



SKRIPSI

**ANALISA KESETIMBANGAN ENERGI PADA HEAT
RECOVERY STEAM GENERATOR (HRSG)
PT. CONSOLIDATED ELECTRIC POWER ASIA (CEPA)**



OLEH :

RIKA AYU LESTARI

D211 14 019

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2019



Optimization Software:
www.balesio.com

hir Departmen Teknik Mesin

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan mengikuti Ujian Akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

JUDUL:

**ANALISA KESETIMBANGAN ENERGI PADA HEAT RECOVERY
STEAM GENERATOR (HRSG)
PT. CONSOLIDATED ELECTRIC POWER ASIA (CEPA)**

RIKA AYU LESTARI
D211 14 019

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Gowa, 21 November 2018

Dosen Pembimbing I



Ir. Baharuddin Mire, MT.
Nip. 195509141987021001

Dosen Pembimbing II



Ir. Andi Mangkau, MT.
Nip. 196112311990021003

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT
Nip. 195709141987031001



ABSTRAK

Rika Ayu Lestari (D211 14 019). Dibimbing Oleh **Ir. Baharuddin Mire, MT.** dan **Ir. Andi Mangkau, MT.**

Heat Recovery Steam Generator merupakan peralatan yang memiliki prinsip kerja seperti boiler, tanpa memerlukan bahan bakar tambahan. Sumber Panas berasal dari energy panas gas buang turbin gas yang memiliki temperatur Tinggi ($>500\text{ }^{\circ}\text{C}$) digunakan untuk memanaskan serta mengubah air menjadi uap panas lanjut, kemudian dialirkan ke turbin uap. Kalor yang diserap oleh komponen HRSG sangat berpengaruh terhadap Efisiensi HRSG.

Pengambilan data yang dilakukan yaitu data temperatur pada komponen HRSG (Economiser, Evaporator, dan Superheater), Tekanan pada komponen HRSG HRSG (Economiser, Evaporator, dan Superheater), Laju aliran massa pada HRSG, Temperatur dan Lalu aliran massa gas buang Turbin gas.

Temperatur dan tekanan sangat berpengaruh pada besarnya energy yang diserap oleh komponen HRSG. Berdasarkan temperatur, tekanan dan laju aliran massa yang di ketahui, maka besarnya kalor yang diserap Economiser sebesar 24734,79 kW (27,64 %), Evaporator sebesar 34737,17 kW (38,82 %), Superheater sebesar 14668,31 kW (16,39 %) dan Energi yang hilang pada cerobong sebesar 15334,79 kW (17,13 %). Sehingga Efisiensi HRSG adalah 80,79 %. Adapun energy yang tidak terpakai sebesar 2290,98 kW.

Kata kunci : *Komponen HRSG, Penyerapan Energi, Uap, Temperatur, Tekanan, Laju aliran massa.*



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “*Analisa Keseimbangan Energi pada Heat Recovery Steam Generator (HRSG) PT.Consolidated Elecetric Power Asia (CEPA)* ”. Penulisan skripsi ini disusun untuk memenuhi syarat wajib penulisan skripsi dan tugas akhir program S1 Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Penulis tidak lupa mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada bapak/ibu dosen pembimbing dan mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan petunjuk dan pengarahan serta dorongan sejak awal hingga akhir penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, untuk itu kritik dan saran dari pembaca adalah hal yang dapat penulis gunakan sebagai acuan untuk memperbaiki kesalahan tersebut.

Banyak pihak yang telah berandil dalam penyusunan proposal skripsi ini, untuk itu penulis menghantarkan rasa terima kasih semoga segala bentuk bantuannya bernilai ibadah di sisi Tuhan Yang Maha Esa.

Makassar, Januari 2019

Rika Ayu Lestari



hir Departmen Teknik Mesin

DAFTAR ISI

Halaman Judul	I
Lembar Pengesahan	II
Abstrak	III
Kata Pengantar	IV
Daftar Isi	V

BAB I PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang	1
I.2. Rumusan Masalah.....	3
I.3. Tujuan penulisan	3
I.4. Batasa Masalah	4
I.5. Manfaat Penelitian.....	4

BAB II TEORI DASAR

II.1. Tinjauan Umum PLTGU PT.CEPA	5
II.2. Gambaran Umum Siklus Gabungan	11
II.3. Pengertian HRSG	22
II.4. Perhitungan Uap.....	30

BAB III METODE PENELITIAN

1. Metode Analisis	37
--------------------------	----



III.2. Flowchart Metodologi Penelitian	39
--	----

BAB IV PENGOLAHAN DATA

IV. Data Operation	40
IV.1. Keseimbangan Energi	41
IV.1.1. Penyerapan Kalor sisi uap	41
IV.1.2. Penyerapan kalor sisi Gas	44
IV.2. Efisiensi HRSG	49
IV.3. Persentase penyerapan kalor	50
IV.4. Pinch Point	51

BAB V PEMBAHASAN

V.1 Penyerapan Kalor.....	52
V.2 Energi yang tak terpakai	55
V.3 Efisiensi HRSG.....	56

BAB VI PENUTUP

VI. Kesimpulan	57
VI.2 Saran	57

DAFTAR PUSTAKA



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Masalah energy adalah merupakan suatu masalah dalam kehidupan manusia yang semakin berkembang sekarang ini energy dalam berbagai bentuk merupakan kebutuhan manusia yang di tuntut keberadaanya dalam jumlah besar. Hal ini dikarenakan semakin besarnya jumlah bertumbuhan penduduk dari tahun ke tahun serta seiring dengan pesatnya pertumbuhan pembangunan diseluruh dunia.

Meningkatnya taraf kehidupan, tingkat perekonomian yang semakin berkembang dan pertumbuhan di sektor industri menuntut peranan yang lebih penting disektor energi. Pembangunan dan pertumbuhan nasional yang pesat membutuhkan pasokan bahan bakar utama dan listrik yang mencukupi dan dapat diandalkan.

Untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi dapat dengan cara meningkatkan efisiensi. Salah satunya dengan menerapkan model siklus kombinasi yaitu menggabungkan siklus PLTG dengan siklus PLTU menjadi PLTGU. HRSG ialah suatu alat yang digunakan untuk menghasilkan uap superheated dengan memanfaatkan gas buang PLTG yang digunakan untuk memanaskan uap agar dapat digunakan untuk menggerakkan turbin uap.



Turbin gas dengan efisiensi 33% menggunakan gas hasil pembakaran sebagai fluida kerja. Sesudah diekspansikan didalam turbin gas untuk menghasilkan daya, gas asap meninggalkan turbin gas pada tekanan atmosfer dengan temperatur tinggi. Temperatur ini biasanya diatas 500°C yang tidak dapat dimanfaatkan secara langsung, tetapi masih dapat dimanfaatkan sebagai sumber energy untuk menghasilkan uap. Pada tekanan dan suhu tinggi uap dapat digunakan sebagai fluida kerja pada siklus uap. Dengan pemanfaatan sebagian energy terbuang dari turbin gas dan dikonversi menjadi kerja (turbin uap) dengan menggunakan HRSG yang dikenal dengan siklus gabungan. Pada umumnya boiler HRSG tidak dilengkapi dengan pembakar dan tidak mengkonsumsi bahan bakar, sehingga tidak terjadi proses perpindahan atau penyerapan panas radiasi. Proses perpindahan atau penyerapan yang terjadi hanyalah proses konveksi dan konduksi dari gas buang turbin gas ke dalam air yang akan diproses menjadi uap melalui elemen-elemen pemanas di dalam ruang boiler HRSG.

