

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Proses-proses perpindahan energi yang terjadi pada PLTGU merupakan penerapan dari hukum Termodinamika pertama dan kedua dimana energi adalah konsep dasar dari Termodinamika dan merupakan salah satu aspek terpenting dari analisis keteknikan (Moran *et al.* 2018).

2.1.1 Hukum Termodinamika Pertama

Hukum Termodinamika pertama dikenal juga sebagai prinsip kekekalan energi yang merupakan salah satu prinsip paling mendasar di alam yang menyatakan *bahwa energi tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan tapi hanya berubah dari suatu bentuk ke bentuk lainnya.*

Perubahan energi total dari sistem dalam suatu proses (ΔE_{system}) sama dengan perbedaan antara total energi yang masuk (E_{in}) dan total energi yang keluar dari sistem (E_{out}) selama proses itu, hubungan ini seringkali disebut sebagai keseimbangan energi dan berlaku pada setiap bentuk sistem yang mengalami proses apapun (Cengel *et al.* 2019).

$$E_{\text{in}} - E_{\text{out}} = \Delta E_{\text{system}} \quad (2.1)$$

Energi dapat berpindah (E_{in} dan E_{out}) menuju atau dari suatu sistem dalam bentuk panas (Q) dan kerja (W).

Konservasi massa untuk volume atur (keseimbangan massa)

Dengan menyatakan massa yang terdapat di dalam *volume* atur pada waktu t dengan $m_{\text{cv}}(t)$, dimana massa masuk (m_i) atau keluar (m_e), maka prinsip konservasi massa dinyatakan dengan:

$$\frac{dm_{\text{cv}}}{dt} = m_i - m_e \quad (2.2)$$

Konservasi energi untuk volume atur (keseimbangan energi)

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = Q_{cv} - W_{cv} + m_i [h_i + 1/2 V_i^2 + g z_i] - m_e [h_e + 1/2 V_e^2 + g z_e] \quad (2.3)$$

Analisis pada kajian ini dilakukan pada keadaan tunak (*steady state*) sehingga

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = 0 \text{ dan } \frac{dm_{cv}}{dt} = 0$$

Dimana:

E_{cv} = energi dari *volume* atur pada waktu t

Q dan W adalah laju bersih perpindahan energi melalui panas dan kerja yang melintasi batas *volume* atur pada waktu t

h_i dan h_e = entalpi pada *inlet* dan *outlet* dari *volume* atur

V_i dan V_e = kecepatan pada *inlet* dan *outlet* dari *volume* atur

z_i dan z_e = ketinggian pada *inlet* dan *outlet* dari *volume* atur

2.1.2 Hukum Termodinamika Kedua

Prinsip konservasi energi saja tidak selalu cukup, sehingga hukum kedua dari Termodinamika juga diperlukan dalam melakukan analisis Termodinamika (Moran *et al.* 2018).

Hukum Termodinamika kedua pada pernyataan *Kelvin-Planck* menyatakan *tidak mungkin ada alat yang beroperasi dalam suatu siklus dapat menerima panas dari satu reservoir saja dan menghasilkan sejumlah kerja netto*. Suatu sistem dapat mengubah seluruhnya kerja menjadi perpindahan energi yang setara dalam bentuk panas tapi adalah tidak mungkin suatu peralatan mengubah panas melalui perpindahan energi yang setara sebagai kerja. Dengan kata lain suatu mesin kalor tidak dapat mempunyai efisiensi termal 100%. Hukum kedua Termodinamika ini menegaskan bahwa proses-proses terjadi dalam arah tertentu dan bahwa energi mempunyai kualitas dan juga kuantitas. Suatu proses tidak dapat berlangsung kecuali bila memenuhi hukum pertama dan kedua Termodinamika (Cengel *et al.* 2019).

Berdasarkan hukum kedua Termodinamika, maka hukum kedua ini memiliki banyak kegunaan penting sebagai berikut (Moran *et al.* 2018):

1. Melakukan perkiraan arah dari proses-proses.
2. Menentukan kondisi-kondisi keseimbangan.
3. Mengetahui unjuk kerja teoritis terbaik dari mesin atau suatu peralatan.
4. Melakukan evaluasi faktor-faktor yang menghalangi pencapaian unjuk kerja teoritis terbaik.
5. Mendefinisikan skala suhu independen sifat-sifat dari zat termometris.
6. Melakukan evaluasi sifat-sifat seperti energi dalam (u) dan entalpi (h) dalam hal karakteristik yang lebih mudah diperoleh secara eksperimental.

Sebagaimana massa dan energi diperhitungkan oleh keseimbangan massa dan energi, maka entropi juga diperhitungkan untuk keseimbangan entropi. Tapi tidak seperti massa dan energi yang bersifat lestari, entropi diproduksi (dibangkitkan) dalam sistem ketika terjadi ketidak-idealan (*irreversibilities*) seperti adanya gesekan. Jadi massa dan energi adalah kuantitas yang lestari tapi entropi tidak lestari. Hukum kedua tentang entropi menyatakan *adalah tidak mungkin bagi sistem apapun untuk beroperasi dalam suatu cara dimana entropi dimusnahkan*. Sehingga produksi entropi boleh jadi positif atau nol tapi tidak pernah negatif. Oleh karena itu produksi entropi merupakan indikator apakah suatu proses adalah mungkin atau tidak mungkin.

Salah satu penggunaan hukum kedua Termodinamika dalam keteknikan adalah untuk menentukan unjuk kerja terbaik dari sistem. Dengan membandingkan unjuk kerja aktual dengan unjuk kerja teoritis terbaik, maka suatu gambaran dapat diperoleh untuk potensi perbaikan. Unjuk kerja terbaik dievaluasi dan dicapai dalam hal proses-proses ideal dimana proses-proses ideal tersebut dibedakan dari proses-proses aktual yang selalu melibatkan ireversibilitas.

Suatu proses disebut tidak mampu balik jika sistem dan semua bagian dari lingkungannya tidak dapat secara tepat dipulihkan pada keadaan awal setelah proses terjadi. Suatu proses disebut mampu balik jika sistem dan sekelilingnya dapat

dikembalikan pada keadaan awalnya. Hukum Termodinamika kedua dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu proses adalah mampu balik atau tidak mampu balik.

