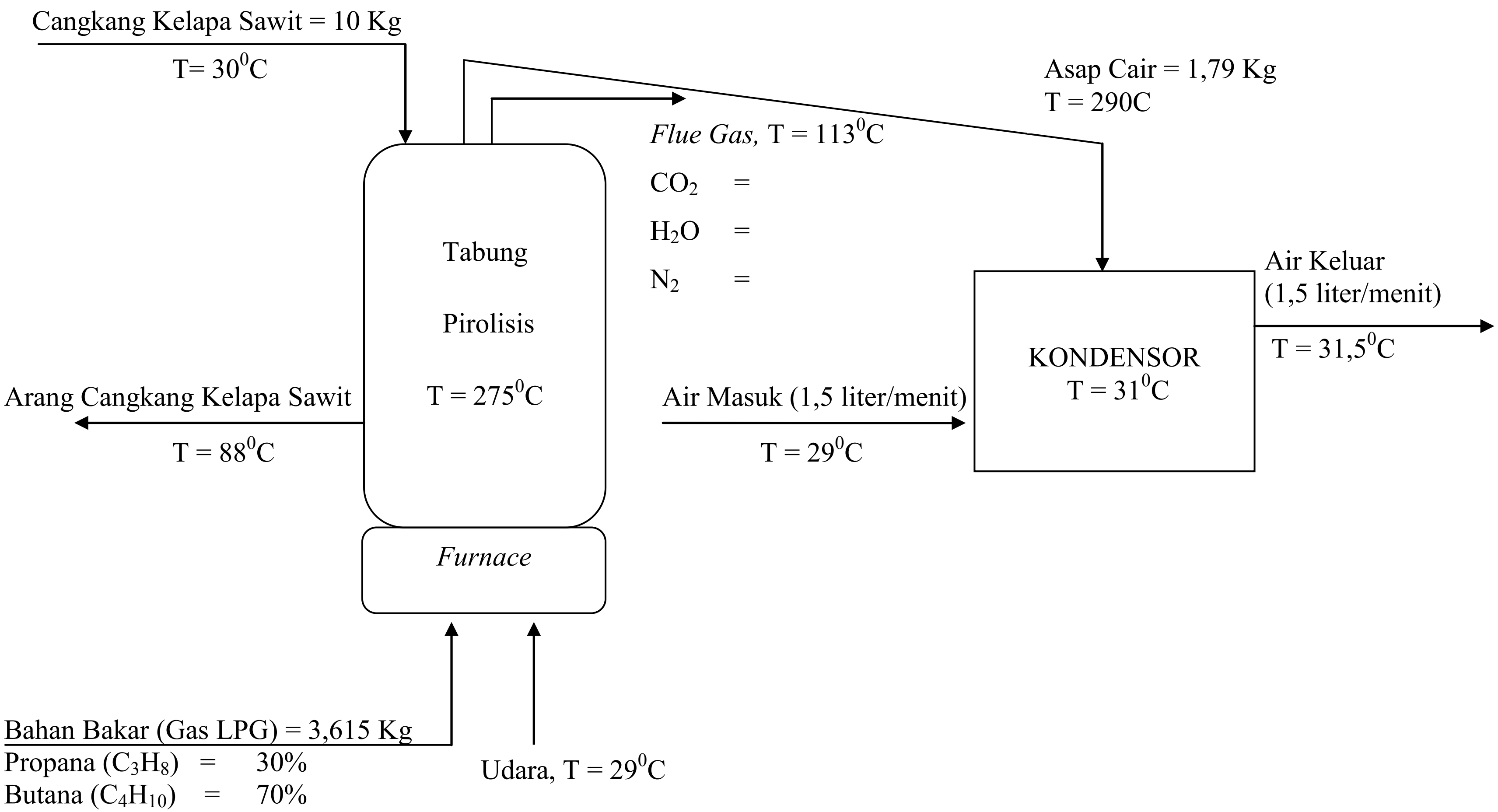
INPUT

Gas LPG	= 3,099	Kg
Udara	= 57,721	Kg
Cangkang kelapa sawit	= 10,000	Kg
Air	= 360,000	Kg
Total	= 430,820	Kg

OUTPUT

Flue gas	= 60,820	Kg
Arang	= 5,940	Kg
Tar	= 0,342	Kg
Asap cair	= 1,710	Kg
Air	= 360,000	Kg
Asap tak terkonden	= 2,008	Kg
Total	= 430,820	Kg

Gambar 19. Blok Diagram Neraca Massa pada Alat Pirolisis secara Keseluruhan (240 atm)

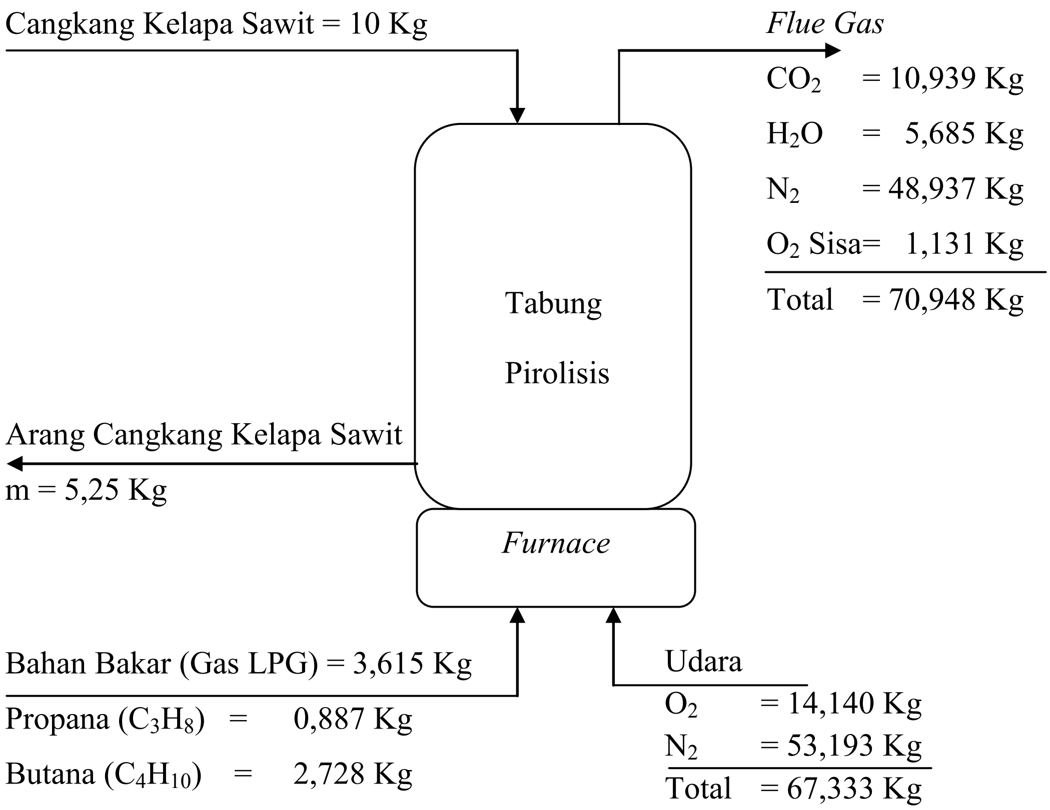


Gambar 20. Skema Alat Pirolisis dengan Laju Alir Bahan Bakar 241 atm

Tabel 27. Neraca Massa pada *Furnace* (241 atm)

Komponen	Input		Output	
	Kmol	Kg	Kmol	Kg
C_3H_8	0.020	0,887	-	-
C_4H_{10}	0.047	2,728	-	-
O_2	0,442	14,140	-	-
N_2	1,900	53,193	1,900	53,193
H_2O	-	-	0,316	5,685
CO_2	-	-	0,249	10,939
O_2 Sisa	-	-	0,035	1,131
Total		70,948		70,948

Neraca massa total pada *furnace* dan tabung pirolisis untuk variasi tekanan LPG 241 atm dapat dilihat pada gambar 21.

