

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian *Boiler*

Boiler atau ketel uap merupakan salah satu mesin konversi energi yang mengubah energi kimia yang terdapat dari bahan bakar menjadi energi 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 sehingga berubah wujud menjadi uap air (Josua dkk, 2021). Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dibandingkan dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air didalam *boiler*. air yang memiliki berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar.

Boiler atau ketel uap memiliki 3 sistem pengolahan yaitu terdiri dari sistem air umpan, sistem steam dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan berguna untuk menyediakan air untuk keperluan boiler sesuai dengan kebutuhan steam. Sistem steam berguna untuk mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Steam dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang digunakan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem (Maulana,2017).

Boiler mengubah energi–energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. *Boiler* dirancang untuk melakukan atau memindahkan kal or dari suatu sumber pembakaran, yang biasanya berupa pembakaran bahan bakar.

Boiler terdiri dari 2 komponen utama, yaitu :

1. *Furnace* (ruang bakar) sebagai alat untuk mengubah energi kimia menjadi energi panas.
2. *Steam Drum* yang mengubah energi pembakaran (energi panas) menjadi energi

potensial *steam* (energi panas).

Boiler pada dasarnya terdiri dari drum yang tertutup ujung dan pangkalnya dan dalam perkembangannya dilengkapi dengan pipa api maupun pipa air. Banyak orang yang mengklasifikasikan ketel steam tergantung kepada sudut pandang masing – masing (Murzaki dan Mursadin, 2019).

2.2 Klasifikasi Boiler

Klasifikasi boiler secara umum dibagi dua yaitu, *boiler* pipa api dan *boiler* pipa air. Jenis *boiler* pipa api banyak digunakan oleh industri yang memerlukan tekanan uap yang relatif rendah, misalnya pabrik-pabrik tahu. Sedangkan jenis pipa air digunakan oleh industri/pembangkit listrik yang memerlukan tekanan uap yang tinggi. Klasifikasi *boiler* dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Klasifikasi *Boiler*

Macam/Jenis	Pipa Air	Pipa Api
Kapasitas, (ton/jam)	3-300	1-30
Tekanan Uap, (kg/cm ²)	1-200	1-20
Metode Sirkulasi Air Umpan	Alamiah dan paksa	Alamiah
Jumlah Air yang Tersedia	30-40%	100-200%
Waktu Menghasilkan Uap,(menit)	10-20	20-30
Pengendalian Kualitas Air	Sukar (Lebih sukar pada tekanan tinggi)	Relatif mudah
Penyesuaian pada Macam-macam Beban,	Relatif baik	Baik
Umur Badan Utama,(tahun)	10-30	10-20
Efisiensi Boiler, (%)	85-90	80-85

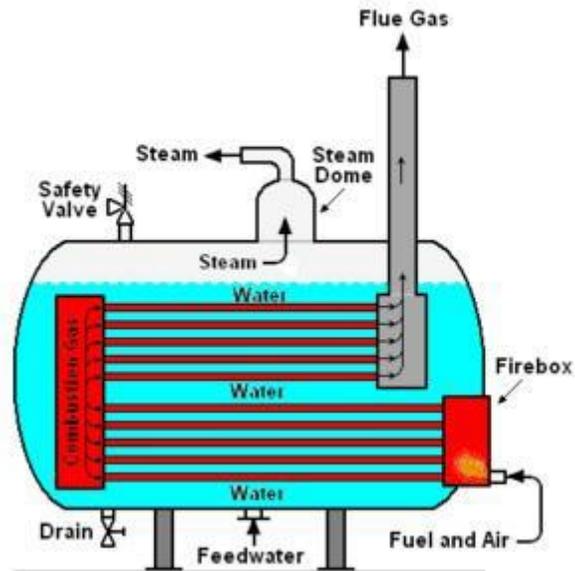
Iskandar, 2015

2.3 Jenis-Jenis *Boiler*

2.3.1 *Boiler* Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

Boiler pipa api merupakan pengembangan dari ketel lorong api dengan menambah pemasangan pipa-pipa api, dimana gas panas hasil dari pembakaran ruang bakar mengalir didalam pipa-pipa dan air diluar pipa drum berfungsi untuk tempat air

dan uap. *Boiler* ini biasanya digunakan untuk kapasitas *steam* yang relative rendah dengan tekanan *steam* rendah sampai sedang. *fire tube boiler* kompetitif untuk kecepatan *steam* sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 16 kg/cm². *Fire tube boiler* dapat menggunakan bahan bakar solar, gas dalam operasinya (Maulana, 2017). Untuk lebih jelas *boiler* pipa api dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Ketel Uap Pipa Api

