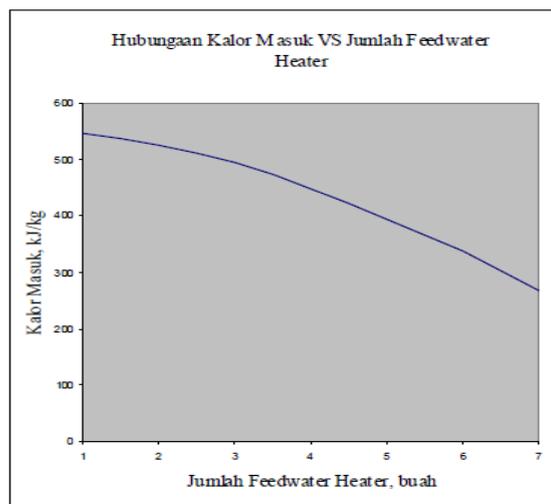


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian mengenai penggunaan *feedwater heater* sebagai penukar kalor dari uap ekstraksi turbin dilakukan oleh Sorii (2014) dengan hasil bahwa terjadi kenaikan unjuk kerja pembangkit sebesar 0,78 % jika dibandingkan dengan *feedwater* dalam kondisi *bypass* serta terjadinya kenaikan tingkat kebutuhan kalor pada *boiler*. Selain itu, penelitian oleh Dedi Junaidi (2010) tentang Kesetimbangan masa dan kalor dengan bervariasi jumlah *feedwater heater*. Pada penelitian ini, dengan mendesain suatu instalasi pembangkit listrik memerlukan parameter-parameter yang harus dipertimbangkan. Sehingga aspek ekonomis sangat memegang peranan penting didalam menentukan desain instalasi yang efisien dan menguntungkan bagi investor. Salah satu parameter yang dipertimbangkan adalah berapa jumlah *feedwater heater* yang harus digunakan demi tercapainya tujuan tersebut. Hasil penelitian menunjukkan kenaikan efisiensi desain ketika *feedwater heater* ditambah, kenaikan yang signifikan mungkin antara satu sampai empat *feedwater heater* tetapi pada lima buah *feedwater heater* sampai tujuh buah *feedwater heater* akan terlihat kenaikan efisiensi sistem yang cenderung stabil. Jadi seandainya ada penambahan *feedwater heater* yang melebihi tujuh buah *feedwater heater* tidak akan memberikan kenaikan pada efisiensi desain instalasi pembangkit listrik secara signifikan.



Gambar 2.1 Hubungan kalor masuk terhadap jumlah *Feedwater heater*
Sumber: Dedi Junaidi (2010,p.54)

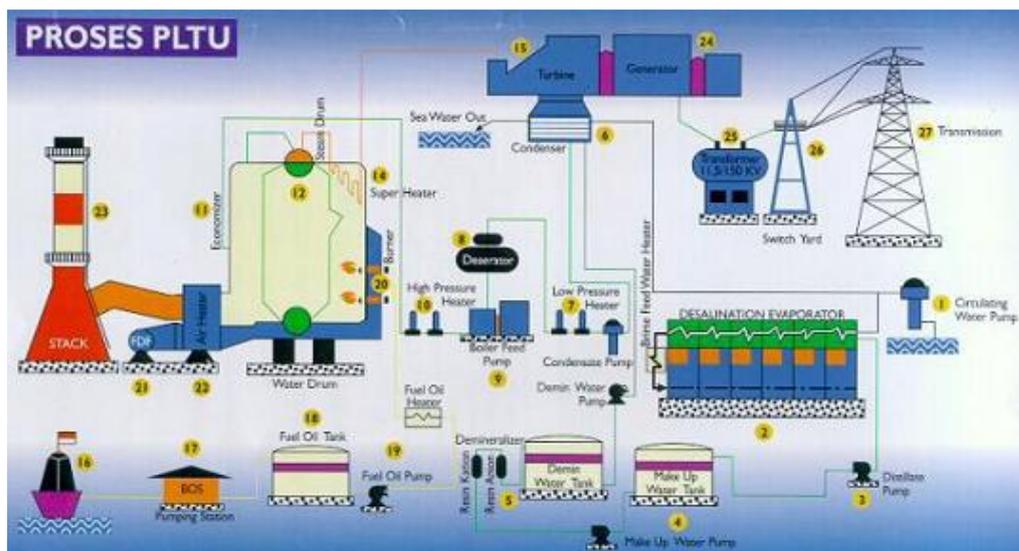
Heat rate adalah ukuran dari thermal performance *boiler-turbine-generator* yang dioperasikan secara gabungan sebagai suatu unit. *Heat rate* didefinisikan sebagai jumlah dari energi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah energi listrik selama waktu satu jam. Satuan *Heat rate* adalah kJ/kWh. Sedangkan *Turbine Heat rate* didefinisikan sebagai jumlah kalor yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kWh. Pengujian *Heat rate* dilakukan untuk menentukan proses transaksi niaga pembelian energi listrik sehingga pihak PLN dapat mematok harga untuk setiap kWh energi listrik yang diproduksi dari PLTU Paiton unit 9

Penelitian mengenai konsumsi bahan bakar pada PLTU Semarang dilakukan oleh Cahyo (2008) yang menunjukkan perbandingan konsumsi bahan bakar dengan HSD (High Speed Diesel) dan MFO (Main Fuel Oil) dengan hasil bahwa menggunakan HSD jauh lebih boros daripada penggunaan MFO pada kasus PLTU Semarang untuk beban 140 MW. Biaya bahan bakar HSD mencapai Rp. 2,005 Trilyun per tahun sedangkan bahan bakar MFO berkisar Rp. 1,555 trilyun per tahun. Konsumsi bahan bakar mengalami kenaikan ketika beban pembangkit di naikkan. Selain itu temperature masuk fluida *boiler* yang turun akibat terganggunya cogeneration plant dapat menurunkan kualitas uap kering yang di hasilkan oleh *boiler*. Penambahan laju bahan bakar dapat menjadi solusi untuk mengatasi kondisi tersebut.

Pada penelitian ini, penulis akan memvariasikan jumlah *feedwater heater* yang akan bekerja sebagai peralatan kogenerasi pembantu *boiler*, dimana hasil tersebut akan dibandingkan dengan pengoperasian pada performa pembangkit 100 persen.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit listrik tenaga uap merupakan salah satu dari jenis pembangkit, dimana pembangkit ini memanfaatkan uap yang dihasilkan oleh *boiler* sebagai sumber energi untuk menggerakkan turbin dan sekaligus memutar generator sehingga akan dihasilkan tenaga listrik. Sistem pembangkit tenaga uap yang sederhana terdiri dari empat komponen utama yaitu *boiler*, turbin uap, kondenser dan pompa kondensat. Skema pembangkit listrik tenaga uap sederhana dapat ditunjukkan pada gambar berikut. Pompa digunakan untuk mengkompres air sampai tekanan operasi *boiler*. Air memasuki *boiler* sebagai cairan kompresi dan akan menjadi uap *superheated*.



