



UNJUK KERJA KAPASITAS KETEL UAP MINI MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR GAS

Demetrius Hanopan Tambunan^a, Armando Sipayung^a, Arnold Pakpahan^a, Yudha Tarigan^a

^aProgram Studi Teknik Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

E-mail: demetriustambunan@students.polmed.ac.id (D. Tambunan) Tel: +62822-7463-7584

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 23 November 2022

Direvisi pada 29 Desember 2022

Disetujui pada 20 Januari 2023

Tersedia daring pada 25 Februari 2023

Kata kunci:

Ketel uap, kapasitas, nilai kalor, unjuk kerja, gas

Keywords: Boiler, capacity, heating value, efficiency, gas

ABSTRAK

Ketel uap merupakan sebuah alat untuk menciptakan uap air dan ketel uap memiliki berbagai komponen penyusun ketel uap yakni unsur air, uap air, serta ruang bakar. Ketel uap dibagi menjadi dua kelompok yaitu ketel pipa api dan ketel pipa air. Uap adalah kemampuan perpindahan panas material yang digunakan sebagai penghantar panas untuk pemanasan dan penguapan atau evaporasi didalam ketel itu sendiri. Ada tiga jenis perpindahan panas pada ketel yaitu, secara radiasi, konveksi dan konduksi. Perpindahan panas terjadi pada dapur pembakaran, sedangkan konveksi terjadi pada aliran fluida gas panas dan fluida kerja atau yang menerima panas, kemudian secara konduksi terjadi pada metal material diantara gas panas sebagai sumber energi panas dan fluida kerja cair sebagai penerima transfer panas yang bertujuan melaksanakan penguapan atau evaporasi. Salah satu peralatan pada pabrik tersebut yang menggunakan energi panas adalah ketel uap. Alat ini harus selalu siap dalam menjalankan fungsinya sebagai penghasil uap yang seterusnya digunakan untuk keperluan produksi. Efisiensi ketel uap ini selalu berubah-ubah sesuai dengan beban operasinya, untuk dapat mengurangi energi panas yang tidak efisien perlu dilakukan memantau setiap unit ketel uap dan menurunkan kerugian kalor nya. Maka perlu dilakukan pengevaluasian prestasi kerja terhadap efisiensi pada ketel uap. Unjuk kerja ketel uap mini menggunakan bahan bakar gas memiliki efisiensi ketel uap mini yaitu 25 kg/jam, konsumsi bahan bakar 2,032 kg/jam, Tekanan rata – rata 3,00 bar gauge. Bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar gas dengan nilai kalor sebesar 47111,8kJ/kg. Temperatur rata – rata gas buang 248,2°C. Efisiensi termal ketel uap adalah sebesar 68,81 %.

ABSTRACT

A steam boiler is a device for creating steam air and a steam boiler has various components, namely steam boilers, no doubt, air steam, and a combustion chamber. Steam boilers are divided into two groups, namely fire tube boilers and water tube boilers. Steam is a heat transfer material that is used as a heat conductor for heating and evaporation in the boiler itself. There are three types of heat transfer in the boiler, namely, by radiation, convection and conduction. Heat transfer occurs in the combustion chamber, while convection occurs in the flow of hot gas and working fluids or those that receive heat, then conduction occurs in metal materials between the hot gas as a source of heat energy and the working fluid as a heat transfer recipient which aims to carry out evaporation or evaporation. The efficiency of this boiler always changes according to its operating load, in order to reduce inefficient heat energy it is necessary to monitor each boiler unit and reduce its heat loss. So it is necessary to evaluate work performance on the efficiency of the steam boiler. The performance of a mini steam boiler using gas fuel has an efficiency of a mini steam boiler of 25 kg/hour, fuel consumption of 2,032 kg/hour, an average pressure of 3.00 bar gauge. The fuel used is LPG with an HHV of 47111.8kJ/kg. The average exhaust gas temperature is 248.2°C. The thermal efficiency of the steam boiler is 68.81%.

1. PENGANTAR

Ketel uap adalah suatu bejana tertutup dan dengan cara memanaskan air didalamnya akan menghasilkan uap bertekanan (Muin, S.A., 2016). *Steam* diperoleh dengan memanaskan air yang berada dalam bejana dengan bahan bakar. *Ketel uap* dirancang untuk memindahkan kalor dari suatu pembakaran, yang biasanya pembakaran bahan bakar (Purba, 2015). Di ketel pipa air, air umpan ketel uap berkecimpung melalui pipa-pipa masuk ke pada tangki, uap tercipta karena energi panas ditransfer dari luar pipa yg dipanaskan oleh gas pembakaran yg terjadi didaerah cairan di dalam drum. Sebagai akibatnya ketel yg telah sangat berkembang. ketel pipa air biasanya dirancang dengan tekanan sangat tinggi yaitu hingga lebih dari 100 bar dan memiliki daya muat uap antara 4.500-12.00 kg/jam (Juriwon, 2017). Cara kerja ketel uap terjadinya pembakaran artinya asal bahan bakar sebagai akibatnya menimbulkan panas dan ketel uap memakai bahan bakar cair (residu, solar), padat (batubara), atau gas (Alidina, dkk., 2022; Rusnadi, dkk., 2020). Panas berasal bahan bakar lalu digunakan buat memasak air di dalam ketel uap sebagai akibatnya air bisa mendidih menghasilkan uap sehingga terjadinya tekanan dalam ketel uap. Hasil dari uap mengandung tenaga potensial yang nantinya tenaga steam tersebut masuk ke dalam ketel uap dan dirubah menjadi tenaga mekanik (Polewangi dan Sani, 2019). Aspek krusial sebab keterkaitan terhadap efisiensinya. Faktor yang mempengaruhi efisiensi ketel uap pada umumnya adalah desain awal ketel uap, kualitas air umpan, kualitas udara, kualitas Untuk bakar yang digunakan, kualitas komponen mengoptimalkan pemanfaatan tenaga secara lebih mudah dan berhemat porto produksi terhadap pemakaian bahan bakar maka analisis tentang pengembangan kinerja pada ketel uap artinya bahan utama dan komponen penunjang ketel uap serta sistem kontrol yang terpasang. Karakteristik energi kerja asal suatu alat bisa dikatakan menjadi efisien jika kinerja kerja atau taraf buat kerja ketel uap diperoleh asal kesetaraan antara tenaga yg diubah atau diserap sang cairan kerja didalam ketel menggunakan memasukan tenaga kimia berasal bahan bakar. kemampuan ketel uap umumnya berkisaran antara 70% sampai 90% (Alidina, dkk., 2022).