(sumber: Pakpahan Christine, 2019. *Boiler dan Jenisnya*)

Dalam perencanaan *boiler* ada beberapa faktor penting yang harus dipertimbangkan agar boiler yang direncanakan dapat bekerja dengan baik dan sesuai dengan yang dibutuhkan.

Faktor yang mendasari pemilihan jenis *boiler* adalah sebagai berikut :

- a. Kapasitas yang digunakan
- b. Kondisi *steam* yang dibutuhkan
- c. Bahan bakar yang dibutuhkan
- d. Kontruksi yang sederhana dan perawatan mudah
- e. Tidak perlu air isian yang berkualitas tinggi

Kerugian ketel pipa api (Muzaki dan Mursadin,2019) :

1. Tekanan *steam* hasil rendah
2. Kapasitas Kecil
3. Pemanasan relatife lama

Keuntungan ketel pipa api :

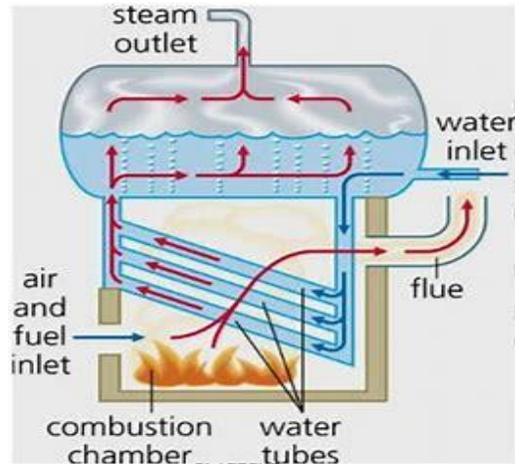
1. Kontruksi yang relatife lebih kuat
2. Biaya perawatan murah
3. Pengoperasian dan perawatan mudah.

Boiler yang tergolong dalam jenis *fire tube boiler* adalah jenis *boiler* kecil yang sederhana dan pada umumnya memiliki kapasitas 10 Ton/jam dengan tekanan 16 kg/cm², jadi tergolong ke dalam boiler bertekanan rendah Karena kapasitas, tekanan, dan temperatur uap yang dihasilkan rendah maka *fire tube boiler* jarang digunakan untuk pengolahan modern. Kekurangannya adalah kapasitas kecil, lambat dalam mencapai tekanan kerja operasi pada awal operasi dan memerlukan waktu yang cukup lama dalam proses pembentukan uap bertekanan, dan keuntungan menggunakan boiler ini adalah proses pengoperasian dan perawatan mudah (Prasetyo dkk, 2019).

2.3.2 Boiler Pipa Air (Water Tube Boiler)

Ketel pipa air, yaitu ketel uap dimana air atau uap berada didalam pipa-pipa atau tabung dengan pipa api atau asap berada diluarnya.

Di dalam *water tube boiler*, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk ke dalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakar membentuk *steam* pada daerah uap dalam *drum*. *Boiler* ini dipilih jika kebutuhan *steam* dan tekanan *steam* sangat tinggi seperti pada kasus *boiler* untuk pembangkit tenaga. *Water tube boiler* yang sangat modern dirancang dengan kapasitas *steam* antara 4.500 – 12.000 Kg/jam. *Water tube boiler* dapat menggunakan bahan bakar solar, gas dan padat dalam operasinya.



