

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Boiler merupakan perangkat penting dalam sistem pembangkitan uap yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap melalui proses pemanasan. Uap yang dihasilkan digunakan dalam berbagai aplikasi industri, seperti pembangkit listrik, proses manufaktur, dan sistem pemanas. Efisiensi boiler sangat bergantung pada berbagai parameter operasional, di antaranya tekanan kerja dan laju aliran panas yang diberikan ke dalam sistem. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan antara tekanan, laju aliran panas, temperatur, dan energi panas yang dihasilkan menjadi krusial dalam mengoptimalkan kinerja boiler.

Tekanan dalam boiler berperan penting dalam menentukan sifat termodinamika uap yang dihasilkan. Berdasarkan prinsip termodinamika, peningkatan tekanan akan meningkatkan titik didih air, yang pada akhirnya mempengaruhi temperatur uap yang dihasilkan. Selain itu, laju aliran panas menentukan seberapa cepat energi panas ditransfer ke air di dalam boiler, yang memengaruhi efisiensi perpindahan panas serta total energi yang tersimpan dalam uap. Kombinasi dari kedua faktor ini dapat mempengaruhi efisiensi boiler serta konsumsi bahan bakar yang digunakan.

Sumber energi panas yang digunakan dalam boiler berperan besar dalam menentukan performa sistem pemanas. Dalam hal ini, penggunaan bahan bakar gas LPG (*Liquefied Petroleum Gas*) sebagai sumber energi untuk boiler menawarkan sejumlah keuntungan. LPG memiliki kandungan energi yang tinggi dan proses

pembakarannya lebih bersih dibandingkan dengan bahan bakar fosil lainnya, seperti batu bara atau minyak. Selain itu, gas LPG memiliki sifat pembakaran yang lebih efisien dan stabil, sehingga dapat mempengaruhi laju aliran panas yang lebih terkontrol dan mengurangi resiko pemborosan energi. Penggunaan LPG juga dapat menghasilkan emisi yang lebih rendah, menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan.

Dalam praktiknya, pengoperasian boiler sering menghadapi tantangan dalam mengontrol tekanan dan laju aliran panas agar tetap berada dalam kondisi optimal. Jika tekanan terlalu tinggi, risiko beban termal yang berlebihan dapat meningkat, sementara tekanan yang terlalu rendah dapat menyebabkan uap yang dihasilkan memiliki entalpi yang lebih rendah. Di sisi lain, laju aliran panas yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kehilangan energi yang tidak efisien, sementara aliran panas yang terlalu rendah dapat memperlambat proses pembangkitan uap. Oleh karena itu, analisis mengenai pengaruh tekanan dan laju aliran panas terhadap temperatur dan energi panas yang dihasilkan sangat penting untuk dapat mengoptimalkan konsumsi energi.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara tekanan dan laju aliran panas terhadap temperatur serta energi panas yang dihasilkan pada boiler dengan kapasitas 12 kg sebagai penghasil uap. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih baik dalam pengoperasian boiler agar lebih efisien serta mendukung penghematan energi dalam aplikasi industri.

1.2. Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus dan terarah, maka perlu ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya akan menganalisis pengaruh variasi tekanan dan laju aliran panas terhadap temperatur dan energi panas yang dihasilkan pada boiler 12 kg.
2. Boiler yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis boiler yang dibuat dengan menggunakan tabung gas LPG 12 kg untuk menghasilkan uap dalam skala kecil hingga menengah.
3. Variabel yang dianalisis adalah tekanan dalam sistem boiler dan laju aliran panas, sementara variabel lain seperti jenis bahan bakar dan efisiensi boiler tidak akan dibahas dalam penelitian ini.
4. Data yang digunakan dalam penelitian ini diambil melalui eksperimen dan pengukuran langsung dalam kondisi operasi yang realistis sesuai dengan kapasitas boiler yang diteliti.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan batasan masalah yang telah dijelaskan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi tekanan terhadap temperatur yang dihasilkan pada boiler 12 kg sebagai penghasil uap?
2. Bagaimana pengaruh variasi tekanan absolut terhadap temperatur absolut yang dihasilkan pada boiler 12 kg?

3. Bagaimana pengaruh variasi laju aliran panas terhadap energi panas yang dihasilkan pada boiler 12 kg?

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh variasi tekanan terhadap temperatur yang dihasilkan pada boiler 12 kg. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana perubahan tekanan dalam sistem boiler dapat memengaruhi suhu uap yang dihasilkan.
2. Menganalisis pengaruh variasi tekanan absolut terhadap temperatur absolut yang dihasilkan pada boiler 12 kg. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana hubungan antara variasi tekanan absolut dengan temperatur absolut yang dihasilkan dalam sistem boiler.
3. Menganalisis pengaruh variasi laju aliran panas terhadap energi panas yang dihasilkan pada boiler 12 kg. Penelitian ini juga bertujuan untuk mempelajari bagaimana laju aliran panas memengaruhi jumlah energi panas yang diserap dan digunakan untuk menghasilkan uap.

