

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pengertian *Boiler***

*Boiler* adalah sebuah tabung tertutup dimana terdapat proses pembakaran untuk memanaskan air sampai menjadi air panas atau uap air (*Steam*). Air panas atau uap air bertekanan kemudian dipakai untuk mentransfer panas pada suatu proses. Ketika air mendidih menjadi uap, volumenya meningkat kira-kira 1600 kali, menghasilkan kekuatan mudah meledak yang hampir setara dengan bahan peledak. Hal ini menjadikan *boiler* suatu peralatan sangat berbahaya yang harus diperlakukan dengan kepedulian serius (UNEP 2006).

Sistem *boiler* terdiri dari: sistem air umpan, sistem steam dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk *boiler* secara otomatis sesuai dengan kebutuhan *steam*. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan. Sistem *steam* mengumpulkan dan mengontrol produksi *steam* dalam *boiler*. Sistem bahan bakar merupakan semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar sehingga menghasilkan panas yang dibutuhkan (Sitepu 2020).

fungsi *boiler* adalah untuk mengubah air menjadi uap (*steam*) pada tekanan konstan serta memasok kebutuhan *steam* (Alazemi 2019).

#### **2.2 Kalsifikasi *Boiler***

*Boiler* disenut juga *steam generator*. *Boiler* telah ada lebih dari 150 tahun. Berbagai bentuk *boiler* telah berkembang mulai dari ukuran, kergaman, fleksibilitas, keserbagunaan, keandalan serta kompleksitas (Dryden 2013). Berdasarkan fluida yang mengalir didalam pipa, *boiler* terbagi menjadi pipa air dan pipa api klasifikasi *boiler* dapat dilihat pada Tabel 2.1

**Tabel 2.1** Klasifikasi *Boiler*

Macam/Jenis	Pipa Air	Pipa Api
Kapasitas	3-300	1-30
Tekanan uap (kg/cm <sup>2</sup> )	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	10-30	10-20
Efisiensi <i>boiler</i>	85-90	80-85

*Iskandar, 2015*

### 2.2.1 Boiler Pipa Api

Pada ketel pipa api (*fire tube boiler*) bahan bakar dibakar di dalam tungku. Gas panas yang dihasilkan di tungku kemudian melewati *tube*. *Tube* direndam dalam air di dalam bejana utama *boiler*. Saat gas panas dilewatkan melalui *tube*, panas energi gas ditransfer ke air di sekitarnya mereka. Akibatnya dihasilkan uap (*steam*). Keuntungan *boiler* pipa api yaitu konstruksi yang sederhana dan lebih murah. Sedangkan kerugian *boiler* pipa api yaitu karena jumlah air yang besar maka diperlukan tekanan kerja yang tinggi, pemanasan relatif lama dan kapasitas kecil ( Abbas 2021).

### 2.2.2 Boiler Pipa Air

Sedangkan pada *boiler* pipa air, air yang bersirkulasi melalui pipa-pipa *boiler* yang dipanaskan secara eksternal yang berasal dari tungku pembakaran (*furnace*) (Duarte 2017). Keuntungan *boiler* pipa air yaitu tekanan kerja tinggi, dapat menyesuaikan pada macam macam beban serta dapat digunakan pada pembangkit yang besar karena kualitas steam yang dihasilkan baik, sedangkan kerugiannya yaitu desain yang kompleks sehingga biaya perawatan tinggi, membutuhkan tenaga ahli sebagai operator, untuk output yang sama biaya produksi lebih tinggi, serta *water treatment* menjadi hal yang sangat penting karena endapan kecilpun dalam *tube* dapat menyebabkan panas berlebih dan meledak (Kumar 2021).

### 2.3 Komponen-komponen Boiler

*Boiler* terdiri dari beberapa ruangan yang memiliki fungsi berbeda-beda, yaitu:

a. *Furnace* (Ruang bakar)

*Furnace* (ruang bakar) adalah bagian dari *boiler* yang berfungsi untuk tempat berlangsungnya proses pembakaran bahan bakar dan udara. Tekanan gas panas yang berada didalam ruang bakar (*furnace*) dapat lebih besar dari pada tekanan udara luar (tekanan ruang bakar positif) dan dapat juga bertekanan lebih kecil dari pada tekanan udara luar (tekanan ruang bakar negative) atau bertekanan seimbang (*balance draft*).

