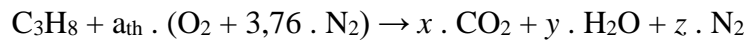


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Nilai Kalor secara Teoritis

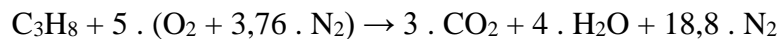
Nilai kalor LPG adalah jumlah panas atau kalori yang dihasilkan dari suatu pembakaran bahan bakar LPG tersebut. Komposisi LPG terdiri antara *propana* (C_3H_8) dan *butana* (C_4H_{10}) akan tetapi komposisi lebih didominasi oleh propana. Nilai kalor LPG secara teoritis memiliki reaksi pembakaran (stoikiometris).



Dengan nilai mol antara reaktan dan produk sebagai berikut :

C	: 3 = x	dengan	x = 3
H	: 8 = 2 . y	dengan	y = 4
O	: 2 . a _{th} = 2 . x + y = 2(3) + 4 = 10	dengan	a _{th} = 5
H ₂	: 3,76 . a _{th} = z → Z = 3,76 . 5	dengan	z = 18,8

Sehingga jika disetarakan menjadi seperti pada persamaan sebagai berikut :



Untuk 1 kmol C_3H_8 diketahui sebagai berikut :

N _{udara}	= 5 . 4,76 = 23,8 kmol udara
N _{CO₂}	= 3 kmol CO ₂
N _{H₂O}	= 4 kmol H ₂ O
N _{N₂}	= 18,8 kmol N ₂

Selanjutnya untuk mengetahui nilai entalpi pembentukan (h_f^0) dari komposisi LPG menggunakan Tabel A-26 :

C ₃ H ₈ (g)	= -103.850 kJ/kmol
O ₂	= 0
N ₂	= 0
CO ₂	= -393.520 kJ/kmol
H ₂ O (g)	= -241.820 kJ/kmol
H ₂ O (l)	= -285.830 kJ/kmol

Sehingga dapat dihitung nilai entalpi reaksi (H_R) dari LPG :

$$H_R = N_{C_3H_8} \cdot h_f^0_{C_3H_8} + N_{O_2} \cdot h_f^0_{O_2} + N_{N_2} \cdot h_f^0_{N_2}$$

$$H_R = 1 \cdot (-103.850) + 5 \cdot (0) + 5 \cdot 3,76 \cdot (0)$$

$$H_R = -103.850 \text{ kJ}$$

Nilai entalpi produk pada produk H₂O dalam fasa gas (H_{P, gas}) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$H_{P, gas} = N_{CO_2} \cdot h_{f^\circ CO_2} + N_{H_2O (g)} \cdot h_{f^\circ H_2O (g)} + N_{N_2} \cdot h_{f^\circ N_2}$$

$$H_{P, gas} = 3 \cdot (-393.520) + 4 \cdot (-241.820) + 18,8 \cdot (0) = -2.147.840 \text{ kJ}$$

Nilai entalpi produk pada produk H₂O dalam fasa cair (H_{P liquid}) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$H_{P, liquid} = N_{CO_2} \cdot h_{f^\circ CO_2} + N_{H_2O (l)} \cdot h_{f^\circ H_2O (l)} + N_{N_2} \cdot h_{f^\circ N_2}$$

$$H_{P, liquid} = 3 \cdot (-393.520) + 4 \cdot (-285.830) + 18,8 \cdot (0) = -2.323.880 \text{ kJ}$$

Dari hasil perhitungan nilai entalpi diatas dapat diketahui nilai kalor C₃H₈ sebagai berikut :

$$LHV = H_{P, gas} - H_R = -2.147.840 - (-103.850) = 2.043.990 \text{ kJ/kmol C}_3\text{H}_8$$

$$HHV = H_{P, liquid} - H_R = -2.323.880 - (-103.850) = 2.220.030 \text{ kJ/kmol C}_3\text{H}_8$$

Untuk menghitung nilai LHV dan HHV dalam satuan kJ/kg, maka nilai kalor harus dibagi dengan massa molar (Mr) C₃H₈. Massa molar dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$Mr_{C_3H_8} = 3 \cdot (13) + 8 \cdot (1) = 44 \text{ kg/kmol}$$

Maka nilai dari LHV dan HHV adalah :

$$LHV = 2.043.990 / 44 = 46.454,31 \text{ kJ/kg}$$

$$HHV = 2.220.030 / 44 = 50.455,22 \text{ kJ/kg}$$

4.2 Kalibrasi

Kalibrasi adalah pengecekan dan pengaturan akurasi dari alat ukur dengan cara membandingkan dengan standar atau tolak ukur (Almegakm, 2016).

Dari hasil kalibrasi yang dilakukan terhadap *thermocouple* T₁ sampai T₈, dengan cara mengukur suhu air panas yang diaduk agar suhu merata menggunakan *thermometer* dan *thermocouple* yang berfungsi untuk mengukur suhu air panas tersebut sampai kedua alat tersebut mengukur suhu yang sama atau tidak jauh beda, sebagai acuan suhu yang digunakan antara suhu 20°C

sampai dengan 80°C. Kalibrasi bertujuan untuk mengetahui kebenaran nilai konvensional penunjukan suatu instrumen ukur. *Thermometer* disini digunakan sebagai acuan kalibrasi alat *thermocouple*. *Thermocouple* yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan *thermocouple* tipe K dan hasil pengamatan kalibrasi akan diolah menjadi grafik yang akan menunjukkan nilai *gradient* dan *regresi* dari perbandingan pengukuran suhu antara *thermometer* dan *thermocouple* tersebut. Kegiatan kalibrasi yang dilakukan seperti pada gambar (4.1).



Gambar 4.1 kegiatan kalibrasi *thermocouple*

Gradien adalah nilai yang menunjukkan besar arah dan kemiringan dari garis yang didapat dari perbandingan antara suhu *thermometer* dan *thermocouple*. *Gradient* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (4.1).

$$Y = m \cdot x + c$$

keterangan :

- y = suhu *thermometer* standar
- m = *gradien* garis *regresi*
- x = suhu *termocouple* terukur
- c = koefisien (titik pada sumbu y yang dilewati garis)

Koefisien determinasi (R^2) adalah ukuran kedekatan sebuah garis regresi linier dengan data yang sebenarnya. Sama halnya dengan *gradient*, koefisien

determinasi didapat dari grafik data hasil perbandingan antara *thermometer* dengan *thermocouple*.

4.3 Hasil Kalibrasi

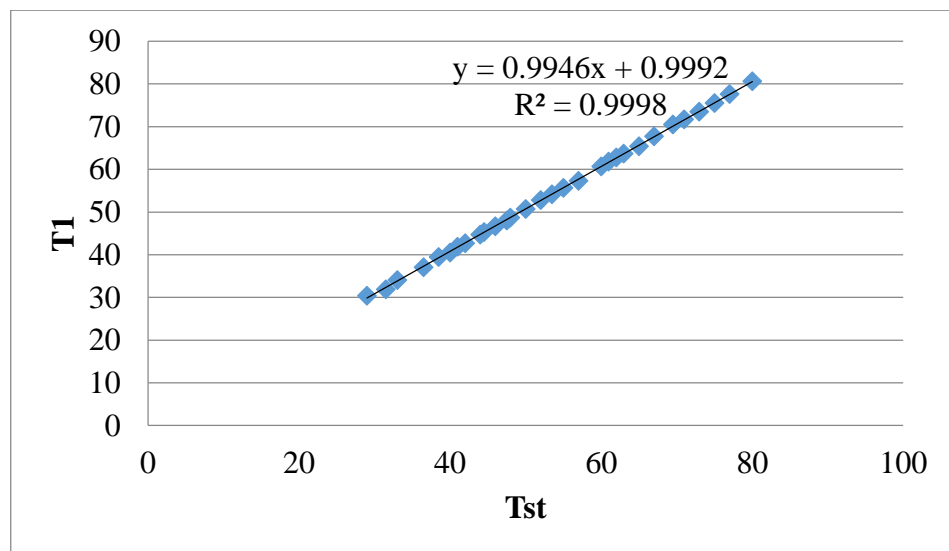
Proses kalibrasi terhadap *thermocouple* akan memberikan nilai suhu yang akan diolah menjadi grafik perbandingan suhu *thermocouple* terhadap *thermometer* standar sehingga menghasilkan nilai *gradient* dan koefisien determinasi yang akan digunakan untuk menghitung suhu standar atau suhu yang sebenarnya dari hasil data nilai suhu yang didapat dari proses pengujian menggunakan alat kalorimeter aliran. Data yang diperoleh tercantum pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Data kalibrasi keseluruhan

No	Termometer T _{st} (°C)	<i>Termocouple</i> T ₁ (°C)	<i>Termocouple</i> T ₂ (°C)	<i>Termocouple</i> T ₃ (°C)	<i>Termocouple</i> T ₄ (°C)
1	29	30,4	30,7	30,7	30,6
2	31,5	31,9	32	31,8	31,8
3	33	34,1	33,8	34,1	33,9
4	36,5	37,1	37	37,3	36,9
5	38,5	39,5	39,9	39,8	40
6	40	40,5	40,6	40,4	40,4
7	41	41,9	41,5	41,6	41,8
8	42	42,7	42,6	42,5	42,6
9	44	44,7	44,6	44,6	44,6
10	44,5	45,3	45	45	45,2
11	46	46,7	46,7	46,5	46,9
12	47,5	48	48	48	48
13	48	48,7	48,4	48,3	48,7
14	50	50,7	50,3	50,2	50,6
15	52	52,8	52,4	52,3	52,6
16	53,5	54,2	53,8	53,5	54,1
17	55	55,7	55,4	55,1	55,7
18	57	57,3	57,4	57,3	57,7
19	60	60,7	60,5	60,4	60,8
20	61	61,8	61,6	61,5	61,9
21	62	62,8	62,6	62,6	62,9

No	Termometer T _{st} (°C)	Termocouple T ₁ (°C)	Termocouple T ₂ (°C)	Termocouple T ₃ (°C)	Termocouple T ₄ (°C)
22	63	63,7	63,6	63,5	63,8
23	65	65,4	65,4	65,4	65,8
24	67	67,7	67,6	67,5	67,8
25	69,5	70,5	70,5	70,3	70,7
26	71	71,7	71,6	71,4	71,9
27	73	73,5	73,3	73,5	73,6
28	75	75,5	75,6	75,6	75,9
29	77	77,6	77,4	77,4	77,8
30	80	80,6	80,4	80,4	80,8

Grafik yang terbentuk dari data kalibrasi T₁ diatas seperti pada gambar (4.2) :



Gambar 4.2 Grafik Kalibrasi T₁

Dari gambar 4.2 grafik kalibrasi T₁ maka dapat dibaca bahwa hasil kalibrasi sebagai berikut :

- *Thermocouple* T₁ menghasilkan nilai gradient (y) = $0,9946x + 0,9992$ dan nilai koefisien determinasi (R^2) = $0,9998$.