1.5. Manfaat Penelitian

Sebagai peran nyata dalam perkembangan pada dunia industri khususnya pada *boiler*, maka penulis berharap dapat mengambil manfaat pada penelitian ini. Adapun manfaat dari penelitian ini ialah sebagai berikut :

1. Untuk memberikan pemahaman yang lebih baik terhadap pengaruh dari variasi tekanan dan laju aliran panas terhadap temperatur dan energi panas yang dihasilkan.
2. Untuk memberikan pengetahuan mengenai cara kerja boiler, alat beserta bahan yang diperlukan untuk proses pembuatannya pada penelitian ini
3. Sebagai referensi bagi mahasiswa yang menjalankan tugas yang berkaitan dengan *boiler*.
4. Sebagai bahan pertimbangan untuk pengembangan lebih lanjut pada penelitian *boiler* selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian *Boiler*

Menurut Sugiharto Agus (2016), *Boiler* adalah “suatu alat berbentuk bejana tertutup yang terbuat dari baja dan digunakan untuk menghasilkan uap (*steam*). *Steam* diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar. Pada umumnya *Boiler* memakai bahan bakar cair (residu, solar), padat (batubara), atau gas. Air di dalam *Boiler* dipanaskan oleh panas dari hasil pembakaran bahan bakar (sumber panas lainnya) sehingga terjadi perpindahan panas dari sumber panas tersebut ke air yang mengakibatkan air tersebut menjadi panas atau berubah wujud menjadi uap [8].

Pengertian *boiler* menurut Sutikno, D. (2011) dalam Pravitasari Yolanda. (2017) adalah sebuah alat untuk menghasilkan uap, yang terdiri dari dua bagian penting yaitu dapur pemanasan untuk menghasilkan panas yang didapat dari pembakaran bahan bakar dan *boiler proper* untuk mengubah air menjadi uap [10].

Pengertian lain menurut Nasution, M. (2022) menyatakan bahwa *boiler* merupakan bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai berbentuk uap panas atau *steam* berupa energi kerja [6].

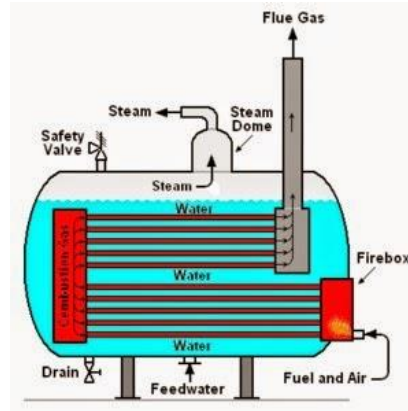
Dari pernyataan tersebut, dapat kita simpulkan bahwa pengertian *boiler* adalah sebuah alat yang berbentuk bejana yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap, dengan cara dipanaskan dengan menggunakan bahan bakar.

2.2. Jenis-jenis *Boiler*

Boiler telah berkembang seiring dengan kemajuan pada bidang teknologi di dunia industri. Jenis-jenis *boiler* dikembangkan secara terus-menerus untuk dapat menghasilkan uap yang lebih banyak, dan untuk mengurangi emisi gas buang *boiler* yang menjadi masalah dalam pencemaran lingkungan. Beberapa jenis pada *boiler*, diantaranya :

2.2.1. *Fire Tube Boiler*

Fire tube Boiler atau yang dikenal dengan sebutan *Boiler* Tabung Api, adalah salah satu jenis ketel uap atau *boiler* yang proses pembakarannya berlangsung di dalam pipa. *Boiler* ini akan menghasilkan uap dengan kapasitas dan tekanan lebih rendah. *Fire tube boiler* juga disebut sebagai *boiler Shell*. Sebab, semua permukaan didalamnya berkontribusi terhadap perpindahan panas secara tertutup di dalam shell yang terbuat dari baja [3]. Pada *fire tube boiler*, gas buang panas yang keluar akibat reaksi pembakaran dilewatkan melalui tabung *boiler*-nya. Tabung ini dikelilingi oleh air yang perlu dipanaskan. Kemudian, panas yang dihasilkan akan dikirimkan ke air yang dihasilkan oleh gas panas waktu proses pembakaran. Dalam *boiler fire tube* ini, gas pembakarannya melewati tabung *boiler* dalam dan nantinya panas akan dikirimkan ke air di sisi *shell*. Jenis *boiler* ini mempunyai laju uap untuk mengalirkan gas panas dari tungku pembakaran melalui air di sekitarnya dan nantinya akan dihasilkan uap. Biasanya, tabungnya tercetak di dalam tangki air besar. Kemudian gas panas dari tungku pembakaran melewati tabung tersebut untuk memanaskan air di sekitarnya.



Gambar 2.1 Fire Tube Boiler

Fungsi utama fire tube boiler adalah menghasilkan uap untuk berbagai kebutuhan, serta memanaskan air untuk keperluan industri. Boiler ini juga berfungsi mengatur suhu air atau uap sesuai kebutuhan, penting untuk menjaga konsistensi dan kualitas proses industri.