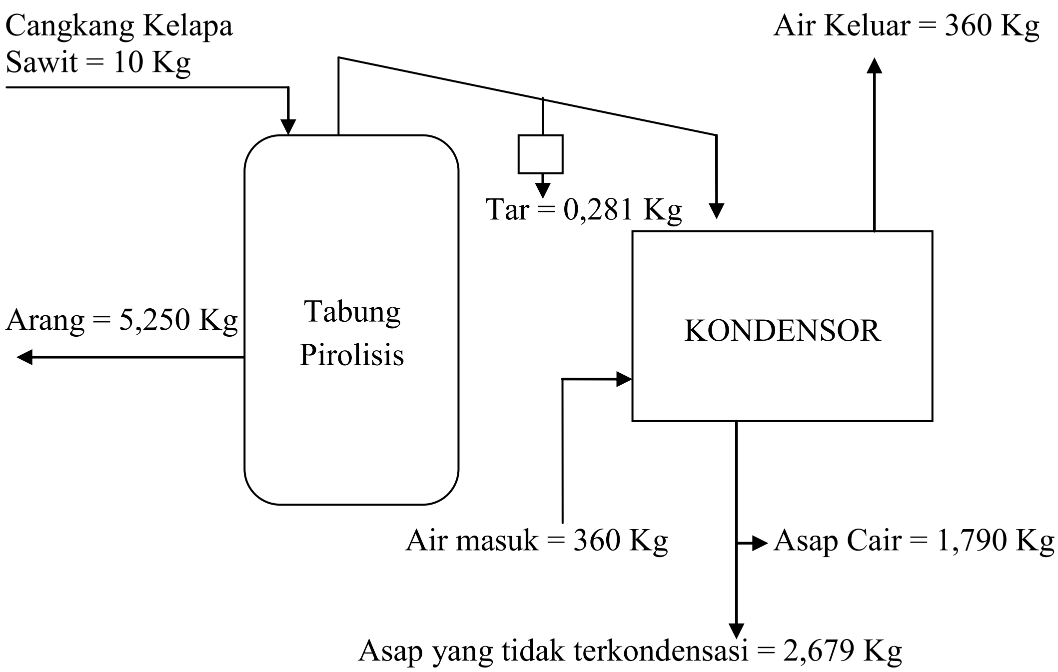


Gambar 21. Blok Diagram Neraca Massa pada *Furnace* (241 atm)

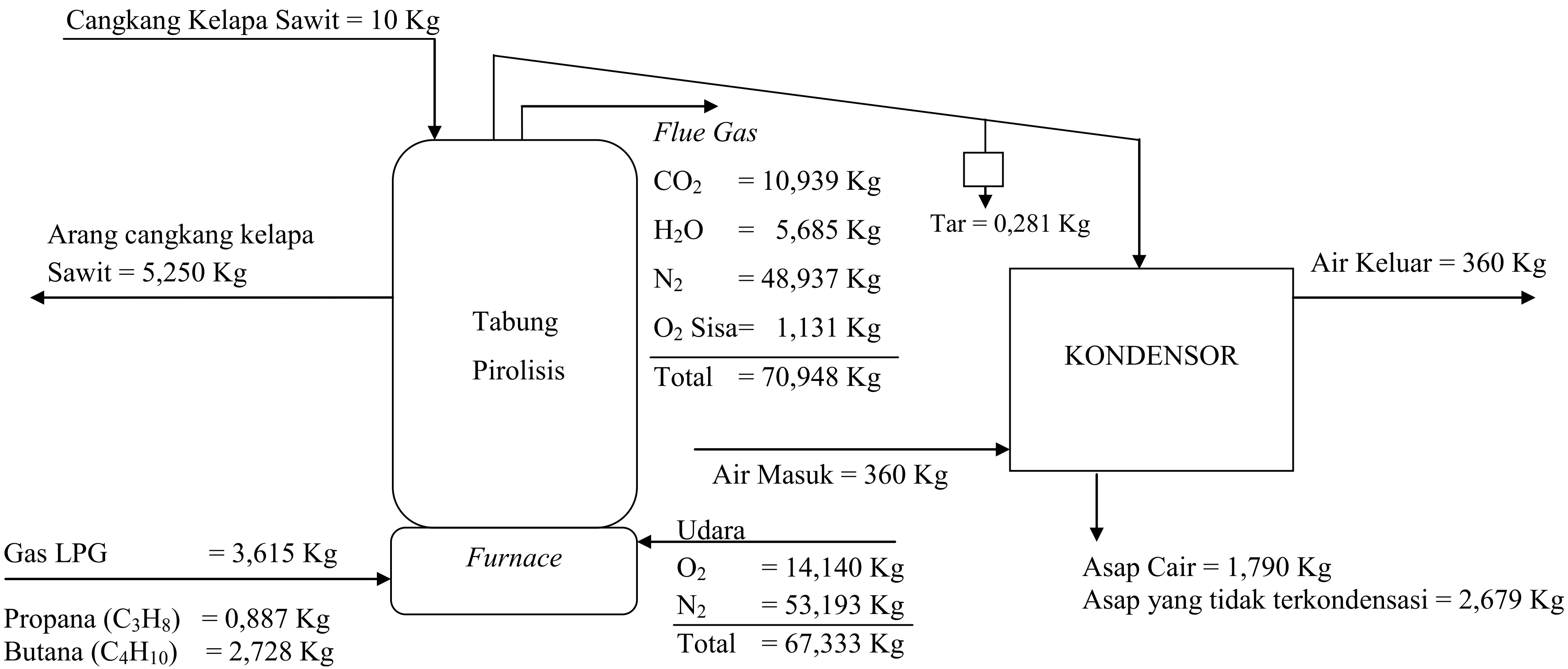
Tabel 28. Neraca Massa pada Reakor dan Kondensor (241 atm)

Komponen	Input (kg)	Output (Kg)
Cangkang kelapa sawit	10	-
Arang	-	5,25
Asap cair	-	1,790
Tar	-	0,281
Asap yang tidak terkondensasi	-	2,679
Air masuk kondensor	360	360
Air Keluar kondensor	-	
Total	370	370

Neraca massa total pada tabung pirolisis dan kondensor untuk variasi tekanan LPG 241 atm dapat dilihat pada gambar 22.



Gambar 22. Blok Diagram Neraca Massa pada Reaktor dan Kondensor (241 atm)



INPUT

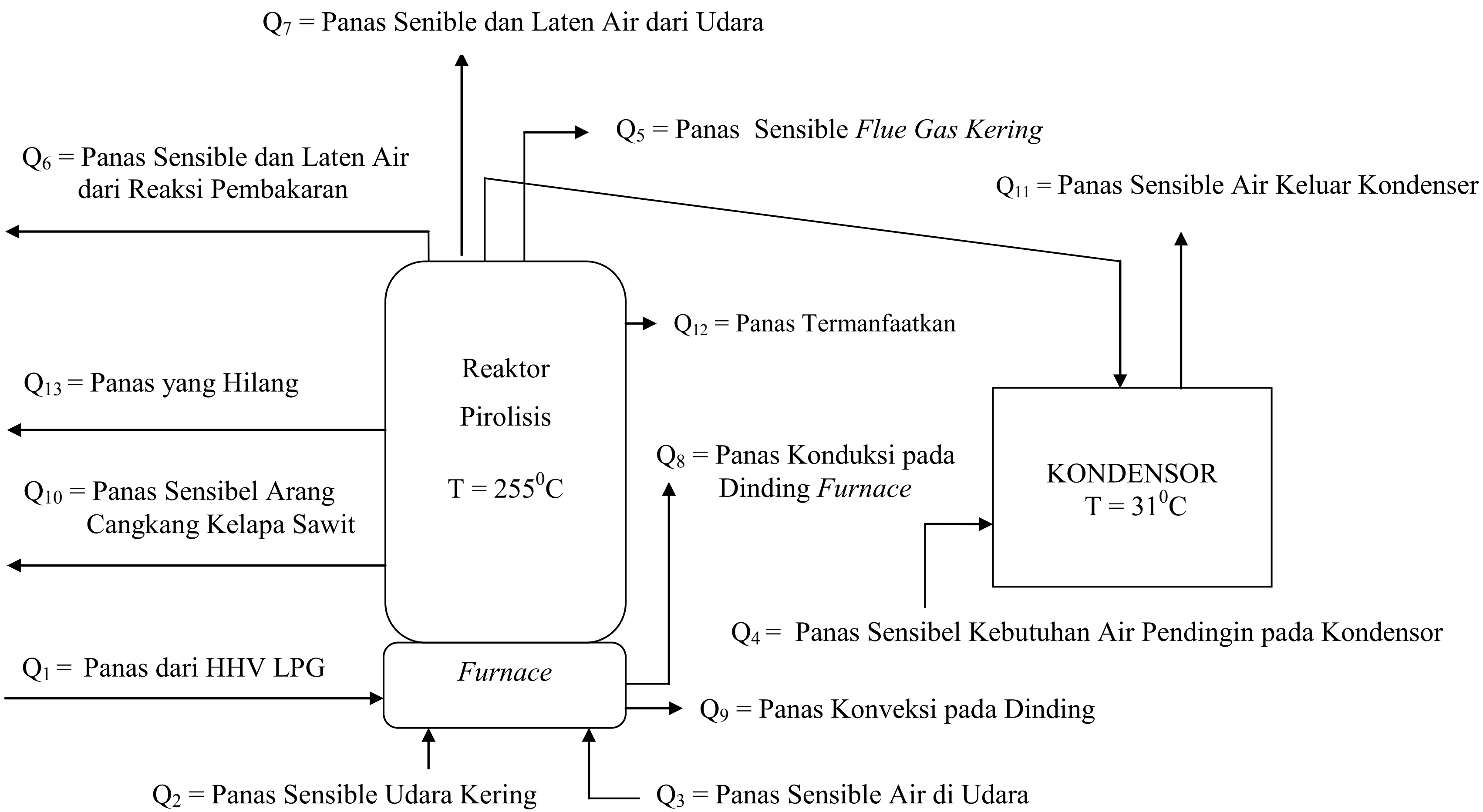
Gas LPG	= 3,615	Kg
Udara	= 67,333	Kg
Cangkang kelapa sawit	= 10,000	Kg
Air	= 360,000	Kg
Total	= 440,948	Kg

