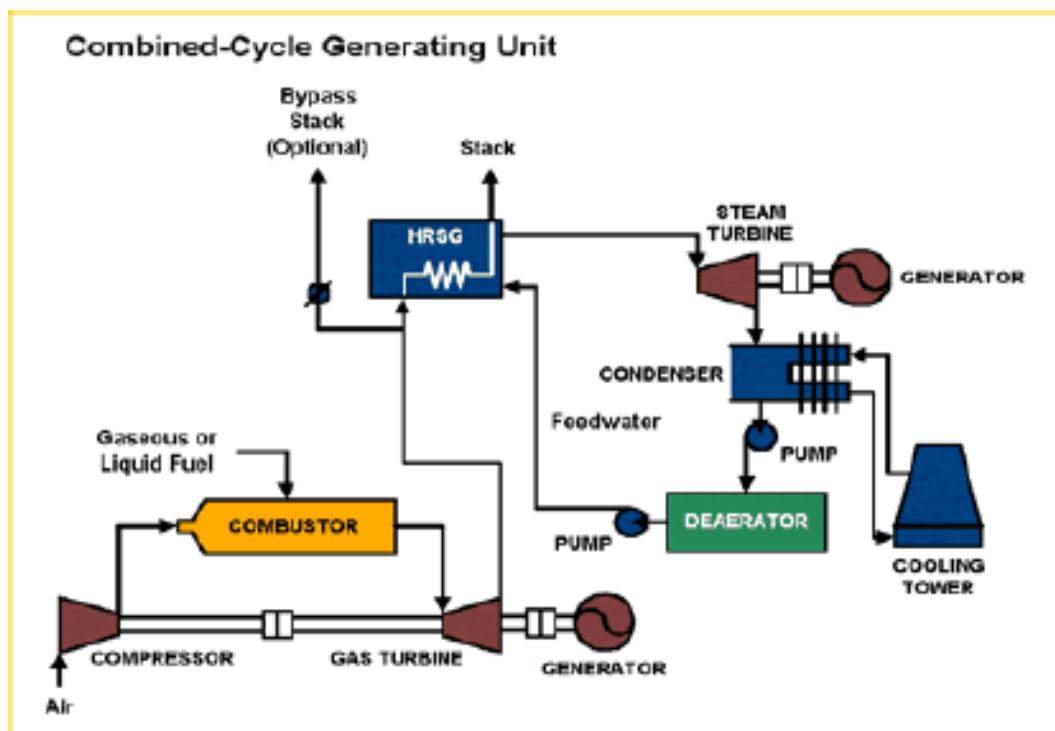


BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)

PLTGU merupakan gabungan antara pembangkit listrik tenaga gas dan tenaga uap. Penggunaan temperatur tinggi pada turbin gas dimungkinkan secara teknis sebab telah dikembangkan teknologi pelapisan permukaan turbin dengan material yang memiliki resistansi tinggi terhadap panas. Oleh karena itu, pembangkit listrik tenaga gas memiliki potensi untuk memiliki efektifitas termal yang tinggi. Tetapi, pembangkit listrik tenaga gas memiliki kekurangan yaitu gas buang yang masih memiliki temperatur yang tinggi yaitu $\pm 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ yang membuat efektifitas termal PLTG berkurang. Turbin uap pada sistem pembangkit tenaga uap modern rata-rata beroperasi pada suhu $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1150\text{ }^{\circ}\text{F}$). Sementara, untuk turbin gas adalah sekitar $1425\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($2600\text{ }^{\circ}\text{F}$) (Cengel, Y. A. & Boles, 2015). Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.