Ketel uap digunakan untuk membuat pulp atau kertas, penggerak turbin uap yang menghasilkan listrik alat pemanas, penguap cairan dan kegunaan lainnya. Ketel uap digunakan sebagai alat pemanas dan penguap cairan. Peranan dan kegunaan ketel uap digunakan di industri sangat luas sehingga pengoperasian ketel uap harus berjalan sesuai standar. Apabila tidak mengikuti prosedur kerja maka dapat menimbulkan kecelakaan berupa ledakan yang dapat merusak bangunan, menelan korban jiwa manusia yang bekerja disekitar industri tersebut. Ketel uap dioperasikan secara manual membuat operator ketel uap akan menemui hambatan atau kesulitan pada saat mengoperasikan ketel uap. Ketel uap pipa air mini dengan kapasitas 25 kg/jam dengan tekanan 4 bar. Proses perubahan air menjadi uap dilakukan dengan memanaskan air yang berada didalam pipa-pipa dengan panas hasil pembakaran bahan bakar. Proses pembakaran dilakukan secara kesinambungan didalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar. Uap yang dihasilkan adalah uap *superheat* (uap air yang masih bercampur dengan air liquid/uap jenuh) dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju, aliran, dan panas pembakaran yang diberikan. Ketel uap yang konstruksinya terdiri dari pipa – pipa yang berisi air disebut *water tube boiler* (ketel uap pipa air). standar yang dibuat akan menjamin keamanan dalam pengoperasian, sehingga akan meningkatkan efisiensi.

a. Ketel Uap

Ketel uap berasal dari kata boil yang berarti mendidih dan menguap sehingga ketel uap adalah alat yang digunakan untuk memproduksi uap pada tekanan tertentu. Dengan memberikan panas terhadap air yang terdapat dalam drum yang tertutup rapat. Pada drum ini dilengkapi dengan pipa air (*water tube*). Uap (*steam*) yang dihasilkan dari ketel uap digunakan dalam berbagai proses dalam aplikasi industri, seperti penggerak, pemanas, dan lain – lain. Ketel uap diklasifikasikan kedalam dua kelompok, yaitu ketel uap pipa api (*fire tube boiler*) dan ketel uap pipa air (*water tube boiler*). Ketel uap pipa air banyak dipakai untuk kebutuhan uap skala besar (Muin A. Syamsir, 1993)

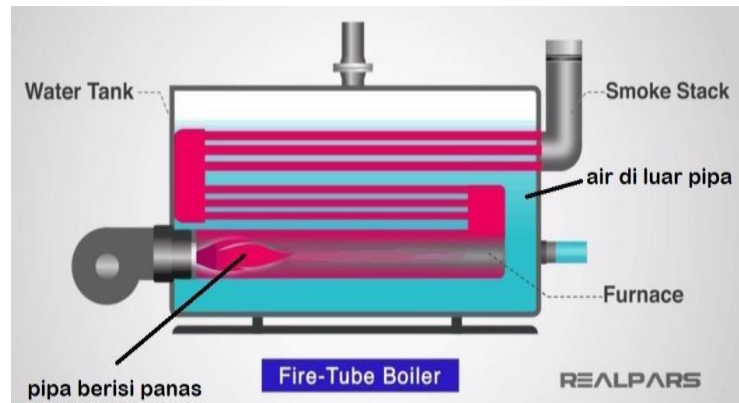
b. Prinsip Kerja Ketel Uap

Prinsip kerja ketel uap kurang lebih mirip dengan panci yang digunakan untuk memasak air, tetapi dengan kapasitas yang jauh lebih besar. Dalam ketel uap dimana air diubah menjadi uap dan panas diserap air dalam ketel uap dan uap yang dihasilkan secara kontinu. Air yang disuplai ke ketel uap untuk diubah menjadi steam disebut air umpan. Air umpan yang dialirkan ke ketel uap untuk menggantikan air dalam ketel uap yang telah berubah menjadi uap. Ketika uap meninggalkan air yang mendidih, padatan–padatan yang tertinggal menjadi bertambah kepekatannya dan bahkan dapat mencapai suhu tingkat dimana pemekatan lebih lanjut bisa menyebabkan terbentuk kerak atau deposit didalam ketel uap. Air ketel uap yang kepekatannya tinggi ini harus diganti untuk mencegah terbentuknya kerak didalam ketel uap. Proses ini dikenal sebagai *blowdown* yang berkelanjutan. Bahan baku yang digunakan untuk membuat steam adalah air yang baku yang diolah di *water treatment* dan dialirkan ke *feed water tank* yang berfungsi sebagai penampung air umpan sebelum dipompakan ke *daerator*. Air umpan dari *feed water tank* dialirkan menggunakan pompa ke *daerator* yang berfungsi untuk menghilangkan kandungan O₂ dan gas–gas yang terlarut didalam air umpan. Air dari *daerator* dipompakan ke ketel uap dengan melewati *economizer* yang bertujuan untuk menaikkan temperatur air dengan memanfaatkan panas dari gas buang pembakaran ketel uap dan dapat meningkatkan efisiensi ketel uap yang lebih tinggi (Darwin Sitompul, 1996).

c. Klasifikasi Ketel Uap

1. Ketel pipa api (*fire tube boiler*)

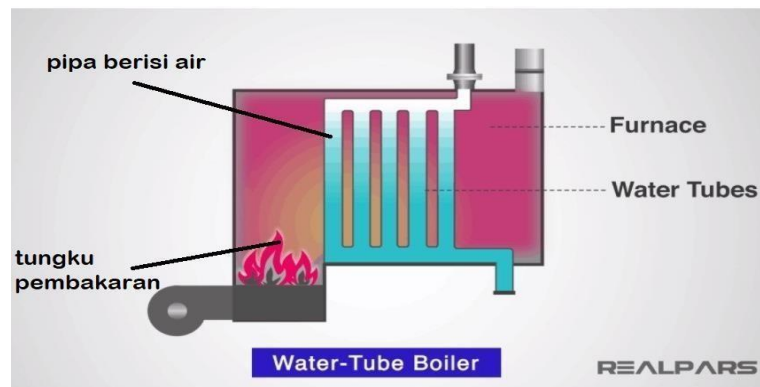
Ketel uap pipa api adalah jenis ketel uap dimana gas panas dari api melewati satu atau lebih tabung berjalan melalui wadah tertutup air. Panas dari gas ditransfer melalui dinding tabung dengan konduksi panas, pemanas air dan akhirnya menciptakan uap seperti pada gambar 1 (Muin A. Syamsir, 1993).



Gambar 1: Ketel pipa api (*fire tube boiler*)

2. Ketel pipa air (*Water tube boiler*)

Ketel uap pipa air secara umum dalam perkembangannya tampak seperti ketel pipa kecuali bahwa uap air dan tekanan tinggi terletak didalam pipa – pipa dan gas pembakaran terletak diluar seperti gambar 2 (Muin A. Syamsir, 1993).



