

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Boiler

Boiler merupakan mesin kalor (*thermal engineering*) yang mentransfer energi – energi kimia atau energi otomis menjadi kerja (usaha) (Muin 1988:28). *Boiler* atau ketel *steam* adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan *steam*. *Steam* diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar (Yohana dan Askhabulyamin 200:13). *Boiler* mengubah energi – energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. *Boiler* dirancang untuk melakukan atau memindahkan kalor 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 (Muin 1998 :8).

2.2 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 pembakaran dari ruang bakar mengalir didalamnya, sehingga akan memanasi dan menguapkan air yang berada di sekeliling pipa – pipa api tersebut. Pipa - pipa api berada atau terendam didalam air yang akan diuapkan. Volume air kira – kira $\frac{3}{4}$ dari tangki ketel.

Jumlah *pass* dari *boiler* tergantung dari jumlah laluan vertikal dari pembakaran diantara *furnace* dan pipa – pipa api. Laluan gas pembakaran pada *furnace* dihitung sebagai *pass* pertama *boiler* jenis ini banyak dipakai untuk industri pengolahan mulai skala kecil sampai skala menengah (Raharjo dan Karnowo 2008: 180).

Dalam perancangan *boiler* ada beberapa faktor penting yang harus dipertimbangkan agar *boiler* yang direncanakan dapat bekerja dengan baik 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. Konstruksi yang sederhana dan perawatan mudah
- e. Tidak perlu air isian yang berkualitas tinggi

Kerugian ketel pipa api :

1. Tekanan *steam* hasil rendah
2. Kapasitas kecil
3. Pemanasan relatif lama

Prinsip aliran gas dalam ketel *steam* pipa api ada 3 macam :

1. Kostruksi dua laluan (*pass*)

Konstruksi ini merupakan konstruksi ketel scotch yang mula – mula lorong api yang besar dibutuhkan untuk mendapatkan bidang – bidang pemanas yang luas.

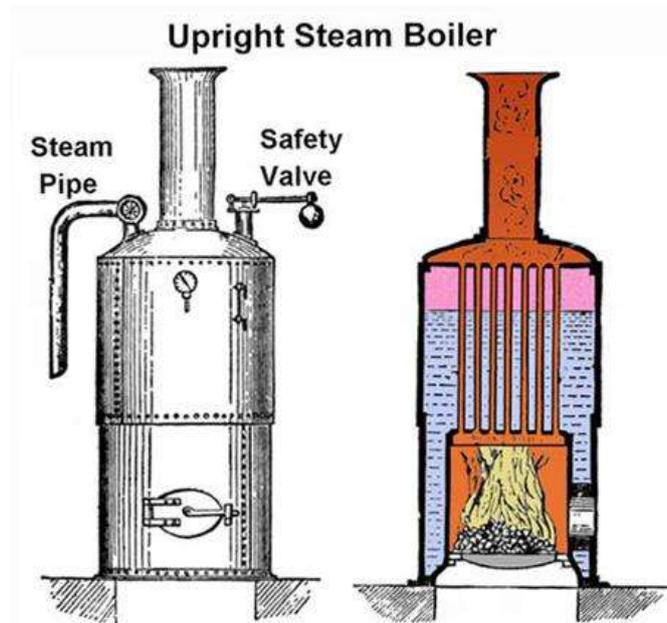
1. Konstruksi tiga laluan (*pass*)

Konstruksi ini gas asap melewati jalan yang lebih panjang sebelum meninggalkan cerobong, sehingga dapat menaikkan efisiensi kalor, akan tetapi tenaga yang dibutuhkan *draft fan* akan membesar akibat kerugian tekanan gas asap.

2. Konstruksi empat laluan (*pass*)

Konstruksi ini merupakan unit yang mempunyai efisiensi yang lebih tinggi, karena jalan asap menjadi lebih panjang, maka tenaga *draft fan*

menjadi lebih besar pula. Agar gas asap lebih tinggi dibuat ukuran pipa – pipa untuk pass – pass berikut yang lebih kecil. Untuk lebih jelas boiler pipa api tipe vertikal dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Boiler Vertikal
(Sumber : Science.howstuffworks.com)

2.3 Dasar 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 alternatif, pembangkit listrik, sistem pendingin, pompa kalor merupakan sistem – sistem yang menghasilkan suatu konversi energi (Sutini Pujiastuti Lestari, 2011).

2.3.1 Hukum Termodinamika 1

Bunyi hukum Termodinamika I adalah “Energi tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah bentuknya saja.” Berdasarkan uraian tersebut terbukti bahwa kalor (Q) yang diserap sistem tidak hilang. Oleh sistem, kalor ini akan diubah menjadi usaha luar (W) dan atau penambahan energi dalam (U) (Sutini Pujiastuti Lestari, 2011).

2.3.2 Hukum Termodinamika II

Hukum kedua termodinamika 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 diperbolehkan ini. Hukum kedua berbunyi entropi suatu sistem bertambah selama ada perubahan spontan.

$$\Delta S_{\text{tot}} \geq 0 \quad (1)$$

Proses irreversibel (seperti pendinginan hingga mencapai temperatur yang sama dengan lingkungan dan pemuai bebas dari gas) adalah proses spontan, sehingga proses itu disertai dengan kenaikan entropi. Proses irreversibel menghasilkan entropi, sedangkan proses reversibel adalah perubahan yang sangat seimbang, dengan sistem dalam keseimbangan dengan lingkungannya pada setiap tahap. Proses reversibel tidak menghasilkan entropi, melainkan hanya memindahkan entropi dari suatu bagian sistem terisolasi ke bagian lainnya (Atkins, 1999).