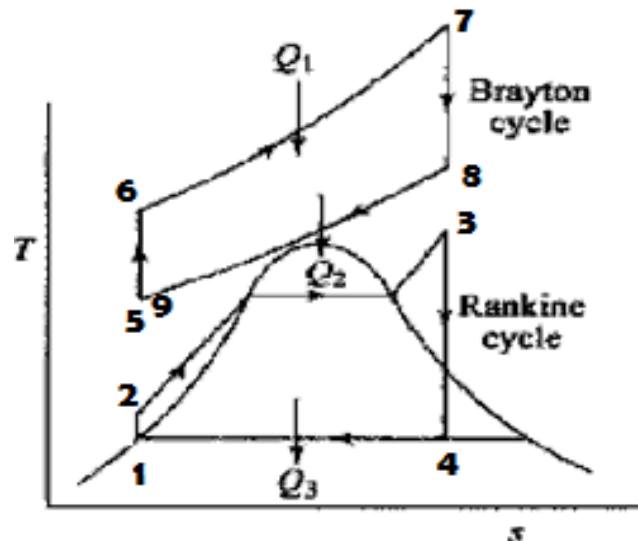


Gambar 2.1 Siklus kombinasi turbin gas turbin uap

Gambar 2.1 merupakan penjelasan mengenai diagram alir kalor pada sistem pembangkit listrik tenaga gas-uap. Pada prinsipnya sistem pembakaran masih sama hanya saja pada gas buang hasil pembakaran pada turbin gas digunakan untuk memanaskan kembali air yang telah dipompakan menuju ke turbin uap. HRSG dipergunakan sebagai pengganti *boiler* untuk memanaskan air. Air yang telah dipanaskan akan berubah fasa menjadi uap sehingga dapat menggerakkan turbin uap. Dengan sistem seperti ini maka efektifitas termal sistem dapat ditingkatkan dengan biaya yang minimum. Selanjutnya uap yang telah digunakan untuk menggerakkan turbin dikondensasikan menggunakan kondensor untuk diubah kembali menjadi fase cair dan digunakan kembali.

2.2 Siklus Gabungan

Pada sistem PLTGU terdapat dua siklus yang digunakan yaitu Siklus Brayton dan Siklus Rankine. Siklus Brayton digunakan pada sistem pembangkit tenaga gas sedangkan Siklus Rankine digunakan pada sistem pembangkit tenaga uap. Kedua siklus tersebut dipergunakan dalam sistem PLTGU dan disebut siklus gabungan. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Siklus gabungan *Brayton Cycle* dan *Rankine Cycle*

Pada Gambar 2.2 ditunjukkan bahwa kalor masuk pada titik 6-7 yaitu pada ruang bakar kemudian diarahkan menuju ke turbin pada titik 7-8. Pada titik 8-9 disana terjadi titik perpindahan panas yang terjadi pada HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) yang digunakan sebagai pengganti *boiler*. Pada siklus uap (*steam cycle*) kalor tadi dipindahkan untuk merubah fasa air dititik 2-3 dan menggerakannya menuju turbin yang kemudian terjadi proses ekspansi dari titik 3-4. Uap hasil ekspansi kemudian dikondensasikan menggunakan kondensor dari titik 4-1 dimana terjadi pelepasan kalor. Dari titik 1-2 terjadi proses pemompaan sehingga air membentuk siklus untuk digunakan kembali.

2.3 Ketel Uap

ketel uap atau boiler adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan steam. Steam diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar. Boiler mengubah energi-energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. Dan dirancang untuk melakukan atau memindahkan kalor dari suatu sumber pembakaran, yang biasanya berupa pembakaran bahan bakar.

Bagian pemindahan panas dari sebuah ketel besar itu terdiri dari evaporator, pemanas lanjut (*superheater*), pemanas ulang (*reheater*), pemanas awal udara, dan bagian *economizer*. Permukaan *superheater*, *reheater* dan evaporator disebut permukaan pindahan panas primer sedangkan permukaan panas pemanas awal udara dan *economizer* disebut sebagai permukaan pindahan panas sekunder.

2.3.1 Jenis dan Klasifikasi Ketel

Ketel uap dapat diklarifikasikan dengan berbagai cara umum ada dua jenis ketel uap, tergantung pada orientasi lintasan aliran air uap dan gas panas. Berdasarkan fluida yang mengalir dalam pipa, maka boiler diklasifikasikan menjadi :

- a. Boiler pipa api (*fire tube boiler*) Boiler jenis ini pada bagian tubenya dialiri dengan gas pembakaran dan bagian lainnya yaitu sell dialiri air yang akan diuapkan. Pipa-pipanya langsung didinginkan oleh air yang melindunginya. Jumlah pass dari boiler tergantung dari jumlah laluan horizontal dari gas 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.