Menurut Cengel *et al.* (2019) ketidakmampubalikan (*irreversibilities*) selalu membangkitkan entropi dan apa saja yang membangkitkan entropi selalu memusnahkan eksergi. Eksergi yang dimusnahkan ($X_{\text{destroyed}}$) adalah sebanding dengan entropi yang dibangkitkan (S_{gen}) dan dinyatakan dengan persamaan:

$$X_{\text{destroyed}} = T_0 S_{\text{gen}} \geq 0 \quad (2.4)$$

Beberapa ketentuan untuk eksergi yang dimusnahkan:

$$X_{\text{destroyed}} > 0 \text{ proses } irreversible$$

$$X_{\text{destroyed}} = 0 \text{ proses } reversible$$

$$X_{\text{destroyed}} < 0 \text{ proses yang tidak mungkin}$$

Laju keseimbangan eksergi pada volume atur

$$\Sigma \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - W + \Sigma_{\text{in}} m\psi - \Sigma_{\text{out}} m\psi - X_{\text{destroyed}} = 0 \quad (2.5)$$

Dimana:

T_0 = suhu pada keadaan *dead state* (keadaan keseimbangan termodinamika dengan lingkungannya, 25°C dan 1 atm)

T_k = suhu pada lokasi k

Q_k = laju perpindahan panas pada suhu T_k

W = kerja

m = laju alir massa

ψ = aliran eksergi

$X_{\text{destroyed}}$ = eksergi yang musnah

Perbandingan Energi dan Eksergi untuk Volume Atur pada keadaan Tunak

Meskipun energi dan eksergi memiliki satuan yang sama dimana perpindahan eksergi menyertai perpindahan energi, namun energi dan eksergi secara mendasar memiliki konsep yang berbeda. Eksergi memberikan gambaran yang lebih tajam mengenai unjuk kerja dibandingkan energi sebab selain eksergi menyatakan semua perpindahan energi secara umum tapi juga memperhitungkan secara jelas efek irreversibilitas melalui konsep pemusnahan eksergi (Moran *et al.* 2018).

Perbandingan antara energi dan eksergi dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Perbandingan antara energi dan eksergi (Dincer dan Rosen 2013)

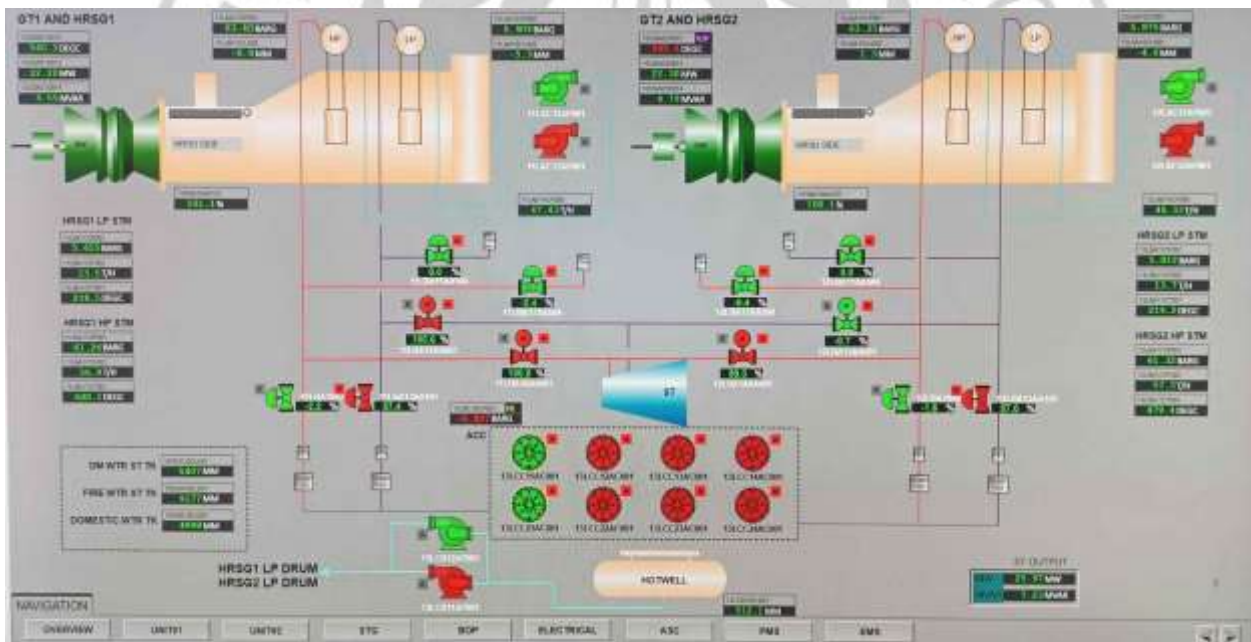
ENERGI	EKSERGI
Tergantung hanya pada sifat zat atau aliran energi, tidak bergantung pada sifat lingkungan	Tergantung pada sifat zat atau aliran energi dan lingkungan
Mempunyai nilai berbeda dari nol ketika berada dalam keseimbangan dengan lingkungan	Sama dengan nol ketika berada pada kondisi <i>dead state</i> berdasarkan keseimbangan dengan lingkungan
Lestari untuk semua proses, berdasarkan hukum pertama Termodinamika	Lestari untuk proses mampu balik (reversible) dan tidak Lestari untuk proses nyata (di mana sebagian atau seluruhnya musnah karena irreversibilitas), berdasarkan hukum kedua Termodinamika
Tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan	Tidak dapat dimusnahkan atau diproduksi dalam proses mampu balik, tetapi selalu musnah (dikonsumsi) dalam proses ireversibel
Muncul dalam berbagai bentuk (misalnya, energi kinetik, energi potensial, kerja, panas) dan diukur dalam bentuk tersebut	Muncul dalam berbagai bentuk (misalnya, eksergi kinetik, eksergi potensial, kerja, eksergi termal), dan diukur berdasarkan kerja atau kemampuan untuk menghasilkan kerja
Hanya mengukur kuantitas	Mengukur kuantitas dan kualitas

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU)

PLTGU adalah teknologi yang lebih disukai untuk pembangkit listrik karena mempunyai efisiensi yang tinggi dengan lebih sedikit emisi yang dikeluarkan. (Kaviri *et al.* 2012).

