

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Penelitian mengenai peningkatan efisiensi turbin gas pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) telah banyak dilakukan, baik melalui pendekatan termodinamika siklus Brayton maupun melalui rekayasa kondisi operasi seperti pendinginan udara masuk (*inlet air cooling system*). Namun, sebagian besar studi terdahulu masih berfokus pada pengaruh temperatur udara masuk terhadap efisiensi, sementara kajian yang secara spesifik menganalisis pengaruh variasi beban operasi dengan mempertimbangkan kondisi *Evaporative Cooler* diperasikan dan tidak dioperasikan masih relatif terbatas, terutama untuk konteks sistem *single shaft* di wilayah tropis.

Penelitian Hizbullah et al. (2014) pada PLTG Gilimanuk menunjukkan bahwa temperatur udara lingkungan yang tinggi (31-33°C) menyebabkan penurunan daya output turbin gas hingga 17,86% dibandingkan kondisi ISO (15°C). Penerapan sistem pendingin udara masuk mampu menurunkan temperatur inlet dari 31,4°C menjadi 22°C dan meningkatkan daya keluaran sebesar 13,18 MW ($\approx 2\text{-}3\%$ efisiensi tambahan). Studi ini menegaskan bahwa pendinginan udara masuk secara signifikan memengaruhi kinerja kompresor, terutama saat unit beroperasi pada beban puncak. Walaupun penelitian ini berfokus pada efek temperatur, implikasinya jelas bahwa peningkatan beban operasi akan memperbesar kebutuhan udara pendingin agar efisiensi tetap optimal.

Penelitian oleh Syammary et al. (2020), di PLTGU Muara Tawar meninjau perubahan efisiensi turbin gas tipe Siemens V94.2 sebelum dan *sesudah Minor Inspection*. Hasilnya menunjukkan peningkatan efisiensi termal sebesar 0,70 %, efisiensi turbin naik 1,35 %, serta penurunan *heat rate* sebesar 216,61 kJ/kWh. Peningkatan ini sebagian besar disebabkan oleh pengembalian performa pada beban operasi tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan beban operasi memiliki pengaruh langsung terhadap efisiensi termal, di mana pada beban menengah hingga tinggi, efisiensi meningkat hingga titik optimum.

Penelitian oleh Ridwan & Wibisono (2024) berjudul “*Analysis of Brayton Cycle Efficiency at 100 MW Load Before and After Overhaul of Unit 1 Block 1 at PLTGU Gresik*” menunjukkan peningkatan efisiensi siklus Brayton dari 41% menjadi 42% setelah *overhaul* unit turbin gas. Perubahan ini dikaitkan dengan perbaikan kompresor dan penurunan temperatur udara masuk sebesar ± 2 K. Hasil tersebut memperlihatkan korelasi kuat antara rasio tekanan, densitas udara masuk, dan efisiensi total siklus Brayton, terutama pada variasi beban operasi di atas 650 MW.

Penelitian oleh Putra & Pariaman (2020) yang berjudul “*Analisis Energi dan Eksergi Pembangkit Listrik Tenaga Gas-Uap Blok 1 Unit Pembangkitan Gresik*” menunjukkan bahwa efisiensi energi sistem PLTGU mencapai 59,37% dan efisiensi eksergi 52,82%. Penurunan efisiensi pada beban rendah disebabkan oleh kehilangan energi pada ruang bakar dan HRSG, sedangkan pada beban tinggi efisiensi meningkat akibat rasio bahan bakar terhadap kerja turbin yang lebih proporsional. Temuan ini memperkuat dasar analitis bahwa variabel beban dapat digunakan sebagai parameter utama dalam menganalisis performa turbin gas pada kondisi *Evaporative Cooler* dioperasikan atau tidak dioperasikan.

Dalam tinjauan global, Odila et al. (2023) dalam artikelnya *A Review of Gas Turbine Inlet Cooling Technologies* menguraikan bahwa kinerja turbin gas bergantung terutama pada temperatur udara masuk kompresor dan massa alir udara. Pada kondisi udara panas dengan densitas rendah, daya keluaran turun hingga 20-25%, sementara penerapan *Inlet Air Cooling* (IAC) mampu meningkatkan daya hingga 27% tergantung kondisi iklim. Penelitian tersebut juga menyoroti bahwa efisiensi *evaporative cooler* sangat bergantung pada kelembapan udara sekitar. Pada iklim panas-lembap seperti Indonesia, efisiensi sistem evaporatif dapat mencapai peningkatan daya 5-7% dan efisiensi hingga 2%, dengan biaya operasional yang relatif rendah dibanding sistem refrigeratif.

Dalam penelitian tersebut juga menegaskan bahwa sistem pendinginan evaporatif memiliki efek optimal saat dioperasikan pada beban menengah-tinggi, karena aliran massa udara yang besar meningkatkan transfer panas adiabatik. Hal ini relevan dengan penelitian saat ini yang memfokuskan analisis pada variasi beban 670

MW, 700 MW, dan 730 MW untuk mengevaluasi hubungan antara *Evaporative Cooler* diperasikan atau tidak dioperasikan dengan efisiensi siklus.

Di sisi lain, Pangestu (2021) dalam Analisis Sistem Pendinginan Absorpsi pada PLTGU Grati mengembangkan konsep *absorption chiller inlet cooling* berbasis air/lithium bromide untuk memanfaatkan panas buang turbin gas. Hasil penelitiannya menunjukkan peningkatan daya turbin sebesar 8,07% dan efisiensi sistem sebesar 1,43% dengan konsumsi energi tambahan kurang dari 1% total daya sistem. Studi ini memberikan dasar pembandingan bahwa setiap metode pendinginan udara masuk memiliki keunggulan spesifik terhadap kondisi beban operasi, dimana sistem absorpsi lebih efisien untuk beban tinggi dan kontinu, sedangkan sistem evaporatif unggul dalam fleksibilitas beban dan biaya operasi.

