

Penentuan Nilai Kalor Eksperimental LPG dengan Variasi Udara Berlebih dan Variasi Debit LPG 0,4; 0,5; dan 0,6 LPM

Tito Hadji Agung S.^a, Muhammad Nadjib^a, Hardhany Faiz Ikhsan^a, Tayuh Kinayung Waskitho^a, Fiqri Elpa Ramadhany^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, Indonesia, 55183

e-mail: titohas@umy.ac.id

Kata Kunci:

Nilai kalor, efisiensi kalorimeter, *excess air*, kalorimeter aliran, LPG

ABSTRAK

Setiap bahan bakar memiliki nilai kalor (NK) yaitu energi yang dikandung dalam setiap massa dari bahan bakar. Penentuan nilai kalor bahan bakar gas dapat dilakukan dengan kalorimeter aliran. Penelitian ini menggunakan LPG sebagai bahan penelitian. Untuk menjamin semua bahan bakar terbakar, digunakan udara berlebih (*excess air*). Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mendapatkan NK eksperimental LPG dan efisiensi kalorimeter aliran dengan variasi udara berlebih (*excess air*). Penelitian ini menggunakan metode pembakaran aktual dengan debit LPG 0,4; 0,5; dan 0,6 LPM dan tujuh variasi *excess air* (EA) 0% hingga 60% dengan interval variasi 10%. Dari hasil perhitungan didapatkan NK eksperimental dan efisiensi kalorimeter aliran yang mendekati NK LPG teoritik yaitu pada EA 50% sebesar 41.042,16 kJ/kg dan 85%. Namun pada variasi EA 60%, NK eksperimental dan efisiensi mengalami penurunan nilai yaitu 38.142,44 kJ/kg dan 78,66%. Dapat disimpulkan bahwa NK eksperimental LPG naik seiring dengan naiknya udara berlebih hingga 50% dan selanjutnya turun pada udara berlebih 60% karena penambahan udara berlebih selanjutnya akan bersifat sebagai pendinginan.

Keyword:

Heating value, calorimeter efficiency, *excess air*; flow calorimeter, LPG

ABSTRACT

Each fuel has a heating value (HV) which is the energy contained in each mass of the fuel. Determination of the heating value of gas fuel can be done with a flow calorimeter. This research uses LPG as research material. To ensure that all fuel is burned, excess air is used. The purpose of this study was to obtain experimental LPG heating value and flow calorimeter efficiency with excess air variations. This study uses the actual combustion method with an LPG discharge of 0.4; 0.5; and 0.6 LPM and seven variations of excess air (EA) from 0% to 60% with a variation interval of 10%. From the calculation results obtained experimental HV and flow calorimeter efficiency close to theoretical LPG HV, namely at 50% EA of 41,042.16 kJ/kg and 85%. However, at 60% EA variation, experimental HV and efficiency decreased in value, namely 38,142.44 kJ/kg and 78.66%, respectively. It can be concluded that the experimental HV of LPG increases with the increase in excess air by up to 50% and then decreases at 60% excess air because the addition of excess air will act as cooling.

1. PENDAHULUAN

Pengukuran nilai kalor bahan bakar gas dengan pembakaran dapat dilakukan dengan menggunakan kalorimeter aliran. Konsep penentuan nilai kalor dengan cara pembakaran yang berlangsung antara bahan bakar dengan oksigen dikemukakan oleh Markowski et al [1]. Metode analisis dapat juga diperoleh dengan menjumlahkan fraksi mol produk dan nilai kalor molar yang memungkinkan untuk menghitung nilai kalor molar campuran gas [2]. Metode lain adalah metode korelasi yaitu menghitung nilai kalor kotor (*Gross Calorific Value* (GCV)) dengan analisis regresi linier untuk memprediksi GCV pada sampel suatu gas dan berat jenis gas yang digunakan sebagai variabel independennya [3]. Pengukuran nilai kalor LPG pada penelitian ini dilakukan dengan metode pembakaran menggunakan kalorimeter aliran yang memiliki 9 pipa *stainless steel* yang berfungsi sebagai

media perpindahan panas. Alat kalorimeter aliran pada penelitian ini dioperasikan dengan udara berlebih (*excess air*). Proses ini melibatkan aliran air di sisi luar *tube* sebagai media penangkap panas yang keluar sebagai hasil dari pembakaran.

Penelitian ini merupakan pengembangan dari hasil penelitian sebelumnya yaitu dengan pengujian kalorimeter dengan variasi debit LPG pada udara teoritik [4]. Peneliti lain melakukan penelitian kalorimeter aliran dengan variasi debit LPG 0,4 dan 0,5 LPM dan variasi udara berlebih dengan EA (*excess air*) 20% dan 30% [5]. Data yang ada sebelumnya masih sedikit untuk bisa dijadikan acuan referensi penentuan nilai kalor berbagai bahan bakar gas secara eksperimental.

Alat rotameter air yang dipasang pada penelitian kalorimeter aliran sebelumnya [5] memiliki tingkat ketelitian yang tidak terlalu tinggi sehingga mempengaruhi kenaikan suhu air pada proses pembakaran yang selanjutnya berimbas pada penentuan nilai kalornya. Rotameter air pada alat kalorimeter aliran yang sudah ada sebelumnya [4]–[6] dilakukan perubahan yaitu dengan yang rotameter yang lebih panjang dengan tingkat ketelitian yang lebih presisi. Perubahan ini mempengaruhi pembacaan debit air yang penting dalam penentuan nilai kalor eksperimental LPG.

