

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Relevan

Sebagai landasan dalam penyusunan penelitian ini, penulis merujuk pada beberapa studi sebelumnya yang relevan dan memiliki keterkaitan dengan pembahasan penelitian ini.

1. Evaluasi Dampak Beban Generator Turbin Gas Terhadap Efisiensi Heat Recovery Steam Generator (HRSG) di PT PLN Indonesia Power PLTGU Priok Blok 3

Penelitian ini meninjau bagaimana fluktuasi beban pada turbin gas memengaruhi efisiensi termal HRSG tipe triple pressure. Dengan menggunakan data dari *Automatic Control System* (ACS), studi ini menganalisis tiga kondisi beban: tinggi (200 MW), sedang (165 MW), dan rendah (153 MW). Hasilnya menunjukkan adanya hubungan linear yang kuat yaitu efisiensi termal mencapai puncaknya pada beban tinggi sebesar 75,97% (bahkan sempat menyentuh 77,04%), namun menurun menjadi 73,93% saat unit beroperasi di beban rendah.

Kajian ini juga mengungkapkan bahwa sektor tekanan tinggi (HP) merupakan penyerap panas paling dominan dengan kontribusi mencapai 69,5% terhadap total efisiensi termal sistem. Secara keseluruhan, temuan ini menekankan bahwa pengoperasian pada beban maksimal (> 200 MW) adalah kunci untuk menjaga standar efisiensi operasional bagi unit serupa di PLTGU Priok. (Alfaridzi et al., 2025)

2. Analisis Efisiensi Termal HRSG Sebelum dan Sesudah Overhaul pada PLTGU UJP Tanjung Priok Blok 2

Dari sisi aspek pemeliharaan, penelitian ini memberikan sudut pandang penting mengenai bagaimana perawatan menyeluruh (overhaul) berpengaruh pada

efisiensi HRSG. Studi tersebut membandingkan efisiensi termal di berbagai beban sebelum dan setelah overhaul secara periodic. Penelitian menemukan bahwa efisiensi HRSG meningkat signifikan pada semua tingkat beban setelah overhaul, contohnya pada beban 135 MW efisiensi naik dari 58% menjadi 60%, dan pada beban 225 MW meningkat dari 54% menjadi 67%. Penurunan kerugian panas HRSG pasca overhaul menjadi indikator perbaikan kondisi operasional, yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi sampai 25 MW pada beban tertentu. Temuan ini menegaskan pentingnya perawatan sebagai bagian integral dari strategi optimalisasi efisiensi termal PLTGU. (NASUTION Pramono, 2024)

3. Analisis Efisiensi Termal dan Komponen Utama Sebelum dan Sesudah Overhaul Pada PLTU Jeranjang OMU Unit 3 (25 MW)

Pada penelitian ini menguji efektivitas overhaul dalam meningkatkan efisiensi termal HRSG dan komponen terkait lainnya. Penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi termal cenderung menurun pada saat beban rendah, yang disebabkan oleh turunnya temperatur inlet gas buang sebagai akibat dari turunnya output turbin gas. Namun, efisiensi secara keseluruhan meningkat dan lebih stabil pada beban nominal setelah perbaikan dan perawatan menyeluruh. Hal ini menegaskan urgensi pemeliharaan berkala sebagai upaya menghambat penurunan performa akibat fouling, korosi, dan degradasi material yang mengurangi perpindahan panas. (WIRATAMA, 2021).

4. Analisis Efisiensi Thermal High Pressure dan Low Pressure Superheater pada Heat Recovery Steam Generator (HRSG) 2.1 PLTGU Blok 2 Tambak Lorok

Penelitian menyajikan hasil riset yang menekankan faktor-faktor mekanis dan operasional seperti pinch point, approach point, dan variasi beban sebagai variabel utama yang memengaruhi efisiensi HRSG. Penelitian tersebut menggarisbawahkan bagaimana pengaturan variasi beban dengan tepat dapat meminimalisir kehilangan panas dan memaksimalkan transfer energi dari gas buang ke air pemanas dalam HRSG. Dengan pengendalian beban yang optimal,

HRSG dapat beroperasi pada tingkat efisiensi tertinggi, sehingga menghasilkan keluaran energi yang lebih besar dan menurunkan konsumsi bahan bakar. (Husen et al., 2020)

5. Perhitungan Efisiensi Panas pada Heat Recovery Steam Generator di PT PLN Indonesia Power UBP Grati

Pada penelitian ini memberikan hasil kuantitatif terkait performa HRSG di lapangan. Studi tersebut menganalisis laju perpindahan panas serta besarnya energi yang hilang pada sistem, dengan hasil efisiensi termal tercatat sebesar 62,16%. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa kondisi fisik komponen HRSG termasuk kerusakan isolasi, adanya deposit yang menyebabkan penyumbatan pipa, serta korosi akibat pengendapan sulfur secara signifikan menurunkan efisiensi. Dengan demikian, perawatan kondisi fisik HRSG sangat krusial agar efisiensi termal tetap optimal selama masa operasi. (Santi et al., 2025)

6. Analisis Pengaruh Penurunan Temperatur LMTD Terhadap Unjuk Kerja HRSG pada PLTGU

Mengkaji dampak penurunan temperatur rata-rata logaritmik (Logarithmic Mean Temperature Difference, LMTD) pada performa HRSG sebelum dan sesudah dilakukan overhaul di PLTGU Tambak Lorok Unit 2 Semarang. HRSG yang bekerja dengan prinsip pemanasan air menggunakan panas gas buang turbin gas tanpa bahan bakar tambahan, mengalami penurunan efisiensi akibat kerusakan pipa seperti kebocoran, fouling, dan isolasi yang menurun kualitasnya. Overhaul yang meliputi pergantian pipa, pembersihan dinding tube, dan isolasi ulang berhasil menurunkan temperatur LMTD serta meningkatkan jumlah panas Q yang diserap HRSG. Penurunan LMTD secara signifikan meningkatkan efisiensi thermal HRSG, yang berimplikasi pada peningkatan performa pembangkitan uap di PLTGU tersebut. Penelitian ini menunjukkan efisiensi HRSG meningkat sekitar 1,93% setelah overhaul, serta adanya pengaruh positif dari penurunan temperatur LMTD terhadap laju perpindahan panas dan kualitas produksi uap superheated. Faktor lain

seperti pemanfaatan dual pressure pada HRSG dan jenis bahan bakar juga ditemukan mempengaruhi efisiensi. (Nurhasanah et al., 2018).