Gambar 2: Ketel pipa air (*water tube boiler*)

d. **Komponen Utama Ketel Uap**

Komponen utama dari ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Muin A. Syamsir, 1993):

1. **Dapur ketel (ruang bakar)**
Suatu ruang yang digunakan untuk menghasilkan panas dari suatu bahan bakar yang membentuk uap di dalam ketel uapnya. Dinding – dinding tungku ini dikelilingi oleh pipa – pipa air, sehingga digunakan pada ketel – ketel pipa air yang akan berubah menjadi uap saat dipanaskan selama proses pembakaran
2. **Pipa *Water Wall***
Fungsinya untuk menyerap panas dan gas asap dari hasil pembakaran bahan bakar. Pada pipa ini terdapat air yang menyerap panas sehingga temperaturnya naik, berat jenisnya berkurang, maka terjadilah sirkulasi. Perpindahan panas ini berlangsung secara radiasi. Air yang keluar dari water wall diharapkan berbentuk uap jenuh.
3. **Drum Ketel**
Drum ketel adalah pusat sirkulasi air dan uap, dimana didalamnya terdapat separator untuk memisahkan antara air dan uap. Pada ketel uap terdapat drum atas (*upper drum*) dan drum bawah (*lower drum*). Level pada drum ini diatur oleh pipa – pipa *down comer* dan pipa – pipa *back pass*, dimana level itu bertujuan untuk mencegah terjadinya kebocoran dan pecahnya dinding sebelah atas, karena dinding sebelah atas berbatasan dengan uap dan akan lebih banyak memuai.
4. **Pipa superheater**
Pipa ini berfungsi untuk menghasilkan uap yang memiliki kandungan air yang lebih rendah, sehingga uap yang dihasilkan tersebut menjadi lebih baik dalam pemanfaatannya karena memiliki daya yang lebih besar dan entalpi yang lebih tinggi, seperti untuk drum atas

seperti untuk memutar turbin uap. Uap pada pipa superheater ini dialirkan dari drum atas untuk dipanaskan lagi dan ditampung dalam *header superheater* untuk dialirkan ke pipa induk.

5. *Economizer*

Economizer merupakan suatu alat penukar kalor yang berfungsi sebagai pemanas awal karena menaikkan suhu air umpan yang akan masuk ke ketel. Panas yang digunakan biasanya berasal dari gas buang hasil pembakaran bahan bakar. Dengan menggunakan *economizer* diperoleh penghematan bahan bakar yang berarti juga memperkecil panas dibuang sehingga meningkatkan efisiensi sistem.

6. *Blower* hembus

Blower hembus berfungsi untuk menekan udara pembakaran kedalam dapur untuk keperluan udara pembakaran. Disamping mensuplai udara untuk pembakaran, bahan bakar *blower* juga berfungsi sebagai pendingin *voster* dan penyebaran bahan bakar.

7. Cerobong asap

Cerobong asap berfungsi untuk mempermudah pembuangan gas asap sehingga pembuangan gas asap lebih sempurna. Dalam hal ini gas asap hasil pembuangan bahan bakar harus dibuang agar pembakaran dapat berlangsung baik. Cerobong asap ini juga berfungsi untuk membuang abu, serta sisa hasil pembakaran sehingga polusi pada ketel uap berkurang. Untuk dapat membuang gas asap dan sisa tersebut, cerobong asap menggunakan tarikan yang dihasilkan *blower* isap atau sistem tarikan uap (*indrive drive fan*) yaitu dengan menghisap gas asap dari ruang pembakaran dan menekannya kedalam cerobong asap untuk dibuang ke udara luar.

e. Komponen Pendukung Ketel Uap

Komponen pendukung ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Djokosetyardjo M. J. 1990):

1. *Force Draft Fan* (FDF)

Force draft fan berfungsi untuk menjaga kualitas nyala api. FDF berfungsi sebagai filter udara yang masuk kedalam ruang bakar sehingga terhindar dari benda asing dari lingkungan.

2. Katup pengaman (*safety valve*)

Katup pengaman ini berfungsi mengurangi tekanan pada system drum agar tidak melebihi tekanan kerja yang diinginkan atau telah di atur .

3. Manometer pengukur tekanan uap

Manometer ini digunakan untuk mengetahui besarnya tekanan didalam ruangan uap sehingga kita dapat mengetahui besarnya tekanan uap yang ada dalam ketel uap.

4. Gelas penduga

Alat ini berfungsi untuk melihat level pada drum ketel dan memiliki peranan penting dan harus beroperasi dengan baik. Peralatan ini harus rutin diperiksa selama ketel uap beroperasi.

5. Alarm

Berfungsi untuk memperingatkan operator akan kondisi level air pada drum. Alat ini akan berbunyi bila kondisi air pada drum kurang atau berlebih, karena alarm dihubungkan dengan sensor level air yang berada pada drum atas.

6. *Dearator*

Dearator letaknya berada diluar ketel uap dan berfungsi sebagai pemanas yang menghilangkan gas – gas terlarut dalam air umpan ketel uap terutama oksigen.

7. Keran uap induk

Keran ini berfungsi sebagai katup penghubung antara ruang uap dalam ketel uap yang bertekanan tinggi dengan ruang bakar mesin (turbin uap), karena itu harus dipasang sedekat mungkin dengan badan ketel uap guna pengamanan.

f. Proses Pembentukan Uap

Penguapan adalah proses terjadinya perubahan fasa dari cairan menjadi uap. Apabila panas yang diberikan pada air, maka suhu air akan naik. Naiknya suhu air akan meningkatkan kecepatan gerak molekul air. Jika panas terus bertambah secara perlahan – lahan maka kecepatan gerak air akan semakin meningkat pula, hingga sampai pada suatu titik dimana molekul – molekul air akan mampu melepaskan diri dari lingkungannya (100%) pada tekanan 1 kg/cm², maka air secara berangsur – angsur akan berubah menjadi fasa menjadi uap dan hal inilah yang disebut penguapan. Pembentukan uap pada ketel uap, udara masuk dan bahan bakar dimasukkan kedalam dan terjadi proses pembakaran. Gas – gas hasil pembakaran akan melewati evaporator, superheater, air heater, dan akhirnya akan dibuang ke atmosfer melalui cerobong asap. Sedangkan air pengisi, setelah mengalami pemanasan pada daerator, lalu dimasukkan kedalam evaporator dan selanjutnya uap jenuh akan dipanaskan lanjut pada alat yang dinamakan superheater dan akhirnya diperoleh uap panas lanjut (*superheated steam*) (Nasution. A. H. 1979).