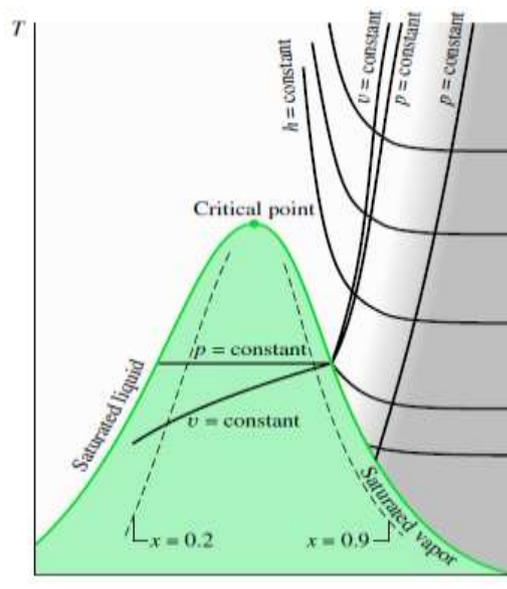
Sifat atau keadaan perilaku partikel dinyatakan dalam besaran entropi, entropi didefinisikan sebagai bentuk ketidakteraturan perilaku partikel dalam sistem. Entropi didasarkan pada perubahan setiap keadaan yang dialami partikel dari keadaan awal hingga keadaan akhirnya.

Semakin tinggi entropi suatu sistem, semakin tidak teratur pula sistem tersebut, sistem menjadi lebih rumit, kompleks, dan sulit diprediksi. Untuk mengetahui konsep keteraturan, mula-mula kita perlu membahas hukum kedua termodinamika yang dikenal sebagai ketidaksamaan Clausius dan dapat diterapkan pada setiap siklus tanpa memperhatikan dari benda mana siklus itu mendapatkan energi melalui perpindahan kalor. Ketidaksamaan Clausius mendasari dua hal yang digunakan untuk menganalisis sistem tertutup dan volume tetap berdasarkan hukum kedua termodinamika yaitu sifat entropi dan neraca entropi. Ketidaksamaan Clausius menyatakan bahwa:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (2)$$

dimana dQ mewakili perpindahan kalor pada batas sistem selama terjadinya siklus, T adalah temperatur absolut pada daerah batas tersebut. Sedangkan dS dapat mewakili tingkat ketidaksamaan atau nilai entropi. Pada saat hukum kedua termodinamika diterapkan, diagram entropi sangat membantu untuk menentukan lokasi dan menggambarkan proses pada diagram dimana koordinatnya adalah nilai entropi. Diagram dengan salah satu sumbu koordinat berupa entropi yang sering digunakan adalah diagram temperatur-entropi (T - s). Adapun penjelasan terdapat pada gambar berikut. Bentuk umum dari diagram entropi dapat dilihat pada Gambar 2. Pada daerah uap panas lanjut, garis-garis volume spesifik konstan, kemiringannya lebih curam dari garis-garis tekanan konstan. Garis-garis kualitas tetap ditunjukkan dalam daerah dua fase cair-uap. Pada beberapa gambar, garis kualitas uap tetap ditandai sebagai garis-garis persen uap yang merupakan rasio massa cairan dengan massa total.

Pada daerah uap panas lanjut dalam diagram T - s , garis-garis entalpi spesifik konstan hampir membentuk garis lurus pada saat tekanan berkurang. Keadaan ini ditunjukkan pada daerah terarsir pada Gambar 2. Untuk keadaan pada daerah ini, entropi ditentukan hanya dengan temperatur. Variasi tekanan antara beberapa keadaan tidak berpengaruh besar.

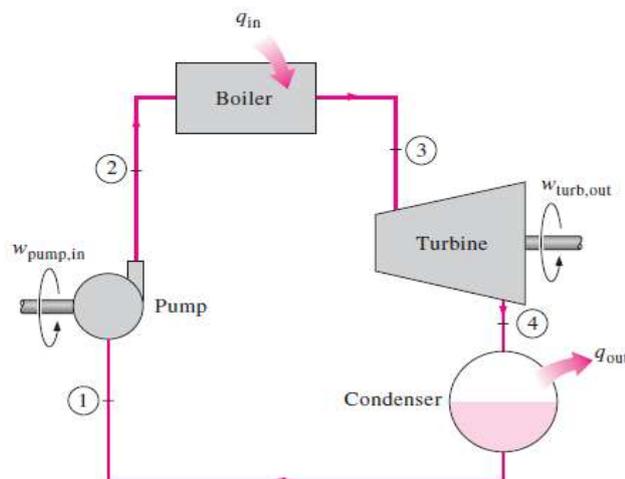


Gambar 2. Diagram Temperatur-Entropi
(Sumber : Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro, (2006))

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Dalam pembangkit listrik tenaga uap, energi primer yang dikonversikan menjadi energi listrik adalah bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan dapat berupa batubara (padat), minyak (cair), dan gas.