7. Analisis Penurunan Tekanan HP Drum HRSG DI PLTGU GRATI Setelah Exhaust Damper Close

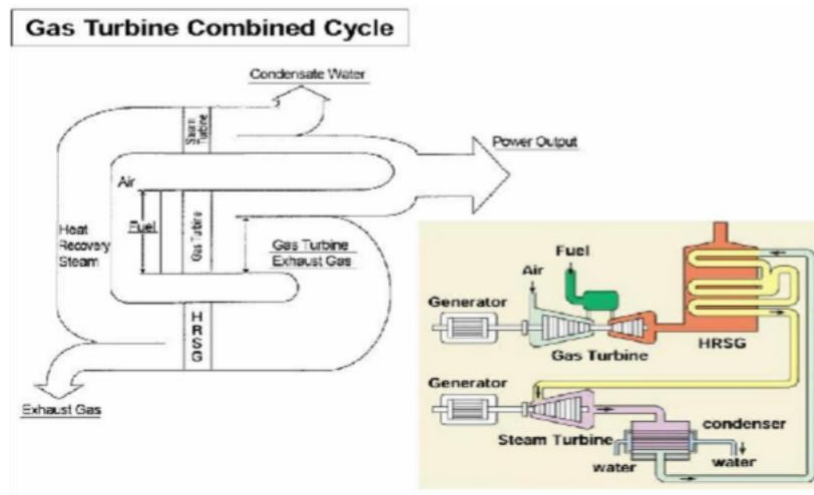
Membahas dinamika tekanan dan energi panas selama proses shutdown dan start-up HRSG. Analisis menunjukkan bahwa waktu start-up HRSG sangat tergantung pada kondisi tekanan High Pressure (HP) Drum. Bila tekanan HP Drum turun dibawah 5 kg/cm², HRSG berada dalam kondisi dingin, sehingga waktu start-up menjadi lama. Penurunan tekanan HP Drum secara drastis terjadi saat exhaust damper ditutup dan pompa sirkulasi HP BCP masih berjalan selama 30 menit. Studi ini menghitung energi yang hilang (loss) akibat penurunan tekanan dan menemukan besaran energi yang hilang sebesar 1122,6 kW, berdekatan dengan energi yang terserap sebesar 1328,2 kW pada HP evaporator. Penelitian ini menekankan pentingnya pengaturan kondisi tekanan HP Drum untuk mempertahankan status HRSG tetap panas dan mengurangi waktu start-up. Teknik banking pressure dan modifikasi pengoperasian sistem kontrol sebagai langkah untuk meningkatkan efisiensi kinerja HRSG dan meminimalkan kehilangan energi selama proses operasional. (Nurhasanah & Hariadi, 2018)

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Prinsip Kerja PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan suatu bagian sistem pembangkit siklus gabungan mengkombinasikan siklus *Brayton* (turbin gas) dengan siklus *Rankine* (turbin uap), yang mengubah panas pembakaran bahan bakar menjadi energi listrik dengan memanfaatkan kinerja turbin gas. Pada PLTGU, gas buang hasil pembakaran di turbin gas yang masih bersuhu tinggi digunakan kembali untuk memanaskan air dalam Heat Recovery Steam Generator (HRSG), menghasilkan uap yang menggerakkan turbin uap.

Pendekatan ini bertujuan untuk memanfaatkan energi panas yang terbuang sia-sia, sehingga meningkatkan efisiensi secara keseluruhan dibanding hanya menggunakan turbin gas saja. Maka, PLTGU memungkinkan peningkatan efisiensi termal yang signifikan dan pengurangan emisi serta konsumsi bahan bakar, sesuai dengan prinsip siklus gabungan yang bertujuan mengoptimalkan penggunaan energi termal dari gas buang.



Gambar 2. 1 Siklus PLTGU

2.2.2 Prinsip Kerja PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap)

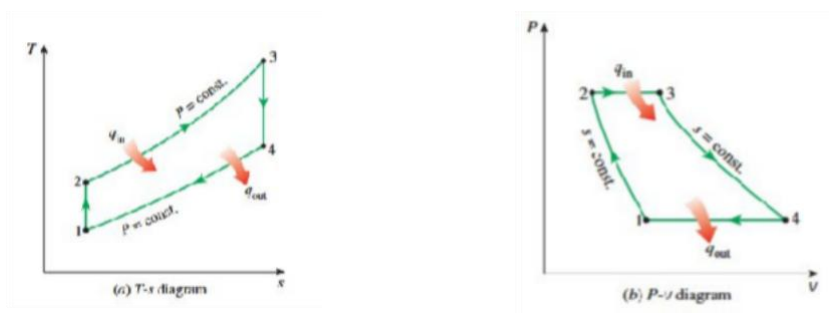
PLTGU merupakan sistem pembangkit listrik yang menggabungkan dua siklus termodinamika, yaitu siklus *Brayton* (turbin gas) dan siklus *Rankine* (turbin uap) untuk menghasilkan listrik yang lebih efisien. Dalam prosesnya, udara dikompresi oleh kompresor, lalu dicampur dengan bahan bakar dan dibakar dalam ruang bakar (*combustion chamber*) sehingga menghasilkan panas yang bertekanan tinggi. Selanjutnya gas ini mengalir ke turbin gas, di mana energi panas dan tekanannya diubah menjadi energi mekanik yang memutar generator. Setelah melewati turbin gas, gas buang yang masih panas tidak langsung dibuang ke atmosfer melainkan dialirkan ke *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). Di HRSG, panas dari gas buang digunakan untuk menghasilkan uap air yang kemudian menggerakkan turbin uap dan menghasilkan listrik tambahan. Pemanfaatan panas dari gas buang pada sistem PLTGU memungkinkan peningkatan efisiensi termal

secara signifikan dibandingkan dengan pembangkit yang hanya menggunakan satu siklus saja.

2.2.2.1 Siklus *Brayton*

Siklus Brayton merupakan siklus termodinamika ideal yang digunakan pada sistem pembangkit berbasis turbin gas. Siklus ini terdiri dari empat proses utama yang secara termodinamika merepresentasikan prinsip kerja turbin gas sederhana dengan sistem siklus terbuka (open cycle). Prosesnya diawali dengan kompresi udara secara isentropik, diikuti oleh penambahan panas pada tekanan konstan, ekspansi gas secara isentropik pada turbin, dan diakhiri dengan pembuangan panas pada tekanan tetap. Komponen utama pada sistem ini meliputi kompresor, ruang bakar (combustor), serta turbin gas. Mula-mula masuk melalui inlet kompresor, kemudian dialirkan ke dalam rangkaian sistem hingga akhirnya dikeluarkan setelah proses ekspansi turbin. (Muttaqin, 2016)

Dalam termodinamika pada siklus *Brayton*, nilai entalpi di setiap proses ditentukan melalui interpolasi linier berdasarkan tabel *Gas Properties of Air (GPOA)* atau dengan menggunakan persamaan termodinamika yang relevan. (Ridwan & Wibisono, 2024). Efisiensi siklus ini dipengaruhi oleh rasio tekanan pada kompresor serta temperatur maksimum di ruang bakar, dan dapat ditingkatkan dengan modifikasi seperti *intercooling*, *reheating*, maupun *regenerative heat exchange*.