2. METODE

a. Efisiensi Ketel Uap

Metode yang digunakan untuk mengetahui efisiensi pada ketel uap ini adalah metode langsung. Efisiensi adalah suatu tingkatan kemampuan kerja dari suatu alat. Sedangkan efisiensi pada ketel uap adalah perbandingan antara energi yang diserap oleh fluida kerja didalam ketel uap dengan masukan energi energi kimia bahan bakar (El-Wakil, M.M. 1992; Karaeng, C.T., 2013).

i. *Kebutuhan bahan bakar*

Bahan bakar yang digunakan pada *ketel uap* ini adalah gas. Nilai kalor bahan bakar (HVV) LPG adalah sebesar 47111,8 kJ/kg yang dilihat melalui Pertamina. Untuk mengetahui kebutuhan bahan bakar gas pada *ketel uap* ini dapat dihitung dengan persamaan 1 berikut:

$$m_{bb} = \frac{\dot{m}_u (h_u - h_a)}{\eta_B \times HVV} \quad (1)$$

ii. *Energi evaporasi*

Untuk perubahan air umpan (*feed water*) menjadi uap (*steam*) dalam proses evaporasi adalah besarnya kandungan entalpi uap dikurang kandungan entalpi air umpan. Dapat dihitung dengan persamaan 2 berikut:

$$Q = \dot{m}_u (h_u - h_a) \quad (2)$$

iii. *Menghitung efisiensi ketel uap*

Unjuk kerja ketel uap dapat dihitung dengan menghitung efisiensinya. Semakin besar efisiensi dari suatu ketel uap, maka dapat dipastikan ketel tersebut memiliki performansi yang baik. Untuk menghitung efisiensi ketel uap dapat dihitung dengan persamaan 3 berikut:

$$\eta_B = \frac{Q_{eva}}{Q_{bb}} = \frac{\dot{m}_u (h_u - h_a)}{m_{bb} HVV} \times 100\% \quad (3)$$

Q_{eva} = Panas penguapan/evaporasi (kJ/dtk)

Q_{bb} = Jumlah suplai panas pembakaran (kJ/kg)

\dot{m}_u = Kapasitas aliran uap atau kapasitas ketel uap (25 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)

HVV = nilai pembakaran LPG (kJ/kg)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Data – Data Ketel Uap Mini

Ketel pipa air mini luas permukaan bidang perpindahan panas dengan menambah jumlah pipa-pipa air dari total 22 pipa menjadi 30 pipa atau penambahan 8 pipa yang panjangnya 40 cm, jadi spesifikasi ketel uap mini modifikasi adalah sebagai berikut

- Peralatan : Ketel Pipa Air Mini
- Kapasitas uap : 25 kg/jam
- Tekanan uap : 4 Bar (abs) (*steady-state*)
- Bahan bakar : Gas (LPG)
- Nilai kalor LPG: 11254,61 kkal/kg (47111,8 kJ/kg)
- Kondisi suplai air: 28 °C (normal)
- Efisiensi ketel uap: 70%

b. Kebutuhan Bahan Bakar

Tekanan uap yang diproduksi ketel uap air mini adalah tekanan absolut, $p = 4$ bar abs ($p = 3$ barg). Entalpi spesifik pada tekanan 4 bar abs dan kondisi saturasi (*steady state*) atau kondisi teoritis ideal yaitu $h_u = h_g = 2739$ kJ/kg. Temperatur suplai air umpan *boiler* atau ketel ada temperatur normal pada 28°C, maka diperoleh entalpi spesifiknya yaitu:

$$h_a = h_f = 117,3 \text{ kJ/kg.}$$

Kapasitas uap yang dihasilkan *ketel uap* adalah

$$\dot{Q}_{uap} = \frac{25 \text{ kg}}{3600 \text{ detik}}$$

Maka kebutuhan bahan bakar dapat dihitung dengan persamaan 1 yaitu:

$$m_{bb} = \frac{25 (2739 - 117,3)}{0,7 \times 47111,8} = 0,000551 \text{ kg/dtk} = 1,98385 \text{ kg/jam}$$

c. Bahan Bakar Ketel Uap

Bahan bakar yang digunakan untuk ketel pipa air mini yang dipilih dan ditetapkan serta lebih praktis di lapangan adalah memakai bahan bakar gas LPG. LPG ini menjadi bahan bakar untuk keperluan sehari-hari setiap rumah dalam masyarakat dan mudah memperolehnya di pasar atau secara umum selalu dapat dijangkau oleh masyarakat yang disediakan oleh Pemerintah. Bahan bakar LPG mengandung sedikitnya 90% propana, dengan campuran sejumlah kecil propana, butana dan butena dengan karakteristik sebagai berikut:

- Titik nyala = -104 °C
- Ambang ledakan = 2,37 – 9,5 %

- Kapasitas kalor = 73,60 J/kmol
- Entalpi pembakaran = -2,2197-2,2187 MJ/mol = 2219,7 – 2218,7 kJ/mol

d. Komposisi Gas

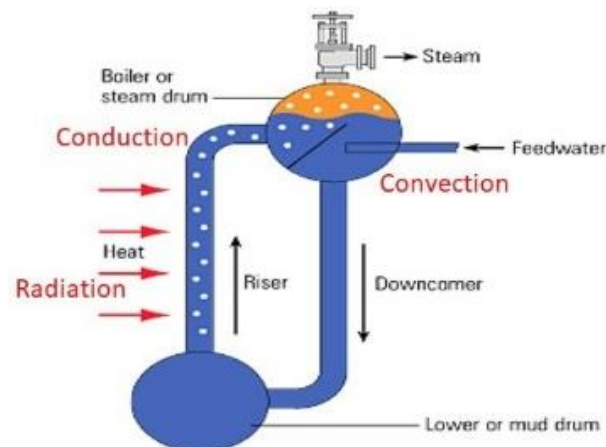
Berdasarkan ESDM komposisi LPG tidak berubah, maka komposisi bahan bakar LPG yang diproduksi dan dipasarkan oleh PT. Pertamina ke masyarakat adalah 50% Propana (C_3H_8) dan 50% Butana (C_4H_{10}) secara massa. Jadi untuk jumlah bahan bakar LPG sebesar 1,98395 kg/jam, maka jumlah masing-masing komposisi LPG adalah

- Propana (C_3H_8) = $0,50 \times 1,98395 \text{ kg}$ = 0,991975 kg
- Butana (C_4H_{10}) = $0,50 \times 1,98395 \text{ kg}$ = 0,991975 kg

