

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Dalam pelaksanaannya, studi ini mengambil referensi dan melakukan tinjauan pustaka terhadap sejumlah penelitian relevan yang telah ada. Penelitian-penelitian terdahulu yang menjadi referensi sebagai berikut:

1. *Analysis of The Effect of Fuel Switching on The Thermal Efficiency of PLTG Unit 1.3 PT. PLN Indonesia Power Priok PGU*

Kajian ini bertujuan untuk membandingkan performa turbin gas ketika beroperasi dengan Dua jenis bahan bakar berbeda yaitu *High Speed Diesel* (HSD) dan *Liquefied Natural Gas* (LNG). Metode yang digunakan adalah analisis siklus *Brayton* aktual, didukung oleh data operasional lapangan dan simulasi *CycleTempo*. Hasil riset menunjukkan bahwa efisiensi termal Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) meningkat bersamaan dengan peningkatan beban operasi. Secara spesifik, HSD menghasilkan rentang efisiensi yang lebih tinggi (40,61%–45,60%) dibandingkan LNG (37,96%–44,62%). Kesimpulan utama dari studi ini adalah tipe bahan bakar memiliki peran krusial dalam menentukan kinerja turbin gas. (Ridwan & Adi Gumelar, 2024).

2. *Analisis Efisiensi Turbin Gas Tipe V94.2 Sebelum dan Sesudah Minor Inspection pada Blok 4 Unit 3 PLTGU Muara Tawar*

Penelitian ini menguji dampak *minor inspection* terhadap peningkatan kinerja turbin gas melalui perbandingan kondisi sebelum dan sesudah perawatan. Hasilnya menunjukkan bahwa perawatan rutin ini berhasil meningkatkan berbagai parameter efisiensi secara signifikan dimana efisiensi termal naik 0,70%, efisiensi kompresor naik 0,56%, dan efisiensi turbin naik 1,35%, diikuti dengan penurunan *Heat Rate* sebesar 216,61 kJ/kWh. Peningkatan optimalisasi konversi energi ini utamanya disebabkan oleh perbaikan keausan dan pembersihan internal komponen. Secara tegas, studi tersebut menyimpulkan bahwa pemeliharaan periodik efektif dalam

mempertahankan performa dan efisiensi optimal turbin gas. (Syammary et al., 2020).

3. *Analysis of Brayton Cycle Efficiency at 100 MW Load Before and After Overhaul of Unit 1 Block 1 at PLTGU PT. PLN Nusantara Power Up Gresik*

Studi ini menganalisis efisiensi siklus *Brayton* (PLTG) di PLTGU Gresik (100 MW) *pasca-overhaul*. Hasilnya menunjukkan peningkatan kecil efisiensi siklus aktual sebesar 0,1% (dari 28% menjadi 28,1%). Peningkatan ini dipicu oleh naiknya efisiensi komponen utama yaitu, kompresor (84% ke 85%) dan combustion chamber (93% ke 94%), serta sedikit kenaikan pada turbin. Kesimpulan utamanya adalah perawatan *overhaul* efektif meningkatkan efisiensi aktual siklus *Brayton* melalui optimalisasi kerja komponen. (Ridwan & Wibisono, n.d.).

4. *Analisis Perbandingan Efisiensi PLTG Menggunakan Bahan Bakar Gas dan Solar*

Penelitian ini menganalisis perbandingan kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) saat menggunakan *High Speed Diesel* (HSD) dan gas alam, dengan fokus pada efisiensi termal dan konsumsi bahan bakar. Berdasarkan hasil perhitungan data operasional, ditemukan bahwa penggantian bahan bakar dari HSD ke gas meningkatkan efisiensi PLTG hingga sekitar 5,7% dan menurunkan *Specific Fuel Consumption* (SFC) secara signifikan. Peningkatan ini disebabkan oleh karakteristik pembakaran gas yang lebih stabil dan bersih dibandingkan HSD, yang berdampak pada peningkatan performa termal dan penurunan biaya operasional. Selain manfaat ekonomi, penggunaan gas alam juga menghasilkan emisi yang lebih rendah, mendukung inisiatif transisi energi bersih dan berkelanjutan. (Kamal & Firbarini, 2021).