Komponen-komponen utama pada *fire tube boiler* meliputi :

1. Tungku Pembakaran (*Furnance*)

Tungku pembakaran / *furnance* adalah tempat dimana proses pembakaran terjadi, tungku ini berfungsi untuk melakukan proses pembakaran untuk dapat menghasilkan panas. Pada tungku ini, bahan bakar akan dibakar sehingga menghasilkan sumber energi panas yang bertujuan untuk memanaskan air.

2. Tabung Api (*Fire Tube*)

Tabung api adalah pipa-pipa yang terletak di dalam tangki air besar. Tabung ini memiliki fungsi penting, yaitu sebagai jalur untuk mengirimkan energi panas yang berasal dari hasil proses pembakaran. Sehingga, energi panas akan dialirkan dengan menggunakan pipa-pipa pada tabung api.

3. Tangki Air (*Water Tank*)

Tangki air memiliki fungsi utama untuk menyimpan air. Air yang akan digunakan selanjutnya disimpan pada tangki ini, selanjutnya air ini akan dipanaskan oleh energi panas yang berasal dari tungku pembakaran yang dialirkan dengan menggunakan pipa-pipa tabung api, dimana pada akhirnya air tersebut akan berubah menjadi uap.

4. Kepala Pipa Uap (*Steam Drum*)

Kepala pipa uap adalah sebuah komponen yang berfungsi untuk mengumpulkan uap terlebih dahulu sebelum dialirkan menuju proses pengaplikasian atau penggunaan dalam industri.

5. Cerobong Asap (*Chimney*)

Cerobong asap atau *chimney* adalah sebuah komponen untuk membuang gas hasil pembakaran dan asap. Dengan menggunakan cerobong asap, emisi gas buang hasil pembakaran akan dibuang dengan lebih terarah dan lebih teratur.

6. *Valve* dan Kontrol

Fire tube boiler dilengkapi dengan safety valve dan kontrol yang bertujuan untuk mengatur aliran bahan bakar, udara pembakaran, tekanan dan suhu pada tangki air sehingga meningkatkan faktor keselamatan dan keamanan pada *fire tube boiler*.

Prinsip kerja *fire tube boiler* adalah gas panas mengalir melalui tabung yang terendam dalam air, mentransfer panas ke air untuk menghasilkan uap. Proses dimulai dengan pembakaran bahan bakar di tungku untuk menghasilkan energi panas. Panas tersebut mengalir melalui pipa tabung api, memanaskan air hingga menjadi uap. Uap ini kemudian dikumpulkan di atas boiler untuk digunakan dalam

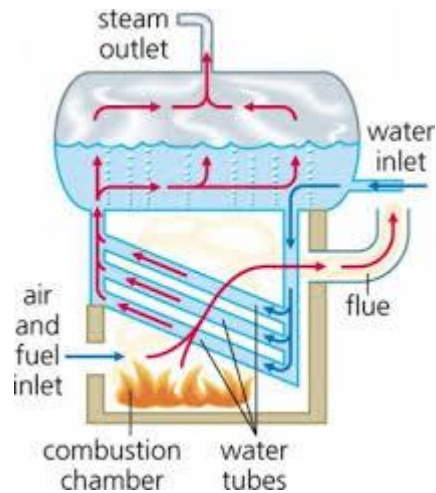
industri. Asap dan gas hasil pembakaran dibuang melalui cerobong untuk mencegah akumulasi gas berbahaya dan menjaga kualitas udara, serta menjaga efisiensi dan memperpanjang umur *boiler*.

2.2.2. Water Tube Boiler

Water tube boiler merupakan salah satu jenis *boiler* pipa air yang dimana proses pembakarannya dilakukan diluar pipa air tersebut. Jenis *boiler* ini lebih cocok untuk aplikasi dengan tekanan uap yang tinggi serta membutuhkan kapasitas yang besar, seperti pembangkit listrik tenaga uap dan industri kimia. Struktur utama *boiler* jenis ini ialah terdiri dari serangkaian pipa-pipa yang membawa air dan dikelilingi oleh energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar yang ada di dalam tungku. *Water tube boiler* biasanya lebih besar dan dapat menangani tekanan dan suhu yang lebih tinggi daripada *fire tube boiler*. *Boiler* ini juga memiliki efisiensi panas atau *thermal* yang lebih tinggi, yang berarti *boiler* ini dapat mengubah lebih banyak bahan bakar menjadi energi yang lebih berguna. Pada umumnya, *boiler* jenis ini digunakan dengan tekanan uap yang tinggi, yakni sekitar 3.000 psi atau lebih tinggi. Selain itu, *water tube boiler* juga dapat digunakan untuk menghasilkan uap jenuh atau uap yang sangat panas (*superheated*). Karakteristik dari jenis ini juga hampir sama dengan *fire tube boiler*, akan tetapi perbedaannya ialah pada *water tube boiler* dapat menghasilkan kapasitas dan tekanan uap / *steam* yang tinggi. Kapasitas uap atau *steam* yang dihasilkan pada *boiler* jenis ini berkisar antara 4.500 sampai dengan 12.000 Kg/Jam dengan tekanan yang sangat tinggi [2].