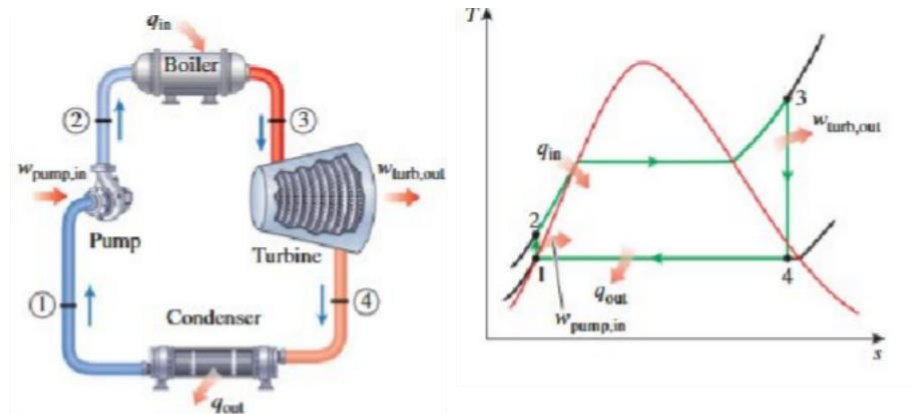
Gambar 2. 2 Diagram T-S dan P-V Siklus Brayton
(Yunus Cengel, 2014)

Berikut adalah penjelasan proses siklus *Brayton* berdasarkan diagram T-s (Temperatur-Entropi) dan P-v (Tekanan- Volume):

1. Proses 1 – 2 Kompresi Isentropik: udara masuk ke dalam kompresor dan mengalami proses kompresi tanpa perubahan entropi (isentropik). Pada diagram T-s ditandai dengan kenaikan temperatur sementara entropi tetap konstan. Pada diagram P-v, terjadi peningkatan tekanan dan penurunan volume udara.
2. Proses 2 – 3 Penambahan Panas Isobarik: udara bertekanan tinggi dari kompresor dialirkan ke ruang bakar (combustor) dimana bahan bakar kemudian diinjeksikan, dan terjadi reaksi pembakaran. Proses ini berlangsung pada tekanan konstan (isobarik) dan menghasilkan. Peningkatan temperatur yang signifikan. Pada diagram T-s, titik ini menunjukkan kenaikan temperatur sangat tajam sedangkan entropi naik sedikit. Pada diagram P-v, volume udara meningkat dengan tekanan tetap.
3. Proses 3 – 4 Ekspansi Isentropik: gas panas bertekanan tinggi tersebut mengalami ekspansi melalui turbin secara isentropik, menghasilkan kerja mekanik untuk memutar poros turbin, yang sebagian energinya digunakan untuk menggerakkan kompresor dan sisanya menjadi energi keluaran sistem. Pada diagram T-s, terjadi penurunan temperatur dengan entropi tetap. Pada diagram P-v, tekanan gas menurun dan volumenya meningkat.
4. Proses 4 – 1 Pembuangan Panas Isobarik: gas hasil pembakaran yang telah melewati turbin dikeluarkan dengan memiliki temperatur yang masih cukup tinggi dan dilepaskan ke atmosfer pada sistem siklus terbuka. Dalam siklus tertutup, gas akan didinginkan hingga kembali ke kondisi awal sebelum masuk kembali ke kompresor. Pada diagram T-s, temperatur menurun sedangkan tekanan tetap, dan pada diagram P-v, volume sedikit berubah pada tekanan konstan.

2.2.2.2 Siklus Rankine

Siklus *Rankine* merupakan siklus termodinamika yang digunakan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap untuk mengubah energi panas menjadi energi mekanik. Dalam sistem ini, panas disuplai dari sumber eksternal ke dalam suatu aliran tertutup, di mana air umumnya digunakan sebagai fluida kerja. Fluida tersebut bergerak secara kontinu di dalam sistem dan mengalami perubahan fase selama proses berlangsung, dipengaruhi oleh suplai panas eksternal yang menyebabkan variasi tekanan di sepanjang lintasan alirannya. Efisiensi dari siklus Rankine sangat dipengaruhi oleh kondisi tekanan operasi, terutama uap jenuh dan tekanan kondensasi dalam sistem.



Gambar 2. 3 Siklus Rankine

(Yunus Cengel, 2014)

Berikut merupakan penjelasan proses siklus *Rankine* berdasarkan diagram T-s (Temperatur – Entropi) yang terdiri dari empat proses utama:

1. Proses 1 – 2 Pemompaan Air → merupakan ekspansi isentropik di mana uap bertekanan dan temperatur tinggi hasil pemanasan dari boiler mengalir melalui turbin. Dalam proses ini, uap menghasilkan kerja mekanik, lalu dialirkan ke kondensor dengan tekanan yang relatif rendah.
2. Proses 2 – 3 Pemanasan dan Penguapan → tahap kondensasi dimana uap basah melewati kondensor dan mengalami perubahan fase menjadi cairan jenuh pada

tekanan dan temperatur konstan. Pada kondensor tersebut terjadi perpindahan panas dari uap ke air pendingin yang mengalir dalam jalur terpisah.

3. Proses 3 – 4 Ekspansi Uap → merupakan kompresi isentropik, di mana cairan jenuh hasil kondensasi dipompa ke tekanan boiler, menyebabkan peningkatan tekanan tanpa perubahan entropi signifikan.
4. Proses 4 – 1 Kondensasi → menunjukkan pendinginan uap basah di kondensor hingga seluruh uap berubah ke fase cair, sehingga siklus dapat dimulai kembali dari proses 1 – 2. (Fachriansyah & Takwanto, 2025).

2.2.2.3 Siklus Kombinasi (*Combined Cycle*)

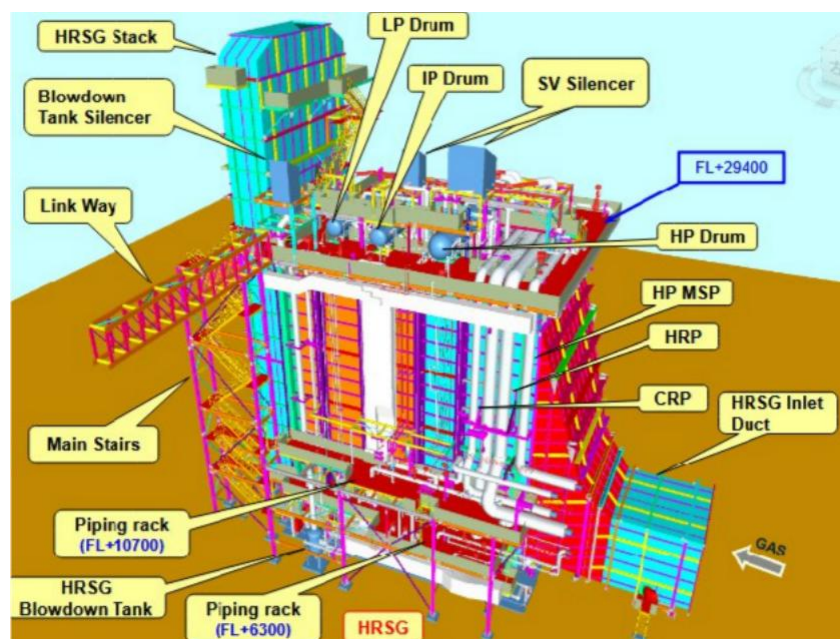
Combined Cycle merupakan system pembangkit Listrik yang menggabungkan dua siklus termodinamika berbeda, siklus *Brayton* (turbin gas) dan siklus *Rankine* (turbin uap), untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan. Dalam sistem ini, panas gas buang dari turbin gas yang masih memiliki temperatur tinggi untuk menghasilkan uap dalam *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). Uapnya kemudian dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin uap, sehingga menghasilkan tenaga listrik tambahan dari energi yang seharusnya terbuang. Penerapan siklus kombinasi mampu meningkatkan efisiensi pembangkit listrik hingga sekitar 20% dibandingkan dengan sistem pembangkit bersiklus tunggal. Selain itu, penggunaan sistem ini juga berkontribusi terhadap penurunan emisi gas buang sehingga lebih ramah lingkungan.