Pembangkit daya siklus gabungan pada dasarnya terdiri dari dua siklus utama, yakni siklus Brayton (siklus gas) dan siklus Rankine (siklus uap) dengan turbin gas dan turbin uap yang menyediakan daya ke jaringan. Dalam pengoperasian turbin gas, gas buang sisa pembakaran yang keluar mempunyai suhu yang relatif tinggi. Sehingga jika dibuang langsung ke atmosfer merupakan kerugian energi. Oleh karena itu, panas hasil buangan

gas tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber panas ketel uap yang

hir Departmen Teknik Mesin



dalam hal ini disebut Heat Recovery Steam Generator(HRSG), disamping menghasilkan efisiensi yang tinggi dan keluaran daya yang lebih besar, siklus gabung bersifat luwes, mudah dinyalakan dengan beban tak penuh, cocok untuk operasi beban dasar dan turbin bersiklus dan mempunyai efisiensi yang tinggi dalam daerah beban yang luas. Kelemahan berkaitan dengan keruwetannya, karena pada dasarnya instalasi ini menggabungkan dua teknologi didalam satu komplekspembangkit daya.

Pemanfaatan gas buang (waste heat) dari turbin gas perlu dilakukan sebagai usaha untuk menurunkan temperatur gas buang ke lingkungan. Selain itu gas buang tersebut dapat dimanfaatkan untuk memanaskan air pengisi (feed water) pada pembangkit tenaga uap sehingga dapat menurunkan tingkat pemakaian bahan bakar pada ketel uap (boiler).

I.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana cara mengetahui kalor yang diserap oleh setiap komponen-komponen pada HRSG ?
2. Berapa efisiensi pada HRSG ?

I.3 Tujuan

1. Menganalisa penyerapan kalor pada tiap-tiap komponen Heat Recovery Steam Generator (HRSG).
2. Untuk menganalisa efisiensi pada HRSG.



1.4 Batasan Masalah

Karena luasnya permasalahan, maka analisa ini hanya dibatasi pada :

- Analisa dilakukan hanya pada penyerapan panas pada komponen utaman Heat Recovery Steam Generator (HRSG)berupa pada superheater, evaporator, dan Ekonomiser.

1.5 Manfaat penelitian

Hasil penelitian di harapkan dapat memberikan informasi tentang Keseimbangan Energi pada HRSG PT. Consolidated Electric Power Asia (Cepa) dan efisiensi HRSG.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 TINJAUAN UMUM PLTGU PT.CEPA

Instalasi pembangkit listrik tenaga gas uap (PLTGU) PT.CEPA menggunakan gas sebagai bahan bakar pada ruang bakar dan pada pembakaran tambahan (suplementetri firing). Instalasi PLTGU terdiri dua unit system turbin gas dan dua unit ketel gas buang (HRSG) untuk memproduksi uap yang akan di gunakan oleh satu unit turbin uap. Pada PLTGU sengkang digunakan pembakaran tambahan yang di operasikan pada beban puncak untuk menambah kalor gas buang yang keluar dari turbin gas. Penambahan pembakaran tambahan ntuk menaikkan daya yang di hasilkan turbin uap.

Menurut kondisi desain dan pengoperasiannya. Pembangkit daya combine cycle mempunyai daya output bersih 135 MW (sesuai kontrak dengan PLN). Daya listrik ini di peroleh dari dua sistem turbin gas dan sebuah tyrbn uap dengan supplementary firing untuk bebabn puncak.

Daya output pembangkit disesuaikan dengan permintaan PLN berdasarkan kebutuhan listrik di Sulawesi Selatan. Jadi pembangkit kadang dioperasiakn pada beban rendah, menengah dan beban puncak. Sehingga angkit didesain untuk beroperasi pada ketiga tingkatan beban tersebut.

listrik yang disuplai ke jaringan interkoneksi adalah aliran listrik AC



dengan frekuensi 50 Hz pada voltase nominal 150 kv setelah travo step-up utama.

II.1.1 Komponen utama instalasi PLTGU PT.CEPA

Kompresor

Dua unit kompresor, setiap unit terdapat atas 9 tingkat sudut kompresor pada bagian inlet kompresor terdapat VIGV yang berfungsi untuk mengatur suplai udara udara masuk kompresor.

Ruang Bakar

Terdiri Dari dua ruang bakar, ruang bakar ini adalah merupakan single burner yang di dalamnya terdapat 19 nossel.

Turbin Gas

Dua unit turbin gas, yang setiap unit turbin gas terdiri atas 3 Tingkat sudu turbin.

HRSO (Heat Recovery Steam Generator)

Duan Unit HRSO dengan tekanan tunggal.

Turbin Uap

Satu unit turbin uap kondensor dengan sebuah generator erpendingin udara.

Kondensor



Satu unit kondensor yang di desain dengan menggunakan pendingin air.

Dearator (Feet Water Tank)

Sebuah daerah yang melayani siklus air uap sebagai fasilitas utama menyimpan air.

Sistem kontrol

Dengan sebuah system control pada semua proses pembangkit yang berdasarkan teknologi PROKONTROL P.

Proses ini dapat menjamin keamanan operasi, control dan proses dengan suatu fungsi otomatis.

II.1.2 Komponen Penunjang Instalasi PT.Cepa

A. Pegolahan Air (Water Tretmen)

Pengolahan air untuk mensuplai air bersih untuk system pendingin utama dan dimenaralisasi air untuk kebutuhan bagian pembangkit lainnya. Air yang sudah bersih setelah melalui berbagai proses dikumpulkan dalam tangki penyimpan air demineralisasi untuk distribusi ke :

1. Kondensor untuk menggantikan kehilangan air yang di sebabkan blow down dan darin dalam siklus uap air HRSG.

2. Stasiun sample HRSG

B. Transformator utama



Tiga transformator step-up utama dari generator turbin gas dan uap.

System pendingin (Main Cooling Water).

System pendingin air utama (Main Cooling Water) adalah sebuah sitem siklus tertutup yang didinginkan kembali pada sebuah menara pendingin.

Sistem main Cooling water digunakan untuk mendinginkan komponen berikut :

1. Kondensor turbin uap
2. System air pendingin sekunder

Sistem air pendingin sekunder yang di suplai langsung dari system air pendingin utama tanpa air pendingin lainnya, memastika pendingin dari komponen berikut :

1. Pendinginan udara generator turbin uap
2. Pendinginan minyak pelumas
3. Pendingin sample

Sebuah menara pendinginn digunakan untuk mendinginkan air pendingin yang panas setelah mendinginkan kondensor utama.



II.1.3 Proses Instalasi Pembangkit Siklus Gabungan

A. TURBIN GAS

Turbin gas ABB GT 8C adalah sebuah turbin gas tiga tingkat dengan efisiensi tinggi dan kompresor transonic 12 tingkat dan sebuah sistem pembakaran yang terdiri dari 19 pembakar. Setiap turbin gas dihubungkan dengan sebuah roda gigi reduksi ke sebuah generator berpendingin udara.