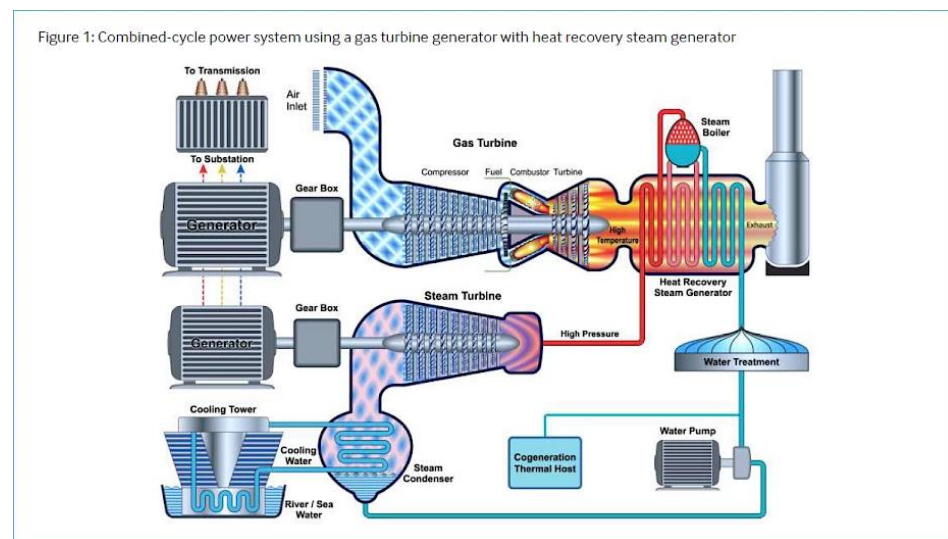
2.2 Dasar Teori

2.2.1 Prinsip dasar pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) atau *Combined Cycle Power Plant (CCPP)* merupakan sistem pembangkitan listrik yang menggabungkan dua siklus termodinamika utama, yaitu siklus Brayton (pada turbin gas) dan siklus Rankine (pada turbin uap). Tujuan utama integrasi kedua siklus ini adalah untuk memaksimalkan pemanfaatan energi dari bahan bakar gas dengan cara memanfaatkan panas sisa gas buang turbin gas untuk menghasilkan uap yang kemudian digunakan pada turbin uap (Edris, 2010)

Secara umum, proses kerja PLTGU dimulai dengan udara dari lingkungan yang dikompresi oleh kompresor hingga mencapai tekanan tinggi. Udara bertekanan kemudian dicampurkan dengan bahan bakar gas alam dan dibakar di ruang bakar (*combustion chamber*) pada tekanan konstan. Hasil pembakaran berupa gas panas bertekanan tinggi diarahkan ke turbin gas (*Gas Turbine*) untuk menghasilkan energi mekanik rotasi. Energi mekanik tersebut diteruskan ke generator sinkron (*Gas Turbine Generator/GTG*) untuk menghasilkan listrik (Çengel & Boles, 2015)

Gas buang dari turbin gas masih memiliki temperatur tinggi, umumnya sekitar 500-600°C, sehingga masih mengandung energi panas yang signifikan. Energi panas sisa ini dimanfaatkan oleh *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) untuk memanaskan air menjadi uap bertekanan tinggi. Uap tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin uap (*Steam Turbine*) yang juga terhubung ke generator tambahan. Hasilnya, sistem PLTGU mampu meningkatkan efisiensi termal secara signifikan dibandingkan sistem tunggal (*simple cycle gas turbine*).



Gambar 2.1 Skema Kerja PLTGU

<https://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-compendium/combined-cycle-gas-turbines-2022>

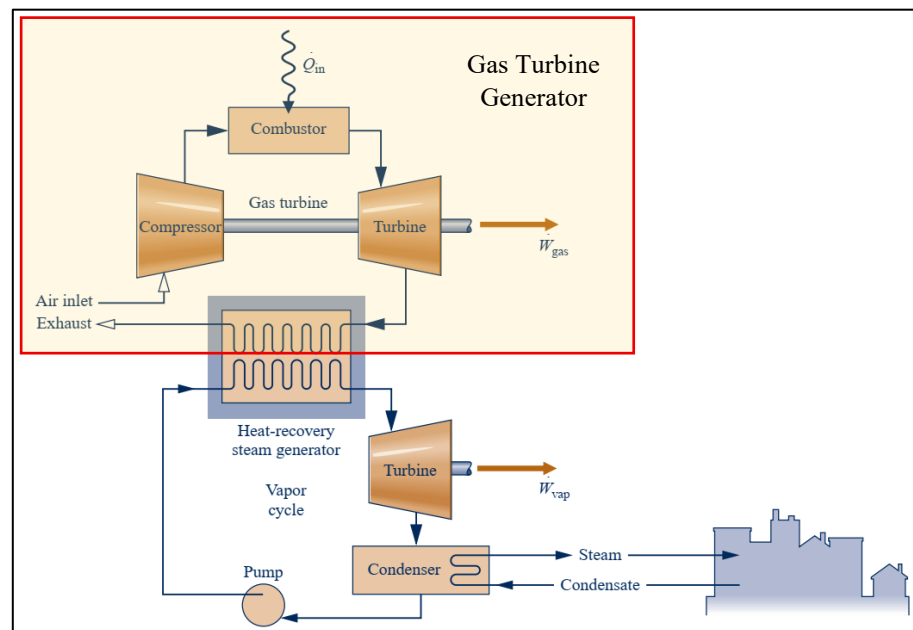
Menurut Moran & Shapiro (2010) efisiensi termal PLTG konvensional umumnya berkisar 35-40%, sedangkan PLTGU modern dengan integrasi HRSG mampu mencapai efisiensi hingga 60-62%. Meskipun sistem ini melibatkan dua siklus termodinamika, komponen turbin gas dan kondisi udara masuk tetap menjadi penentu utama performa keseluruhan PLTGU, karena daya listrik yang dihasilkan dari turbin gas dapat mencapai 65% total output sistem *combined cycle* (Kwon et al., 2019).

Dengan demikian, kinerja turbin gas khususnya pada bagian kompresor dan sistem udara masuk memiliki pengaruh langsung terhadap efisiensi

keseluruhan PLTGU. Perubahan temperatur udara lingkungan dapat menyebabkan fluktuasi daya dan efisiensi sistem. Untuk mengatasi pengaruh ini, diterapkan sistem pendinginan udara masuk (*Inlet Air Cooling*) seperti *Evaporative Cooler*, yang berfungsi menurunkan temperatur udara sebelum masuk ke kompresor, sehingga meningkatkan densitas udara dan daya keluaran turbin gas.

2.2.2 Gas turbine generator (GTG) dan karakteristik pada sistem *single shaft*

Gas Turbine Generator (GTG) merupakan komponen utama yang berfungsi mengubah energi panas hasil pembakaran menjadi energi listrik. Unit GTG terdiri dari tiga elemen utama: kompresor, ruang bakar, dan turbin gas yang dihubungkan pada satu poros dengan generator sinkron. Energi kinetik dari gas panas hasil pembakaran memutar poros turbin, yang kemudian menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik.