Proses kerja *boiler* dimulai dengan pembakaran bahan bakar di tungku. Gas panas hasil pembakaran dialirkan melalui tabung yang berisi air. Panas dari gas ini menguapkan air menjadi uap. Uap yang terbentuk kemudian terpisah dari air dan

dialirkan keluar. Air yang telah kehilangan sebagian uapnya akan kembali ke tungku untuk dipanaskan kembali, menciptakan siklus yang berulang.



Gambar 2.2 Water Tube Boiler

Komponen-komponen utama pada *water tube boiler* meliputi

1. Tungku (*Furnance*)

Tungku / *furnance* adalah tempat dimana bahan bakar akan dibakar untuk dapat menghasilkan energi panas atau *thermal*. Energi panas ini selanjutnya akan dipindahkan ke air yang ada di dalam tabung.

2. Pipa Air (*Water Tubes*)

Pipa air adalah saluran tempat air mengalir. Air dipanaskan oleh gas panas yang mengalir di sekitar pipa.

3. Drum Uap (*Steam Drum*)

Drum uap adalah bejana besar di bagian atas *boiler* yang dimana tempat air dan uap dipisahkan. Uap dikeluarkan dari drum uap untuk selanjutnya digunakan pada berbagai kebutuhan industri.

4. 'Sistem Sirkulasi (*Circulation System*)

Sistem sirkulasi mempunyai fungsi untuk mengalirkan air melalui pipa-pipa. Sistem sirkulasi dapat berupa sirkulasi alami atau paksa. Dalam sirkulasi alami, air disirkulasikan oleh perbedaan massa jenis antara air panas dan air dingin. Dalam sirkulasi paksa, air disirkulasikan dengan menggunakan pompa.

5. Katup Pengaman (*Safety Valve*)

Katup pengaman adalah katup yang terbuka untuk melepaskan uap jika tekanannya terlalu tinggi. Ini mencegah terjadinya *boiler* meledak.

6. Indikator Level Air (*Water Level Indication*)

Indikator level air adalah perangkat yang menunjukkan level air di dalam *boiler*. Hal ini penting untuk memastikan bahwa *boiler* tidak kehabisan air.

2.3. Proses Pembakaran *Boiler*

Pembakaran adalah proses yang melibatkan reaksi kimia antara material yang dapat terbakar (bahan bakar) dengan oksigen yang terdapat di udara. Proses pembakaran melibatkan bahan bakar, oksigen dan sumber penyalaan (*ignition*). Nyala api dan energi panas merupakan ciri-ciri pada suatu proses pembakaran, namun tidak selalu suatu proses pembakaran menghasilkan nyala api sebagai contoh suatu proses pembakaran energi yang terdapat pada makanan yang telah diolah di dalam tubuh manusia. Api merupakan fenomena dalam fase gas, sehingga pembakaran dengan nyala api pada bahan bakar padat dan cair, harus didahului dengan proses perubahan fase bahan bakar tersebut menjadi fase gas. Untuk bahan bakar cair, proses ini umumnya berupa penguapan sederhana dari hasil pendidihan pada permukaan, tetapi untuk hampir semua padatan, dekomposisi kimia atau pirolisis dibutuhkan agar menghasilkan produk dengan berat molekular rendah

yang dapat melayang dari permukaan, memasuki api. Pada dasarnya, dekomposisi thermal atau pirolisis dari bahan bakar padatan hanya akan terjadi pada tingkat temperatur tertentu pada permukaan padatan itu sendiri.

Selanjutnya, gas dan uap hasil dekomposisi thermal tersebut akan bercampur dengan oksigen atau udara sebagai *oxidizer* untuk membentuk campuran yang dapat terbakar. Udara merupakan *oxidizer* alami karena terdapat 21% kadar oksigen pada udara. Aliran atau semburan dari gas hidrokarbon yang telah bercampur dengan udara dapat dipicu dengan *igniter* untuk membentuk api. Pada saat yang bersamaan dengan proses oksidasi campuran bahan bakar, terjadi emisi kalor. Karena pembakaran melepaskan sejumlah panas, maka proses ini digolongkan ke dalam reaksi eksotermik, dimana terjadi perpindahan energi panas dari sistem ke lingkungan.

Pada proses pembakaran *boiler*, terdapat 3 unsur utama yaitu :

1. Oksigen

Oksigen merupakan unsur yang ada pada udara dan diperlukan untuk reaksi pembakaran, yang dimana dibutuhkan setidaknya sekitar 15% volume oksigen pada udara agar terjadi pembakaran. Udara normal pada atmosfer berkisar 21% volume oksigen.