- b. Boiler pipa air (*water tube boiler*) Boiler jenis ini banyak dipakai untuk kebutuhan uap skala besar. Prinsip kerja dari boiler pipa air berkebalikan dengan pipa api, gas pembakaran dari *furnace* dilewatkan ke pipa-pipa yang berisi air yang akan diuapkan.

2.3.2 Permukaan Pemanasan Ketel Primer

Permukaan pindahan panas primer pada ketel terdiri dari bagian evaporator (penguap), bagian pemanas lanjut (superheater) dan bagian pemanas ulang bila sistem menggunakan turbin pemanasan ulang (*reheat turbine*). Permukaan evaporator biasanya diletakan pada bagian terpaanas ketel dekat dengan tempat pembakaran oleh karena air yang mendidih di dalam pipa melindungi bahan pipa dari temperatur yang tinggi. Bagian evaporator terdiri dari dinding-dinding air (*water walls*), lantai air (*water floor*) dan tirai air yang dipakai untuk mengarahkan aliran gas buang panas.

Bagian superheater yaitu permukaan-permukaan pindahan panas dimana panas dipindahkan ke uap jenuh untuk menaikkan temperaturnya. Pemanas lanjut sangat penting untuk produksi uap bagi turbin uap agar mengurangi kandungan kelembaban dari uap ketika berekspansi di turbin. Bagian pemanas ulang dari sebuah ketel besar yaitu bagian ketel yang semua uap keluar dari turbin tekanan tinggi diikembalikan untuk mendapatkan tambahan panas lanjut sebelum di kirim turbin tekanan menengah. Pemanas ulang sangat mirip dengan pemanas lanjut dalam bentuk dan lokasinya di dalam ketel.

2.3.3 Permukaan Pemanasan Ketel Sekunder

Permukaan-permukaan pindahan panas sekunder memperoleh panas dari gas asap setelah gas tersebut memindahkan panasnya ke permukaan pindahan pnnas primer. Untuk memperoleh efisiensi ketel yang tinggi, temperatur gas buang perlu direndahkan. Ada dua jenis permukaan pindahan panas sekunder, ekonomiser dan pemanasan awal udara. Economizer memindahkan panas dari gas asap ke air pengisian ketel yang masuk, sementara pemanas awal udara memindahkan energi gas asap ke udara pembakaran yang masuk.

2.4 Perpindahan Panas

2.4.1 Perpindahan Panas pada HRSG

Perpindahan panas yang terjadi pada HRSG adalah perpindahan panas secara konveksi dan konduksi, semuanya berlangsung di economizer, evaporator, superheater dan *steam drum* dengan intensitas yang berbeda pada setiap bagiannya. Besarnya perpindahan panas yang terjadi tergantung dari perbedaan temperature, koefisien perpindahan panas dan luas permukaan perpindahan panas.

2.4.2 Perpindahan Panas Konveksi

Konveksi merupakan perpindahan energi yang terjadi melalui dua mekanisme, yaitu melalui gerakan acak molekul-molekul (difusi) dan melalui gerakan makroskopik suatu fluida. Akibat dari gerakan makroskopik ini, sejumlah besar molekul bergerak bersamaan. Untuk sebuah permukaan bertemperatur tertentu yang terekspos pada fluida, fenomena konveksi akan menyebabkan timbulnya lapisan batas hidrodinamik dan termal. Lapisan batas hidrodinamik terjadi akibat fluida bersirkulasi pada permukaan, sedangkan lapisan batas termal terjadi akibat adanya distribusi temperatur pada fluida.

2.4.3 Perpindahan Panas Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan energi dari partikel yang lebih berenergi ke partikel yang kurang berenergi dalam suatu zat karena adanya interaksi antar partikel. Selain pada benda padat, konduksi dapat terjadi pada cairan dan gas yang diam, atau tidak memiliki pergerakan makroskopik.

