

## PERFORMANSI KETEL UAP PIPA AIR MINI KAPASITAS 20 KG/JAM DAN TEKANAN 3 BAR

Rispi Andra Harahap<sup>1</sup>, Alvin Singarimbun<sup>2</sup>, Rufinus Nainggolan<sup>3</sup>

Teknik Konversi Energi<sup>1,2,3</sup>, Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan

rispiharahap@students.polmed.ac.id<sup>1</sup>, alvinsingarimbun@students.polmed.ac.id<sup>2</sup>,

rufinusnainggolan@polmed.ac.id<sup>3</sup>

### ABSTRAK

*Boiler* atau ketel uap adalah suatu bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan uap. Uap dihasilkan dengan cara air yang berada di dalam bejana dipanaskan dengan bahan bakar. *Boiler* berfungsi sebagai pesawat konversi energi yang mengkonversikan energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas. Bejana bertekanan pada *boiler* umumnya menggunakan bahan baja terutama untuk penggunaan *boiler* pada industri-industri besar. Spesifikasi mini *boiler* pipa air yang dirancang dengan menggunakan bahan bakar LPG (*liquified Petroleum Gas*), kapasitas uap 20 kg/jam, tekanan uap 3 barg (jenuh saturasi) dengan nilai kalor LPG (LHV) 47046 kJ/kg (Pertamina). Dari hasil perhitungan secara langsung diketahui jenis *boiler* mini pipa air berbahan bakar LPG, jumlah uap yang dihasilkan 14,3 kg/jam. Bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan uap dengan tekanan uap 3 barg yang dijaga konstan dan temperatur gas buang 251,94°C adalah sebesar 1,17 kg/jam. Jumlah energi panas yang masuk ke *boiler* dari hasil pembakaran ( $Q_{in}$ ) adalah sebesar 55043,82 kJ/kg jam dan jumlah energi panas yang diserap air umpan sampai terbentuknya uap dalam *boiler* ( $Q_{out}$ ) adalah sebesar 37476,725 kJ/kg jam. Sehingga efisiensi *boiler* adalah sebesar 68,08 %. Sebagai dasar perancangan adalah sesuai spesifikasi untuk menghasilkan kapasitas 20 kg/jam. Dalam pengujian dapat diperoleh kemampuan atau performansi *boiler*.

**Kata Kunci** :*Boiler*, Performansi, Uap

### PENDAHULUAN

Mahasiswa teknik konversi energi mempelajari secara mendalam dan berfokus pada keahlian pembangkitan tenaga yaitu ketel uap selama dibangku perkuliahan. Ditambah lagi kondisi wabah pandemi Covid-19 saat ini menyebabkan manusia didorong untuk menggunakan sistem komunikasi jarak jauh dan cara digital yang tentu juga tidak terlepas dengan ketersediaan energi tanpa interupsi khususnya energi listrik karena sistem jaringannya daya listrik dapat menjangkau semua tempat/lokasi dengan menggunakan kabel.

Sangat penting untuk mengetahui apa dan bagaimana sumber-sumber energi dibuat peralatannya dan sistem operasinya. Salah satu peralatan pembangkitan energi yang sampai saat ini mendominasi di dunia adalah pembangkit listrik tenaga uap atau PLTU. PLTU mempunyai *boiler* atau ketel uap sebagai peralatan penghasil uap. Uap yang dihasilkan digunakan memutar turbin dan selanjutnya turbin memutar generator listrik yang menghasilkan daya listrik.

*Boiler* atau ketel uap adalah bejana yang terdiri dari pipa dan drum yang memiliki kelengkapan, sistem kendali, alat keselamatan dan sistem pembakaran. Sebagai mahasiswa Program Studi Konversi Energi, maka pengetahuan *Boiler* salah satu subjek perkuliahan dan praktek yang dibahas dan menjadi subjek utama mata kuliah. Selain itu di dunia perindustrian boiler merupakan salah satu komponen utama dalam penyediaan uap dan sebagai salah satu alat yang digunakan untuk penghasil atau pembangkit daya listrik yang memanfaatkan tekanan dan aliran uap untuk memutar turbin sehingga turbin menghasilkan arus listrik, yang mana arus listrik tersebut akan di distribusikan ke semua terminal yang ada di wilayah industri tersebut. Dalam perancangan dan pembuatan ketel pipa air mini bermaksud mengaplikasikan formula-formula atau rumusan-rumusan dari ilmu teori perpindahan panas sebagai dasar perancangan *boiler* dan dari teori-teori ilmu termodinamika dan ilmu teknik lainnya yang ikut mendasari menentukan parameter-parameter dalam pengoperasian *boiler* mini tersebut.