Untuk T₂ sampai T₄ setelah dibuat grafik maka diperoleh data sebagai berikut :

- *Thermocouple* T₂ menghasilkan nilai gradient (y) = $0,9921x + 1,017$ dan nilai koefisien determinasi (R^2) = $0,9996$.

- *Thermocouple* T₃ menghasilkan nilai gradien $(y) = 0,9909x + 1,0233$ dan nilai koefisien determinasi $(R^2) = 0,9995$.
- *Thermocouple* T₄ menghasilkan nilai gradien $(y) = 1,0011x + 0,7195$ dan nilai koefisien determinasi $(R^2) = 0,9996$.

Table 4.2 Data kalibrasi alat termokopel T₅ sampai dengan T₈

No	<i>Thermometer</i> T _{st} (°C)	<i>Termocouple</i> T ₅ (°C)	<i>Termocouple</i> T ₆ (°C)	<i>Termocouple</i> T ₇ (°C)	<i>Termocouple</i> T ₈ (°C)
1	29	29,5	29,5	29,5	29,5
2	31,5	31,4	31,4	31,4	31,4
3	34,5	34	34,2	34,2	34,2
4	37,5	37,2	37,3	37,3	37,3
5	41	39,5	39,6	39,6	39,6
6	43	41,4	41,6	41,6	41,6
7	45	43,1	43,3	43,3	43,2
8	47	45,9	45	45	45
9	52	49,8	49,9	49,9	49,9
10	55	53,4	53,4	53,5	53,4
11	58	56	56,3	56,2	56,3
12	61	58,4	58,5	58,5	58,5
13	64	60,5	60,5	60,4	60,5
14	67	62,9	63	63	63
15	70	65,6	65,4	65,3	65,5
16	73	68,3	68,4	68,3	68,2
17	75	70	69,9	70,1	70,1
18	78	72,7	72,6	72,7	72,5
19	80	74,8	74,8	74,8	74,9
20	82	75,2	76,4	76,2	76
21	84	77,1	77,4	77,5	77,3
22	86	80,4	80,9	81,2	80,8

Untuk T₅ sampai T₈ setelah dibuat grafik kalibrasi maka diperoleh data sebagai berikut :

- *Thermocouple* T₅ menghasilkan nilai gradien $(y) = 0,8823x + 3,9044$ dan nilai koefisien determinasi $(R^2) = 0,9989$.
- *Thermocouple* T₆ menghasilkan nilai gradien $(y) = 0,888x + 3,6652$ dan nilai koefisien determinasi $(R^2) = 0,9991$.
- *Thermocouple* T₇ menghasilkan nilai gradien $(y) = 0,8891x + 3,6089$ dan nilai koefisien determinasi $(R^2) = 0,999$.

- *Thermocouple* T₈ menghasilkan nilai gradient $(y) = 0,8864x + 3,7331$ dan nilai koefisien determinasi $(R^2) = 0,999$

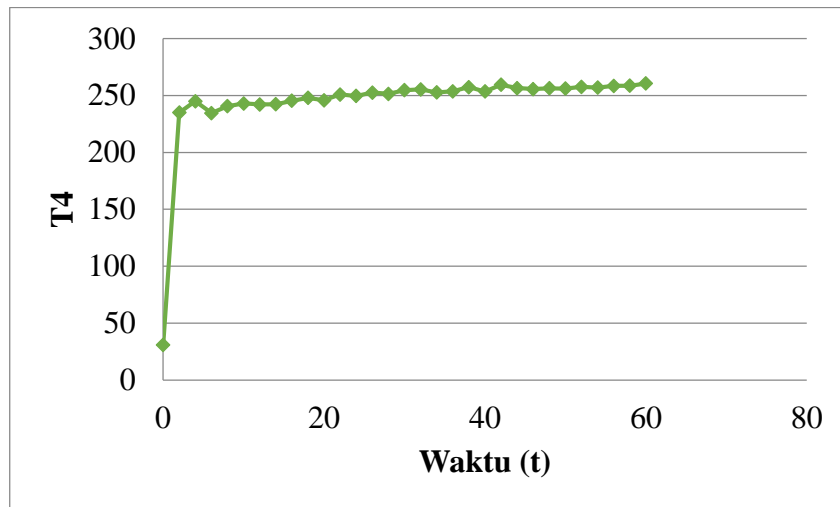
4.4 Hasil Pengujian *Flow Calorimeter* dengan LPG

4.4.1 Debit Aliran 2 LPM dengan Bukaan Katup Gas 1/8

Table 4.3 Data hasil pengujian debit 2 LPM katup 1/8

Waktu Menit	Debit (LPM)	Massa (kg)	SUHU							
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
0	2	9,8	31	32,3	31	30,9	31	31	30,7	30,8
2	2	9,77	31	38,9	35	235	32	32	31,3	31,5
4	2	9,74	31	42,3	34	244,9	33	33	31,3	31,3
6	2	9,72	31	44,6	35	234,6	34	34	32,1	31,7
8	2	9,7	31	46,5	35	240,6	34	34	32,1	31,8
10	2	9,68	31	47,4	36	243	34	35	32,2	31,7
12	2	9,66	31	47,8	31	242,2	33	35	31,3	31,8
14	2	9,64	31	48	32	242,3	34	35	31,8	32
16	2	9,62	31	48,4	37	245,4	35	35	32,5	32,2
18	2	9,6	31	48,4	37	247,9	34	35	32,1	31,8
20	2	9,58	31	48,8	32	245,8	34	35	31,8	31,5
22	2	9,56	32	48,7	32	250,8	33	34	30,8	31,2
24	2	9,54	32	48,9	33	249,6	34	35	31,9	32,9
26	2	9,52	32	49,2	33	252,6	35	36	32,6	32,3
28	2	9,5	32	49,7	32	251,4	34	35	32,2	31,8
30	2	9,48	32	49,5	32	254,7	34	35	31,5	31,8
32	2	9,46	32	49,8	34	255,4	35	36	32,5	32
34	2	9,44	32	49,9	33	252,7	35	36	31,9	31,8
36	2	9,42	32	49,7	34	253,7	35	36	31,8	32
38	2	9,4	32	49,8	34	257,3	34	36	32,1	32,2
40	2	9,38	32	50,2	33	253,5	35	36	32,6	32,5
42	2	9,36	32	50,1	33	259,4	34	36	32	32,1
44	2	9,34	32	50,1	37	256,5	32	36	32,2	31,9
46	2	9,32	32	50,4	39	255,6	35	36	32	31,9
48	2	9,3	32	50,4	34	256,4	34	35	31,4	31,8
50	2	9,28	32	50,4	34	256	35	36	32,3	31,9
52	2	9,26	32	50,5	34	257,6	34	35	31,6	31,6
54	2	9,24	32	50,5	35	256,9	35	36	32,1	31,6
56	2	9,22	32	50,6	31	258,4	33	35	30,4	30,8
58	2	9,2	32	50,9	32	258,6	34	35	31,5	31,4
60	2	9,18	32	51	37	260,5	34	35	31,3	31,2

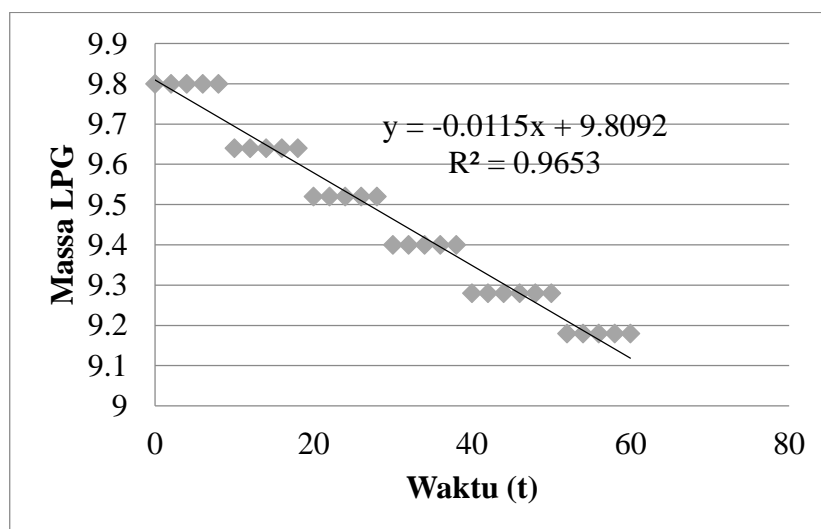
Grafik kenaikan suhu gas keluaran pada pembakaran kalorimeter aliran terhadap waktu seperti pada gambar (4.3):



Gambar 4.3 Grafik suhu T₄ terhadap waktu pada katub 1/8

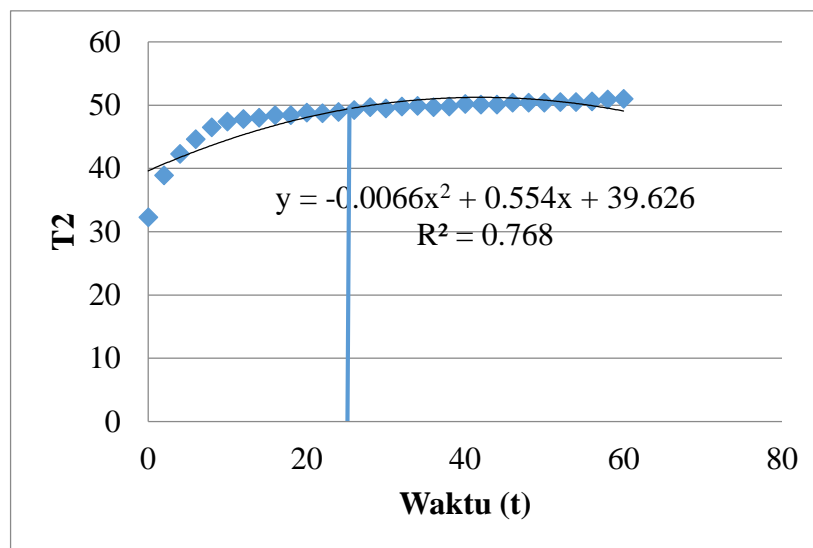
Dari grafik gambar (4.3) dapat diketahui bahwa suhu keluaran normal dan selama pembakaran berlangsung memiliki perbedaan yang jauh, dimana pada 2 menit pertama suhunya mencapai 235 C, ini terjadi karena kalor jenis udara yang mengisi saluran pembakaran sebelum gas pembakaran masuk terbilang rendah, sehingga suhu gas keluar dapat meningkat tinggi dengan cepat. Dari grafik gambar (4.3) juga dapat diketahui bahwa suhu gas keluar pada kalorimeter aliran baru berkisar pada 234,6 °C hingga 260 °C.