2.2.3 *Heat Recovery Steam Generator*

HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) adalah peralatan yang berperan penting dalam pembangkit Listrik karena mampu memanfaatkan kembali panas yang sebenarnya masih tersisa dari gas buang proses pembakaran. Gas buang panas dari turbin gas dialirkan melewati rangkaian pipa di dalam HRSG. Saat melewati pipa-pipa tersebut, panasnya diserap oleh air diserap oleh air di sekitarnya hingga

air berubah menjadi uap. Uap inilah yang kemudian digunakan untuk memutar turbin uap yang menghasilkan tambahan energi listrik.

Umumnya, HRSG terdiri dari tiga bagian utama: *economizer*, *steam generation section*, dan *heat recovery section*. Bagian penerima panas bertugas menyerap energi termal dari gas buang, sementara bagian pembangkit uap mengubah air yang dipanaskan menjadi uap. Setelah panas utama dimanfaatkan, *economizer* memanfaatkan sisa panas gas buang sebelum gas dilepas ke lingkungan. Dengan memanfaatkan panas buang, HRSG mampu meningkatkan efisiensi keseluruhan pembangkit, mengurangi konsumsi bahan bakar, serta menurunkan emisi gas buang yang berpotensi mencemari lingkungan. (Pratiwi et al., 2018)



Gambar 2. 4 Heat Recovery Steam Generator

(Sumber: Manual Book PLTGU Tanjung Priok)

HRSG tidak memiliki pembakaran tambahan dan tidak menggunakan bahan bakar apa pun. Karena itu, proses perpindahan panas melalui radiasi tidak terjadi didalamnya. Panas hanya berpindah melalui konveksi dan konduksi dari gas buang turbin gas menuju air, yang kemudian berubah menjadi uap ketika melewati rangkaian elemen pemanas pada ketel

pemulihan. (Jaelani, 2017)

Jumlah uap yang dapat dihasilkan HRSG sangat bergantung pada besarnya energi panas yang masih tersisa di dalam gas buang turbin gas, serta pada kondisi beban gas itu sendiri. Pada turbin gas dengan kecepatan putar tetap, aliran udara masuk ke kompresor tidak berubah, sehingga perubahan beban turbin tidak selalu berbanding lurus dengan perubahan aliran bahan bakarnya. Dampaknya, *temperature* gas buang dapat naik atau turun mengikuti perubahan beban tersebut.

Laju aliran udara dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\mu = AFR \times mbb \dots\dots\dots 2.1$$

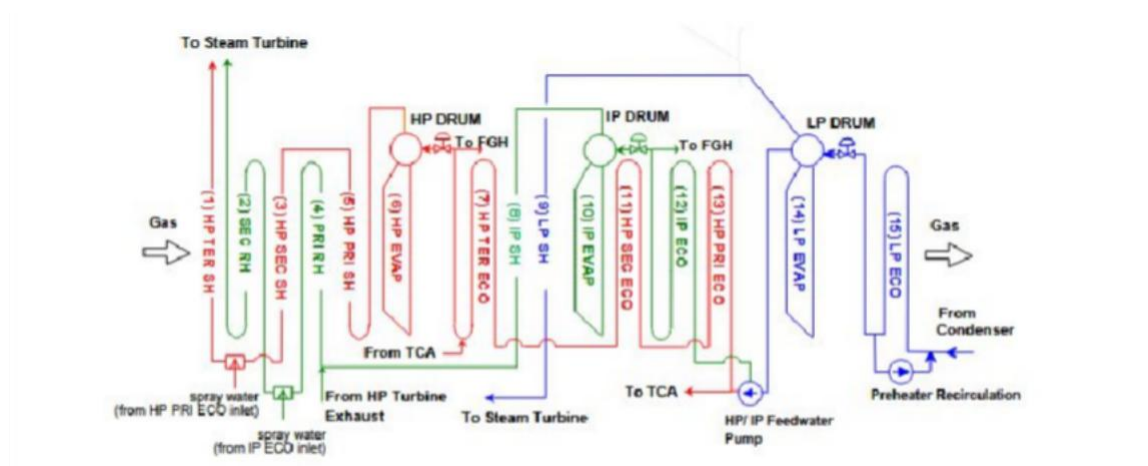
Setelah laju aliran udara diketahui, laju aliran gas buang dapat dihitung melalui:

$mig = mbb + mu$ 2.2

Sedangkan jumlah panas yang masuk ke HRSG dihitung dengan menggunakan:

$$Q_{in} = m_{gas} \times (h_4 - h_1) \dots\dots\dots 2.3$$

2.2.4 Prinsip Kerja HRSG



Gambar 2.5 Flow Diagram HRSG

(Sumber: Manual Book PLTGU Tanjung Priok)

Berdasarkan flow diagram diatas, prinsip kerja *Heat Recovery Steam Generator (HRSG) tipe triple pressure* dengan *reheater* diawali dengan masuknya gas buang turbin gas ke dalam HRSG melalui sisi inlet gas. Gas buang tersebut

memiliki temperatur tinggi dan mengalir secara horizontal melewati rangkaian permukaan pemanas (*heating surface*) yang disusun berdasarkan tingkat temperatur, dari bagian bersuhu paling tinggi hingga paling rendah. Susunan tersebut bertujuan untuk memaksimalkan pemanfaatan energi panas gas buang secara bertahap dan efisien.(MHPS, 2017)

Pada zona temperatur tinggi, gas buang melewati rangkaian *HP Tertiary Superheater, Secondary Reheater*, serta *HP Secondary* dan *Primary Superheater*. Pada bagian ini, uap tekanan tinggi (*High Pressure/HP*) dan uap *reheater* dipanaskan hingga mencapai temperatur yang ditentukan sebelum dialirkan ke turbin uap. Temperatur uap HP dan *reheater* dikendalikan menggunakan *spray water (attemperator)* yang berasal dari jalur *economizer*, sehingga temperatur uap tetap aman dan stabil.

Setelah melewati zona *superheater* dan *reheater*, gas buang dengan temperatur yang lebih rendah mengalir menuju bagian evaporator tekanan tinggi (*HP Evaporator*) dan tekanan menengah (*IP Evaporator*). Pada komponen ini, air masing-masing drum mengalami proses pendidihan melalui mekanisme sirkulasi alami hingga terbentuk uap jenuh. Uap tersebut kemudian dipisahkan di drum dan selanjutnya dialirkan ke *superheater* untuk dipanaskan menjadi uap panas lanjut sebelum masuk ke turbin uap.