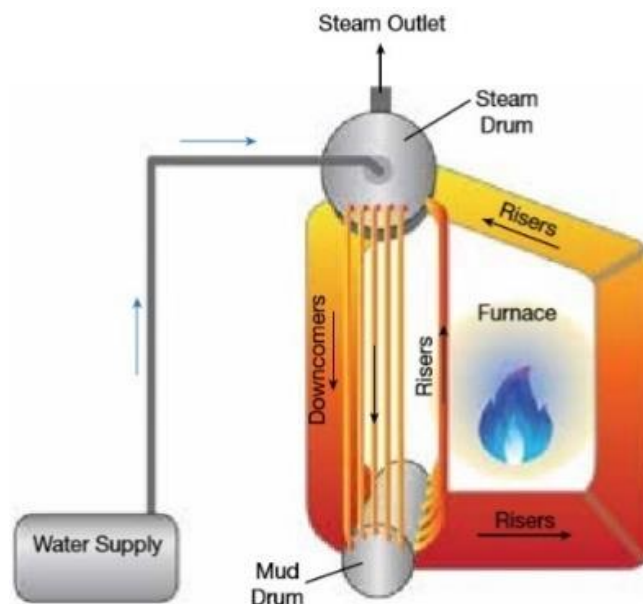
Besarnya kebutuhan oksigen dan kebutuhan udara pembakaran serta juga menentukan jumlah gas asap, dan untuk memastikan terjadinya pembakaran sempurna (*completed combustion*) maka untuk pengoperasian ketel pipa air *mini* ini digunakan jumlah udara berlebih (*excess air*) sebanyak 25% (0,25) dan selanjutnya bisa dihitung dengan membuat reaksi pembakaran.

e. Luas Permukaan Bidang Pemanas

Drum-drum ketel dan pipa-pipa dipasang dengan menghubungkan drum atas (*upper drum*) dengan drum bawah (*lower drum*) oleh pipa-pipa. Drum-drum dan pipa-pipa ini menjadi bagian-bagian permukaan perpindahan panas adalah tempat air dipanaskan dengan gas asap yang mengalir melalui permukaan drum atas, drum bawah dan pipa-pipa tersebut. Pipa-pipa juga merupakan saluran sirkulasi air turun ke drum bawah dan gelembung-gelembung uap.naik ke drum atas karena perbedaan densitas yang disebut sirkulasi alam dan ditunjukkan pada gambar 3 dan gambar 4. Drum-drum ketel dan pipa-pipa dipasang dengan menghubungkan drum atas (*upper drum*) dengan drum bawah (*lower drum*) oleh pipa-pipa. Drum-drum dan pipa-pipa ini menjadi bagian-bagian permukaan perpindahan panas adalah tempat air dipanaskan dengan gas asap yang mengalir melalui permukaan drum atas, drum bawah dan pipa-pipa tersebut. Pipa-pipa juga merupakan saluran sirkulasi air turun ke drum bawah dan gelembung-gelembung uap.naik ke drum atas karena perbedaan densitas atau berat jenis yang disebut sirkulasi alam.



Gambar 3: Diagram Skematis Dasar Ketel Pipa Air



Gambar 4: Skematis Aliran Fluida Kerja dan Perpindahan Panas

Drum atas ini dirancang dengan panjang drum = 0,5 m, diameter drum = 0,254 m dengan posisi drum horizontal dan posisinya di atas sehingga disebut drum atas, dengan keadaan 2/3 dari tinggi drum berisi air, sedangkan selebihnya berisi uap. Dalam hal ini air hanya boleh sedikit lebih tinggi atau sedikit lebih rendah dari 2/3 tinggi (diameter) drum. Bahan drum adalah *seamless steel*, dengan *allowable working stress* 8000 psi pada temperatur 650°F. Gambar ketel pipa air dapat dilihat pada gambar 5 berikut.



Gambar 5: Ketel Pipa Air

Untuk perancangan drum atas ketel uap pipa air mini ini, maka level air adalah 2/3 diameter drum, dimana 1/3 diameter bagian atas merupakan daerah pengumpulan produksi uap sebagai hasil evaporasi. Jumlah pipa-pipa dengan diameter nominal 1/4" adalah 22 pipa dengan bahan stainless steel SS304 dengan kekuatan tarik atau tensile strength, yield 2150 kg/cm², panjang masing-masing berbeda dan terpasang 1 drum bawah dan 1 drum atas dengan masing-masing diameter 3" dan 10" dengan panjang yang sama adalah 0,5 m, maka luas perpindahan panas dan volume aktual ketel uap pipa air mini sebelum penambahan pipa-pipa adalah:

- Drum atas : $A_1 = \pi d \cdot L = 0,3925 \text{ m}^2$
- $V = \text{Volume}$: $V_1 = 0,02532253 \text{ m}^3$
- Drum bawah : $A_2 = 0,119634 \text{ m}^2$ $V_2 = 0,002279 \text{ m}^3$
- Pipa L = 70 cm, 8 pipa : $A_3 = 0,1116584 \text{ m}^2$ $V_3 = 0,00017726 \text{ m}^3$
- Pipa L = 40 cm, 4 pipa : $A_4 = 0,0638048 \text{ m}^2$ $V_4 = 0,0001013 \text{ m}^3$
- Pipa L = 25 cm, 4 pipa : $A_5 = 0,019939 \text{ m}^2$ $V_5 = 0,00000316 \text{ m}^3$
- Pipa L = 52 cm, 2 pipa : $A_6 = 0,02073656 \text{ m}^2$ $V_6 = 0,000003292 \text{ m}^3$

Untuk modifikasi ini ditambahkan pipa-pipa sebanyak 8 pipa (masing-masing 4 pada kompartemen 1 dan 4 pada kompartemen 2), dan panjang L = 40 cm, maka total A₄ menjadi 2 kali, $A_4 = 2 \times 0,0638048 \text{ m}^2 = 0,1276096 \text{ m}^2$. Luas bidang permukaan perpindahan panas pada kompartemen 1 dengan jumlah pipa panjang 70 cm sebanyak 4 pipa, panjang 40 cm sebanyak 8 pipa, dan setengah drum atas serta setengah drum bawah, maka luas bidang permukaan setelah penambahan 8 pipa ini sebagai berikut:

$$A_I = \frac{1}{2} A_1 + \frac{1}{2} A_2 + \frac{1}{2} A_3 + \frac{1}{2} A_4$$

$$A_I = \frac{1}{2} (0,39878) + \frac{1}{2} (0,119634) + \frac{1}{2} (0,1116584) + \frac{1}{2} (0,1276096)$$

$$A_I = 0,378841 \text{ m}^2$$

Luas bidang permukaan perpindahan panas pada kompartemen 2 dengan jumlah pipa panjang 70 cm sebanyak 4 pipa, panjang 40 cm sebanyak 8 pipa, panjang 25 cm sebanyak 4 pipa, panjang 52 cm sebanyak 2 pipa dan setengah drum atas serta setengah drum bawah, maka luas bidang permukaan setelah penambahan 8 pipa ini sebagai berikut:

$$A_{II} = \frac{1}{2} A_1 + \frac{1}{2} A_2 + \frac{1}{2} A_3 + \frac{1}{2} A_4 + A_5 + A_6$$

$$A_{II} = \frac{1}{2} (0,39878) + \frac{1}{2} (0,119634) + \frac{1}{2} (0,1116584) + \frac{1}{2} (0,1276096) + 0,019939 + 0,02073656$$

$$A_{II} = 0,41951656 \text{ m}^2$$

Total Luas bidang permukaan perpindahan panas adalah

$$A = A_I + A_{II} = 0,79835756 \text{ m}^2$$

Volume aktual drum atas adalah 25,3 Liter dan Total volume aktual internal ketel uap pipa air adalah $0,02799 \text{ m}^3 (= 28 \text{ Liter})$

f. Diameter Drum Atas

Jumlah volume drum bawah dan pipa-pipa (30 pipa) adalah

$$V = V_2 + V_3 + 2 \cdot V_4 + V_5 + V_6$$

$$V = 0,002279 + 0,00017726 + 2 \cdot 0,0001013 + 0,00000316 + 0,000003292$$

$$V = 2,69 \text{ liter}$$

Volume 2/3 × level air dalam drum atas (A₁), dapat dihitung

$$A_1 = V_{2/3 D} / L$$

$$A_1 = 0,015 \text{ m}^3 / 0,5 \text{ m}$$

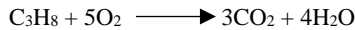
$$A_1 = 0,03 \text{ m}^2$$

g. Kebutuhan Bahan Bakar

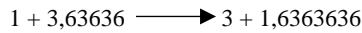
Pembakaran teoritis yang juga umumnya adalah pembakaran sejumlah bahan bakar dengan kebutuhan bahan bakar sesuai reaksi kimianya dengan jumlah kebutuhan oksigen/udara secara teoritis sehingga disebut juga reaksi pembakaran stoikiometrik.

Pembakaran teoritis atau juga disebut secara stoikiometrik :

1. Propana (C_3H_8), maka reaksinya sbb:



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

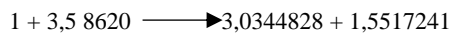
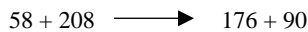
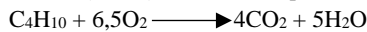


Massa $C_3H_8 = 0,991975$ kg, maka:



Jadi untuk $0,991975$ kg C_3H_8 membutuhkan oksigen secara stoikiometrik sebesar $3,6071818$ kg dan menghasilkan produk-produk pembakaran karbondioksida (CO_2) dan air (H_2O) masing-masing $2,975925$ kg dan $1,6232318$ kg.

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



Untuk massa $C_4H_{10} = 0,991975$ kg, maka:



Jadi untuk $0,991975$ kg C_4H_{10} memerlukan oksigen stoikiometrik sebesar $3,5574276$ kg dan menghasilkan produk-produk pembakaran karbondioksida (CO_2) dan air (H_2O) masing-masing $3,0101311$ kg dan $1,5392715$ kg. Jadi untuk pembakaran bahan bakar LPG sebesar $1,98395$ kg/jam, maka jumlah masing-masing reaktan dan produk-produk pembakaran adalah

Bahan bakar LPG = $1,98395$ kg

Oksigen (O_2) = $3,6071818 + 3,5574276$

Oksigen (O_2) = $7,1646094$ kg

Karbondioksida (CO_2) = $2,975925 + 3,0101311 = 5,9862381$ kg

Air (H_2O) = $1,6232318 + 1,5392715 = 3,1625033$ kg

Kesetimbangan massa reaktan dan produk (*balance* pembakaran) atau massa sebelum dan sesudah pembakaran dapat dilihat pada tabel 1 berikut:

Tabel 1: Balance/kesetimbangan Massa

Reaktan		Produk	
Materi	kg	Materi	kg
LPG	198,395	CO_2	59,862,381
O_2	71,646,094	H_2O	31,625,033
	91,486		91,486

h. Diameter Radiant Ruang Nyala Api

Kapasitas energi panas yang diserahkan dalam dapur berupa panas *radiant surface* ditentukan dari bidang yang kena radiasi dari sumber pembakaran nyala api. Kapasitas energi panas dari sumber pembakaran bahan bakar LPG dan yang diserahkan dalam dapur selanjutnya dapat dihitung. Kapasitas panas pembakaran bahan bakar LPG adalah suplai panas terhadap ketel uap untuk setiap jam sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{bb} = \dot{m}_{bb} \times HHV \times \eta_f \quad (4)$$

\dot{m}_{bb} = Kebutuhan bahan bakar (kg/jam)

$\dot{m}_{bb} = 1,98395$ kg/jam

HHV = Kandungan energi bahan bakar (kJ/kg)

HHV = $47111,8$ kJ/kg

η_f = Efisiensi dapur/furnace

$\eta_f = 0,90 - 0,97 \rightarrow 0,9$ (diambil)

$\dot{Q}_{bb} = 1,98395$ kg/jam $\times 47111,8$ kJ/kg

$\dot{Q}_{bb} = 93467,4556$ kJ/jam

$\dot{Q}_{bb} = 25963,182$ J/dtk

$\dot{Q}_{bb} = 25963,182$ W

Jadi diambil efisiensi dapur $0,9$, maka besar panas meninggalkan dapur sebesar

$\dot{Q}_{bb} = 93467,4556$ kJ/jam $\times 0,9$

$\dot{Q}_{bb} = 84120,71$ kJ/jam

Maka temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar atau dapur dan masuk ke dalam lorong api dapat dihitung dari persamaan 5 yaitu.

$$Q_1 = \dot{m}_g \times \dot{C}_{pg} \times T_g \quad (5)$$

\dot{m}_g = Laju aliran massa gas asap (kg/jam)

$$\dot{m}_g = 40,9221 \text{ kg/jam}$$

C_{Pg} = Dari sifat udara (sama dengan sifat gas)

$$C_{Pg} = 1,428 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \text{ (pada temperatur } 1795^\circ\text{C)}$$

$$84120,71 \text{ kJ/jam} = 40,9221 \text{ kg/jam} \times 1,428 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times T$$

$$T = \frac{84120,71 \text{ kJ/jam}}{40,9221 \text{ kJ/jam} \times 1,43 \text{ kJ/kgK}}$$

$$T = 1440 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Maka kehilangan radiasi panas yang terjadi pada dapur atau ruang pembakaran besarnya adalah:

$$\dot{Q}_{rs} = \dot{Q}_{bb} - \dot{Q}_1$$

$$\dot{Q}_{rs} = 93467,4556 - 84120,71 \text{ kJ/jam}$$

$$\dot{Q}_{rs} = 9346,7456 \text{ kJ/jam} = 2596,32 \text{ W}$$

Besarnya luas ruang permukaan *radiant surface* nyala api sesuai menurut Plank dan Stefan Boltzman, dapat dihitung pada persamaan 6:

$$\dot{Q}_{rs} = \epsilon_f \cdot \epsilon_r \cdot A_r \cdot \sigma (T_f^4 - T_g^4) \tag{6}$$