Variasi pengujian menggunakan persentase udara berlebih mulai dari EA 0% (stoikiometri), 10%, 20%, 30%, 40%, dan 60% pada debit gas LPG 0,4; 0,5; dan 0,6 LPM yang bertujuan untuk dapat mengetahui nilai kalor eksperimental dan efisiensi alat. Dengan adanya tambahan data penelitian ini akan didapatkan nilai efisiensi kalorimeter aliran yang selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan nilai kalor berbagai bahan bakar gas lainnya.

2. BAHAN DAN METODE

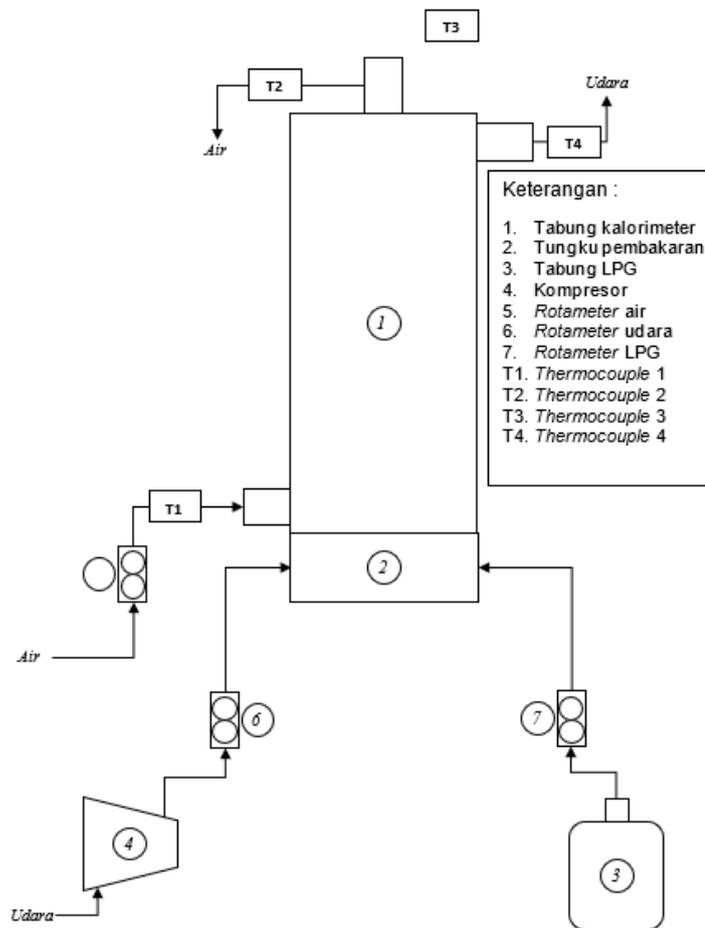
Alat kalorimeter aliran dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.1, skema alat dari kalorimeter aliran pada Gambar 2.2. dan diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.3. Prinsip penentuan nilai kalor eksperimental LPG yaitu dengan prinsip kesetimbangan energi pada kalorimeter aliran. Pada diagram alir Gambar 2.3, udara yang mengandung oksigen (O_2) diukur debitnya dengan rotameter udara, gas LPG diukur dengan rotameter gas, dan air sebagai media penangkap kalor diukur dengan rotameter air. Udara dan gas LPG dicampur dan dibakar di *burner*. Gas pembakaran mengalir di bagian dalam dari 9 *tube* dan melepaskan energi yang dikandung gas LPG. Energi yang dilepas gas LPG akan diserap oleh air di bagian luar *tube* melalui dinding *tube*. Suhu air masuk dan keluar alat diukur dengan termokopel. Nilai kalor eksperimental LPG dihitung dengan mengukur energi yang diserap oleh air.

Alat kalorimeter aliran pada penelitian ini berbentuk silinder luar tunggal dengan bahan *stainless steel* serta dilapisi dengan isolasi panas dan aluminium foil. Alat ini memiliki ukuran dengan diameter tabung luar 210 mm dan tinggi 680 mm. Pada bagian dalam tabung luar terdapat 9 pipa berukuran kecil dengan diameter 25,4 mm yang berfungsi sebagai tempat mengalirnya gas pembakaran dan sebagai dinding transfer panas.