Konversi energi tingkat pertama yang terjadi di pembangkit listrik tenaga uap adalah konversi energi primer menjadi energi panas (Kalor). Hal ini dilakukan dalam ruang bakar dari ketel uap. Energi panas ini kemudian dipindahkan ke dalam air yang ada dalam *steam drum*. Uap dari *steam drum* dialirkan ke turbin uap. Dalam turbin uap, energi uap dikonversikan menjadi energi mekanis penggerak generator, dan akhirnya energi mekanik dari turbin uap dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Secara skematis proses pembangkit listrik tenaga uap dapat dilihat pada Gambar 3.



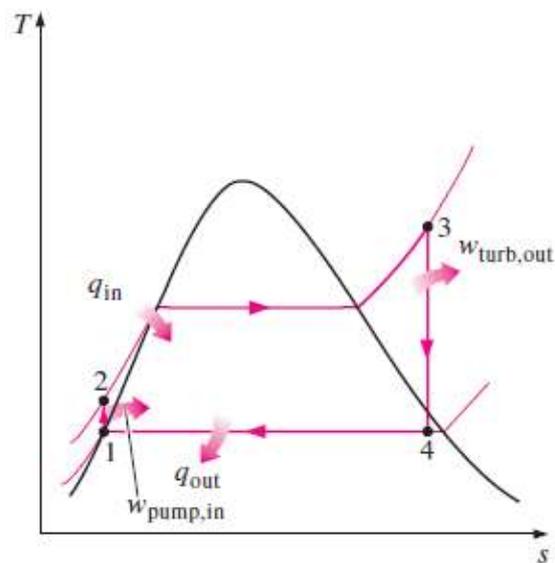
Gambar 3. Skematik Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

Siklus ideal yang mendasari siklus kerja dari suatu pembangkit daya uap adalah siklus Rankine. Siklus Rankine berbeda dengan siklus-siklus udara ditinjau dari fluida kerjanya yang mengalami perubahan fase selama siklus pada saat evaporasi dan kondensasi. Perbedaan lainnya secara termodinamika, siklus uap dibandingkan dengan siklus gas adalah bahwa perpindahan kalor pada siklus uap dapat terjadi secara isothermal.

Proses perpindahan kalor yang sama dengan proses perpindahan kalor pada siklus Carnot dapat dicapai pada daerah uap basah dimana perubahan entalpi

fluida kerja akan menghasilkan penguapan atau kondensasi, tetapi tidak pada perubahan temperatur. Temperatur hanya diatur oleh tekanan uap fluida.

Kerja pompa pada siklus Rankine untuk menaikkan tekanan fluida kerja dalam fase cair akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan pemampatan untuk campuran uap dalam tekanan yang sama pada siklus Carnot. Siklus Rankine ideal dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Siklus Rankine Sederhana
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

Siklus Rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses :

- 1-2 kompresi isentropik dengan pompa
- 2-3 penambahan panas dalam *boiler* secara isobar
- 3-4 ekspansi isentropik pada turbin
- 4-1 pelepasan panas pada kondenser secara isobar dan isotermal

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh dan dikompresi sampai tekanan operasi *boiler*. Temperatur air akan meningkat selama kompresi isentropik karena menurunnya volume spesifik air. Air memasuki *boiler* sebagai cairan terkompresi (*compressed liquid*) pada kondisi 2 dan akan menjadi uap *superheated* pada kondisi 3. Dimana panas diberikan ke *boiler* pada tekanan yang tetap. Boiler dan seluruh bagian yang menghasilkan steam ini disebut *steam generator*. Uap *superheated* pada kondisi 3 kemudian akan memasuki turbin

untuk diekspansi secara isentropik dan akan menghasilkan kerja untuk memutar shaft yang terhubung dengan generator listrik sehingga dapat dihasilkan listrik. Tekanan dan temperatur dari *steam* akan turun selama proses ini menuju keadaan 4 dimana *steam* akan masuk kondenser dan biasanya sudah berupa uap jenuh. *Steam* ini akan dicairkan pada tekanan konstan didalam kondenser dan akan meninggalkan kondenser sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini (Cengel dan Boles, 1994 : 553).

2.5 Komponen- komponen Boiler

a. *Furnace* (Ruang bakar)

Furnace (ruang bakar) berfungsi sebagai tempat pembakaran bahan bakar. Bahan bakar dan udara dimasukkan ke dalam ruang bakar sehingga terjadi pembakaran. Dari pembakaran bahan bakar dihasilkan sejumlah panas dan nyala api/gas asap. Dinding ruang bakar umumnya dilapisi dengan pipa-pipa. Semakin cepat laju peredaran air, pendinginan dinding pipa bertambah baik dan kapasitas *steam* yang dihasilkan bertambah besar.

Idealnya, *furnace* harus memanaskan bahan sebanyak mungkin sampai mencapai suhu yang seragam dengan bahan bakar. Kunci dari operasi *furnace* yang efisien yaitu terletak pada pembakaran bahan bakar yang sempurna dengan udara berlebih yang minim. *Furnace* beroperasi dengan efisiensi yang relatif rendah (paling rendah 7%) dibandingkan dengan peralatan pembakaran lainnya seperti *boiler* (dengan efisiensi lebih dari 90%). Hal ini disebabkan oleh suhu operasi yang tinggi dalam *furnace*. Secara umum bentuk ruang bakar terdiri atas dua jenis yaitu :

1. Berbentuk silinder
2. Berbentuk kotak

Ruang bakar berbentuk silinder tegak, *tube* pada daerah radiasi dipasang secara vertikal. *Tube* yang satu dengan yang lainnya disambung dengan menggunakan U bend. *Burner* terletak pada bagian bawah, sehingga nyala api sejajar dengan tube dapur. Bentuk lantai adalah lingkaran, sedang *burner* dipasang di lantai dengan arah pancaran api vertikal. *Tube* di ruang pembakaran dipasang

vertikal. *Furnace* jenis ini bisa didesain tanpa atau dengan ruang konveksi. Jenis *tube* yang dipasang di ruang konveksi bisa *bare tube*, *finned tube*, tetapi pada umumnya digunakan *finned tube* untuk mempercepat proses perpindahan panas karena konveksi.