Gambar 2.2. Ketel Uap Pipa Air

(sumber:Pakpahan Christine,2019.Boiler dan Jenisnya)

Prinsip kerjanya yaitu proses pengapian terjadi diluar pipa. Panas yang dihasilkan digunakan untuk memanaskan pipa yang berisi air. *Steam* yang dihasilkan kemudian dikumpulkan terlebih dahulu didalam sebuah *steam drum*. Sampai tekanan dan temperatur sesuai, *saturated steam* dipanaskan lagi oleh *superheater* untuk menghasilkan *superheated steam*, baru *steam* mengalir ke *outlet* melalui pipa distribusi (Hidayanto, 2016).

Keuntungan dan kerugian ketel pipa air (Muzaki dan Mursadin,2019) :

1. Menghasilkan uap dengan tekanan lebih tinggi
2. Dapat dioperasikan dengan cepat, jadi dalam waktu yang singkat telah dapat memproduksi uap
3. Memiliki nilai efisiensi yang lebih tinggi

Kerugian-kerugian ketel pipa air :

1. Air umpan mensyaratkan kemurnian tinggi untuk mencegah endapan kerak didalam pipa yang bisa menimbulkan panas yang berlebihan dan pecah.
2. Pembersihan pipa air tidak mudah dilakukan
3. Investasi awal relative lebih mahal

2.4 Komponen-komponen *Boiler*

Komponen *boiler* adalah seperangkat alat atau unit proses yang merupakan bagian dari *boiler*. Komponen sistem boiler terdiri dari komponen utama dan komponen bantu yang masing-masing memiliki fungsi untuk menyokong prinsip kerja ketel uap.

1. *Furnace* (Ruang bakar)

Furnace (Ruang bakar) berfungsi sebagai tempat terjadinya pembakaran bahan bakar. Bahan bakar dan udara dimasukkan ke dalam ruang bakar sehingga terjadinya pembakaran.

2. *Burner*

Prinsip burner adalah alat yang digunakan untuk mencampur bahan bakar dan udara. Dan sebagai *nozle* untuk mendorong campuran bahan bakar kedalam *furnace*

3. *Tubing water tube*

Tubing water tube berfungsi sebagai tempat aliran air umpan yang akan dipanaskan. Pipa air mengalami kontak langsung dengan api pembakaran, sehingga pemanasan air didalam pipa terjadi dan menyebabkan fluida mengalami pergerakan molekul air ke arah *steam drum*.

4. *Steam drum*

Steam drum merupakan tempat penampung air panas dan *steam*. *Steam* masih bersifat jenuh (*saturated*)

5. *Water drum*

Water drum merupakan tempat menampung air sekaligus sebagai pemisah uap dan air. Alat ini berhubungan erat dengan *steam drum* dalam proses sirkulasi air dalam *boiler*. Kotoran yang terbawa ke dalam *water drum* akan diendapkan dan dibuang dengan membuka *drain valve*. selain itu, *fluida* yang masih berfase cair di dalam *steam drum* akan mengalir ke *water drum* secara alami.

6. Level control air (*water flow meter*)

Level control air berfungsi untuk *start* dan *stop* pengisian air ke boiler yang dijalankan oleh pompa.

7. *Superheater*

Superheater berfungsi untuk menaikkan temperatur *saturated steam* sampai menjadi *superheated steam*.

8. *Pressure safety valve*

Pressure safety valve berfungsi sebagai pengaman yang akan bekerja bila tekanan pada *boiler* melebihi batas tekanan yang diatur.

9. *Blowdown valve*

Blowdown valve merupakan saluran yang berfungsi membuang endapan yang berada di dalam pipa *steam* ataupun didalam *drum*.

10. *Pressure indicator*

Pressure indicator berfungsi sebagai alat untuk menunjukkan besarnya tekanan uap.