Berdasarkan hal di atas, kami sangat tertarik untuk lebih memahami lebih dalam, sehingga dalam pengajuan HAKIM ini menetapkan judul **“PERFORMANSI KETEL UAP PIPA AIR MINI KAPASITAS 20 KG/JAM DAN TEKANAN 3 BAR”**.

Sebagai mahasiswa Teknik Konversi Energi maka dituntut untuk memahami dasar perancangan dan pembuatan suatu ketel uap dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Oleh karena itu, untuk merencanakan sebuah Ketel uap diperlukan pengetahuan teori. Sedangkan pembuatannya dapat diberikan ke bengkel dengan melakukan pengawasan agar sesuai ketentuan teknis dan ketentuan K3. Dan kemampuan *boiler* harus mencapai efisiensi yang tinggi sehingga pengoperasiannya tidak boros bahan bakar.

Dengan demikian rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana dasar perhitungan-perhitungan efisiensi ketel pipa air mini ini?
2. Apa jenis bahan bakar yang digunakan dalam pengujian *boiler* mini?
3. Bagaimana cara menentukan parameter-parameter seperti energi panas bahan bakar, serta konsumsi bahan bakar ketel pipa air mini sehingga diketahui jumlah energi bahan bakar serta konsumsi bahan bakar setiap periode tertentu?

Perancangan *boiler* mini didasarkan kepada jumlah panas bertransfer dari pembakaran bahan bakar LPG untuk memproduksi kapasitas uap 20 kg/jam dan tekanan 4 bar abs ( $p = 3$  bar *gauge*).

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini yaitu :

1. Performansi didasarkan kepada efisiensi bahan bakar, yaitu bahan bakar yang digunakan dan dengan formula atau rumusan efisiensi bahan bakar maka dapat dihitung ukuran dan dimensi *boiler* mini ini.
2. Untuk mengetahui kemampuan *boiler* mini ini, maka dihitung jumlah panas evaporasi dengan jumlah panas yang masuk, maka efisiensi dapat ditentukan.

Jadi yang menjadi batasan masalah adalah perancangan dan pembuatan sebuah ketel pipa air mini kapasitas produksi uap 20 kg/jam dan tekanan 3 bar, serta pengoperasian untuk mengetahui efisiensi atau kemampuan *boiler* tersebut.

Pada bagian ini juga perlu dijelaskan tujuan penelitian secara ringkas dan target luaran yang ingin dicapai.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk perancangan dan pembuatan *boiler* mini kapasitas 20 kg/jam dan tekanan 3 bar yang dapat dimanfaatkan sebagai sterilisasi dan laundry pada rumah sakit dan hotel.
2. Jika *boiler* mini ini digunakan pada Laboratorium juga bisa sebagai alat pengujian untuk mahasiswa dan juga sarana penelitian kepada para dosen.

## TINJAUAN PUSTAKA

Dalam penulisan tugas akhir perlu dilakukan penelitian tentang materi tugas akhir sebagai acuan untuk observasi. Berikut adalah beberapa referensi terkait antara lain :

