

PENGUJIAN EFISIENSI KETEL UAP PIPA AIR MINI KAPASITAS 20 KG/JAM TEKANAN KERJA 3 BAR

Nurul Fadillah¹, Indah Kemala Dewi², Rufinus Nainggolan³

Teknik Konversi Energi^{1,2,3}, Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan
nurulfadillah@students.polmed.ac.id¹, indahdewi@students.polmed.ac.id²
rufinusnainggolan@polmd.ac.id³

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 (*liquefied 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*, Uap, Efisiensi

PENDAHULUAN

Boiler adalah sebuah vessel tertutup yang digunakan untuk merubah air menjadi uap bertekanan dengan cara melakukan penambahan panas. Vessel terbuka yang menghasilkan uap bertekanan atmosfer tidak disebut sebagai boiler. Pada furnace *boiler*, energi kimia bahan bakar diubah menjadi energi panas. Panas ini dipindahkan ke air seefisien mungkin oleh *boiler*. Dengan demikian, fungsi utama boiler adalah untuk menghasilkan uap di atas tekanan atmosfer melalui penyerapan panas yang dihasilkan pada proses pembakaran.

Efisiensi adalah suatu tingkatan kemampuan kerja dari suatu alat. Sedangkan efisiensi pada boiler adalah prestasi kerja atau tingkat unjuk kerja *boiler* atau ketel uap yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan ke atau diserap oleh fluida kerja didalam ketel dengan masukan energi kimia dari bahan bakar. Untuk tingkat efisiensi pada *boiler* atau ketel uap tingkat efisiensinya berkisar antara 70% hingga 90%. Uji efisiensi *boiler* dapat membantu dalam menemukan penyimpangan efisiensi *boiler* dari efisiensi terbaik dan target area permasalahan untuk tindakan perbaikan.

Berdasarkan hal dijelaskan di atas, kami sangat tertarik untuk lebih memahami lebih dalam, sehingga dalam pengajuan HAKIM ini menetapkan judul “**Pengujian Efisiensi Ketel Uap Pipa Air Mini Kapasitas 20 kg/jam Dengan Tekanan 3 Bar**”.

Sebagai mahasiswa Teknik Konversi Energi maka dituntut untuk memahami dasar-dasar sistem pengujian. Oleh karena itu, untuk mengaplikasikan ilmu-ilmu teori yang diperoleh di bangku kuliah, maka melakukan penggunaan sistem pengujian pada ketel pipa air mini akan memberikan pengalaman yang berarti sehingga menjadi bekal untuk pengembangan yang lebih modern dan canggih. Dengan demikian dalam pemasangan sistem pengujian maka dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana prinsip kerja *boiler* atau ketel uap?
2. Apa komponen-komponen ketel pipa air dan bagaimana prinsip kerjanya?

3. Bagaimana menghitung efisiensi *boiler* ketel uap pipa air kapasitas 20 kg/jam .dengan .tekanan 3 bar?

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($p = 3 \text{ bar gauge}$). Adapun batasan masalah dalam penelitian ini yaitu :

1. Perancangan didasarkan kepada pengetahuan ilmu perpindahan panas, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Dengan formula atau rumusan perpindahan panas 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 api 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

Kajian 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

Pada tahun 1764 James Watt mereparasi mesin uap Newcomen. James watt adalah seorang pembuat instrument dari *Glasgow University*. Tahun 1769 James Watt mendapatkan hak paten dari mesin uap ciptaannya, Menurut teori James Watt, uap adalah suatu media yang elastis, dapat mengembang hingga vakum.

Definisi Ketel Uap

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. Ketel uap berfungsi sebagai pesawat konversi energi yang mengkonversikan energi kimia (potensial) dari bahan bakar menjadi energi panas (Ir. Syamsir A. Muin, 2017).

Prinsip Kerja boiler

Prinsip kerja *boiler* kurang lebih mirip dengan panci yang digunakan untuk merebus air, namun kapasitasnya jauh lebih besar. Di dalam *boiler*, air akan diubah menjadi uap. Panas diserap oleh air di *boiler* dan terus menerus menghasilkan uap. Air yang disuplai ke *boiler* untuk diubah menjadi uap disebut air umpan. Air umpan mengalir ke *boiler* untuk menggantikan air yang hilang yang telah menjadi uap di *boiler*. Ketika uap meninggalkan air mendidih, padatan terlarut dalam air umpan *boiler* tetap berada di *water drum*. Padatan-padatan yang tersisa menjadi bertambah kepekatannya dan bahkan dapat mencapai ke suatu tingkat dimana pemekatan lebih lanjut dan bisa menyebabkan pembentukan kerak atau endapan di dalam *boiler*.