Furnace terdiri dari beberapa bagian utama yaitu :

1. *Stack* (Cerobong asap)

Cerobong asap berfungsi untuk membuang gas asap yang tidak dipakai lagi ke udara bebas, untuk mengurangi polusi disekitar instalasi *boiler*, sehingga proses pembakaran dapat berlangsung dengan baik. Dengan cerobong asap pengeluaran gas asap dapat lebih sempurna.

2. *Burner*

Pada prinsipnya *burner* adalah transduser yang berguna untuk mengubah satu bentuk energi ke bentuk energi yang lain. Dalam kasus ini *burner* berfungsi untuk mengubah energi kimia yang terdapat dalam bahan bakar, menjadi energi panas di dalam *furnace* melalui suatu reaksi kimia dalam nyala api. Kunci utama *burner* adalah untuk membakar bahan bakar seefisien mungkin dan menghasilkan *heat flux* yang optimum. Pada *premix burner* konvensional, bahan bakar dicampurkan dengan udara primer yang mengalir ke dalam *burner*. Aliran udara primer harus dimaksimalkan tanpa menaikkan tinggi nyala api dalam *burner*.

b. *Steam Drum*

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

c. *Superheater*

Komponen ini merupakan tempat pengeringan *steam* dan siap dikirim melalui main *steam pipe* dan siap untuk menggerakkan turbin *steam* atau menjalankan proses industri.

d. Turbin *Steam*

Turbin *steam* berfungsi untuk mengkonversi energi panas yang dikandung oleh *steam* menjadi energi putar (energi mekanik). Poros turbin dikopel dengan poros generator sehingga ketika turbin berputar generator juga ikut berputar.

e. Kondensor

Kondensor berfungsi untuk mengkondensasikan *steam* dari turbin (*steam* yang telah digunakan untuk memutar turbin).

f. Generator

Generator berfungsi untuk mengubah energi putar dari turbin menjadi energi listrik.

g. *Economizer*

Komponen ini merupakan ruangan pemanas yang digunakan untuk memanaskan air dari air yang terkondensasi dari sistem sebelumnya maupun air umpan baru.

h. *Safety valve*

Komponen ini merupakan saluran buang steam jika terjadi keadaan dimana tekanan *steam* melebihi kemampuan *boiler* menahan tekanan *steam*.

i. *Blowdown valve*

Komponen ini merupakan saluran yang berfungsi membuang endapan yang berada di dalam pipa *steam*.

2.6 Turbin Uap

Turbin uap adalah mesin tenaga yang berfungsi untuk mengubah energi thermal (energi panas yang terkandung dalam uap) menjadi energi poros (putaran). Sebelum energi termal (*enthalpy*) diubah menjadi energi poros, energi tersebut diubah menjadi energi kinetik. Secara umum, sebuah turbin uap secara prinsip terdiri dari dua komponen berikut (Yunus, 2010):

1. Nosel (*nozzle*), dimana energi panas dari uap tekanan tinggi diubah menjadi energi kinetik, sehingga uap keluar nosel dengan kecepatan

sangat tinggi.

2. Sudu, yang merubah arah dari uap yang disemprotkan nosel, sehingga akan bekerja gaya sudu karena perubahan momentum memutar turbin.

2.6.1 Prinsip Kerja Turbin Uap

Suatu turbin dapat terdiri dari satu dua atau banyak silinder yang merupakan mesin rotasi berfungsi untuk merubah energi panas menjadi energi mekanik. Tiap silinder memiliki sebuah rotor yang disangga oleh bantalan-bantalan. Rotor-rotor tersebut disambung menjadi satu termasuk rotor generator. Ruang diantara rotor dengan rumah turbin (*casing*) terdiri dari rangkaian sudu-sudu tetap dan sudu-sudu gerak yang dijajarkan berselang-seling.

Sudu-sudu tetap dipasang disekeliling bagian dalam rumah turbin, sedang rangkaian sudu gerak dipasang pada rotor. Bila kedalam turbin dialirkan uap, maka energi panas yang dikandung uap akan diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros.

Mula-mula energi panas dalam uap diubah terlebih dahulu menjadi energi kinetik (kecepatan) dengan cara melewatkan uap melalui nosel-nosel. Uap berkecepatan tinggi kemudian diarahkan ke sudu-sudu sehingga menghasilkan putaran poros turbin dimana energi mekanik ini selanjutnya dapat digunakan untuk menggerakkan generator, pompa dan sebagainya. Perubahan energi panas menjadi energi kinetik terjadi didalam nosel (sudu diam) turbin, sedangkan perubahan energi kinetik menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran rotor turbin terjadi pada sudu jalan turbin.