B. HRSG (Heat Recovery Steam Generator)

Dua HRSG tekanan tunggal beroperasi dengan cara sirkulasi alami.

Gas buang turbin gas digunakan sebagai sumber panas dan pembangkit uap super panas yang bertekanan tinggi. Air pengisi bertekanan tinggi dipanaskan dalam ekonomiser, sedangkan uap jenuh diproduksi pada evaporator. Uap tekanan tinggi tersebut kemudian dilewatkan kesuperheater dan bila perlu attemperated dengan air dari ekstraksi air pendingin yang berhubungan dengan pompa peed water.

Pada HRSG dilengkapi dengan pembakaran tambahan yang dioperasikan pada beban tinggi.



C. TURBIN UAP (STEAM TURBIN)

Uap dipanaskan lanjut pada tekanan tinggi dari setiap HRSG dikumpulkan dalam induk utama uap tekanan tinggi dan masuk ke turbin melalui jalur uap baru.

Turbin uap ABB tipe MP20 adalah suatu turbin implus kecepatan tinggi yang terdiri dari 13 tingkat. Ekstraksi uap terjadi pada tingkat ke 11.

Mesin dengan satu casing yang dilengkapi sebuah jalur uap untuk mengalirkan uap tekanan tinggi dari HRSG dan satu jalur ekstraksi untuk melengkapi ekstraksi uap ke daerator. Saluran pembuangan aksial dihubungkan ke kondensor yang dipasang horizontal.

Turbin uap di hubungkan dengan reduksi roda gigi ke generator ABB bependingin udara tipe WY16Z-068LLT.

D. KONDENSOR

Kondensor adalah pendingin air permukaan yang diatur secara horizontal. Tempat penyimpanan air terbagi, oleh karena itu perawatan air dimungkinkan selama pengoperasian turbin uap.

E. POMPOA KONDESAT

Terdiri ats dua pompa kondesat dimana satu pompa kondesat beroperasi pada beban penuh. sementara yang kedua disiapkan untuk



membantu dan beroperasi secara otomatis jika pompa utama mengalami gangguan, juga untuk mendukung operasi by pass.

F. DAERATOR

Sebuah daerator yang menggunakan pemanas mula membantu penampungan dan pemanasan air untuk siklus uap. Energy untuk pemanas diperoleh dari ekstraksi turbin uap pada tingkat ke 11.

II. 2 GAMBARAN UMUM SIKLUS GABUNGAN

Pembangkit dengan siklus gabungan yang biasa di sebut PLTGU merupakan suatu pembangkit listrik dengan memadukan siklus Brayton dengan siklus Rankine. Pada siklus gabungan gas buang dari turbin gas yang masih mempunyai temperatur dan kalor yang sangat tinggi digunakan untuk menghasilkan uap didalam ketel untuk menyuplai kebutuhan uap turbin uap.

Komponen-komponen utama yang digunakan dalam siklus gabungan antara lain terdiri dari compressor , ruang bakar, turbin gas, ketel uap, pompa air pengisi ketel, kondensor, dan turbin uap.

Udara atmosfer diisap masuk ke dalam compressor kemudian ditekan guna mendapatkan udara yang bertekanan tinggi yang diperlukan untuk Pembakaran dan pendinginan dalam ruang bakar. Dengan menyempatkan

an bakar kedalam ruang bakar yang didalamnya terdapat atau dilewatkan ra yang bertekanan dan bertemperatur tinggi yang keluar dari



compressor maka terjadilah pembakaran dalam ruang bakar. Gas hasil pembakaran dalam ruang bakar kemudian diekspansikan melalui sudu-sudu turbin gas yang selanjutnya menghasilkan momen putar pada poros turbin gas. Momen putar tersebut dimanfaatkan untuk memutar compressor, generator dan turbin gas itu sendiri.

Gas buang yang keluar dari turbin gas yang mempunyai temperatur dan kalor yang sangat tinggi digunakan untuk memanaskan air yang berada dalam ketel/Heat Recovery Steam Generator (HRSG) guna menghasilkan uap yang selanjutnya dipergunakan untuk memutar turbin uap. Setelah berekspansi dalam turbin uap, uap kering menjadi uap basah yang selanjutnya di kondensasikan dalam kondensor yang didinginkan dengan air pendingin untuk dipompa kembali ke aerator. (Hidayat, 2017)

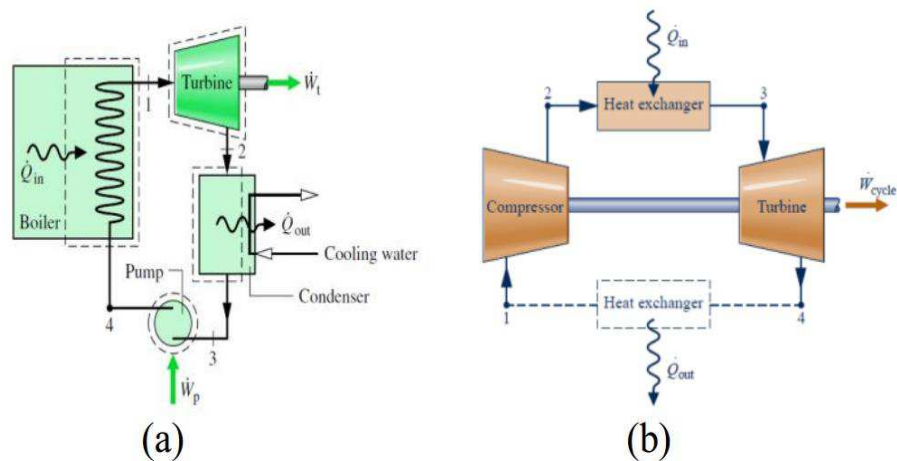
II.2.1 Siklus Kombinasi Pada PLTGU

Siklus kombinasi adalah siklus yang menggabungkan antara dua siklus termodinamika yang paling umum ditemui aplikasinya pada pembangkit, yaitu siklus Rankine dan siklus Brayton. Siklus Rankine menggunakan fluida kerja berupa air, dan memiliki komponen utama berupa turbin uap, kondensor, pompa, dan boiler. Skema dari siklus Rankine ditunjukkan seperti pada gambar (a). Sedangkan siklus Brayton menggunakan fluida kerja berupa gas, dan memiliki komponen utama berupa turbin gas, kompresor, dan alat



penukar panas (*heat exchanger*) yang diaplikasikan ke ruang bakar.