Tahap berikutnya yaitu pemanfaatan panas gas buang pada bagian *economizer HP* dan *IP*, di mana *feedwater* dipanaskan sebelum masuk ke drum masing-masing tingkat tekanan. Proses pemanasan awal berfungsi untuk meningkatkan efisiensi termal HRSG dengan mengurangi kebutuhan panas pada *evaporator*.

Pada bagian akhir aliran gas, sisa panas dimanfaatkan oleh sistem tekanan rendah melalui *LP Evaporator* dan *LP Economizer*. Air pengisi yang berasal dari kondensor dipanaskan dulu di *LP Economizer*, kemudian sebagian diubah menjadi uap di *LP Evaporator* dan ditampung di *LP Drum*. Uap tekanan rendah tersebut

selanjutnya dipanaskan di *LP Superheater* sebelum digunakan sesuai kebutuhan sistem. Setelah seluruh panas yang ekonomis diserap, gas buang keluar dari HRSG menuju cerobong dengan temperatur yang jauh lebih rendah.

Secara keseluruhan, flow diagram ini menunjukkan bahwa HRSG memanfaatkan panas gas buang turbin gas secara berjenjang melalui sistem tekanan HP, IP, dan LP untuk menghasilkan uap dengan karakteristik tekanan dan temperatur yang berbeda-beda, sehingga efisiensi pembangkit listrik siklus gabungan dapat dimaksimalkan.

2.2.3.1 Klasifikasi HRSG Berdasarkan Aliran Gas Buang

A. HRSG Tipe Vertikal

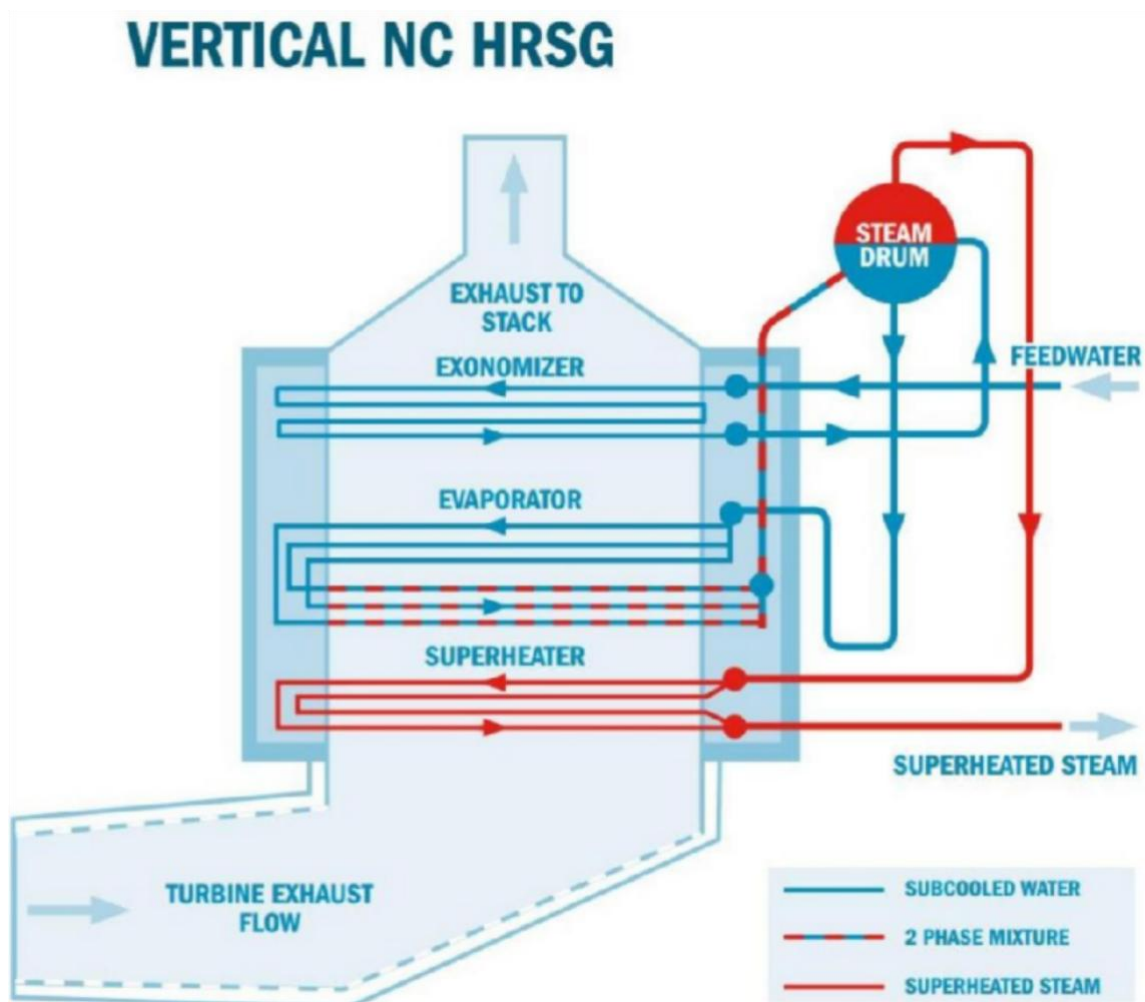
HRSG tipe vertikal dirancang dengan arah aliran gas buang turbin gas yang mengalir dari bawah ke atas, melewati pipa-pipa pemindah panas yang disusun secara vertikal. Pada bagian atas sistem ini umumnya terdapat *steam drum* yang berfungsi sebagai tempat penampung dan pengolahan uap sebelum dialirkan menuju turbin uap. Susunan vertikal tersebut membuat HRSG memiliki bentuk yang lebih ramping dan memanjang ke atas.

Salah satu keunggulan utama tipe vertikal adalah dimensinya yang relatif lebih ringkas. Karakteristik ini memungkinkan untuk diaplikasikan pada lokasi pembangkit dengan keterbatasan lahan. Dibandingkan dengan HRSG tipe horizontal, dengan desain vertikal memungkinkan pemasangan pada area yang lebih sempit. Selain itu, konstruksi HRSG tipe vertikal umumnya lebih ringan, sehingga lebih mudah dipasang pada struktur bangunan yang memiliki keterbatasan daya dukung terhadap beban berat.

Namun, HRSG tipe vertikal memiliki beberapa keterbatasan. Proses pemeliharaan dan inspeksi cenderung lebih susah karena aksesnya menuju pipa-pipa pemindah panas tidak seluas pada HRSG tipe horizontal. Kondisi ini mengharuskan teknisi bekerja di ruang yang lebih terbatas pada beberapa kasus,

dan memerlukan peralatan khusus. Selain itu, aliran dan distribusi gas panas pada HRSG vertikal berpotensi kurang merata, yang dapat mempengaruhi efektivitas perpindahan panas dibandingkan dengan desain horizontal.