Jadi didalam turbin, uap mengalami proses ekspansi yaitu penurunan tekanan dan mengalir secara kontinyu. Akibat pengurangan tekanan uap didalam rangkaian sudu-sudu, maka kecepatan uap meningkat sangat tinggi. Kecepatan aliran uap tersebut akan bergantung pada selisih banyaknya panas uap sebelum dan sesudah ekspansi. Selisih banyaknya panas uap sebelum dan sesudah ekspansi didalam turbin dinamakan penurunan panas/*heat drop* (Pusdiklat PLN, 2006).

2.6.2 Klasifikasi Turbin Uap

Ditinjau dari cara kerja transfer energi uap ke poros, turbin uap dapat dibedakan atas dua tipe:

- a. Turbin impuls
- b. Turbin reaksi

a. Turbin Impuls

Turbin impuls pertama kali dibuat oleh Branca pada tahun 1629. Dimana pancaran uap yang keluar dari nosel menghembus daun-daun rotor (disebut blades) sehingga rotor berputar.

Sudu impuls juga disebut sudu aksi atau sudu tekanan tetap, adalah sudu dimana uap mengalami ekspansi hanya dalam sudu-sudu tetap. Sudu-sudu tetap berfungsi sebagai nosel (saluran pancar) sehingga uap yang melewati akan mengalami peningkatan energi kinetik.

Turbin impuls adalah turbin yang mempunyai roda jalan atau rotor dimana terdapat sudu-sudu impuls. Sudu-sudu impuls mudah dikenali bentuknya, yaitu simetris dengan sudut masuk ϕ dan sudut keluar γ yang sama (20°), pada turbin biasanya ditempatkan pada bagian masuk dimana uap bertekanan tinggi dengan volume spesifik rendah. Bentuk turbin impuls pendek dengan penampang yang konstan.

Ciri yang lain adalah secara termodinamika penurunan energi terbanyak pada nosel, dimana pada nosel terjadi proses ekspansi atau penurunan tekanan. Sudu-sudu turbin uap terdiri dari sudu tetap dan sudu gerak. Sudu tetap berfungsi sebagai nosel dengan energi kinetik yang naik, sedangkan pada sudu bergerak tekanannya konstan.

Proses perubahan atau konversi energi pada turbin mulai terjadi pada nosel, yaitu ekspansi fluida gas pada nosel. Pada proses ekspansi di nosel, energi fluida dan tekanan mengalami penurunan. Berbarengan dengan penurunan energi dan tekanan, kecepatan fluida gas naik karena proses ekspansi. Kemudian, fluida gas dengan energi kinetik tinggi menumbuk sudu turbin dan memberikan sebagian

energinya ke sudu, sehingga sudu pun bergerak. Perubahan energi dengan tumbukan fluida di sudu adalah azas impuls.

Perubahan energi dengan azas reaksi, sudu turbin reaksi berfungsi seperti nosel. Hal ini berarti, pada sudu turbin reaksi terjadi proses ekspansi, yaitu penurunan tekanan fluida gas dengan dengan dibarengi kenaikan kecepatan. Prinsip reaksi adalah gerakan melawan aksi, jadi dapat dipahami dengan kenaikan kecepatan fluida gas pada sudu turbin reaksi, sudu turbin pun akan bergerak sebesar nilai kecepatan tersebut dengan arah yang berlawanan. Proses ekspansi dapat dilihat pada Gambar 5.

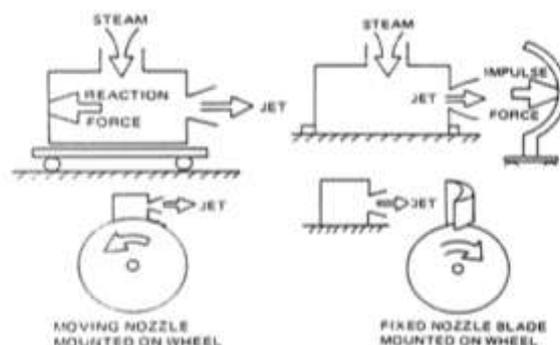


Gambar 5. Proses Ekspansi Pada Nozle
(Masagus S Rizal, 2013)

b. Turbin reaksi

Turbin ini dirancang pertama oleh Hero, 120 tahun sebelum Masehi. Reaksi dari pancaran uap yang keluar dari ujung pipa yang disebut Nozel.

Dalam suatu turbin yang terdiri dari 100% sudu-sudu reaksi, maka sudu-sudu gerak juga berfungsi sebagai nosel-nosel sehingga uap yang melewatinya akan mengalami peningkatan kecepatan dan penurunan tekanan. Peningkatan kecepatan ini akan menimbulkan gaya reaksi yang arahnya berlawanan dengan arah kecepatan uap.

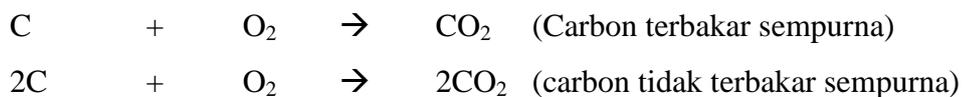


Gambar 6. Prinsip Dasar Sudu Reaksi dan Sudu Impuls
(Sumber: Pusat Pendidikan dan Pelatihan PT. PLN (Persero) (2006))

2.7 Proses Pembakaran

Pembakaran merupakan oksidasi cepat bahan bakar 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, hidrogen dan sulfur.

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. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan “tiga T” 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.