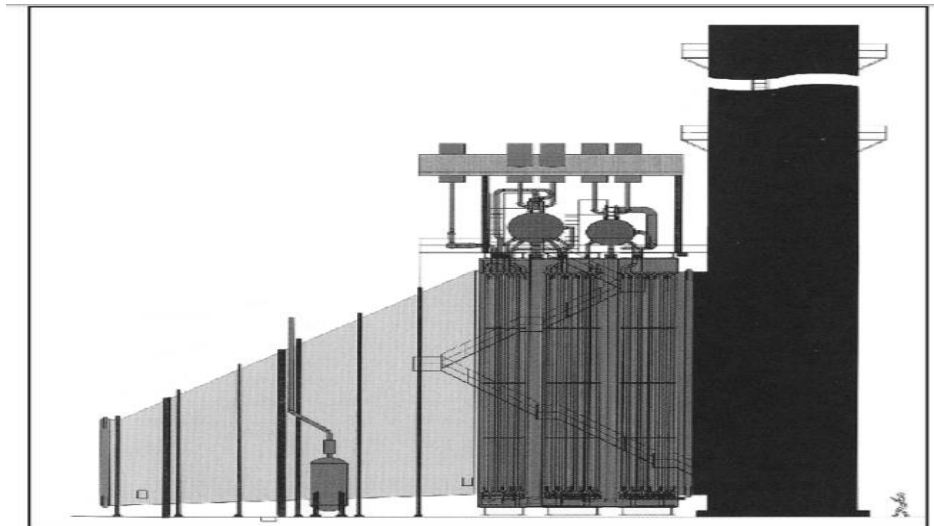
2.5 Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) adalah ketel uap atau *boiler* yang memanfaatkan energi panas sisa gas buang satu unit turbin gas untuk memanaskan air dan mengubahnya menjadi uap, dan kemudian uap tersebut dipergunakan untuk menggerakkan turbin uap. Pada umumnya HRSG tidak dilengkapi pembakar (*burner*), sehingga tidak terjadi proses perpindahan panas secara radiasi. Proses konveksi dan konduksi dari gas buang turbin gas ke dalam air yang akan diproses menjadi uap melalui elemen-elemen pemanas di dalam HRSG.

2.6 HRSG Menurut Kontruksi Aliran Gas Buang dari Turbin Gas

2.6.1 HRSG tipe Horizontal

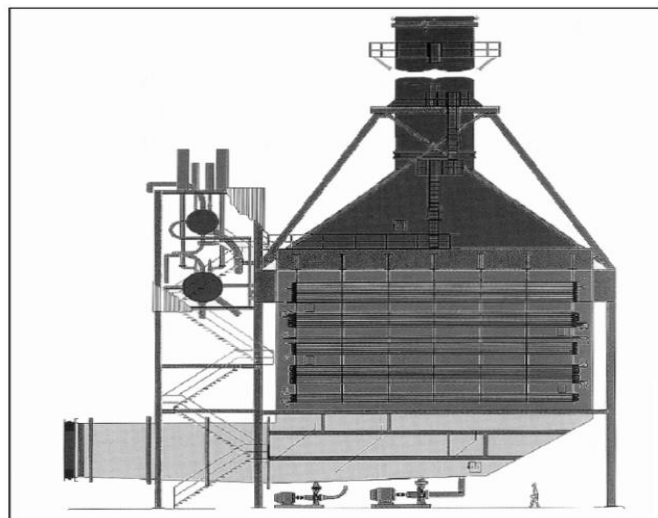
Pada HRSG tipe horizontal pipa-pipa penukar panas disusun secara vertikal. Gas buang dari *exhaust* melintasi pipa-pipa tersebut dengan arah mendatar. Gas ini selanjutnya keluar melalui cerobong/*stack* yang berada di ujung HRSG seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 HRSG tipe Horizontal

2.6.2 HRSG tipe Vertikal

Pada HRSG tipe vertikal pipa-pipa penukar panas disusun secara horizontal. Gas buang turbin masuk dari sisi bawah, mengalir ke atas melintang pipa-pipa penukar panas, yang selanjutnya keluar melalui cerobong/*stack* yang berada langsung di atas HRSG seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.