OUTPUT

Flue gas	= 70,948	Kg
Arang	= 5,250	Kg
Tar	= 0,281	Kg
Asap cair	= 1,790	Kg
Air	= 360,000	Kg
Asap tak terkonden	= 2,679	Kg
Total	= 440,948	Kg

Gambar 23. Blok Diagram Neraca Massa pada Alat Pirolisis secara Keseluruhan (241 atm)

3. Neraca Panas



Gambar 24. Skema Rancangan Blok Diagram Neraca Panas pada Alat Pirolisis

1). Menghitung Panas Pembakaran LPG

HHV Propana (C_3H_8)* = 45,4 Mj/Kg = 45400 Kj/Kg x $\frac{Kcal}{4{,}1868\ Kj}$

= 10843,60 Kcal/Kg

HHV Butana (C_4H_{10})* = 47,4 Mj/Kg = 47300 Kj/Kg x $\frac{Kcal}{4{,}1868\ Kj}$

= 11318,58 Kcal/Kg

(*Sumber: Envestra, Natural Gas, 2012)

Massa Propana (C_3H_8) = 0,634 Kg

Massa Butana (C_4H_{10}) = 1,948 Kg

Q_1 = Q C_3H_8 + Q C_4H_{10}

= (m x HHV C_3H_8) + (m x HHV C_4H_{10})

= (0,634 Kg x 10843,60 Kcal/Kg) + (1,948 Kg x 11318,58 Kcal/Kg)

= 6874,82 Kcal + 22043,58 Kcal

= 28918,40 Kcal

2). Menghitung Panas Sensible Udara

t_1 (T referen)	= 25^0C	T_1	= (273 + 25)	= 298 ^{0}K
t_2 (t udara masuk)	= 30^0C	T_2	= (273 + 30)	= 303 ^{0}K

2.a Menghitung Panas O_2 dari Udara

O_2 = 0,316 Kmol

Cp $O_2 = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_1) + \frac{c}{3}\ (T_2^2 + T_2.T_1 + T_1^2)$ (Hougen P 258)

Dan nilai *a, b*, dan *c* untuk udara didapat dari (Hougen P 255), yaitu :

$O_2 \rightarrow$ a = 6,117

b = 3,167 x 10^{-3}

c = -1,005 x 10^{-6}

Cp O_2 $= 6{,}117 + \frac{3{,}167\ x\ 10^{-3}}{2}(298 + 303) + \frac{-0{,}2656 x 10^{-6}}{3}(270907)$

= 6,933 Kcal/Kmol ^{0}K

$Q\,O_2$ = n x Cp x ($T_2 - T_1$)

= 0,316 Kmol x $6{,}933\ ^{\text{Kcal}}/_{\text{kmol°K}}$ x (303 ^{0}K – 298 ^{0}K)

= 10,954 Kcal

2.b Menghitung Panas N_2 dari Udara

N_2 = 1,357 Kmol

Untuk mencari Cp N_2 pada T = 30^{0}C dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$Cp\ = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_1) + \frac{c}{3}\ (T_2^2 + T_2.T_1 + T_1^2)$ (Hougen P 258)

Dan nilai *a, b*, dan *c* untuk udara didapat dari (Hougen P 255), yaitu :

$N_2 \rightarrow$ a = 6,457

b = 1,389 x 10^{-3}

c = -0,069 x 10^{-6}

Cp N_2 $= 6{,}457 + \frac{1{,}389\ x\ 10^{-3}}{2}(298 + 303) + \frac{-0{,}069\ x10^{-6}}{3}(270907)$

$= 6{,}869\ ^{\text{Kcal}}/_{\text{kmol°K}}$

$Q\,N_2$ = n x Cp x ($T_2 - T_1$)

= 1,357 Kmol x $6{,}869\ ^{\text{Kcal}}/_{\text{kmol°K}}$ x (303 ^{0}K – 298 ^{0}K)

= 46,606 Kcal

Maka panas sensible dari udara adalah:

Q_2 = Q O_2 + Q N_2

= 10,954 Kcal + 46,606 Kcal

= 57,560 Kcal

3) Menghitung Panas Sensible Cangkang Kelapa Sawit

t_1 (T referen) = 25 ^{0}C

t_2 (t udara masuk) = 30 ^{0}C

Cangkang kelapa sawit = 10 Kg

Cp Cangkang kelapa sawit = 4,13 KJ/Kg ^{0}C (Austin, 2012)

Q_3 = m. Cp. ($T_2 - T_1$)

= 10 Kg x 4,13 Kj/Kg ^{0}C x (30 ^{0}C - 25 ^{0}C)

= 206.500 Kj x $\frac{1 \text{ Kcal}}{4{,}1868 \text{ Kj}}$

= 49,321 Kcal

Total Panas Masuk (*Input*) = $Q_1 + Q_2 + Q_3$

= 28918,400 Kcal + 57,560 Kcal + 49,321 Kcal

= 29025,281 Kcal

B. Panas Keluar

1) Menghitung Panas Sensible *Flue Gas Kering*

t_1 (T referen) = 25^{0}C T_1 = (273 + 29) = 298^{0}K

t_2 (T *flue gas*) = 106^{0}C T_2 = (273 + 106) = 379^{0}K

Tabel 29. Nilai a, b, c Komponen *Flue Gas*

Komponen	A	B x 10^{-3}	C x 10^{-6}
N_2	6,457	1,389	-0,069
CO_2	6,339	10,14	-3,415
O_2	6,117	3,167	-1,005

Sumber : Hougen, Hal : 255

a. Menghitung Panas Sensible N_2

N_2 = 1,357 Kmol

Cp N_2 = $a + \frac{b}{2}(T_2 + T_1) + \frac{c}{3}\,(T_2^2 + T_2.T_1 + T_1^2)$

$$\text{Cp } N_2 = 6{,}457 + \frac{1{,}389x10^{-3}}{2}(302 + 379) + \frac{-0{,}069x10^{-6}}{3}(345387)$$

$$= 6{,}919 \ {}^{\text{Kcal}}/_{\text{kmol°K}}$$

Q N_2 = n x Cp x ($T_2 - T_1$)

= 1,357 Kmol x $6{,}922 \ {}^{\text{Kcal}}/_{\text{kmol°K}}$ x (379 – 302) ^{0}K

= 723,273 Kcal

b. Menghitung Panas Sensible CO_2

CO_2 = 0,178 Kmol

Cp CO_2 = $a + \frac{b}{2}(T_2 + T_1) + \frac{c}{3}\ (T_2^2 + T_2.T_1 + T_1^2)$

Cp CO_2 = $6{,}339 + \frac{10{,}14\ x10^{-3}}{2}(302 + 379) + \frac{-3{,}415\ x10^{-6}}{3}(345387)$

$= 9{,}378\ ^{\text{Kcal}}/_{\text{kmol°K}}$

Q CO_2 = n x Cp x ($T_2 - T_1$)

= 0,178 Kmol x $6{,}922\ ^{\text{Kcal}}/_{\text{kmol°K}}$ x (379 – 302) ^{0}K

= 135,215 Kcal

c. Menghitung Panas Sensible O_2

n O_2 = 0,808 Kmol

Cp O_2 = Cp N_2 = $a + \frac{b}{2}(T_2 + T_1) + \frac{c}{3}\ (T_2^2 + T_2.T_1 + T_1^2)$

$= 6{,}117 + \frac{3{,}167\ x\ 10^{-3}}{2}(298 + 303) + \frac{-0{,}2656x10^{-6}}{3}(345387)$

$= 7{,}016\ ^{\text{Kcal}}/_{\text{kmol°K}}$

N O_2 = n x Cp x ($T_2 - T_1$)