b. *Burner*

*Burner* adalah alat yang dipakai untuk menyebarkan bahan bakar kedalam ruang bakar dan menghasilkan pengabutan yang memudahkan reaksi pembakaran. *Burner* dilengkapi oleh *igniter* sebagai pematik api agar bahan bakar dan udara yang masuk ke ruang bakar dapat terbakar.

c. *Superheater Tube*

*Superheater tube* merupakan *tube* yang berfungsi untuk menyerap panas secara konveksi dan radiasi dari gas buang pembakaran, sehingga saturated steam dapat semakin mengering dan menjadi superheated steam

d. *Steam Drum*

*Steam drum* adalah salah satu komponen pada *boiler* pipa air yang berfungsi sebagai reservoir campuran air dan uap air, dan juga berfungsi untuk memisahkan uap air dengan air pada proses pembentukan uap *superheater*. Namun tidak semua boiler pipa air (water tube) yang menggunakan steam drum ini. *Boiler* supercritical beroperasi pada tekanan sangat tinggi di atas tekanan kritis, sehingga tidak dimungkinkan terbentuk gelembung-gelembung uap air, karena itulah boiler supercritical tidak memerlukan steam drum untuk memisahkan air dengan uap air. adalah bejana tempat penampungan *steam* baik yang datang maupun *steam* hasil penguapan. Drum ini menampung uap jenuh (*saturated steam*) beserta air dengan perbandingan antara 50% air dan 50% uap. untuk menghindari agar air tidak terbawa oleh uap, maka dipasang

sekat-sekat, air yang memiliki suhu rendah akan turun ke bawah dan air yang bersuhu tinggi akan naik ke atas dan kemudian menguap.

e. *Feed Water Drum*

Feed water drum merupakan bagian penting dari operasi boiler, yaitu sebagai tempat penampungan air umpan boiler. Air umpan dimasukkan ke dalam feed water drum dari pompa umpan, kemudian air dialirkan ke seluruh water tube yang ada di boiler.

f. *Water Tube*

*Water tube* berfungsi sebagai tempat pemanasan air umpan boiler yg dibuat sebanyak mungkin hingga penyerapan panas lebih merata dengan efisiensi tinggi.

g. *Safety Valve*

*Safety valve* merupakan alat yang berfungsi untuk membuang uap apabila tekanan uap telah melebihi batas yang telah ditentukan. *Valve* ini terdiri dari valve pengaman saturated steam dan valve pengaman superheated steam. *Safety valve* dapat diatur sesuai dengan aspek yang ditentukan.

h. *Stack (Cerobong)*

*Stack* merupakan cerobong asap yang berfungsi sebagai laluan *flue gas* terbang ke atmosfer. Temperature *flue gas* sebelum terbang ke atmosfer dijaga tidak melebihi 160°C, agar tidak terjadi kerusakan lingkungan atau merusak lapisan ozon.

i. *Blowdown valve*

*Blowdown valve* adalah valve pembuangan sebagian dari air dalam boiler yang telah tinggi konsentrasinya, dan menggantikannya dengan air umpan boiler yang baru sehingga akan menurunkan konsentrasi air dalam boiler.

j. *Pressure Instrument*

*Pressure instrument* merupakan alat yang berfungsi untuk mengukur tekanan steam yang dihasilkan dalam *steam drum* pada boiler.

k. *Temperature Instrument*

*Temperature instrument* merupakan alat yang berfungsi untuk mengukur temperatur steam yang dihasilkan dalam *steam drum* pada boiler.

l. *Water Level Volume*

*Water level volume* merupakan alat yang berfungsi untuk mendeteksi volume air, ketinggian air, dan kualitas air didalam *drum* secara akurat.

m. *Main Steam Valve*

*Main steam valve* merupakan alat yang berfungsi untuk mengatur jumlah dan tekanan uap yang akan disuplai, selain itu berfungsi untuk menghentikan aliran uap untuk disuplai.

## **2.4 Termodinamika**

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 alternative, pembangkit listrik sistem pendingin, pompa kalor merupakan sistem-sistem yang menghasilkan suatu konversi energi (Hougen dkk 1974).

### **2.4.1 Hukum Termodinamika I**

Hukum termodinamika pertama dikenal dengan prinsip konversi energi yang menyatakan bahwa energi itu lestari. Energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, disebut juga hukum kekekalan energi. Walaupun energi terdapat dalam berbagai bentuk, jumlah energi total adalah konstan, dan bila energi hilang dalam satu bentuk, energi ini timbul dalam bentuk yang lain secara bersama-sama (Astu dkk 2013).