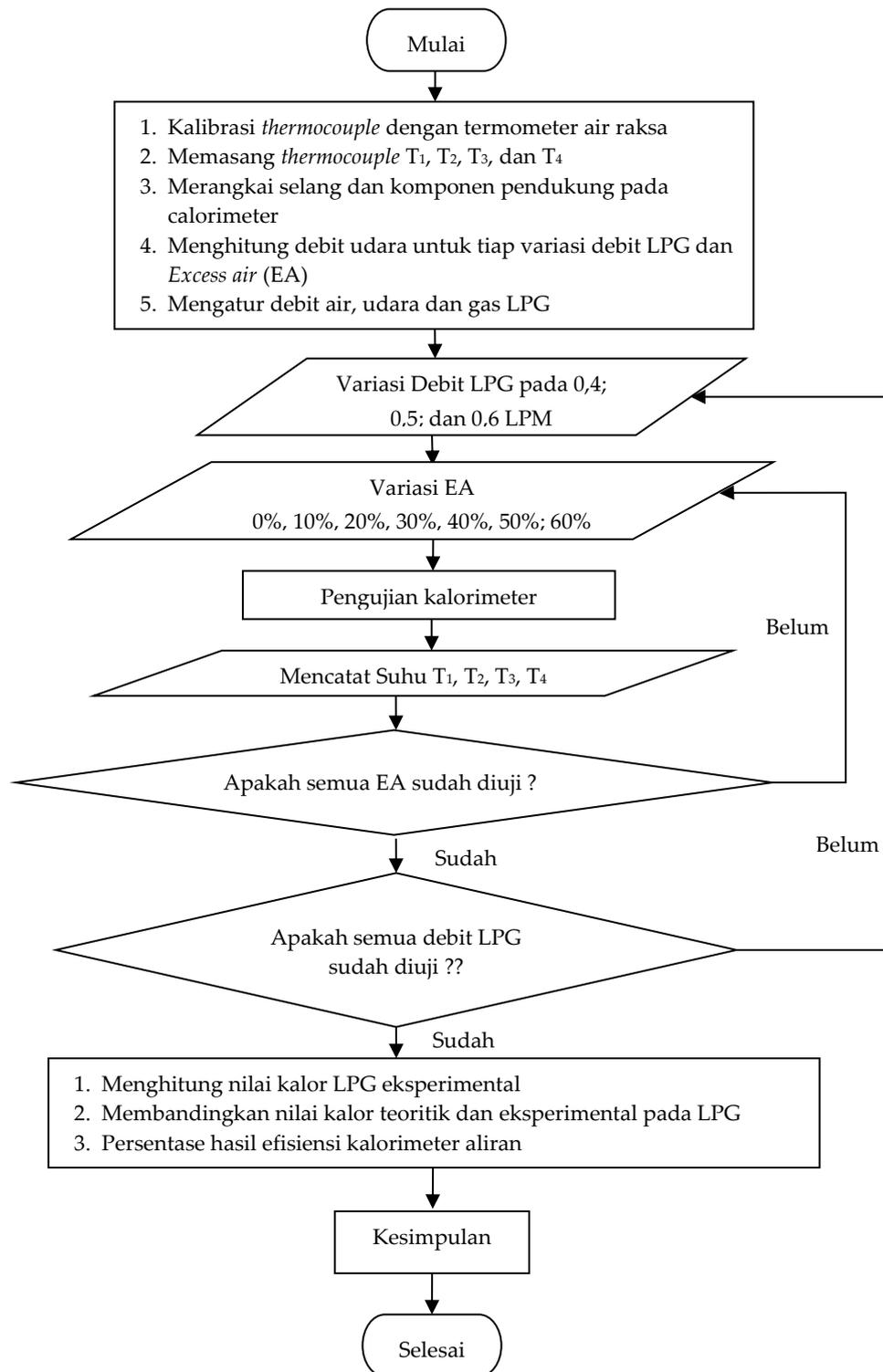
Instrumen yang dipasang pada alat kalorimeter aliran antara lain rotameter, katup aliran fluida, selang, *burner*, *thermocouple*, dan *thermoreader*. Ada tiga jenis rotameter, yaitu rotameter air, rotameter udara, dan rotameter LPG. Rotameter air memiliki 2 satuan debit dalam LPM dan GPM, yaitu dari 0 – 4 LPM dengan kenaikan 0,1 LPM setiap 1 strip dan 0,1 – 1 GPM dengan kenaikan sebesar 0,05 GPM setiap 1 strip. Rotameter udara memiliki pembacaan debit dari 0 sampai 25 LPM dengan kenaikan 1 strip sebesar 1 LPM. Rotameter LPG memiliki pembacaan debit dari 0 sampai 0,8 LPM dengan kenaikan 1 strip sebesar 0,05 LPM.



Gambar 2.1. Kalorimeter aliran



Gambar 2.2. Skema kalorimeter aliran



Gambar 2.3. Skema kalorimeter aliran

Pada penelitian ini, udara dan gas LPG dicampur dan dibakar di *burner*. *Thermocouple* yang dipakai ada 4 kawat termokopel tipe K. *Thermoreader* digunakan untuk pembacaan suhu termokopel. *Thermoreader* menggunakan tipe 4 titik untuk pengukuran suhu T_1 (suhu air masuk), T_2 (suhu air keluar), T_3 (suhu udara lingkungan), T_4 (suhu gas buang pembakaran) dengan satuan suhu yang dapat diatur dalam satuan $^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$ dan K. Sumber bahan bakar yang dipakai untuk pembakaran pada kalorimeter aliran menggunakan gas LPG 3 kg yang diproduksi oleh PT. PERTAMINA. Gas LPG yang digunakan terdiri dari sebagian besar gas propana dan sebagian kecil butana. Pada penelitian ini gas LPG diasumsikan sebagai propana (C_3H_8). Bahan lain pada penelitian ini adalah air sebagai media penyerap panas. Sumber