Arizal Aswan, dkk (2019), dalam penelitiannya mengenai analisis energi *boiler* pipa air menggunakan bahan bakar solar. Untuk pembentukan *steam* energi total *input* yang masuk ke dalam *boiler furnace* dari total energi *input* yang masuk dipergunakan sebanyak 19272,45 Kcal/jam untuk pembentukan *steam*. Sehingga dapat dikatakan bahwa energi pembentukan *steam* sebesar 34,23% pada tekanan 5 bar sedangkan pada tekanan 10 bar sebesar 95,90 % dari energi *input* bahan bakar. Sementara, energi lain adalah energi gas buang 2558,60 Kcal/jam (13,28%) pada tekanan 5 bar. 1784,05 Kcal/jam (8,15%) pada tekanan 10 bar, *blowdown* 2011,39 Kcal/jam (10,44%) pada tekanan 5 bar dan 1508,4 Kcal/jam (6,89%) pada tekanan 10 bar. energi radiasi 2581,65 Kcal/jam (13,40%) pada tekanan 5 bar dan 2646,89 (12,09%) pada tekanan 10 bar, dan konveksi sebesar 1383,3 Kcal/jam (7,18%) pada

tekanan 5 bar, dan 1388,80 Kcal/jam (6,34%) pada tekanan 10 bar, merupakan energi yang hilang (bocor) keluar sistem. Sisanya sebesar 2767,86 Kcal/jam pada tekanan 5 bar (14,36%) dan 3186,21 kcal/jam (14,6%) pada tekanan 10 bar merupakan energi yang tidak teranalisis energi ini sebagian besar terakumulasi dalam sistem.

Mohammad Arifin, dkk (2011), melakukan penelitian mengenai rancang bangun dan instalasi sistem kontrol *boiler* kapasitas 155 Kg/Jam dengan tekanan kerja 3 bar. Tujuan dari tugas akhir ini adalah membuat desain rancangan sistem kontrol, menentukan alat dan bahan yang akan digunakan untuk keperluan sistem kontrol untuk *boiler* tersebut serta merakit instrumen yang akan digunakan sesuai desain yang dibuat sehingga rangkaian kontrol tersebut dapat bekerja sesuai dengan fungsinya. Dari sampel percobaan yang telah dilakukan menggunakan sistem kontrol pada *boiler* diperoleh data  $p = 1,92 \text{ kg/cm}^2$  pada suhu  $T = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ , bahan bakar = 11,93 kg/jam, muap = 119,23 kg/jam, huap = 2789,98 kJ/kg, hair = 150,86 kJ/kg dan nilai HHV (*high heating value*) = 44775 kJ/kg. Sehingga didapat efisiensi *boiler* tersebut 58,90% untuk waktu pengoperasian *boiler* selama 1 menit setelah pembukaan katup *steam* pada tekanan kerja 2 kg/cm.

### Sejarah Perkembangan Ketel Uap

Uap (*steam*) dalam pembicaraan selanjutnya dimaksudkan uap air yaitu gas yang timbul akibat perubahan fase air (cair) menjadi uap (gas) dengan cara pendidihan (*boiling*). Untuk melakukan proses pendidihan diperlukan energi panas, misalnya dari pembakaran bahan-bakar (padat,cair,gas) tenaga listrik dan gas panas sisa proses kimia serta tenaga nuklir.

### Definisi Ketel Uap (*Boiler*)

*Boiler* atau ketel uap adalah suatu perangkat mesin yang berfungsi untuk merubah fasa air menjadi fasa uap. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berbeda dalam pipa-pipa dengan panas hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara kontiniu didalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar.

### Prinsip Kerja Ketel Uap (*Boiler*)

*Boiler* yang fungsinya disebut juga sebagai steam generator (penghasil uap), ialah suatu bentuk sistem pembakaran yang merupakan gabungan dari beberapa peralatan yang di desain untuk saling terhubung dalam suatu proses untuk mengubah air menjadi uap bertekanan yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin dan generator sehingga menghasilkan listrik di sebuah *power plant* (pembangkit listrik). Secara umum ,di dalam *boiler* terdapat 3 proses yaitu :

- a. Proses air menjadi *steam*.
- b. Proses bahan bakar (batubara, cangkang, oil, dan serabut) sampai menjadi abu sisa pembakaran.
- c. Proses udara sampai menjadi gas buang.