ϵ_f = Emisivitas nyala

$$\epsilon_f = 0,5 - 0,75 \text{ dan } \epsilon_f = 0,6 \text{ (diambil)}$$

ϵ_r = Emisivitas pancar bidang *radiasi*

$$\epsilon_r = 0,520 - 0,820 \text{ dan } \epsilon_r = 0,6 \text{ (diambil)}$$

Σ = Konstanta Boltzman

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

A = Luas bidang permukaan *radiant* (m^2)

T_f = Temperatur efektif nyala (K)

T_g = Temperatur gas yang meninggalkan ruang *radiant surface* (K)

$$\dot{Q}_{rs} = 0,6 \times 0,6 \times A \times 5,67 \times 10^{-8} [2068^4 - 1713^4]$$

$$A = \frac{2596,32 \times 10^8}{2,0412 (18289512837376 - 8610521428161)}$$

$$A = \frac{2596,32 \times 10^8}{2,0412 (9678991409215)}$$

$$A = 0,01314 \text{ m}^2$$

Jika ruang *radiasi permukaan* dengan berbentuk silinder dan bidang diameter saluran /nyala api 1,5” atau 4 cm, maka panjang nyala api dapat dihitung dengan persamaan 7 yaitu:

$$A = \pi \times D \times L \tag{7}$$

$$L = \frac{A}{\pi \times D}$$

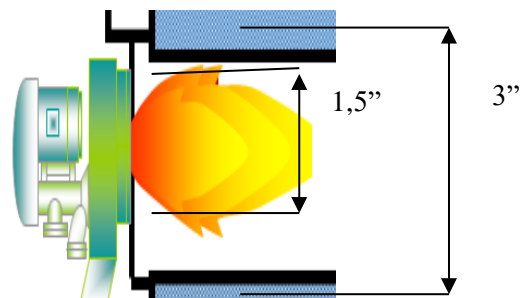
$$L = \frac{0,01314}{3,14 \times 0,04}$$

$$L = 0,1046 \text{ m}$$

$$L = 10,46 \text{ cm.}$$

$$L = 14 \text{ cm (3 inchi diameter pipa)}$$

Untuk membuat nyala api ini tidak menyentuh lorong pembakaran maka digunakan saluran dengan diameter 3” dan panjang 14 cm, dengan tujuan agar tidak cepat mengalami kerusakan atau terbakar.



Gambar 8 Nyala api dengan ruang saluran

i. Tebal Drum Ketel Uap

Tebal drum ditentukan dengan menggunakan persamaan 8 berikut:

$$t = \frac{P \times R_a}{\eta \times s_a - (1-Y)P} + C \tag{8}$$

t = Tebal minimum pelat

$$P = \text{Tekanan perencanaan maksimum} = 1,5 \cdot \text{tekanan kerja} = 1,5 \cdot 4 \text{ Bar} = 6 \text{ Bar} = 6 \text{ kg/cm}^2$$

$$R_a = \text{Jari-jari drum} = 25 \text{ cm}$$

$$S_a = \text{Tegangan izin dari bahan} = 8000 \text{ psi} = 544,217 \text{ kg/cm}^2$$

$$\eta = \text{Efisiensi penyambungan} = 0,9 \text{ (ditetapkan)}$$

$$Y = \text{Koefisien kerja drum yang dipengaruhi oleh temperature} = 0,4 \text{ untuk temperatur di bawah } 900 \text{ } ^\circ\text{F}$$

C = Konstanta penambah = 0,1 in = 0,254 cm

$$t = \frac{6 \cdot 31,5}{0,9 \cdot (544,217) - (1-0,4)^6} + 0,254$$

$$t = 0,6427 \text{ cm}$$

Ketel uap yang direncanakan tekanannya adalah tekanan rendah yaitu 4 bar abs atau 4 kg/cm² sehingga beban tegangan yang diterima material drum dan material pipa-pipa sangat rendah sekali sedangkan tegangan tarik material (*tensile strength, yield*) atau baja tahan karat atau *stainless steel* yang digunakan cukup tinggi yaitu 215 MPa atau 2150 kg/cm² (2150 Bar). Oleh karena itu, kekuatan material yang digunakan adalah sangat aman karena faktor keamanannya sudah lebih dari 10 kali. Untuk bahan dan tebal *front baffle* dan *rear baffle* sama dengan bahan dan tebal drum tersebut sehingga pengoperasiannya aman.

j. Efisiensi Ketel Pipa Air Mini

Efisiensi ketel pipa air mini setelah pengujian ditunjukkan pada tabel 2 yaitu:

Tabel 2: Hasil Pengujian Ketel Pipa Air Mini pada Kapasitas 20 kg/jam

	Temperatur air (°C)	Tekanan Uap (Barg)	Konsumsi Bahan bakar LPG (kg)	Jumlah Kondensat (kg)	Temperatur Gas Buang (°C)	Efisiensi (%)
20 kg/jam	28	2,96	1,2	14	252	64,9
	28	3	1,25	14,8	253,6	65,96
	28	3	1,3	14,2	255,5	60,86
	28	3	1,15	14,6	239,6	70,73
	28	3,03	1,2	13,8	259	64,07
Rata-rata	28	3,01	1,22	14,3	251,94	65,3

- Tekanan uap p = 3 bar = 4 bar abs (*steady state*: saturasi)
- kapasitas, $\dot{m}_u = 14,3 \text{ kg/jam}$
- Pemakaian LPG $\dot{m}_{bb} = 1,22 \text{ kg/jam}$
- Efisiensi, $\eta_{\text{Ketel Uap}} = 65,3\%$

Efisiensi ketel pipa air mini setelah pengujian pada kapasitas 25 kg/jam ditunjukkan pada tabel 3 yaitu:

Tabel 3: Hasil Pengujian Ketel Pipa Air Mini pada Kapasitas 25 kg/jam

	Temperatur air (°C)	Tekanan Uap (Barg)	Konsumsi Bahan bakar LPG (kg)	Jumlah Kondensat (kg)	Temperatur Gas Buang (°C)	Efisiensi (%)
25 bar	28	3,05	2,06	24,2	252	65,16
	28	3	2,2	24,8	243	62,53
	28	2,98	1,98	25,6	255	71,72
	28	3	1,96	26,4	239	74,71
	28	2,97	1,96	24,6	252	69,62
Rata-rata	28	3	2,032	25,12	248,2	68,81