2. Bahan bakar

Bahan bakar adalah material yang dapat terbakar. Bahan bakar dapat berasal dari benda padat, cair maupun gas. Terdapat beberapa bahan bakar yang memiliki cukup banyak kadar oksigen yang dapat mendukung proses terjadinya pembakaran.

Bahan bakar terbagi menjadi tiga wujud, yaitu :

1). Bahan Bakar Padat

Bahan bakar padat adalah segala jenis material yang memiliki bentuk padat dan dapat dibakar untuk menghasilkan energi. Beberapa bahan bakar padat yang umum dijumpai ialah kayu bakar, arang, batok kelapa, batubara, dan lain sebagainya.

2). Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair adalah material yang memiliki wujud cair dan dapat dibakar untuk menghasilkan energi. Beberapa bahan bakar cair yang umum dijumpai adalah bensin, solar, minyak tanah, biodiesel, dan avtur.

3). Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas adalah segala jenis material yang dapat dibakar untuk menghasilkan energi dan memiliki bentuk berupa gas. Bahan bakar gas biasanya termasuk golongan bahan bakar fosil. Beberapa jenis bahan bakar gas ialah gas alam yang berasal dari fosil, dan biogas yang merupakan sumber energi terbarukan.

3. Panas

Panas merupakan sebuah energi yang diperlukan untuk dapat memulai reaksi kimia pembakaran. Sumber panas dapat berasal dari panas matahari, percikan api, reaksi kimia eksotermis, nyala terbuka, dan gesekan. (Gambar 2.4 Segitiga Pembakaran dapat dilihat pada halaman selanjutnya).



Gambar 2.3 Segitiga Pembakaran

Ketiga unsur pembakaran ini disebut sebagai segitiga api. Ketika ketiga unsur ini bereaksi, maka akan terjadi pembakaran yang menghasilkan energi panas. Akan tetapi, apabila salah satu unsur tersebut habis atau hilang, maka api akan padam dan proses pembakaran akan terhenti.

2.4. Unsur Pembakaran Pada *Boiler*

Terdapat beberapa unsur yang mempengaruhi pembakaran pada *boiler*, diantaranya ialah sebagai berikut :

2.4.1. Neraca Panas

Neraca panas adalah perhitungan yang menyatakan seberapa banyak energi panas yang masuk dan energi panas yang keluar suatu sistem pada satuan waktu tertentu. Perhitungan neraca panas didasarkan pada penerapan hukum kekekalan energi. Pada *boiler*, perhitungan neraca panas digunakan untuk mengetahui jumlah energi panas yang masuk dan energi panas yang keluar. Sehingga dapat diketahui seberapa besar efisiensi pada *boiler* tersebut saat sedang dioperasikan.

2.4.2. Nilai Kalor Pembakaran

Jumlah energi yang dilepaskan pada proses pembakaran dinyatakan sebagai enthalpi pembakaran yang merupakan beda enthalpi produk dan reaktan dari proses

pembakaran sempurna [6]. Enthalpi pembakaran ini dapat dinyatakan sebagai *Higher Heating Value* (HHV) atau *Lower Heating Value* (LHV). HHV didapatkan ketika seluruh air hasil pembakaran dalam wujud cair, sedangkan LHV didapatkan ketika seluruh air hasil pembakaran dalam bentuk uap. Sebagian besar pembakaran tidak menggunakan oksigen murni melainkan memanfaatkan oksigen yang terdapat pada udara. Jumlah udara teoritis (Stoikiometrik) adalah jumlah udara minimum yang dibutuhkan untuk dapat menghasilkan pembakaran yang sempurna. Namun pada praktiknya, untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna jumlah udara yang diperlukan melebihi jumlah udara teoritis. Jumlah udara yang diberikan melebihi jumlah udara teoritis disebut sebagai *excess air* dan secara umum dinyatakan dalam persen. Parameter yang umum dipakai untuk mengukur proporsi udara dan bahan bakar dalam proses pembakaran tertentu adalah rasio udara-bahan bakar. Pembakaran sempurna dapat dicapai apabila jumlah udara lebih besar dari jumlah udara teoritis. Terdapat dua jenis nilai pembakaran, yaitu :

1. Higher Heating Value (HHV)

Higher Heating Value (HHV) atau yang umum disebut sebagai nilai kalor atas adalah jumlah panas maksimum yang dilepaskan oleh suatu bahan bakar ketika dibakar dengan sempurna dan semua produk pembakaran kembali ke suhu awal sehingga seluruh panas yang dihasilkan dapat diukur. HHV umumnya diukur dengan menggunakan alat yang disebut *bomb calorimeter*. Data suhu air pendingin sebelum dan sesudah reaksi pembakaran merupakan hasil dari pengujian dengan menggunakan *bomb calorimeter*.

