



MODIFIKASI BOILER KAPASITAS 25 KG/JAM TEKANAN 4 BAR DENGAN MEMPERBESAR BIDANG LUAS PEMANAS

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

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

*Corresponding authors at: demetriustambunan@students.polmed.ac.id (Tambunan, D.H) Tel: +6282-274-637-584

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 09 Mei 2023

Direvisi pada 12 Juni 2023

Disetujui pada 07 Juli 2023

Tersedia daring pada 15 Agustus 2023

Kata kunci:

Ketel uap, uap, *liquefied petroleum gas* (LPG), Efisiensi

Keywords: Boiler, steam, liquefied petroleum gas (LPG), efficiency.

ABSTRAK

Ketel uap adalah penghasil uap. ketel uap dibagi kedalam dua kelompok besar yaitu, ketel pipa api dan ketel pipa air. Masing – masing ketel tersebut juga bervariasi bentuk dan ukurannya, tetapi memiliki fungsi yang sama sebagai penghasil uap. Hal yang penting menghasilkan 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. Dalam laporan akhir ini dilakukan perhitungan efisiensi steam boiler mini. Uap aktual yang dihasilkan dari Mini Boiler ini sebesar 25 kg/jam, konsumsi bahan bakar 2,032 kg/jam, Tekanan rata – rata 3,00 bar gauge. Bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar LPG dengan HHV sebesar 47111,8kJ/kg. Temperatur rata – rata gas buang 248,2°C. Efisiensi thermal ketel uap adalah sebesar 68,81 %.

ABSTRACT

A steam boiler is a type of steam generator. Steam boilers are classified into two types: fire tube boilers and water tube boilers. These boilers vary in shape and size, but provide the same function as a steam generator. The heat transfer ability of the material used as a heat conductor for heating and evaporation or evaporation in the boiler itself is essential when generating steam. In the boiler, heat is transferred in three ways: radiation, convection, and conduction. While convection takes place in the flow of hot gas and working fluids or those that receive heat, conductivity occurs in the metal material between the hot gas as a source of heat energy and the liquid working fluid as a heat transfer receiver aimed to carry out evaporation or evaporation. evaporation. A micro steam boiler performance calculation is performed in this final report. This Mini Boiler provides 25 kg/hour of steam, requires 2,032 kg/hour of fuel, and has an average pressure of 3.00 bar gauge. LPG with an HHV of 47111.8 kJ/kg is utilized as fuel. The average temperature of the exhaust gases is 248.2°C. The steam produced by the boiler has a heating efficiency of 68.81%.

1. PENGANTAR

Ketel uap (*boiler*) adalah alat untuk menghasilkan uap air, yang akan digunakan untuk pemanasan atau tenaga gerak. Bahan bakar pendidih bermacam-macam dari yang populer batubara dan minyak bakar, sampai listrik, gas, biomasa, nuklir dan lain-lain. Pendidih merupakan bagian terpenting dari penemuan mesin uap yang merupakan pemicu lahirnya revolusi industri. Ketel uap digunakan untuk membuat pulp atau kertas, penggerak turbin uap yang menghasilkan listrik alat pemanas, penguap cairan dan kegunaan lainnya. Ketel uap juga digunakan sebagai alat pemanas, penguap cairan dan kegunaan lainnya (Darwin Sitompul, 1996; Muin A. Syamsir, 1993). Demikian luasnya peranan dan kegunaan ketel uap, sehingga tanpa adanya ketel uap suatu pabrik atau industri tidak dapat beroperasi dengan sempurna. Ketel uap pipa air mini kapasitas 20 kg/jam uap ini dirancang dengan tekanan 4 bar. Kemudian telah dimodifikasi menjadi 25 kg/jam dengan tekanan yang sama yaitu 4 bar.