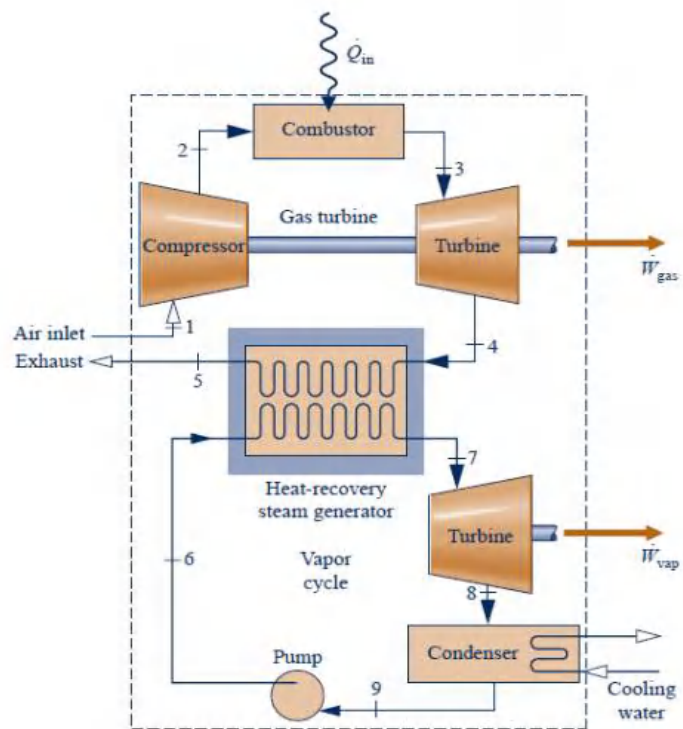
Skema dari siklus Brayton ditunjukkan seperti pada gambar 2(b).



Gambar. 1. a) Siklus Rankine ; b) Siklus brayton

Pada siklus Rankine, kerja akan dihasilkan dari putaran turbin uap yang memanfaatkan aliran uap air yang bertekanan tinggi. Setelah melewati turbin uap, tekanan uap air akan menurun lalu uap air masuk komponen kondensor untuk dikondensasikan menjadikan air. Setelah dari kondensor, air akan masuk pompa untuk dinaikkan tekannya dan masuk komponen boiler untuk merubah air menjadi uap air. Sedangkan pada siklus Brayton, kerja akan dihasilkan dari putaran turbin gas yang memanfaatkan aliran dari gas panas yang sebelumnya sudah dikompresi di kompresor lalu diberikan panas di ruang bakar (*heat exchanger*). Gas panas keluaran dari turbin gas masih memiliki temperatur yang tinggi setelah dimanfaatkan pada

turbin, dan akan berbahaya jika langsung dibuang ke lingkungan. Oleh karena itu, panas gas buang tersebut dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan uap air pada siklus Rankine yang merupakan fungsi dari komponen boiler. Dengan menggabungkan kedua siklus tersebut, dapat menghasilkan efisiensi yang lebih besar karena sumber panas yang dibutuhkan oleh siklus Rankine dapat disediakan oleh siklus Brayton, sehingga tidak perlu bahan bakar tambahan. Skema dari siklus kombinasi dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2. Siklus Kombinasi



➤ **Tinjauan dari Siklus Brayton**

- Kompresor

Pada kompresor gas akan mengalami kompresi, sehingga

pada kondisi 2 gas akan memiliki tekanan yang tinggi. Dengan asumsi steady state, efek dari energi kinetik dan potensial dapat diabaikan.

- Ruang Bakar

Pada ruang bakar (*combustor*) akan terjadi proses pemasukan kalor terhadap gas dalam sistem. Sehingga pada kondisi 3 gas akan memiliki temperatur dan tekanan yang tinggi. Dengan asumsi yang ada, didapatkan persamaan:

- Turbin

Turbin yang digunakan pada siklus Brayton adalah turbin gas, karena fluida kerja pada siklus ini adalah gas. Gas yang memiliki temperatur dan tekanan yang tinggi akan diekspansi pada turbin gas, dan menghasilkan kerja. Sehingga pada kondisi 4, tekanan gas akan menurun begitu pula dengan temperaturnya namun tidak signifikan.

- HRSG

Pada HRSG akan terjadi proses pembuangan kalor dari siklus Brayton menuju siklus Rankine. Dengan asumsi yang ada, didapatkan persamaan:

$$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}_{gas}} = h_4 - h_5 \quad (1)$$

Dimana \dot{Q}_{out} adalah kalor yang dibuang gas dari siklus Brayton menuju siklus Rankine, dan \dot{m}_{gas} adalah laju aliran massa gas hasil pembakaran. Dimana efisiensi siklus adalah



perbandingan antara daya yang dihasilkan dan kalor yang dibutuhkan.

➤ **Tinjauan dari Siklus Rankine**

- Turbin

Turbin yang digunakan pada siklus Rankine adalah turbin uap, karena fluida kerja yang mengalir dalam siklus ini berupa air dan uap air. Pada kondisi 7, uap air yang keluar dari HRSG mempunyai temperatur dan tekanan yang tinggi. Ketika melewati turbin, maka terjadilah proses ekspansi yang menghasilkan kerja. Sehingga uap air pada kondisi 8 memiliki tekanan yang lebih rendah. Dengan persamaan *energy balance*, menggunakan asumsi *steady state*, perpindahan panas di sekitar turbin, energi kinetik, dan energi potensial diabaikan, didapat:

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_s} = h_7 - h_8 \quad (2)$$

Dimana \dot{W}_t adalah daya turbin, \dot{m}_s adalah laju aliran massa *steam* (uap air), dan h adalah enthalpi.

- Kondensor

Pada kondensor terjadi perpindahan panas dari fluida kerja ke air pendingin (*cooling water*) pada aliran yang terpisah. Fluida kerja akan mengalami kondensasi dan temperatur air pendingin akan meningkat.



- Pompa

Setelah mengalami kondensasi, maka fluida kerja menjadi air. Air pada titik 9 akan dipompa, sehingga akan mengalami proses kompresi yang mengakibatkan tekanan air meningkat agar dipersiapkan masuk boiler.

- HRSG

Fluida kerja pada kondisi 6 setelah meninggalkan pompa disebut *boiler feedwater*, yang nantinya akan dipanaskan hingga mencapai titik jenuh dan mengalami evaporasi pada HRSG. Performa dari siklus Rankine ini dapat diketahui dengan menghitung efisiensi termal dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\eta_{siklus Rankin} = \frac{W_t - W_p}{\dot{Q}_{in\ exh\ gas}}$$

(3)

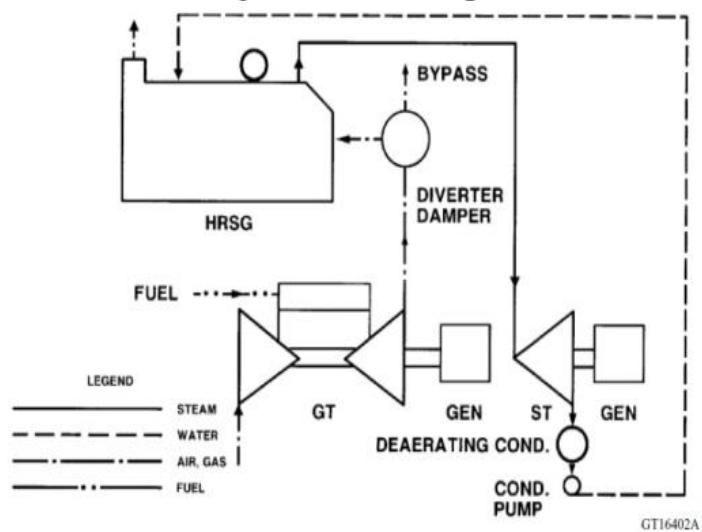
Dimana efisiensi siklus adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan dan kalor yang dibutuhkan. Siklus Rankine dan siklus Brayton dikombinasikan menggunakan komponen HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) yang berperan sebagai boiler pada siklus Rankine dan memanfaatkan panas dari gas buang turbin gas siklus Brayton. Dikarenakan memiliki efisiensi yang cukup besar, penggunaan siklus kombinasi sudah diaplikasikan sebagai pembangkit listrik yang banyak dipakai di seluruh dunia. Untuk



menghitung efisiensi termal dari siklus kombinasi, bisa didapat dengan:

$$\eta_{\text{siklus Kombinasi}} = \frac{W_{GT} + W_{ST}}{\dot{Q}_{in}} \quad (4)$$