### Klasifikasi Ketel Uap (*Boiler*)

Ketel uap (*Boiler*) diklasifikasikan menjadi 3 golongan utama yaitu :

1. Ketel-ketel Lorong Api dan Ketel-ketel Pipa Api
2. Ketel-ketel Pipa Air yang biasa
3. Ketel-ketel Pipa Air dengan Perencanaan Khusus

### Unsur-Unsur Pembakaran Bahan Bakar

Bahan bakar adalah segala bahan yang dapat dibakar. (Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-Pesawat Konversi Energi 1 (Ketel Uap) 1988:146). Ada tiga wujud bahan bakar diantaranya yaitu :

- Bahan bakar padat (*solid fuel*).
- Bahan bakar cair (*Liquid fuels*).
- Bahan bakar gas.

### Kebutuhan Udara Pembakaran

Udara terdiri dari kandungan utama adalah unsur molekul nitrogen (N<sub>2</sub>) dan oksigen (O<sub>2</sub>). Udara selalu tersedia melimpah di lingkungan sekeliling alam pada lapisan atmosfer dan komponen udara ini dapat ditabelkan sebagai berikut ini.

Tabel 1. Komposisi Udara

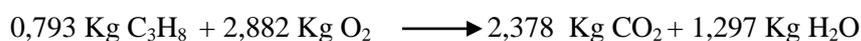
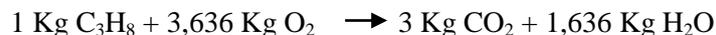
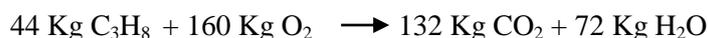
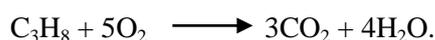
Udara	% Vol	% massa
N <sub>2</sub>	79	77
O <sub>2</sub>	21	23

### Pembakaran Teoritis Stoikiometrik

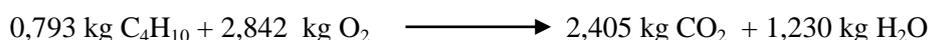
Pembakaran teoritis yang juga umum disebut adalah pembakaran sejumlah bahan bakar dengan kebutuhan bahan bakar sesuai reaksi kimianya membutuhkan jumlah oksigen sebesar 100% teoritis sehingga disebut juga reaksi pembakaran stoikiometrik.

Pembakaran teoritis stoikiometrik :

- Untuk propana (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), maka reaksinya sbb :



- Butana (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), maka reaksi pembakarannya :



### Efisiensi Ketel Uap

Efisiensi ketel uap adalah tingkat kemampuan kerja ketel uap yang didapat melalui perbandingan antara energi yang berpindah tempat atau diserap oleh fluida kerja di dalam ketel uap dengan masukan energi kimia dari bahan bakar.

Metodologi dikenal juga sebagai “metode *input output*” karena faktanya bahwa metode ini hanya membutuhkan keluaran/output (steam) dan panas masuk/*input* (bahan bakar) untuk evaluasi efisiensi.

Efisiensi ketel uap dengan metode langsung dirumuskan dengan :

$$\text{Efisiensi boiler } (\eta) = \frac{\text{energi penguapan}}{\text{panas masuk}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.9a)$$

$$\text{Efisiensi boiler } (\eta) = \frac{m_u(h_u - h_a)}{m_{bb.LHV}} \dots \dots \dots (2.9b)$$

Dimana :

$\eta_B$  = Efisiensi *boiler* (%).

$\dot{m}_u$  = Kapasitas Aliran Uap atau Kapasitas ketel uap (kg/jam).

$h_u$  = Entalpi spesifik uap saturasi (kJ/kg).

$h_a$  = Entalpi spesifik suplai air (kJ/kg).