1.1 Ketel Uap

Ketel uap adalah suatu bejana/wadah yang di dalamnya berisi air atau fluida lain untuk dipanaskan (Djokosetyardjo, M.J., 2016). Energi panas dari fluida tersebut selanjutnya digunakan untuk berbagai macam keperluan, seperti untuk turbin uap, pemanas ruangan, mesin uap, dan lain sebagainya. Ketel uap memiliki fungsi untuk mengkonversi energi kimia yang tersimpan di dalam bahan bakar menjadi energi panas yang ditransfer ke fluida kerja (Rizky Agustira dkk., 2017). 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 (Desi Aratri Damanik dkk., 2022; Desi Rismawati dkk., 2021; Darwin Sitompul, 1996).

1.1.1 Prinsip Kerja Ketel Uap

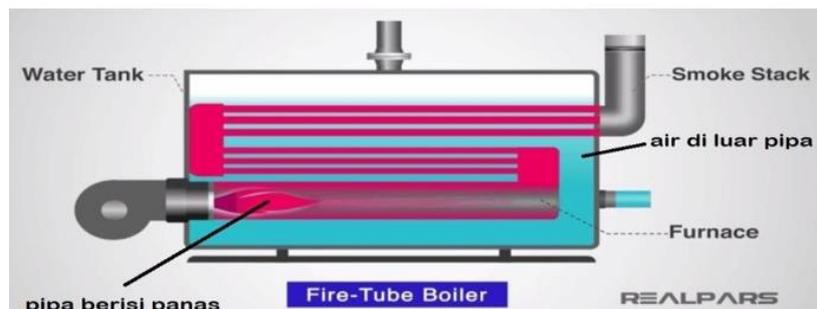
Prinsip kerja ketel uap kurang lebih mirip dengan panci yang digunakan untuk memasak air, tetapi dengan kapasitas yang jauh lebih besar. Dalam ketel uap air diubah menjadi uap. Panas diserap air dalam ketel uap dan uap yang dihasilkan secara kontinu. Air yang disuplai ke ketel uap untuk diubah menjadi steam disebut air umpan. Air umpan yang dialirkan ke ketel uap untuk menggantikan air dalam boiler yang telah berubah menjadi uap. Ketika uap meninggalkan air yang mendidih, padatan – padatan yang tertinggal menjadi bertambah kepekatannya dan bahkan dapat mencapai temperatur 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 uap 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; Muin A. Syamsir, 1993).

1.1.2 Klasifikasi Ketel Uap

Klasifikasi ketel uap dibagi menjadi 2 bagian yaitu (Djokosetyardjo, M.J., 2016; Darwin Sitompul, 1996; Muin A. Syamsir, 1993):

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

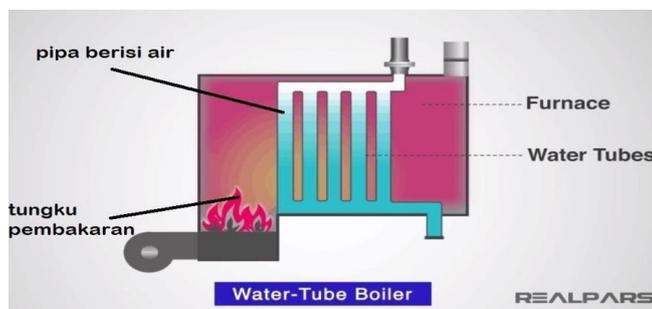
Ketel uap pipa api adalah jenis ketel uap dimana gas panas dari api melewati satu atau lebih tabung berjalan melalui wadah tertutup air. Panas dari gas ditransfer melalui dinding tabung dengan konduksi panas, pemanas air dan akhirnya mengeluarkan uap (Angky Puspawan dkk, 2016). Ketel pipa api dapat dilihat pada gambar 1 (Djokosetyardjo, M.J., 2016; Darwin Sitompul, 1996; Muin A. Syamsir, 1993).



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

b. 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. ketel pipa air dapat dilihat pada gambar 2 (Djokosetyardjo, M.J., 2016; Darwin Sitompul, 1996; Muin A. Syamsir, 1993).



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

1.1.3 Komponen Utama Ketel Uap

Komponen utama dari ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Djokosetyardjo, M.J., 2016; Darwin Sitompul, 1996; Muin A. Syamsir, 1993):

- a. **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.
- b. **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.
- c. **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.
- d. **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 entalphy 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.
- e. **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.
- f. **Blower**
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.
- g. **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.