Gambar 2.2 Diagram alur energi pada PLTGU

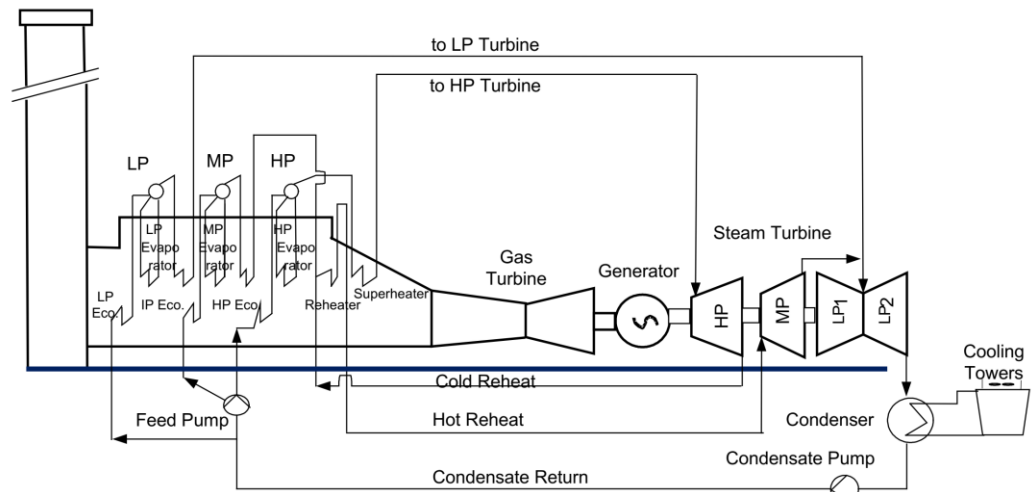
Sumber : Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2010). Fundamentals of Engineering Thermodynamics (7th ed.). John Wiley & Sons.

Menurut Moran & Shapiro (2010), siklus kerja turbin gas mengikuti prinsip siklus Brayton, di mana efisiensi termodinamika bergantung pada rasio tekanan, temperatur udara masuk, dan kondisi beban operasi. Secara umum, kerja bersih turbin gas (W_{net}) diperoleh dari selisih antara kerja turbin (W_T) dan kerja kompresor (W_C).

Perubahan beban operasi akan memengaruhi keempat titik keadaan (1-4), yang pada akhirnya mengubah efisiensi siklus Brayton. Pada beban menengah hingga tinggi, laju aliran massa bahan bakar meningkat seiring peningkatan tekanan dan temperatur gas buang, menyebabkan efisiensi naik hingga mencapai titik optimum sebelum menurun kembali akibat kehilangan panas dan peningkatan kerja kompresor.

Pada sistem PLTGU dengan konfigurasi *single shaft*, turbin gas (GT), turbin uap (ST), dan generator dihubungkan dalam satu poros mekanis yang sama. Konfigurasi ini berbeda dengan sistem *multi shaft* yang memisahkan poros GT dan ST ke generator masing-masing. Hubungan mekanis langsung pada sistem *single shaft* menyebabkan setiap perubahan kinerja turbin gas secara langsung memengaruhi torsi poros dan daya total blok. Hal ini menjadikan GT sebagai komponen penentu utama efisiensi blok pembangkit, karena peningkatan atau penurunan efisiensi turbin gas akan segera tercermin pada total daya keluaran sistem tanpa keterlambatan sinkronisasi antarpors.

Menurut Edris (2010), hubungan mekanis langsung pada sistem *single shaft* menyebabkan efisiensi blok PLTGU sangat sensitif terhadap kinerja turbin gas. Peningkatan efisiensi GTG sekecil 1% dapat menghasilkan peningkatan daya total blok hingga 0,8-1,2% tergantung rasio kontribusi GT terhadap total daya. Oleh karena itu, dalam kondisi operasi nyata, pengendalian kinerja GTG menjadi kunci untuk menjaga stabilitas daya keluaran dan efisiensi termal sistem.



Gambar 2.3 PLTGU dengan konfigurasi *single shaft*

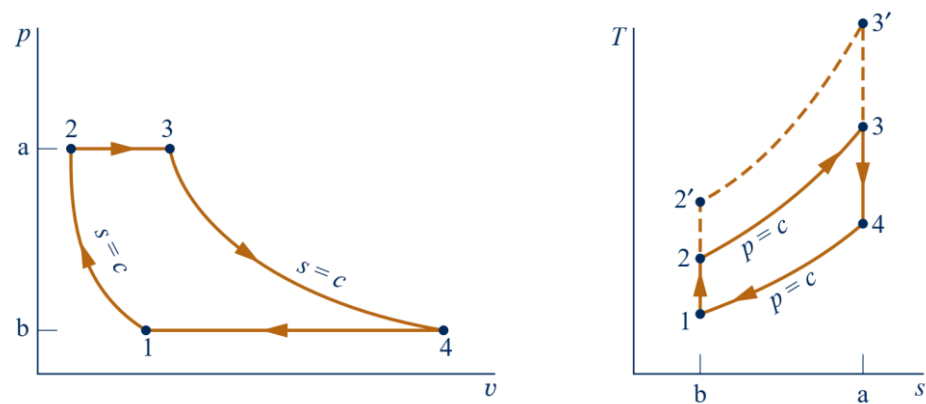
Penelitian oleh Ridwan & Wibisono (2024) pada PLTGU Gresik memperlihatkan bahwa peningkatan efisiensi siklus Brayton dari 41% menjadi 42% terjadi setelah penurunan temperatur udara masuk dari 306 K menjadi 304 K, yang menandakan sensitivitas efisiensi terhadap perubahan kecil pada densitas udara. Sementara itu, Putra & Pariaman (2020) mencatat bahwa kenaikan beban operasi dari 600 MW ke 700 MW pada blok PLTGU yang sama meningkatkan efisiensi energi sebesar 1,2%, karena rasio bahan bakar terhadap daya keluaran menjadi lebih proporsional. Hal ini sejalan dengan teori bahwa efisiensi GT meningkat pada beban menengah hingga mendekati beban nominal, sebelum mengalami penurunan kembali pada beban maksimum akibat peningkatan temperatur buang dan rugi mekanis.

Dalam konteks iklim tropis seperti Indonesia, yang memiliki suhu udara tinggi (27–35°C) dan kelembapan relatif 70–90%, kestabilan performa GT sangat dipengaruhi oleh kondisi udara masuk kompresor. Suhu lingkungan yang tinggi menurunkan densitas udara, meningkatkan beban kerja kompresor, dan menurunkan efisiensi sistem. Salah satu solusi efektif untuk mengatasi hal ini adalah penerapan sistem *Evaporative Cooling* pada saluran masuk udara kompresor.