PLTGU dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu Turbin Gas sebagai bagian sistem yang utama dan HRSG beserta Turbin Uap adalah bagian keduanya, dimana HRSG berfungsi untuk memanfaatkan panas yang keluar dari Turbin Gas untuk menghasilkan uap yang digunakan pada Turbin Uap (Ghorbani 2020).

Proses pada PLTGU dapat dijelaskan melalui Gambar 2.1 di bawah ini:



Gambar 2.1 Overview Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap

PLTGU ini terdiri dari dua Turbin Gas *GE Frame 6B*, satu Turbin Uap *GE*, dua HRSG dengan masing-masing terdiri dari LP dan HP Drum, Kondensor dengan jenis pendinginan udara *Air Cooled Condenser (ACC)* yang terdiri dari 8 kipas udara, dua pompa Kondensat *Condensate Extraction Pump (CEP)*, dua pompa umpan boiler pada

masing-masing HRSG *Boiler Feed Pump* (BFP) dan juga terdapat katup *LP* dan *HP bypass* pada masing-masing HRSG.

Turbin Gas beroperasi dengan sistem siklus *Brayton*, dimana suhu keluar gas buang yang masih tinggi yaitu sekitar 500-600°C digunakan sebagai sumber panas untuk memanaskan air pada HRSG sehingga air akan berubah menjadi uap panas lanjut sebelum dimasukkan ke Turbin Uap. Sistem pada Turbin Uap ini merupakan proses Termodinamika yang berdasarkan pada siklus *Rankine*. Setelah uap berekspansi di Turbin Uap maka uap tersebut terkondensasi di Kondensor dimana uap akan mengembun menjadi air kondensat. Air kondensat akan dipompa untuk mengisi *Low Pressure Drum* (LP Drum) dan kemudian dari LP Drum air akan dipompa oleh *Boiler Feed Pump* (BFP) menuju *High Pressure Drum* (HP Drum). Pada HRSG air akan mengalami proses pemanasan menjadi keadaan campuran air dan uap di *Evaporator* hingga mengalami perubahan fase dari cair jenuh menjadi uap jenuh yang kemudian dipanaskan lagi hingga akhirnya menjadi uap panas lanjut di *Superheater* sebelum berekspansi di Turbin Uap, kemudian uap keluaran dari Turbin akan dibuang panasnya dan terjadi proses kondensasi sehingga akan membentuk siklus tertutup kembali. Masing-masing Turbin Gas dan Turbin uap akan terhubung dengan *Generator* yang melakukan kerja poros yang merupakan kerja berguna untuk menghasilkan energi listrik.

2.3 Konfigurasi Operasional

Kondisi operasi optimum diperoleh pada saat mengoperasikan semua pembangkit gas maupun uap yaitu dengan mode operasional 2-2-1 (dua Turbin Gas, dua HRSG dan satu Turbin Uap) dimana ini merupakan konfigurasi operasional terbaik. Tetapi tidak menutup kemungkinan bahwa salah satu pembangkit atau komponennya mengalami pemeliharaan atau kerusakan sehingga mode operasi juga akan berubah seperti berikut:

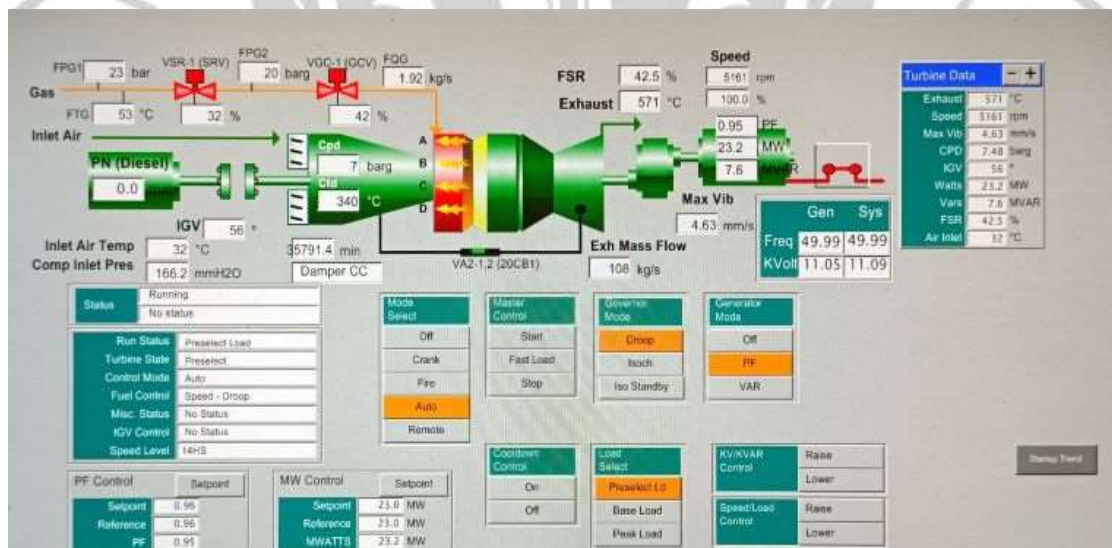
- 2-2-1: Semua *GT*, *HRSG*, *ST* beroperasi (*Combined Cycle Operation*)

- 2-1-1: Dua Turbin Gas, satu HRSG dan Turbin Uap yang beroperasi. Satu HRSG *shutdown*.
- 2-0-0: Hanya kedua pembangkit Turbin Gas yang beroperasi sedangkan sistem yang lainnya *shutdown*. Kondisi ini dikenal sebagai *Simple Cycle operation* atau operasi *Open Cycle Gas Turbine*.
- 1-1-1: Satu Turbin Gas, satu HRSG dan Turbin Uap beroperasi. Satu Turbin Gas dan satu HRSG *shutdown*.
- 1-0-0: Hanya satu Turbin Gas yang beroperasi
- 0-0-0: *Plant total shutdown*