5. *Analisis Efisiensi Thermal Before and After Overhaul dengan Pendekatan Sankey Diagram pada PLTGU UP Muara Karang Blok 2*

Penelitian ini menganalisis efisiensi termal PLTGU Muara Karang Blok 2 menggunakan Hukum I Termodinamika dan Diagram Sankey.

Hasilnya *overhaul* terbukti meningkatkan efisiensi termal total. Efisiensi beban 135 MW naik dari 84,92% menjadi 86,40% dan beban 230 MW naik dari 85,70% menjadi 86,69%, seiring penurunan heat loss. Meskipun Turbin Gas optimal 91,0% ke 91,3%, *Combustor Chamber* adalah penyumbang *heat loss* terbesar. Kesimpulan studi ini adalah pemeliharaan berhasil mengoptimalkan konversi energi dan menaikkan efisiensi termal (Sihol et al., n.d.).

6. Analisis Pengaruh Bahan Bakar HSD dan LNG terhadap Efisiensi Termal PLTG dengan Variasi Beban Menggunakan *Software Cycle Tempo*

Penelitian ini membandingkan efisiensi termal PLTG Blok 1 Muara Karang menggunakan LNG dan HSD pada beban 80 MW dan 90 MW. Ditemukan bahwa efisiensi meningkat seiring kenaikan beban. Secara komparatif, LNG memberikan efisiensi yang lebih tinggi dari HSD; pada beban 90 MW, LNG mencapai 34,66% sementara HSD 33,91%. Keunggulan efisiensi LNG ini disebabkan oleh nilai *Lower Heating Value* (LHV) yang lebih tinggi dan laju massa udara yang lebih besar saat beroperasi dengan LNG (Nababan & Susanto, n.d.).

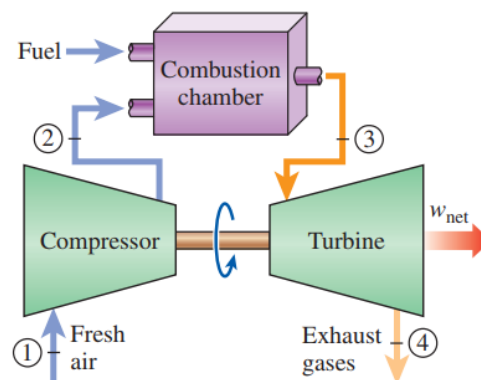
7. Kajian Bahan Bakar HSD, MFO, dan LNG terhadap Daya Listrik di PLTG Pamaron

Studi ini menganalisis pengaruh HSD, MFO, dan LNG terhadap daya keluaran dan performa PLTG. Hasil utama menunjukkan bahwa LNG unggul dengan konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) paling rendah yaitu 0,13 kg/kWh, jauh di bawah HSD (0,33 kg/kWh) dan MFO (0,43 kg/kWh). Berkat SFC yang rendah, LNG mampu menghasilkan daya tertinggi sekitar 40,48 kWh dengan volume bahan bakar yang sama. Penelitian ini menyimpulkan bahwa karakteristik bahan bakar seperti nilai kalor dan efisiensi pembakaran, sangat memengaruhi kinerja turbin gas dan daya listrik yang dihasilkan (Satria Abdi Wicaksana et al., 2023).

2.2 Konsep Dasar PLTG dan Siklus

2.2.1 Prinsip Kerja

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan sistem pembangkit yang beroperasi berdasarkan siklus termodinamika *Brayton*, di mana energi panas dari pembakaran bahan bakar diubah menjadi energi listrik. Sistem ini berperan penting dalam menjaga kestabilan pasokan energi, dan umumnya difungsikan sebagai pembangkit beban puncak (*peak load plant*) atau pembangkit cadangan (*standby plant*) karena memiliki kemampuan *start-up* yang cepat dan respon yang fleksibel terhadap perubahan beban (Ridwan & Adi Gumelar, 2024).