11. *Temperature indator*

Temperature indicator adalah alat yang berfungsi menunjukkan suhu dari suatu proses

2.5 Prinsip Kerja Boiler

Boiler adalah bejana tertutup dimana air umpan masuk ke *drum*, air dipanaskan oleh panas dari hasil gas pembakaran bahan bakar. Sehingga terjadinya perpindahan panas dari sumber panas dipindahkan ke air sampai terbentuk uap dengan temperatur dan tekanan tinggi. Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dibanding dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air di dalam *boiler*. Air yang memiliki berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar . Sistem *boiler* terdiri dari sistem air umpan, sistem *steam* dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk *boiler* secara otomatis sesuai kebutuhan uapnya. Sistem *steam* mengumpulkan dan mengontrol produksi uap dalam *boiler*. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan (Ben, 2016). Prinsip kerja *boiler* yaitu mengubah dan memindahkan energi yang dimiliki bahan bakar menjadi

energi yang dimiliki uap air. Berdasarkan bahan bakar yang digunakan, *boiler* dapat diklasifikasikan menjadi *boiler* bahan bakar padat, *boiler* bahan bakar cair, dan *boiler* bahan bakar gas. Pemanas ruangan juga merupakan salah satu aplikasi dari *boiler*. Prinsip kerja pemanas ruangan dikembangkan berdasarkan Hukum Termodinamika I dan II.

2.6 Dasar Termodinamika Pada *Boiler*

Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari perpindahan energi ketika suatu sistem mengalami proses termodinamika dari suatu keadaan ke keadaan lain. Berbagai aplikasi teknik yang menunjukkan pentingnya prinsip-prinsip termodinamika teknik seperti pada sistem energi alternatif, Pembangkit listrik, sistem pendingin, pompa kalor merupakan sistem-sistem yang menghasilkan suatu konversi energi (Sutini Pujiastuti Lestari, 2018).

2.6.1 Hukum Termodinamika I

Hukum Termodinamika I merupakan penerapan kekekalan energi, yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lainnya dengan total energinya sama. Bila diberikan panas (dQ) pada suatu sistem, maka sistem akan berekspansi dan melakukan kerja sebesar (dW) dan menimbulkan penambahan kecepatan molekul dari sistem serta pertambahan jarak antara molekul-molekul dari sistem karena sistem berekspansi. Energi total dari suatu sistem disebut sebagai energi dalam (U). Energi dalam adalah sifat keadaan, artinya nilai energi dalam tergantung hanya pada keadaan akhir sistem dan tidak bergantung pada cara pencapaian keadaan itu (Lewerissa, 2018). Energi dalam mempunyai dua sifat lebih lanjut, yaitu:

1. Energi dalam sistem yang terisolasi adalah tetap. Pengamatan ini sering diringkas dengan ucapan bahwa energi bersifat kekal. Bukti kekekalan energi adalah kemustahilan untuk membuat mesin yang bergerak terus menerus, yang bekerja tanpa bahan bakar: mustahil untuk menciptakan atau menghancurkan energi.

2. Sifat kedua energi dalam adalah perpindahan energi (karena kita dapat melihat apakah beban dinaikkan atau diturunkan dalam lingkungannya, atau apakah es sudah meleleh). Kalor dan kerja adalah cara dalam mengubah energi sistem.

Kedua sifat energi ini diringkas menjadi pernyataan yang disebut hukum pertama termodinamika yaitu energi dalam suatu besarnya tetap kecuali jika dirubah dengan melakukan kerja atau pemanasan. Sesuai dengan hukum ini, energi yang diberikan oleh panas harus sama dengan kerja eksternal yang dilakukan ditambah dengan perolehan energi dalam karena kenaikan temperatur.

2.6.2 Hukum Termodinamika II

Hukum Termodinamika II timbul berdasarkan pernyataan oleh:

1. Clausius, bahwa: “adalah tidak mungkin bagi sistem apapun untuk beroperasi sedemikian rupa sehingga hasil tunggalnya akan berupa suatu perpindahan energi dalam bentuk kalor dari benda yang lebih dingin ke benda yang lebih panas”
2. Kelvin Planck, bahwa: “tidak mungkin menggunakan proses siklus untuk memindahkan panas dari benda panas dan mengubahnya menjadi kerja tanpa memindahkan sebagian panasnya kepada benda dingin pada saat yang sama”
3. Weber, bahwa: “adalah panas tidak dapat mengalir dari benda yang suhunya rendah ke suhu yang tinggi, kecuali ditambah energi dari luar sistem untuk mengubah benda tersebut”