= 0,808 Kmol x $7{,}016\ ^{\text{Kcal}}/_{\text{kmol°K}}$ x (379 – 302) ^{0}K

= 435,506 Kcal

Q_4 = Q N_2 + Q CO_2 + Q O_2

= 723,273 Kcal + 135,215 Kcal + 435,506 Kcal

= 1293,994 Kcal

2). Menghitung Panas Sensible dan Laten Air dari Reaksi Pembakaran

H_2O dari hasil reaksi pembakaran = H_2O reaksi 1 + H_2O reaksi 2

= 0,058 Kmol + 0,168 Kmol

= 0,226 Kmol

t_1 (T referen)	= 25^{0}C	T_1	= (273 + 25)	= 298^{0}K
t_2 (T *flue gas*)	= 106^{0}C	T_2	= (273 + 106)	= 379^{0}K

Cp $= a + \frac{b}{2}(T_2 + T_1) + \frac{c}{3}\,(T_2^2 + T_2.T_1 + T_1^2)$ (Hougen P 258)

Dan nilai *a, b*, dan *c* untuk udara didapat dari (Hougen P 255), yaitu :

Air → a = 7,136

b = 2,640 x 10^{-3}

c = 0,0459 x 10^{-6}

$$\text{Cp } H_2O = 7{,}136 + \frac{2{,}640x10^{-3}}{2}(302 + 379) + \frac{0{,}0459x10^{-6}}{3}(349303)$$
$$= 8{,}035\ \text{Kcal}/_{\text{kmol°K}}$$

Untuk panas laten pada temperatur 100^0C, didapat lamda (λ) = 9717 Kcal/Kmol (*sumber: Hougen, Hal : 274)

$Q_{5.a}$ = 9717 Kcal/Kmol x Mol H_2O dari udara

= 9717 Kcal/Kmol x 0,226 Kmol

= 2196,042 Kcal

Q_5 = λ + (mol H_2O x Cp x ($T_2 - T_1$))

= 2196,042 Kcal + (0,226 Kmol x 8,035 Kcal/Kmol ^{0}K x (379-298)^{0}K

= 2343,129 Kcal

3) Menghitung Panas Konduksi pada Dinding *Furnace*

Tabel 30. Data Desain Ruang Bakar (*Furnace*)

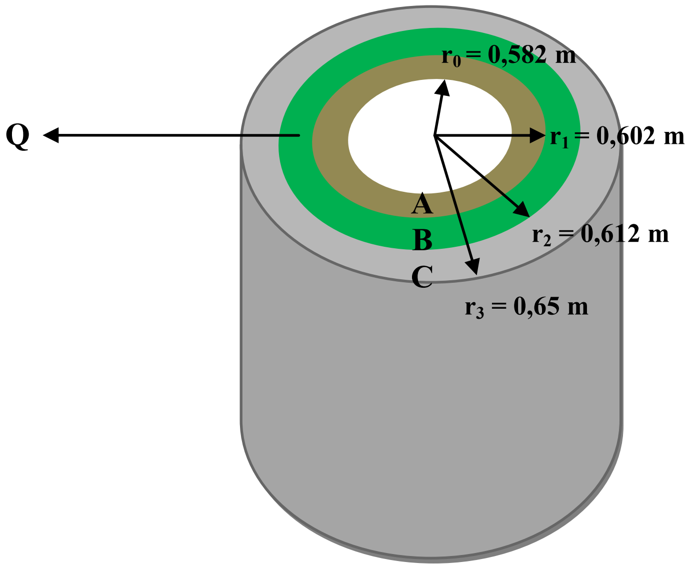
Ukuran	Satuan (cm)
Diameter	65
Tinggi	32

Material yang digunakan pada dimensi ruang bakar terdiri dari 3 lapisan dinding isolasi, dapat dilihat pada gambar. Dan jenis bahan isolasi tersebut dapat dilihat pada tabel 31.

Tabel 31. Konduktivitas Material *Furnace*

Material	Konduktivitas W/m.°C
Asbes	0.16
Glass Wol	0.038
Plat Besi	59

(Sumber : (J.P Holman, 1994)



Gambar 25. Perpindahan Kalor Melalui Dinding Komposit

Tabel 32. Konduktivitas Termal dan Tebal dari Material *Furnace*

No	Material	Konduktivitas Termal (W/m °C)	Tebal (m)	Diameter (m)
0-1	Asbes	0.16	0,02	0,59
1-2	Glass wol	0.038	0,01	0,63
2-3	Plat Besi	59	0,008	0,65

(Sumber : (J.P Holman, 1994)

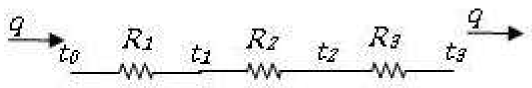
Dimensi *Furnace* :

Tinggi = 32 cm = 0,32 m

Temperatur Dinding Dalam *Furnace* = 209 °C

Temperatur Dinding Luar *Furnace* = 67 °C

Permukaan dinding ruang bakar yang berlapis dengan nilai konduktivitas yang berbeda dapat dianalogikan sebagai rangkaian tahanan seri, hal ini dapat dilihat pada gambar .



Gambar 26. Analogi Listrik Melalui Dinding Komposit (*Sumber : Holman, 1994)*

$$R1 = \frac{\ln(r_1/r_0)}{2\pi K_A L} = \frac{\ln\left(\frac{0{,}602\ m}{0{,}582\ m}\right)}{2 \text{ x } 3{,}14 \text{ x } \left(0{,}16 \frac{W}{m^oC}\right) \text{x } 0{,}65\ m} = 0{,}052\ ^\circ C/W$$

$$R2 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi K_A L} = \frac{\ln\left(\frac{0{,}612\ m}{0{,}602\ m}\right)}{2 \text{ x } 3{,}14 \text{ x } \left(0{,}038 \frac{W}{m^oC}\right) \text{x } 0{,}65\ m} = 0{,}106\ ^\circ C/W$$

$$R3 = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi K_A L} = \frac{\ln\left(\frac{0{,}65\ m}{0{,}612\ m}\right)}{2 \text{ x } 3{,}14 \text{ x } \left(0{,}59 \frac{W}{m^oC}\right) \text{x } 0{,}65\ m} = 0{,}011^\circ C/W$$

$\Sigma R \quad = R_1 + R_2 + R_3$

$= (0{,}052 + 0{,}106 + 0{,}011)\ ^oC/W$

$= 0{,}169\ ^oC/W$

- Menghitung laju aliran kalor menyeluruh menggunakan persamaan:

$Q_6 = \frac{\Delta T}{\Sigma R}$ (Sumber: Holman, Hal 27)

$$= \frac{(209 - 67)^\circ C}{0{,}169\ \ ^\circ C/W}$$

$$= 840{,}237 \text{ W x} \frac{0.239 \text{ Kal/s}}{W}$$

$$= 200{,}817 \frac{Kal}{s} \text{ x } \frac{Kkal}{1000\ Kal} \text{ x} \frac{3600\ s}{jam}$$

= 722,940 Kkal

4) Menghitung Panas Konveksi pada Dinding *Furnace*

t_1 (t referen) = 29 ^oC

t_2 (t dinding luar) = 67 ^oC

Lebar *furnace* = Panjang *Furnace* = 0,8 m

Δx plat besi = 0,6 m

A = 2. πr. (r + t)

= 2 (3,14 cm x 32,5 cm) x (32,5cm + 32 cm)

= 13164 cm^2

= 1,3164 m^2

$$\text{Temperatur film} = \frac{\text{T dinding luar furnace} - \text{T refrence}}{2}$$

$$= \frac{(67 - 29)^\circ C}{2} = (19^\circ C + 273) = 292^\circ K$$

Untuk menghitung bilangan Gruesolt, Prentel, dan nilai h terlebih dahulu diketahui sifat – sifat dari udara pada tekanan atmosfer.