Dimana W_{GT} adalah daya yang dihasilkan dari turbin gas, W_{ST} adalah daya yang dihasilkan dari turbin uap, dan \dot{Q}_{in} adalah total panas yang dibutuhkan dalam siklus kombinasi. Sedangkan nilai *heat rate* sistem pembangkit diperoleh dengan persamaan berikut:



Gambar.3 : HRSG pada Siklus Kombinasi

II.2.2 Turbin Uap

Turbin uap merupakan kelompok pesawat-pesawat konversi energy yang mengkonversikan energy potensial uap menjadi energy mekanik pada poros turbin, menggunakan uap sebagai fluida kerja, dihasilkan dari pemanasan air menjadi uap super panas menggunakan



gas buang turbin gas dalam ketel yang dalirkan melalui nossal kedalam turbin uap. Akibat tumbukan uap pada sudu-sudu turbin kemudian menghasilkan gerakan putar poros pada turbin sebagai energy mekanik.

Daya yang dihasilkan oleh turbin diperoleh dari selisih entalpi (panas jatuh) dan kapasitas massa uap (massa aliran uap persatuan waktu) yang masuk dalam turbin. Besarnya massa uap yang masuk pada hakekatnya dipengaruhi oleh besarnya rendemen turbin, sementara rendemen turbin sendiri tergantung pada system sudu-sudu turbin.

II.2.3 Ketel Gas Buang

Ketel gas buang Heat Recovery Steam Generator (HRSG) adalah suatu pesawat pembangkit uap yang memanfaatkan panas gas buang turbin gas sebagai sumber energy untuk memproduksi uap.

Sumber energy lain untuk jenis ketel gas buang dapat pula diperoleh dari adanya pebakaran tambahan (supplementary firing) yang diinjeksikan kedalam ketel bila kandungan energy tidak mencukupi untuk memproduksi uap sesuai kebutuhan turbin.

Perbandingan antara jumlah kalor yang diserap oleh ketel gas buang terhadap jumlah kalor yang masuk kedalam ketel didefenisikan sebagai efisiensi ketel gas buang. ketel pada umumnya terdiri dari komponen-komponen sebagai berikut :



- Ekonomiser

Ekonomiser adalah penukar kalor yang menaikkan suhu air yang keluar dari daerator atau Feed Water Tank(FWT) sampai mendekati temperatur jenuh.

- Evaporator

Evaporator adalah penukar kalor yang berfungsi untuk mendidihkan air yang keluar dari ekonomiser dan menyuplainya ke superheater dalam bentuk uap air. Air yang telah dipanaskan diekonomiser dididihkan dalam drum evaporator melalui penyerapan kalor dari uap yang dihasilkan dari pipa penguap. Air jenuh dari drum kemudian dialirkan oleh pompa sirkulasi ke pipa-pipa penguap sehingga menghasilkan uap air.

- Drum Uap

Drum uap merupakan tempat air pengisi ketel masuk setelah dipanaskan diekonomiser dan tempat pemisahan uap jenuh dan cairan jenuh. Air pengisi ketel yang masuk kea lat disirkulasikan ke evaporator untuk menguapkannya. Sirkulasi air dan uap pada evaporator terjadi akibat pengaruh gravitasi perbedaan massa uap air dan air. Fungsi utama drum uap adalah memisahkan uap dengan air mendidih.

Metode pemisahan uap yang dipakai pada PLTGU PT.CEPA adalah pemisahan setrifugal.



- Superheater

Superheater digunakan untuk mengubah uap jenuh yang dihasilkan evaporator sehingga menjadi uap dipanaskan lanjut yang kemudian diekspansi ke turbin uap. Pemakaian uap dipanaskan lanjut pada turbin uap memberikan beberapa keuntungan antara lain:

1. Memperbesar ekspansi yang dapat dilakukan pada turbin uap sehingga daya out put yang dihasilkan turbin uap akan semakin besar.
2. Mencegah terjadinya pengembunan pada sudu-sudu turbin uap yang dapat menyebabkan keausan pada sudu-sudu turbin uap.

II.2.4 Kondensor

Merupakan suatu alat penukar panas (Heat Exchanger), dengan proses perpindahan panas yang terjadi dari suatu fluida kerja yang bertemperatur tinggi pada fluida kerja yang bertemperatur lebih rendah. Uap yang telah berekspansi dalam turbin dikondensasi agar dapat dipompa kembali ke daerator.



II.3 PENGERTIAN HRSG

Turbin gas dengan efisiensi 33% menggunakan gas hasil pembakaran sebagai fluida kerja. Sesudah diekspansikan didalam turbin gas untuk menghasilkan daya, gas asap meninggalkan turbin gas pada tekanan atmosfer dengan temperatur tinggi. Temperatur ini biasanya diatas 500°C yang tidak dapat dimanfaatkan secara langsung, tetapi masih dapat dimanfaatkan sebagai sumber energy untuk menghasilkan uap. Pada tekanan dan suhu tinggi uap dapat digunakan sebagai fluida kerja pada siklus uap. Dengan pemanfaatan sebagian energy terbuang dari turbin gas dan dikonversi menjadi kerja (turbin uap) dengan menggunakan HRSG yang dikenal dengan siklus gabungan.

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 perpindahan panas yang terjadi hanyalah proses konveksi dan konduksi dari gas buang turbin gas ke dalam air yang akan diproses menjadi uap melalui elemenelemen pemanas didalam HRSG.(Silaban, 2014)

Boiler HRSG sangat bermanfaat untuk meningkatkan hasil guna (elemen) bahan bakar yang dipakai pada unit turbin gas, yang selanjutnya menggerakkan unit turbin uap. Sistem pembangkit listrik yang