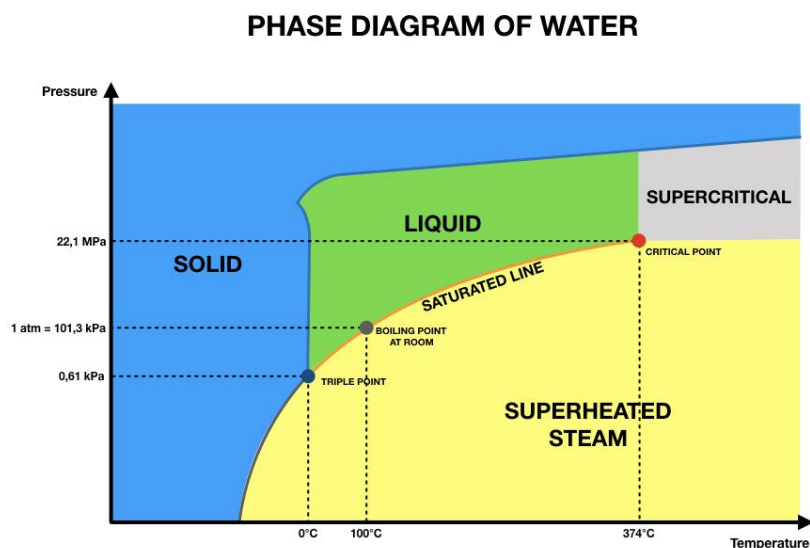
### **2.4.2 Hukum Termodinamika II**

Hukum Termodinamika kedua dinyatakan dengan entropi. pada hukum pertama, energi dalam digunakan untuk mengenali perubahan yang diperbolehkan sedangkan pada hukum kedua entropi digunakan mengenali perubahan spontan di antara perubahan-perubahan yang diperolehkan ini. Hukum kedua berbunyi entropi suatu sistem bertambah selama ada perubahan spontan (Evalina dkk 2019).

## 2.5 Prinsip Kerja Boiler

Air terdiri dari molekul-molekul  $H_2O$  yang bergerak bebas dalam lingkungannya. Molekul-molekul tidak akan meninggalkan lingkungannya karena ada gaya tarik menarik antar molekul itu sendiri yaitu karena adanya ikatan hidrogen. Apabila air tersebut dipanaskan maka kecepatan gerak molekulnya akan bertambah, namun molekul air itu belum mampu melepaskan diri dari lingkungannya. Bila air tersebut terus dipanaskan sampai temperatur didih air maka molekul-molekul air mampu melepaskan diri dari gaya tarik antar molekul. Peristiwa proses penguapan dari molekul-molekul tersebut disebut molekul uap dan uap yang terbentuk disebut uap kering (Heselton 2020).

Proses pembentukan uap pada boiler diawali dengan mengalirkan air umpan *boiler*. Prinsip kerja boiler itu sendiri yaitu mengubah energi panas yang dihasilkan dari pembakaran antara bahan bakar dan udara, dari air menjadi uap (*steam*) dengan temperatur dan tekanan yang tinggi (Heselton 2020).



**Gambar 2.1** Diagram Fasa Air

(Artikel Teknologi, 2019)

Pada diagram fase air tersebut, terbentuk tiga buah kurva yang menjadi batas antara tiga fase fisika air. Kurva pertama menunjukkan batas antara fase padat dengan fase gas, kurva kedua menjadi batas antara fase padat dengan cair, sedangkan kurva ketiga menjadi batas antara fase cair dengan gas. Khusus kurva ketiga ini disebut dengan istilah *saturated line* (garis saturasi). Garis saturasi memiliki fase yang dikenal dengan nama uap saturasi. Di sepanjang garis saturasi,

berapapun besar tekanan dan temperatur, air dan uap air dapat berada di dalam satu kondisi yang sama dengan perbandingan kuantitas sesuai dengan nilai entalpi yang dikandungnya.