Pada T = 292 ^oK didapat sifat – sifat dari udara pada tekanan atmosfer dengan cara interpolasi (Holman, 1944)

Pada T = 250 ^oK, V = 11,31 x 10^{-6} m^2/s

K = 0,02227 W/m ^oC

Pr = 0,722

g = 9,8 m/s^2

Pada T = 300 ^oK, V = 15,690 x 10^{-6} m^2/s

K = 0,02624 W/m ^oC

Pr = 0,708

g = 9,8 m/s^2

Hasil Interpolasi :

Pada T = 292 ^oK, V = 11,31 x 10^{-6} m^2/s+ $\frac{(292-250)K}{(300-250)K}$ x (15,690 - 11,31) x 10^{-6}

$= 11{,}31 \times 10^{-6}\ m^2/s + (0{,}84) \times (4{,}38 \times 10^{-6})\ m^2/s$

$= (11{,}31 \times 10^{-6} + 3{,}654 \times 10^{-6})\ m^2/s$

$= 14{,}964 \times 10^{-6}\ m^2/s$

Pada T = 292 ^oK, k $= 0{,}02227 + \frac{(292-250)K}{(300-250)K} \times (0{,}02624 - 0{,}02227)$ W/m ^oC

$= 0{,}02227$ W/m ^oC $+ (0{,}84) \times (0{,}000379)$ W/m ^oC

$= (0{,}02227 + 0{,}00334)$ W/m ^oC

$= 0{,}02258$ W/m ^oC

Pada T = 292 ^oK, Pr $= 0{,}722 + \frac{(292-250)K}{(300-250)K} \times (0{,}708 - 0{,}722)$

$= 0{,}722 - (0{,}84) \times (0{,}014)$

$= 0{,}722 - 0{,}01176$

$= 0{,}71976$

$\beta = \frac{1}{Tf} = \frac{1}{19} = 0.053\ ^0C$

$Gr = \frac{g\ x\ \beta\ x\ qw\ x\ X^4}{k.V^2}$ qw = Konstan

$= \frac{9.8\ x\ 0.053\ x\ 800\ x\ (0{,}008)^4}{59\ x\ (14{,}964\ x\ 10^{-6})^2}$

$= 128{,}826$

Nu $= 0{,}10\ (Gr.Pr)^{1/3}$

$= 0{,}10\ (128{,}826 \times 0{,}71976)^{0{,}333}$

$= 0{,}45$

$h = \frac{Nu \times K}{L}$

$= \frac{0{,}45\ x\ 59\ W/m^0C}{0{,}8\ m}$

$= 33{,}188\ \frac{W}{m^2}.^0C$

$Q_7 = h \times A \times (t_2 - t_1)$

$= 33{,}188\ \frac{W}{m^2}.^0C \times 1{,}3164\ m^2 \times (67 - 29)^0C$

$= 1660{,}170\ W \times \frac{0.239\ Kal/s}{W}$

$= 396{,}781 \frac{Kal}{s} \times \frac{Kkal}{1000\ Kal} \times \frac{3600\ s}{jam}$

= 1428,410 Kkal

5) Menghitung Panas Sensibel Arang Cangkang Kelapa Sawit

Massa Arang	= 6,45 Kg			
t_1 (T referen)	= 25^0C	T_1	= (273 + 25)	= 298^0K
t_2 (T arang)	= 86^0C	T_2	= (273 + 106)	= 359^0K

Cp Arang produk pirolisis = 19,983 Kj/Kg ^{0}K
(Sumber, Georgia Institute of Technology, 2010)

Q_8 = m x Cp x (T_2 - T_1)

= 6,45 Kg x 19,983 Kj/Kg ^{0}K x (359^0K - 298^0K)

$= 7862{,}311\ Kj \times \frac{1\ Kj}{4{,}1868\ Kcal}$

= 1877,881 Kcal

6) Menghitung Panas yang Termanfaatkan untuk Proses Pirolisis (Produk)

6.a Panas Sensible Arang Cangkang Kelapa Sawit

Massa Arang	= 6,45 Kg			
t_1 (T referen)	= 25^0C	T_1	= (273 + 29)	= 298^0K
t_2 (T reaktor)	= 255^0C	T_2	= (273 + 106)	= 528^0K

Cp Arang Cangkang Kelapa Sawit = 19,983 Kj/Kg ^{0}K
(Sumber, Georgia Institute of Technology, 2010)

$Q_{\text{arang cangkang kelapa sawit}}$ = m x Cp x (T_2 - T_1)

= 6,45 Kg x 19,983 Kj/Kg ^{0}K x (528^0K - 298^0K)

$= 29644{,}780\ Kj \times \frac{1\ Kcal}{4{,}1868\ Kj}$

= 7080,534 Kcal

6.b Panas Laten dan Panas Sensibel Asap Cair

Massa Asap Cair	= 1,65 Kg			
t_1 (T referen)	= 29^0C	T_1	= (273 + 29)	= 302^0K
t_2 (T *asap cair*)	= 30,47 ^{0}C	T_2	= (273 + 106)	= $303{,}47^0$K

Cp Asap Cair = 2,4346 Kj/Kg ^{0}K (Sumber, Georgia Institute of Technology, 2010)

H_{vo} = 20256,931 Kj/Kg (Sumber, Georgia Institute of Technology, 2010)

b.1 Menghitung Panas Laten Asap Cair

$Q_{\text{laten asap cair}}$ = H_{vo} x Massa asap cair

= 20256,931 Kj/Kg x 1,65 Kg

= 33423,936 Kj x $\frac{1 \text{ Kcal}}{4{,}1868 \text{ Kj}}$

= 7983,170 Kcal

b.2 Menghitung Panas Sensible Asap Cair

$Q_{\text{sensible asap cair}}$ = m x Cp x ($T_2 - T_1$)

= 1,65 Kg x 2,4346 Kj/Kg ^{0}K x (303,47^{0}K – 302^{0}K)

= 5,905 Kj x $\frac{1 \text{ Kcal}}{4{,}1868 \text{ Kj}}$

= 1,411 Kcal

$Q_{\text{asap cair}}$ = $Q_{\text{laten asap cair}} + Q_{\text{sensible asap cair}}$

= 7983,170 Kcal + 1,411 Kcal

= 7984,581 Kcal

6.c Panas Sensible Tar

Massa Tar = 0,457 Kg

t_1 (T referen) = 25^{0}C

t_2 (T tar) = 41^{0}C

Cp Tar Oil = 0,34 Kcal/Kg.^{0}C

Sumber: (Perry's, Chemical Engineering Handbooks)

Q_{tar} = m. Cp. ($T_2 - T_1$)

= 0,457 Kg x 0,34 Kcal/Kg.^{0}C x (41^{0}C – 25^{0}C)

= 2,486 Kcal

Total Panas yang Termanfaatkan

Q_9 = $Q_{\text{arang cangkang kelapa sawit}} + Q_{\text{asap cair}} + Q_{\text{tar}}$

= 7080,534 Kcal + 7984,581 Kcal + 2,486 Kcal

= 15067,601 Kcal

Panas Keluar (*Output*) = $Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9$

= 1293,994 Kcal + 2343,129 Kcal + 722,940 Kcal + 1428,410 Kkal + 1877,881 Kcal + 15067,601 Kcal