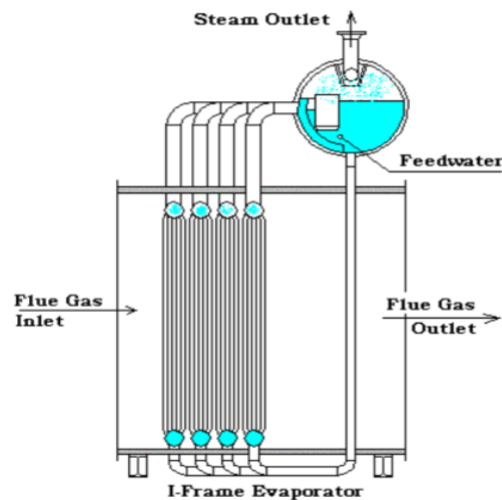


Gambar 2.4 HRSG tipe Vertikal

2.7 HRSG Menurut Sirkulasi Aliran Air

2.7.1 HRSG dengan Sirkulasi Alami (*Natural Circulation*)

HRSG dengan sirkulasi alami mempunyai susunan pipa secara vertikal, dan gas panas dari *exhaust* melintasi pipa-pipa tersebut dengan arah mendatar. Gas buang ini selanjutnya keluar melalui cerobong/*stack* yang berada di ujung HRSG. Jenis HRSG dengan sirkulasi alami seperti terlihat pada Gambar 2.5 :

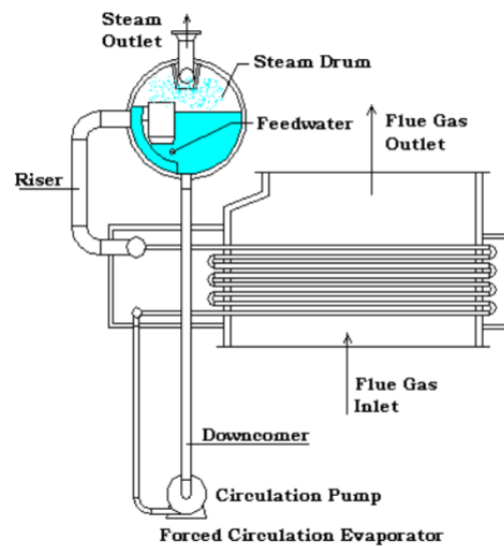


Gambar 2.5 HRSG Sirkulasi Alami (*Natural Circulation*)

Dari gambar terlihat bahwa *inlet ducting* HRSG disambungkan dengan *exhaust* (sisi keluar) turbin gas, sehingga gas buang masuk HRSG. Perpindahan panas terjadi pada rangkaian pipa yang dipasang secara vertikal dalam bentuk modul.

2.7.2 HRSG dengan Sirkulasi Paksa (*Forced Circulation*)

Berbeda dengan jenis HRSG sirkulasi natural, HRSG sirkulasi paksa menggunakan pompa sirkulasi yang berguna untuk mensirkulasikan air di dalam HRSG. Pada sirkulasi paksa, modul-modul pipa penukar panas dipasang secara horizontal. Gas panas pada *exhaust* turbin gas masuk dari sisi bawah, mengalir ke atas melintang pipa-pipa penukar panas, yang selanjutnya keluar melalui cerobong/*stack* yang berbeda langsung di atas HRSG. Jenis HRSG dengan sirkulasi paksa seperti terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 HRSG Sirkulasi Paksa (*Forced Circulation*)

Air pengisi masuk ke dalam drum melalui ekonomiser. Air disirkulasikan ke pipa-pipa evaporator sehingga terjadi proses perubahan fasa menjadi uap. Uap yang terbentuk, selanjutnya masuk kembali ke dalam drum, dan dipisahkan dari air. Uap akan dipanaskan lebih lanjut di superheater sehingga benar-benar menjadi uap superheat dan setelah itu uap digunakan untuk menggerakkan turbin.