Gambar 2. 1 Prinsip Kerja PLTG

(Sumber: Cengel dan Boles, 2019)

Secara umum, prinsip kerja PLTG dimulai dari udara yang berasal dari lingkungan pertama kali dihisap oleh kompresor dan dimampatkan hingga tekanannya meningkat beberapa kali lipat dari tekanan atmosfer. Tujuan dari proses kompresi ini adalah agar udara memiliki kerapatan dan energi potensial yang cukup tinggi sebelum masuk ke ruang bakar. Pada tahap ini, terjadi peningkatan tekanan dan temperatur udara secara signifikan, yang nantinya sangat menentukan efisiensi siklus (Çengel & Boles, 2019).

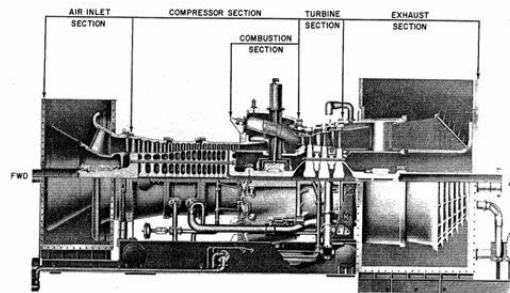
Udara bertekanan yang keluar dari kompresor selanjutnya dialirkan ke ruang bakar (*combustion chamber*), tempat bahan bakar disemprotkan dan dicampur dengan udara dalam perbandingan tertentu. Campuran ini kemudian dibakar sehingga menghasilkan gas panas bertekanan tinggi

dengan suhu sekitar 1000 hingga 1400°C. Tahap pembakaran ini menjadi bagian paling penting dalam proses perubahan energi kimia bahan bakar menjadi energi panas (Mulyono et al., 2020).

Gas hasil pembakaran kemudian dialirkan ke turbin gas, tempat di mana gas panas tersebut mengalami proses ekspansi dan kehilangan sebagian tekanannya. Selama proses ini berlangsung, energi dari gas digunakan untuk memutar sudu-sudu turbin, sehingga menghasilkan gerakan rotasi. Putaran turbin tersebut diteruskan ke generator listrik yang terhubung langsung melalui satu poros, sehingga energi panas dari bahan bakar berubah menjadi energi mekanik, lalu dikonversi menjadi energi listrik yang dapat disalurkan ke jaringan distribusi (Ridwan & Adi Gumelar, 2024).

Setelah keluar dari turbin, gas buang yang masih memiliki temperatur tinggi, sekitar 400–600°C, tidak selalu langsung dilepaskan ke udara bebas. Pada sistem PLTG yang lebih modern, panas sisa dari gas buang tersebut dimanfaatkan kembali untuk memanaskan fluida kerja pada sistem *combined cycle* (PLTGU). Pemanfaatan ini mampu meningkatkan efisiensi total pembangkit karena energi panas yang sebelumnya terbuang dapat digunakan kembali dalam proses pembangkitan (Syammary et al., 2020).

2.2.2 Komponen Utama



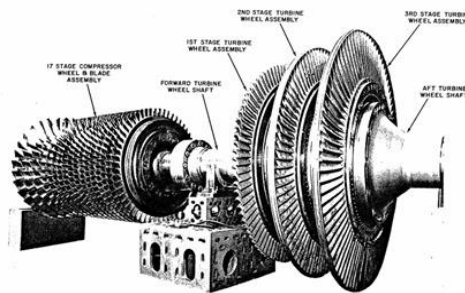
Gambar 2. 2 Turbin Gas GE MS900E

(Sumber: *Manual Book GE*)

Sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terpadu dalam satu sistem termodinamika, sebagai berikut:

1. Kompresor (*Compressor*)

Kompresor berfungsi untuk mengisap udara dari lingkungan sekitar dan menekannya hingga mencapai tekanan tinggi sebelum dialirkan ke ruang bakar. Proses ini meningkatkan energi potensial udara melalui kompresi adiabatik. Jenis kompresor yang umum digunakan pada PLTG adalah kompresor aksial (*axial compressor*) karena mampu menghasilkan rasio tekanan tinggi dengan efisiensi yang baik.