2.4 Bagian-bagian dari PLTGU

Proses-proses pada bagian utama dari PLTGU terdiri dari:

- Turbin Gas dan Generator



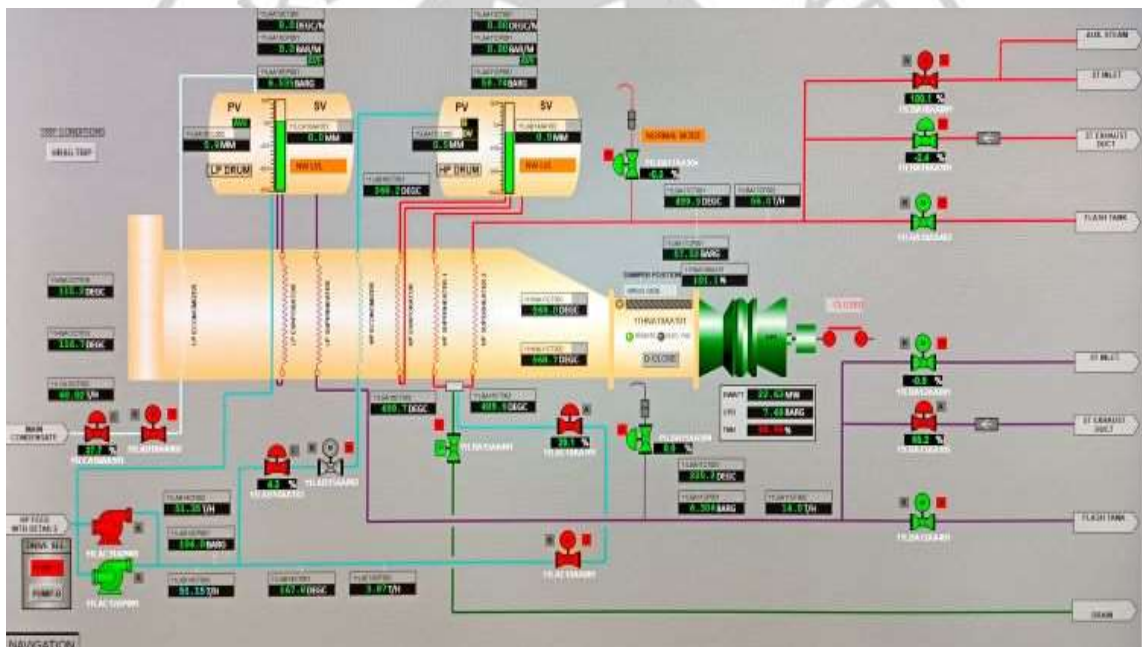
Gambar 2.2 Turbin Gas

Udara akan memasuki saluran udara masuk dan dikompresikan di Kompresor untuk kemudian memasuki ruang bakar. *Natural Gas* kemudian masuk ke ruang bakar yang dengan adanya pemantik (*ignitor*) sebagai pembakar awal maka campuran udara dan gas akan dibakar dan memasuki Turbin Gas untuk kemudian berekspansi,

menghasilkan kerja dengan memutar poros Turbin yang dihubungkan dengan *Generator* untuk menghasilkan daya listrik.

- *Heat Recovery Steam Generator*

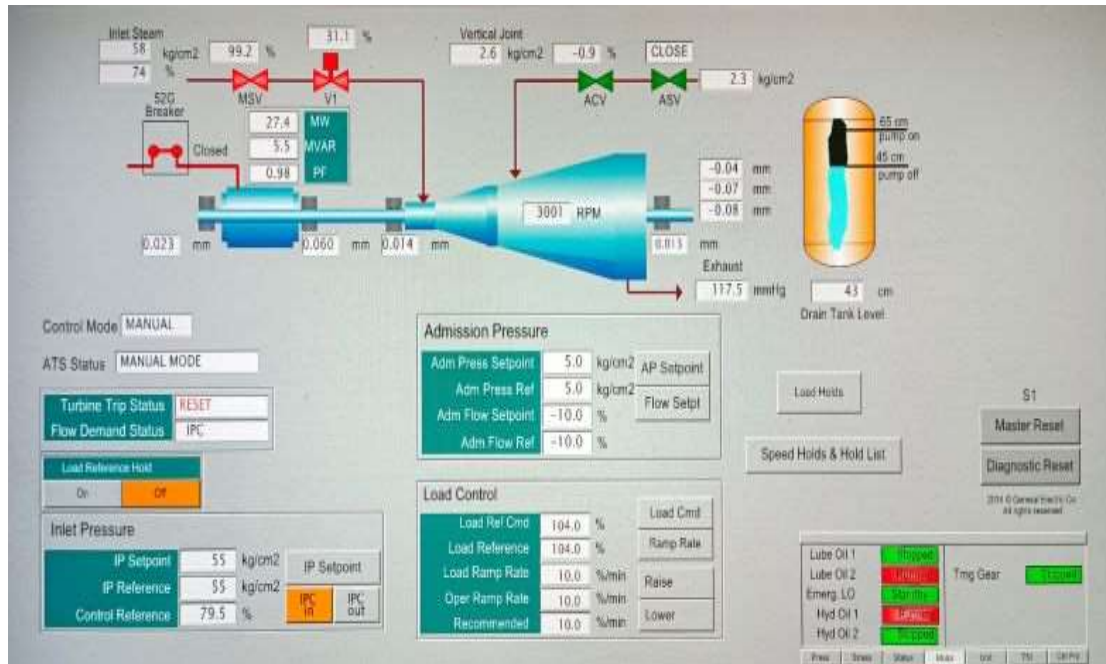
Exhaust gas yang keluar dari Turbin Gas akan memasuki HRSG (Gambar 2.3) dan diserap panasnya untuk memanaskan air, dengan jalur pemanasan: HP *Superheater* 1 dan 2, HP *Evaporator*, HP *Economizer*, LP *Superheater*, LP *Evaporator*, dan LP *Economizer* untuk kemudian *flue gas* akan dibuang melalui cerobong (*stack*) ke udara sekelilingnya.