Gambar 2.2 Skema pembangkit listrik tenaga uap
Sumber: Operasi Pembangkit (2004,p.4)

Uap *superheated* 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 uap akan turun dan masuk ke kondenser, dan kemudian dicairkan pada tekanan konstan didalam kondenser dan akan meninggalkan kondenser sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa

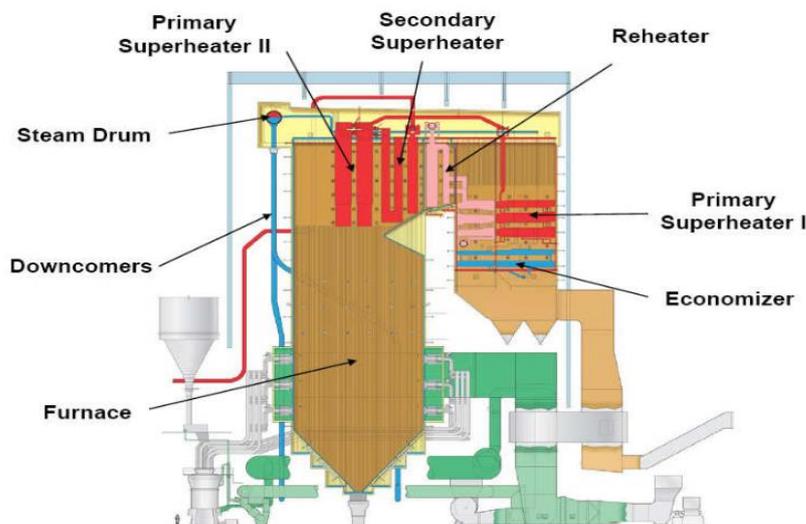
2.3 Komponen PLTU

Komponen utama PLTU terdiri atas:

1. *Boiler* : *Boiler* merupakan bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk steam berupa energi kerja
2. Turbin : suatu penggerak yang mengubah energi potensial menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin
3. *Generator* : suatu sistem yang mengubah tenaga mekanik menjadi listrik
4. *Condensor* : Sebuah alat yang digunakan untuk mendinginkan *extraction steam* yang bertekanan tinggi berubah menjadi cairan yang bertekanan tinggi
5. *Condensate pump* : memompa air kondensasi yang terkumpul pada *Hot-well Condensor daerator* untuk disirkulasikan ke system
6. *Heater* : Suatu pemanas yang berfungsi memanaskan air agar tidak terjadi perbedaan temperatur yang signifikan antara temperature air dalam *boiler* dengan temperatur masuk dalam *boiler*
7. *Boiler Feed Pump* : Pompa Pengisi drum *boiler*

A. Boiler

Salah satu peralatan yang sangat penting di dalam suatu pembangkit tenaga listrik adalah *boiler* (*Steam Generator*) atau yang biasanya disebut ketel uap. Alat ini merupakan alat penukar kalor, dimana energi panas yang dihasilkan dari pembakaran diubah menjadi energi potensial yang berupa uap. Uap yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi inilah yang nantinya digunakan sebagai media penggerak utama Turbin Uap. Energi panas diperoleh dengan jalan pembakaran bahan bakar di ruang bakar



Gambar 2.3 Boiler

Sumber: Operasi Pembangkit (2004,p.7)

Boiler menghasilkan uap pada tekanan dan temperatur tinggi (*superheated vapor*). Perubahan dari fase cair menjadi uap dilakukan dengan memanfaatkan energi panas yang didapatkan dari pembakaran bahan bakar. *Boiler* pada PLTU Paiton menggunakan batubara *low range coal* sebagai bahan bakar utamanya. Penyaluran panas dari bahan bakar ke air demin dapat terjadi secara radiasi, dan konveksi. *Furnace* komponen ini merupakan tempat pembakaran bahan bakar. Beberapa bagian dari *furnace* diantaranya *refractory*, ruang perapian, *burner*, *exhaust for flue gas*, *charge and discharge door*.

Wall tube merupakan dinding *boiler* yang terdiri dari tubes atau pipa-pipa yang disatukan oleh membran, oleh karena itu disebut dengan *wall tube*. Di dalam *wall tube* tersebut mengalir air yang akan dididihkan. Dinding pipa *boiler* merupakan pipa dengan ulir dalam dengan tujuan agar aliran air di dalam *wall tube* berputar (*turbulen*), sehingga penyerapan panas menjadi lebih banyak dan merata, serta untuk mencegah terjadinya *overheating* karena penguapan awal air pada dinding pipa yang menerima panas radiasi

langsung dari ruang pembakaran. Untuk mencegah terjadinya penyebaran panas keluar dari *wall tube*, maka disisi luar *wall tube* di pasang dinding isolasi yang terbuat dari mineral fiber.

Steam drum pada sistem *boiler* merupakan tempat penampungan air panas dan pembentukan steam. Steam pada steam drum bersifat jenuh (*saturated steam*). Steam drum adalah bagian dari *boiler* yang bertujuan untuk

1. Menampung air yang akan dipanaskan pada pipa pipa penguap (*wall tube*) dan menampung uap air dari pipa pipa penguap sebelum dialirkan ke *superheater*
2. Mengatur kualitas air *boiler* dengan membuang kotoran kotoran terlarut didalam *boiler* melalur *continous blowdown*
3. Mengatur permukaan air sehingga tidak terjadi kekurangan saat *boiler* beroperasi yang dapat menyebabkan *overheating* pada pipa *boiler*

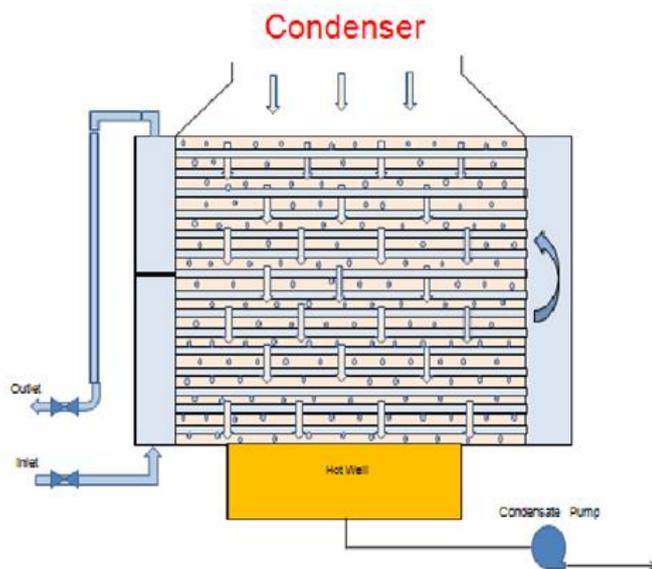
Air Heater adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk memanaskan udara pembakaran yang dihembuskan oleh *Forced Draft Fan* sebelum dipakai untuk pembakaran dihembuskan oleh *forced draft fan* sebelum dipakar untuk pembakaran didalam *furnace boiler*. Pemanasnya diambilkan dari gas bekas setelah dipakai *economizer*. Adapun tujuannya untuk menaikkan efisiensi *boiler*.

Economizer adalah peralatan pada *boiler* untuk memanaskan air pengisi *boiler* dengan memanfaatkan panas dari gas sisa pembakaran di dalam *boiler*. Dengan meningkatnya temperatur air pengisi *boiler* maka efisiensi *boiler* juga akan meningkat. Gas sisa pembakaran bahan bakar di dalam *boiler* masih mempunyai temperatur yang cukup tinggi. Dengan melewati gas sisa pembakaran melalui pipa-pipa *economizer* maka akan terjadi transfer panas yang akan diserap oleh pipa-pipa *economizer* dan panas tersebut diteruskan kedalam air pengisi *boiler* yang terdapat di dalam pipa-pipa *economizer*.

Jenis jenis dari *boiler* antara lain : *Fire tube boiler*, *Water tube boiler*, Paket *boiler*, *Fluidized bed combustion boiler*, *Atmospheric fluidized bed combustion boiler*, *Pressurized fluidized bed combustion boiler*, *Circulating fluidized bed combustion boiler*, *Stoker fired boiler*, *Pulverized fuel boiler*, *Boiler* pemanas limbah (*Waste heat boiler*) dan Pemanas fluida termis.

B. Kondenser

Kondensor merupakan alat penukar kalor (*Heat Exchanger*) yang berfungsi mengkondensasikan uap bekas dari turbin menjadi titik-titik air (air kondensat) dan air yang terkondensasi menjadi air ditampung pada *Hotwell*. Selanjutnya air tersebut disirkulasikan kembali menuju ke *boiler* untuk diproses kembali menjadi uap.