Tiga kurva yang membentuk diagram fase air kemudian bertemu di sebuah titik yang dikenal sebagai *triple point*. *Triple point* Kondisi ini berada pada tekanan 0,61 kPa dan temperatur 0,010°C. Nampak pada diagram di atas, di bawah *triple point*, air tidak memiliki fase cair. Di bawah *triple point* ini padatan air (es) akan langsung menguap menjadi gas jika terjadi kenaikan temperatur pada tekanan konstan. Di atas *triple point*, terdapat dua percabangan kurva dengan fungsi masing-masing. Satu kurva membatasi antara fase padat dengan cair, sedangkan kurva lainnya membatasi antara fase cair dengan gas. Di ujung kurva saturasi ini terdapat satu titik yang disebut sebagai *critical point*. *Critical point* adalah sebuah titik yang menjadi batas akhir dari kurva ekuilibrium fase cair dan gas sehingga dapat berada pada satu kondisi tekanan dan temperatur yang sama. *Critical point* air berada pada tekanan 22,1 MPa dan temperatur 374°C.

Ketika sistem berada pada keadaan cairan jenuh, tambahan panas pada tekanan tetap menghasilkan pembentukan uap tanpa perubahan suhu tetapi dengan peningkatan volume spesifik yang cukup besar. Ketika campuran uap-cair ada dalam kesetimbangan, fase cair adalah cairan jenuh dan fase uap adalah uap jenuh. Jika air dipanaskan lebih lanjut sampai sedikit cairan terakhir yang menguap maka keadaan menjadi uap jenuh.

Uap lanjut dari penguapan cairan disebut uap jenuh (*saturated steam*) sepanjang temperatur dan tekanan uap sama seperti cairan jenuh yang terjadi. Uap jenuh dapat digambarkan juga sebagai uap pada temperatur dimana pendinginan uap lanjut disebabkan oleh sebagian uap mengembun dan dengan cara tersebut struktur molekul cairan kembali lagi. Hal tersebut penting untuk dipahami bahwa temperatur jenuh benda cair (temperatur pada waktu cairan akan menguap jika panas ditambahkan) dan temperatur jenuh uap (temperatur pada saat uap akan mengembun jika panas dibuang) akan memberikan tekanan yang sama dan cairan tidak akan cair lagi pada temperatur di atas temperatur jenuh, sedangkan uap tidak akan tetap uap pada temperatur di bawah temperatur jenuh.

Uap pada temperatur di atas temperatur jenuh adalah uap panas lanjut. Jika setelah penguapan, uap dipanaskan sehingga temperatur naik di atas penguapan cairan, uap dikatakan panas lanjut (*superheated*). Uap panas lanjut diperlukan untuk memisahkan uap dari penguapan cairan. Sepanjang uap tetap berhubungan dengan cairan, maka akan tetap jenuh. Hal tersebut disebabkan adanya penambahan panas pada campuran uap-cairan yang hanya akan menguap lebih lanjut adalah cairan dan tidak ada *superheating* yang terjadi. (Hamid 2007).

## 2.6 Proses Pembakaran

Pembakaran adalah proses kimia di mana suatu zat bereaksi cepat dengan oksigen dan mengeluarkan panas. Zat asli disebut bahan bakar, dan sumber oksigen disebut oksidator. Bahan bakarnya bisa padat, cair, atau gas, meskipun untuk penggerak pesawat biasanya bahan bakarnya cair. Oksidator, juga, bisa berupa padat, cair, atau gas, tetapi biasanya berupa gas (udara). Udara mengandung 21% oksigen dan 78% nitrogen, Selama proses pembakaran, saat bahan bakar dan oksidator diubah menjadi produk, panas dihasilkan. Agar pembakaran terjadi, tiga hal harus ada: bahan bakar yang akan dibakar, sumber oksigen, dan sumber panas. Proses pembakaran dapat dikontrol atau dihentikan dengan mengontrol jumlah bahan bakar yang tersedia, jumlah oksigen yang tersedia, atau sumber panas (Nancy 2021).

Pembakaran adalah reaksi antara bahan bakar dan oksidan disertai dengan pelepasan panas:



Biasanya, bahan bakarnya mengandung karbon, seperti bensin, kayu, atau batu bara, dan oksidannya adalah oksigen di udara, meskipun ada bahan bakar non-karbon, terutama hidrogen. Namun, pembakaran dapat menyebabkan emisi karena adanya kandungan pengotor di udara, atau pembakaran tidak sempurna (Russel 2013).

Tujuan dari pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan tiga T pembakaran yaitu:

- a. T- Temperatur. Temperatur yang digunakan untuk pembakaran yang baik harus cukup tinggi sehingga dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia.



- b. T- Turbulensi. Turbulensi yang tinggi menyebabkan terjadinya pencampuran yang baik antara bahan bakar dan pengoksidasi.
- c. T- Time. Waktu harus cukup agar input panas dapat terserap oleh reaktan sehingga berlangsung proses termokimia (UNEP, 2006).