Gambar 2.3 *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*

- Turbin Uap dan Generator

Uap panas lanjut dari HRSG akan memasuki Turbin Uap untuk kemudian berekspansi menghasilkan kerja memutar poros Turbin Uap yang dihubungkan dengan *Generator* untuk menghasilkan daya listrik.



Gambar 2.4 Turbin Uap

- *Air Cooled Condenser (ACC)*

Setelah berekspansi di Turbin Uap, maka uap akan didinginkan oleh 8 kipas pendingin udara untuk mengalami proses kondensasi sehingga uap akan berubah fase menjadi air kondensat.

- *Condensate Extraction Pump (CEP)*

Dua pompa kondensat dengan kapasitas 2 x 100% digunakan untuk memompa air dari tangki kondensat ke *LP Drum* di HRSG.

- *Boiler Feed Pump (BFP)*

Dua pompa umpan boiler (BFP) dengan kapasitas 2 x 100% digunakan untuk memompa air boiler dari *LP Drum* ke *HP drum* di HRSG.

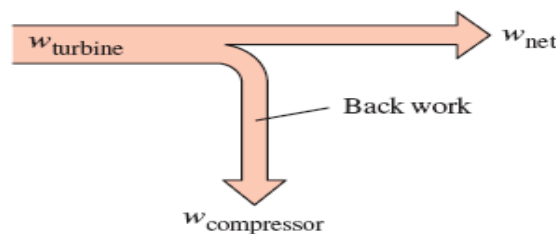
- *High Pressure dan Low Pressure bypass (HP dan LP bypass)*

Masing-masing HRSG juga dilengkapi dengan *HP/LP bypass* yang berfungsi sebagai jalur uap sementara pada saat *start up*, *shutdown*, atau *trip* dimana uap dari *HP* dan *LP header* tidak akan melalui Turbin Uap tapi langsung menuju Kondensor.

2.5 Siklus-siklus pada PLTGU

2.5.1 Siklus pada Turbin Gas

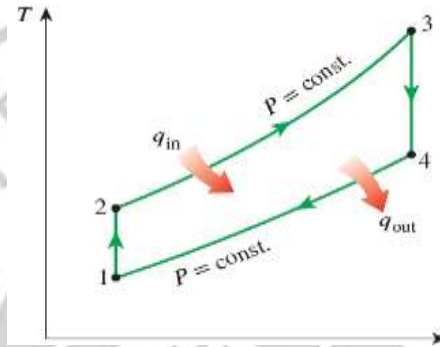
Siklus yang terjadi pada Turbin Gas merupakan siklus *Brayton* dimana gas akan mengalami proses ekspansi di Turbin Gas untuk menghasilkan kerja berguna (W_T). Kerja berguna yang dihasilkan tersebut dikurangi dengan kerja yang dibutuhkan untuk memutar Kompresor (W_C) sehingga kerja bersihnya: $W_{net} = W_T - W_C$



Gambar 2.5 Back Work Ratio (Cengel et al. 2019)

Pada Turbin Gas, rasio dari kerja kompresor terhadap kerja turbin yang disebut sebagai *Back Work Ratio* (BWR) adalah sangat tinggi (Gambar 2.5). Biasanya lebih dari setengah *output* kerja turbin digunakan untuk menggerakkan kompresor. Ini sangat berbeda dengan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), di mana *BWR* hanya beberapa persen saja. Hal ini karena pada PLTU yang dikompresi adalah cairan (pada proses pemompaan) dan bukannya gas, sehingga kerja aliran tunak sebanding dengan volume spesifik dari fluida kerja. Pembangkit listrik dengan *BWR* yang tinggi membutuhkan turbin yang lebih besar untuk menyediakan daya tambahan yang diperlukan pada kompresor. Karena itu, turbin yang digunakan pada pembangkit listrik turbin gas lebih besar daripada yang digunakan pada PLTU dengan daya *output* bersih yang sama (Cengel et al. 2019).

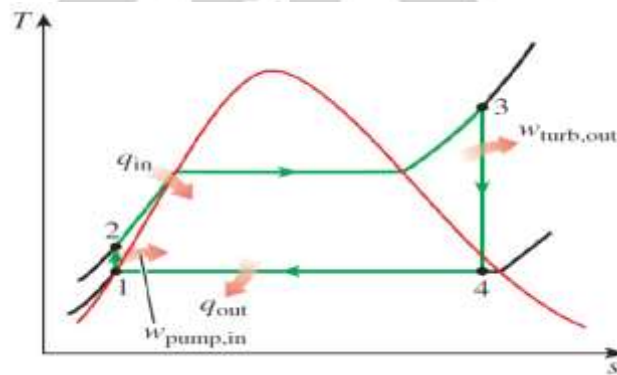
Menurut Zare dan Hasanzadeh (2016), dalam siklus *Brayton* efisiensi Turbin dan Kompresor adalah faktor-faktor penting yang mempengaruhi unjuk kerja sistem secara menyeluruh. Siklus *Brayton* ideal dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Siklus *Brayton* ideal (Cengel *et al.* 2019)

2.5.2 Siklus pada Turbin Uap

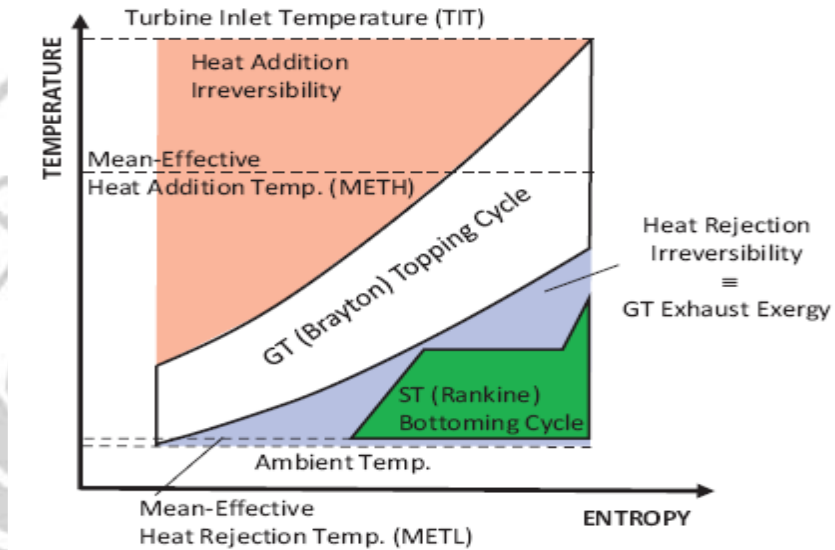
Siklus pada Turbin Uap merupakan siklus *Rankine* dimana uap akan berekspansi di Turbin untuk menghasilkan kerja berguna, setelah itu uap akan dikondensasikan untuk kemudian bersirkulasi membentuk siklus air-uap (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Siklus *Rankine* ideal (Cengel *et al.* 2019)