Grafik penurunan massa gas LPG terhadap waktu seperti pada gambar (4.4) :



Gambar 4.4 Grafik penurunan massa LPG terhadap waktu pada katub 1/8

Dari grafik gambar (4.4) dapat diketahui bahwa massa gas LPG berkurang setiap menit pengujian. Pengamatan massa LPG terhadap waktu pengujian pada alat calorimeter aliran menghasilkan nilai regresi $R^2 = 0,9999$. Artinya penurunan massa LPG pada pengujian kalorimeter aliran baru dapat dikatakan stabil karena pengurangan massa LPG berkurang dengan selisih tidak terlalu banyak setiap 2 menit.



Gambar 4.5 Grafik suhu T_2 terhadap waktu pada katub $\frac{1}{8}$

Dari hasil grafik gambar (4.5) diatas T_2 menunjukkan nilai *steady* pada menit 28. Maka nilai T_1 sampai T_8 diambil pada menit ke 28, sehingga nilai suhu standarnya adalah sebagai berikut :

$$T_{st1} = \frac{1}{0,9946} \times (31,7 - 0,9992) = 30,87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st2} = \frac{1}{0,9921} \times (49,7 - 1,017) = 49,07 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st3} = \frac{1}{0,9909} \times (32,4 - 1,0233) = 31,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st4} = \frac{1}{1,0011} \times (251,4 - 0,7159) = 250,41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st5} = \frac{1}{0,8823} \times (34,2 - 3,9044) = 34,34 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st6} = \frac{1}{0,888} \times (35,4 - 3,6652) = 35,74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st7} = \frac{1}{0,8891} \times (32,2 - 3,6089) = 32,16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st8} = \frac{1}{0,8864} \times (31,8 - 3,7331) = 31,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dari hasil kalibrasi standar yang didapat dari perhitungan menggunakan rumus hasil kalibrasi, maka nilai kalor jenis (C_p) dapat ditentukan menggunakan tabel termodinamika. Nilai kalor jenis (C_p) dari air masuk, air keluar dan setiap komponen LPG dapat diketahui sebagai berikut :

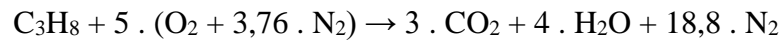
$$\begin{aligned} C_{p_{C_3H_8}} (T_{st3} \text{ pada } 31,67 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 304,67\text{K} \\ &= 1,6794 \text{ kJ/kg (Tabel A-2a)} \\ C_{p_{w.in}} (T_{st1} \text{ pada } 31,67 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 4,18 \text{ kJ/kg (Tabel A-3a)} \\ C_{p_{w.out}} (T_{st2} \text{ pada } 49,07 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 4,18 \text{ kJ/kg (Tabel A-3a)} \\ C_{p_{u.in}} (T_{st3} \text{ pada } 31,67 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 304,67 \text{ K} \\ &= 1,005 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2b)} \\ C_{p_{CO_2}} (T_{st4} \text{ pada } 250,41 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 523,41 \text{ K} \\ &= 1,029 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2b)} \\ C_{p_{H_2O}} (T_{st4} \text{ pada } 250,41 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 523,41 \text{ K} \\ &= 1,978957 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2c)} \\ C_{p_{N_2}} (T_{st4} \text{ pada } 250,41 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 523,41 \text{ K} \\ &= 1,06 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2b)} \end{aligned}$$

Dari hasil pengujian kalorimeter dengan debit 2 LPM dan bukaan katup gas $\frac{1}{8}$ diketahui $\Delta m \text{ LPG} = 9,8 \text{ kg} - 9,18 \text{ kg} = 0,62 \text{ kg}$ dengan lama pengujian selama 60 menit, sehingga perlu dihitung massa dari masing-masing unsur LPG sebagai berikut :

Massa molar komponen-komponen LPG :

- C_3H_8 = 44 kg/kmol (Tabel A-1 Termodinamika)
- Udara = 28,97 kg/kmol (Tabel A-1 Termodinamika)
- CO_2 = 1 . (12) + 2 . (16) = 44 kg/kmol
- H_2O = 2 . (1) + 16 = 18 kg/kmol
- N_2 = 2 . (14) = 28 kg/kmol

Sehingga jumlah massa dari komponen unsur-unsur *LPG* untuk 1 kmol pada persamaan sebagai berikut :



- 1 C_3H_8 = $3 \cdot (12) + 8 \cdot (1)$ = 44 kg
- 5 ($\text{O}_2 + 3,76 \text{N}_2$) (udara) = $5 \cdot \{2 \cdot (16) + 3,76 \cdot 2 \cdot (14)\}$ = 686,4 kg
- 3 CO_2 = $3 \cdot \{1 \cdot (12) + 2 \cdot (16)\}$ = 132 kg
- 4 H_2O = $4 \cdot \{2 \cdot (1) + 16\}$ = 72 kg
- 18,8 N_2 = $18,8 \cdot \{2 \cdot (14)\}$ = 526,4 kg

Jadi untuk setiap 1 kg *LPG* (C_3H_8) maka massa tiap komponen sebagai berikut :

- Udara → $m = 686,4 \text{ kg} / 44 \text{ kg/kmol}$ = 15,6 kg
- CO_2 → $m = 132 \text{ kg} / 44 \text{ kg/kmol}$ = 3 kg
- H_2O → $m = 72 \text{ kg} / 44 \text{ kg/kmol}$ = 1,64 kg
- N_2 → $m = 526,4 \text{ kg} / 44 \text{ kg/kmol}$ = 11,96 kg

Sehingga massa dari unsur-unsur yang terlibat dalam proses pengujian didapatkan hasil sebagai berikut :

- $\dot{m} \text{ C}_3\text{H}_8$ = $0,62 \text{ kg} / 3600 \text{ detik}$ = 0,00017222 kg/detik
- $\dot{m} \text{ u}$ (udara) = $1,56 \text{ kg} \times 0,00017222 \text{ kg/detik}$ = 0,000268 kg/detik
- $\dot{m} \text{ CO}_2$ = $3 \text{ kg} \times 0,00017222 \text{ detik}$ = 0,000516 kg/detik
- $\dot{m} \text{ H}_2\text{O}$ = $1,64 \text{ kg} \times 0,00017222 \text{ detik}$ = 0,002822 kg/detik
- $\dot{m} \text{ N}_2$ = $11,96 \text{ kg} \times 0,00017222 \text{ detik}$ = 0,002059 kg/detik
- $\dot{m} \text{ w}$ (air) = $2000 \text{ kg/m}^3 \times (0,002 \text{ m}^3 / 60 \text{ detik})$ = 0,06667 kg/detik

Selama proses pengujian berlangsung, selain gas hasil pembakaran juga terdapat kalor yang terbuang ke lingkungan yaitu kalor konveksi dan kalor radiasi yang dihasilkan dari dinding tabung selama proses pengujian pembakaran berlangsung. Cara untuk mengetahui nilai kalor yang terbuang ke lingkungan yaitu perlu diketahui nilai kalor konveksi dan radiasi seperti pada persamaan (2.8) :

- Konveksi

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$T_s = \frac{T5+T6}{2} = \frac{34,34+35,74}{2} = 35,04 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = \frac{T7+T8}{2} = \frac{32,16+31,66}{2} = 31,91 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A_s = (\pi \times D) \times t = (\pi \times 210\text{mm}) \times 680 = 0,448 \text{ m}^2$$

$$T_f = \frac{T_\delta + T_\infty}{2} = \frac{35,04 + 31,91}{2} = 33,47 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Setelah diketahui nilai T_f , maka akan digunakan table A-15 untuk mencari nilai:

$$k = \left(\frac{33,47-30}{35-30} \right) \times (0,02625 - 0,02588) + 0,02588 = 0,02613 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

$$\nu = \left(\frac{33,47-30}{35-30} \right) \times (1,655 \cdot 10^{-5} - 1,608 \cdot 10^{-5}) + 1,608 \cdot 10^{-5} = 1,640 \cdot 10^{-5}$$

$$Pr = \left(\frac{33,47-30}{35-30} \right) \times (0,7268 - 0,7282) + 0,7282 = 0,7272$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{33,47} = \frac{1}{306,47k}$$

Setelah nilai (k , ν , Pr dan B) diketahui, maka nilai Ra dapat dihitung menggunakan persamaan (2.10) :

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) D^3}{\nu^2} \times Pr$$

$$Ra = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{306,47k} \cdot (35,04 - 31,91) ^\circ\text{C} \cdot (0,21m)^3}{(1,640 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s})^2} \times 0,7272$$

$$Ra = 2505974,875$$

Fluida mengalir secara laminar karena mengalir dengan arah lurus melewati titik-titik pengukuran suhu.

Nilai Ra digunakan untuk menghitung angka *nusselt* Nu dengan menggunakan persamaan (2.11) :

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{1}{4}}} \right)^2$$

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot 2606677,4146^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{0,7272} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{1}{4}}} \right)^2$$

$$Nu = 18,9338$$

Nilai angka nussel Nu digunakan untuk menghitung nilai koefisien konveksi h menggunakan persamaan (2.9) :

$$h = \frac{k}{D} \cdot Nu = \frac{0,02613 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}{0,21 m} \times 18,9338 = 2,3559 \text{ W/m} \cdot ^\circ C$$

Maka nilai kalor konveksi Q kon dapat dihitung menggunakan persamaan (2.9):

$$\begin{aligned} Q &= h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \\ &= 2,3559 \text{ W/m} \cdot ^\circ C \times 0,448 \text{ m}^2 \times (35,04 - 31,91) ^\circ C \\ &= 3,29995 \text{ W} \end{aligned}$$

- Radiasi

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \Delta T^4$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}$$

$$\varepsilon = 0,07 \text{ (emissities of materials alumunium foil at 300k).}$$

$$T_s = \frac{T_5 + T_6}{2} = \frac{34,34 + 35,74}{2} = 35,04 ^\circ C = 308,04 \text{ K}$$

$$T_{\text{surr}} = \frac{T_7 + T_8}{2} = \frac{32,16 + 31,66}{2} = 31,91 ^\circ C = 304,91 \text{ K}$$

$$A = (\pi \times D) \times t = (\pi \times 210 \text{ mm}) \times 680 \text{ mm} = 0,448 \text{ m}^2$$