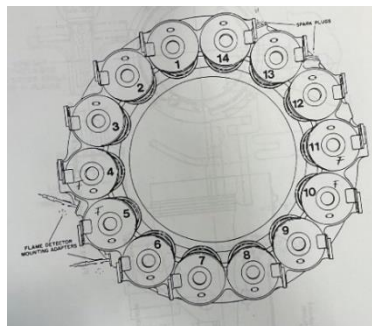


Gambar 2. 3 Kompresor

(Sumber: General Electric, 1992)

Proses kompresi memerlukan sekitar 50–60% dari total daya turbin, sehingga efisiensi kompresor sangat memengaruhi efisiensi keseluruhan sistem. Jika kompresor mengalami penurunan performa akibat debu, korosi, atau kebocoran, maka suplai udara berkurang dan pembakaran menjadi tidak sempurna, sehingga efisiensi termal menurun (Çengel & Boles, 2019).

2. Ruang Bakar (*Combustion Chamber*)



Gambar 2. 4 Combustor

(Sumber: General Electric, 1992)

Ruang bakar merupakan tempat terjadinya proses pembakaran bahan bakar dengan udara bertekanan tinggi. Bahan bakar yang digunakan bisa berupa *High Speed Diesel* (HSD), *Liquefied Natural Gas* (LNG), maupun gas alam dari Nusantara Regas (NR). Campuran udara dan bahan bakar dibakar secara stabil pada tekanan konstan, menghasilkan gas panas bertekanan tinggi dengan suhu sekitar 1000–1500°C.

3. Turbin Gas

Turbin gas berfungsi mengubah energi panas dari gas hasil pembakaran menjadi energi mekanik rotasional. Gas panas bertekanan tinggi yang keluar dari ruang bakar diarahkan ke sudu-sudu turbin (*turbine blades*) dan mengalami ekspansi sehingga memutar poros turbin. Poros turbin ini terhubung langsung dengan generator dan juga dengan kompresor.

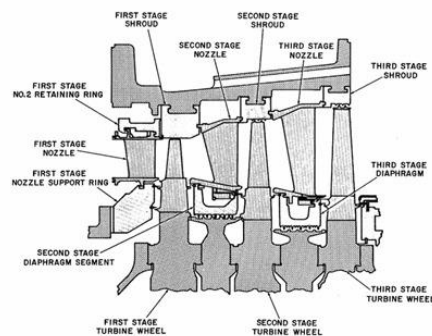


Figure 3-17 Turbine Section-Cutaway View

Gambar 2. 5 Sudu Turbin Gas

(Sumber: General Electric, 1992)

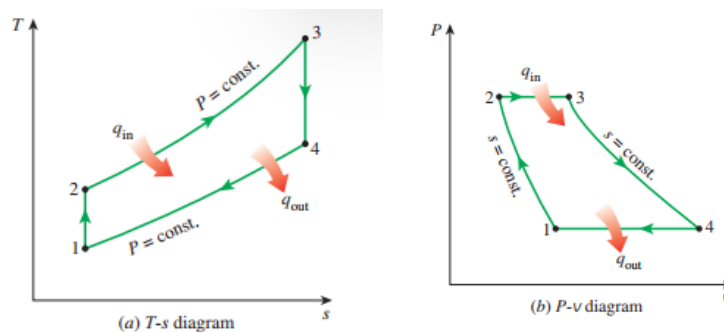
Sebagian besar energi dari turbin digunakan untuk menggerakkan kompresor, sementara sisanya menjadi daya bersih untuk menghasilkan listrik. Temperatur gas masuk turbin (T_3) merupakan faktor utama yang menentukan efisiensi sistem, semakin tinggi temperatur gas masuk,

semakin besar energi yang dapat dikonversi menjadi listrik, asalkan material turbin mampu menahan suhu tersebut (Abbas et al., 2020).