2.5.3 Siklus gabungan pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU)

Pada PLTGU terjadi kombinasi antara siklus *Brayton* dengan siklus *Rankine* seperti yang dapat dilihat pada diagram T-S (Gambar 2.8) berikut ini:



Gambar 2.8 Diagram T-S dari siklus PLTGU (Gulen 2020)

2.6 Analisis Energi dan Eksergi

2.6.1 Analisis Energi

Hukum pertama Termodinamika mendefinisikan tentang konservasi energi. Berdasarkan konsep inilah maka efisiensi dari sistem dinyatakan, dimana efisiensi (η) adalah kerja *output* yang dihasilkan dibandingkan dengan energi input yang diberikan.

$$\eta = \frac{\text{Output berguna dari suatu proses}}{\text{Input energi ke dalam suatu proses}}$$

Bagaimanapun, hukum pertama Termodinamika tidak menyediakan informasi tentang arah dimana proses akan terjadi secara spontan, yaitu aspek reversibilitas dari proses Termodinamika. Hukum pertama Termodinamika tidak memberikan informasi

tentang ketidakmampuan dari setiap proses Termodinamika untuk merubah panas sepenuhnya menjadi kerja mekanis. Prinsip untuk menerangkan gejala-gejala ini dan untuk menyifatkan ketersediaan dari energi diperlukan dalam hal ini. Prinsip-prinsip ini terdapat pada hukum kedua dari Termodinamika (Dincer dan Rosen 2013).

Telah diamati bahwa energi dapat mengalir dari sistem dalam bentuk panas atau kerja. Hukum pertama Termodinamika tidak menetapkan jumlah energi total dari sistem yang dapat menyebabkannya mengalir keluar sebagai kerja. Suatu batasan telah ditentukan, bagaimanapun sebagai akibat dari prinsip hukum kedua Termodinamika yang menyatakan bahwa panas akan mengalir secara alamiah dari satu *reservoir* energi ke *reservoir* lain yang bersuhu yang lebih rendah, tetapi tidak pada arah yang berlawanan tanpa adanya bantuan.

Lebih jauh lagi hukum pertama Termodinamika menetapkan kesetaraan antara kuantitas panas yang digunakan dan kerja mekanis tapi tidak menjelaskan kondisi-kondisi dimana konversi dari panas menjadi kerja dimungkinkan, juga tidak dalam arah dimana perpindahan panas dapat terjadi. Celah ini dijabatani oleh hukum kedua Termodinamika (Rajput 2007).

2.6.2. Analisis Eksergi

Eksergi adalah kuantitas berguna dalam menganalisa energi dan sistem serta proses-proses yang lain. Eksergi atau disebut juga ketersediaan adalah kerja teoritis maksimum yang dapat diperoleh dari sistem ketika sistem berpindah menuju keseimbangan dengan lingkungan melalui kondisi *dead state* (Moran *et al.* 2018).

Eksergi dianggap sebagai indikator dari kerja maksimum yang mungkin dilakukan oleh sistem ketika sistem secara mampu balik berpindah ke titik standarnya. Peralatan dengan laju pemusnahan eksergi yang tinggi mempunyai efisiensi eksergi yang lebih tinggi. Peralatan seperti Turbin, Kompresor, dan Pompa yang secara langsung dikaitkan dengan pembangkitan listrik atau konsumsi, mempunyai pemusnahan eksergi yang rendah. (Saharkhiz *et al.* 2021).

Eksergi seperti juga energi dapat berpindah menuju atau dari suatu sistem dalam bentuk: panas (Q) atau kerja (W). Perpindahan eksergi dikenali pada batas sistem

ketika eksergi melintasinya dan dinyatakan oleh eksergi yang diperoleh atau hilang oleh sistem dalam suatu proses. Untuk setiap jenis perpindahan energi terdapat perpindahan eksergi yang saling berkaitan juga.

Analisis eksergi secara khusus sangat sesuai untuk melanjutkan tujuan lebih jauh daripada hanya menganalisa penggunaan sumber daya yang efisien, karena memungkinkan lokasi, tipe dan besarnya limbah dan rugi-rugi dapat ditentukan. Informasi ini dapat digunakan untuk merancang sistem termal, memandu upaya untuk mengurangi sumber inefisiensi dalam sistem yang ada dan mengevaluasi sistem ekonomi.

2.6.3 Unjuk Kerja Pada Siklus *Brayton*

Efisiensi Termal:

$$\eta = \frac{W_t - W_c}{Q_{in}} \quad (2.6)$$

bwr (*back work ratio*):

$$bwr = \frac{W_c}{W_t} \quad (2.7)$$

2.6.4 Unjuk Kerja Pada Siklus Tenaga (*Rankine*)

Efisiensi Termal:

Efisiensi termal mengukur sejauh mana *input* energi (Q_{in}) pada fluida kerja yang melewati Boiler/HRSG diubah menjadi *output* kerja bersih. Efisiensi termal dari siklus tenaga dapat dihitung dari persamaan (Moran *et al.* 2018):

$$\eta = \frac{W_t - W_p}{Q_{in}} \quad (2.8)$$

Heat Rate

Heat rate adalah jumlah energi yang ditambahkan oleh perpindahan panas ke siklus, untuk menghasilkan satuan *output* kerja bersih, dengan demikian *heat rate* berbanding terbalik dengan efisiensi termal.