## 2.7 Rasio Udara Bahan Bakar

Rasio Udara-Bahan Bakar (AFR) adalah faktor kunci yang harus dikendalikan untuk mengoptimalkan proses pembakaran dalam hal efisiensi dan dampak lingkungan. AFR didefinisikan sebagai rasio antara laju aliran udara yang diinjeksikan ( $\dot{m}_a$ ) dan laju aliran bahan bakar yang diinjeksikan ( $\dot{m}_f$ ) :

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \dots\dots\dots(2.1)$$

AFR = *Air fuel ratio* (rasio udara bahan bakar)

$\dot{m}_a$  = laju alir udara

$\dot{m}_f$  = laju alir bahan bakar

Untuk proses pembakaran yang baik (suhu tinggi, lama waktu tinggal, dan pencampuran yang baik), ini juga cenderung mengurangi produksi CO dan karbon yang tidak terbakar ke tingkat yang dapat diterima. kondisi sub-stoikiometrik, pasti mengarah pada produksi CO dan sisa karbon yang tidak terbakar di dasar dan aliran abu terbang. Nilai lebih besar menyebabkan adanya kelebihan oksigen dalam gas buang. Oleh karena itu, kondisi lokal dalam tungku dapat berbeda dari keseimbangan udara-bahan bakar global dalam hal stoikiometri (Blondeau dkk 2018).

Udara *Excess Air* dan O<sub>2</sub> optimum pada gas buang berbagai bahan bakar memiliki persentase dan standar yang berbeda. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** *Excess Air* dan O<sub>2</sub> optimum pada gas buang berbagai Bahan Bakar

Bahan Bakar	Optimum Excess Air %	Optimum O <sub>2</sub> pada Stack Gas %
Batubara	20 – 25	4 - 4,5
Biomassa	20 – 40	4 – 6
Stoker firing	25 – 40	4,5 - 6,5
Solar	5 – 20	1 – 3
Gas Bumi/ LPG	5 – 10	1 – 2
Black Liquor	5 – 10	1 – 2

(Sumber : *The Engineering ToolBox*, 2003)

## 2.8 Udara

Udara merujuk kepada campuran gas yang terdapat di permukaan bumi. Sifatnya tidak tampak mata, tidak berbau dan tidak ada rasanya. Udara terdiri dari 3 unsur utama, yaitu udara kering, uap air, dan aerosol. Kandungan udara kering adalah 78,09% nitrogen, 20,95% oksigen, 0,93% argon, 0,04% karbon dioksida, dan gas-gas lain yang terdiri dari neon, helium, metana, kripton, hidrogen, xenon, ozon, radon. Uap air yang ada pada udara berasal dari evaporasi (penguapan) pada laut, sungai, danau, dan tempat berair lainnya. Aerosol adalah benda berukuran kecil, seperti garam, karbon, sulfat, nitrat, kalium, kalsium, serta partikel dari gunung berapi.

**Tabel 2.3** Sifat-sifat Udara

Sifat	Nilai
Densitas pada 0 <sup>0</sup> C	1,2928 kg/m <sup>3</sup>
Temperatur Kritis	-140,7 <sup>0</sup> C
Tekanan Kritis	37,2 atm
Densitas Kritis	350 kg/m <sup>3</sup>
Panas Jenis pada 1000 <sup>0</sup> C , 281,65K dan ),89876 bar	0,28 kal/gr <sup>0</sup> C
Faktor Kompresibilitas	1000
Berat Molekul	28,964
Viskositas	1,76 E-5 poise
Koefisien perpindahan panas	1,76 E-5 W/m.K
Entalpi pada 1200 <sup>0</sup> C	1278 KJ/kg

(*Perry's*, 1996)

## 2.9 Bahan Bakar

Solar adalah bahan bakar minyak nabati hasil destilasi dari minyak bumi mentah. Bahan bakar ini berwarna kuning coklat yang jernih. Penggunaan solar pada umumnya adalah untuk bahan bakar pada semua jenis mesin diesel dengan putaran tinggi (diatas 1000 rpm), yang juga dapat digunakan sebagai bahan bakar

pada pembakaran langsung dalam dapur-dapur kecil yang terutama diinginkan pembakaran yang bersih.

Minyak solar ini biasa juga disebut Gas Oil, Automotive Diesel Oil, High Speed Diesel (Pertamina, 2005).