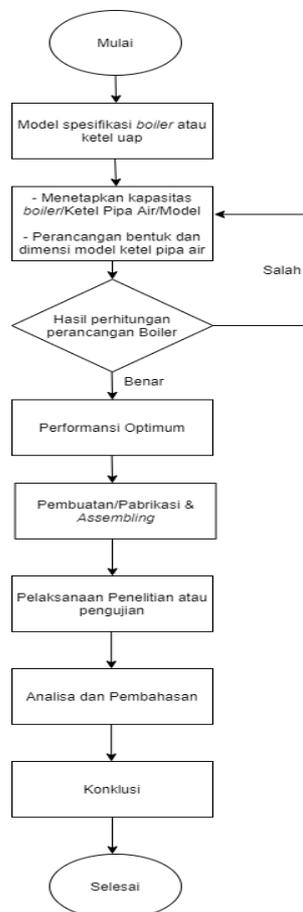
$\dot{m}_{bb}$  = Konsumsi bahan bakar (kg/dtk).

LHV = nilai kalor bawah (kJ/k

## METODE PENELITIAN

### Diagram Alir Penelitian

Diagram Alir (*Flowchart*) dari penelitian ini adalah digambarkan sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Perancangan dan Pembuatan Model *Boiler*

### Lokasi Penelitian

Pengerjaan dilaksanakan di salah satu bengkel rekanan di Jl. Mahkamah Kota Medan. Ketel pipa air selanjutnya diangkut ke bengkel Politeknik Negeri Medan untuk melakukan pengujian dan pengoperasian untuk memperoleh data-data pengoperasian dan selanjutnya digunakan sebagai penetapan spesifikasi ketel pipa air.

### Teknik Pengumpulan dan Analisa Data

Pengambilan data dilakukan berdasarkan pada data-data yang dibutuhkan dalam analisis pembakaran ketel uap. Kegiatan tersebut meliputi yaitu studi literatur yang berupa mempelajari jurnal dan buku-buku yang menjadi referensi dalam pemahaman mengenai ketel uap, terutama mengenai laju massa uap dan laju massa bahan bakar pada ketel uap. Literatur yang didapat berasal dari referensi dan buku pada perpustakaan Politeknik Negeri Medan. Dan juga survey lapangan dimaksudkan untuk mengetahui kondisi nyata instalasi serta jenis peralatan yang digunakan.

Teknik analisa data yaitu dengan menghitung efisiensi ketel uap dari rumus-rumus yang bersumber dari pustaka.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Penetapan Spesifikasi

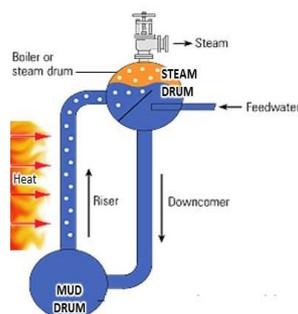
Model ketel pipa air mini yang dirancang ini dan pembuatannya di salah satu bengkel di Kota Medan atau sebuah bengkel rekanan yang bisa dan mampu mengerjakannya dan juga sesuai dengan penetapan tugas yang diberikan dan ditetapkan adalah sebagai berikut :

- Peralatan : Ketel Pipa Air Mini
- Kapasitas uap : 20 kg/jam
- Tekanan uap : 3 Bar<sub>g</sub> (Jenuh Saturasi)
- Bahan bakar : LPG
- Nilai Kalor LPG, LHV : 47046 kJ/kg (Pertamina, 2011)
- Temperatur suplai air : 30 °C (Normal)
- Efisiensi ketel uap : 70% (Diasumsikan)

#### Analisa Data Perhitungan Efisiensi Ketel Uap

Tabel 2. Analisa Data Perhitungan Efisiensi Ketel Uap

No	Pukul	Temperatur Air (°C)	Tekanan Uap (Barg)	Konsumsi Bahan Bakar LPG (kg)	Jumlah Kondensat (kg)	Temperatur Gas Buang (°C)	Efisiensi (%)
1.	10.00	28	2,96	1,20	14,0	252	64,9
2.	11.00	28	3,00	1,25	14,8	253,6	65,96
3.	12.00	28	3,00	1,03	14,2	255,5	76,80
4.	13.00	28	3,00	1,15	14,6	239,6	70,73
5.	14.00	28	3,03	1,20	13,8	259	64,07
Rata-rata :		28	3,01	1,17	14,3	251,94	68,492



Gambar 2. Temperatur Air Umpan

Temperature air Umpan = 28 °C

LHV LPG = 47046 kJ/kg (Pertamina,2011).