Back Work Ratio (BWR)

Merupakan rasio antara *input* kerja pompa (W_p) terhadap kerja yang dihasilkan oleh turbin (W_t). BWR dapat dihitung dengan persamaan:

$$bwr = \frac{W_p}{W_t} \quad (2.9)$$

2.6.5 Unjuk Kerja Pada Siklus PLTGU

Efisiensi termal dari siklus gabungan adalah:

$$\eta = \frac{W_{gas} + W_{vap}}{Q_{in}} \quad (2.10)$$

Dimana W_{gas} adalah kerja bersih yang dihasilkan Turbin Gas dan W_{vap} adalah kerja bersih yang dihasilkan Turbin Uap. Q_{in} merupakan laju total perpindahan panas pada siklus gabungan yang meliputi penambahan perpindahan panas.

2.6.6 Efisiensi Eksergi

Efisiensi eksergi untuk peralatan yang menghasilkan kerja dapat dinyatakan sebagai rasio antara kerja *output* berguna (W_u) terhadap kerja *output* maksimum (W_{rev}) yang mungkin dihasilkan (*reversible*):

$$\eta_{II} = \frac{W_u}{W_{rev}} \quad (2.11)$$

Untuk peralatan *non* siklus yang mengkonsumsi kerja (contohnya kompresor) maka efisiensi eksergi dinyatakan sebagai rasio antara kerja *input minimum* (W_{rev}) reversibel terhadap kerja *input* yang berguna (W_u):

$$\eta_{II} = \frac{W_{rev}}{W_u} \quad (2.11)$$

2.6.7 Analisis rugi-rugi Eksergi

Eksergi mempunyai karakteristik yang dilestarikan hanya ketika semua proses-proses yang terjadi dalam sistem dan lingkungan adalah mampu balik. Eksergi dimusnahkan (dikonsumsi) ketika proses tak mampu balik terjadi. Ketika analisis eksergi dilakukan pada pembangkit listrik, kilang petrokimia, atau refrigerasi maka ketidaksempurnaan Termodinamika dapat dikuantifikasikan sebagai pemusnahan eksergi, yang mewakili rugi-rugi dalam kualitas energi atau kebergunaan (contoh: kerja poros yang terbuang atau potensi terbuang untuk produksi kerja poros).

Menurut Maruf *et al.* (2021), rugi-rugi adalah berkaitan dengan perbedaan antara *input* dan *output* dari suatu sistem. Analisis rugi-rugi sistem pembangkit listrik dapat dikaji dari analisis eksergi. Pembangkit listrik yang tidak mampu balik akan mengurangi eksergi, sehingga mengakibatkan perbedaan yang besar antara eksergi *input* dan eksergi *output*. Karena pembangkit termal cenderung memiliki ireversibilitas yang tinggi, maka kerugian eksergi juga cukup tinggi. Kehilangan eksergi yang tinggi menunjukkan meningkatnya pembentukan entropi selama proses pembangkitan listrik sehingga juga meningkatkan panas bersih dari proses tersebut. Meningkatnya rugi-rugi eksergi juga mengacu pada defisiensi termodinamika dari proses pembangkitan listrik.

2.7 Studi Pustaka

Beberapa penelitian terdahulu tentang analisis energi dan eksergi pada PLTGU dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Ringkasan penelitian analisis energi dan eksergi yang terdahulu

NO	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analysis
1	Aliyu <i>et al.</i> (2020)	Energy, exergy and parametric analysis of a combined cycle power plant	Analisa termodinamika (energi dan eksergi) dari pembangkit listrik dengan menggunakan data desain Combined Cycle Power Plant (PLTGU) tekanan triple dengan reheater. Analisa eksergi menunjukkan sumber utama irreversibilitas pada siklus turbin uap dari CCPP terdapat di stack diikuti oleh HRSG, turbin, dan kondensor	Penelitian Aliyu dkk dilakukan pada sistem PLTGU yang berbeda yaitu 5 unit yang terdiri dari 3 GTG, 3 HRSG dengan 1 STG, <i>triple pressure</i> dengan <i>reheater</i> dan sebagian uap disuplai untuk produksi air (<i>MSF plant</i>). Pada penelitian ini PLTGU hanya menghasilkan listrik dengan analisa energi dan eksergi menggunakan <i>software Cycle Tempo</i> dengan empat skenario berbeda.
2	Sanjay & Prasad (2013)	Energy and exergy analysis of intercooled combustion based combined cycle power plant	Inter-cooled combustion based combined cycle menunjukkan unjuk kerja yang meningkat dibandingkan dengan siklus sederhana combustion-turbine berbasis siklus kombinasi. Terjadi peningkatan 20% kerja output dari plant dalam kasus ICCT-CC dibandingkan dengan CCPP dasar, sementara efisiensi plant sedikit meningkat. Analisa eksergi menunjukkan bahwa efisiensi rasional dari pembakaran-turbin lebih tinggi sekitar 3,13% dibandingkan siklus pembakaran-turbin dasar.	Penelitian Sanjay dan Prasad dilakukan pada PLTGU dengan <i>inter cooled combustion</i> (ICCT) yang dibandingkan dengan siklus sederhana PLTGU dan menunjukkan bagaimana penggunaan ICCT dapat meningkatkan unjuk kerja CCPP. Pada penelitian ini PLTGU tidak menggunakan intercooling dan analisa energi dan eksergi dilakukan dengan empat skenario berbeda
3	Kaviri <i>et al.</i> (2013)	Exergoenvironmental optimization of Heat Recovery Steam Generators in combined cycle power plant through energy and exergy analysis	Combined cycle power plant (CCPP) adalah teknologi yang lebih disukai untuk pembangkitan listrik karena emisi yang rendah dan efisiensi yang tinggi. Pengaruh suhu gas masuk ke HRSG dibahas dan hasilnya menunjukkan bahwa kenaikan suhu gas masuk HRSG sampai 650°C akan meningkatkan efisiensi termal dan efisiensi eksergi dari siklus dan setelah itu sedikit peningkatan dan mulai menurun.	Penelitian Kaviri dkk yaitu melakukan optimisasi <i>exergoenvironmental</i> dari <i>dual</i> HRSG dengan <i>supplementary firing</i> pada PLTGU melalui analisa energi dan eksergi. Penelitian ini tidak melakukan optimisasi dan melakukan analisa energi dan eksergi pada PLTGU saja.
4	Ghorbani <i>et al.</i> (2020)	Pinch and exergy evaluation of Kalina/Rankine/gas/steam combined cycles for tri-generation of power, cooling and hot water using liquefied natural gas regasification	Melakukan analisa energi dan eksergi serta evaluasi <i>pinch</i> pada sistem pembangkitan listrik terintegrasi yang terdiri dari siklus Rankine organik suhu rendah, pembangkit listrik tenaga gas uap dan pembangkit listrik Kalina. Sistem terintegrasi ini menghasilkan 158,5 MW listrik, 9,498 MW pendinginan dan 46,02 kg/s air panas. Total efisiensi listrik, termal, dan eksergi dari sistem terintegrasi adalah 48,62%, 55,18% dan 67,74%.	Penelitian Ghorbani dkk yaitu melakukan evaluasi pinch, analisa energi dan eksergi pada Kalina/Rankine/PLTGU untuk <i>tri-generation</i> : tenaga listrik, pendingin dan air panas menggunakan LNG. Pada penelitian ini hanya melakukan analisa energi dan eksergi pada PLTGU saja.