Klasifikasi boiler

Klasifikasi *boiler* umumnya terdapat 2 golongan utama yaitu :

1. Ketel-ketel Pipa Api.
2. Ketel-ketel Pipa Air.

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 :

1. Bahan bakar padat (*solid fuel*).
2. Bahan bakar cair (*Liquid fuels*).
3. Bahan bakar gas.

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 1. Komposisi Udara

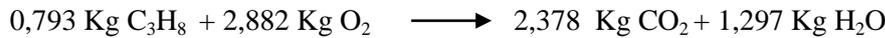
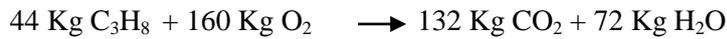
Udara	% Vol	% massa
N_2	79	77
O_2	21	23

Pembakaran Teoritis Stoikiometrik

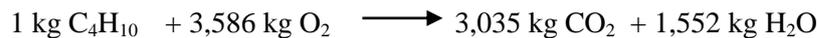
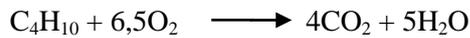
Pembakaran teoritis yang juga umum disebut adalah pembakaran sejumlah bahan bakar dengan kebutuhan bahan bakar sesuai reaksi kimianya membutuhkan jumlah oksigen sebesar 100% teoritis sehingga disebut juga reaksi pembakaran stoikiometrik.

Pembakaran teoritis stoikiometrik :

a. Untuk propana (C_3H_8), maka reaksinya sbb :



b. Butana (C_4H_{10}), 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 :

η_B = Efisiensi boiler (%).

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).

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 survei 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 :

- a. Peralatan : Ketel Pipa Air Mini
- b. Kapasitas uap : 20 kg/jam
- c. Tekanan uap : 3 Bar_g (Jenuh Saturasi)
- d. Bahan bakar : LPG
- e. Nilai Kalor LPG, LHV : 47046 kJ/kg (Pertamina, 2011)
- f. Temperatur suplai air : 30 °C (Normal)
- g. Efisiensi ketel uap : 70% (Diasumsikan)

Kebutuhan Udara Pembakaran

Udara terdiri dari kandungan utama adalah unsur molekul nitrogen (N₂) dan oksigen (O₂). Udara selalu tersedia melimpah di lingkungan sekeliling alam pada lapisan atmosfer dan komponen udara ini dapat ditabelkan sebagai berikut ini.

Tabel 2. Komposisi Udara

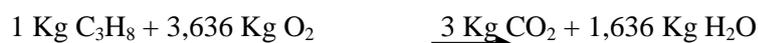
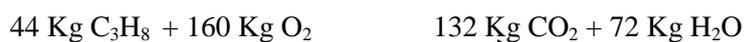
Udara	% Vol	% massa
N ₂	79	77
O ₂	21	23

Pembakaran teoritis stoikiometrik :

- a. Untuk propana (C₃H₈), 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.

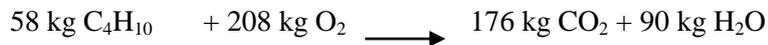


Massa C₃H₈ = 0,7926 kg, maka:

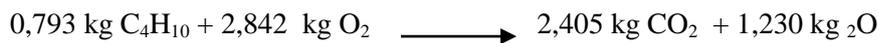


Jadi untuk 0,793 kg C_3H_8 membutuhkan udara stoikiometrik teoritis sebanyak 2,882 kg dan menghasilkan produk-produk pembakaran karbondioksida (CO_2) dan air (H_2O) masing-masing 2,378 kg dan 1,297 kg.