Diperoleh rata rata data sebagai berikut :

Ta = 28 °C

P = 3 Bar<sub>g</sub> = 4 Bar<sub>abs</sub> , Ts = 143,6°C

$$\dot{m}_{bb} = 1,17 \text{ kg/jam}$$

$$\dot{m}_u = 14,3 \text{ kg/jam}$$

a. Energi Entalpi Air Umpan (  $h_a$  )

$$h_a T = 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

Dari Tabel A.4 ( MM Wakil, ) diperoleh,  $h_a = 117,35 \text{ kJ/kg}$

b. Energi Entalphi Uap ( $h_u$ )

$$P = 4 \text{ Bar}_{abs}, T_s = 143,6^\circ\text{C}$$

Dari Tabel A.4 Diperoleh,  $h_u = 2738,1 \text{ kJ/kg}$

c. Energi Penguapan ( $\dot{Q}_{out}$  )

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_u (h_u - h_a)$$

$$= 14,3 \text{ kg/jam} (2738,1 \text{ kJ/kg} - 117,35 \text{ kJ/kg})$$

$$= 37476,725 \text{ kJ/kg jam}$$

d. Kalor Pembakaran

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{bb} \cdot LHV$$

$$= 1,17 \text{ kg/jam} \cdot 47046 \text{ kJ / kg}$$

$$= 55043,82 \text{ kJ/kg jam}$$

e. Effisiensi ( $\eta$ )

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} \times 100\%$$

$$= \frac{37476,725 \text{ kJ / kg jam}}{55043,82 \text{ kJ / kg jam}} \times 100 \%$$

$$= 68,08 \%$$

### Kebutuhan Udara Pembakaran

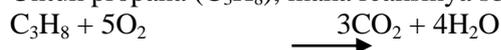
Udara terdiri dari kandungan utama adalah unsur molekul nitrogen ( $N_2$ ) dan oksigen ( $O_2$ ). Udara selalu tersedia melimpah di lingkungan sekeliling alam pada lapisan atmosfer dan komponen udara ini dapat ditabelkan sebagai berikut ini.

Tabel 3. Komposisi Udara

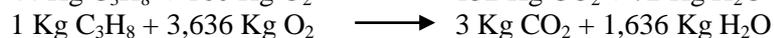
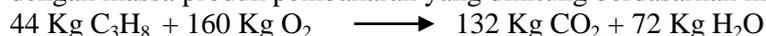
Udara	% Vol	% massa
$N_2$	79	77
$O_2$	21	23

Pembakaran teoritis stoikiometrik :

Untuk propana ( $C_3H_8$ ), maka reaksinya sbb :



Kesetimbangannya massa berdasarkan besar molekul-molekul, dimana massa reaktan harus sama dengan massa produk pembakaran yang dihitung berdasarkan massa molekul masing-masing.

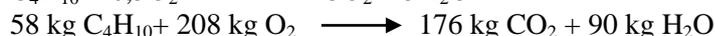


Massa  $C_3H_8 = 0,7926 \text{ kg}$ , maka :

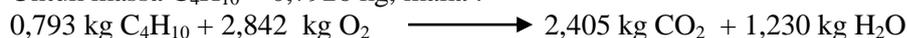


Jadi untuk 0,793 kg  $C_3H_8$  membutuhkan udara stoikiometrik teoritis sebanyak 2,882 kg dan menghasilkan produk-produk pembakaran karbondioksida ( $CO_2$ ) dan air ( $H_2O$ ) masing-masing 2,378 kg dan 1,297 kg.