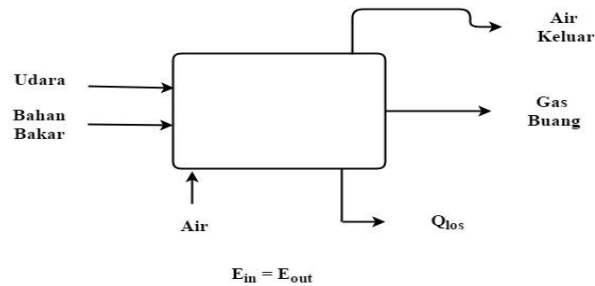
Maka nilai dari kalor radiasi Q_{radiasi} dapat dihitung menggunakan persamaan (2.12) :

$$\begin{aligned} Q &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \Delta T^4 \\ &= 0,07 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm K}^{-4} \times 0,448 \text{ m}^2 \times (308,04 \text{ K} - 304,91 \text{ K})^4 \\ &= 1,046 \text{ W} \end{aligned}$$

Setelah nilai kalor koveksi dan radiasi diketahui, maka nilai kalor lingkungan dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned} Q_{\text{loss}} &= Q_{\text{konveksi}} + Q_{\text{radiasi}} \\ &= 3,29995 \text{ W} + 1,046 \text{ W} \\ &= 4,3469 \text{ W} \end{aligned}$$

Dari hasil tahapan perhitungan diatas maka nilai kalor dari LPG dapat dihitung menggunakan persamaan (3.1) :



Gambar 4.6 Kestimbangan Energi pada *Flow Calorimeter*

$$HV_{C_3H_8} = [\dot{m}_{w,out} \cdot C_{p,w,out} \cdot T_{st2} + Q_{loss} + T_{st4} \cdot (\dot{m}_{CO_2} \cdot C_{p,CO_2} + \dot{m}_{H_2O} \cdot C_{p,H_2O} + \dot{m}_{N_2} \cdot C_{p,N_2}) - \dot{m}_{u,in} \cdot C_{p,u,in} \cdot T_{st3} - \dot{m}_{w,in} \cdot C_{p,w,in} \cdot T_{st1}] \cdot \frac{1}{\dot{m}_{C_3H_8}}$$

$$HV_{C_3H_8} = [0,06667 \text{ kg/detik} \cdot 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot 49,07 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 1000 + 4,3469 + 250,41 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 1000 \cdot (0,000516 \text{ kg/detik} \cdot 1,029 \text{ kJ/kg.K} + 0,0002821 \text{ kg/detik} \cdot 1,978957 \text{ kJ/kg.K} + 0,002057 \text{ kg/detik} \cdot 1,06 \text{ kJ/kg.K}) - 0,00268667 \text{ kg/detik} \cdot 1,005 \text{ kJ/kg} \cdot 31,67 \cdot 1000 - 0,6667 \text{ kg/detik} \cdot 4,18 \text{ kJ/kg.K} \cdot 30,87 \cdot 1000] \cdot \frac{1}{0,00017222 \text{ kg/detik}}$$

$$HV_{C_3H_8} = 33.758.181,88 \text{ kJ/kg}$$

$$= 33.758,18 \text{ kJ/kg}$$

Karena bahan bakar pembakaran adalah jenis gas, maka nilai kalor adalah LHV. Sehingga nilai LHV dari LPG = 33.715,46 kJ/kg.

Setelah diketahui nilai kalor LHV maka dapat diketahui efisiensi dari flow kalorimeter menggunakan nilai kalor secara teoritik yaitu 46.454,31 kJ/kg.

$$\text{Efisiensi FC} = \frac{\dot{Q} \text{ diserap air}}{\dot{m}_{LPG} \cdot NK_{LPG}}$$

$$\eta = [\dot{m}_{w,out} \cdot C_{p,w,out} \cdot (T_{st2} - T_{st1})] / (\dot{m}_{C_3H_8} \cdot LHV_{C_3H_8} \text{ teoritik})$$

$$= [0,06667 \text{ kg/dtk} \cdot 4,18 \text{ kJ/kg.K} \cdot (49,07 \text{ }^\circ\text{C} - 30,87 \text{ }^\circ\text{C})] / (0,00017222 \text{ kg/dtk} \cdot 46.454,31 \text{ kJ/kg})$$

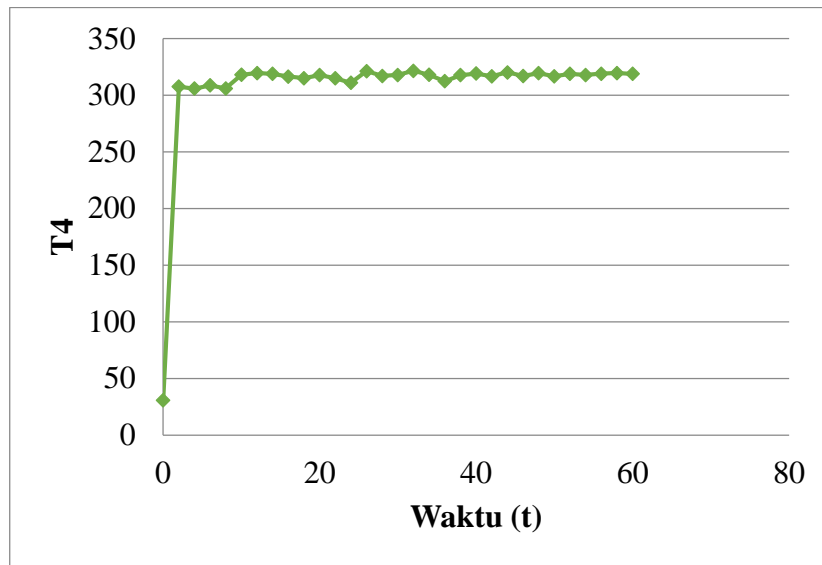
$$= 0,63 \text{ atau } 63 \%$$

4.4.2 Debit Aliran 2 LPM dengan Bukaannya Katup Gas ¼

Tabel 4.4 Data hasil pengujian debit 2 LPM bukaan katup ¼

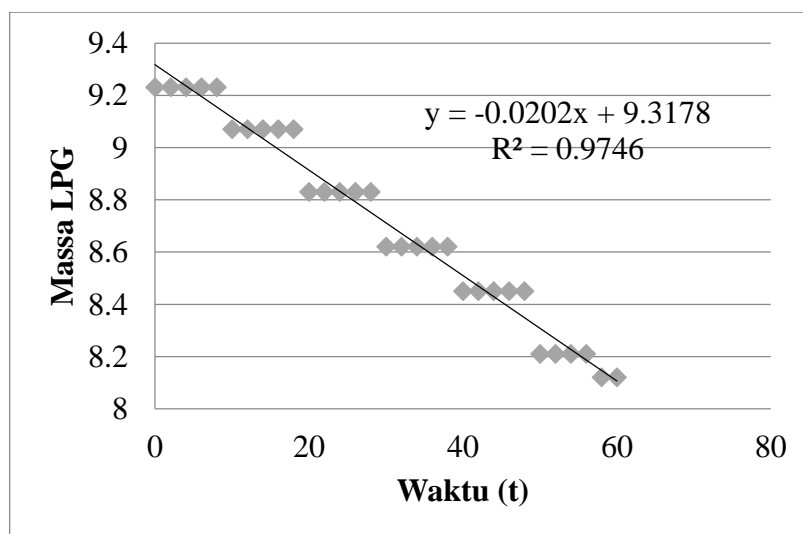
Waktu Menit	Debit (LPM)	Massa (kg)	SUHU							
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
0	2	9,23	30,5	30,5	29,9	30,8	29,6	29,6	29,4	29,4
2	2	9,2	30,3	42,1	30,2	307,5	31,7	32,3	30	29,9
4	2	9,17	30,3	48	31,7	305,9	33,3	34	30,7	30,3
6	2	9,13	30,3	52,5	31,5	308,7	34,1	35,2	30,3	30,3
8	2	9,1	30,4	55,7	35,2	306	34,7	35,5	31	31
10	2	9,07	30,4	57,5	32,4	318	34,8	35,9	30,8	30,5
12	2	9,04	30,5	58,6	32,1	319,5	32,9	35,8	30,7	30,6
14	2	9,01	30,6	59,3	32,8	318,8	34,6	35,4	30,6	30,4
16	2	8,98	30,6	59,4	35,4	316,4	35,6	36	31,2	31
18	2	8,95	30,8	59,5	31,9	315,1	34,4	34,3	30,4	30
20	2	8,91	30,9	59,8	33,8	317,7	35,2	34,8	31,3	30,7
22	2	8,87	31	60	33,5	315	35	34,3	31,3	30,8
24	2	8,83	31	59,9	33,1	311	35,1	34,8	31,1	30,7
26	2	8,8	31,1	60	33,6	321,2	35,1	34,9	31,2	30,6
28	2	8,76	31,2	60	32,8	317	34,1	35,3	30,2	30,3
30	2	8,72	31,2	60,1	32,2	317,8	34,4	35,7	31,4	31,2
32	2	8,68	31,3	60,2	32	321,6	33,1	35	29,6	30
34	2	8,62	31,3	60,2	31,6	318	34,1	34,4	30,6	30,4
36	2	8,59	31,2	60,3	32,6	312,3	34,8	35,1	31,4	31,6
38	2	8,55	31,2	60,2	30,6	317,7	33,8	34,2	30,2	29,9
40	2	8,52	31,2	60,3	31,1	319,2	34	35,8	29,7	30,1
42	2	8,48	31,4	60,2	31,7	316,7	34,9	35,9	31,4	31
44	2	8,45	31,3	60,2	33,2	320,1	35,6	36	31,4	30,8
46	2	8,41	31,3	60,2	32,7	317	34,4	35,4	30,5	30,2
48	2	8,36	31,2	60	32,2	319,4	34,4	35,7	30,2	30,1
50	2	8,32	31,2	60,2	34,2	316,8	35,4	35,8	31,8	31,4
52	2	8,28	31,1	60,1	33,1	318,9	35,4	36,2	31,3	30,7
54	2	8,25	31,1	60	31,2	317,9	34	35,9	30,5	30,5
56	2	8,21	31,3	60,2	31,5	319	35,1	35,8	31	30,5
58	2	8,16	31,3	60,2	32,4	319,5	35,1	36	31,5	31,1
60	2	8,12	31,1	60,2	37,8	318,8	33,3	35,1	30,4	30,3

Grafik kenaikan suhu gas keluaran pada pembakaran kalorimeter aliran terhadap waktu seperti pada gambar (4.7) :



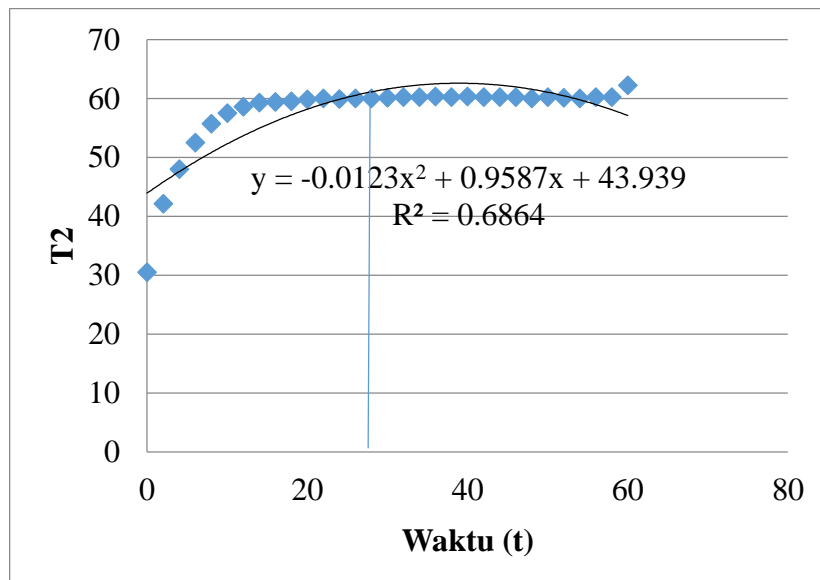
Gambar 4.7 Grafik suhu T₄ terhadap waktu pada katub ¼

Dari grafik gambar (4.7) dapat diketahui bahwa suhu keluaran normal dan selama pembakaran berlangsung memiliki perbedaan yang jauh, dimana pada 2 menit pertama suhunya mencapai 307,5 °C, ini terjadi karena kalor jenis udara yang mengisi saluran pembakaran sebelum gas pembakaran masuk terbilang rendah, sehingga suhu gas keluar dapat meningkat tinggi dapat cepat. Dari grafik gambar (4.7) juga dapat diketahui bahwa suhu gas keluar pada kalorimeter aliran baru berkisar pada 305,9 °C hingga 320,1 °C.