Secara umum, HRSG tipe vertikal banyak digunakan pada pembangkit listrik dengan kapasitas kecil hingga menengah, khususnya di lokasi yang memiliki keterbatasan ruang. Jenis HRSG ini menjadi pilihan bagi industri yang membutuhkan pasokan uap dalam jumlah moderat, karena efisiensi pemanfaatan ruang serta kemudahan dalam proses instalasinya.



Gambar 2. 6 HRSG Tipe Vertikal

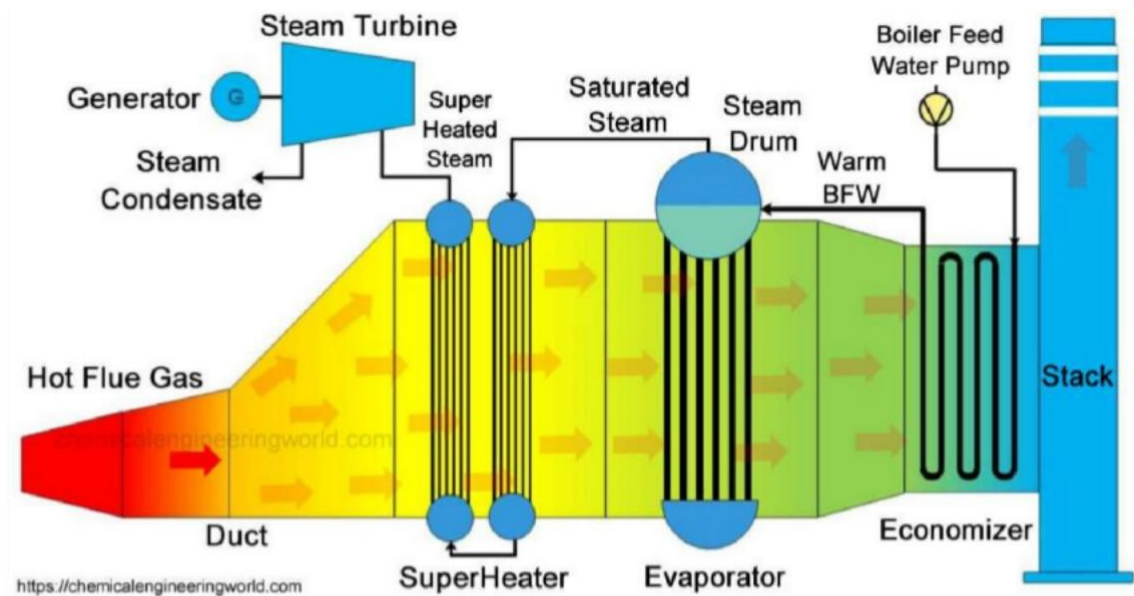
B. HRSG Tipe Horizontal

HRSG tipe horizontal dirancang dengan aliran gas buang dari turbin gas yang bergerak secara mendatar melalui rangkaian pipa pemindah panas yang tersusun horizontal. Pada konfigurasi ini, *steam drum* umumnya ditempatkan di bagian atas unit HRSG dan berfungsi untuk menampung serta mendistribusikan uap sebelum dialirkan menuju turbin uap.

Keunggulan utama HRSG tipe horizontal terletak pada kinerja perpindahan panas yang relatif lebih baik. Aliran gas panas yang lebih merata saat melewati pipa-pipa pemindah panas memungkinkan proses penyerapan energi berlangsung secara optimal, sehingga berdampak pada peningkatan efisiensi termal. Kondisi ini mendukung penerapan HRSG dengan konfigurasi *multi-pressure*, seperti sistem *triple pressure level* (HP, IP, dan LP). Selain itu, desain horizontal memberikan kemudahan dalam aspek pemeliharaan, karena komponen-komponen utama HRSG lebih mudah diakses oleh teknisi untuk keperluan inspeksi maupun perbaikan.

Di sisi lain, HRSG tipe horizontal juga memiliki beberapa keterbatasan. Unit ini membutuhkan area instalasi yang lebih luas, sehingga kurang sesuai untuk lokasi pembangkit dengan keterbatasan lahan. Ukuran dan bobot konstruksi yang lebih besar menyebabkan proses pemasangan HRSG tipe horizontal memerlukan waktu yang lebih lama serta biaya investasi awal yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan HRSG tipe vertikal.

Secara umum, HRSG tipe horizontal lebih banyak diterapkan pada pembangkit listrik berskala besar, khususnya pada sistem *combined cycle*, karena mampu menangani kapasitas uap yang tinggi serta kestabilan termal yang lebih baik selama operasi.



Gambar 2. 7 HRSG Tipe Horizontal

2.2.3.2 Sirkulasi Aliran Uap

Secara umum, terdapat dua sirkulasi, yaitu sirkulasi alami dan sirkulasi paksa, berikut penjelasannya:

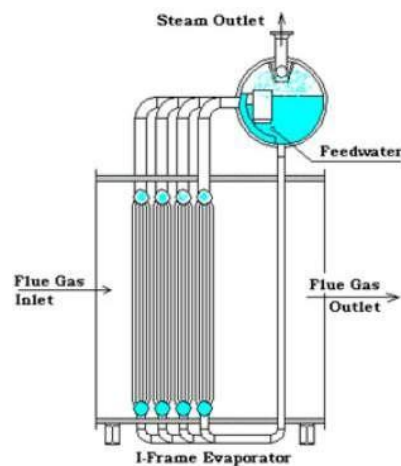
a. Sirkulasi Alami

Jenis HRSG biasanya digunakan pada konfigurasi di mana gas buang mengalir secara horizontal, sedangkan aliran uap bergerak ke arah vertikal. Pada sistem ini, pergerakan air dan uap terjadi secara alami karena adanya perbedaan densitas antara keduanya. Air dengan densitas yang lebih tinggi akan turun dari steam drum melalui pipa *downcomer* menuju *evaporator*. Sebaliknya, uap yang densitasnya lebih rendah bergerak naik menuju *steam drum* melalui pipa riser. Ilustrasinya ditunjukkan pada gambar a.

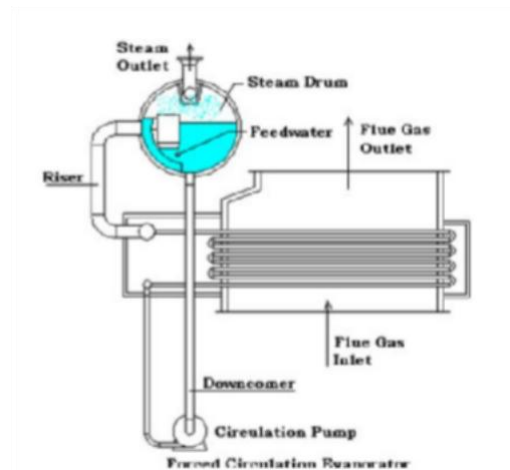
b. Sirkulasi Paksa

Sirkulasi Paksa digunakan pada HRSG yang arah aliran gas buangnya vertikal dan aliran uapnya horizontal. Pada konfigurasi seperti ini, perbedaan densitas tidak cukup untuk menggerakkan fluida secara alami, sehingga dibutuhkan

pompa untuk mensirkulasikan air melalui evaporator. Pompa inilah yang menciptakan aliran paksa di dalam evaporator. Uap yang keluar dari evaporator kemudian dipisahkan dari air di steam drum sebelum dialirkan ke superheater untuk proses pemanasan lanjutan. Ilustrasi dapat dilihat pada gambar b.