air berasal dari tandon air yang berada di Laboratorium Prestasi Mesin lantai dasar Gedung G6 Program Studi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Pada pengujian kalorimeter aliran terdapat 7 tahap pengambilan datanya. Variasi pengujian dengan debit air 1 LPM, dengan debit udara di set pada EA 0%; 10%; 20%; 30%; 40%; 50%; dan 60% dengan debit LPG pada 0,4; 0,5; dan 0,6 LPM. Terdapat empat parameter suhu yang harus dicatat selama proses pengujian. Waktu dalam pengujian setiap variasi dilakukan selama 60 menit hingga suhu air keluar T_2 dianggap telah stabil (tunak). Pembacaan suhu ini dapat dilihat pada *thermoreader* yang menunjukkan suhu untuk T_1 , T_2 , T_3 , dan T_4 .

Pencatatan suhu dilakukan secara berkala setiap jeda waktu 2 menit untuk mengetahui kondisi transien sebelum kondisi tunak terjadi. Keempat parameter suhu yang telah dicatat dikonversi menjadi suhu standar yang diperoleh dari analisis regresi kalibrasi termokopel. Perhitungan nilai kalor eksperimental dan efisiensi kalorimeter aliran dapat ditentukan dengan analisis kesetimbangan energi pada kalorimeter aliran dengan data-data suhu tersebut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kalibrasi Suhu

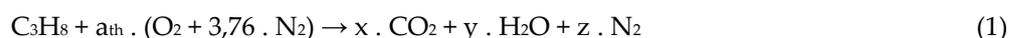
Kalibrasi dilakukan pada ke empat termokopel yang digunakan. Data yang didapat dari ke empat termokopel pada pengujian ini harus disesuaikan dengan hasil kalibrasi termokopel ini. Dengan melakukan kalibrasi alat ukur, maka dapat diketahui besar kecilnya penyimpangan yang terjadi pada keakuratan hasil pembacaan oleh alat ukur [7]. Hasil kalibrasi termokopel dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Persamaan Kalibrasi Termokopel

Suhu Standar Termokopel (T_{st})	Persamaan Regresi
$T_{st,1}$	$1,0026 \cdot T_1 - 1,051$
$T_{st,2}$	$1,002 \cdot T_2 - 0,9978$
$T_{st,3}$	$1,0013 \cdot T_3 - 1,0211$
$T_{st,4}$	$0,9994 \cdot T_4 - 0,9641$

3.1 Nilai Kalor Teoritis LPG

Nilai kalor LPG adalah kandungan energi yang disimpan LPG per satuan massa LPG dengan satuan kJ/kg. Nilai kalor dari bahan bakar gas LPG dengan komposisi propana secara teoritik memiliki reaksi pembakaran stoikiometri yaitu :



Dengan kesetimbangan atom atau molekul pada masing-masing atom atau molekul antara reaktan dan produk akan didapatkan koefisien reaksi sebagai berikut:

$$\begin{array}{ll} C : 3 = x & \text{dengan } x = 3 \\ H : 8 = 2 \cdot y & \text{dengan } y = 4 \\ O : 2 \cdot a_{th} = 2 \cdot x + y = 2(3) + 4 = 10 & \text{dengan } a_{th} = 5 \\ N_2 : 3,76 \cdot a_{th} = z & \text{Nilai } z = 3,76 \times 5 = 18,8 \end{array}$$

Persamaan pembakaran teoritik gas LPG menjadi:



Penentuan nilai kalor LPG menggunakan prinsip kesetimbangan energi sehingga entalpi reaktan (H_R) sama dengan entalpi produk (H_P).

Persamaan entalpi reaktan dan entalpi produk dapat dituliskan sebagai berikut:
Entalpi reaktan (H_R):

$$H_R = \sum_j (N_{R,j} \cdot h_{f,R,j}^o)$$

$$H_R = N_{C_3H_8} \cdot hf_{C_3H_8}^o + N_{O_2} \cdot hf_{O_2}^o + N_{N_2} \cdot hf_{N_2}^o \quad (3)$$

Entalpi produk (H_P):

$$H_P = \sum_i (N_{P,i} \cdot h_{f,P,i}^o)$$

$$H_P = N_{CO_2} \cdot hf_{CO_2}^o + N_{H_2O} \cdot hf_{H_2O}^o + N_{N_2} \cdot hf_{N_2}^o \quad (4)$$

Data sifat yaitu entalpi pembentukan (hf^o) dalam keadaan standar (25 °C, 1 atm) dari komponen reaktan dan produk pembakaran LPG ditentukan dari Tabel A-26 [5].