Menurut Hizbullah et al. *2014) dan Pangestu (2021), pendinginan udara masuk menggunakan *Evaporative Cooling* mampu meningkatkan efisiensi turbin gas 1-3% dan menambah daya keluaran hingga 8-10% pada beban operasi tinggi. Teknologi ini tidak memerlukan modifikasi besar pada desain mesin dan dapat beroperasi dengan biaya energi yang rendah. Dengan demikian, kombinasi antara pengaturan variasi beban operasi dan penerapan sistem pendinginan evaporatif menjadi strategi efektif untuk menjaga efisiensi GT pada PLTGU berkonfigurasi *single shaft*, terutama di lingkungan beriklim panas-lembap seperti Indonesia.

2.2.3 Siklus brayton dan pengaruh kondisi udara masuk

Turbin gas sebagai komponen utama PLTGU bekerja berdasarkan siklus Brayton, yang dikenal sebagai siklus tekanan konstan (*constant pressure cycle*). Dalam siklus ini, fluida kerja (udara) mengalami empat tahapan utama:



Gambar 2.4 P-v diagram dan T-s diagram siklus Brayton

Sumber : Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2010). Fundamentals of Engineering Thermodynamics (7th ed.). John Wiley & Sons.

1. Kompresi Isentropik (1-2): udara dari atmosfer dikompresi dalam kompresor sehingga tekanannya meningkat.
2. Pembakaran Isobarik (2-3): bahan bakar gas dicampur dengan udara terkompresi dan dibakar pada tekanan konstan.

3. Ekspansi Isentropik (3-4): gas panas hasil pembakaran mengalir ke turbin, melakukan kerja mekanik, dan tekanannya menurun.
4. Pembuangan Panas (4-1): gas buang dilepaskan ke HRSG atau atmosfer.

Udara dingin memiliki densitas yang lebih tinggi, menghasilkan massa udara lebih besar per satuan volume, sehingga proses pembakaran menjadi lebih efisien dan kerja bersih turbin meningkat. Sebaliknya, udara panas mengurangi densitas udara, menurunkan *mass flow rate*, dan meningkatkan kerja kompresor, yang mengakibatkan penurunan efisiensi sistem. Menurut (Çengel & Boles, 2015), setiap kenaikan 1°C temperatur udara masuk dapat menurunkan efisiensi turbin gas sebesar 0,1-0,3% .

Dalam konteks PLTGU di daerah beriklim tropis seperti Indonesia, di mana suhu udara lingkungan sering mencapai $33\text{-}35^{\circ}\text{C}$ dengan kelembapan tinggi, penurunan temperatur udara masuk menjadi penting agar kinerja siklus Brayton optimal. Oleh karena itu, penggunaan sistem *Evaporative Cooling* sebelum kompresor menjadi solusi efisien untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan PLTGU.

2.2.4 Perhitungan entalpi siklus brayton

Untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang kinerja termodinamika turbin gas, siklus Brayton dapat dihitung berdasarkan perubahan entalpi pada titik-titik utama siklus (1–2–3–4),

Dalam penentuan nilai tekanan relatif gas, nilai entalpi, dan temperatur siklus Brayton, penggunaan interpolasi sangat sesuai untuk mengestimasi dengan cepat dan stabil dari data tabel, selama interpolasi dilakukan dalam rentang data dan bukan diluar batas tabel (Chapra, 2017). Referensi tabel yang digunakan dalam menghitung nilai Pr_4 , T_3 , h_1 , h_2 , h_2' , h_3 , h_4 , dan h_4' merujuk pada tabel A-17: *ideal gas properties of air* pada buku “*Thermodynamics an Engineering Approach. Ninth Edition. 2019*”(Çengel et al., 2019)

- a. Interpolasi nilai tekanan relatif gas keluar turbin (Pr4)

$$Pr4 = \frac{(T4-T \text{ bawah})(Pr \text{ atas}-Pr \text{ bawah})}{(T \text{ atas}-T \text{ bawah})} + Pr \text{ bawah} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

Pr 4 : Tekanan relatif gas keluar turbin

T4 : Temperatur gas keluar turbin

- b. Rasio tekanan

$$rp = \frac{Pr \text{ 3}}{Pr \text{ 4}} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

rp : Rasio tekanan

Pr 3 : Tekanan relatif gas masuk turbin

Pr 4 : Tekanan relatif gas keluar turbin

(Purwanto, 2024)

- c. Temperatur gas masuk turbin (T3)

$$T3 = \frac{(Pr \text{ 3}-Pr \text{ bawah})(T \text{ atas}-T \text{ bawah})}{(Pr \text{ atas}-Pr \text{ bawah})} + T \text{ bawah} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

T3 : Temperatur gas masuk turbin

Pr 3 : Tekanan relatif gas masuk turbin

- d. Temperatur ideal udara keluar kompresor (T2')

$$T2' = T1 \times rp^{\frac{(k-1)}{1,4}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

T2' : Temperatur udara ideal keluar kompresor

T1 : Temperatur udara masuk kompresor

rp : Rasio tekanan

(Hakim & Effendi, 2025)

e. Temperatur ideal gas keluar turbin (T4')

$$T4' = T3 \times \frac{1}{r_p^{\frac{(k-1)}{1,4}}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

T4' : Temperatur gas ideal keluar turbin

T3 : Temperatur gas masuk turbin

rp : Rasio tekanan

(Sunarwo & Harijono, 2016)

f. Nilai enthalpi

$$h1 = \frac{(T1-T \text{ bawah})(h \text{ atas}-h \text{ bawah})}{(T \text{ atas}-T \text{ bawah})} + h \text{ bawah} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

h1 : entalpi masuk kompresor

T1 : Temperatur udara masuk kompresor

2.2.5 Efisiensi sistem utama turbin gas

Analisis kinerja sistem utama turbin gas dalam penelitian ini dilakukan dengan pendekatan entalpi siklus Brayton untuk mengevaluasi kontribusi masing-masing komponen utama, yaitu kompresor, ruang bakar, dan turbin, terhadap efisiensi keseluruhan sistem. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi perubahan energi internal fluida kerja yang secara langsung berkaitan dengan kerja bersih turbin gas, sehingga relevan untuk menilai pengaruh variasi beban operasi serta kondisi pengoperasian *evaporative cooler* (beroperasi atau tidak).