Sehingga dapat dinyatakan bahwa bunyi termodinamika II yaitu panas mengalir secara spontan dari benda bersuhu tinggi menuju benda yang bersuhu lebih rendah, dan panas tidak dapat mengalir secara spontan dari benda bersuhu rendah menuju benda yang bersuhu lebih tinggi tanpa dilakukan usaha. Hukum termodinamika II mendefinisikan konsep termodinamika entropi. Entropi suatu sistem bertambah selama ada perubahan spontan. Sifat atau keadaan perilaku partikel dinyatakan dalam besaran entropi. Entropi didefinisikan sebagai bentuk ketidakteraturan perilaku partikel dalam sistem. Entropi didasarkan pada perubahan setiap keadaan yang dialami partikel dari keadaan awal hingga keadaan akhirnya. Semakin tinggi entropi

suatu sistem. Semakin tidak teratur pula sistem tersebut. Sistem menjadi lebih rumit, kompleks, dan sulit diprediksi (Alfin Fajar, 2020).

2.7 Proses Pembakaran

Proses pembakaran adalah reaksi kimia yang cepat antara bahan bakar dengan oksigen (O_2) dari udara, disertai dengan produksi panas atau panas, dan cahaya. Pembakaran sempurna bahan bakar terjadi hanya jika ada pasokan oksigen yang cukup. Dalam setiap bahan bakar, unsur yang mudah terbakar adalah karbon, hydrogen dan sulfur (Akbar Kelana, 2018). Dalam proses suatu pembakaran jika tidak ada cukup oksigen, maka karbon tidak akan terbakar seluruhnya, contohnya sebagai berikut :

Tujuan dari pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar, menurut Utami dkk, (2016), dapat dilakukan dengan pengontrolan “tiga T” yaitu

- a. T-Temperatur Temperatur yang digunakan dalam pembakaran yang baik harus cukup tinggi untuk menyalakan dan menjaga penyalaan bahan bakar.
- b. T-Turbulensi Turbulensi yang tinggi menyebabkan terjadinya pencampuran oksigen dan bahan bakar yang baik.
- c. T-Time Waktu harus cukup untuk pembakaran yang sempurna.

2.7.1 Kebutuhan Udara Pembakaran

Dalam suatu pembakaran perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran. Kebutuhan udara dan bahan dinyatakan dengan rasio campuran udara dan bahan bakar AFR (*Air Fuel Ratio*).

Rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*/AFR) adalah rasio massa udara terhadap bahan bakar padat, cair, atau gas yang ada dalam proses pembakaran. Rasio ini merupakan parameter yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau. Secara simbolis, AFR dihitung sebagai perbandingan jumlah massa udara dengan jumlah massa bahan bakar.

$$AFR = \frac{ma}{mf}$$

Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR. Maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai aktual lebih kecil dari AFR maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar (Nurya Ulfa, 2020). *Excess air* dan O₂ optimum pada gas buang dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 *Excess Air* dan O₂ optimum pada gas buang berbagai bahan bakar

Bahan Bakar	Optimum	Optimum O ₂ pada stack
	<i>Excess Air</i> %	Gas %
Batubara	20-25	4-4,5
Biomassa	20-40	4-6
BBM	5-15	1-3
Gas Bumi/LPG	5-10	1-2
Black Liquor	5-10	1-2

2.8 Air Umpan Boiler

Sistem air umpan yang dimiliki *boiler* untuk menghasilkan *steam* harus memenuhi spesifikasi dan syarat tertentu sehingga dapat digunakan sebagai umpan *boiler*. Dengan menggunakan pompa air pengisian ketel atau *boiler feed water pump* (BFWP) air umpan *boiler* dipompakan dari luar masuk ke dalam *boiler* dari tekanan 1 bar hingga mencapai tekanan kerja maksimum di dalam *boiler* (Hidayanto, 2016).

Air yang disuplai ke *boiler* untuk dirubah menjadi *steam* disebut air umpan (*feed water*). Terdapat dua sumber air umpan yaitu :

- Steam* yang mengembun yang dikembalikan dari proses atau kondensat.
- Air baku yang sudah diolah yang harus diumpankan dari luar ruang *boiler* dan (*plant process*) yang disebut air *make up*.