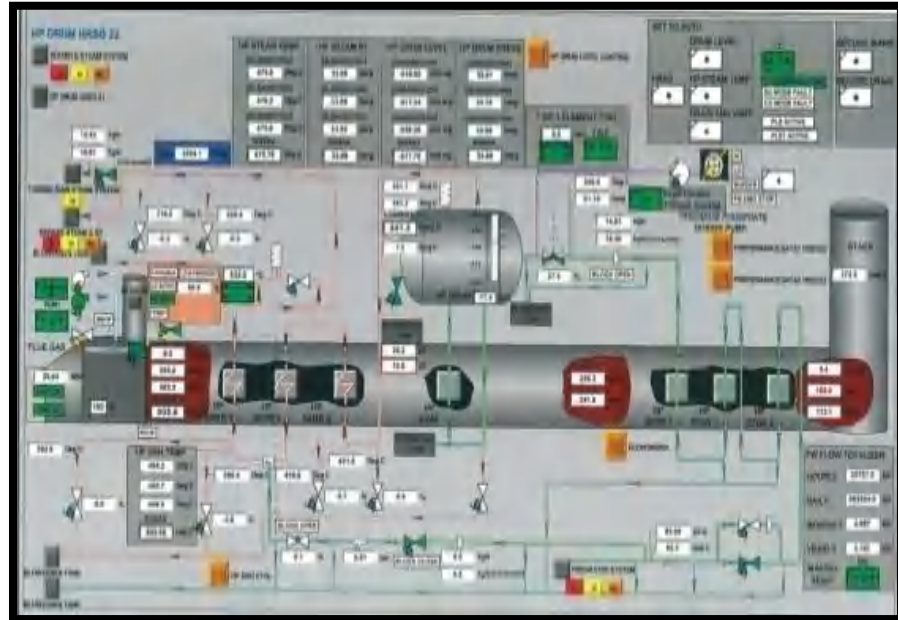


memanfaatkan proses ini disebut Pusat Listrik tenaga Gas dan Uap (PLTGU) atau unit pembangkit siklus kombinasi CCPP (Combined Cycle Power Plant). Boiler HRSG adalah bagian penting PLTGU. Siklus Pusat Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) adalah gabungan siklus Brayton turbin gas dan siklus Rankine turbin uap. Boiler HRSG merupakan bagian dari siklus Rankine.

Kapasitas produksi uap yang dapat dihasilkan HRSG tergantung pada kapasitas energi panas yang masih dikandung gas buang dari unit turbin gas, yang berarti tergantung pada beban unit turbin gas. Pada dasarnya, turbin gas yang beroperasi pada putaran tetap, aliran udara masuk kompresor juga tetap, perubahan beban turbin yang tidak konstan dengan aliran bahan bakar tetap, sehingga suhu gas buang juga berubah-ubah mengikuti perubahan beban turbin gas. Suhu gas buang unit turbin gas tetap konstan diperoleh dengan cara mengatur pembukaan sirip-sirip pemandu aliran udara masuk (IGV, Inlet Guide Vane) guna mengatur laju aliran udara masuk ke kompresor, dimana suhu gas buang sebagai umpan baliknya. Sebagian boiler HRSG dapat dilengkapi dengan pembakaran tambahan untuk meningkatkan kapasitas produksi uapnya, dan sebagian produksi uapnya dapat digunakan untuk keperluan pemanasan aplikasi lainnya (cogeneration). Dengan pembakaran tambahan ini, kestabilan produksi uap HRSG dapat dipertahankan, sehingga kestabilan turbin uap yang menggunakan uap ini dapat dijaga, walaupun beban turbin gas berubah-ubah, dan juga suhu gas buang turbin gas (aliran udara masuk kompresor) tidak harus dijaga tetap konstan dan karenanya tidak memerlukan pengaturan IGV). (DEPDIKNAS. 2010)



II.3.1. Prinsip Kerja HRSG



Gambar 4. Proses kerja pada HRSG PT.CEPA

Sumber : Ruang kontrol PT.CEPA

Air yang dimasukkan ke dalam HRSG adalah air yang tidak mengandung mineral yang berfungsi untuk menghindari terjadinya korosi pada pipa. Setelah dipanaskan pada tangki pengisian (*feedwater tank*) akan dipompakan oleh pompa air kedalam ekonomiser tekanan tinggi. Air meninggalkan ekonomiser tekanan tinggi dan masuk lagi menuju drum tekanan tinggi. Sirkulasi alami dipertahankan pada evaporator tekanan tinggi oleh sebuah downcomer. Air masuk ke pipa-pipa evaporator dan gas buang dari turbin gas yang bersuhu tinggi terlepas kalornya sehingga memanaskan air di dalam pipa-pipa evaporator. Air yang bersuhu tinggi kemudian memanaskan air yang ada pada drum tekanan tinggi. Kemudian campuran (uap jenuh dan cairan jenuh) dipisahkan didalam



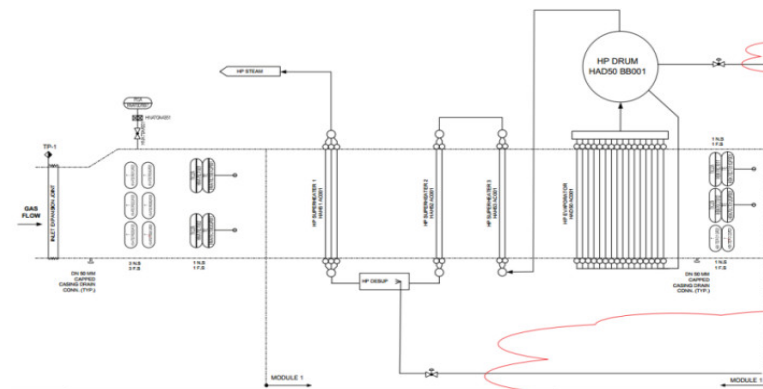
drum tekanan tinggi. Uap jenuh yang telah dipisahkan ini keluar menuju ke superheater. Setelah itu uap yang telah berubah menjadi uap panas lanjut ini menuju ke turbin uap.(Thawakkal,dkk.2005)

II.3.2 Bagian – Bagian Utama HRSG

A. Superheater

Superheater merupakan alat yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh sampai menjadi uap panas lanjut (*superheat vapour*). Uap panas lanjut bila digunakan untuk melakukan kerja dengan jalan ekspansi di dalam turbin atau mesin uap tidak akan mengembun, sehingga mengurangi kemungkinan timbulnya bahaya yang disebabkan terjadinya pukulan balik atau *back stroke* yang diakibatkan mengembunnya uap belum pada waktunya sehingga menimbulkan vakum di tempat yang tidak semestinya di daerah ekspansi. Superheater ditempatkan pada daerah aliran gas asap yang bertemperatur tinggi. Temperatur uap yang dihasilkan superheater sangat dipengaruhi temperatur gas asap. Pada superheater biasanya dilengkapi dengan temperature control yang menjaga temperature uap yang keluar dari superheater agar tidak melebihi batas high temperature, sistem ini dinamakan Desuperheater. Desuperheater ini fungsinya menjaga temperature keluar HRSG yang masuk ke dalam turbin (HP Turbin) agar tidak melebihi set temperature material turbin. (DEPDIKNAS, 2010).





Gambar 5. Superheater dan Evaporator pada HRSG.

B. Evaporator

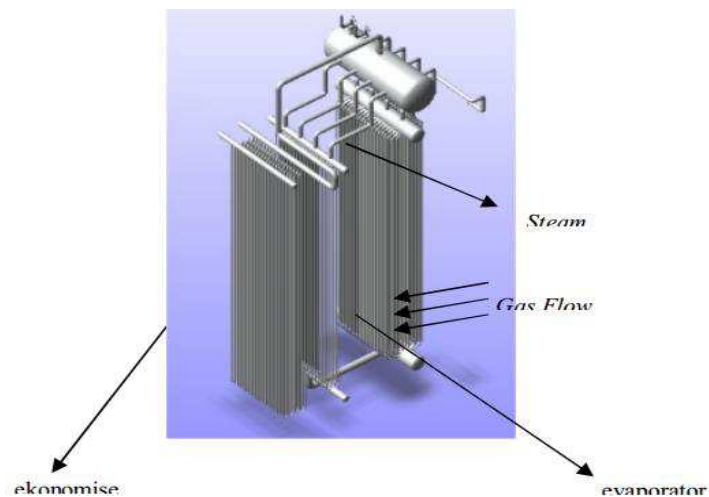
Evaporator merupakan elemen HRSG yang berfungsi untuk mengubah air hingga menjadi uap jenuh, pipa-pipa evaporator pada ketel uap biasanya terletak pada lantai (*water floor*) dan juga pada dinding (*water wall*). Pada pipa ini uap jenuh pada kualitas 0,80 – 0,98, sehingga sebagian masih berbentuk fase cair. Evaporator akan memanaskan uap air yang turun dari drum uap (*steam drum*) yang masih dalam fase cair agar berbentuk uap jenuh sehingga bisa diteruskan menuju *Superheater*. Uap bercampur air mengalir pada pipa-pipa evaporator menuju drum uap. Pada drum uap terjadi pemisahan antara uap dengan air, yang disebabkan perbedaan massa jenis (DEPDIKNAS, 2010).