Gambar 2.4 kondenser

Sumber: Operasi Pembangkit (2004,p.10)

Proses pada kondensor yang terjadi adalah proses perpindahan panas. Panas dari uap bekas diteruskan ke massa Fluida pendingin melalui media pemisah yaitu permukaan perpindahan panas yang dibuat dengan pipa-pipa dengan ketebalan yang tipis dalam jumlah banyak untuk mencapai efektifitas transmisi perpindahan panas yang baik. Untuk pengoperasiannya, vakum kondensor menjadi penting untuk di jaga agar uap dapat bergerak turun dari sudu terakhir dari *low pressure turbine*

Hasil dari kondensasi ditampung dalam *hot well* kemudian dipompa ke *boiler* dengan melalui *feedwater heater*. Instalasi ini, kondensor yang digunakan adalah jenis shell and tube dengan fluida dingin yang berasal dari danau atau air laut. Water Treatment Plant (WTP) adalah proses menghilangkan kandungan mineral (demineralisasi) yang diambil dari raw water (air bebas garam namun masih mengandung mineral logam). Proses WTP: Air laut – Desalination Plant – Raw Water Tank (Air Tawar) – Demineralization Plant (Air Demine) – Make Up Water Tank – Unit (Condenser – Deaerator – Steam Drum – Steam Turbin).

C. Generator

Generator adalah suatu sistem yang menghasilkan tenaga listrik dengan masukan tenaga mekanik. Jadi disini generator berfungsi untuk mengubah tenaga mekanik menjadi tenaga listrik. Sistem eksitasi berhubungan erat dengan pengoperasian AVR, karena pada dasarnya prinsip dari AVR adalah mengatur arus penguatan (eksitasi) pada exciter. Sistem eksitasi adalah sistem pasokan listrik DC sebagai penguatan pada generator listrik atau sebagai pembangkit medan magnet, sehingga suatu generator dapat menghasilkan energy listrik dengan besar tegangan keluaran generator bergantung pada besarnya arus eksitasinya. Sistem ini merupakan sistem yang vital pada proses pemabngkit listrik



Gambar 2.5 Generator

Sumber: Operasi Pembangkit (2004,p.29)

D. Steam Turbine

Turbin uap adalah suatu mesin yang berfungsi untuk merubah energy panas (thermis) menjadi energi mekanis (energi putar). Konstruksinya terdiri rumah turbin (casing turbin) atau stator (statis) kemudian rotor (bagian yang berputar). Pada rotor turbin ditempatkan sudu-sudu jalan yang disusun sedemikian rupa melingkar di rotor dan berjajar di sepanjang rotor. Sudu yang berputar ini ditempatkan secara simetris disela-sela sudu tetap (berselang-seling). Energi panas dalam uap mula-mula diubah menjadi energy kinetis oleh nozzle. Selanjutnya uap dengan kecepatan tinggi ini uap masuk ke turbin membentur /mendorong sudu putar pada turbin. Uap setelah keluar dari sudu putar diterima oleh sudu tetap kemudian dipantulkan lagi ke sudu putar, begitu sudu putar diterima sudu tetap kemudian dipantulkan lagi ke sudu putar, begitu seterusnya

hingga keluar melalui exhaust turbin menuju kondesor, jadi energi kinetic diubah menjadi energi mekanis terjadi pada sudu-sudu putar turbin



Gambar 2.6 Turbin uap
Sumber: Operasi Pembangkit (2004,p.33)

Berdasarkan tipe turbin yang digunakan pada pembangkit listrik, dapat dibedakan berdasarkan tekanannya:

- a) Turbin tekanan rendah
- b) Turbin tekanan sedang
- c) Turbin tekanan tinggi

Turbin terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator dan rotor yang merupakan komponen utama pada turbin kemudian ditambah komponen lainnya yang meliputi pendukungnya, seperti bantalan, kopling dan sistem bantuan agar kerja turbin dapat lebih baik. Sebuah turbin uap memanfaatkan energi kinetik air yang bertambah akibat penambahan energi termal.

Fungsi utama turbin untuk mengubah energi panas yang terkandung dalam uap menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran. Uap dengan tekanan dan temperature yang tinggi mengalir melalui *nozzle* sehingga kecepatannya naik dan untuk mendorong sudu-sudu turbin. Akibatnya, poros turbin bergerak menghasilkan putaran (energi mekanik) untuk menggerakkan generator listrik.

E. Kogenerasi

Kogenerasi adalah suatu proses pembangkitan dan pemanfaatan energi dalam bentuk yang berbeda secara serempak dari energi bahan bakar untuk menghasilkan tingkat efisiensi maksimum, ekonomis dan ramah lingkungan. Aplikasi kogenerasi yang

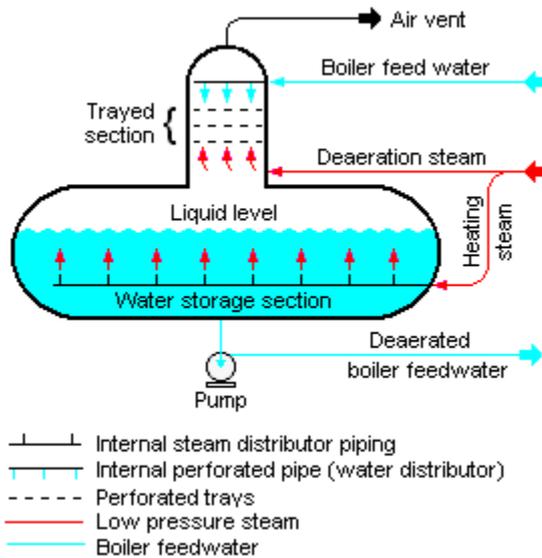
lazim digunakan adalah pembangkitan energi listrik dan pembangkitan energi termal. Energi listrik akan dipakai untuk catu daya bagi peralatan kelistrikan

Sistem kogenerasi adalah serangkaian atau pembangkitan secara bersamaan beberapa bentuk energi yang berguna (biasanya mekanikan dan termal) dalam satu sistem yang terintegrasi. Sistem CHP (Combined Heat & Power) terdiri dari sejumlah komponen mesin penggerak (mesin panas), generator, pemanfaatan kembali panas, dan sambungan listrik tergabung menjadi suatu integrasi. Jenis peralatan yang menggerakkan seluruh sistem (mesin penggerak) mengidentifikasi secara khusus sistem CHPnya. Mesin penggerak untuk sistem CHP (Combined Heat & Power) terdiri dari mesin reciprocating, pembakaran atau turbin gas, turbin uap, turbin mikro dan sel bahan bakar. Mesin penggerak ini dapat membakar berbagai bahan bakar, yaitu gas alam, batubara, minyak bakar, dan bahan bakar alternatif untuk memproduksi daya poros atau energi mekanis. Meskipun umumnya energi mekanis dari mesin penggerak digunakan untuk menggerakkan generator untuk membangkitkan listrik, tetapi dapat juga digunakan untuk menggerakkan peralatan yang bergerak seperti kompresor, pompa, dan fan. Energi termal dari sistem dapat digunakan untuk penerapan langsung dalam proses atau tidak langsung untuk memproduksi steam, air panas, udara panas untuk pengeringan

F. Deaerator

Deaerator berfungsi menghilangkan kandungan oksigen atau gas-gas terlarut lainnya pada air umpan sebelum masuk *boiler*. Deaerator bekerja berdasarkan sifat oksigen yang larut pada air berkurang dengan adanya kenaikan suhu. Deaerator terdiri dari dua drum, pertama drum yang lebih kecil merupakan tempat pemanasan pendahuluan dan pembuangan gas-gas dari air umpan, sedangkan kedua drum yang lebih besar merupakan tempat penampungan air umpan sebelum masuk *boiler*.

Drum kecil terdapat spray nozzle yang berfungsi menyemprotkan air umpan menjadi butiran-butiran air halus pada proses pemanasan dan pembuangan gas-gas lebih sempurna, dan gas-gas yang tidak terkondensasi dibuang ke atmosfer melalui saluran vent pada drum kecil. Oksigen dan gas-gas terlarut dalam air umpan perlu dihilangkan karena dapat menyebabkan senyawa oksida menjadi karat pada pipa dan peralatan pembangkit yang terbuat dari logam. Air jika bereaksi dengan karbondioksida terlarut dapat menyebabkan korosi lebih lanjut. Terdapat dua jenis deaerator yang sering digunakan yaitu tipe Tray dan tipe Spray.