1.1.4 Komponen Pendukung Ketel Uap

Komponen pendukung ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Djokosetyardjo, M.J., 2016; Darwin Sitompul, 1996; Muin A. Syamsir, 1993):

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

- b. Katup pengaman (*safety valve*)
Katup pengaman ini berfungsi mengurangi tekanan pada sistem drum agar tidak melebihi tekanan kerja yang diinginkan atau telah di setting.
- c. Manometer pengukur tekanan uap
Manometer ini digunakan untuk mengetahui besarnya tekanan didalam ruangan uap sehingga kita dapat mengetahui besarnya tekanan uap yang ada dalam boiler.
- d. Gelas penduga
Alat ini berfungsi untuk melihat level pada drum ketel. Peralatan ini sangat penting dan harus beroperasi dengan baik. Peralatan ini harus rutin diperiksa selama ketel uap beroperasi.
- e. 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.
- f. *Dearator*
Dearator letaknya berada diluar ketel uap. *Dearator* atau pemanas awal berfungsi untuk menghilangkan gas – gas terlarut dalam air umpan ketel uap terutama oksigen.
- g. 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 boiler guna pengamanan.

1.1.5 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 atau *superheated steam* (Nizya Mukti Pratama dkk, 2021; Muhammad Shofiudin dan Dony Hidayat Al-Janani, 2018; Jhonas Purba, 2016).

2. METODE PENELITIAN

2.1 Performansi Luas Permukaan Perpindahan Panas

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 density atau berat jenis (Yolanda Jacqueline Lewerissa, 2018; Cristian Tallu Karaeng, 2013).

2.1.1 Luas bidang permukaan

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 A_4 menjadi 2 kali, $A_4 = 2 \times 0,0638048 \text{ m}^2 = 0,1276096 \text{ m}^2$. Untuk menghitung luas bidang permukaan dapat dihitung dengan persamaan 1 (Desi Aratri Damanik, 2022; Desi Rismawati, 2021; Ochtafian Wahyu Irawan, 2021):

$$A = \pi \times d \times L \quad (1)$$

2.1.2 Efisiensi ketel uap

Performansi 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 2 berikut (Desi Aratri Damanik, 2022; Desi Rismawati, 2021; Ochtafian Wahyu Irawan, 2021):

$$\eta_B = \frac{Q_{eva}}{Q_{bb}} = \frac{\dot{m}_u(h_u - h_a)}{\dot{m}_{bb} \cdot HVV} \times 100\% \quad (2)$$

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

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

\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)
\dot{m}_{bb}	= Konsumsi bahan bakar (kg/dtk)
HHV	= nilai pembakaran LPG (kJ/kg)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Ketel Uap Mini

Modifikasi ketel pipa air mini dilakukan dengan penambahan 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 memiliki kandungan energi = 11254,61 kkal/kg ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1: Data ketel uap mini

Deskripsi	Spesifikasi
Peralatan	: Ketel Pipa Air Mini
Kapasitas uap	: 25 kg/jam
Tekanan uap	: 4 Bar (abs) (<i>steady-state</i>)
Bahan bakar	: LPG
Nilai Kalor LPG	: 11254,61 kkal/kg (47111,8 kJ/kg)
Kondisi suplai air	: 28°C (Normal)
Efisiensi ketel uap	: 70% (dirancang dan dikalkulasi)

3.2 Kebutuhan Bahan Bakar

Tekanan uap yang diproduksi *steam boiler mini* ketel pipa air adalah tekanan absolut, $p = 4$ bar abs ($p = 3$ barg). Oleh karena itu dari tabel uap (tabel uap terlampir) diperoleh besaran 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 ketel ada temperatur normal pada 28°C, maka diperoleh entalpi spesifiknya $h_a = h_f = 117,3$ kJ/kg. Kapasitas uap yang dihasilkan ketel uap menggunakan persamaan adalah (Desi Aratri Damanik, 2022; Desi Rismawati, 2021; Ochtafian Wahyu Irawan, 2021):

$$\dot{Q}_{uap} = \frac{25 \text{ kg}}{3600 \text{ detik}} \quad (3)$$

Maka kebutuhan bahan bakar dapat dihitung dengan rumus:

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

3.3 Bahan Bakar Boiler

Bahan bakar yang digunakan untuk ketel pipa air *mini* adalah memakai bahan bakar LPG atau gas alam yang dicairkan. LPG ini menjadi bahan bakar untuk keperluan sehari-hari setiap rumah dalam masyarakat dengan harga terjangkau. Bahan bakar LPG mengandung sedikitnya 90% *propana*, dengan campuran sejumlah kecil *propana*, *butana* dan *butena* (Standard HDS) dengan karakteristik pada tabel 2.

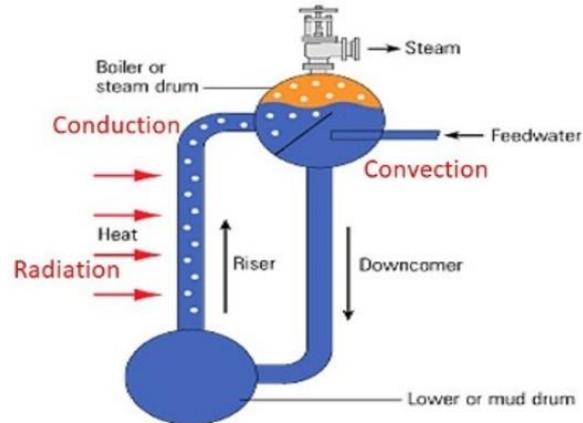
Tabel 2: Karakteristik Bahan Bakar Ketel Uap

Parameter	Nilai
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

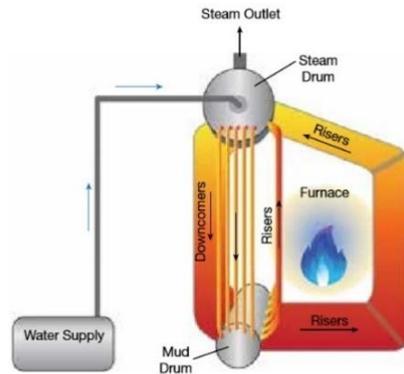
Komposisi bahan bakar LPG yang diproduksi dan dipasarkan oleh PT. Pertamina ke masyarakat adalah 50% *Propana* (C_3H_8) dan 50% *Butana* (C_4H_{10}) secara massa. Jadi untuk jumlah bahan bakar LPG sebesar 1,98395 kg/jam, maka jumlah masing-masing komposisi LPG adalah *propana* (C_3H_8) = $0,50 \times 1,98395 \text{ kg} = 0,991975 \text{ kg}$ dan *butana* (C_4H_{10}) = $0,50 \times 1,98395 \text{ kg} = 0,991975 \text{ kg}$. 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% dan selanjutnya bisa dihitung dengan membuat reaksi pembakaran.

3.4 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 density atau berat jenis, yang disebut sirkulasi alam. Skematis dasar ketel pipa air dapat dilihat pada gambar 3 dan gambar skematis aliran fluida kerja dan perpindahan panas dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 3: Diagram dasar ketel pipa air



Gambar 4: Aliran fluida kerja dan perpindahan panas

Drum ini dirancang dengan ketel pipa air mini kapasitas 20 kg/jam yaitu panjang drum = 0,5 m dan diameter drum = 0,254 m. 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 *stainless steel*, dengan *allowable working stress* 8000 psi pada temperatur 650°F dan dibawahnya. Gambar 5 ketel pipa air dapat dilihat pada gambar 5 berikut.



Gambar 5: Ketel pipa air

Untuk perancangan drum atas uap ketel uap pipa air 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 terdapat pada tabel 3.