Gambar 4.8 Grafik penurunan massa gas LPG terhadap waktu pada katub ¼

Dari grafik gambar (4.8) dapat diketahui bahwa massa gas LPG berkurang setiap menit pengujian. Pengamatan massa LPG terhadap waktu pengujian pada alat kalorimeter aliran menghasilkan nilai regresi $R^2 = 0,9979$, artinya penurunan massa LPG pada pengujian kalorimeter aliran baru dapat dikatakan stabil karena pengurangan massa LPG berkurang dengan selisih tidak terlalu banyak setiap 2 menit.



Gambar 4.9 Grafik suhu T_2 terhadap waktu pada katub $\frac{1}{4}$

Dari hasil grafik gambar (4.9) diatas T_2 menunjukkan nilai *steady* pada menit ke-24. Maka nilai T_1 sapaai T_8 diambil pada menit ke 24. Sehingga nilai suhu standarnya adalah sebagai berikut :

$$T_{st1} = \frac{1}{0,9946} \times (30,9 - 0,9992) = 30,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st2} = \frac{1}{0,9921} \times (65,3 - 1,017) = 64,79 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st3} = \frac{1}{0,9909} \times (33,8 - 1,0233) = 33,08 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st4} = \frac{1}{1,0011} \times (317,7 - 0,7159) = 316,63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st5} = \frac{1}{0,8823} \times (35,2 - 3,9044) = 35,47 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st6} = \frac{1}{0,888} \times (34,8 - 3,6652) = 35,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st7} = \frac{1}{0,8891} \times (31,3 - 3,6089) = 31,14 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st8} = \frac{1}{0,8864} \times (30,7 - 3,7331) = 30,42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dari hasil kalibrasi standar yang didapat dari perhitungan menggunakan rumus hasil kalibrasi, maka nilai kalor jenis (C_p) dapat ditentukan menggunakan tabel termodinamika. Nilai kalor jenis (C_p) dari air masuk, air keluar dan setiap komponen LPG dapat diketahui sebagai berikut :

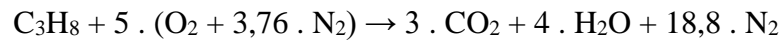
$$\begin{aligned} C_{p_{C_3H_8}} (T_{st3} \text{ pada } 33,0777 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 306,0777 \text{ K} \\ &= 1,6794 \text{ kJ/kg (Tabel A-2a)} \\ C_{p_{w.in}} (T_{st1} \text{ pada } 30,0631 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 4,18 \text{ kJ/kg (Tabel A-3a)} \\ C_{p_{w.out}} (T_{st2} \text{ pada } 64,7969 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 4,18 \text{ kJ/kg (Tabel A-3a)} \\ C_{p_{u.in}} (T_{st3} \text{ pada } 33,0777 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 306,0777 \text{ K} \\ &= 1,005 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2b)} \\ C_{p_{CO_2}} (T_{st4} \text{ pada } 316,6358 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 589,6358 \text{ K} \\ &= 1,069 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2b)} \\ C_{p_{H_2O}} (T_{st4} \text{ pada } 316,6358 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 589,6358 \text{ K} \\ &= 2,016923 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2c)} \\ C_{p_{N_2}} (T_{st4} \text{ pada } 316,6358 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 539,6358 \text{ K} \\ &= 1,073 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2b)} \end{aligned}$$

Dari hasil pengujian kalorimeter dengan debit 2 LPM dan bukaan katup gas $\frac{1}{4}$ diketahui $\Delta m \text{ LPG} = 9,23 \text{ kg} - 8,12 \text{ kg} = 1,11 \text{ kg}$ dengan lama pengujian selama 60 menit, sehingga perlu dihitung massa dari masing-masing unsur LPG sebagai berikut :

Massa molar komponen-komponen LPG :

- C_3H_8 = 44 kg/kmol (Tabel A-1 Termodinamika)
- Udara = 28,97 kg/kmol (Tabel A-1 Termodinamika)
- CO_2 = 1 . (12) + 2 . (16) = 44 kg/kmol
- H_2O = 2 . (1) + 16 = 18 kg/kmol
- N_2 = 2 . (14) = 28 kg/kmol

Sehingga jumlah massa dari komponen unsur-unsur *LPG* untuk 1 kmol pada persamaan sebagai berikut :



- 1 C_3H_8 = $3 \cdot (12) + 8 \cdot (1)$ = 44 kg/kmol
- 5 ($\text{O}_2 + 3,76 \text{N}_2$) (udara) = $5 \cdot \{2 \cdot (16) + 3,76 \cdot 2 \cdot (14)\}$ = 686,4 kg
- 3 CO_2 = $3 \cdot \{1 \cdot (12) + 2 \cdot (16)\}$ = 132 kg
- 4 H_2O = $4 \cdot \{2 \cdot (1) + 16\}$ = 72 kg
- 18,8 N_2 = $18,8 \cdot \{2 \cdot (14)\}$ = 526,4 kg

Jadi untuk setiap 1 kg *LPG* (C_3H_8) maka massa tiap komponen sebagai berikut :

- Udara → $m = 686,4 \text{ kg} / 44 \text{ kg/kmol}$ = 15,6 kg
- CO_2 → $m = 132 \text{ kg} / 44 \text{ kg/kmol}$ = 3 kg
- H_2O → $m = 72 \text{ kg} / 44 \text{ kg/kmol}$ = 1,64 kg
- N_2 → $m = 526,4 \text{ kg} / 44 \text{ kg/kmol}$ = 11,96 kg

Sehingga massa dari unsur-unsur yang terlibat dalam proses pengujian didapatkan hasil sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \dot{m} \text{ C}_3\text{H}_8 &= 1,11 \text{ kg} / 3600 \text{ detik} &&= 0,00030833 \text{ kg/detik} \\ \dot{m} \text{ u (udara)} &= 1,56 \text{ kg} \times 0,00030833 \text{ kg/detik} &&= 0,00048 \text{ kg/detik} \\ \dot{m} \text{ CO}_2 &= 3 \text{ kg} \times 0,00030833 \text{ detik} &&= 0,000924 \text{ kg/detik} \\ \dot{m} \text{ H}_2\text{O} &= 1,64 \text{ kg} \times 0,00030833 \text{ detik} &&= 0,0005051 \text{ kg/detik} \\ \dot{m} \text{ N}_2 &= 11,96 \text{ kg} \times 0,00030833 \text{ detik} &&= 0,003683 \text{ kg/detik} \\ \dot{m} \text{ w (air)} &= 2000 \text{ kg/m}^3 \times (0,002 \text{ m}^3 / 60 \text{ detik}) &&= 0,06667 \text{ kg/detik} \end{aligned}$$

Selama proses pengujian berlangsung, selain gas hasil pembakaran juga terdapat kalor yang terbuang ke lingkungan yaitu kalor konveksi dan kalor radiasi yang dihasilkan dari dinding tabung selama proses pengujian pembakaran berlangsung. Untuk mengetahui nilai kalor yang terbuang ke lingkungan, perlu diketahui nilai kalor koveksi dan radiasi seperti pada persamaan (2.8) :

- Konveksi

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$T_s = \frac{T5+T6}{2} = \frac{35,47+35,06}{2} = 35,27 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = \frac{T7+T8}{2} = \frac{31,14+30,42}{2} = 30,73 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A = (\pi \times D) \times t = (\pi \times 210\text{mm}) \times 680 = 0,448 \text{ m}^2$$

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{35,27 + 30,73}{2} = 33 \text{ }^\circ\text{C}$$

Setelah diketahui nilai T_f , maka akan digunakan tabel A-15 untuk mencari nilai :

$$k = \left(\frac{33-30}{35-30}\right) \times (0,02625 \times 0,02588) + 0,02588 = 0,02629 \text{ W/m }^\circ\text{C}$$

$$\nu = \left(\frac{33-30}{35-30}\right) \times (1,655 \cdot 10^{-5} - 1,608 \cdot 10^{-5}) + 1,608 \cdot 10^{-5} = 1,636 \cdot 10^{-5}$$

$$Pr = \left(\frac{33-30}{35-30}\right) \times (0,7268 - 0,7282) + 0,7282 = 0,7274$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{33 \text{ }^\circ\text{C}} = \frac{1}{306,15 \text{ K}}$$

Setelah nilai (k , ν , Pr dan B) diketahui, maka nilai (Ra) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.10) :

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) D^3}{\nu^2} \times Pr$$

$$Ra = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{306,15 \text{ K}} \cdot (35,27 - 30,73)^\circ\text{C} \cdot (0,21 \text{ m})^3}{(1,636 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}})^2} \times 0,7274$$

$$Ra = 3656887,299$$

Fluida mengalir secara laminar karena mengalir dengan arah lurus melewati titik-titik pengukuran suhu.