Dalam proses pembakaran tidak terlepas dari penyalaan yaitu sebuah keadaan transisi dari tidak reaktif ke reaktif karena rangsangan atau dorongan eksternal yang memicu reaksi termokimia diikuti dengan transisi yang cepat sehingga pembakaran dapat berlangsung. Penyalaan terjadi bila panas yang dihasilkan oleh pembakaran lebih besar dari panas yang hilang ke lingkungan. Dalam proses penyalaan ini dapat dipicu oleh energi *thermal* yang merupakan transfer energi *thermal* ke reaktan oleh konduksi, konveksi, radiasi atau kombinasi dari ketiga macam proses tersebut, Kimia yaitu dengan memasukan bahan kimia reaktif.

Temperatur adiabatik merupakan temperatur teoritis maksimum yang dicapai oleh produk-produk pembakaran bahan bakar dengan oksigen atau udara. Temperatur adiabatik terjadi pada udara lebih sama dengan nol (kondisi stokiometrik). Namun temperatur adiabatik juga bisa tidak tercapai hal ini disebabkan oleh:

a. kehilangan panas

yaitu proses pembakaran tidak terjadi seketika. Pembakaran yang cepat akan mereduksi kehilangan panas. Akan tetapi jika pembakaran berjalan lambat maka gas terdinginkan dan akan terjadi pembakaran yang tidak sempurna.

b. terjadinya diasosiasi CO₂ dan H₂O

pada temperatur diatas 300 °F, CO₂ dan H₂O terdisosiasi dengan menyerap panas. Jika gas mendingin produk disosiasi berekombinasi dan melepas energi disosiasinya. Jadi panasnya tidak hilang akan tetapi temperatur nyala aktual lebih rendah. (hidayat: 2004).

Rumus empiris untuk pembakaran temperatur adiabatik :

$$T_{ad} = T_o + \frac{3750}{1 + 750/h_f} \quad (3)$$

Dimana :
 T_{ad} : Temperatur Adiabatik (°F)
 T_o : Temperatur Udara Pembakaran (°F)
 h_f : panas pembakaran (Btu/lb)

2.7.1 Kebutuhan Udara Pembakaran

Dalam suatu pembakaran perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran. Rasio campuran bahan bakar dan udara dapat dinyatakan dalam beberapa parameter yang lazim antara lain AFR (*Air Fuel Ratio*), FAR (*Fuel Air Ratio*), dan Rasio Ekuivalen (ϕ).

2.7.2 Rasio Udara-Bahan Bakar (*Air Fuel Ratio/AFR*)

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 adalah jumlah mol bahan bakar.

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} = \frac{M_a N_a}{M_f N_f} \quad (4)$$

Dimana : AFR : *Air Fuel Ratio*

\dot{m}_a : laju massa udara (kg/s)

\dot{m}_f : laju massa bahan bakar (kg/s)

M_a : massa molar udara

N_a : jumlah mol udara

M_f : massa molar bahan bakar

N_f : jumlah mol bahan bakar

2.7.3 Rasio Bahan Bakar-Udara (*Fuel Air Ratio/ FAR*)

Rasio bahan bakar-udara merupakan kebalikan dari AFR yang dirumuskan sebagai berikut :

$$FAR = \frac{m_f}{m_a} = \frac{M_f N_f}{M_a N_a} \quad (5)$$

FAR dan AFR dapat juga dinyatakan dalam perbandingan volume. Untuk bahan bakar gas, perbandingan volume lebih sering dipergunakan karena sebanding dengan perbandingan jumlah mol.

2.7.4 Rasio Ekivalen (*Equivalent Ratio, Φ*)

Rasio ini termasuk juga rasio yang umum digunakan. Rasio ekivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stokiometri dengan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual atau juga sebagai perbandingan antara rasio bahan bakar-udara (FAR) aktual dengan rasio bahan bakar-udara (FAR) stoikiometri (Mahandri,2010:10).

2.8 Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan pada uji kinerja prototipe pembangkit uap yang dirancang adalah solar dan LPG. Berikut adalah pembahasan mengenai kedua jenis bahan bakar tersebut.

2.8.1 Solar

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.

Berikut spesifikasi solar dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Solar

No	Karakteristik	Satuan	Batasan		Metode Uji ASTM
			Min.	Maks.	
1	Bilangan Cetana :				
	- Angka Cetana atau	-	51	-	D 613 – 95
	- Indeks Cetana	-	48	-	D 4737 - 96a
2	Berat Jenis (pada suhu 15 ⁰ C)	Kg/m ³	82	860	D 445 – 97
			0		
3	Viskositas (pada suhu 15 ⁰ C)	mm ² /s	2	4,5	D 445 – 97
4	Kandungan Sulfur	% mm	-	0,05	D 2622 – 98
5	Distilasi				
	T 90	⁰ C	-	340	
	T 95	⁰ C	-	360	
	Titik Didih Akhir	⁰ C	-	370	

6	Titik Nyala	$^{\circ}\text{C}$	55	-	D 93 799c
7	Titik Tuang	$^{\circ}\text{C}$	-	18	D 97
8	Residu Karbon	% mm	-	0,30	D 4530 – 93
9	Kandungan Air	mg/kg	-	500	D 1744 – 92
10	Stabilitias Osidasi	g/m^3	-	25	D 2274 – 94

(Sumber : Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi (2006))

2.8.2 LPG

LPG (*liquified petroleum gas*) adalah campuran dari berbagai unsur hidrokarbon yang berasal dari gas alam atau kilang *crude oil*. Dengan menambah tekanan dan menurunkan suhunya, gas berubah menjadi cair. Komponennya didominasi propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}). Elpiji juga mengandung hidrokarbon ringan lain dalam jumlah kecil, misalnya etana (C_2H_6) dan pentana (C_5H_{12}). Sebagai bahan bakar, gas LPG mudah terbakar apabila terjadi persenyawaan di udara (PT. Aptogas Indonesia, 2015)