2. Lower Heating Value (LHV)

Lower Heating Value (LHV) atau yang sering disebut sebagai nilai kalor bawah adalah jumlah panas yang dilepaskan oleh suatu bahan bakar tanpa panas laten yang dihasilkan dari pembakaran tetap dalam bentuk uap dan tidak mengembun. Bahan bakar cair biasanya terdapat sekitar 15% hidrogen, yang berarti pada setiap bahan bakar terdapat 0,15 bagiannya adalah hidrogen. Ketika bahan bakar terjadi pembakaran sempurna, jumlah air yang terbentuk sama dengan setengah dari jumlah hidrogen yang ada.

2.5. Parameter Pengujian *Boiler*

Berikut ini adalah parameter-parameter yang digunakan pada pengujian ini antara lain sebagai berikut :

1. Tekanan Absolut

Tekanan absolut adalah jumlah total tekanan yang bekerja pada suatu titik, termasuk tekanan atmosfer. Untuk dapat menghitung tekanan absolut, digunakan rumus sebagai berikut :

$$P_{abs} = P_{gauge} + P_{atm}$$

Keterangan :

P_{abs} : Tekanan absolut (kPa)

P_{gauge} : Tekanan gauge (kPa)

P_{atm} : Tekanan atmosfer (kPa)

2. Temperatur Absolut

Temperatur absolut adalah temperatur uap pada tekanan absolut. Untuk dapat mendapatkan nilai temperatur absolut, maka digunakan rumus sebagai berikut :

$$T_{abs} = T_{sat@P_{abs}}$$

Keterangan :

T_{abs} : Temperatur absolut (°C)

P_{abs} : Tekanan absolut (kPa)

3. Laju Aliran Panas

Laju aliran panas adalah ukuran seberapa cepat panas berpindah dari suatu benda ke benda yang lain. Untuk dapat mengetahui laju aliran panas menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\dot{Q}_{in} = \frac{m_{bb} \times \text{LHV}}{t}$$

Keterangan :

\dot{Q}_{in} : Laju aliran panas (kJ/kg)

m_{bb} : Jumlah pemakaian bahan bakar gas (kg)

LHV : Nilai kalor pembakaran bawah (kJ/kg)

t : Waktu pembakaran (s)

4. Energi Panas Yang Masuk

Energi panas yang masuk selama proses pembakaran dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Q_{in} = \dot{Q}_{in} \Delta t$$

Keterangan :

Q_{in} : Energi panas masuk (kJ)

\dot{Q}_{in} : Nilai kalor pembakaran (kJ)

Δt : Waktu saat katup uap dibuka (s)

2.6. Penelitian Yang Telah Dilaksanakan

Berikut ini adalah beberapa referensi terkait penelitian boiler skala menengah-kecil yang telah dilaksanakan, diantaranya sebagai berikut :

1. (Sihol Albert Sihaloho), (2023). “*ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA BOILER PIPA API SKALA MODEL TEKANAN UAP 7 Kg/Cm²*”

Pada penelitian tersebut bertujuan untuk menganalisis panas yang masuk ke boiler pipa api skala model. Penelitian ini membahas analisis perpindahan panas pada boiler pipa api skala model dengan tekanan uap 7,138 kg/cm² dan kapasitas 20 kg/jam, yang dirancang sebagai bagian dari sistem pembangkit listrik skala kecil. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui laju perpindahan panas, kalor masuk dari bahan bakar, serta kalor yang diperlukan untuk mengubah air menjadi uap. Boiler ini menggunakan bahan bakar kayu bakar, dan eksperimen dilakukan dengan pendekatan desain eksperimental pada boiler vertikal tipe pipa api. Perpindahan panas dianalisis melalui mekanisme konduksi, konveksi, dan radiasi, di mana hasil menunjukkan bahwa pada tekanan awal 1,02 kg/cm² laju perpindahan panas mencapai 157,40 watt, meningkat seiring kenaikan tekanan hingga mencapai 426,38 watt pada tekanan maksimum 7,138 kg/cm². Panas total yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar sebesar 107.830 watt, sedangkan kalor yang digunakan air untuk menjadi uap adalah 731,155 watt. Penelitian ini juga menggunakan

prinsip-prinsip perpindahan panas seperti hukum Fourier untuk konduksi dan hukum Newton untuk konveksi, serta mempertimbangkan tahanan termal dalam proses perpindahan kalor secara keseluruhan.

2. (Demetrius Hanopan Tambunan), (2023). “*UNJUK KERJA KAPASITAS KETEL UAP MINI MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR GAS*”