Gambar 2.7 Bagian-Bagian *Deaerator Tray*
 Sumber Operasi Pembangkit (2004,p.83)

Deaerator tipe Tray (Gambar 2.10) terdiri dari bagian domed deaeration yang dipasang diatas silinder vessel horizontal yang berfungsi sebagai tangki penyimpanan air dari *boiler*. Prinsip kerja deaerator masuk melalui bagian atas deaerator melewati tray dan uap masuk melalui bagian bawah. Tray menyebabkan permukaan kontak antara air dengan uap menjadi lebih luas. Gas-gas yang tidak terlarut dipisahkan oleh uap dan keluar melalui lubang bagian atas deaerator. Saluran ventilasi terdiri dari katup yang hanya memperbolehkan uap untuk keluar. Air umpan yang telah di-diaerasi mengalir kedalam tangki penyimpanan yang kemudian dipompa ke *boiler*. Uap pemanas bertekanan rendah yang memasuki tangki deaerator bagian bawah melalui pipa sparger ditujukan untuk menjaga air umpan tetap hangat. Deaerator tipe Spray hanya terdiri dari tangki horizontal yang berfungsi sebagai tempat dieresis dan tempat penyimpanan air. Gambar 2.11 menunjukkan bahwa tipe deaerator spray memiliki bagian pemanasan awal dan bagian dieresis yang dipisahkan oleh penyekat. Uap bertekanan rendah masuk melalui tangki dengan disemprotkan dari bagian bawah tangki sedangkan air umpan disemprotkan dari atas dan dipanaskan oleh uap yang disemprotkan ke atas oleh stem sparger. Fungsi dari spray nozzle dan bagian preheater adalah untuk memanaskan air umpan sampai suhu saturasi sehingga memudahkan proses pengurangan gas-gas terlarut yang kemudian dipisahkan melalui lubang diatas tangki, dan jenis ventilasi yang digunakan dengan deaerator tipe tray, begitu juga dengan air umpan yang telah di-dieresis dipompa ke *boiler*.

G. Superheater

Superheater digunakan untuk memanaskan lebih lanjut dan *boiler* sehingga menjadi uap kering. Pemanasan untuk superheater diambil dari panas gas buang hasil pembakaran diruang pembakaran Furnace. Superheater dibagi menjadi) tahap yaitu

1. Primary Superheater
2. Secondary Superheater
3. Final Superheater

Primary Superheater menerima gas yang relatif dingin untuk dipanaskan dengan gas buang yang di aliri searah dengan aliran uap tersebut. Kemudian uap keluar dari secondary Superheater outlet melalui transfer yang dilengkapi dengan pipa spary type attemperator untuk mengatur suhu uap menuju secondary Superheater disini uap akan dipanas lebih lanjut

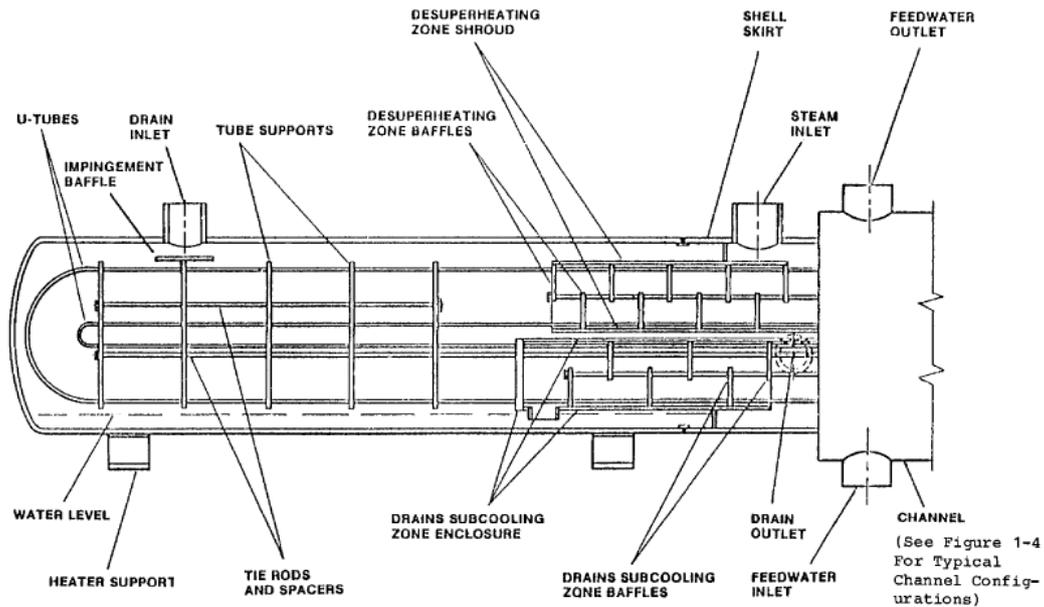
Seperti di primary Superheater, selanjutnya uap akan ke final Superheater dimana uap juga akan dipanasi. Uap dari Final outlet Superheater masuk ke Final Superheater. dan keluar melalui final outlet Superheater untuk meninggalkan *boiler* menuju High Pressure Turbine

H. Reheater

Reheater berfungsi untuk memanaskan kembali uap yang keluar dari HP Turbine dengan memanfaatkan gas hasil pembakaran yang temperaturnya relatif masih tinggi. Pemanasan ini bertujuan untuk menaikkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Perpindahan panas yang paling dominan pada reheater adalah perpindahan panas konveksi. Perpindahan panas radiasi pada reheater memberikan efek yang sangat kecil sehingga proses ini biasanya diabaikan. Temperatur uap masuk reheater adalah 335°C dengan tekanan sebesar 42,8 kg/cm², sedangkan temperatur keluarannya adalah 541°C dengan tekanan 39 kg/cm². Uap ini kemudian digunakan untuk menggerakkan IP Turbine, dan setelah uap keluar dari IP Turbine, langsung digunakan untuk memutar LP Turbine tanpa mengalami pemanasan ulang.

I. Feedwater heater

Feedwater heater merupakan alat penukar panas (Heat exchanger) berupa Shell and Tube Heat exchanger dengan Tipe U-Tube. FWH ini menggunakan fluida panas (uap) berada di shell dan fluida dingin (air) yang terletak di dalam tube. Dalam usaha mendapatkan efisiensi pemanasan yang optimum, pemanas dari air terdiri dari 3 zona yaitu: Zona Desuperheating, Zona Condensing dan Zona Subcooling

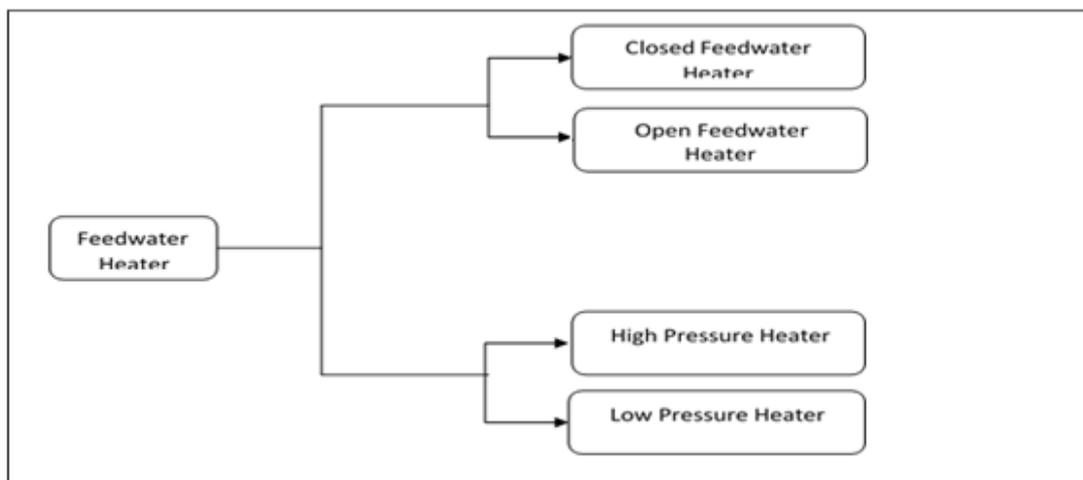


Gambar 2.8 Feedwater heater

Sumber: Operasi Pembangkit (2004,p.113)