Rasio antara volume gas bila menguap dengan gas dalam keadaan cair bervariasi tergantung komposisi, tekanan dan temperatur, tetapi biasanya sekitar 250:1. Adapun spesifikasi LPG dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi LPG

<i>Description</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Specific Gravity at 60/60 °F</i>	<i>To be reported</i>	
<i>Vapour pressure 100°F psig</i>	-	120
<i>Weathering test at 36°F %Vol</i>	95	-
<i>Copper Corrosion 1 hrs 100 ° F</i>	-	ASTM No.1
<i>Total Sulphur, grains/100 cuft</i>	-	
<i>Water content</i>	<i>Free of water</i>	<i>Free of water</i>
<i>Komposisi :</i>		<i>D-2163 Test</i>
<i>C2 % vol</i>	-	0.2
<i>C5 + (C5 and heavier) % vol</i>	97.5	-
<i>thyl or Buthyl mercaptan added ml/100 AG</i>		50

(Sumber: Pertamina (2005))

2.9 Perpindahan Kalor

Perpindahan Kalor adalah bentuk kalor yang dapat berpindah dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah. Sedangkan kalor ini merupakan suatu bentuk energi atau dapat juga didefinisikan sebagai jumlah panas yang ada dalam suatu benda.

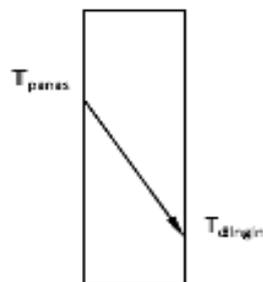
2.9.1 Macam-macam Perpindahan Kalor

Perpindahan dari suatu tempat ke tempat yang lain melalui 3 cara, yaitu Konduksi, Konveksi dan Radiasi.

1. Konduksi (*Hantaran*).

Perpindahan kalor secara konduksi adalah proses perpindahan kalor dimana kalor mengalir dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur rendah dalam suatu medium (padat, cair, atau gas) atau antara medium –medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung sehingga terjadi pertukaran energi dan momentum.

Perpindahan Panas Konduksi pada dinding dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Perpindahan Panas Konduksi pada Dinding

(Sumber : J.P. Holman, hal :33)

Laju perpindahan panas yang terjadi pada perpindahan panas konduksi adalah berbanding dengan gradien suhu normal sesuai dengan persamaan berikut.

Persamaan Dasar Konduksi :

$$q_k = -k \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Keterangan :

q = Laju Perpindahan Panas (kj /det,W)

k = Konduktivitas Termal (W/m.⁰C)

A = Luas Penampang (m^2)

dT = Perbedaan Temperatur ($^{\circ}C$, $^{\circ}F$)

ΔT = Perubahan Suhu ($^{\circ}C$, $^{\circ}F$)

dX = Perbedaan Jarak (m/det)

dT/dx = gradient temperatur ke arah perpindahan kalor. Konstanta positif “ k ” disebut konduktifitas atau kehantaran termal benda itu, sedangkan tanda minus disisipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika, yaitu bahwa kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala temperatur. (J.P. Holman, hal :2)

hubungan dasar aliran panas melalui konduksi adalah perbandingan antara laju aliran panas yang melintas permukaan isothermal dan gradien yang terdapat pada permukaan tersebut berlaku pada setiap titik dalam suatu benda pada setiap waktu yang dikenal dengan hukum fourier. Dalam penerapan hukum Fourier (persamaan 6) pada suatu dinding datar, jika persamaan tersebut diintegrasikan maka akan didapatkan, (J.P. Holman, hal : 26)

$$q_k = -k \cdot A \frac{dT}{dx} (T_2 - T_1) \quad (7)$$

Tetapan kesebandingan (k) adalah sifat fisik bahan atau material yang disebut konduktivitas termal. Persamaan (6) merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Berdasarkan rumusan itu maka dapatlah dilaksanakan pengukuran dalam percobaan untuk menentukan konduktivitas termal berbagai bahan. Pada umumnya konduktivitas termal itu sangat tergantung pada suhu. Konduktivitas termal pada berbagai bahan dapat dilihat pada tabel 3 berikut.

Daftar Tabel 3. Konduktivitas Termal Berbagai Bahan pada $0^{\circ}C$

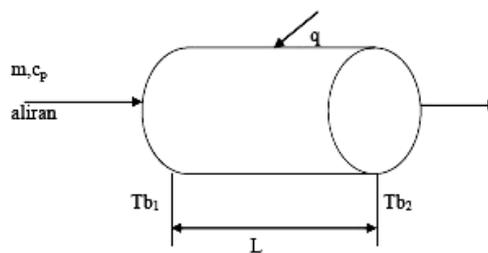
No.	Bahan	Konduktivitas Termal K	
		W/m. $^{\circ}C$	Btu/h. Ft. $^{\circ}F$
<i>Logam</i>			
1.	Perak (murni)	410	237
2.	Tembaga (murni)	385	223
3.	Alumunium (murni)	202	117