Tabel 3: Data perancangan modifikasi ketel uap mini

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

$$\begin{aligned} AI &= \frac{1}{2} A_1 + \frac{1}{2} A_2 + \frac{1}{2} A_3 + \frac{1}{2} A_4 \\ &= \frac{1}{2} (0,39878) + \frac{1}{2} (0,119634) + \frac{1}{2} (0,1116584) + \frac{1}{2} (0,1276096) \\ &= 0,378841 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

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 menggunakan persamaan 4 sebagai berikut:

$$AII = \frac{1}{2} A_1 + \frac{1}{2} A_2 + \frac{1}{2} A_3 + \frac{1}{2} A_4 + A_5 + A_6 \quad (4)$$

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

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

Total Luas bidang permukaan perpindahan panas adalah

$$A = AI + AII = 0,79835756 \text{ m}^2. \text{ Volume aktual drum atas adalah 25,3 liter dan total volume aktual internal ketel uap adalah } 0,02799 \text{ m}^3 (= 28 \text{ Liter})$$

3.5 Pembahasan

3.5.1 Temperatur Pembakaran

Untuk menentukan temperatur pembakaran dalam dapur atau ruang bakar, maka dapat diperoleh melalui persamaan kesetimbangan energi. Jika proses pembakaran berlangsung pada kondisi-kondisi standard, maka energi panas yang dilepaskan dapat diperoleh secara langsung dari panas pembakaran standard itu sendiri. Besarnya temperatur nyala api ini diperlukan untuk perancangan ruang bakar atau dapur boiler dan bagian-bagian lainnya dengan cara perpindahan panas dari pembakarannya tersebut. Temperatur pembakaran teoritis dapat diperoleh dari persamaan kesetimbangan energi dalam dapur nyala api. Persamaan 5 yaitu kesetimbangan energi sebagai berikut (Darwin Sitompul, 1996):

$$\sum_j n_j (Q'_0)_j = \sum_i \frac{m_i}{MW_i} (\bar{C}_p)_{m,i} (T_{\text{exit}} - T_0) - \frac{m_a}{MW_a} (\bar{C}_p)_{m,a} (T_a - T_0) \quad (5)$$

Q'_0 = Panas pembakaran masing-masing komponen bahan bakar per kg (kJ)

$(\bar{C}_p)_{m,i}$ = Panas spesifik molal rata-rata produk i antara T_0 dan T_{keluar} (kJ/kmol.°C)

$(\bar{C}_p)_{m,a}$ = Panas spesifik molal rata-rata udara antara T_{udara} dan T_0 (kJ/kmol.°C)

m_a = Massa udara yang ditambahkan dengan m_f kilogram bahan bakar

m_i = Massa komponen i yang ada dalam produk gas per m_f kilogram bahan bakar (kg)

MW_a, MW_i = Berat molekular dari bahan bakar, udara dan komponen i berturut-turut (kmol)

Harga panas spesifik molal rata-rata (tabel 4) untuk berbagai gas umum yang terkandung dalam produk pembakaran (relatif ke-0°C)

Tabel 4: Panas spesifik mol rata-rata

Komponen Gas	b (\bar{C}_p) m
H ₂ O	(\bar{C}_p) = 8.361 + 4.92 × 10 ⁻⁴ T' + 4.46 × 10 ⁻⁷ (T') ² m.i
CO ₂ , SO ₂ , dan gas-gas triatomik lain	(\bar{C}_p) = 9.082 + 2.4 × 10 ⁻³ T' - 2.77 × 10 ⁻⁷ (T') ² m.i
N ₂ , O ₂ , CO dan gas-gas diatomik lain	(\bar{C}_p) = 6.935 + 3.38 × 10 ⁻⁴ T' + 0.43 × 10 ⁻⁷ (T') ² m.i

Konstanta tersebut diperoleh dengan mengintegrasikan persamaan untuk panas spesifik (*Bureau of Mines Technical Paper 445. 1929*). Integral harga panas spesifik rata-rata untuk komponen *i* tersebut dalam *range* temperatur (T' - T₀) pada persamaan 6 dan persamaan 7 (Darwin Sitompul, 1996):

$$\bar{C}_{Pi} = \frac{\int_{T_0}^{T'} C_{Pi} dT}{T' - T_0} \quad (6)$$

(\bar{C}_p)_{m.i} = rata-rata kapasitas panas molal dari 0 hingga T'°C (cal/g mol . °C).