Nilai Ra digunakan untuk menghitung angka *nusselt* Nu dengan menggunakan persamaan (2.11) :

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{27}}}\right)^2$$

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot 44600376^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{0,7274}\right)^{\frac{9}{8}}\right)^{\frac{1}{4}}}\right)^2$$

$$Nu = 21,12$$

Nilai angka nussel Nu digunakan untuk menghitung nilai koefisien konveksi h menggunakan persamaan (2.11) :

$$h = \frac{k}{D} \cdot Nu = \frac{0,02629 \frac{W}{m} \cdot ^\circ C}{0,21 m} \times 21,12 = 2,644 W/m \cdot ^\circ C$$

Maka nilai kalor konveksi Q kon dapat dihitung menggunakan persamaan (2.8):

$$\begin{aligned} Q &= h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \\ &= 2,644 W/m \cdot ^\circ C \times 0,448 m^2 \times (35,27 - 30,73) ^\circ C \\ &= 5,368 W \end{aligned}$$

- Radiasi

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \Delta T^4$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} Wm$$

$$\varepsilon = 0,07 \text{ (emissities of materials aluminium foil at 300k).}$$

$$T_s = \frac{T_5 + T_6}{2} = \frac{35,47 + 35,06}{2} = 35,27 ^\circ C = 308,27 K$$

$$T_{surr} = \frac{T_7 + T_8}{2} = \frac{31,14 + 30,42}{2} = 30,73 ^\circ C = 303,73 K$$

$$A = (\pi \times D) \times t = (\pi \times 210 mm) \times 680 mm = 0,448 m^2$$

Maka nilai dari kalor radiasi Q_{radiasi} dapat dihitung menggunakan persamaan (2.12) :

$$\begin{aligned} Q &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \Delta T^4 \\ &= 0,07 \times 5,67 \cdot 10^{-8} Wm K^{-4} \times 0,448 m^2 \times (308,27 K - 303,73 K)^4 \\ &= 1,234 W \end{aligned}$$

Setelah nilai kalor koveksi dan radiasi diketahui, maka nilai kalor lingkungan dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned} Q_{loss} &= Q_{konveksi} + Q_{radiasi} \\ &= 5,368 W + 1,234 W \end{aligned}$$

$$= 6,602 \text{ W}$$

Dari hasil tahapan perhitungan diatas maka nilai kalor dari LPG dapat dihitung menggunakan persamaan (3.1).

$$HV_{C_3H_8} = [\dot{m}_{w,out} \cdot C_{p_{w,out}} \cdot T_{st2} + Q_{loss} + T_{st4} \cdot (\dot{m}_{CO_2} \cdot C_{p_{CO_2}} + \dot{m}_{H_2O} \cdot C_{p_{H_2O}} + \dot{m}_{N_2} \cdot C_{p_{N_2}}) - \dot{m}_{u,i} \cdot C_{p_{u,i}} \cdot T_{st3} - \dot{m}_{w,i} \cdot C_{p_{w,i}} \cdot T_{st1}] \cdot \frac{1}{\dot{m}_{C_3H_8}}$$

$$HV_{C_3H_8} = [0,06667 \text{ kg/detik} \cdot 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot 59,25 \text{ }^\circ\text{C} + 6,602 \text{ W} + 316,63 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (0,000924 \text{ kg/detik} \cdot 1,096 \text{ kJ/kg.K} + 0,0005056 \text{ kg/detik} \cdot 2,01692 \text{ kJ/kg.K} + 0,003683 \text{ kg/detik} \cdot 1,073 \text{ kJ/kg.K}) - 0,0048 \text{ kg/detik} \cdot 1,005 \text{ kJ/kg} \cdot 306,08 \text{ K} - 0,06667 \text{ kg/detik} \cdot 4,18 \text{ kJ/kg.K} \cdot 303,06 \text{ K}] \cdot \frac{1}{0,000308 \text{ kg/detik}}$$

$$HV_{C_3H_8} = 32.375.243,85 \text{ J/kg}$$

$$= 32.375,24 \text{ kJ/kg}$$

Karena bahan bakar pembakaran adalah jenis gas, maka nilai kalor adalah LHV. Sehingga nilai LHV dari LPG = 32.375,24 kJ/kg.

Setelah diketahui nilai kalor LHV maka dapat diketahui efisiensi dari flow calorimeter dan disini untuk mengetahui efisiensi calorimeter menggunakan nilai kalor teoritik yaitu berkisar 46.454,31 kJ/kg.

$$\text{Efisiensi FC} = \frac{\dot{Q} \text{ diserap air}}{\dot{m}_{LPG} \cdot NK_{LPG}}$$

$$\eta = [\dot{m}_{w,out} \cdot C_{p_{w,out}} \cdot (T_{st2} - T_{st1})] / (\dot{m}_{C_3H_8} \cdot LHV_{C_3H_8})$$

$$= [0,06667 \text{ kg/dtk} \cdot 4,18 \text{ kJ/kg.K} \cdot (59,25 \text{ }^\circ\text{C} - 30,06 \text{ }^\circ\text{C})] / (0,00030833 \text{ kg/dtk} \cdot 46.454,31 \text{ kJ/kg})$$

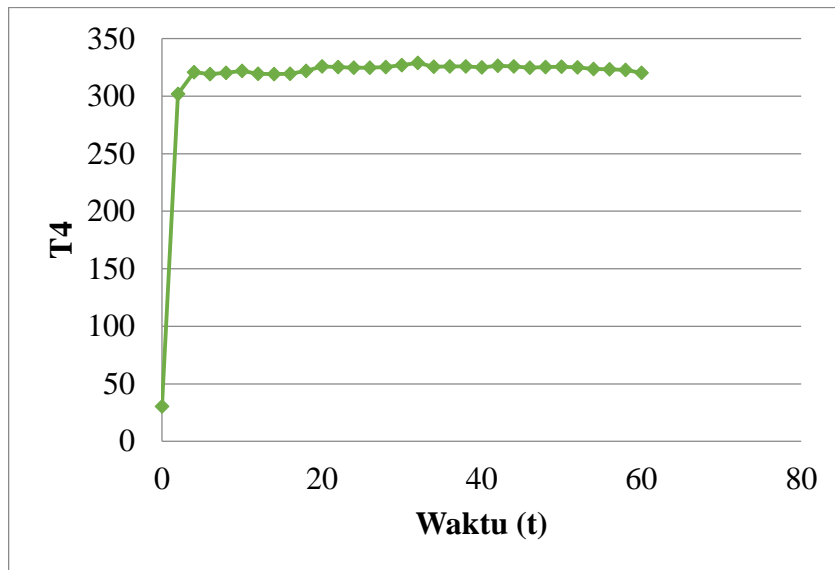
$$= 0,57 \text{ atau } 57 \%$$

4.4.3 Debit Aliran 2 LPM dengan Buka-an Katup Gas ½

Tabel 4.5 Data hasil pengujian debit aliran 2 LPM katup gas ½

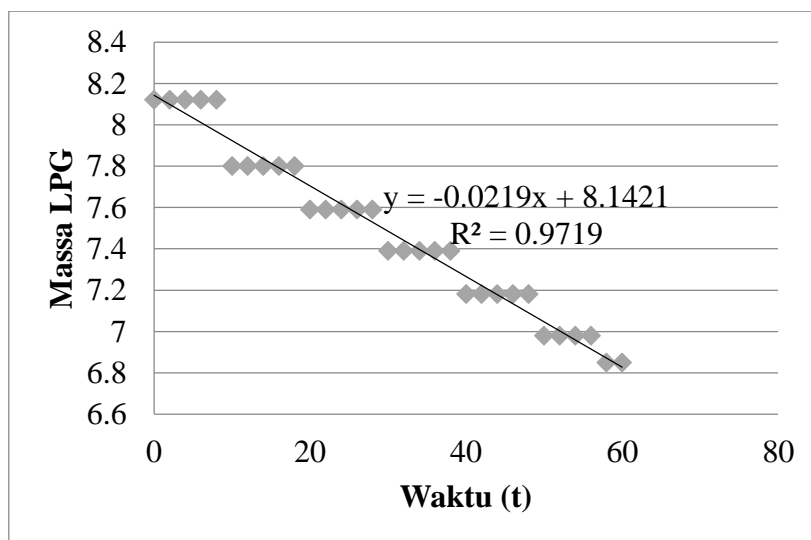
Waktu Menit	Debit (LPM)	Berat LPG (kg)	SUHU							
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
0	2	8,12	30,3	30,3	29,2	30,5	28,4	28,6	28,4	28
2	2	8,08	30	42,5	32,1	30,2	32,4	31,8	31,2	30
4	2	8,04	30,3	49,1	29,5	32,1	31,4	32,4	28,3	28
6	2	7,99	30,6	54,3	29,7	31,9	30,9	32,5	28,6	29
8	2	7,94	30,6	58,4	32,7	32,0	34,1	34,9	31,1	30
10	2	7,89	30,7	61,2	31,2	32,2	34,4	34,8	30,3	30
12	2	7,85	30,8	63,1	31,4	31,9	34,9	35,5	30,9	31
14	2	7,8	30,9	65,5	33	31,9	34,9	35,3	30	30
16	2	7,75	31	67,7	32,9	31,9	34,4	36	31,8	31
18	2	7,71	31,1	69,6	31,2	32,2	34,6	36	29,1	29
20	2	7,67	31,2	70,4	30,6	32,6	35,9	36,1	29,8	30
22	2	7,63	31,4	71,3	34,3	32,5	36,6	36	30,3	31
24	2	7,59	31,4	71,9	32,2	32,5	34,8	37,4	31,4	31
26	2	7,55	31,4	72,4	30,9	32,5	33,9	35,9	30,2	30
28	2	7,51	31,5	72,9	30,5	32,5	36	35,7	29,8	30
30	2	7,47	31,5	73,1	32,7	32,7	34,7	36,7	31	30
32	2	7,43	31,4	73,4	30,6	32,9	35,3	36,2	29,9	29
34	2	7,39	31,5	73,5	32,4	32,5	34,5	35,9	30,3	30
36	2	7,34	31,4	73,2	31,5	32,6	34,8	35,8	29,7	30
38	2	7,3	31,4	73,7	31,4	32,6	35,5	36,7	29,9	30
40	2	7,26	31,4	73,5	31,2	32,5	33,5	36,7	29,9	30
42	2	7,22	31,4	73,1	29,8	32,6	34,9	35,8	29,2	29
44	2	7,18	31,8	73	29,3	32,6	35,3	35,6	28,5	29
46	2	7,14	31,9	73,2	29,5	32,5	35,6	36,4	23	28
48	2	7,1	31,8	73,4	29,2	32,5	35,4	36,4	30	30
50	2	7,06	31,6	72	29,7	32,6	34,4	36,1	29,5	29
52	2	7,02	31,4	72,3	30,3	32,5	34,6	35,6	28,5	29
54	2	6,98	31,1	72,5	30,9	32,4	33,6	35,3	29,4	29
56	2	6,94	31	72,4	29,3	32,3	33,6	33,9	28,3	28
58	2	6,89	31	72,7	28,8	32,3	33,8	34,2	28,1	28
60	2	6,85	31	72,4	29,4	32,0	33,6	33,8	28,6	28

Grafik kenaikan suhu gas keluaran pada pembakaran kalorimeter aliran terhadap waktu seperti pada gambar (4.10).