Perhitungan nilai entalpi reaktan dan entalpi produk pada gas LPG propana (C_3H_8)

Nilai entalpi reaktan (H_R) dari reaksi pembakaran teoritik LPG pada persamaan 3 menjadi:

$$H_R = N_{C_3H_8} \cdot hf_{C_3H_8}^o + N_{O_2} \cdot hf_{O_2}^o + N_{N_2} \cdot hf_{N_2}^o$$

$$H_R = 1 \cdot (-103.850 \text{ kJ/kmol}) + 5 \cdot (0) + 5 \cdot (0)$$

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

Nilai entalpi produk jika H_2O produk berfasa gas (*vapor*) ($H_{P,gas}$) dihitung dengan persamaan 5 yaitu:

$$H_{P,gas} = N_{CO_2} \cdot hf_{CO_2}^o + N_{H_2O(g)} \cdot hf_{H_2O(g)}^o + N_{N_2} \cdot hf_{N_2}^o \quad (5)$$

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

$$H_{P,gas} = -2.147.840 \text{ kJ/kmol}$$

Nilai entalpi produk jika H_2O produk berfasa cair (*liquid*) ($H_{P,liquid}$) dihitung persamaan 6 yaitu :

$$H_{P,liquid} = N_{CO_2} \cdot hf_{CO_2}^o + N_{H_2O(l)} \cdot hf_{H_2O(l)}^o + N_{N_2} \cdot hf_{N_2}^o \quad (6)$$

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

$$H_{P,liquid} = -2.323.880 \text{ kJ/kmol}$$

Setelah menentukan entalpi reaktan (H_R) dan entalpi produk ($H_{P,gas}$ dan $H_{P,liquid}$) dapat ditentukan nilai kalor HHV dan LHV. Nilai kalor LHV adalah nilai kalor jika H_2O produk berfasa gas dan nilai kalor HHV jika H_2O produk berfasa cair, sehingga:

$$LHV = H_{P,gas} - H_R = 2.043.990 \text{ kJ/kmol } C_3H_8 \quad (7)$$

$$HHV = H_{P,liquid} - H_R = 2.220.030 \text{ kJ/kmol } C_3H_8 \quad (8)$$

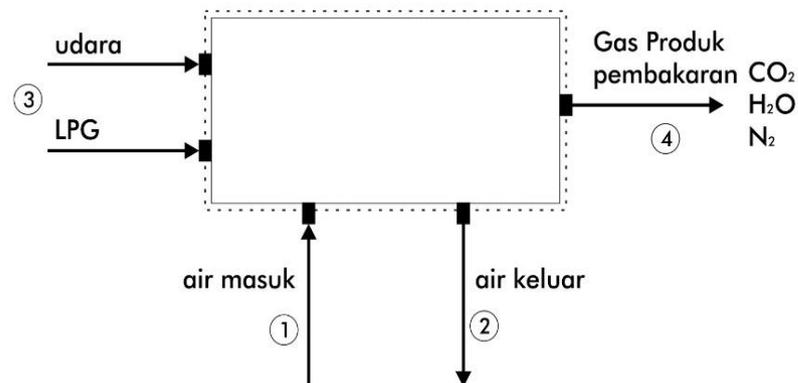
Untuk mendapatkan nilai kalor teoritik LPG dalam satuan kJ/kg, persamaan 7 dan 8 dibagi dengan massa molar LPG (propana) yang besarnya 44 kg/kmol sehingga nilai kalor LHV dan HHV menjadi:

$$LHV = \frac{2.043.990 \text{ kJ/kmol}}{44 \text{ kg/mol}} = 46.454,31 \text{ kJ/kg} \quad (9)$$

$$HHV = \frac{2.220.030 \text{ kJ/kmol}}{44 \text{ kg/mol}} = 50.455,22 \text{ kJ/kg} \quad (10)$$

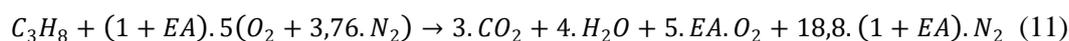
3.3 Nilai Kalor Eksperimental LPG

Untuk menentukan nilai kalor eksperimental dengan udara berlebih (*excess air*, EA) pada reaksi pembakaran aktual LPG dilakukan dengan analisis kesetimbangan energi yang dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Kesetimbangan energi pada *flow* kalorimeter

Reaksi pembakaran LPG dengan variasi udara berlebih (EA) dinyatakan pada persamaan 11 yaitu:



Dengan prinsip kesetimbangan energi pada sistem kalorimeter Gambar 3.1 di atas maka:

$$\begin{aligned} \sum \dot{E}_{in} &= \sum \dot{E}_{out} \\ \dot{m}_{u,i} \cdot cp_{u,i} \cdot T_3 + NK_{C_3H_8} \cdot \dot{m}_{C_3H_8} + \dot{m}_{w,i} \cdot cp_{w,i} \cdot T_1 \\ &= \dot{m}_{w,o} \cdot cp_{w,o} \cdot T_2 + T_4 \cdot (\dot{m}_{CO_2} \cdot cp_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O} \cdot cp_{H_2O} \\ &\quad + \dot{m}_{O_2} \cdot cp_{O_2} + \dot{m}_{N_2} \cdot cp_{N_2}) \end{aligned}$$

Sehingga nilai kalor LPG secara eksperimental dapat ditentukan sebagai berikut :

$$NK_{C_3H_8} = \frac{1}{\dot{m}_{C_3H_8}} [\dot{m}_{w,o} \cdot cp_{w,o} \cdot T_2 + T_4 \cdot (\dot{m}_{CO_2} \cdot cp_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O} \cdot cp_{H_2O} + \dot{m}_{O_2} \cdot cp_{O_2} + \dot{m}_{N_2} \cdot cp_{N_2}) - \dot{m}_{u,i} \cdot cp_{u,i} \cdot T_3 - \dot{m}_{w,i} \cdot cp_{w,i} \cdot T_1] \quad (12)$$