2.8 HRSG Menurut Jumlah Tekanan Kerja

2.8.1 HRSG dengan Tekanan Tunggal (*Single Pressure*)

Pada HRSG ini uap yang dihasilkan memiliki satu tekanan. Susunan PLTGU dengan satu tekanan biasanya turbin gas, generator, dan turbin uapnya dibuat menjadi satu poros.

2.8.2 HRSG Dengan Dua Tekanan (*Dual Pressure*)

Heat Recovery Steam Generator ini menghasilkan dua tingkat tekanan, yaitu tekanan tinggi dan tekanan rendah. Uap tekanan tinggi digunakan untuk memutar turbin tekanan tinggi (*High Pressure Turbine*), sedangkan uap tekanan rendah bersama-sama dengan uap buang dari turbin tekanan tinggi digunakan untuk menggerakkan turbin tekanan rendah (*Low Pressure Turbine*).

Tujuan membuat dua tingkat tekanan adalah untuk meningkatkan efisiensi termal siklus kombinasi. Dengan dua tingkat tekanan, maka gas buang sebelum dibuang ke atmosfer dapat digunakan untuk menghasilkan uap dengan tekanan dan

temperatur yang rendah sehingga panas gas buang dimanfaatkan dengan lebih optimal.

Aliran gas panas dari turbin gas masuk melalui HRSG mengalir ke atas melewati pipa-pipa superheater, evaporator, economizer tekanan tinggi bersamaan dengan melepaskan panas. Selanjutnya melewati pipa-pipa yang fungsinya sama tetapi dengan tekanan lebih rendah yang berada di bagian atasnya kemudian dibuang ke atmosfer melalui cerobong yang terletak di atas HRSG.

2.8.3 HRSG Tekanan Bertingkat (*Multi Pressure*)

HRSG jenis ini mempunyai tiga tingkat tekanan yang berbeda, yaitu tekanan tinggi *High Pressure* (HP), tekanan menengah *Intermediete Pressure* (IP) dan tekanan rendah *Low Pressure* (LP). Dengan tiga tingkat tekanan efisiensi termal siklus kombinasi akan lebih baik karena celah di antara tekanan tinggi dan tekanan rendah masih dimanfaatkan untuk menghasilkan uap tekanan menengah.

Gas buang dari turbin gas mengalir mendatar dan menyerahkan panas ke pipa-pipa penghantar panas yang dipasang tegak sebagaimana pada sistem satu tekanan ataupun dua tekanan.

2.9 Bagian-Bagian Utama HRSG

2.9.1 Superheater

Alat penukar kalor ini digunakan untuk mengubah uap jenuh pada evaporator menjadi uap kering. Gas dari buangan turbin gas mula-mula melewati superheater untuk memanaskan uap pada pipa-pipa superheater. Selanjutnya uap akan langsung diteruskan ke turbin uap.

2.9.2 Preheater

Merupakan tempat pemanasan awal air sebelum masuk ke HRSG agar air yang akan dipanaskan mengalami kenaikan suhu. Umumnya *condensate preheater* menempati posisi bagian atas sekali dari pada posisi pipa-pipa pemanas yang ada dan diikuti pipa-pipa lainnya.