Butana ( $C_4H_{10}$ ), maka reaksi pembakarannya :



Untuk massa  $C_4H_{10} = 0,7926 \text{ kg}$ , maka :

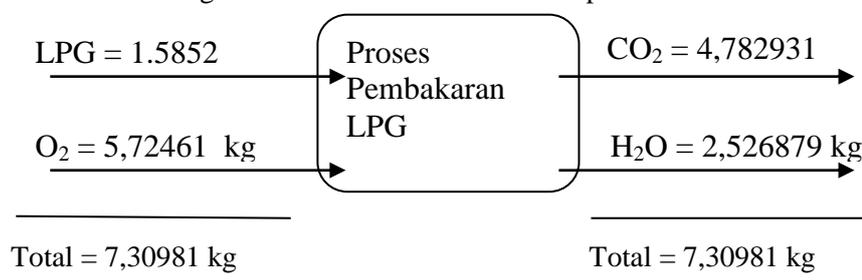


Jadi untuk 0,793 kg  $C_4H_{10}$  memerlukan oksigen stoikiometrik teoritis sebanyak 2,842 kg dan menghasilkan produk-produk pembakaran karbondioksida ( $CO_2$ ) dan air ( $H_2O$ ) masing-masing 2,405 kg dan 1,230 kg.

Jadi untuk pembakaran bahan bakar LPG sebanyak 1,5852 kg/jam, maka jumlah masing-masing reaktan dan produk-produk pembakaran adalah :

Bahan bakar LPG	= 1,5852 kg
Oksigen $O_2$	= 2,882 kg + 2,842 kg = 5,724 kg
Karbondioksida $CO_2$	= 2,378 kg + 2,405 kg = 4,783 kg
Air $H_2O$	= 1,297 kg + 1,230 kg = 2,527 kg

Periksa *balance*/kesetimbangan massa sebelum dan sesudah pembakaran.



Gambar 3. *Balance*/Kesetimbangan Massa

### Pembakaran Dengan Udara Berlebihan

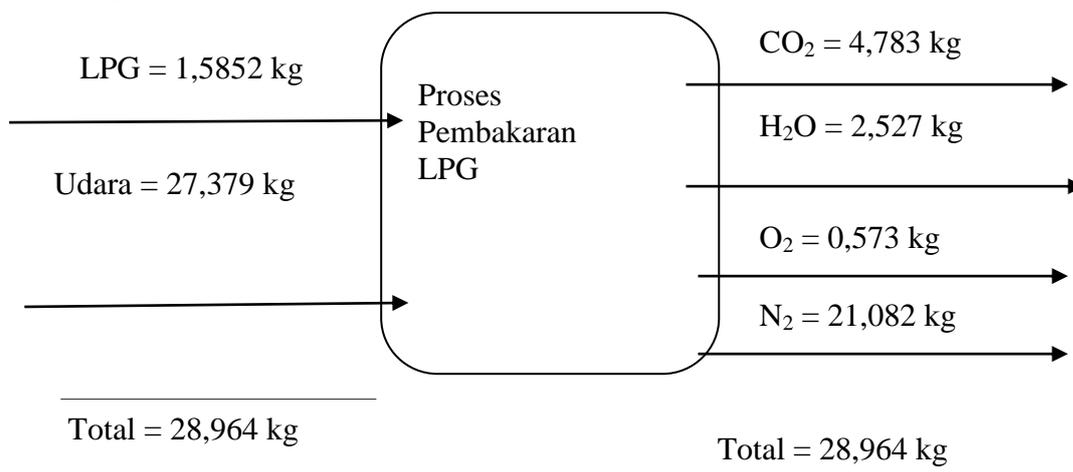
Untuk memastikan berlangsungnya pembakaran sempurna maka digunakan jumlah massa udara pembakaran aktual, sehingga dengan demikian diambil jumlah kelebihan massa udara pembakaran (*excess air*) sebesar 10 % atau 0,1 dari jumlah massa udara pembakaran teoritis stoikiometrik. Jadi jumlah udara pembakaran aktual selanjutnya dapat ditentukan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{Udara} &= 24,889609 + 0,1(24,889609) \\
 &= 24,889609 + 2,4889609 \\
 &= 27,3785699 \text{ kg} \\
 &= 27,379 \text{ kg} \\
 \text{Jumlah total } O_2 &= 23/100 \times 27,3785699 \\
 &= 6,29707108 \text{ kg} \\
 &= 6,297 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Dengan jumlah kelebihan udara sebesar adalah 10%, maka komposisi gas asap masing-masing sebagai berikut :

Karbondioksida, CO <sub>2</sub>	= 4,782931 kg
Air, H <sub>2</sub> O	= 2,526879 kg
Nitrogen, N <sub>2</sub>	= 77/100 x 27,379 kg
	= 21,082 kg
Oksigen bebas, O <sub>2</sub>	= 6,297 kg - 5,724 kg
	= 0,573 kg

Pemeriksaan untuk balans massa atau kesetimbangan/*balance* pembakaran dengan jumlah udara aktual sebagai berikut.