Uap dari turbin akan masuk melalui sisi steam inlet masuk ke zona desuperheating. Pada zona ini terjadi perpindahan panas antara uap dengan pipa yang yang berisi air. Perpindahan panas pada zona ini menyerap fraksi panas superheat dari uap yang menyebabkan temperature uap turun sampai suhu saturasinya. Selanjutnya uap akan mengalir masuk menuju zona condensate, pada bagian ini perpindahan panas yang dominan dimana fraksi panas laten dari uap ekstraksi diserap oleh air pengisi hingga uap mencapai kondisi saturated liquid selanjutnya pada zona drain dimana sebagian fraksi panas sensible diserap oleh air pengisi sehingga suhu air kondensasi uap ekstraksi mengalami penurunan hingga di bawah titik didih (subcooling), sebelum mengalir keluar ke saluran drain

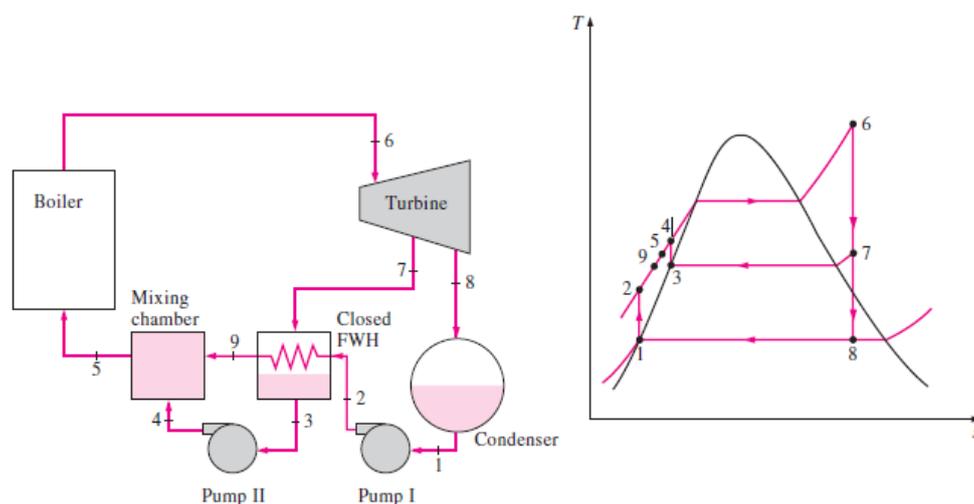
Feedwater heater dapat diklasifikasikan menjadi 2 berdasarkan tempat pencampuran yaitu *Open Feedwater heater* dan *Closed Feedwater heater*. Sedangkan berdasarkan tempat instalasinya dapat di bedakan menjadi 2 yaitu *High Pressure Heater* dan *Low Pressure Heater*. Klasifikasi *feedwater heater* dapat di lihat dari diagram berikut:



Gambar 2.9 Klasifikasi *Feedwater heater*
Sumber Operasi Pembangkit (2004,p.100)

a. *Closed Feedwater heater*

Tipe *feedwater heater* lainnya yang biasa digunakan adalah *Closed Feedwater heaters*, dimana panas yang ditransfer dari uap ekstraksi ke feedwater tanpa dicampur terlebih dahulu. Kedua aliran dapat berada pada tekanan yang berbeda karena mereka tidak bercampur. Skema dari pembangkit listrik tenaga uap dengan satu *closed feedwater heater* dan diagram T-s dari siklus ditunjukkan oleh gambar 2.23 berikut ini



Gambar 2.10 Sistem *Closed Feedwater heater*
Sumber: Yunus A. Cengel (1994,p.570)

Pada *Closed Feedwater heater* yang ideal, feedwater dipanaskan hingga suhu keluar dari uap ekstraksi, dimana idealnya meninggalkan heater sebagai cairan jenuh pada tekanan ekstraksi. Pada sistem pembangkit tenaga actual, feedwater meninggalkan heater dibawah suhu keluar dari uap ekstraksi karena perbedaan suhu beberapa derajat

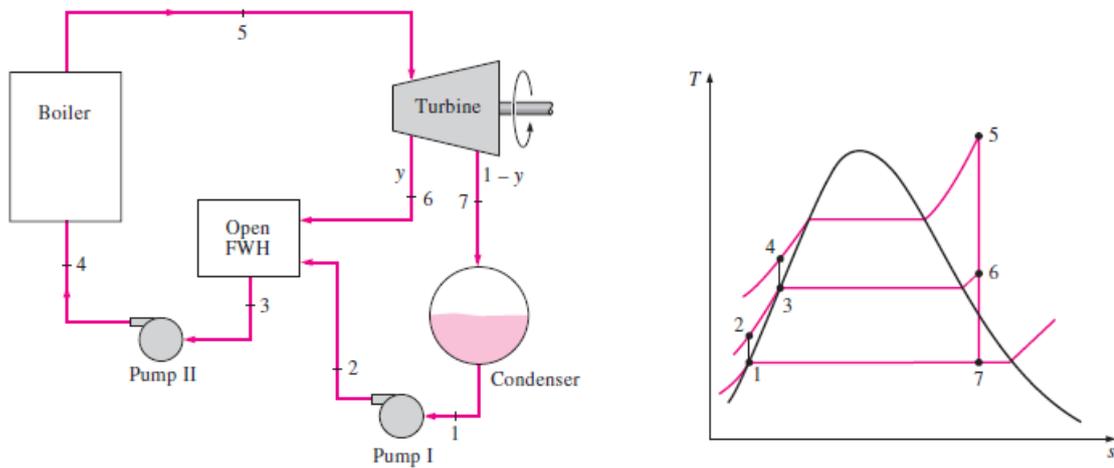
diperlukan untuk efektifitas perpindahan panas. Uap kondensasi baik yang dipompakan ke aliran feedwater maupun dikembalikan lagi ke heater lainnya atau ke kondenser disebut dengan trap. Trap dapat membuat cairan dipompakan ke tekanan yang lebih rendah. Fraksi dari aliran total dapat dihitung dengan menerapkan prinsip-prinsip conservation mass and energy pada control volume. Dengan mengasumsikan tidak terjadi perpindahan kalor antara sistem pengisian dan lingkungan serta mengabaikan energi kinetik dan potensial, maka kesetimbangan laju mass and energy pada kondisi steady state menjadi persamaan berikut ini :

$$0 = y (h_{u_{in}} - h_{u_{out}}) + (h_i - h_o) \dots\dots\dots (2-1)$$

$$y = \frac{h_o - h_i}{h_{u_{in}} - h_{u_{out}}} \dots\dots\dots (2-2)$$

b. Open Feedwater heater

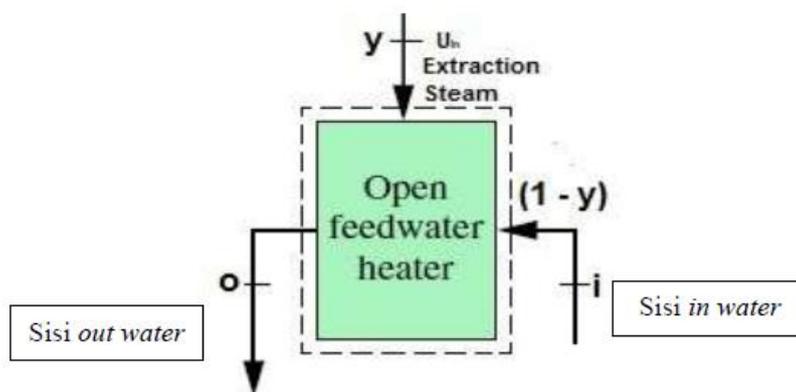
Open Feedwater heaters pada dasarnya adalah mixing chambers, dimana uap hasil ekstraksi dari turbin dicampur dengan feedwater. Skema dari pembangkit listrik tenaga uap dengan satu *open feedwater heater* dan diagram T-s ditunjukkan oleh gambar 2.22 berikut ini