(a)



(b)

Gambar 2. 8 (a) Sirkulasi Alami (b) Sirkulasi Paksa

(budi widias, 2010)

2.2.3.3 Tingkat Tekanan Uap

HRSG dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah tahapan tekanan uap yang dihasilkan dalam prosesnya. Variasi jumlah tingkat tekanan ini umumnya ditentukan oleh temperatur gas buang yang masuk ke HRSG. Berdasarkan tingkat tekanannya meliputi : HRSG satu tingkat tekanan, dua tingkat tekanan, tiga tingkat tekanan, serta sistem dengan tambahan reheat. Uraian masing-masing jenis dijelaskan sebagai berikut:

1. HRSG satu tingkat tekanan (*Single Pressure*)

Tipe ini memiliki konfigurasi satu *feedwater pump* dan satu *evaporator*, sedangkan jumlah economizer dan superheater dapat disesuaikan dengan

kebutuhan desain. Efisiensi tipe single pressure relatif lebih rendah dibandingkan dengan jenis HRSG tipe lain.

2. HRSG dua tingkat tekanan (*Dual Pressure*)

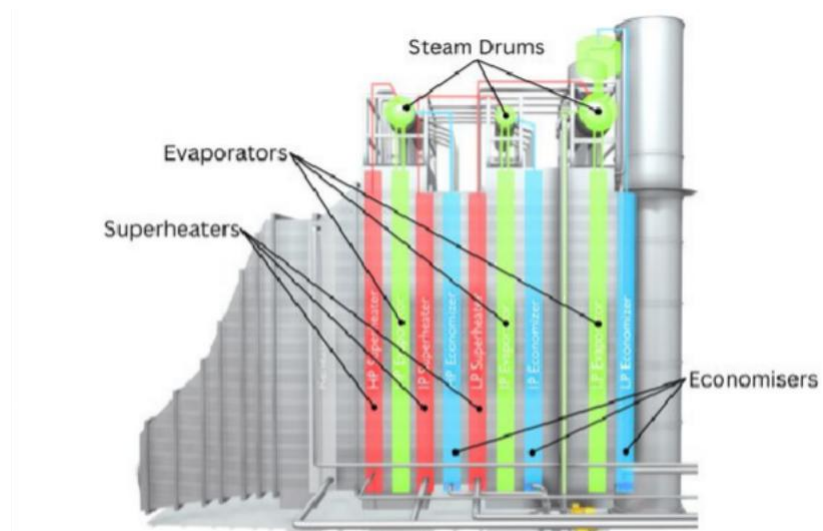
Umumnya terdiri dari dua pompa *feedwater* (*low pressure* dan *high pressure*) serta dua *evaporator* (*evaporator* tekanan rendah dan tinggi). Jumlah *economizer* maupun *superheater* tetap disesuaikan sesuai kebutuhan. Efisiensinya lebih baik dibandingkan tipe *single pressure*.

3. HRSG tiga tingkat tekanan (*Triple Pressure*)

HRSG ini dilengkapi dengan tiga pompa *feedwater* (*LP*, *IP*, dan *HP Drum*) serta tiga *evaporator* yang sesuai dengan masing-masing tingkat tekanan. Sementara itu, jumlah *economizer* dan *superheater* dapat disesuaikan dengan desain HRSG.

4. HRSG dengan tambahan *reheat*

Sistem *reheat* merupakan proses pemanasan ulang uap keluaran turbin tekanan tinggi (HP) di dalam HRSG sebelum dialirkan untuk menggerakkan turbin tekanan uap menengah (IP) atau tekanan rendah (LP). Penambahan proses *reheat* meningkatkan pemanfaatan energi panas sehingga efisiensi sistem menjadi lebih tinggi. Tipe ini memiliki efisiensi yang paling optimal. (Sutopo, 2016)



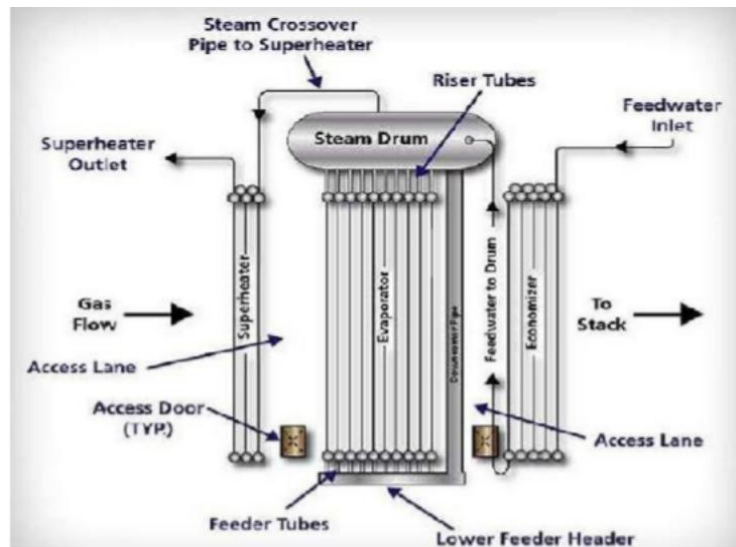
Gambar 2. 9 Superheater, evaporator, steam drum, economizer

2.2.3.4 Komponen Penukar Kalor pada HRSG

HRSG merupakan salah satu peralatan utama dalam sistem pembangkit listrik, khususnya pada pembangkit siklus gabungan. Perangkat ini terdiri dari beberapa komponen penting, yaitu economizer, evaporator, dan superheater, yang masing-masing memiliki fungsi berbeda dalam proses pembentukan uap. Selain itu, HRSG tersusun atas rangkaian pipa dengan desain dan konfigurasi khusus yang dirancang untuk mengoptimalkan proses perpindahan panas.

Jumlah serta susunan pipa pada setiap komponen HRSG sangat berpengaruh terhadap kinerja termalnya. Pipa-pipa tersebut berperan sebagai media utama dalam proses penyerapan panas dari gas buang turbin gas. Di dalam pipa mengalir fluida kerja berupa air dan uap, sedangkan di bagian luar pipa mengalir gas buang panas hasil pembakaran dari turbin gas. Interaksi kedua media memungkinkan terjadinya proses perpindahan panas.