C. Ekonomiser

Ekonomiser terdiri dari pipa-pipa air yang ditempatkan pada lintasan gas asap setelah pipa evaporator. Pipa-pipa ekonomiser dibuat dari bahan baja atau besi tuang yang sanggup



untuk menahan panas dan tekanan tinggi. Ekonomiser berfungsi untuk memanaskan air pengisi sebelum memasuki *steam drum* dan *evaporator* sehingga proses penguapan lebih ringan dengan memanfaatkan gas buang dari HRSG yang masih tinggi sehingga memperbesar efisiensi HRSG karena dapat memperkecil kerugian panas pada HRSG tersebut. Air yang masuk pada *evaporator* sudah pada temperatur tinggi sehingga pipa-pipa *evaporator* tidak mudah rusak karena perbedaan temperatur tidak terlalu tinggi. (Depdiknas, 2010).



Gambar 6 : Susunan Pipa ekonomiser dan evaporator.

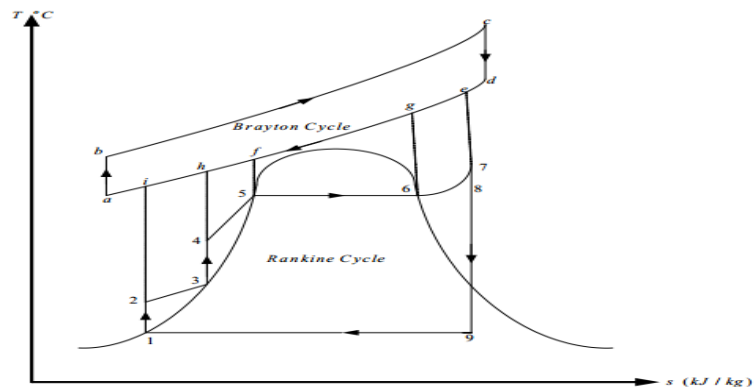
D. Preheater

Preheater merupakan pemanas awal air yang dipompakan dari kondensor sebelum masuk tangki air umpan (*feed water tank*). Pada HRSG *preheater* bertujuan menaikkan suhu sebelum masuk tangki air umpan yang nantinya akan diteruskan ke ekonomiser. Umumnya *preheater* ini menempati

posisi lintasan gas asap sebelum meninggalkan ketel.
(DEPDIKNAS, 2010).

F. Rendemen Instalasi

Diagram PLTGU dengan HRSG Single Pressure dapat dinyatakan dalam sebuah diagram T-S seperti pada gambar 8. Diagram I menyatakan daur Brayton untuk turbin gas dan diagram II menyatakan daur Rankine untuk turbin uap.



Gambar 7 : Diagram T-S PLTGU

Pemasukan panas ke dalam siklus gabungan terjadi pada ruang bakar atau pada proses b-c dalam gambar 3-4, yang besarnya adalah:

$$Q_{in} = m_{gas} (h_c - h_b)$$

(5)

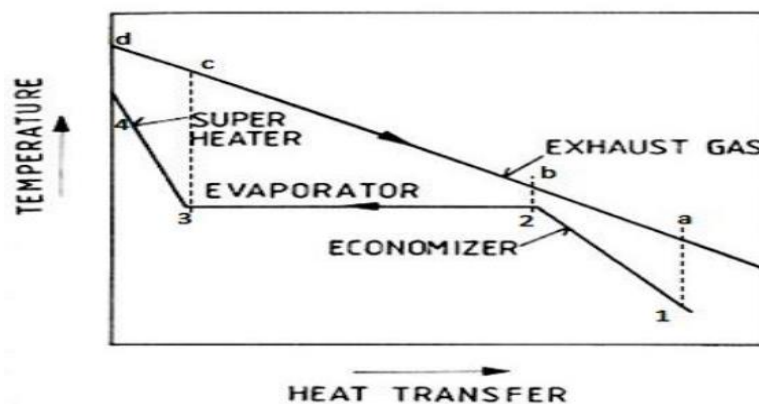
Kerja bersih yang dihasilkan pada instalasi turbin gas sebagai perbedaan kerja yang dihasilkan turbin dengan kerja diperlukan untuk kompresi gas. (DEPDIKNAS, 2010).



II.3.3 Berdasarkan Tingkat Tekanan

- Single Pressure

HRSG yang dipakai pada PT. CEPA berdasarkan tingkat tekakanan adalah single pressure. Pada HRSG single pressure, fluida kerja akan dialirkan melalui komponen yang dikondisikan memiliki tekanan yang sama 13 dari economizer, evaporator, hingga superheater. Sehingga turbin uap yang dipakai juga memiliki tekanan tunggal. Energi dihasilkan dari gas buang yang akan dimanfaatkan panasnya untuk menghasilkan uap air. Skema tekanan tunggal adalah skema siklus uap air (Rankine) yang paling sederhana yang bisa diterapkan dalam siklus kombinasi dan penggunaannya sudah dipakai secara luas. Dengan skema ini akan didapatkan biaya instalasi yang paling murah, walaupun skema ini tidak menghasilkan efisiensi termal siklus kombinasi yang tertinggi. Skema tekanan tunggal dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar .8: Profil distribusi temperatur pada Tekanan Tunggal



II.4.2. Perhitungan Uap

A. Perpindahan Panas pada HRSG

Perpindahan panas yang terjadi di dalam HRSG termasuk proses kombinasi konduksi dan konveksi. Perpindahan panas konveksi adalah perpindahan panas yang dilakukan oleh molekul-molekul fluida (cair atau gas). Perpindahan panas secara konveksi yaitu konveksi bebas dan konveksi paksa.

Gas buang yang dihasilkan turbin gas masuk ke HRSG untuk selanjutnya mengubah air umpan (*feedwater*) menjadi uap panas lanjut yang akan digunakan untuk memutar sudu-sudu turbin uap sehingga dapat memutar generator listrik. Setelah melalui beberapa tingkatan sudu turbin, uap tersebut dialirkan menuju kondensor. Uap mengalami proses kondensasi di dalam kondensor, selanjutnya air hasil proses kondensasi tersebut dipompakan kembali ke HRSG. (Burlian,dkk. 2013)

B. Laju aliran energi panas gas buang yang diberikan kepada HRSG

(Q_{eg}).