Analisis berdasarkan entalpi ini memberikan gambaran perubahan energi internal sistem turbin gas yang berkaitan langsung dengan kerja bersih yang dihasilkan. Dalam konteks penelitian ini, pendekatan entalpi digunakan untuk memperkuat analisis efisiensi pada berbagai variasi beban, sekaligus memvalidasi pengaruh kondisi *evaporative cooler* beroperasi dan tidak beroperasi terhadap kerja bersih turbin gas.

- Perhitungan *Air Fuel Ratio* (AFR)

Air Fuel Ratio (AFR) merupakan parameter awal yang penting dalam analisis kinerja turbin gas karena menggambarkan perbandingan massa udara terhadap massa bahan bakar yang masuk ke ruang bakar. AFR dirumuskan sebagai:

(Puspawan et al., 2023)

$$AFR = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan :

$\dot{m}_{air}$: massa udara masuk kompresor

$\dot{m}_{fuel}$: massa bahan bakar masuk kompresor

- Perhitungan nilai laju aliran gas ($\dot{m}_{gas}$)

Laju aliran massa gas yang mengalir menuju turbin merupakan gabungan dari laju aliran massa udara dan bahan bakar, yang dinyatakan sebagai:

(Sidik et al., 2024)

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel} \dots\dots\dots(2.8)$$

- Perhitungan daya kompresor ($\dot{W}_c$)

Daya kompresor dihitung berdasarkan kenaikan entalpi udara selama proses kompresi, yang dirumuskan sebagai:

(Purwanto, 2024)

$$\dot{W}_c = \dot{m}_{air} (h_2 - h_1) \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan :

$\dot{m}_{air}$: massa udara masuk kompresor

h_1 : entalpi udara masuk kompresor

h_2 : entalpi udara keluar kompresor

- Perhitungan efisiensi kompresor (η_c)

Efisiensi kompresor didefinisikan sebagai perbandingan antara kerja isentropik dan kerja aktual kompresor:

(Ridwan et al., 2025)

$$\eta_c = \frac{h_{2'} - h_1}{h_2 - h_1} \times 100\% \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan :

h_1 : entalpi udara masuk kompresor

h_2 : entalpi udara keluar kompresor

$h_{2'}$: entalpi ideal udara keluar kompresor

- Perhitungan nilai daya bahan bakar masuk ($\dot{H}_{fuel}$)

Daya bahan bakar masuk ke sistem turbin gas berasal dari energi kimia bahan bakar, yang dihitung dengan:

(Nabilah et al., 2022)

$$\dot{H}_{fuel} = \dot{m}_{gas} \times LHV \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan :

$\dot{m}_{fuel}$: laju massa bahan bakar

LHV : *lower heating value* bahan bakar

- Perhitungan nilai daya udara masuk ($\dot{H}_{air}$)

Daya udara masuk ke sistem turbin gas muncul dalam bentuk entalpi sensibel, yang dihitung dengan:

(Çengel & Boles, 2015)

$$\dot{H}_{air} = \dot{m}_{air} \times C_p \times (T_1 - T_{ref}) \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

$\dot{m}_{air}$: laju massa udara

C_p : kapasitas panas jenis pada tekanan konstan
 T_1 : Temperatur udara masuk kompresor
 T_{ref} : Temperatur referensi (25°C / 298,15°K)

- Perhitungan nilai daya masuk total ($\dot{E}_{in}$)

Nilai daya total masuk ke sistem turbin gas dapat dihitung dengan menjumlahkan daya pada bahan bakar dan daya pada udara seperti perhitungan berikut:

(Boyce, 2006)

$$\dot{E}_{in} = \dot{H}_{air} + \dot{H}_{fuel} \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan :

$\dot{H}_{air}$: daya udara masuk

$\dot{H}_{fuel}$: daya bahan bakar masuk

- Perhitungan efisiensi ruang bakar (η_{cc})

Efisiensi ruang bakar menggambarkan kemampuan sistem pembakaran dalam mengonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi termal gas hasil pembakaran, yang dirumuskan sebagai

(Syammary et al., 2020a)

$$\eta_{cc} = \frac{h_3 - h_2}{h_3 - h_{2'}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan :

h_2 : entalpi udara keluar kompresor

$h_{2'}$: entalpi ideal udara keluar kompresor

h_3 : entalpi gas masuk turbin

- Perhitungan daya turbin ($\dot{W}_t$)

Daya turbin dihitung dari penurunan entalpi gas selama proses ekspansi di dalam turbin:

(Setiawan et al., 2017)

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{\text{gas}}(h_3 - h_4) \dots\dots\dots(2.15)$$

Keterangan :

$\dot{m}_{\text{gas}}$: massa campuran udara-bahan bakar

h_3 : entalpi gas masuk turbin

h_4 : entalpi gas keluar turbin

- Perhitungan efisiensi turbin (η_t)

Efisiensi turbin didefinisikan sebagai perbandingan antara kerja aktual turbin dan kerja isentropik:

(Sunarwo & Harijono, 2016)

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4'}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.16)$$

Keterangan :

h_3 : entalpi gas masuk

h_4 : entalpi gas keluar turbin

$h_{4'}$: entalpi ideal gas keluar turbin

- Perhitungan *Back Work Ratio* (BWR)

Back Work Ratio (BWR) digunakan untuk mengevaluasi proporsi daya turbin yang digunakan untuk menggerakkan kompresor, yang dirumuskan sebagai:

(Moran & Shapiro, 2010)

$$BWR = \frac{\dot{W}_c}{\dot{W}_t} \times 100\% \dots\dots\dots(2.17)$$

Keterangan :

$\dot{W}_c$: Daya Kompresor

$\dot{W}_t$: Daya Turbin

Pada kondisi operasi aktual, nilai daya turbin gas sangat dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu temperatur udara masuk kompresor dan efisiensi komponen utama (kompresor, ruang bakar, dan turbin). Penurunan temperatur udara masuk akibat pengoperasian *evaporative cooler* meningkatkan densitas udara, menurunkan kerja kompresor, serta meningkatkan rasio kerja turbin terhadap kompresor. Dampaknya, efisiensi bersih sistem meningkat tanpa memerlukan tambahan bahan bakar. Sebaliknya, ketika *evaporative cooler* tidak dioperasikan, temperatur udara masuk yang lebih tinggi menurunkan massa udara terkompresi, meningkatkan kerja kompresor, dan menurunkan efisiensi keseluruhan sistem (Çengel & Boles, 2015)

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Ridwan & Wibisono (2024) yang menunjukkan bahwa penurunan temperatur udara masuk sebesar 2 °C pada PLTGU Gresik mampu meningkatkan efisiensi turbin gas sekitar 1%. Selain itu, Putra & Pariaman (2020) melaporkan bahwa variasi suhu udara sekitar sebesar 5–10 °C dapat mengubah efisiensi energi dan eksergi sistem sebesar 1,5–2%. Hasil tersebut menegaskan sensitivitas kinerja turbin gas terhadap kondisi udara masuk, khususnya pada kompresor yang sangat bergantung pada densitas udara.