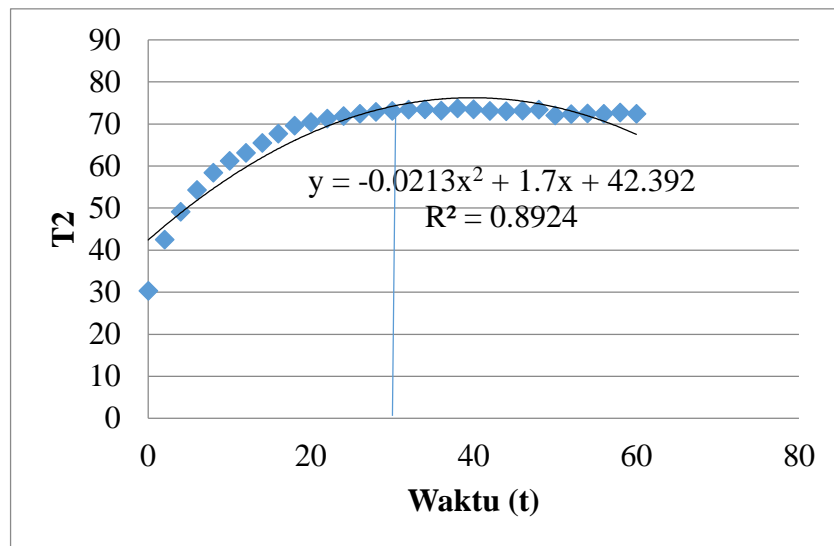
Gambar 4.10 Grafik suhu T₄ terhadap waktu pada katub ½

Dari grafik gambar (4.10) dapat diketahui bahwa suhu keluaran normal dan selama pembakaran berlangsung memiliki perbedaan yang jauh, dimana pada 2 menit pertama suhunya mencapai 302 °C, ini terjadi karena kalor jenis udara yang mengisi saluran pembakaran sebeum gas pembakaran masuk terbilang rendah, sehingga suhu gas keluar dapat meningkat tinggi dapat cepat. Dari grafik gambar (4.10) juga dapat diketahui bahwa suhu gas keluar pada kalorimeter aliran baru berkisar pada 302 °C hingga 329 °C.



Gambar 4.11 Grafik penurunan massa gas LPG terhadap waktu pada katub ½

Dari gambar grafik (4.11) dapat diketahui bahwa massa gas LPG berkurang setiap menit pengujian. Pengamatan massa LPG terhadap waktu pengujian pada alat calorimeter aliran menghasilkan nilai regresi $R^2 = 1$. Artinya penurunan massa LPG pada pengujian calorimeter aliran baru dapat dikatakan stabil karena pengurangan massa LPG berkurang dengan selisih tidak terlalu banyak setiap 2 menit.



Gambar 4.12 Grafik T_2 terhadap waktu pada katub $\frac{1}{2}$

Dari hasil gambar (4.12) grafik diatas T_2 menunjukkan nilai *steady* pada menit 26. Maka nilai T_1 sampai T_8 diambil pada menit ke 26. Sehingga nilai suhu standarnya adalah sebagai berikut :

$$T_{st1} = \frac{1}{0,9946} \times (31,5 - 0,9992) = 30,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st2} = \frac{1}{0,9921} \times (73,1 - 1,017) = 72,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st3} = \frac{1}{0,9909} \times (32,7 - 1,0233) = 31,97 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st4} = \frac{1}{1,0011} \times (327 - 0,7159) = 325,92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st5} = \frac{1}{0,8823} \times (34,7 - 3,9044) = 34,90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st6} = \frac{1}{0,888} \times (36,7 - 3,6652) = 37,20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st7} = \frac{1}{0,8891} \times (31 - 3,6089) = 30,81 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{st8} = \frac{1}{0,8864} \times (30 - 3,7331) = 29,63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dari hasil kalibrasi standar yang didapat dari perhitungan menggunakan rumus hasil kalibrasi, maka nilai kalor jenis (C_p) dapat ditentukan menggunakan tabel termodinamika. Nilai kalor jenis (C_p) dari air masuk, air keluar dan setiap komponen LPG dapat diketahui sebagai berikut :

$$\begin{aligned} C_{p_{C_3H_8}} (T_{st3} \text{ pada } 31,9676 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 304,9676 \text{ K} \\ &= 1,6794 \text{ kJ/kg (Tabel A-2a)} \end{aligned}$$

$$C_{p_{w.in}} (T_{st1} \text{ pada } 30,666 \text{ } ^\circ\text{C}) = 4,18 \text{ kJ/kg (Tabel A-3a)}$$

$$C_{p_{w.out}} (T_{st2} \text{ pada } 72,6569 \text{ } ^\circ\text{C}) = 4,19 \text{ kJ/kg (Tabel A-3a)}$$

$$\begin{aligned} C_{p_{u.in}} (T_{st3} \text{ pada } 31,9676 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 304,9676 \text{ K} \\ &= 1,005 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2b)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{p_{CO_2}} (T_{st4} \text{ pada } 325,9256 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 598,9256 \text{ K} \\ &= 1,074 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2b)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{p_{H_2O}} (T_{st4} \text{ pada } 325,9256 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 598,9256 \text{ K} \\ &= 2,022312 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2c)} \end{aligned}$$

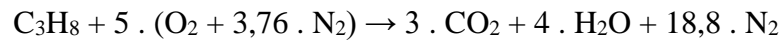
$$\begin{aligned} C_{p_{N_2}} (T_{st4} \text{ pada } 325,9256 \text{ } ^\circ\text{C}) &= 598,9256 \text{ K} \\ &= 1,075 \text{ kJ/kg.K (Tabel A-2b)} \end{aligned}$$

Dari hasil pengujian calorimeter dengan debit 2 LPM dan bukaan katup gas $\frac{1}{2}$ diketahui $\Delta m \text{ LPG} = 8,12 \text{ kg} - 6,85 \text{ kg} = 1,27 \text{ kg}$ dengan lama pengujian selama 60 menit, sehingga perlu dihitung massa dari masing-masing unsur LPG sebagai berikut :

Massa molar komponen-komponen LPG :

- C_3H_8 = 44 kg/kmol (Tabel A-1 Termodinamika)
- Udara = 28,97 kg/kmol (Tabel A-1 Termodinamika)
- CO_2 = 1 . (12) + 2 . (16) = 44 kg/kmol
- H_2O = 2 . (1) + 16 = 18 kg/kmol
- N_2 = 2 . (14) = 28 kg/kmol

Sehingga jumlah massa dari komponen unsur-unsur *LPG* untuk 1 kmol pada persamaan sebagai berikut :



- 1 C_3H_8 = $3 \cdot (12) + 8 \cdot (1)$ = 44 kg
- 5 ($\text{O}_2 + 3,76 \text{N}_2$) (udara) = $5 \cdot \{2 \cdot (16) + 3,76 \cdot 2 \cdot (14)\}$ = 686,4 kg
- 3 CO_2 = $3 \cdot \{1 \cdot (12) + 2 \cdot (16)\}$ = 132 kg
- 4 H_2O = $4 \cdot \{2 \cdot (1) + 16\}$ = 72 kg
- 18,8 N_2 = $18,8 \cdot \{2 \cdot (14)\}$ = 526,4 kg

Jadi untuk setiap 1 kg *LPG* (C_3H_8) maka massa tiap komponen sebagai berikut :

- Udara → $m = 686,4 \text{ kg} / 44 \text{ kg}$ = 15,6 kg
- CO_2 → $m = 132 \text{ kg} / 44 \text{ kg}$ = 3 kg
- H_2O → $m = 72 \text{ kg} / 44 \text{ kg}$ = 1,64 kg
- N_2 → $m = 526,4 \text{ kg} / 44 \text{ kg}$ = 11,96 kg

Sehingga massa dari unsur-unsur yang terlibat dalam proses pengujian didapatkan hasil sebagai berikut :

- $\dot{m} \text{ C}_3\text{H}_8$ = $1,27 \text{ kg} / 3600 \text{ detik}$ = 0,000352778kg/detik
- $\dot{m} \text{ u (udara)}$ = $1,56 \text{ kg} \times 0,0003528 \text{ kg/detik}$ = 0,00055033 kg/detik
- $\dot{m} \text{ CO}_2$ = $3 \text{ kg} \times 0,000352778 \text{ detik}$ = 0,0010583 kg/detik
- $\dot{m} \text{ H}_2\text{O}$ = $1,64 \text{ kg} \times 0,000352778 \text{ detik}$ = 0,0005786 kg/detik
- $\dot{m} \text{ N}_2$ = $11,96 \text{ kg} \times 0,000352778 \text{ detik}$ = 0,004219 kg/detik
- $\dot{m} \text{ w (air)}$ = $2000 \text{ kg/m}^3 \times (0,002 \text{ m}^3 / 60 \text{ detik})$ = 0,06667 kg/detik

Selama proses pengujian berlangsung, selain gas hasil pembakaran juga terdapat kalor yang terbuang ke lingkungan yaitu kalor konveksi dan kalor radiasi yang dihasilkan dari dinding tabung selama proses pengujian pembakaran berlangsung. Untuk mengetahui nilai kalor yang terbuang ke lingkungan, perlu diketahui nilai kalor koveksi dan radiasi seperti pada persamaan (2.8) :

- Konveksi

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$T_s = \frac{T_5 + T_6}{2} = \frac{34,90 + 37,20}{2} = 36,05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = \frac{T_7 + T_8}{2} = \frac{30,81 + 29,63}{2} = 30,22 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A_s = (\pi \times D) \times t = (\pi \times 210\text{mm}) \times 680 = 0,448 \text{ m}^2$$

$$T_f = \frac{T_\delta + T_\infty}{2} = \frac{35,2661 + 30,734}{2} = 33,135 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Setelah diketahui nilai T_f , maka akan digunakan tabel A-15 untuk mencari nilai :

$$k = \left(\frac{33,135 - 30}{35 - 30} \right) \times (0,02625 - 0,02588) + 0,02588 = 0,02611 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

$$\nu = \left(\frac{33,135 - 30}{35 - 30} \right) \times (1,655 \cdot 10^{-5} - 1,608 \cdot 10^{-5}) + 1,608 \cdot 10^{-5} = 1,637 \cdot 10^{-5}$$

$$Pr = \left(\frac{33,135 - 30}{35 - 30} \right) \times (0,7268 - 0,7282) + 0,7282 = 0,7273$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{33,00005} = \frac{1}{306,135k}$$

Setelah nilai (k , ν , Pr dan B) diketahui, maka nilai (Ra) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.10) :

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) D^3}{\nu^2} \times Pr$$

$$Ra = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{306,00005k} \cdot (36,05 - 30,22)^\circ\text{C} \cdot (0,21m)^3}{(1,637 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s})^2} \times 0,7273$$

$$Ra = 4695682,133$$

Fluida mengalir secara laminar karena mengalir dengan arah lurus melewati titik-titik pengukuran suhu.