Gambar 2.11 Diagram temperature versus entropi dari siklus Rankine
 Sumber: Yunus A. Cengel (1994,p.569)

Pada siklus regeneratif Rankine ideal, uap masuk ke turbin pada tekanan boiler (kondisi 5) dan diekspansikan secara isentropic ke tekanan medium (kondisi 6). Beberapa uap akan diekstraksi dan dikirim kembali ke *feedwater heater*, sementara uap yang tersisa diekspansikan lanjut secara isentropic ke tekanan kondenser (kondisi 7). Air kondensasi yang juga disebut dengan feedwater dipompakan kembali ke *feedwater*

heater, dimana disana akan dicampur dengan uap ekstraksi dari turbin. Fraksi dari uap ekstraksi meninggalkan heater sebagai uap saturasi pada tekanan heater (kondisi 3). Pompa kedua meningkatkan tekanan air hingga mencapai tekanan boiler (kondisi 4). Siklus berakhir dengan dipanaskan air pada boiler hingga kondisi masuk turbin (kondisi 5). Untuk setiap 1 kg uap yang meninggalkan boiler, y kg diekspansikan terpisah di dalam turbin dan diekstraksikan pada kondisi 6. Sisa (1-y) kg diekspansikan ke tekanan kondenser. Oleh karena itu Flow rate pada setiap komponen berbeda. Jika flow rate boiler adalah \dot{m} , maka $(1-y)\dot{m}$ melewati kondenser.



Gambar 2.12 Open Feedwater heater
 Sumber Operasi Pembangkit (2004,p.140)

Perpindahan panas pada heat exchanger ini dilakukan secara konveksi. Pada open feedwater heater, extraction steam bertemu dan bercampur dengan fluida kerja. Fraksi y dapat dihitung dengan menerapkan prinsip-prinsip conservation of mass and energy pada control volume di sekeliling pemanas. Jika tidak terjadi perpindahan kalor antara sistem dan lingkungan serta energi kinetik dan potensial diabaikan, maka kesetimbangan laju mass and energy pada kondisi tunak menghasilkan persamaan berikut:

$$0 = y h_{uin} + (1 - y) h_i - h_o \dots\dots\dots (2-3)$$

$$0 = y \dot{m}_{uin} + (1 - y) \dot{m}_i - \dot{m}_o \dots\dots\dots (2-4)$$

c. High Pressure Heater

High Pressure Heater, Adalah pemanas air pengisi tekanan tinggi, dipasang setelah boiler feed pump, sumber kalornya berasal dari ekstraksi uap HP turbin .High Pressure Heater (HP Heater) memiliki peran merupakan alat pemanas awal feedwater sebelum masuk boiler. Tekanan pada air pengisi dinaikkan oleh BFP (Boiler Feed Pump), tekanan dari air pengisi dinaikkan hingga melebihi tekanan pada boiler. Hal ini di tujukan agar air pengisi dapat mengalir masuk ke dalam boiler.



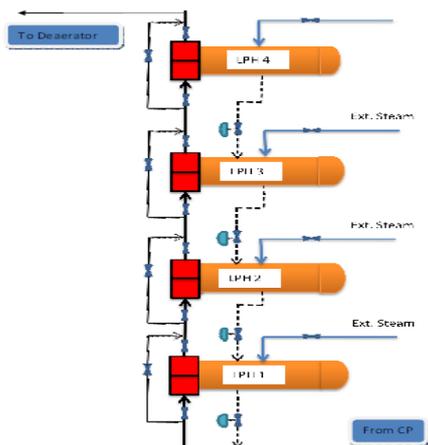
Gambar 2.13 High Pressure Heater
 Sumber: Operasi Pembangkit (1994,p.120)

Pada HP heater, selain penambahan tekanan di lakukan juga penambahan temperature pada air pengisi dalam melewati sistem di dalam HP heater. Pemanasan air pengisi di lakukan untuk dua tujuan yaitu :

- Semakin dekat temperature air pengisi masuk *boiler* dengan batas titik didih air pada tekanan operasi *boiler*, maka semakin sedikit bahan bakar yang dibutuhkan untuk proses evaporasi didalam *boiler*
- Temperatur dari air pengisi yang akan masuk ke dalam *boiler* sedapat mungkin harus mendekati dari temperature metal ketel karena jika terjadi perbedaan yang besar antara keduanya dapat menimbulkan kerusakan komponen dari *boiler* akibat dari thermal stress

d. Low Pressure Heater

LPH (Low Pressure Heater) Adalah pemanas air pengisi sebelum masuk ke deaerator. Instalasi jumlah low pressure heater tiap pembangkit berbeda-beda sesuai dengan kapasitas pembangkitan. Kalor uap ekstraksi (bleed steam / extraction steam) menjadi sumber pemanas dari air yang masuk ke instalasi LPH. Low Pressure Turbine menjadi salah satu pilihan dari sumber uap ekstraksi yang akan di alirkan ke LP heater. Proses perpindahan panas terjadi pada dinding luar pipa yang berisikan air dengan uap ekstraksi yang berada dibagian luar pipa

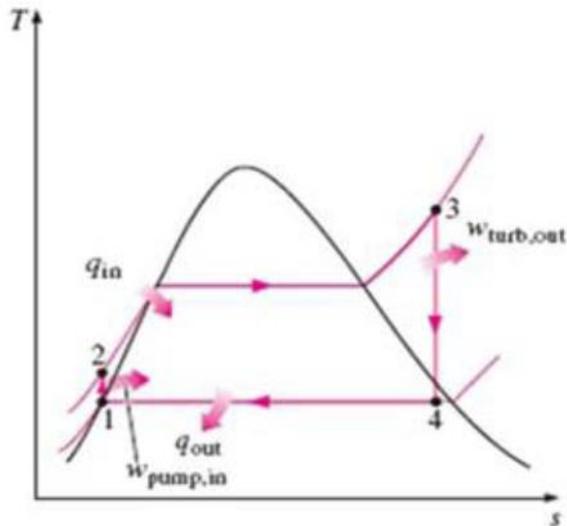


Gambar 2.14 Instalasi Low Pressure Heater
 Sumber: Yunus A. Cengel (1994,p.115)

Proses kondensasi dari uap ekstraksi pada LP heater akan di alirkan menuju drain inlet pada instalasi LP heater yang lebih rendah sebagai sumber pemanas selain dari uap LP turbin. Pada gambar 2.11 instalasi dari 4 tingkat LP heater di mana air masuk ke LP heater 1 dan mengalami perpindahan panas antara air dalam pipa dan uap dari LP turbin dan sisa uap yang telah terkondensasi yang berasal dari LP heater 2. Selanjutnya air yang telah terpanaskan keluar dari feedwater outlet LP heater 1 menuju ke feedwater inlet LP heater 2, pada tahap ini uap ekstraksi dari LP turbin lebih tinggi suhu dan tekanannya dari pada uap ekstraksi pada LP heater 1, dan sisa uap dari LP heater 3 menjadi media pemanas tambahan dari ekstraksi uap di LP heater 2. Akhir dari instalasi LP heater adalah air yang telah melewati semua LP heater akan menuju ke dearator sedangkan uap yang telah terkondensasi menuju ke kondenser.

2.4 Siklus Rankine

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.



Gambar 2.15 Siklus Rankine Sederhana
 Sumber: Yunus A. Cengel (1994,p.553)

Temperatur hanya diatur oleh tekanan uap fluida. Kerja pompa pada siklus Rankine untuk menaikkan tekanan fluida kerjadalam fase cair akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan pemampatan untuk campuran uap dalam tekanan yang sama pada siklus Carnot.