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



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

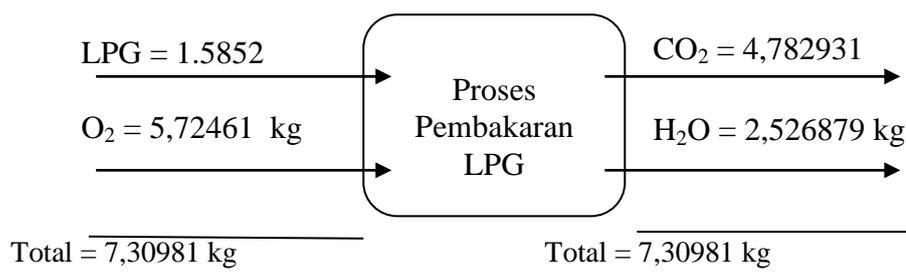


Jadi untuk 0,793 kg C_4H_{10} memerlukan oksigen stoikiometrik teoritis sebanyak 2,842 kg dan menghasilkan produk-produk pembakaran karbondioksida (CO_2) dan H air (H_2O) masing-masing 2,405 kg dan 1,230 kg.

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

- a. Bahan bakar LPG = 1,5852 kg
- b. Oksigen O_2 = 2,882 kg + 2,842 kg
= 5,724 kg
- c. Karbondioksida CO_2 = 2,378 kg + 2,405 kg
= 4,783 kg
- d. Air H_2O = 1,297 kg + 1,230 kg
= 2,527 kg

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



Gambar 2. *Balance*/Keseimbangan 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:

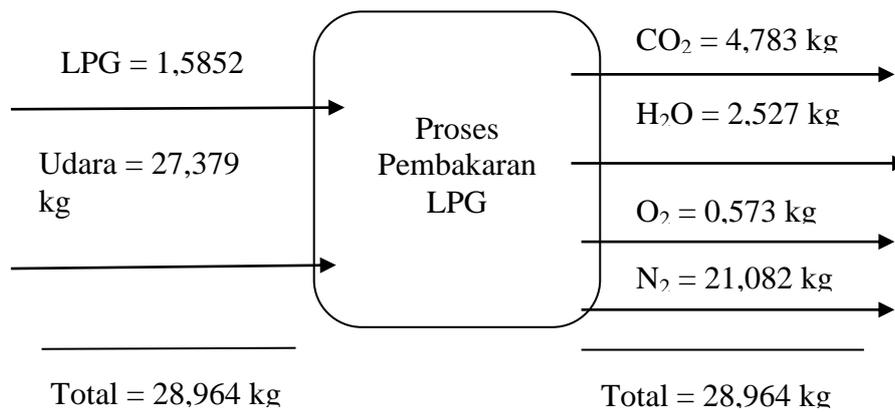
$$\text{Udara} = 24,889609 + 0,1(24,889609)$$

$$\begin{aligned}
 &= 24,889609 + 2,4889609 \\
 &= 27,3785699 \text{ kg} \\
 &= 27,379 \text{ kg} \\
 \text{Jumlah total O}_2 &= 23/100 \times 27,3785699 \\
 &= 6,29707108 \text{ kg} \\
 &= 6,297 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

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

- Karbondioksida, CO_2 = 4,782931 kg
- Air, H_2O = 2,526879 k
- Nitrogen, N_2 = $77/100 \times 27,379$ kg
= 21,082 kg
- Oksigen bebas, O_2 = $6,297 \text{ kg} - 5,724 \text{ kg}$
= 0,573 kg

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



Gambar 3. Kesetimbangan/*Balance* dengan Jumlah Udara Aktual

Dengan demikian maka jumlah gas asap dapat dihitung adalah :

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_g &= \dot{m}_{ud} + \dot{m}_{bb} = 27,379 + 1,5852 \\
 &= 28,964 \text{ kg/jam}
 \end{aligned}$$

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.

Tabel 3. Analisa Data Perhitungan Efisiensi Ketel Uap

No	Pukul	Temp. 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

Temperatur air Umpan = 28 ° C

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

Diperoleh rata rata data sebagai berikut :

$$T_a = 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P = 3 \text{ Bar}_g = 4 \text{ Bar}_{abs} , T_s = 143,6^\circ\text{C}$$

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

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

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

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

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

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

e. Effisiensi (η)

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

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

$$= 68,08 \%$$

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 (*Q_{in}*) adalah 55043,82 kJ/kg jam sedangkan jumlah energi berguna yang diserap air umpan sampai terbentuknya uap dalam ketel uap (*Q_{out}*) 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.