2.9.3 Economizer

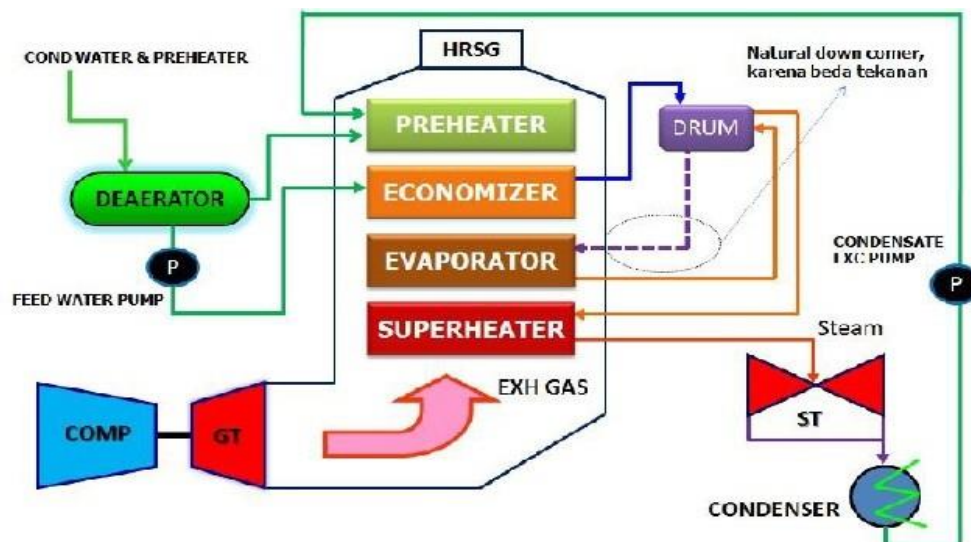
Adalah alat penukar kalor yang menaikkan suhu air yang keluar dari HRSG yang tekanannya paling tinggi sampai ke suhu jenuh. Disini pemanasan dilakukan oleh gas yang keluar dari pemanas lanjut dan pipa penguap.

2.9.4 Evaporator

Air dari tangka melalui ekonomizer ke evaporator. Dengan adanya pipa pemanas akan terjadi pembentukan uap, dimana media pemanasan dilakukan oleh gas yang keluar dari pemanas lanjut (superheater).

2.10 Sistem Air Uap

Sistem air uap merupakan sebuah siklus air yang melewati berbagai komponen sehingga mengalami perubahan temperatur, tekanan dan fasa menjadi uap yang digunakan untuk memutar turbin, kemudian didinginkan dan bersirkulasi seperti awal. Sistem air uap dalam PLTGU hanya terjadi pada siklus turbin uap saja seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Sistem Uap Air

Air berasal dari kondensor yang telah mengalami kondensasi masuk *condensate pump* untuk dipompakan menuju preheater yang terdapat di dalam HRSG. Di dalam preheater air mengalami kenaikan suhu. Kemudian dari preheater air menuju *deaerator storage tank*. Kemudian air yang masuk dihilangkan gelembung-gelembung gas udara dan juga mengalami pemanasan yang berasal dari uap ekstraksi *high pressure turbine* dan *low pressure turbine*. Setelah itu air dipompakan oleh *feed water pump*. *Feed water pump* (FWP) disini terdapat tiga jenis, HP FWP dan LP FWP. Dengan adanya tiga jenis pompa, tentunya air akan memisah menjadi tiga jalur berdasarkan besarnya tekanan yaitu *High Pressure* dan *Low Pressure*.

Pertama air yang berasal dari HP FWP menuju HP economizer untuk dipanaskan sampai suhu mendekati titik didih. Kemudian air masuk ke dalam HP drum melewati pipa *downcomer* menuju evaporator untuk dipanaskan sampai air berubah menjadi uap jenuh. Pada proses ini sirkulasi air dari drum menuju evaporator secara natural *downcomer* tanpa bantuan pompa yang biasa disebut boiler *circulating pump*. Dari evaporator uap jenuh dimasukkan kembali menuju HP drum. Kemudian uap dikeluarkan menuju HP superheater untuk dipanaskan kembali agar menjadi uap panas lanjut yang bertekanan tinggi. Uap panas lanjut tadi digunakan untuk memutar turbin tekanan tinggi.

Kedua, air dari LP FWP menuju LP economizer kemudian masuk LP drum dilanjutkan ke evaporator, masuk kembali ke LP drum dan dijadikan uap panas lanjut dalam superheater. Uap bekas turbin tekanan menengah yang keluar dari pipa *crossover* bercampur dengan uap dari LP superheater masuk ke dalam turbin tekanan rendah. Uap keluaran dari turbin tekanan rendah didinginkan oleh kondensor dengan menggunakan air laut yang telah di *treatment*. Sumber air pengisi juga berasal dari air hasil kondensasi uap yang digunakan untuk seal turbin. Alat yang digunakan untuk menampung uap kondensasi tersebut adalah *gland condenser* yang akan diteruskan menuju kondensor. Siklus air uap akan berjalan seperti awal, tetapi jika air pengisi mengalami kekurangan maka akan ditambah dengan air yang telah di *make up* terlebih dahulu.