= 21024,637 Kcal

8) Menghitung Panas yang Hilang (*Heat Losses)*

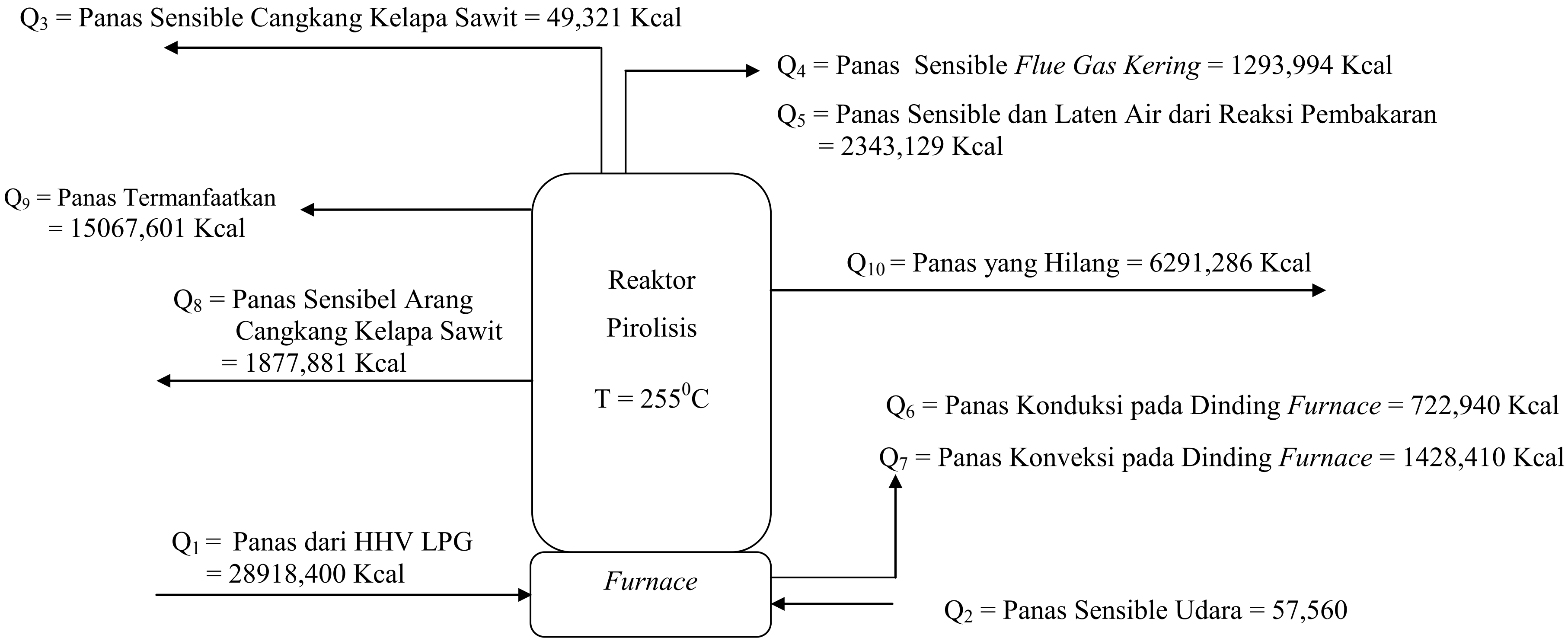
Total panas masuk = 29025,281Kcal

Total panas keluar = 22733,995 Kcal -

Panas yang hilang = 6291,286 Kcal **(21,675 %)**

Tabel 33. Neraca Panas pada Alat Pirolisis (239 atm)

Komponen	Input		Output	
	Kcal	%	Kcal	%
Panas dari HHV LPG	28918,400	99,648	-	-
Panas Sensible Udara Kering	57,560	0,182	-	-
Panas Sensible Cangkang Kelapa Sawit	49,321	0,170	-	-
Panas Sensible *Flue Gas Kering*	-	-	1293,994	4,458
Panas Sensible dan Laten Air dari Reaksi Pembakaran	-	-	2343,129	8,073
Panas Konduksi pada Dinding *Furnace*	-	-	722,940	2,491
Panas Konveksi pada Dinding *Furnace*	-	-	1428,410	4,921
Panas Sensibel Arang Cangkang Kelapa Sawit	-	-	1877,881	6,470
Panas yang Termanfaatkan untuk Proses Pirolisis (Produk)	-	-	15067,601	51,921
Panas yang Hilang (*Heat Losses)*	-	-	6291,286	21,675
Total	29025,281	100	29025,281	100



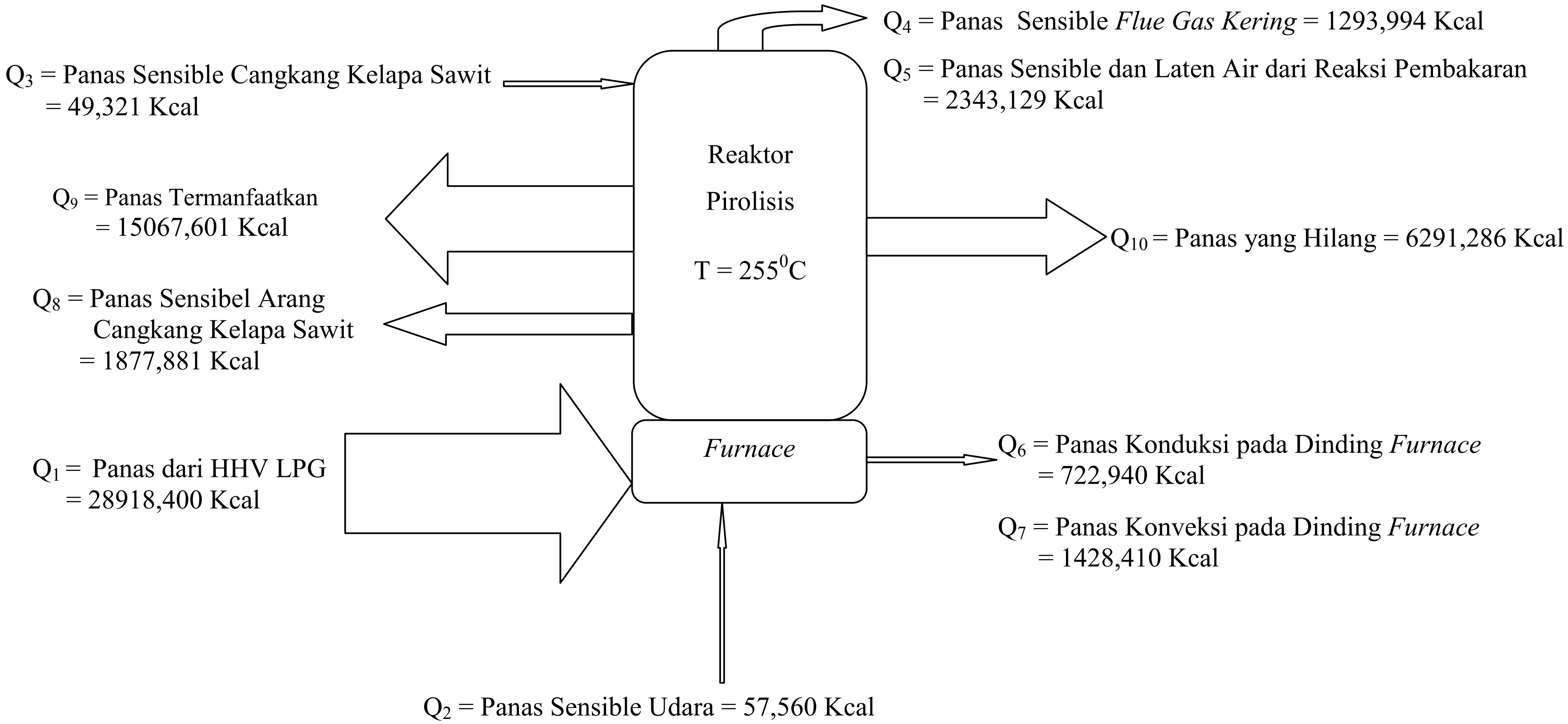
INPUT

Q_1	= 28918,400 Kcal	= 99,648 %
Q_2	= 57,560 Kcal	= 0,182 %
Q_3	= 49,321 Kcal	= 0,170 %
Total	= 29020,671 Kcal	= 100 %

OUTPUT

Q_4	= 1293,994 Kcal	= 4,458 %
Q_5	= 2343,129 Kcal	= 8,073 %
Q_6	= 722,940 Kcal	= 2,491 %
Q_7	= 1428,410 Kcal	= 4,921 %
Q_8	= 1877,881 Kcal	= 6,470 %
Q_9	= 15067,601 Kcal	= 51,921 %
Q_{10}	= 6291,287 Kcal	= 21,675 %
Total	= Total= 29020,671 Kcal	= 100 %

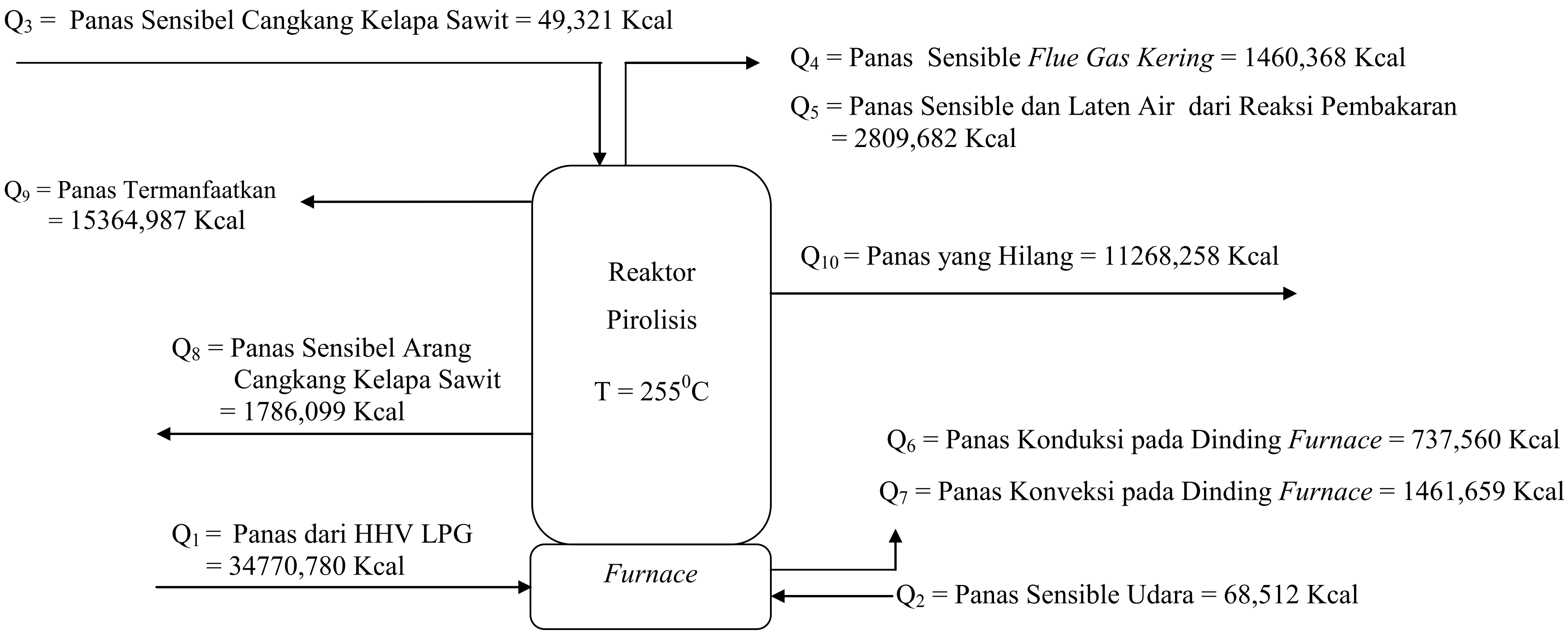
Gambar 27. Blok Diagram Neraca Panas pada Alat Pirolisis (239 atm)