Bahan bakar solar mempunyai sifat-sifat utama, yaitu:

- a. Warna sedikit kekuningan dan berbau
- b. Encer dan tidak mudah menguap pada suhu normal
- c. Mempunyai titik nyala yang tinggi (40 °C sampai 100°C)
- d. Terbakar secara spontan pada suhu 350°C
- e. Mempunyai berat jenis sekitar 0,82 – 0,86
- f. Mampu menimbulkan panas yang besar (10.500 kcal/kg)
- g. Mempunyai kandungan sulfur yang lebih besar daripada bensin.

Adapun spesifikasi bahan bakar solar adalah sebagai berikut :

**Tabel 2.4** Spesifikasi Minyak Solar

No	Karakteristik	Satuan	Batasan SNI Minyak Solar		Metode Uji	
			Min.	Maks.	ASTM	Lain-lain
1	Bilangan setana/ indeks setana		48		D613	
			45		D4737	
2	Berat Jenis (pada suhu 15 <sup>0</sup> C)	Kg/m <sup>3</sup>	815	870	D4052/ D1298	
3	Viskositas (pada suhu 40 <sup>0</sup> C)	mm <sup>3</sup> /s	2,0	4,5	D445	
4	Kandungan Sulfur	% m/m	-	0,35 <sup>1)</sup> 0,30 <sup>2)</sup> 0,25 <sup>3)</sup> 0,05 <sup>4)</sup> 0,005 <sup>5)</sup>	D4294/ D5453	
5	Distilasi : 90% vol.penguapan	<sup>0</sup> C	-	370	D86	
6	Titik Nyala	<sup>0</sup> C	52	-	D93	
7	Titik Kabut	<sup>0</sup> C	-	18	D2500	
8	Titik Tuang	<sup>0</sup> C	-	18	D97	
9	Residu Karbon	%m/m	-	0,1 <sup>6)</sup>	D189	
10	Kandungan Air	mm/kg	-	500	D6304	
11	Kandungan FAME	% v/v	-	020 <sup>7)</sup>	D7806/ D7371	
12	Korosi Bilah Tembaga		-	Kelas 1	D130	
13	Kandungan Abu	%m/m	-	0,01	D482	
14	Kandungan Sedimen	%m/m	-	0,01	D473	
15	Bilangan Asam Kuat	mgKOH/gr	-	0	D664	
16	Bilangan Asam Total	mgKOH/gr	-	0,6	D664	
17	Penampilan Visual		Jernih dan terang	-	-	
18	Warna	No. ASTM		3,0	D1500	
19	Lubricity (HFRR wear scar dia. @60	micro	-	460 <sup>8)</sup>	D6079	
20	Kestabilan Oksidasi Metode Rancimat	Jam	35			EN1571

(Sumber : Surat Keputusan Dirjen Migas)

## 2.10 Efisiensi dan Rasio Penguapan Boiler

Ada dua metode pengkajian efisiensi boiler yaitu metode langsung dan tidak langsung. Metode langsung didapat dengan membandingkan energi yang terkandung dalam steam dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar boiler. Sedangkan metode tidak langsung merupakan perbedaan antara kehilangan dan energi yang masuk.

Standar acuan untuk uji boiler yang adalah *British Standard, BS 845:1978* dan *USA standard ASME PTC -4-1 Power test code steam generating units*.

Efisiensi termal boiler dipengaruhi oleh tiga parameter regenerasi air umpan berupa distribusi enthalpy untuk menaikkan panas, suhu air umpan optimum yang sesuai dan jumlah tahap regenerative (Su, Chaudri, Tian, Su, & Qiu, 2014).

Metode langsung atau metode input output didapatkan dengan membandingkan panas yang dimanfaatkan menjadi *steam* dengan panas masuk yaitu panas bahan bakar, udara dan panas air masuk boiler (ASME PTC -4-1).

$$\text{Efisiensi boiler} = \frac{\text{Output}}{\text{input}} \dots\dots\dots(2.2)$$

.....(ASME PTC-4-1)

Sedangkan rasio evaporasi boiler didefinisikan sebagai kilogram steam generator per kilogram konsumsi bahan bakar atau jumlah kg steam yang diproduksi untuk setiap kg bahan bakar (Bora 2014)

$$\text{Evaporation Ratio} = \frac{\text{quantity of steam generation (kg)}}{\text{quantity of fuel generator (kg)}} \dots\dots\dots(2.3)$$

...(Bora 2014)