3.3.1 Perhitungan Debit Udara Berlebih (*excess air*)

Pada pengujian dengan variasi udara berlebih (EA) ini, perlu dihitung dahulu besarnya debit udara sesuai variasi udara berlebih (EA) yang ingin diuji. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan dengan menggunakan variasi EA mulai dari 0% (Stoikiometri), 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, dan 60%. Perhitungan debit udara dengan variasi udara berlebih diawali dengan perhitungan rasio udara terhadap bahan bakar (rasio AF/air to fuel ratio) pada persamaan 13. Selanjutnya debit udara dihitung dengan persamaan 14.

$$AF = \frac{N_{udara} \cdot M_{udara}}{N_{LPG} \cdot M_{LPG}} \quad (13)$$

$$\dot{V}_{udara} = \left(\frac{\rho_{LPG}}{\rho_{udara}} \right) \cdot \dot{V}_{LPG} \cdot AF \quad (14)$$

Setelah didapat debit udara pada berbagai variasi EA, rotameter udara diatur sesuai dengan besarnya debit udara ini. Debit gas LPG dan debit air juga diatur sesesuai dengan variasi yang akan dilakukan yang tertuang pada diagram alir gambar 2.3.

3.3.2 Kalor Jenis Setiap Komponen Pada Pembakaran Propana

Perhitungan nilai kalor eksperimental pada persamaan 12 memerlukan penentuan sifat kalor jenis (cp). Penentuan nilai kalor jenis (cp) menggunakan tabel termodinamika [7] dengan mempertimbangkan suhu dan hasil kalibrasi termokopel.

3.3.3 Laju Aliran Massa Tiap Komponen Pada Variasi EA

Perhitungan nilai kalor eksperimental pada persamaan 12 juga memerlukan penentuan laju aliran massa baik komponen reaktan maupun komponen produk. Penentuan laju aliran massa menggunakan hubungan antara massa dengan jumlah mol dalam persamaan 15 dengan mempertimbangkan variasi pengujian yang dilakukan.

$$m = N \cdot Mr \quad (15)$$

3.4. Hasil Perhitungan Nilai Kalor Eksperimental LPG

Setelah parameter-parameter pada persamaan 12 yaitu kalor jenis (cp), laju aliran massa pada berbagai variasi pengujian (variasi debit LPG dan variasi udara berlebih, EA) ditentukan, maka dapat ditentukan nilai kalor eksperimental LPG.

Nilai kalor eksperimental LPG pada variasi debit LPG dan variasi udara berlebih (EA) dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Nilai kalor eksperimental LPG [kJ/kg]

EA	0.4 LPM LPG	0.5 LPM LPG	0.6 LPM LPG
0	43.925,30	42.005,02	35.551,70
0.1	45.175,75	42.443,36	36.477,80
0.2	45.745,00	43.430,71	37.607,35
0.3	46.180,62	44.014,13	38.073,52
0.4	46.808,28	44.319,01	39.581,96
0.5	47.114,72	44.871,95	41.088,16
0.6	46.102,41	43.529,27	38.188,90

3.5 Efisiensi Kalorimeter Aliran

Perhitungan nilai efisiensi kalorimeter aliran menggunakan acuan perbandingan dari nilai kalor teoritis LPG yaitu sebesar 46.454,31 kJ/kg (persamaan 9). Maka efisiensi dapat dihitung dengan persamaan 15 sebagai berikut:

$$\eta_{FC} = \frac{\dot{Q}_{diserap\ air}}{\dot{m}_{LPG} \cdot NK_{LPG,teoritis}} \quad (16)$$

$$\text{Dengan } \dot{Q}_{diserap\ air} = m_{air} \cdot cp_{air} \cdot (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (17)$$

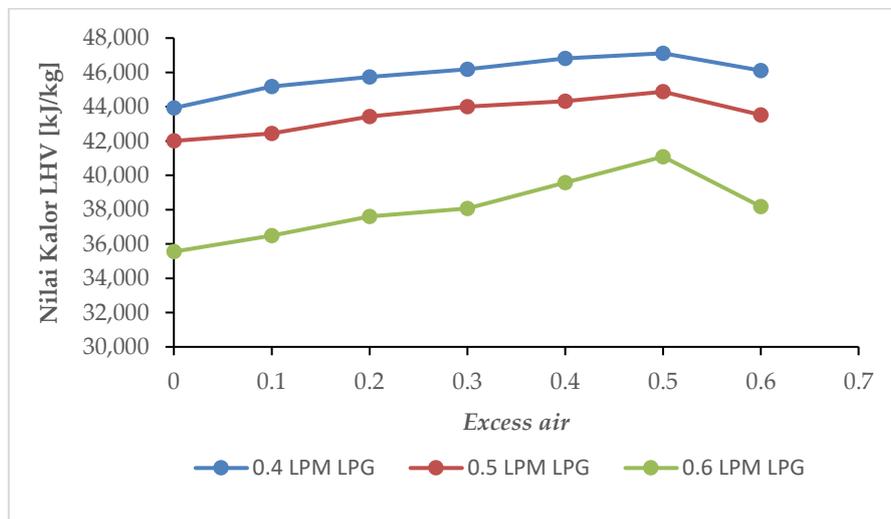
Nilai efisiensi kalorimeter aliran pada berbagai variasi debit LPG dan variasi udara berlebih (EA) disajikan pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Nilai efisiensi kalorimeter aliran