Kualitas air umpan yang tidak baik (termasuk air *condensate*), akan menyebabkan korosi dan memicu timbulnya kerak atau jelaga pada komponen *boiler*.

Oleh karena itu untuk dapat digunakan sebagai air umpan harus dilakukan pengolahan terlebih dahulu, karena harus memenuhi persyaratan tertentu dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Persyaratan Air Umpan *Boiler*

Parameter	Satuan	Ukuran
PH		10,5-11,5
Conductivity	Ymhos/cm	5000, max
TDS	Ppm	3500, max
Alkalinity	Ppm	800, max
Silica	Ppm	150, max
Besi	Ppm	2, max
Residu Fosfat	Ppm	20 – 50
Residu Sulfur	Ppm	20 - 50
PH Kondensat	Unit	8,0 – 9,0

PT. Nalco Indonesia

2.9 Bahan Bakar

Bahan bakar adalah bahan yang dapat dibakar untuk menghasilkan panas (kalor). Proses pembakaran adalah proses kimia antara bahan bakar, udara dan panas. Proses pembakaran yang terjadi diruang bakar *boiler* bertujuan untuk mengubah fasa air menjadi fasa uap (Prasetyo dkk, 2019).

Bahan bakar yang digunakan *boiler* digolongkan menjadi tiga jenis, yaitu bentuk padat, bentuk cair, dan bentuk gas (Hidayanto, 2016). Pada prinsipnya ketiganya memiliki keunggulan dan kekurangan masing-masing, namun saat ini industri dengan skala besar lebih memilih bahan bakar gas sebagai bahan bakar utama, dikarenakan memiliki efektifitas yang tinggi dan tidak menimbulkan kotor pada permukaan pembakaran. Berikut ini adalah jenis bahan bakar yang digunakan oleh *boiler* :

1. Bahan Bakar Padat (Batubara)

Batubara merupakan bahan bakar jenis batuan sedimen berwarna coklat gelap yang dapat terbakar terdiri dari konsolidasi dan senyawa dari pada tumbuhan yang tumbuh dihutan. Komposisi kimia batubara bervariasi dari suatu daerah ke daerah

yang lain, tergantung pada vegetasi dari yang dibentuk dan kondisi lingkungan yang terkena formasi lingkungan. Batubara mempunyai kandungan kimia utama yaitu karbon, hydrogen, nitrogen, batubara juga mengandung air dan kotoran yang abu, belerang (Hidayanto, 2016).

2. Bahan Bakar Cair (Minyak)

Bahan bakar cair berasal dari minyak bumi. Minyak bumi didapat dari dalam tanah dengan jalan mengebornya diladang-ladang minyak, dan memompanya sampai ke atas permukaan bumi untuk selanjutnya diolah lebih lanjut menjadi berbagai jenis minyak bakar.

Bahan bakar cair yang biasa dipakai dalam industri, transportasi maupun rumah tangga adalah fraksi minyak bumi. Minyak bumi adalah campuran berbagai hidrokarbon yang termasuk dalam kelompok senyawa: parafin, naphtena, olefin, dan aromatic. Kelompok senyawa ini berbeda dari yang lain dalam kandungan hidrogennya. Minyak mentah, jika disuling akan menghasilkan beberapa farksi, seperti : bensin atau premium, kerosen atau minyak tanah, minyak solar, minyak bakar, dan lain-lain (Akbar Kelana, 2018).