Tekanan uap p = 3 barg = 4 bar abs (*steady state*: saturasi)

kapasitas, $\dot{m}_u = 25,12 \text{ kg/jam}$

Pemakaian LPG $\dot{m}_{bb} = 2,032 \text{ kg/jam}$

Efisiensi operasi aktual dapat dihitung dengan persamaan 9 sebagai berikut

$$\eta_{\text{Ketel Uap}} = \frac{\dot{m}_u (h_u - h_a)}{\dot{m}_{bb} \times \text{HHV}} \quad (9)$$

$$\eta_{\text{Ketel Uap}} = \frac{25,12 (2739 - 117,3)}{2,032 \times 47111,8} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{Ketel Uap}} = 68,81\%$$

k. Pembahasan

Modifikasi ketel uap dengan penambahan luas bidang permukaan perpindahan panas maka dapat meningkatkan kapasitas produksi uap 25 kg/jam dan efisiensi mencapai 68,81%, sedikit lebih rendah dari hasil penetapan rancangan 70%. Menurut Firdaus dan Sirait, 2015, bahwa perhitungan efisiensi ketel uap pipa api yang digunakan dengan metode tidak langsung, dengan cara menghitung kerugian-kerugian kalor pada ketel uap, kerugian-kerugian tersebut antara lain kerugian panas gas asap pada cerobong, kerugian karena mengandung H₂O dalam bahan bakar, kerugian karena kelembaban udara pembakaran dan kerugian radiasi. Pada kapasitas uap 3,10 ton/jam didapatkan nilai efisiensi paling rendah yaitu 86,67%, pada kapasitas uap 2,20 ton/jam efisiensinya adalah 87,03%, pada kapasitas 2,40 ton/jam nilai

efisiensinya adalah 86,89% mengalami penurunan efisiensi sebesar 0,14%, pada kapasitas uap 2,60 ton/jam nilai efisiensi adalah 86,80% mengalami penurunan efisiensi sebesar 0,09%. Rancangan ketel uap juga mempertimbangkan nilai efisiensi termal netto yang menunjukkan nilai efisiensi perpindahan panas yang terjadi selama sirkulasi di dalam ketel uap. Kenaikan tekanan operasi ketel uap menyebabkan terjadinya kenaikan nilai efisiensi termal netto pada rentang 18% - 23% (Rany Puspita Dewi, 2017).

4. KESIMPULAN

Luas bidang pemanas ketel uap pipa air mini semakin besar memberikan pengaruh pada kebutuhan bahan bakar yaitu 25,12 kg pada temperatur gas buang rata - rata sebesar 248,2°C dan tekanan rata – rata 3 barg dengan waktu selama 1 jam. Efisiensi yang diperoleh adalah 68,81% dengan kondensat 14,3 kg/jam. Panas pembakaran bahan bakar sangat mempengaruhi efisiensi oleh karena itu campuran udara dan bahan bakar yang mempengaruhi efisiensi. Konstruksi ketel uap pipa air mini sederhana sehingga mudah perawatannya dan unit ini cukup baik digunakan untuk peralatan proses pada industri pencuci/pengering pakaian dan pengolahan pangan. Ketel uap pipa air mini harus dilakukan pemeliharaan secara rutin/berkala sesuai dengan jadwal sesuai dengan jenis ketel uap sesuai dengan rancangan seperti bahan material, dan aksesoris lainnya dan parameter proses seperti tekanan uap, ketinggian air dalam drum, temperatur uap yang dihasilkan yaitu uap *superheat*, tekanan udara masuk dapur.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan rasa syukur karena berkat dan rahmat yang maha kuasa penulis dapat menyelesaikan artikel ini, serta terima kasih yang sedalamnya karena dukungan Jurusan Teknik Mesin POLMED dalam menyelesaikan penelitian dibidang energi dan Ir. Rufinus Nainggolan, M.T., selaku pembimbing tugas akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- Alidina, D., Arga, E., Ridwan, K.A., Zurohaina, & Syakdani, A. (2022). Analisis Sistem Termal Pada *Double Drum Water Tube Boiler* Untuk Memproduksi *Superheated* Pengaruh Rasio Udara Bahan Bakar Gas. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia* 2 (1), 33-40.
- Djokosetyardjo M. J. (1990). Pembahasan Lebih Lanjut Tentang Ketel Uap. Jakarta, CV Pradnya Paramita.
- El-Wakil, M.M. (1992). *Instalasi Pembangkit Daya* Jilid 1. Jakarta. Erlangga.
- Firdaus, A., & Sirait E. (2015). Analisa Pengaruh Variasi Kapasitas Uap Terhadap Efisiensi Ketel Uap di Pt. Sinar Sosro Banyuasin-Sumatera Selatan. *Jurnal Energi dan Manufaktur* 8 (2), 133-140.
- Juriwon. (2017). Analisis Energi Boiler Pipa Air Menggunakan Bahan Bakar Solar. *Jurnal Hasil Penelitian* 8 (2), 7–13.
- Karaeng, C.T., Iswandi, Firman, & Nuzul, M. (2013). Analisis Kinerja Boiler Pada PLTU Unit 1 PT. Semen Tonasa. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi* 3 (1), 74-85.
- Muin A. Syamsir. (1993). Pesawat Konversi Energi 2 (turbin Uap), Edisi II, Jakarta, CV Rajawali.
- Nasution. A. H. (1979). Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas, *Edisi Ke-3*, Jakarta, CV Erlangga.
- Polewangi, Y.D., & Sani V.G. (2018). Analisis Sistem Perawatan Boiler di PT. Dewa Rencana Perangin-Angin . *Journal of Industrial And Manufacture Engineering* 2 (1), 161-165.
- Rany Puspita Dewi. (2017). Perancangan Boiler Mini Berbahan Bakar Biogas Dengan Berbagai Variasi Tekanan. *EKSERGI Jurnal Teknik Energi* 13 (2), 40-43.
- Rusnadi, I., Fatria, Zikri, A., Lestari, S. P., Alvino, R., & Jaya, J.I. (2020). Pengaruh Rasio Udara Bahan Bakar Solar dan Gas Terhadap Kualitas *Saturated Steam* Pada Sistem *Two Drum Water Tube Boiler*. *Jurnal Kinetika* 11 (2), 38-43.
- Sitompul, D.(1996). Prinsip-Prinsip Konversi Energi, Jakarta, CV Erlangga.