Gambar 28. Grassman Diagram Neraca Panas pada Alat Pirolisis (239 atm)

Tabel 34. Neraca Panas pada Alat Pirolisis (240 atm)

Komponen	Input		Output	
	Kcal	%	Kcal	%
Panas dari HHV LPG	34770,780	99,677	-	-
Panas Sensible Udara Kering	68,512	0,182	-	-
Panas Sensible Cangkang Kelapa Sawit	49,321	0,141	-	-
Panas Sensible *Flue Gas Kering*	-	-	1460,368	4,186
Panas Sensible dan Laten Air dari Reaksi Pembakaran	-	-	2809,682	8,053
Panas Konduksi pada Dinding *Furnace*	-	-	737,560	2,114
Panas Konveksi pada Dinding *Furnace*	-	-	1461,659	4,190
Panas Sensibel Arang Cangkang Kelapa Sawit	-	-	1786,099	5,119
Panas yang Termanfaatkan untuk Proses Pirolisis (Produk)	-	-	15364,987	44,040
Panas yang Hilang (*Heat Losses)*	-	-	11268,258	32,298
Total	34888,613	100	34888,613	100



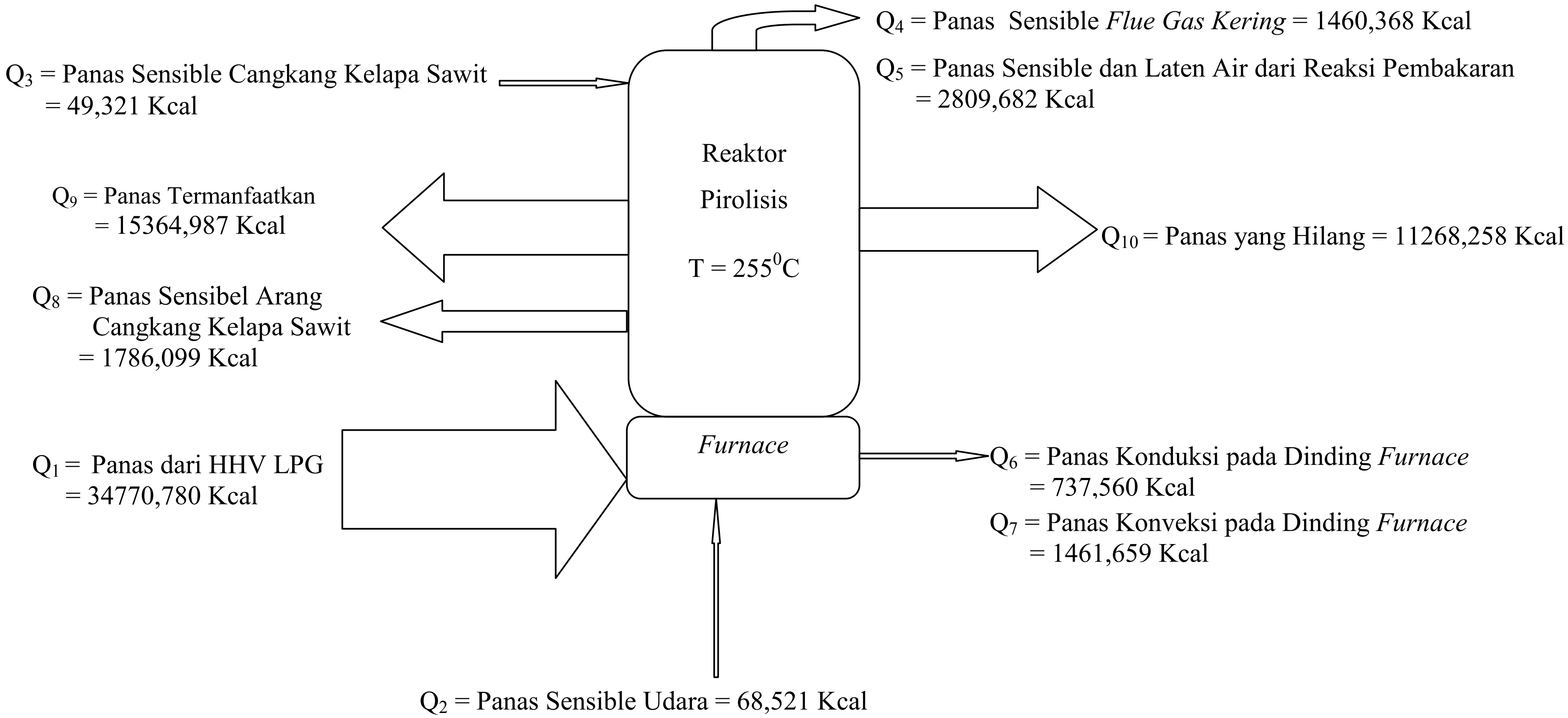
INPUT

Q_1	= 34770,780 Kcal	= 99,677 %
Q_2	= 68,512 Kcal	= 0,182 %
Q_3	= 49,321 Kcal	= 0,141 %
Total	= 34883,613 Kcal	= 100 %

OUTPUT

Q_4	= 1460,368 Kcal	= 4,186 %
Q_5	= 2809,682 Kcal	= 8,053 %
Q_6	= 737,56 Kcal	= 2,114 %
Q_7	= 1461,659 Kcal	= 4,190 %
Q_8	= 1786,099 Kcal	= 5,119 %
Q_9	= 15364,987 Kcal	= 44,040 %
Q_{10}	= 11268,258 Kcal	= 32,298 %
Total	= 34888,613 Kcal	= 100 %

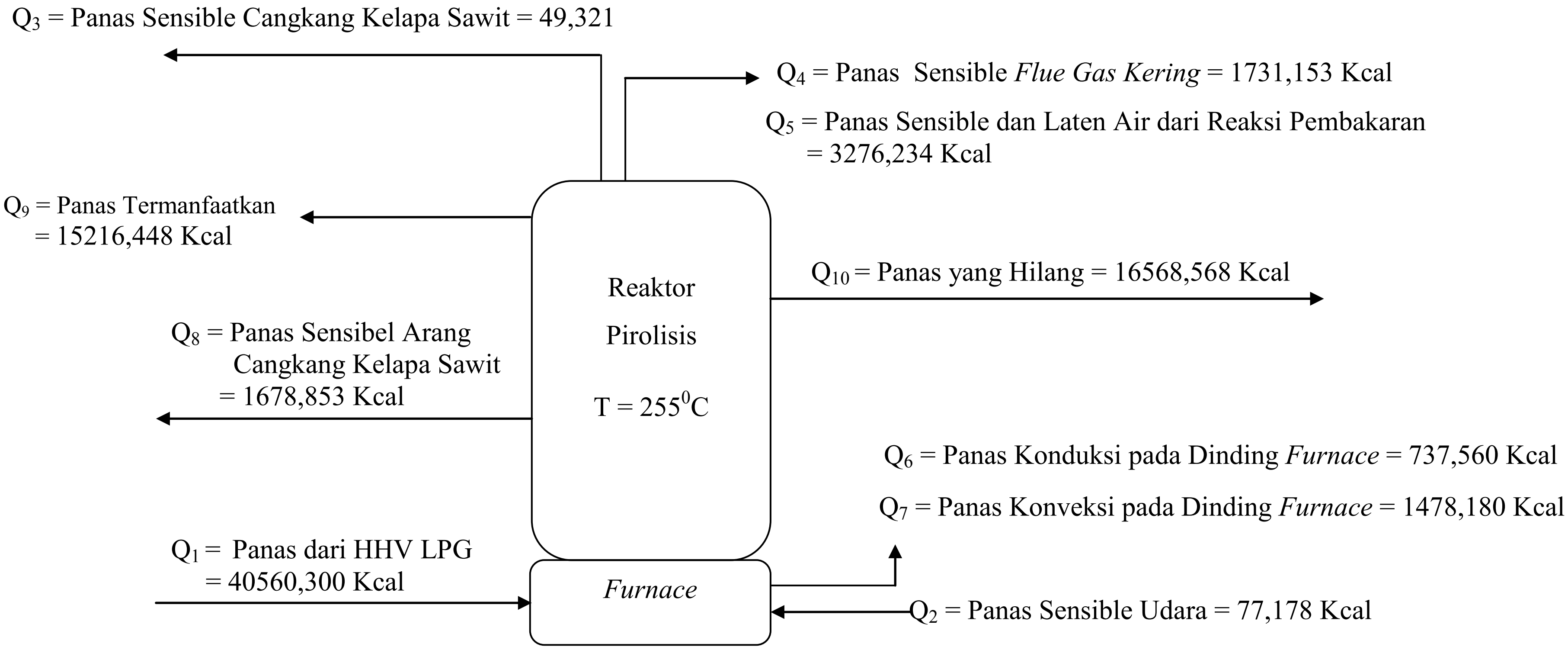
Gambar 29. Blok Diagram Neraca Panas pada Alat Pirolisis (240 atm)