2.11 Bagian-bagian Pendukung HRSG

2.11.1 Kondensor

Kondensor adalah peralatan yang berfungsi mengembunkan uap bekas yang keluar turbin tekanan rendah. Kondensor yang dipakai dalam PLTGU adalah kondensor jenis *surface condensor*. Di dalamnya harus dibuat keadaan vakum, agar pendinginan berjalan sempurna. Alat yang berfungsi mevakumkan ruangan kondensor adalah ejector atau menggunakan vacuum pump.

2.11.2 Pipa Kondensat

Pipa kondensat adalah pompa yang bertujuan mengalirkan air dari kondensor menuju *deaerator storage tank*. Air yang dipompa disebut air condensate.

2.11.3 Deaerator Storage Tank

Deaerator storage tank berfungsi sebagai tempat penampungan air sementara dan menghilangkan gelembung-gelembung gas dalam air. Selain itu deaerator storage tank berfungsi juga memanaskan air dengan bantuan uap ekstraksi dari turbin tekanan tinggi dan turbin tekanan rendah.

2.11.4 Feed Water Pump

Feed Water Pump adalah salah satu jenis pompa pada PLTGU yang berfungsi untuk memompa air dari *feed water tank* atau *deaerator storage tank* menuju ekonomiser. Pompa jenis ini memiliki tekanan yang sangat tinggi, karena desain impeler pompanya dibuat seri dan letaknya yang tinggi juga mempengaruhi tekanan air. Pada sistem PLTGU digunakan dua buah FWP berdasarkan tekanan yang akan dihasilkan yaitu *High Pressure FWP* dan *Low Pressure FWP*.

2.12 Bahan Bakar

2.12.1 High Speed Diesel (HSD)

High Speed Diesel (HSD) merupakan BBM jenis solar yang memiliki angka performa *cetane number* 45, jenis BBM ini umumnya digunakan untuk mesin transportasi mesin diesel yang umum dipakai dengan sistem injeksi pompa mekanik (*injection pump*) dan *electronic injection*, jenis BBM ini diperuntukkan untuk jenis kendaraan bermotor transportasi dan mesin industri. Minyak solar adalah bahan bakar jenis distilat berwarna kuning kecoklatan yang jernih. Penggunaan minyak solar pada umumnya adalah untuk bahan bakar pada semua jenis mesin diesel dengan putaran tinggi (di atas 1.000 RPM), yang juga dapat dipergunakan sebagai bahan bakar pada pembakaran langsung dalam dapur-dapur kecil, yang terutama diinginkan pembakaran yang bersih. Minyak solar ini biasa disebut juga *Gas Oil*, *Automotive Diesel Oil*, *High Speed Diesel*.

2.12.2 CNG (Compressed Natural Gas) / BBG (Bahan Bakar Gas)

Gas alam terkompresi/*Compressed natural gas* (CNG) adalah alternatif bahan bakar selain bensin atau solar dan banyak digunakan sebagai bahan bakar gas (BBG). Bahan bakar ini dianggap lebih bersih bila dibandingkan dengan dua

bahan bakar minyak karena emisi gas buangnya yang ramah lingkungan. CNG dibuat dengan melakukan kompresi metana (CH_4) yang diekstrak dari gas alam, kemudian disimpan dan didistribusikan dalam bejana tekan yang berbentuk silinder.

Pengisian CNG dapat dilakukan dari sistem bertekanan rendah maupun bertekanan tinggi. Membutuhkan pendinginan dan tempat penyimpanan yang lebih besar untuk sejumlah massa gas alam, serta perlu tekanan yang sangat tinggi. Oleh karena itu pemasaran CNG lebih ekonomis untuk lokasi-lokasi yang dekat dengan sumber gas alam.