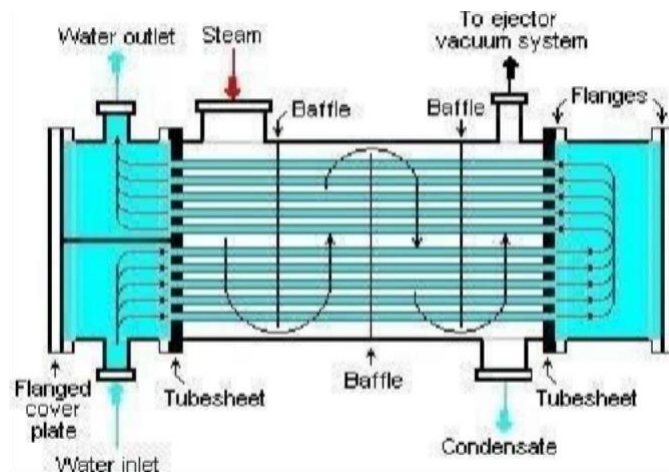
Perpindahan panas dalam HRSG berlangsung melalui mekanisme konveksi dan konduksi. Panas dari gas buang yang bersuhu tinggi ditransfer melalui dinding pipa dan kemudian diserap oleh fluida kerja di dalamnya. Untuk meningkatkan efektivitas proses tersebut, pada pipa-pipa HRSG dilengkapi dengan sirip (*fins*). Sirip ini berfungsi memperluas luas permukaan perpindahan panas sehingga energi panas yang diserap oleh fluida kerja menjadi lebih besar dalam waktu yang relatif singkat. Desain pipa dan sirip pada HRSG memiliki peran penting dalam menentukan tingkat efisiensi sistem secara keseluruhan.



Gambar 2. 10 *Superheater, Evaporator, Economizer, Steam Drum*

2.2.3.5 Superheater

Superheater merupakan salah satu komponen utama dari *Heat Recovery Steam Generator* yang berfungsi untuk meningkatkan temperatur uap hasil keluaran evaporator ke tingkat yang lebih tinggi. Tujuannya yaitu agar uap mendapatkan tambahan energi panas, sehingga tetap berada dalam fase gas dan mencapai suhu serta tekanan yang sesuai sebelum dialirkan ke turbin uap.



Gambar 2. 11 *Superheater*

(Yusepa, 2014)

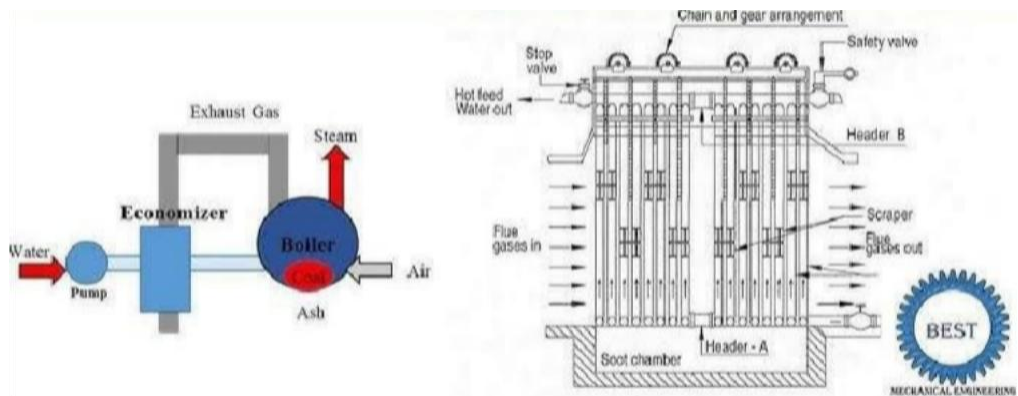
2.2.3.6 Evaporator

Evaporator merupakan salah satu komponen utama dalam *Heat Recovery Steam Generator*. Komponen ini berfungsi untuk menyerap panas yang berasal dari

gas buang turbin gas yang mengubah air menjadi uap dengan tekanan dan suhu yang tinggi. Proses dimulai ketika air umpan dialirkan ke dalam tabung atau pipa-pipa evaporator. Di sepanjang alirannya, air menerima panas dari gas buang dengan suhu sangat tinggi. Panas yang diterima menyebabkan air mendidih secara cepat dan berubah menjadi uap. Dengan demikian, evaporator tidak hanya meningkatkan suhu dan tekanan air, tetapi menghasilkan uap panas yang dimanfaatkan untuk proses selanjutnya.

2.2.3.7 Economizer

Pada bagian ini, air umpan *evaporator* dapat dipanaskan terlebih dahulu sebelum masuk ke tahap penguapan. Di dalam *economizer*, air umpan yang biasanya masih bersuhu rendah dialirkan melalui rangkaian pipa atau *coil*. Ketika gas buang panas melewati pipa-pipa tersebut, panasnya ditransfer ke air sehingga temperatur air umpan meningkat. Maka air yang sudah lebih panas saat memasuki evaporator, kebutuhan energi untuk mengubah air menjadi uap lebih kecil. Proses pemanfaatan kembali panas yang seharusnya terbuang, mekanisme pertukaran panas meningkatkan efisiensi termal total HRSG.



Gambar 2. 12 Economizer

(Sumber: Manual Book PLTGU Tanjung Priok)

2.2.5 Menghitung Heat Balance

Keseimbangan panas adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan perbandingan panas yang masuk dan keluar suatu benda atau sistem. Keseimbangan panas terjadi ketika total energi panas yang masuk ke sistem sebanding dengan energi panas yang keluar dari sistem, baik dalam sistem tertutup atau dalam sistem tertentu. lingkungan.

$$Q_{balance} = m_{gas} \times C_{p, gas}(T_2 - T_1) \dots\dots\dots 2.4$$

1. Pipa Evaporator

- HP pada Pipa *Evaporator*

$$Q_{Eva} = m_{is}(h_{HP, 5} - h_{HP, 4}) = m_{gas}(h_B - h_C) \dots\dots\dots 2.5$$

2. Pipa Economizer

- LP pada Pipa *Evaporator*

$$Q_{Eva} = m_{is}(h_{LP, 3} - h_{LP, 2}) = m_{gas}(h_C - h_D) \dots\dots\dots (2.6)$$

- HP pada *Economizer*

$$Q_{2, Eco} = m_{is}(h_{HP, 3} - h_{HP, 2}) = m_{gas}(h_B - h_C) \dots\dots\dots 2.6$$

$$Q_{1, Eco} = m_{is}(h_{HP, 2} - h_{HP, 1}) = m_{gas}(h_C - h_D) \dots\dots\dots 2.7$$

Maka jumlah energi panas yang berhasil diserap oleh HRSG dinyatakan sebagai:

$$Q_{HRSG} = Q_{Sup} + Q_{Eva} + Q_{Eco} \dots\dots\dots 2.8$$

Laju aliran massa uap diperoleh dari prinsip kesetimbangan kalor, yaitu:

$$Q_{Uap} = Q_{Gas}$$

$$m_{uap}(h_2 - h_1) = m_{gas}(h_g(in) - h_g(out)) \dots\dots\dots 2.9$$

Sehingga laju aliran uap dapat dihitung:

$$m_{uap} = \frac{m_{gas}(h_g(in) - h_g(out))}{(h_2 - h_1)} \dots\dots\dots 2.10$$