T_a = T₀ disederhanakan menjadi persamaan 7

$$\sum_j n_j (Q'_0)_j = \sum_i \frac{m_i}{MW_i} (\bar{C}_p)_{m.i} (T_{exit} - T_0) \quad (7)$$

3.5.2 Variabel Tetap Tekanan dan Performansi

Pengujian pengoperasian ketel uap mini untuk tekanan dijaga konstan dan pencatatan dilaksanakan setiap 20 menit dan 10 menit kemudian setiap satu jam dicatat jumlah pemakaian/konsumsi bahan bakar LPG dan jumlah kondensat yang dikumpulkan. Pengujian diteruskan selama 5 hari berturut-turut atau sebanyak 5 kali yang semuanya ditunjukkan pada tabel 5.

Tabel 5: Peformansi pengujian ketel uap mini

Waktu	Temp. Air (oC)	Tekanan (Barg)		Konsumsi LPG (kg)	Jumlah Kondensat (kg)	Temp Gas Buang (°C)
		Gauge	Absolut			
14:00	27	3,26	4,26	28,5	0	256
14:20	28	3,00	4,00	26,44	24,2	254
14:40	28	2,96	3,96	24,80	24,2	248
14:50	28	2,98	3,98	24,22	25,6	250
15:00	28	3,05	4,05	26,44	24,2	250
Rata-rata	28	3,05	4,05	4,05	2,06	251,6

3.5.3 Perhitungan Efisiensi Ketel pipa Air Mini

Pengujian ketel uap mini sebelum dimodifikasi ditunjukkan pada tabel 6.

Tabel 6: Efisiensi sebelum modifikasi ketel uap mini

Waktu	Temp. air (°C)	Tekanan Uap (Barg)	Konsumsi LPG (kg)	Jumlah Kondensat (kg)	Temp Gas Buang (°C)	Efisiensi (%)
14:00	28	2,96	1,20	14,0	252	64,9
14:20	28	3,00	1,25	14,8	253,6	65,96
14:40	28	3,00	1,30	14,2	255,5	60,86
14:50	28	3,00	1,15	14,6	239,6	70,73
15:00	28	3,03	1,20	13,8	259	64,07
Rata-rata	28	3,01	1,22	14,3	251,9	65,3

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

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

Pemakaian LPG $\dot{m}_{bb} = 1,22$ kg/jam

Efisiensi, $\eta_{Boiler} = 65,3\%$

Pengujian ketel uap mini sebelum dimodifikasi ditunjukkan pada tabel 7 berikut

Tabel 7: Efisiensi setelah modifikasi ketel uap mini

Tanggal	Temp. air (°C)	Tekanan Uap (Barg)	Konsumsi LPG (kg)	Jumlah Kondensat (kg)	Temperatur Gas Buang (°C)	Efisiensi (%)
15 Juni 2022	28	3,05	2,06	24,2	252	65,16
16 Juni 2022	28	3,00	2,20	24,8	243	62,53
17 Juni 2022	28	2,98	1,98	25,6	255	71,72
18 Juni 2022	28	3,00	1,96	26,4	239	74,71
18 Juni 2022	28	2,97	1,96	24,6	252	69,62
Rata-rata:	28	3,00	2,032	25,12	248,2	68,81%

Tekanan uap $p = 3 \text{ barg} = 4 \text{ bar abs}$ (*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 8 sebagai berikut

$$\eta_{\text{Boiler}} = \frac{\dot{m}_u (h_u - h_a)}{\dot{m}_{bb} \cdot \text{HHV}} \quad (8)$$

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

$$\eta_{\text{boiler}} 68,81\%$$

Modifikasi *steam boiler* atau ketel 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%.