3. Bahan Bakar Gas

Gas alam merupakan bahan bakar hidrokarbon yang tidak berwarna yang utamanya terdiri dari metana (CH_4) dan etana (C_2H_6), pada prinsipnya dua komponen yang mudah terbakar. Keduanya biasanya ditemukan dibawah permukaan bumi. Ketika mengebor sebuah sumur minyak yang dibor melalui pembentukan gas alam, yang berada dibawah tekanan, mengalir ke permukaan di mana gas tersebut didistribusikan menggunakan jaringan pipa ke fasilitas pengolahan. Hal ini membuat kebanyakan *boiler* menggunakan gas alam dikarenakan dapat disalurkan langsung ke *boiler* dan memiliki efisiensi yang tinggi serta tidak menghasilkan abu pembakaran. Selain kemudahan distribusi, penggunaan *boiler* gas alam membutuhkan ruang *boiler* relatife kecil, sehingga tidak terlalu banyak mengeluarkan material untuk membuatnya. Dengan nilai kalor sekitar 1.000 Btu/ft^3 dalam keadaan standar dari 60°F pada tekanan atmosfer dan persyaratan berlebih pada udara rendah yang berkontribusi untuk

efisiensi tinggi, gas alam adalah bahan bakar yang ideal (Hidayanto, 2016). Dalam pembuatan *double drum water tube boiler* ini, kami menggunakan bahan bakar gas LPG karna tidak memungkinkannya penginstalasian pipa gas alam ke dalam *boiler*. Adapun spesifikasi LPG dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Spesifikasi LPG

No	Karakteristik	Satuan	Batasan		Metode Uji	
			Min	Max	ASTM	Lain
1	Berat Jenis Relatif Pada 60/60°F	-	Dilaporkan		D1657/ D2598	IP 432
2	Tekanan Uap pada 100°F	Psig	-	145	D1267/ D6897/ D2598	IP 432
3	Korosi Bilah Tembaga	1 jam/100°F	-	No. 1	D1838	-
4	Kandungan Sulfur Total	Grains/100 cuft	-	15	D6667/ D3246/ D5504/ D6228	-
5	Kandungan Air	-	Tidak ada air		-	Visual
6	Komposisi				D2163	-
	C ₂	% Vol	-	0.8		
	C ₃ dan C ₄	% Vol	97,0	-		
	C ₅₊ (C ₅ dan kandungan hidrogen lain yang lebih berat)	% Vol	-	2,0		
7	Etil atau Butil Merkaptan	Lb/10000 AG	1,0	-	D5305/ D5504	-

Sumber : Keputusan Direktur Jendral Minyak dan Gas Bumi (2020)

2.10 Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor atau *heat transfer* ialah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material. Dari termodinamika telah kita ketahui bahwa energi yang pindah itu dinamakan kalor atau panas. Ilmu perpindahan panas tidak hanya mencoba menjelaskan bagaimana energi kalor itu berpindah dari satu benda ke benda lain, tetapi juga dapat meramalkan laju perpindahan panas yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu (Holman j.p, 1986). Macam-macam perpindahan perpindahan kalor perpindahan dari suatu tempat ke tempat yang lain melalui 3 cara, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi.

2.10.1 Perpindahan Panas Secara Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas dari satu bagian zat yang lain tanpa perpindahan permanen molekul. Dimana molukel-molekul dari zat perantara tidak ikut berpindah tempat tetapi molekul-molekul tersebut hanya menghantarkan panas atau proses perpindahan panas dari suhu yang tinggi ke bagian lain yang suhunya lebih rendah. Konduksi (keadaan *steady*). Suatu material bahan yang mempunyai gradient, maka kalor akan mengalir tanpa disertai oleh suatu gerakan zat. Aliran kalor seperti ini disebut konduksi atau hantaran. Konduksi thermal pada logam-logam padat terjadi akibat gerakan elektron yang terikat dan konduksi thermal mempunyai hubungan dengan konduktivitas listrik. Prmanasan yang terjadi pada logam berarti pengaktifan gerakan molekul, sedangkan pendinginan berarti pengurangan gerakan molekul (McCabe, 1993). Contoh perpindahan kalor secara konduksi antara lain : perpindahan kalor pada logam cerek pemasak air atau batang logam yang dipanaskan (McCabe, 1993).

$$\frac{q}{a} \sim \frac{\delta T}{\delta X} \dots \dots \dots (1)$$

Dan dengan konstanta kesetimbangan (konduksi) maka menjadi persamaan fourier

$$Q = - k A \cdot \frac{\delta T}{\delta X} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

q = laju perpindahan kalor

$\frac{\delta T}{\delta x}$ = gradient suhu ke arah perpindahan kalor

k = konduktivitas termal

A = luas permukaan bidang hantaran

Tanda (-) digunakan untuk memenuhi hukum II termodinamika yaitu “ panas mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala temperature” (Holman,1986).