Lebih lanjut, Edris (2010) menegaskan bahwa pada sistem PLTGU berkonfigurasi single shaft, perubahan efisiensi turbin gas secara langsung memengaruhi daya keluaran blok pembangkit, karena turbin gas, turbin uap, dan generator terhubung dalam satu poros mekanis. Oleh karena itu, efisiensi turbin gas berbasis analisis entalpi menjadi indikator utama dalam mengevaluasi kinerja termal sistem, terutama pada kondisi operasi beban menengah hingga mendekati beban penuh.

2.2.6 Perhitungan efisiensi termal turbin gas dan *heat rate* berdasarkan daya gas turbin terhadap energi bahan bakar

Efisiensi termal sistem turbin gas didefinisikan sebagai perbandingan antara daya listrik yang dihasilkan generator dengan energi panas dari bahan bakar yang dikonsumsi dan udara. Parameter ini merepresentasikan kinerja aktual konversi energi pada tingkat pembangkit dan digunakan sebagai indikator utama untuk mengevaluasi efektivitas pemanfaatan energi bahan bakar. Secara matematis, efisiensi termal dirumuskan sebagai:

(Naryono & Budiono, 2013)

$$\eta_{gtg} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_c}{\dot{E}_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.18)$$

Keterangan :

$\dot{W}_c$: Daya Kompresor

$\dot{W}_t$: Daya Turbin

$\dot{E}_{in}$: Daya masuk

Nilai efisiensi termal turbin gas mencerminkan kemampuan sistem turbin gas-generator dalam mengonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik bersih. Semakin tinggi nilai efisiensi termal, semakin rendah energi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik. Parameter ini secara langsung berkaitan dengan *heat rate*, yang didefinisikan sebagai jumlah energi panas dari bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik. Hubungan antara efisiensi termal dan *heat rate* bersifat berbanding terbalik, sehingga penurunan *heat rate* menunjukkan peningkatan efisiensi termal sistem turbin gasnya. Secara matematik, *heat rate* dirumuskan sebagai:

(Syammary et al., 2020)

$$HR = \frac{\dot{E}_{in}}{\dot{W}_t - \dot{W}_c} \times 3600 \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan :

$\dot{W}_c$: Daya Kompresor

$\dot{W}_t$: Daya Turbin

$\dot{E}_{in}$: Daya masuk

Dalam operasi pembangkit, efisiensi termal dan *heat rate* sangat dipengaruhi oleh variasi beban operasi. Pada beban rendah, sebagian besar energi bahan bakar digunakan untuk memenuhi kebutuhan kerja internal sistem, sehingga porsi energi yang dikonversi menjadi daya listrik relatif kecil dan *heat rate* cenderung tinggi. Seiring dengan peningkatan beban menuju beban menengah hingga tinggi, pembakaran menjadi lebih stabil dan rasio antara daya keluaran generator terhadap energi bahan bakar meningkat, yang ditunjukkan oleh kenaikan efisiensi termal turbin gas dan penurunan *heat rate*.

Menurut Putra & Pariaman (2020) efisiensi energi total pada PLTGU Blok 1 Gresik mencapai 59,37% dan meningkat sekitar 1,2% ketika beban operasi naik dari 600 MW menjadi 700 MW. Hasil ini menunjukkan bahwa kenaikan beban menghasilkan pembakaran yang lebih stabil dan proporsional terhadap daya keluaran, sehingga efisiensi termal meningkat hingga titik optimum. Temuan ini juga sejalan dengan kajian Syammary et al. (2020) yang melaporkan kenaikan efisiensi turbin gas sebesar 1,35% pada PLTGU Muara Tawar setelah perbaikan unit kompresor dan operasi stabil pada beban tinggi.

Efisiensi termal juga dipengaruhi oleh kondisi udara masuk kompresor. Hizbullah et al. (2014) menunjukkan bahwa penerapan *Evaporative Cooling* pada PLTG Gilimanuk mampu menurunkan temperatur udara masuk dari 31,4°C menjadi 22°C, yang berdampak pada peningkatan daya keluaran 13,18 MW dan kenaikan efisiensi 2–3%. Pendinginan udara masuk tersebut meningkatkan densitas udara, menurunkan kerja spesifik kompresor, dan meningkatkan efisiensi termal generator. Penelitian Pangestu (2021) pada PLTGU Grati juga menunjukkan hasil serupa, penerapan sistem pendinginan absorpsi dengan fluida kerja air/lithium bromide menghasilkan kenaikan daya

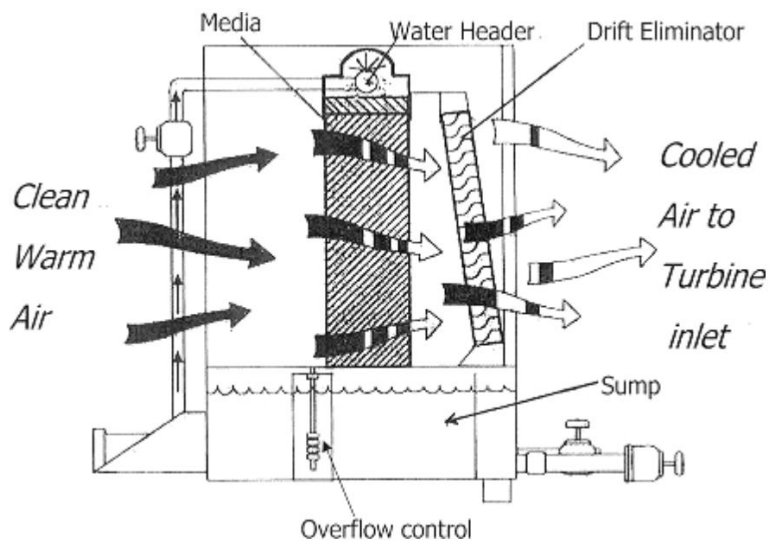
turbin 8,07% dan efisiensi termal 1,43% pada berbagai skema beban (224–480 MW).