Penelitian yang dilakukan oleh Demetrius Hanopan Tambunan dkk. (2023) dalam jurnal *SINERGI Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* mengevaluasi unjuk kerja dan efisiensi termal dari ketel uap pipa air mini menggunakan bahan bakar gas LPG. Ketel ini memiliki kapasitas produksi uap sebesar 25 kg/jam dengan tekanan uap 4 bar (abs) dan luas permukaan perpindahan panas $\pm 0,798 \text{ m}^2$. Metode yang digunakan dalam analisis adalah metode efisiensi langsung, yaitu dengan membandingkan energi yang diserap oleh fluida kerja terhadap energi kimia bahan bakar. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kapasitas 25 kg/jam, ketel menghasilkan efisiensi termal sebesar 68,81% dengan konsumsi bahan bakar LPG sebesar 2,032 kg/jam, tekanan uap rata-rata 3 bar (gauge), temperatur air umpan 28°C , dan temperatur gas buang sebesar $248,2^\circ\text{C}$. Sebagai perbandingan, pada kapasitas 20 kg/jam, efisiensi termalnya adalah 65,3%. Penambahan jumlah pipa air dari 22 menjadi 30 pipa turut meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Selain itu, pembakaran bahan bakar LPG yang terdiri dari 50% propana dan 50% butana dianalisis secara stoikiometrik untuk memastikan pembakaran sempurna. Panas hilang akibat radiasi tercatat sebesar 2596,32 W, dengan efisiensi furnace yang ditetapkan sebesar 90%. Ketel uap ini dinilai cocok untuk industri kecil seperti laundry dan pengolahan makanan karena desainnya yang sederhana, efisiensi yang

cukup baik, serta kemudahan perawatan, namun tetap membutuhkan pemeliharaan berkala agar performanya tetap optimal.

3. (Desi Aratri Damanik), (2022). “*PURWARUPA MINIATUR WATER TUBE BOILER MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR GAS KAPASITAS UAP 20 KG/JAM*”

Pada penelitian ini menjelaskan secara teknis perancangan dan pengujian purwarupa miniatur water tube boiler berbahan bakar LPG dengan kapasitas produksi uap 20 kg/jam pada tekanan 3 barg (jenuh saturasi). Boiler ini bekerja dengan prinsip konversi energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas yang digunakan untuk memanaskan air hingga menjadi uap melalui tiga mekanisme perpindahan panas: konduksi, konveksi, dan radiasi. Desain boiler mencakup drum atas dan bawah, pipa pemanas, pipa uap utama, dan cerobong asap dengan dimensi spesifik. Pengujian dilakukan pada temperatur air umpan 28°C dan temperatur gas buang rata-rata $245,72^{\circ}\text{C}$. Hasil menunjukkan bahwa untuk memproduksi uap sebanyak 14,6 kg/jam, diperlukan konsumsi LPG sebesar 1,24 kg/jam, dengan nilai kalor bahan bakar (LHV) sebesar 47.046 kJ/kg. Energi panas yang masuk ke boiler (Q_{in}) tercatat sebesar 58.337,04 kJ/kg·jam, sedangkan energi yang diserap oleh air hingga berubah menjadi uap (Q_{out}) sebesar 38.262,95 kJ/kg·jam, menghasilkan efisiensi termal sebesar 65,58%. Boiler ini diusulkan sebagai solusi efisien dan aplikatif untuk skala UMKM, khususnya industri jasa seperti laundry, dengan keunggulan efisiensi bahan bakar dan kemudahan operasional.

4. (Mochamad Vicky Fadli), (2021). "*Pengaruh Variasi Diameter Pipa Api Mini Boiler Terhadap Daya Uap Dan Efisiensi*"

Penelitian yang dilakukan oleh Mochamad Vicky Fadli dan A'rsy Fahrudin (2021) membahas pengaruh variasi diameter pipa api terhadap daya uap dan efisiensi pada sistem mini boiler. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tiga variasi diameter pipa api, yaitu 10 mm, 15 mm, dan 20 mm, serta bahan bakar metanol (spirtus) sebanyak 100 mL dengan volume air 500 mL. Mini boiler diuji dalam waktu 6, 9, dan 12 menit untuk mengetahui performa daya uap dan efisiensinya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pipa api berdiameter 15 mm memberikan hasil terbaik, dengan daya uap maksimal sebesar 78,9 Watt dan efisiensi tertinggi sebesar 6,319% pada pengujian selama 12 menit. Sementara itu, pipa api berdiameter 10 mm menghasilkan daya uap maksimal sebesar 22,05 Watt dengan efisiensi 1,766%, dan pipa api diameter 20 mm menghasilkan daya uap maksimal sebesar 48 Watt dengan efisiensi 3,844%. Efisiensi terendah terjadi pada diameter 10 mm karena pembakaran tidak maksimal akibat sempitnya saluran panas. Sebaliknya, diameter 15 mm dinilai optimal karena mampu mengalirkan panas secara merata dan menghasilkan tekanan uap lebih cepat. Pipa berdiameter 20 mm menunjukkan efisiensi yang lebih rendah dari 15 mm karena pembakaran tidak menyentuh sempurna permukaan pipa. Penelitian ini juga menegaskan bahwa semakin lama durasi pemanasan, maka daya uap dan efisiensi mini boiler cenderung meningkat. Oleh karena itu, variasi diameter pipa api memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja termal mini boiler.