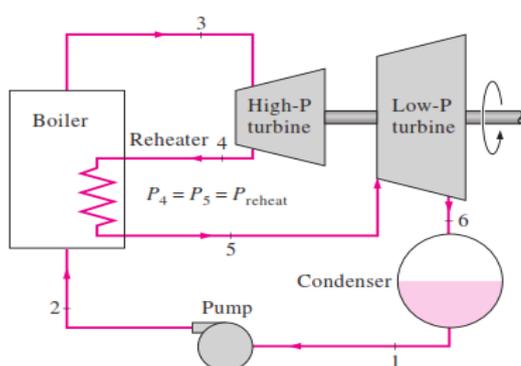
Siklus Rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses:

- 1 -2 Kompresi isentropik dengan pompa.
- 2 -3 Penambahan panas dalam *boiler* secara isobar
- 3 - 4 Ekspansi isentropik pada turbin.
- 4 -1 Pelepasanpanas pada kondenser secara isobardan isothermal.

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh (saturated liquid) 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 saturated pada kondisi 3. Dimana panas diberikan oleh *boiler* ke air pada tekanan yang tetap. *Boiler* dan seluruh bagian yang menghasilkan steam ini disebut sebagai steam generator. Uap saturated 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.

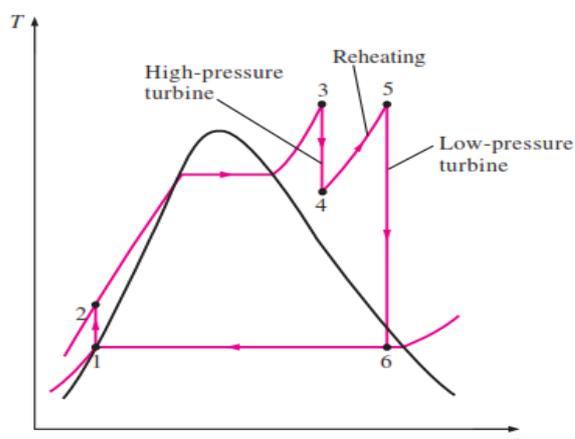
2.4.1 Siklus Rankine dengan Reheater

Semakin maju peradaban membuat manusia berusaha meningkatkan kinerja dari segala peralatan yang dimilikinya, demikian halnya dengan penerapan siklus Rankine. Dalam rangka meningkatkan efisiensi dalam proses muncul alat yang disebut dengan reheater. Alat ini berfungsi untuk meningkatkan kembali temperatur dari uap yang telah keluar dari turbin. Penggunaan reheater ini didasari pertimbangan pemanfaatan uap keluaran dari turbin masih memiliki temperatur yang relatif cukup tinggi. Bila uap ini langsung ditampung di kondensor akan menghasilkan kerugian yang besar bagi PLTU. Pada system ini turbin dibuat 3 tingkat terdiri dari turbin tekanan tinggi, turbin tekanan sedang dan turbin tekanan rendah. Berikut gambar sederhana siklus Rankine dengan menggunakan reheater:



Gambar 2.16 Skema sistem turbin uap sederhana dengan reheater
Sumber: Yunus A. Cengel (1994,p.565)

-Pada gambar di bawah ini akan terlihat grafik T – S yang sederhana dari siklus rankine berupa diagram temperature berbanding entropi



Gambar 2.17 Diagram temperature versus entropi dari siklus Rankine
Sumber: Yunus A. Cengel (1994,p.565)

Pada sistem ini prinsip kerjanya hampir sama seperti pada sistem tanpa reheater. Pada sistem ini, menggunakan turbin bertingkat tiga. Turbin tekanan tinggi, tekanan sedang dan tekanan rendah. Setelah uap pertama “Uap Utama” dari *boiler* digunakan untuk memutar turbin tekanan tinggi (Pada gambar proses 4 & pada diagram proses 3) uap tidak dibuang tapi dipanaskan lagi dengan reheater (Pada gambar proses 5 & Pada diagram proses 3’). Setelah dari reheater temperatur akan kembali naik sesuai yang diharapkan dan digunakan untuk memutar turbin tekanan sedang. Uap buangnya langsung digunakan untuk memutar turbin tekanan rendah. Uap terakhir yang keluar dari turbin tekanan rendah langsung ditampung di kondensor yang kemudian proses akan kembali seperti semula.

2.4.2 Perhitungan kerja dan perpindahan panas

Rankine cycle menggabungkan perpindahan kalor antara komponen pembangkit dengan sekelilingnya. Sehingga energy kinetic dan potensial juga diabaikan. Analisis kerja siklus rankine cycle beroperasi pada kondisi tunak. Prinsip kekekalan masa dan energy dapat digunakan menghitung perpindahan energy dari titik kondisi seperti ditunjukkan dalam Gambar.

- Turbin

Turbin adalah sebuah mesin berputar yang mengambil energy dari aliran fluida. Konstruksi dari turbin sederhana memiliki satu komponen yang bergerak secara “*assembly rotor-blade*”. Fluida yang bergerak memutar baling baling dan menghasilkan energy untuk menggerakkan rotor. Adapun persamaan dari energy untuk menghitung turbin sebagai berikut :

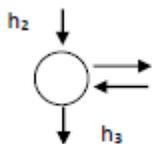
$$0 = Q_{cv} - \dot{W}_t + \dot{m} \left[h_1 - h_2 + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \right] \dots \dots \dots (2-15)$$

$$\frac{W_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2 \dots \dots \dots (2-6)$$

- Kondensor

Kondensor adalah instalasi penukar panas. Dapat juga sebagai penukar kalor yang berfungsi untuk fluida. Dalam aplikasinya kondensor diletakkan pada luar ruangan sehingga tidak mengganggu proses pendinginan. Panas yang dilepas oleh kondensor dapat di hitung dengan persamaan:

$$\frac{Q_{out}}{\dot{m}} = h - h_3 \dots \dots \dots (2-7)$$

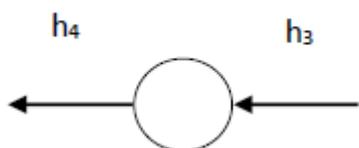


- Pompa

Kondesat cair yang meninggalkan sisi outlet kondensor di pompa menuju ke *feedwater heater*. Kerja dari pompa dan kesetimbangan energy dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{W_p}{\dot{m}} = h_4 - h_3 \dots\dots\dots(2-8)$$

$$h_4 = h_3 + V (P_4 - P_3) \dots\dots\dots(2-9)$$



- *Feedwater heater*

Analisa *feedwater heater* untuk mencari aliran uap dan tekanan ekstraksi dilakukan mulai dari *feedwater heater* tekanan tinggi ke tekanan rendah. Menghitung massa aliran uap ekstraksi dan tekanan ekstraksi pada setiap *feedwater heater*. Entalpi dapat dengan mudah diketahui dengan tabel uap dengan menggunakan rumus rumus termodinamika yang dikeluarkan oleh IAPWS (The International Association for the Properties of Water and Steam) , persamaan laju aliran massa dapat dicari dengan persamaan :

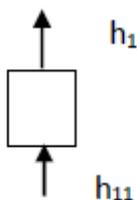
$$m_s h_{si} + m_w h_{wi} = m_s h_{se} + m_w h_{we} \dots\dots\dots(2-10)$$

- *Boiler*

Boiler menerima air yang dialirkan oleh pompa dan dipanaskan sampai suhu yang diinginkan. Dengan menggunakan control volume yang melingkupi tabung *boiler* dan drum, kesetimbangan laju aliran massa dan energy dapat di evaluasi dengan persamaan sebagai berikut:

$$0 = Q_{cv} - W_t + \dot{m} [h_1 - h_{11} + \frac{V_1^1 - V_4^2}{2} + g (z_1 - z_4)] \dots\dots\dots(2-11)$$

$$\frac{Q_{in}}{\dot{m}} = h_{11} - h_1 \dots\dots\dots(2-12)$$



2.5 Heat Rate

Pengujian Heat rate dilakukan untuk menentukan proses transaksi niaga pembelian energi listrik sehingga pihak PLN dapat mematok harga untuk setiap kWh energi listrik yang diproduksi. Heat rate adalah ukuran dari thermal performance *boiler*-turbine-generator yang dioperasikan secara gabungan sebagai suatu unit. Heat rate didefinisikan sebagai jumlah dari energi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah energi listrik selama waktu satu jam. Satuan Heat rate adalah kJ/kWh. Sedangkan Turbine Heat rate didefinisikan sebagai jumlah kalor yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kWh.