5	Zare & Hasanzadeh (2016)	Energy and exergy analysis of a closed Brayton cycle-based combine cycle for solar power tower plants	Paper ini menyajikan siklus gabungan untuk pembangkitan listrik dari tower tenaga surya. Sistem yang diusulkan terdiri dari siklus Brayton tertutup yang menggunakan helium sebagai fluida kerja dan dua siklus organik Rankine yang digunakan untuk memanfaatkan panas dari siklus Brayton. Sistem dianalisa secara termodinamika dari sisi hukum pertama dan kedua.	Penelitian Zare & Hasanzadeh yaitu melakukan analisa energi dan eksergi pada siklus Brayton tertutup kombinasi dengan pembangkit tenaga surya. Pada penelitian ini analisa energi dan eksergi dilakukan pada sistem PLTGU saja.
6	Maruf et al. (2021)	Exergy based evaluation of power plants for sustainability and economic performance identification	Investigasi data pembangkit listrik untuk negara Bangladesh sejak tahun 2009 sampai 2019 untuk mempelajari rugi-rugi energi dalam dari gas alam, minyak, HSD, batubara dan pembangkit listrik hidro dan menyediakan acuan dasar bagi formulasi kebijakan investasi	Penelitian Maruf dkk melakukan evaluasi eksergi terhadap berbagai pembangkit listrik di Bangladesh ditinjau dari keberlanjutan dan identifikasi unjuk kerjanya. Pada penelitian ini secara khusus melakukan analisa energi dan eksergi dengan menggunakan <i>Cycle Tempo</i> pada PLTGU.
7	Adnan et al. (2021)	Energy, Exergy, Exergoeconomic, and environment (4E) analysis of thermal power plants for municipal solid waste to energy application in Bangladesh	Mengusulkan penggunaan pembakaran (incinerator) untuk memanfaatkan energi dari limbah padat kota untuk menghasilkan listrik di daerah perkotaan Dhaka dan Chattogram. Disajikan juga analisis teknis terperinci yang melibatkan energi, eksergi, eksergoekonomis, dan emisi. Pembangkit listrik di kedua kota ini menunjukkan kapasitas potensial masing-masing 169 MW dan 83 MW, dengan faktor eksergoekonomi sebesar 61%.	Penelitian Adnan dkk melakukan analisa 4E terhadap pembangkit listrik termal yang memanfaatkan limbah padat perkotaan di Bangladesh. Pada penelitian ini melakukan analisa energi dan eksergi pada PLTGU berbahan bakar gas alam dengan menggunakan <i>software cycle Tempo</i> .
8	Adibhatla & Kaushik (2017)	Energy, exergy and economic (3E) analysis of integrated solar direct steam generation combined cycle power plant	Analisis energi, eksergi dan ekonomis (3E) dilakukan pada konseptual siklus pembangkit listrik yang dibentuk dengan mengintegrasikan energi surya dalam siklus uap dari gas alam PLTGU.	Penelitian Adibhatla & Kaushik melakukan analisa 3E pada PLTGU yang diintegrasikan juga dengan tenaga surya. Pada penelitian ini hanya melakukan analisa energi dan eksergi pada PLTGU klasik.
9	Jahangiri, Yahyaabadi & Sharif (2019)	Exergy and economic analysis of using the flue gas injection system of a combined cycle power plant into the Heller Tower to improve the power plant performance	Sistem Natural Draft Dry Cooling (Heller Tower) dianggap sebagai salah satu dari sistem pendinginan yang sering digunakan di pembangkit listrik tenaga uap. Studi yang dilakukan bertujuan untuk menguji berbagai dimensi efek dari injeksi flue gas pada menara pendinginan dari PLTGU dan juga efisiensinya dalam bentuk analisis eksergi dan ekonomis.	Penelitian Jahangiri dkk melakukan analisa eksergi dan ekonomi dengan penggunaan injeksi flue gas pada pendingin <i>Heller Tower</i> dari PLTGU yang bertujuan meningkatkan unjuk kerja pembangkit. Pada penelitian ini pendinginan menggunakan <i>Air Cooled Condenser</i> dan dilakukan analisa energi dan eksergi pada PLTGU.
10	Javadi et al. (2019)	Optimization and analysis of exergy, economic, and environmental of a combined cycle power plant	Studi ini dilakukan untuk melakukan optimisasi tiga fungsi dari efisiensi eksergi, emisi CO ₂ , dan biaya-biaya tenaga listrik yang dihasilkan. Optimisasi multi obyek ini dilakukan dengan menggunakan "Non-Dominated Sorting Algorithm (NSGA-II).	Penelitian Javadi dkk melakukan analisa eksergi, ekonomi dan lingkungan dari PLTGU berkapasitas 500 MW serta optimisasi dari efisiensi eksergi, emisi CO ₂ serta biaya listrik yang dihasilkan dengan menggunakan model matematika. Pada penelitian ini analisa energi dan eksergi dilakukan dengan menggunakan <i>software Cycle Tempo</i> pada PLTGU berkapasitas 110 MW.