Gas buang adalah gas yang berasal dari proses pembakaran yang suhunya relatif tinggi terhadap suhu atmosfer. Dalam proses pembakaran tersebut bahan bakar dibakar dengan udara yang akan menghasilkan produk pembakaran yang berupa gas buang yang mengandung berbagai senyawa gas antara lain, H₂O, CO₂ dan N₂ ditambah dengan O₂, jika pemberian udara dilakukan secara



berlebihan.. Besarnya energi panas yang terkandung dalam gas buang yang diberikan kepada HRSG (Q_{eg}) tersebut dapat diketahui dengan persamaan berikut ini :

$$Q_{eg} = m_g(T_i - T_o) \quad (\text{kJ}) \quad (6)$$

Dengan :

T_i = temperatur gas buang (oK).

T_o = temperatur lingkungan (oK).

m_g = laju aliran massa gas buang (kg/dt).

C_{peg} = panas spesifik gas buang (kJ/kg.K).

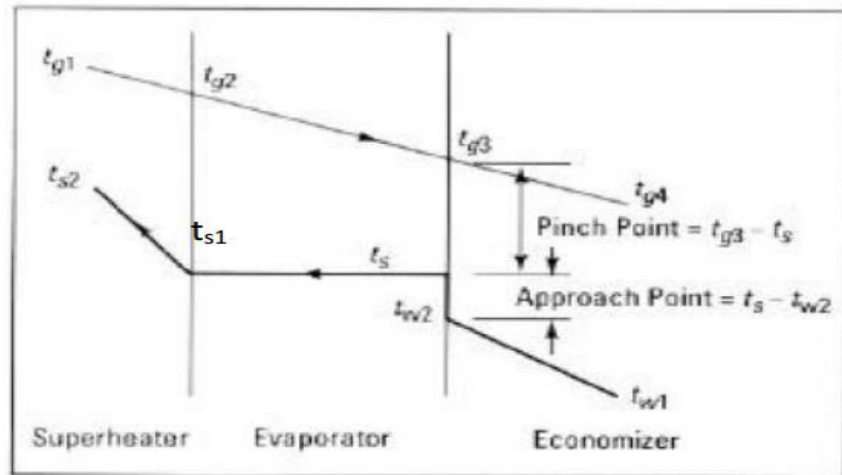
(Setyoko, Bambang. 2006).

II.4.3.Kesetimbangan Energi

Temperatur uap yang dihasilkan harus disesuaikan dengan temperatur gas buang. Perbedaan temperatur terkecil antara dua aliran yaitu aliran gas dengan aliran uap disebut dengan titik penyempitan (*pinch point*) ($T_{g3} - T_s$), minimum 20 °C. (Burlian dan Ghafara. 2013)

Adapun *approach point* merupakan besarnya selisih antara temperatur air jenuh pada evaporator dengan temperatur air keluar economizer ($T_s - T_{w2}$).(Hidayat, 2017).





Gambar 9; Profil diagram temperatur gas buang dan uap pada *single pressure HRSG* (Hidayat,2017)

Tujuan dari penentuan *pinch point* pada HRSG adalah untuk menghindari terjadinya kondisi silang temperatur, dimana temperatur air masuk evaporator lebih tinggi dari temperatur gas keluar evaporator, sehingga member kesan bahwa terjadinya perpindahan panas dari air ke gas yang secara termodinamika adalah tidak mungkin terjadi, ilustrasi dari kondisi silang temperatur ditunjukkan pada gambar 10. Sedangkan tujuan dari penentuan *approach point* pada awal perancangan HRSG adalah untuk menjaga temperatur air keluar economizer berada dibawah temperatur jenuh, hal ini dimaksudkan untuk menghindari terjadinya evaporasi didalam economizer yang akan menyebabkan erosi pada buluh dan masalah lainnya, karena economizer tidak dirancang untuk menampung aliran dua fasa.

Nilai *pinch point* yang disarankan berkisar dari 5oC – 20oC, sedangkan *approach point* berkisar dari 5oC – 12oC (Burlian dan Ghafara, 2013).

Penentuan nilai *pinch point* dan *approach point* berpengaruh terhadap luas daerah perpindahan panas dari HRSG. Nilai *pinch point* dan *approach point* yang kecil membutuhkan luas daerah perpindahan panas HRSG yang besar. Selain itu, jika *pinch point* dan *approach point* terlalu besar maka pemanfaatan kalor yang terkandung pada gas buang juga kurang maksimal.

- **HP Superheater**

Kalor yang diserap pada HP Superheater adalah:

$$Q_{uap} = m_u \cdot (h_{s2} - h_{s1}) \quad (7)$$

Di mana:

m_u = laju aliran massa uap (kg/s)

h_{s2} = enthalpy uap keluar superheater atau masuk ke Turbin uap (kJ/kg)

h_{s1} = enthalpy uap keluar evaporator atau masuk ke superheater (kJ/kg)

Atau ;

$$Q_{gas} = m_g \cdot C_p (T_{g1} - T_{g2}) \quad (8)$$

Di mana:

m_g = laju aliran massa gas buang turbin gas (kg/s)

C_p = panas jenis (kJ/kg.°C)

T_{g2} = temperatur gas buang keluar superheater (°C)



T_{g1} =Temperatur gas buang masuk superheater (°C)

- **HP Evaporator**

Air akan mengalami penguapan pada Evaporator. Besarnya kalor akan dibutuhkan untuk menguapkan air adalah

$$Q_{uap} = m_u \cdot (h_{s1} - h_{w2}) \quad (9)$$

Di mana:

m_u = laju aliran massa uap (kg/s)

h_{s1} = enthalpy uap keluar Evaporator atau masuk ke superheater (kJ/kg)

h_{w2} = enthalpy air masuk evaporator atau keluar economiser (kJ/kg)

Atau ;

$$Q_{gas} = m_g \cdot C_p (T_{g2} - T_{g3}) \quad (10)$$

Di mana:

m_g = laju aliran massa gas buang turbin gas (kg/s)

C_p = panas jenis (kJ/kg.°C)

T_{g2} = temperatur gas buang keluar superheater atau masuk ke evaporator (°C)

T_{g3} =Temperatur gas buang keluar evaporator atau masuk economizer (°C)

- **HP Economizer**

Uap air bertekanan tertentu (bar) dipanaskan di HP Economizer .



$$Q_{uap} = m_u \cdot (h_{w2} - h_{w1}) \quad (11)$$

Di mana:

m_u = laju aliran massa uap (kg/s)

h_{w2} = enthalpy air keluar Economiser atau masuk ke evaporator (kJ/kg)

h_{w1} = enthalpy air masuk economizer (kJ/kg)

Atau ;

$$Q_{gas} = m_g \cdot C_p \cdot (T_{g3} - T_{g4})$$

Di mana:

m_g = laju aliran massa gas buang turbin gas (kg/s)

C_p = panas jenis (kJ/kg.°C)

T_{g4} = temperatur gas buang keluar economizer (°C)

T_{g3} = Temperatur gas buang keluar evaporator atau masuk economizer (°C). (Burlian dan Ghafara. 2013)

II.4.4 Efisiensi HRSG

Effisiensi HRSG didapat dari banyaknya panas yang diserap oleh komponen-komponen utama di HRSG dibagi dengan panas yang masuk kedalam HRSG. Rumus mencari effisiensi :

$$\eta_{HRSG} = \frac{\text{panas yang dimanfaatkan}}{Q_{input HRSG}} \times 100\% \quad (12)$$