Perhitungan mengenai heat rate berdasarkan SPLN No 80 tahun 1989 adalah sabagai berikut :

1. Heat Rate Powerplant

$$HR_{powerplant} = \frac{HR_{Turbine}}{\eta_{Boiler}} \dots\dots\dots (2-13)$$

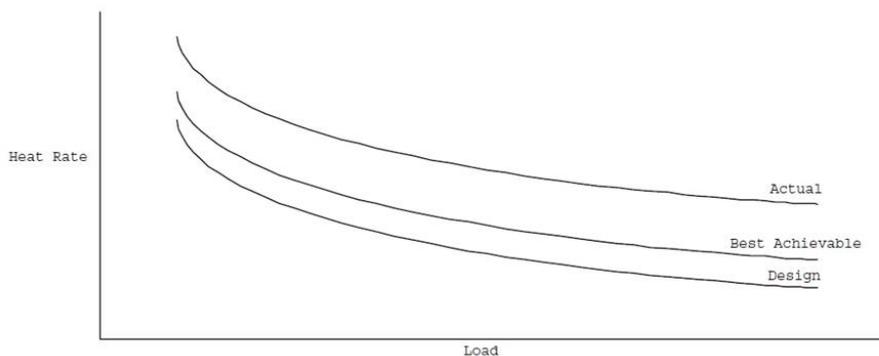
Dimana :

$HR_{Turbine}$: Heat Rate Turbin (dalam kcal/KWh)

η_{Boiler} : Effisiensi *boiler* (dalam %)

Nilai heat rate menjadi suatu yang mendasar dalam menghitung biaya operasi dan laba untuk sebuah pembangkit. Pengoperasian pembangkit tanpa memantau heat rate dan efisiensi dapat membuat pendapatan menurun. Nilai dari Heat rate perlu di lakukan perbandingan diantaranya

1. Perbandingan dengan *As Design Heat Rate*: yaitu data heat rate dari Design Power Plan Document. Data ini digunakan jika terdapat data yang tidak ditemukan pada data *As Built Heat Rate*. Biasanya setiap pembangkit akan mendapatkan heat balance yang menjelaskan heat rate design dari sebuah pembangkit menurut pabrik.
2. Perbandingan dengan *As Bulit Heat Rate*: yaitu data heat rate dari Commisioning test. Heat rate hasil komisioning ini bisa sebagai pembanding ketika melakukan uji heat rate, akan tetapi untuk unit-unit yang sudah beroperasi cukup lama akan sulit untuk mendapatkan hasil sesuai parameter ini.
3. Perbandingan dengan *Best Achievable Heat Rate*: yaitu data heat rate yang didapat dari operasi optimum suatu pembangkit, dimana hal itu didapat setelah dilakukan modifikasi atau inspeksi yang akan mempengaruhi heat rate. Sebagai contoh di PLTGU Grati setiap periode EOH tertentu akan dilakukan Major Inspection, dimana uji heat setelah major inspection dapat dijadikan pembanding untuk pencapaian heat rate selanjutnya.



Gambar 2.18. Jenis Jenis Kurva Heat Rate
Sumber M.wakil (1999,p.209)

2.6 Konsumsi Bahan Bakar

Pada *boiler* jumlah penggunaan bahan bakar yang digunakan berdasarkan jumlah panas yang dibutuhkan untuk mengubah air yang masuk kedalam *boiler* menjadi uap panas superheated yang akan di masukkan ke turbin. Proses pembentukan uapair dari fase cair menjadi uap melalui proses yang disebut panas sensibel dan panas laten. Panas sensibel ialah panas yang menyebabkan terjadinya kenaikan/ penurunan temperatur namun phasa (wujud) tidak berubah. Sedangkan panas laten ialah panas yang diperlukan untuk mengubah fasa (wujud) benda namun temperaturnya tetap. Perhitungan mengenai konsumsi bahan bakar berdasarkan SPLN No. 80 tahun 1989 adalah sebagai berikut :

1. Konsumsi bahan bakar

$$\text{Konsumsi bahan bakar} = \frac{\text{LHV Heat Load}}{\text{Calorie Value}} \dots\dots\dots (2-14)$$

Dimana :

Q_f : Jumlah bahan bakar yang di pakai (liter).

kWh_B : Jumlah kWh yang dibangkitkan generator (kWh).

kWh_{ps} : Jumlah kWh yang dibutuhkan untuk pemakaian sendiri (dalam kWh).

2.7 Gatecycle

GateCycle adalah software yang digunakan untuk menganalisa unjuk kerja dari sebuah power plant. Gate Cycle menggunakan proses termodinamika, perpindahan dan mekanika fluida dalam menjalankan perhitungan simulasinya. Gate cycle yang digunakan dalam penelitian ini adalah versi 5.61.0.r tahun 2004.

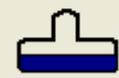


Gambar 2.19 Gatecycle
Sumber: Warhamna (2004,p.9)

Software ini dapat membuat sebuah pembangkit listrik dengan desain yang kita inginkan ataupun sesuai template yang sudah disediakan oleh Gate Cycle. Selain itu, kita juga dapat menentukan properties yang akan bekerja pada tiap komponen dalam desain pembangkit listrik tersebut. Hasil yang didapatkan dari software Gate Cycle ini antara lain efisiensi, heat rate, load yang dihasilkan, kadar polutan yang dilepas ke udara, losses yang terjadi, konsumsi bahan bakar, suhu, tekanan, kelembaban udara sekitar dan lain-lain. Selain itu juga, kita dapat langsung mendapatkan grafik yang kita inginkan hasil iterasi software Gate Cycle ini. Ikon gatecycle secara garis besar dapat di tunjukan pada tabel 2.1 dan identifikasi jenis stream pada gatecycle dapat di lihat pada tabel 2.2

Tabel 2.1
Ikon pada Gatecycle

NO	Ikon	Keterangan
1		Fossil <i>Boiler</i>
2		Steam Turbine
3		Superheater
4		Reheater
5		Temperature Mix Control
6		General Heat Exchanger
7		Generator

8		Condenser
9		Dearator
10		Pompa
11		Valve
12		Flash Tank
13		<i>Feedwater heater</i>

Tabel 2.2
klasifikasi aliran pada *gatecycle*

NO	Gambar Aliran	Keterangan
1		Garis berwarna biru muda menunjukkan aliran uap air
2		Garis Berwarna merah menunjukkan aliran gas
3		Garis berwarna biru menunjukkan aliran air
4		Garis berwarna hitam menunjukkan peralatan yang terhubung satu poros

Selain itu, Gate cycle mempunyai proses yang disebut Cycle Link, dimana proses ini digunakan untuk menentukan input dan output parameter apa yang ingin diketahui dari power plant yang telah dimodelkan sebelumnya.

2.13 Hipotesa

Dalam penelitian ini berdasarkan pertimbangan dasar teori, dapat diprediksi bahwa p-penggunaan *feedwater heater* sebagai proses kogenerasi pada sistem di PLTU paiton 9 dapat menurunkan produksi listrik oleh generator, semakin banyaknya *Feedwater heater* yang digunakan, maka semakin kecil konsumsi bahan bakar, semakin besar Heat rate dan menaikkan nilai efisiensi pembangkit.