Gambar 4. Kesetimbangan/*Balance* dengan Jumlah Udara Aktual

Dengan demikian maka jumlah gas asap dapat dihitung adalah :

$$m_g = m_{ud} + m_{bb} = 27,379 + 1,5852$$

$$= 28,964 \text{ kg/jam}$$

Perbandingan udara – bahan bakar atau *air – fuel ratio* adalah :

$$\frac{A}{F} = \frac{28,964}{1,5852} = 18,272$$

Dengan demikian untuk memperoleh pembakaran sempurna setiap kilogram bahan bakar LPG dibutuhkan massa udara aktual sebesar 18,272 kg udara/kgBB.

## SIMPULAN

*Mini Boiler* ini dapat dimanfaatkan untuk keperluan operasional rumah sakit pada bagian sterilisasi dan *laundry*. Uap aktual yang dihasilkan dari *Mini Boiler* ini sebesar 14,3 kg/jam. Bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan uap sebanyak 14,3 kg/jam dengan tekanan rata-rata 3,01 bar dan temperatur rata-rata gas buang 251,94°C adalah sebesar 1,17 kg/jam.

Untuk jumlah LPG sebanyak 1,17 kg dibutuhkan jumlah udara pembakaran (untuk stoikiometrik teoritis) sebesar 24,89 kg. Nilai Kalor Bawah (*Low Heating Value*) LPG adalah sebesar 47046 kJ/kg. Jumlah energi panas yang masuk ke ketel uap dari hasil pembakaran bahan bakar (*Qin*) adalah 55043,82 kJ/kg jam sedangkan jumlah energi berguna yang diserap air umpan sampai terbentuknya uap dalam ketel uap (*Qout*) adalah sebesar 37476,725 kJ/kgjam. Efisiensi ketel uap adalah sebesar 68,08%. Berdasarkan *range* efisiensi *boiler* 60% - 80% secara umum, maka miniatur *boiler water tube* yang telah dirancang dapat dikategorikan sebagai *boiler* yang efisien atau optimal.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Terimakasih kepada Politeknik Negeri Medan melalui Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) yang telah mendanai penelitian ini.

**DAFTAR PUSTAKA**

Panggabaen, Rizki Fahmi. (2019). Analisis Performansi Water Tube Boiler Kapasitas 661 Ton/Jam Di PT PLN (PERSERO) UPP KITSUM 2 PLTU UNIT 3 PANGKALAN SUSU.

(2018). *Steam Boiler Laundry Rumah Sakit dan Hotel*. <https://distributorboiler.com/steam-boiler/steam-boiler-laundry-rumah-sakit-dan-hotel.html>.

*Pengertian Boiler (Ketel Uap)*. <https://artikel-teknologi.com/pengertian-boiler-ketel-uap/>. Diakses pada 18 November 2019 pukul 15.30.

Nainggolan, Paul AM & Nainggolan, Rufinus & Naibaho, Penteris RP. (2015). *Termodinamika dan Transpor Sifat-sifat Fluida*. Politeknik Negeri Medan.

*Macam-macam Boiler*. <https://artikel-teknologi.com/macam-macam-boiler/> . diakses pada 15 November 2019 pukul 18.30.

Djokosetyardjo, M.J, 2016, *Ketel Uap*, Jakarta: CV Pelita Kasih.

Syamsir, Muin, 2010, *Pesawat-Pesawat Konversi I (Ketel Uap)*, Jakarta: CV Rajawali.

Weisman, Joel & Eckart, Roy. 1985, *Modern Power Plant Engineering*. New Jersey : Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.