Gambar 30. Grassman Diagram Neraca Panas pada Alat Pirolisis (240 atm)

Tabel 35. Neraca Panas pada Alat Pirolisis (241 atm)

Komponen	Input		Output	
	Kcal	%	Kcal	%
Panas dari HHV LPG	40560,300	99,701	-	-
Panas Sensible Udara Kering	77,375	0,178	-	-
Panas Sensible Cangkang Kelapa Sawit	49,321	0,121	-	-
Panas Sensible *Flue Gas Kering*	-	-	1731,153	4,255
Panas Sensible dan Laten Air dari Reaksi Pembakaran	- -	- -	3276,234	8,052
Panas Konduksi pada Dinding *Furnace*	-	-	737,560	1,813
Panas Konveksi pada Dinding *Furnace*	- -	- -	1478,180	3,633
Panas Sensibel Arang Cangkang Kelapa Sawit	-	-	1678,853	4,126
Panas yang Termanfaatkan untuk Proses Pirolisis (Produk)	- -	- -	15216,448	37,399
Panas yang Hilang (*Heat Losses)*	-	-	16568,568	46,722
Total	40686,996	100	40686,996	100



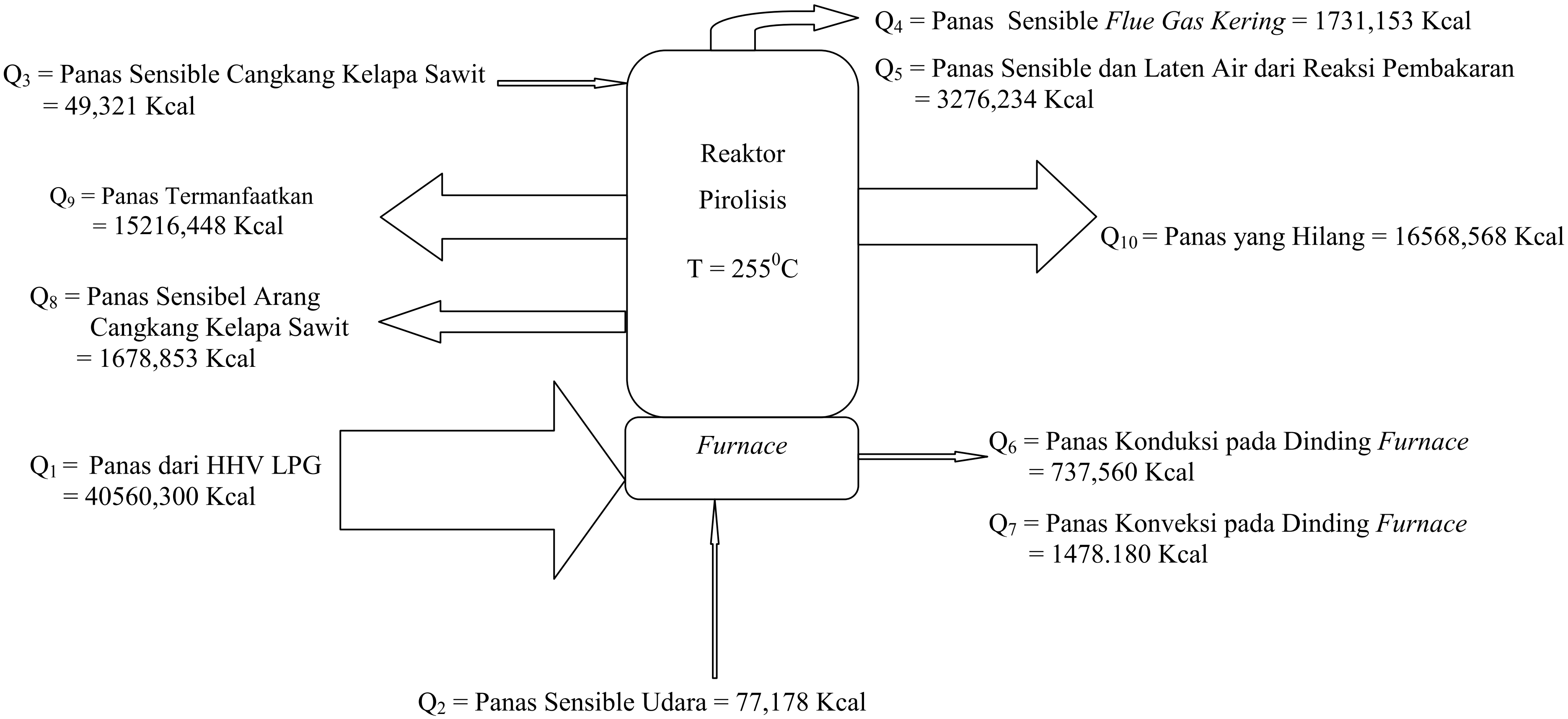
INPUT

Q_1	= 40560,300 Kcal	= 99,701 %
Q_2	= 77,178 Kcal	= 0,178 %
Q_3	= 49,321 Kcal	= 0,121 %
Total	= 40686,996 Kcal	= 100 %

OUTPUT

Q_4	= 1731,153 Kcal	= 4,255 %
Q_5	= 3276,234 Kcal	= 8,052 %
Q_6	= 737,560 Kcal	= 1,813 %
Q_7	= 1478,180 Kcal	= 3,633 %
Q_8	= 1678,853 Kcal	= 4,126 %
Q_9	= 15216,448 Kcal	= 37,399 %
Q_{10}	= 16568,568 Kcal	= 46,722 %
Total	= 40686,996 Kcal	= 100 %

Gambar 31. Blok Diagram Neraca Panas pada Alat Pirolisis (241 atm)



Gambar 32. Grassman Diagram Neraca Panas pada Alat Pirolisis (241 atm)

4. Menghitung Efisiensi Termal Alat Pirolisis

$$\eta = \frac{\text{Panas yang termanfaatkan}}{\text{Total Panas Masuk}} \text{ x } 100\%$$

$$= \frac{15067{,}601 \text{ Kcal}}{29020{,}671 \text{ Kcal}} \text{ x } 100\ \%$$

= 52 %

5. Menghitung *Specific Fuel Consumption* (SFC)

$$\textbf{SFC} = \frac{\textit{Panas dari gas LPG}}{\text{Massa Produk}}$$

$$= \frac{\textit{Panas dari gas LPG}}{\text{Massa Arang}}$$

$$= \frac{28918{,}400\ Kcal}{6{,}450 \text{ kg}}$$

= 4483,473 Kcal/Kg

Dengan cara yang sama, efisiensi termal dan *Specific Fuel Consumption* (SFC) dari alat pirolisis dengan variasi tekanan LPG 240 atm dan 241 atm dapat dilihat pada tabel 36.

Tabel 36. Efisiensi Termal dan *Specific Fuel Consumption* (SFC) pada Alat Pirolisis

Variasi Tekanan LPG (atm)	Efisiensi Termal (%)	SFC Kcal/Kg
239	52	4483,473
240	44	5853,667
241	37	7725,771