5. (Josua Rudianto Manalu), (2021). “*RANCANG BANGUN KETEL PIPA API MINI KAPASITAS 8 KG/JAM DENGAN TEKANAN 4 BAR*”

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun ketel uap tipe pipa api mini dengan kapasitas uap sebesar 8 kg/jam dan tekanan kerja 4 bar, menggunakan bahan bakar LPG yang memiliki nilai kalor tinggi (Higher Heating Value/HHV) sebesar 47081 kJ/kg. Ketel dirancang menggunakan material yang setara dengan baja karbon tipe SA-106 dan mampu beroperasi pada suhu maksimum 400–500°C. Dalam proses pengujian, ketel mampu menghasilkan uap aktual sebesar 6,92 kg/jam dengan tekanan rata-rata 3,04 bar dan temperatur gas buang mencapai 254°C. Konsumsi bahan bakar LPG rata-rata tercatat sebesar 0,63 kg/jam, sementara kebutuhan udara pembakaran teoritis yang dibutuhkan adalah sebesar 10,09 kg/jam. Nilai kalor bawah (Lower Heating Value/LHV) dari LPG yang digunakan adalah 46454,31 kJ/kg. Berdasarkan perhitungan energi, energi masuk (Q_{in}) dari proses pembakaran LPG sebesar 29266,209 kJ/jam, dan energi keluar (Q_{out}) yang diserap oleh air untuk menjadi uap adalah sebesar 18044,938 kJ/jam, sehingga diperoleh efisiensi termal ketel sebesar 61,65%. Ketel ini terdiri dari beberapa komponen utama yaitu drum ketel dengan diameter 25 cm dan panjang 60 cm, pipa saluran api berdiameter 2 inci dan panjang 50 cm, pipa laluan gas asap, serta pipa buang. Proses perpindahan panas yang terjadi melibatkan mekanisme radiasi, konveksi, dan konduksi, dengan distribusi beban perpindahan panas terbesar terjadi pada laluan 1, yaitu sebesar 13263,65 kJ/jam atau 44,41% dari total beban panas. Secara keseluruhan, hasil perancangan dan pengujian menunjukkan bahwa mini boiler ini mampu menghasilkan uap mendekati kapasitas yang dirancang dengan efisiensi termal yang layak, sehingga cocok digunakan

untuk aplikasi industri kecil seperti laundry, pengolahan makanan, dan kebutuhan pemanas berskala kecil.

6. (Jody Prasetya), (2020). “*ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA BOILER SKALA MODEL TEKANAN UAP 5 Kg/Cm² DAN KAPASITAS 23 Kg/Jam*”

Penelitian yang dilakukan oleh Jody Prasetya (2020) bertujuan untuk menganalisis laju perpindahan panas dan kalor yang dibutuhkan pada boiler skala model dengan tekanan uap 5 kg/cm² dan kapasitas uap 23 kg/jam. Boiler yang digunakan merupakan jenis boiler pipa air vertikal dengan bahan bakar kayu bakar sebagai sumber panas. Fokus utama penelitian ini meliputi proses perpindahan panas, energi kalor hasil konduksi dan konveksi, serta energi kalor yang diserap oleh air untuk menjadi uap. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada tekanan awal 1 kg/cm², laju perpindahan panas tercatat sebesar 658,03 Watt, dan meningkat secara bertahap hingga mencapai 2503,38 Watt pada tekanan 5 kg/cm². Panas total yang masuk dari pembakaran bahan bakar mencapai 527.000 Watt, sementara kalor yang digunakan air untuk berubah menjadi uap sebesar 1.727,7 Watt. Metodologi yang digunakan adalah perancangan boiler skala model dan eksperimen langsung dengan pendekatan kuantitatif, yang menitikberatkan pada analisis perpindahan panas melalui mekanisme konduksi dan konveksi. Penelitian ini menekankan pentingnya desain dan pengaturan perpindahan panas yang efisien dalam meningkatkan performa boiler, khususnya pada unit skala kecil yang banyak digunakan untuk tujuan pendidikan atau simulasi proses industri.

7. (Alfaridz Hartana), (2025). *“ANALISA PENGARUH TEKANAN DAN LAJU ALIRAN PANAS TERHADAP TEMPERATUR DAN ENERGI PANAS YANG DIHASILKAN PADA BOILER 12 KG SEBAGAI PENGHASIL UAP”*

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh tekanan dan laju aliran panas terhadap temperatur serta energi panas yang dihasilkan pada boiler berkapasitas 12 kg sebagai penghasil uap. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan tiga variasi tekanan dan laju aliran panas untuk mengamati perubahan temperatur dan energi panas yang dihasilkan. Melalui serangkaian pengujian dengan variasi tekanan dan laju aliran panas pada boiler berkapasitas 12 kg, diperoleh sejumlah temuan menarik terkait karakteristik temperatur serta besarnya energi panas yang dihasilkan. Dengan hasil pengujian tersebut yang akan dibahas lebih lanjut pada BAB 4 HASIL DAN ANALISA DATA beserta kesimpulan yang didapatkan setelah melalui serangkaian pengujian yang terdapat pada BAB 5 PENUTUP.