Nilai Ra digunakan untuk menghitung angka *nusselt* Nu dengan menggunakan persamaan (2.11) :

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{1}{4}} \right)^{\frac{1}{4}}} \right)^2$$

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot 4695682,133^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{0,7273} \right)^{\frac{1}{4}} \right)^{\frac{1}{4}}} \right)^2$$

$$Nu = 22,71$$

Nilai angka *nussel* Nu digunakan untuk menghitung nilai koefisien konveksi h menggunakan persamaan (2.9) :

$$h = \frac{k}{D} \cdot Nu = \frac{0,02611 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}{0,21 m} \times 22,71 = 2,824 \text{ W/m} \cdot ^\circ C$$

Maka nilai kalor konveksi Q_{kon} dapat dihitung menggunakan persamaan (2.8) :

$$\begin{aligned} Q &= h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \\ &= 2,824 \text{ W/m} \cdot ^\circ C \times 0,448 \text{ m}^2 \times (36,05 - 30,22) ^\circ C \\ &= 7,376 \text{ W} \end{aligned}$$

- Radiasi

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \Delta T^4$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}$$

$$\varepsilon = 0,07 \text{ (emissivities of materials aluminium foil at 300k).}$$

$$T_s = \frac{T5+T6}{2} = \frac{34,90+37,20}{2} = 36,05 ^\circ C = 309,05 \text{ K}$$

$$T_{surr} = \frac{T7+T8}{2} = \frac{30,81+29,63}{2} = 30,22 ^\circ C = 303,22 \text{ K}$$

$$A = (\pi \times D) \times t = (\pi \times 210 \text{ mm}) \times 680 \text{ mm} = 0,448 \text{ m}^2$$

Maka nilai dari kalor radiasi $Q_{radiasi}$ dapat dihitung menggunakan persamaan (2.12) :

$$\begin{aligned} Q &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \Delta T^4 \\ &= 0,07 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm K}^{-4} \times 0,448 \text{ m}^2 \times (309,05 \text{ K} - 303,22 \text{ K})^4 \\ &= 2,054 \text{ W} \end{aligned}$$

Setelah nilai kalor koveksi dan radiasi diketahui, maka nilai kalor lingkungan dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned} Q_{loss} &= Q_{konveksi} + Q_{radiasi} \\ &= 7,376 \text{ W} + 2,054 \text{ W} \\ &= 9,43 \text{ W} \end{aligned}$$

Dari hasil tahapan perhitungan diatas maka nilai kalor dari LPG dapat dihitung menggunakan persamaan (3.1).

$$HV_{C_3H_8} = [\dot{m}_{w,out} \cdot C_{p_{w,out}} \cdot (T_{st2} + T_{st4}) \cdot \dot{m}_{CO_2} \cdot C_{p_{CO_2}} + \dot{m}_{H_2O} \cdot C_{p_{H_2O}} + \dot{m}_{N_2} \cdot C_{p_{N_2}} - \dot{m}_{u,in} \cdot C_{p_{u,in}} \cdot T_{st3} - \dot{m}_{w,i} \cdot C_{p_{w,i}} \cdot T_{st3}] \cdot \frac{1}{\dot{m}_{C_3H_8}}$$

$$HV_{C_3H_8} = [0,06667 \text{ kg/detik} \cdot 4,19 \text{ kJ/kg} \cdot (72,66 \text{ }^\circ\text{C} - 325,72 \text{ }^\circ\text{C}) + (0,001062 \text{ kg/detik} \cdot 1,074 \text{ kJ/kg.K} + 0,00058056 \text{ kg/detik} \cdot 2,022312 \text{ kJ/kg.K} + 0,0004234 \text{ kg/detik} \cdot 1,075 \text{ kJ/kg.K}) - 0,0055224 \text{ kg/detik} \cdot 1,005 \text{ kJ/kg} \cdot 304,97 \text{ K} - 0,06667 \text{ kg/detik} \cdot 4,18 \text{ kJ/kg.K} \cdot 303,67 \text{ K}] \cdot \frac{1}{0,000352778 \text{ kg/detik}}$$

$$HV_{C_3H_8} = 35.363.027,96 \text{ J/kg}$$

$$= 35.363,03 \text{ kJ/kg}$$

Karena bahan bakar pembakaran adalah jenis gas, maka nilai kalor adalah LHV. Sehingga nilai LHV dari LPG = 35.363,03 kJ/kg.

Setelah diketahui nilai kalor LHV maka dapat diketahui efisiensi dari flow kalorimeter menggunakan persamaan (3.2).

$$\text{Efisiensi FC} = \frac{\dot{Q} \text{ diserap air}}{\dot{m}_{LPG} \cdot NK_{LPG}}$$

$$\eta = [\dot{m}_{w,out} \cdot C_{p_{w,out}} \cdot (T_{st2} - T_{st1})] / (\dot{m}_{C_3H_8} \cdot LHV_{C_3H_8})$$

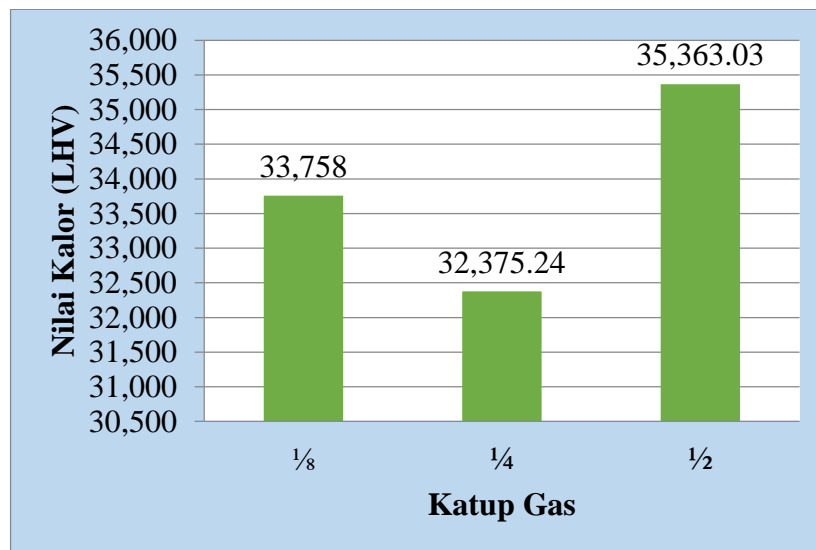
$$= [0,06667 \text{ kg/dtk} \cdot 4,19 \text{ kJ/kg.K} \cdot (72,66 \text{ }^\circ\text{C} - 30,67 \text{ }^\circ\text{C})] / (0,000352778 \text{ kg/dtk} \cdot 46454,31 \text{ kJ/kg})$$

$$= 0,72 \text{ atau } 72 \%$$

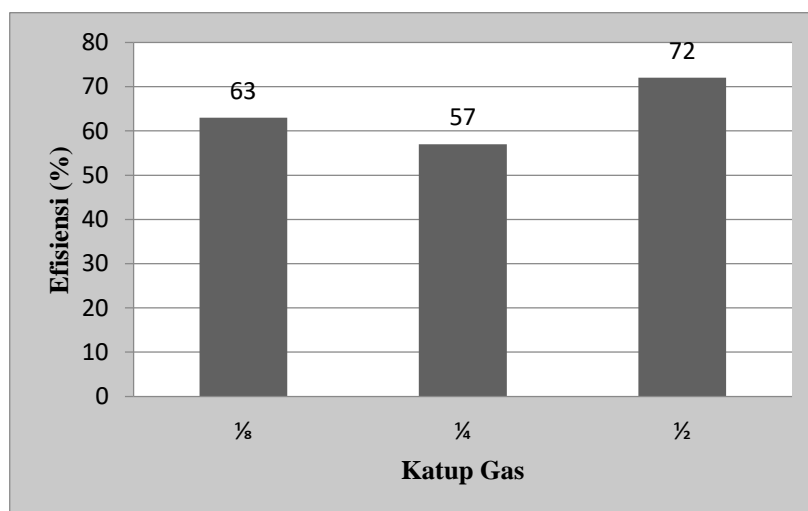
4.5 Hasil Perhitungan Debit 2 LPM

Tabel 4.6 Data perhitungan 2 LPM

Katup	Debit aliran (LPM)	Nilai kalor (Kj/kg)	Efisiensi (%)
$\frac{1}{8}$	2	33.758,18	63
$\frac{1}{4}$	2	32.375,24	57
$\frac{1}{2}$	2	35.363,03	72



Gambar 4.13 Grafik Hasil Nilai Kalor



Gambar 4.14 Grafik Hasil Efisiensi

4.6 Perbandingan Perhitungan Hasil Debit 1 LPM dan 2 LPM

Tabel 4.7 Data perbandingan hasil

Katup	Debit Air (LPM)	Nilai Kalor (kJ/kg)	Efisiensi (%)	Keterangan
$\frac{1}{8}$	1	13.023,45	23	Data 2017
$\frac{1}{4}$	1	17.907,38	28	Penelitian
$\frac{1}{2}$	1	17.636,32	27	DewaPurwa
$\frac{1}{8}$	2	33.758,18	63	Data
$\frac{1}{4}$	2	32.375,24	57	Penelitian
$\frac{1}{2}$	2	35.363,03	72	ini

Dari tabel diatas bisa diketahui bahwa nilai kalor dan efisiensi alat didapatkan hasil yang berbeda-beda setiap variasinya, hal tersebut dipengaruhi dari beberapa faktor seperti debit air dan bukaan katup gas. Pada debit aliran 1 dan 2 LPM didapatkan hasil nilai kalor dan efisiensi yang berbeda tiap variasi bukaan katup gas, dimana hal tersebut mempengaruhi tingkat nyala api pembakaran pada bunner dan pengurangan massa LPG tiap 2 menit selama pengujian dilakukan. Jika bukaan katup semakin besar maka tingkat nyala api juga semakin besar sehingga suhu pada ruangan pembakaran semakin semakin tinggi, semakin besar suhu ruangan pembakaran (T_4) maka semakin besar juga penyerapan kalor panas yang dilakukan oleh air sehingga suhu keluaran air (T_2) semakin tinggi. Jika kenaikan suhu antara air masuk (T_1) dan air keluar (T_2) semakin tinggi maka nilai kalor yang dihasilkan bernilai besar.

Dalam efisiensi *flow calorimeter* faktor yang mempengaruhi besaran nilai efisiensi adalah nilai kalor. Karena jika nilai kalor yang dihasilkan semakin tinggi maka bisa dikatakan efisiensi *flow calorimeter* juga akan tinggi.