2.2.3 Siklus *Brayton*

Siklus *Brayton* merupakan model termodinamika yang menjadi dasar analisis operasi turbin gas. Dalam mesin pembangkit yang memakai prinsip ini, udara masuk dikompresi, kemudian energi ditambahkan melalui pembakaran bahan bakar, setelah itu gas hasil pembakaran diekspansikan di turbin untuk menghasilkan kerja mekanik. Konsep ini krusial dalam memahami konversi energi panas menjadi kerja mekanik atau Listrik (Ridwan & Adi Gumelar, 2024).

2.2.3.1 Siklus *Brayton* Ideal



Gambar 2. 6 Siklus *Brayton* Ideal

(Sumber: Cengel dan Boles, 2019)

Siklus *Brayton* Ideal adalah model teoritis yang mengasumsikan fluida kerja (udara) adalah gas ideal yang bersirkulasi dalam siklus tertutup dan semua prosesnya bersifat *reversibel* atau isentropik (Çengel & Boles, 2019). Secara ideal, siklus *Brayton* terdiri dari empat proses utama, sebagai berikut:

1. Kompresi Isentropik

Udara dari kondisi lingkungan dikompresi secara isentropik di dalam kompresor, sehingga tekanan dan suhu meningkat secara signifikan.

2. Pembakaran

Udara bertekanan memasuki ruang bakar, kemudian panas ditambahkan melalui pembakaran bahan bakar dengan tekanan dianggap konstan. Proses ini meningkatkan suhu fluida secara drastis.

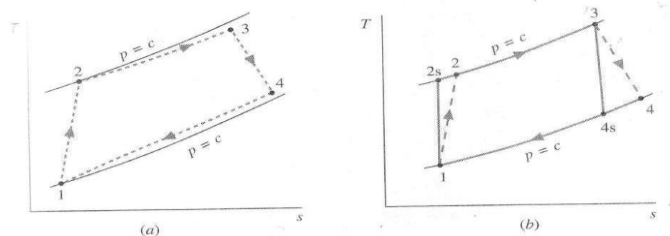
3. Ekspansi Isentropik di Turbin

Gas panas hasil pembakaran kemudian dialirkan ke turbin gas, di mana gas tersebut diekspansikan melalui sudu-sudu turbin. Proses ini mengubah energi panas menjadi energi mekanik yang digunakan untuk memutar poros turbin dan generator listrik.

4. Pembuangan Panas Isobarik

Gas sisa hasil ekspansi yang keluar dari turbin masih memiliki temperatur yang tinggi, biasanya antara 400–600°C. Gas buang ini dilepaskan ke atmosfer melalui cerobong atau dapat dimanfaatkan kembali pada sistem PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap) untuk memanaskan air di *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG).

2.2.3.2 Siklus *Brayton* Aktual



Gambar 2. 7 Siklus *Brayton* Aktual

(Sumber: Cengel dan Boles, 2019)

Siklus *Brayton* Aktual adalah model yang lebih realistis karena memperhitungkan *irreversibilitas* (ketidaksempurnaan) yang terjadi di setiap komponen turbin gas, seperti rugi tekanan (*pressure drop*) dan gesekan fluida. Siklus aktual biasanya digambarkan sebagai siklus terbuka (*open cycle*) karena gas buang langsung dilepaskan ke atmosfer (Naufal et al., 2019).