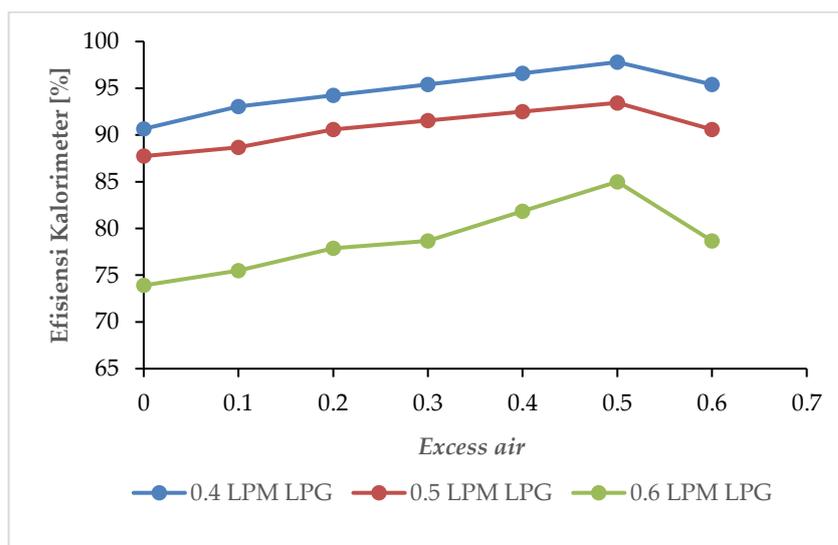
EA	0.4 LPM LPG	0.5 LPM LPG	0.6 LPM LPG
0	90.66	87.74	73.91
0.1	93.05	88.69	75.49
0.2	94.23	90.59	77.87
0.3	95.41	91.54	78.66
0.4	96.60	92.49	81.83
0.5	97.80	93.44	85.00
0.6	95.42	90.60	78.66

3.6 Pembahasan

Grafik perbandingan nilai kalor eksperimental dan efisiensi kalorimeter aliran dengan debit LPG 0,4; 0,5; dan 0,6 LPM menggunakan variasi udara berlebih (EA) dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan 3.3.



Gambar 3.2 Grafik nilai kalor eksperimental pada variasi EA



Gambar 3.3 Grafik efisiensi kalorimeter aliran pada variasi EA

3.6.1 Pengaruh Penambahan Udara Berlebih (*Excess Air*)

Hasil pengujian nilai kalor eksperimental LPG dengan variasi udara berlebih (EA) pada suatu debit LPG tertentu naik seiring dengan naiknya udara berlebih (EA) dari EA 0% hingga EA 50%. Faktor yang menentukan terjadinya pembakaran yaitu adanya bahan bakar, oksigen (O_2), dan titik nyala. Titik nyala dikondisikan dengan percikan pemantik api. Dengan udara berlebih, memungkinkan setiap molekul bahan bakar (gas LPG) akan bertemu dengan oksigen (O_2) sehingga terjadi pembakaran dan pelepasan energi yang dikandung bahan bakar. Peningkatan pembakaran aktual untuk mencapai pembakaran secara lengkap (semua bahan bakar terbakar habis) dapat menggunakan sejumlah udara aktual dari pada udara teoritik [8].

Namun pada udara berlebih EA 60% mengalami penurunan nilai kalor eksperimental LPG. Hal ini disebabkan karena pada komposisi udara terdapat 79% mol gas nitrogen (N_2) yang bersifat inert [9] yang tidak bereaksi pada suhu yang tidak terlalu tinggi. Maka penambahan udara berlebih (EA 60%) setelah mencapai kondisi maksimal (EA 50%), udara akan berfungsi sebagai pendingin karena semua molekul bahan bakar sudah terbakar pada EA 50%.

3.6.2 Perbandingan Data Hasil Pengujian Kalorimeter Aliran

Perbandingan hasil pengujian dari penelitian sebelumnya dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Perbandingan hasil pengujian kalorimeter aliran

Debit LPG1 (LPM)	Debit Udara (LPM)	Debit Air (LPM)	Nilai Kalor Eksperimental (kJ/kg)	Efisiensi Flow Calorimeter (%)	Sumber
Pembakaran dengan udara teoritik (stoikiometri)					
0,2	0	1	37.990,19	78,1	[10]
0,3	0	1	38.261,25	77,8	
0,4	0	1	33.103,01	65,6	[4]
0,5	0	1	30.221,18	58,8	
Pembakaran dengan udara berlebih (<i>excess air</i>)					
0,4	20	1	34.243,39	71,1124	[5]
0,4	30	1	37.086,53	78,224	