4. KESIMPULAN

Penambahan luas bidang pemanas *boiler* maka jumlah bahan bakar yang dibutuhkan ketel uap pipa air mini selama pengoperasian 1 jam adalah 2,032 kg dengan hasil kondensat 25,12 kg pada suhu gas buang rata - rata sebesar 248,2°C dan tekanan rata – rata 3 barg. Maka diperoleh efisiensi sebesar 68,81% meningkat dari rancangan terdahulu dimana efisiensi hanya 65,3% dengan kondensat 14,3 kg/jam. Panas pembakaran bahan bakar sangat mempengaruhi efisiensi dikarenakan campuran udara dan bahan bakar yang mempengaruhi efisiensi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan rasa syukur karena berkat dan rahmat Yang Maha Kuasa penulis dapat menyelesaikan artikel ini, serta terima kasih kepada Program Studi Teknik Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin yang memberikan dukungan dalam menyelesaikan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustira, R., Razi, M., & Syukran. (2017). Rancang Bangun Boiler Vertikal Fire Tube Berbahan Gas Elpiji Untuk Proses Penyulingan Minyak Nilam. *Jurnal Mesin Sains Terapan 1*, 57-60.
- Damanik, D.A., Simanjuntak, J.K., Sinaga, H.H, Simangunsong, K.A., Silitonga, L.C., Nainggolan R., Husin Ibrahim, H., & Alfansuri, M. Purwarupa Miniatur *Water Tube Boiler* Menggunakan Bahan Bakar Gas Kapasitas Uap 20 kg/jam. *Sinerji Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin 3*, 35-42.
- Djokosetyardjo M. J.1990. *Pembahasan Lebih Lanjut Tentang Ketel Uap*. Jakarta. CV Pradnya Paramita.
- Djokosetyardjo, M.J, 2016, *Ketel Uap*. Jakarta. CV Pelita Kasih.
- Effendy, D.A., Sunyoto & Masugino. (2013). Rancang Bangun Boiler Pada Industri Tahu Untuk Proses Pemanasan Sistem Uap Dengan Menggunakan Catia V5. *Journal of Mechanical Engineering Learning 2*, 1-7.
- El-Wakil, M.M. (1992). *Instalasi Pembangkit Daya Jilid 1*. Jakarta. Erlangga
- Karaeng, C.T., Iswandi, I, Firman, F., & Nuzulm M. (2013). Analisis Kinerja Boiler Pada PLTU Unit 1 PT. Semen Tonasa. *Jurnal Teknik Mesin Sinerji 11*, 74-85.
- Lewerissa, Y.J. (2018). 1-Analisis Energi Pada Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan *Cycle Tempo*. *Jurnal Voering 3*, 1-8.
- Muin A. Syamsir, M.A. (1993). *Pesawat Konversi Energi 2*. Jakarta. CV Rajawali.
- Pratama, N.M., Danial, D., & Taufiqurrahman, M. (2021). Analisa Efisiensi *Water Tube Boiler* dengan Menggunakan Metode Langsung. *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin 2*, 105-1010.

- Purba, J. (2016). Perancangan Boiler Pipa Api Untuk Perebusan Bubur Kedelai pada Industri Tahu Kapasitas Uap Jenuh 160 Kg/jam. *Jurnal Mahasiswa Teknik UPP 1*, 1-8.
- Shofiudin, M, & Al-Janani, D.H. (2018). Perancangan dan Validasi Horizontal *Water Tube Boiler* Industri Kecil Tahu Menggunakan *Software Solidworks*. *Saintekno: Jurnal Sains dan Teknologi 16*, 189-210.
- Sitompul, D. 1996. *Prinsip-Prinsip Konversi Energi*. CV Erlangga. Jakarta.
- Rismawati, D., Ibrahim, H., Sutrisno, J., & Bahri, N. (2021). Analisis Sistem Distribusi Uap dari *Water Tube Boiler* Dengan Kapasitas 45 Ton/Jam. *Sinerji Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin 2*, 37-44.
- Wahyu Irawan, O.W., Pratama, L.S., & Insani, C. (2021). Analisis Termodinamika Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Uap Kapasitas 1500 kW. *Jurnal Teknik Mesin ITI 5*, 109-118.