2.10.2 Perpindahan Panas Secara Konveksi

perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi dari satu tempat ke tempat yang lain dengan gerakan partikel secara fisis. Perpindahan panas secara konveksi ini juga diakibatkan oleh molekul-molekul zat perantara ikut berpindah dan mengakibatkan kalor merambat terjadilah konveksi , konveksi terjadi pada zat cair dan gas (udara/cair). Konveksi merupakan suatu fenomena makroskopik dan hanya terjadi bila ada gaya yang bekerja pada partikel atau ada arus fluida yang dapat membuat gerakan melawan gaya gesek (McCabe,1993). Contoh sederhana perpindahan panas secara konveksi adalah ketika mendidihkan air didalam sebuah bejana. Panas akan mengalir melalui kompor menuju bejana secara konduksi. Panas dari bejana akan memanaskan air yang berada dibagian bawah. Air pada bagian bawah akan memanaskan dan kemudian naik, sedangkan air yang lebih dingin bergerak turun untuk menggantikannya. Akan ada gerakan siklus berputar secara konveksi yang mengindikasikan terjadinya perpindahan panas.

$$Q = - hA \cdot \delta T \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

q = Kalor yang dipindahkan

h = Koefisien perpindahan kalor secara konveksi

A = Luas bidang permukaan perpindahan panas

T = Temperatur

Tanda minus (-) digunakan untuk memenuhi hukum II termodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu mempunyai tanda positif (+). Berdasarkan gaya penyebab terjadinya arus aliran fluida, konveksi dapat diklasifikasikan :

1. Konveksi alamiah (*natural/free convection*)

Konveksi alamiah adalah perpindahan kalor yang terjadi secara alami atau pergerakan *fluida* yang terjadi akibat perbedaan massa jenis. Konveksi alamiah dapat terjadi karena ada arus yang mengalir akibat gaya apung. Sedangkan gaya apung terjadi karena ada perbedaan densitas *fluida* tanpa dipengaruhi gaya dari luar sistem. Perbedaan densitas *fluida* terjadi karena adanya gradien suhu pada *fluida*. Contoh konveksi alamiah antara lain aliran udara yang melintas radiator panas (McCabe,1993)

2. Konveksi paksa (*forced convection*)

Konveksi paksa terjadi karena gerakan molekul yang terjadi digerakkan oleh suatu peralatan mekanik, contoh : pompa, pengaduk. Jadi arus *fluida* tidak hanya tergantung pada perbedaan densitas. Contoh perpindahan panas secara konveksi paksa antara lain : pemanasan air yang disertai pengadukan

2.10.3 Perpindahan Panas Secara Radiasi

Radiasi adalah perpindahan kalor atau panas secara langsung dari sumber panas ke lingkungan tanpa melalui medium apapun. Proses perpindahan panas melintas ruang melalui pancaran gelombang elektromagnetik dengan kecepatan cahaya dari benda yang bertemperatur lebih tinggi ke benda yang bertemperatur rendah. Perpindahan panas secara radiasi pada ruang bakar pertukaran radiasi antara gas dengan suatu permukaan (Eastem dkk, 2019). Contoh adalah proses perpindahan panas yang terjadi didalam ruang bakar *boiler* ketika panas dari gas dipancarkan ke dinding ruang bakar (*wall tube*)

Menurut J.P Holman laju perpindahan panas radiasi gas pada ruang bakar dapat dihitung dengan cara:

$$\frac{q_{radiasi}}{A_R} = \epsilon_g (T_g) \sigma T^4 - \alpha_g (T_g) \sigma T^4 \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

Q = Laju perpindahan panas radiasi (kj/h)

ϵ = Emitans gas

c = Konstantastefan-boltzmann dan diasumsikan = $[5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}]$

A_T = Luas bidang yang dipanaskan (m^2)

T_g = Temperatur gas ruang bakar (K)

T_w = Temperatur dinding ruang bakar (K)