Debit LPG1 (LPM)	Debit Udara (LPM)	Debit Air (LPM)	Nilai Kalor Eksperimental (kJ/kg)	Efisiensi Flow Calorimeter (%)	Sumber
0,5	20	1	33.945,62	70,259	Penelitian saat ini (2021)
0,5	30	1	38.318,61	80,784	
0,4	0	2	43.925,30	90,66	
0,4	20	2	45.745,00	94,41	
0,4	30	2	46.180,62	95,41	
0,5	0	2	42.005,02	87,74	
0,5	20	2	43.430,71	90,59	
0,5	30	2	44.014,13	91,54	
0,4	0	2	43.925,30	90,66	

Dapat diketahui pada penelitian sebelumnya bahwa pengujian kalorimeter menggunakan udara teoritik dengan debit LPG 0,2 dan 0,3 LPM [10] dan pada debit LPG 0,4 dan 0,5 LPM [4] memiliki nilai kalor eksperimental yang masih belum mendekati nilai teoritis LPG 46.454,31 kJ/kg sesuai persamaan 9. Hal ini disebabkan pada variasi udara stoikiometri (EA 0%) diduga masih ada sisa gas LPG yang belum terbakar seluruhnya.

Pengujian dengan udara berlebih [5] pada EA 30% dengan debit gas LPG 0,5 LPM memiliki nilai kalor tertinggi yaitu 38.318,61 kJ/kg dengan efisiensi tertinggi sebesar 80,78%. Penggunaan udara berlebih yang kurang tepat pada pembakaran memungkinkan masih adanya sisa gas LPG yang belum terbakar oleh oksigen sehingga nilai kalor yang dihasilkan kurang optimal dan hasilnya belum mendekati nilai kalor teoritis LPG (persamaan 9).

Hasil penelitian ini dengan variasi udara berlebih (EA) memiliki nilai kalor eksperimental yang mendekati nilai teoritis LPG yaitu pada EA 50% sebesar 41.042,16 kJ/kg dan efisiensi sebesar 85%. Namun pada variasi EA 60% terjadi penurunan suhu T_2 yang disebabkan penyerapan energi kalor yang diterima oleh air telah mencapai batas optimalnya sehingga proses pembakarannya tidak mengalami kenaikan suhu pada air. Berdasarkan faktor tersebut, nilai kalor eksperimental serta efisiensi yang diperoleh mengalami penurunan karena terlalu banyak oksigen dan gas nitrogen yang tidak ikut berperan dalam reaksi pembakaran saat melewati titik optimalnya.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian pada pengujian kalorimeter maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin besar udara berlebih (EA) akan menghasilkan kenaikan nilai kalor eksperimental LPG hingga batas maksimal pada EA 50%.
2. Nilai kalor eksperimental LPG yang mendekati nilai kalor teoritik bervariasi pada debit LPG. Pada debit LPG 0,4 LPM, nilai kalor eksperimental mendekati nilai kalor teoritik pada EA 30%, sedang pada debit LPG 0,5 dan 0,6 LPM terjadi pada variasi EA yang sama yaitu pada EA 50%.
3. Nilai efisiensi kalorimeter maksimal pada semua variasi debit LPG terjadi pada EA 50%.
4. Nilai kalor eksperimental yang mendekati dengan nilai teoritik pada debit LPG 0,4 LPM dengan EA 30% sebesar 46.180,62 kJ/kg.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Markowski *et al.*, “The concept of measurement of calorific value of gaseous fuels,” in *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 207, p. 1025.
- [2] P. Ulbig and D. Hoburg, “Determination of the calorific value of natural gas by different methods,” *Thermochim. Acta*, vol. 382, no. 1–2, pp. 27–35, 2002.
- [3] S. Almarri, M. Alrumah, and M. S. Bizanti, “Gross Heating Value Correlations for Kuwaiti Gases,” 2018.
- [4] A. Saputra, “Pengaruh Variasi Debit LPG (0,4 dan 0,5 LPM) terhadap Nilai Kalor Eksperimental dan Efisiensi Kalorimeter Aliran pada Debit Air 1 LPM,” 2019.
- [5] P. O. Kusuma, “Penentuan Nilai Kalor LPG dan Efisiensi Kalorimeter Aliran dengan Udara Berlebih (*Excess air*) 20% dan 30%,” Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2019.
- [6] I. Rahardi, “Perancangan dan Pembuatan Kalorimeter Aliran (Flow Calorimeter) dengan Saluran Gas Pembakaran Berbentuk Banyak Silinder,” Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2017.
- [7] M. I. Siregar, “Teknik Kalibrasi ThermocoupeL TypeK Di PT Inalum Kuala Tanjung,” Universitas Sumatera Utara, 2009.
- [8] Y. A. Cengel and M. A. Boles, “Thermodynamics: an Engineering Approach 8th Edition,” *McGraw-Hill*, pp. 572–575, 2015.
- [9] J. L. Bergmann, “Combustion Analysis of Gas and Oil Appliances,” 2010. [Online]. Available: <https://www.trutechtools.com/assets/images/EducationalMaterials/TruTech Tools Combustion Guide.pdf>.
- [10] M. Setiyono, “Pengaruh Variasi Debit Lpg (0,2 Dan 0,3 Lpm) Pada Debit Air 1 Lpm Terhadap Nilai Kalor Eksperimental Dan Efisiensi Kalorimeter Aliran,” Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2019.