4.	Nikel (murni)	93	54
5.	Besi (murni)	73	42
6.	Naja karbon, 1% C	43	25
7.	Timbal (murni)	35	20,3
8.	Baja karbon – nikel	16,3	9,4
Bukan Logam			
1.	Kuarsa (sejajar sumbu)	41,6	24
2.	Magnesit	4,15	2,4
3.	Marmar	2,08 – 2,94	1,2 – 1,7
4.	Batu pasir	1,83	1,06
5.	Kaca jendela	0,78	0,45
6.	Kayu maple atau ek	0,17	0,096
7.	Serbuk gergaji	0,059	0,034
8.	Glass woll	0,038	0,022
Zat Cair			
1.	Air – raksa	8,21	4,74
2.	Air	0,556	0,327
3.	Ammonia	0,540	0,312
4.	Minyak lumas, SAE 50	0,147	0,085
5.	Freon 12, 22FCCI	0,073	0,042
Gas			
1.	Hydrogen	0,175	0,101
2.	Helium	0,141	0,081
3.	Udara	0,024	0,0139
4.	<i>Steam</i> air (jenuh)	0,0206	0,0119
5.	Karbondioksida	0,0146	0,00844

(Sumber : (J.P.Holman, hal :7)

2. Konveksi (aliran)

Konveksi adalah perpindahan panas karena adanya gerakan/aliran/pencampuran dari bagian panas ke bagian yang dingin. Menurut cara menggerakkan alirannya, perpindahan panas konveksi diklasifikasikan menjadi dua, yakni konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Bila gerakan fluida disebabkan karena adanya perbedaan kerapatan karena suhu, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi bebas (*free/natural convection*). Bila gerakan fluida disebabkan oleh gaya pemaksa/ eksitasi dari luar, misalkan dengan pompa atau kipas yang menggerakkan fluida sehingga fluida mengalir di atas permukaan, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa (*forced convection*). Berikut gambar perpindahan panas konveksi dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Perpindahan Panas Konveksi

Sumber : (J.P. Holman, hal: 252)

Proses pemanasan atau pendinginan fluida yang mengalir di dalam saluran tertutup seperti pada gambar merupakan contoh proses perpindahan panas. Laju perpindahan panas pada beda suhu tertentu dapat dihitung dengan persamaan,

(J.P. Holman, 1994 hal: 11)

$$q = -h \cdot A(T_w - T_\infty) \quad (8)$$

Keterangan :

Q = Laju Perpindahan Panas (kJ/det atau W)

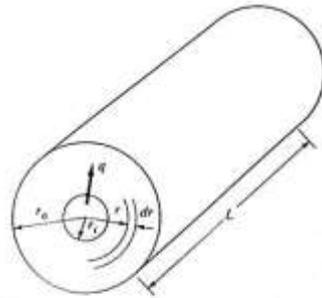
h = Koefisien Perpindahan Panas Konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A = Luas Bidang Permukaan Perpindahan Panas ($ft^2 \cdot m^2$)

T_w = Temperatur Dinding ($^\circ C, K$)

T_∞ = Temperatur Sekeliling ($^\circ C, K$)

Perpindahan panas pada sistem radial silinder dapat dilihat pada gambar 9 berikut.



Gambar 9. Perpindahan Panas pada Sistem Radial Silinder
(Sumber : J.P. Holman , 1991 hal :30)

Perbedaan suhu di silinder adalah $T_i - T_o$. Untuk silinder dengan panjang yang sangat besar dibandingkan dengan diameter, dapat diasumsikan bahwa kalor mengalir dalam arah radial. Luas area bagi aliran kalor :

$$A_r = 2\pi rL \quad (9)$$

Maka :

$$q_r = -k.A_r \frac{dT}{dr} \quad (10)$$

atau :

$$q_r = -2\pi k_r L \frac{dT}{dr} \quad (11)$$

dengan kondisi batas :

$$T = T_i \quad \text{pada} \quad r = r_i$$

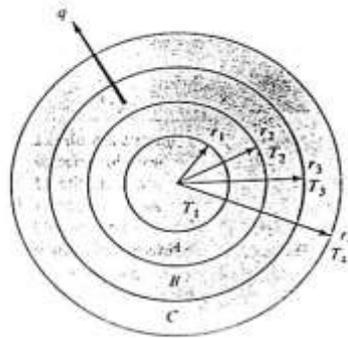
$$T = T_o \quad \text{pada} \quad r = r_o$$

$$\text{Maka :} \quad q = \left(\frac{2\pi kL (T_i - T_o)}{\ln (r_o/r_i)} \right) \quad (12)$$

dan tahanan termal adalah :

$$R_{th} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} \quad (13)$$

Jika silinder mempunyai dinding berlapis, dapat digunakan konsep tahanan termal. Pada gambar , dimisalkan dinding silinder dilapisi oleh dua lapisan isolasi untuk mencegah kalor keluar atau masuk seperti pada gambar 10.



Gambar 10. Perpindahan Kalor pada Dinding Silinder Berlapis
(Sumber : J.P. Holman , 1991 hal :30)

Persamaan Fourier untuk kasus ini dapat ditulis :

$$q = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{k_A} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_B} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{k_C}} \quad (14)$$

Dimana :

- q = Kalor yang mengalir
- K_A = Konduktivitas termal bahan A
- K_B = Konduktivitas termal bahan B
- K_C = Konduktivitas termal bahan C
- $R_A = \frac{\ln(r_2/r_1)}{k_A}$
- $R_B = \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_B}$
- $R_C = \frac{\ln(r_4/r_3)}{k_C}$