Secara global, Odila et al. (2023) melalui *Review of Gas Turbine Inlet Cooling Technologies* menyatakan bahwa teknologi *Evaporative Cooling* dan *Inlet Air Chilling* dapat meningkatkan efisiensi termal hingga 5-7% pada wilayah beriklim panas dengan kelembapan tinggi (70-90%). Sistem pendinginan ini paling efektif pada beban menengah hingga tinggi (70-90% *load*), karena pada rentang tersebut massa udara yang masuk ke kompresor maksimal dan rasio kerja bersih turbin meningkat secara signifikan.

Dengan demikian, efisiensi termal dan *heat rate* berfungsi sebagai parameter integratif yang menyatukan hasil analisis kinerja turbin gas pada berbagai variasi beban operasi. Evaluasi kedua parameter ini memungkinkan penilaian yang komprehensif terhadap pengaruh pengoperasian *evaporative cooler*, baik pada kondisi *evaporative cooler* beroperasi maupun tidak beroperasi, dalam mempertahankan kinerja termal sistem turbin gas pada kondisi operasi aktual.

2.2.7 Sistem evaporative cooling pada turbin gas

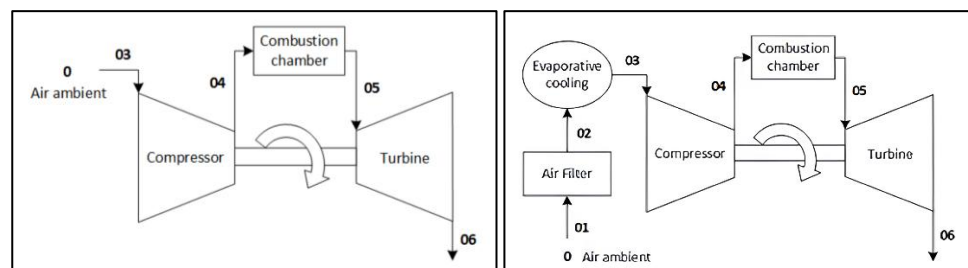
Sistem *Evaporative Cooling* adalah teknologi pendinginan udara masuk (*inlet air cooling system*) yang bekerja berdasarkan prinsip pendinginan adiabatik, di mana udara panas dari lingkungan dialirkan melalui media basah (*wet pad*) yang dibasahi air. Sebagian air menguap dan menyerap panas dari udara, sehingga suhu udara menurun dan kelembapan meningkat. Udara dingin ini kemudian diarahkan ke kompresor turbin gas (Jones & Jacobs III, 2000)



Gambar 2.5 Evaporative Cooler

Dari sisi konfigurasi sistem, perbedaan utama antara turbin gas tanpa dan dengan *evaporative cooler* terletak pada posisi unit pendingin terhadap kompresor. Pada konfigurasi tanpa *evaporative cooling*, aliran udara mengikuti urutan: udara lingkungan - filter udara - kompresor - ruang bakar - turbin - gas buang. Temperatur udara masuk kompresor sepenuhnya ditentukan oleh kondisi lingkungan.

Sebaliknya, pada konfigurasi dengan *evaporative cooling*, unit pendingin ditempatkan setelah sistem filter dan sebelum kompresor. Aliran udara menjadi: udara lingkungan - filter udara - *evaporative cooler* - kompresor - ruang bakar - turbin - gas buang. Dengan penempatan ini, temperatur udara masuk kompresor lebih rendah dibandingkan temperatur lingkungan, sehingga densitas udara meningkat dan titik operasi kompresor bergeser ke kondisi laju massa yang lebih tinggi.



Gambar 2.6 Konfigurasi sistem turbin gas tanpa *evaporative cooler* (kiri) dan dengan *evaporative cooler* (kanan)

Penurunan temperatur udara masuk kompresor akibat proses *evaporative cooling* dilaporkan dalam berbagai studi berdampak langsung terhadap peningkatan laju massa udara masuk ($\dot{m}_a$), yang selanjutnya memengaruhi daya keluaran bersih ($\dot{W}_{net}$), specific fuel consumption (SFC), heat rate, dan efisiensi termal sistem turbin gas (Alam et al., 2015). Hubungan ini dijelaskan melalui persamaan neraca massa dan energi pada siklus Brayton terbuka, di mana perubahan temperatur dan tekanan pada sisi kompresor akan memengaruhi kerja kompresor, kerja turbin, serta performa keseluruhan sistem.

Menurut Hizbullah et al. (2014) serta Pangestu (2021), penerapan pendinginan udara masuk pada sistem PLTG dan PLTGU di Indonesia dapat meningkatkan efisiensi 1–3% dan daya keluaran hingga 10%. Odila et al. (2023) juga menegaskan bahwa sistem ini ideal diterapkan di negara beriklim panas-lembap, dengan peningkatan efisiensi optimal pada beban menengah–tinggi (70–90% load).

Dengan prinsip tersebut, pendinginan udara masuk akan menurunkan daya kompresor, meningkatkan tekanan total pada ruang bakar, dan menghasilkan peningkatan efisiensi siklus Brayton pada kondisi operasi beban tinggi. Namun, dalam penelitian ini efektivitas *evaporative cooler* tidak dihitung secara langsung melainkan dievaluasi melalui perubahan parameter kinerja turbin gas.

2.2.8 Relevansi analisis variasi beban terhadap efisiensi termal turbin gas

Beban operasi merupakan salah satu parameter paling penting yang memengaruhi kinerja dan efisiensi termal turbin gas. Pada beban rendah, sebagian besar energi bahan bakar digunakan untuk mengatasi kerja kompresor dan kehilangan panas sistem, sehingga efisiensi cenderung rendah. Ketika beban meningkat, efisiensi sistem naik karena rasio antara kerja

keluaran turbin dan kerja kompresor semakin besar, yang menghasilkan kerja bersih lebih tinggi. Namun, pada beban mendekati maksimum, efisiensi dapat menurun kembali akibat meningkatnya temperatur gas buang dan rugi tekanan pada ruang bakar (Çengel & Boles, 2015).

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan efisiensi turbin gas pada beban menengah hingga mendekati beban tinggi. Putra & Pariaman (2020) melaporkan bahwa efisiensi energi sistem PLTGU meningkat seiring kenaikan beban hingga mendekati 700 MW, sebelum menunjukkan kecenderungan perubahan yang lebih kecil pada beban lebih tinggi. Temuan ini mengindikasikan bahwa pada rentang beban tertentu, rasio antara energi bahan bakar dan daya keluaran menjadi lebih proporsional, sehingga kinerja termal sistem lebih stabil.

Selain itu, Syammary et al., (2020) menemukan bahwa setelah *Minor Inspection*, efisiensi turbin gas PLTGU Muara Tawar meningkat paling signifikan ketika unit beroperasi di atas 85% beban nominal. Kondisi ini disebabkan oleh peningkatan kualitas pembakaran dan kestabilan tekanan ruang bakar. Dengan demikian, performa turbin gas sangat dipengaruhi oleh kombinasi antara kondisi mekanis dan variasi beban operasi.

Dalam konteks sistem pendinginan udara masuk, Odila et al. (2023) menegaskan bahwa *Inlet Air Cooling (IAC)*, termasuk *Evaporative Cooling*, memberikan dampak efisiensi terbesar saat turbin beroperasi pada beban menengah–tinggi (70–90% load). Pada kondisi tersebut, peningkatan massa aliran udara akibat penurunan temperatur inlet secara langsung meningkatkan daya keluaran dan menurunkan konsumsi bahan bakar spesifik. Kondisi ini memperkuat peran evaporative cooler sebagai sistem pendukung kinerja turbin gas, khususnya pada operasi mendekati beban tinggi.

Sementara itu, hasil simulasi Pangestu (2021) pada PLTGU Grati menunjukkan bahwa penerapan sistem pendinginan absorpsi berbasis air/lithium bromide meningkatkan efisiensi rata-rata 1,43% pada berbagai

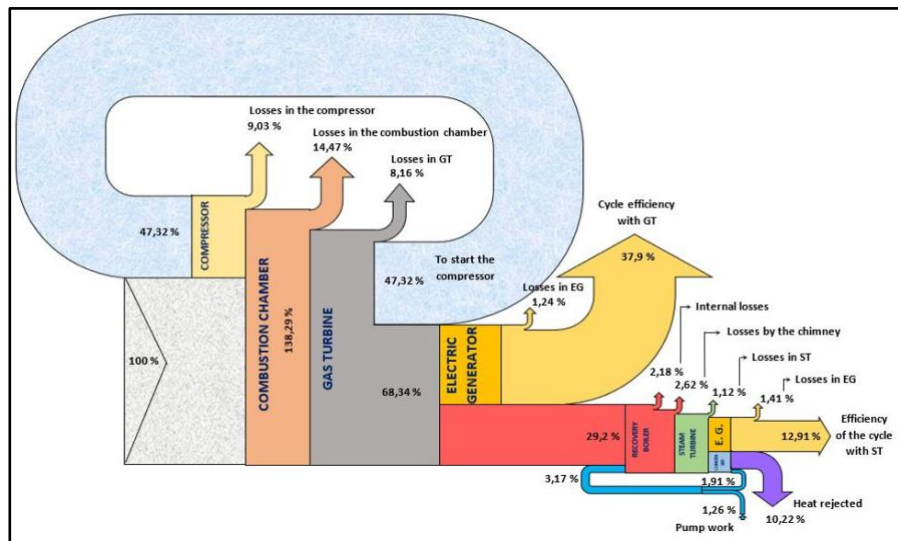
variasi beban (224–480 MW). Peningkatan ini dihasilkan dari penurunan temperatur udara masuk yang memperbaiki densitas udara kompresor dan menurunkan kerja spesifiknya.

Berdasarkan berbagai hasil penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa variasi beban operasi memiliki hubungan langsung terhadap siklus Brayton dan efisiensi termal turbin gas. Oleh karena itu, analisis variasi beban seperti yang digunakan dalam penelitian ini relevan untuk mengevaluasi kecenderungan perubahan kinerja turbin gas pada beberapa titik beban representatif, baik pada kondisi *evaporative cooler* beroperasi maupun tidak beroperasi. Pendekatan ini tidak bertujuan untuk menentukan kondisi optimum secara umum, melainkan untuk mengidentifikasi titik beban dengan kinerja relatif paling efisien dari kondisi operasi yang dianalisis.

Secara empiris, pendekatan ini juga memperkuat hasil dari Muhammad Ridwan & Wibisono (2024), di mana peningkatan efisiensi 1% pada beban sekitar 700 MW menghasilkan peningkatan daya keluaran blok sebesar 8 MW. Dengan demikian, kombinasi antara analisis efisiensi termodinamika dan variasi beban aktual diharapkan mampu memberikan gambaran yang konsisten dan realistis mengenai perilaku efisiensi turbin gas pada kondisi operasi pembangkit di wilayah beriklim tropis seperti Indonesia.

2.2.9 Diagram sankey dalam analisis neraca energi sistem turbin

Diagram Sankey merupakan metode visualisasi yang digunakan untuk merepresentasikan neraca energi suatu sistem secara kuantitatif, di mana lebar aliran menunjukkan besarnya energi yang mengalir melalui setiap komponen sistem. Dalam analisis pembangkit listrik, diagram ini digunakan untuk menggambarkan distribusi energi dari bahan bakar menuju daya keluaran serta berbagai bentuk kehilangan energi yang terjadi selama proses konversi energi. Representasi visual tersebut memudahkan pemahaman proporsi energi yang dimanfaatkan dan energi yang hilang pada sistem pembangkit.



Gambar 2.7 Sankey diagram pada sistem pembangkit *combine cycle*

Click or tap here to enter text. Mariños Rosado et al., (2019) menjelaskan bahwa diagram Sankey tidak berfungsi sebagai metode perhitungan tersendiri, melainkan sebagai representasi grafis dari hasil perhitungan neraca energi yang didasarkan pada hukum pertama termodinamika. Nilai energi yang ditampilkan dalam diagram Sankey diperoleh dari hasil perhitungan daya, laju aliran massa, entalpi, dan energi bahan bakar yang telah ditentukan sebelumnya. Oleh karena itu, ketepatan diagram Sankey sangat bergantung pada keakuratan perhitungan energi yang mendasarinya.

Dalam konteks penelitian ini, diagram Sankey digunakan sebagai analisis tambahan untuk memvisualisasikan distribusi energi pada sistem turbin gas berdasarkan hasil analisis efisiensi yang telah dilakukan. Diagram ini berfungsi sebagai alat bantu interpretatif untuk memperjelas pengaruh variasi beban operasi serta kondisi pengoperasian *evaporative cooler* terhadap proporsi energi yang dikonversi menjadi daya berguna dan energi yang hilang. Penggunaan diagram Sankey tidak dimaksudkan sebagai dasar penentuan kinerja utama, melainkan untuk memperkuat pemahaman terhadap hasil analisis efisiensi termal turbin gas dan heat rate yang diperoleh.