2.2.4 Pengaruh Temperatur Inlet terhadap Kinerja Turbin Gas

Temperatur udara masuk kompresor (Tin) merupakan salah satu parameter operasi yang mempengaruhi kinerja turbin gas. Secara termodinamika, peningkatan temperatur inlet menyebabkan densitas udara berkurang sehingga massa udara yang masuk ke kompresor menurun. Kondisi ini dapat meningkatkan kerja kompresor dan menurunkan daya bersih yang dihasilkan turbin.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur udara masuk berpengaruh terhadap penurunan performa turbin gas, baik dari sisi daya keluaran maupun efisiensi termal. Selain itu, studi eksperimental juga menunjukkan bahwa perubahan temperatur inlet dapat mempengaruhi efisiensi turbin secara kuantitatif meskipun nilainya relatif kecil, yakni sekitar 0.2–0.3% per variasi tertentu dalam satu jenis mesin tertentu (Purwanto, 2024).

2.3 Bahan Bakar

2.3.1 Bahan Bakar PLTG

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) memerlukan bahan bakar yang mampu menghasilkan panas tinggi melalui proses pembakaran di ruang bakar (*combustion chamber*). Secara umum, bahan bakar yang digunakan pada PLTG dapat berupa bahan bakar cair maupun bahan bakar gas.

1. *High Speed Diesel* (HSD)

High Speed Diesel (HSD) adalah bahan bakar cair distilat minyak bumi yang umum digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), baik sebagai bahan bakar utama maupun cadangan. HSD memiliki nilai kalor tinggi dan kadar sulfur rendah, yang mendukung temperatur pembakaran tinggi dan kestabilan operasi turbin gas. Keunggulannya meliputi ketersediaan, stabilitas penyimpanan yang baik, dan pembakaran yang konsisten. Namun, kekurangan utama HSD adalah biaya operasional yang tinggi akibat harga minyak yang fluktuatif, serta

menghasilkan emisi gas buang seperti CO₂ dan partikulat yang lebih besar dibandingkan bahan bakar gas.

Penggunaan HSD pada sistem PLTG menghasilkan efisiensi termal berkisar antara 37% hingga 41%. Walaupun efisiensi tersebut masih tergolong baik, tingkat konsumsi bahan bakarnya lebih tinggi dibandingkan ketika menggunakan bahan bakar gas alam. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun HSD unggul dalam hal ketersediaan dan kestabilan pembakaran, dari sisi ekonomi dan lingkungan bahan bakar ini kurang menguntungkan untuk jangka Panjang (Mulyono et al., 2020).

2. Gas

Sejumlah PLTG di Indonesia, termasuk PLTG Blok 1 Muara Karang, kini telah beralih menggunakan gas alam dari Nusantara Regas (NR) sebagai alternatif pengganti HSD. Keuntungan utama penggunaan gas NR mencakup aspek ekonomi lebih hemat dan tidak bergantung impor dan lingkungan emisi karbon dan partikulat yang lebih rendah. Transisi ini tidak hanya mendukung kebijakan energi bersih tetapi juga memperkuat kemandirian energi nasional.

Meski demikian, pengaruh gas terhadap efisiensi termal dan kinerja turbin gas masih perlu diteliti lebih dalam. Setiap sumber gas alam memiliki komposisi kimia dan nilai kalor yang berbeda, yang dapat memengaruhi temperatur pembakaran, stabilitas nyala api, serta efisiensi energi yang dihasilkan. Oleh karena itu, diperlukan analisis lebih lanjut untuk memastikan sejauh mana penggunaan gas dapat mengoptimalkan performa sistem PLTG (Kamal & Firbarini, 2021).

2.3.2 Reaksi Pembakaran

Reaksi pembakaran adalah proses oksidasi cepat antara bahan bakar dan oksigen yang melepaskan energi termal, produk gas, dan cahaya. Dalam konteks turbin gas, proses ini terjadi di ruang bakar bertekanan untuk menjamin stabilitas reaksi dan menghasilkan energi panas yang diperlukan untuk memutar turbin. Pembakaran hidrokarbon merupakan reaksi eksotermik yang menghasilkan panas, karbon dioksida CO₂ dan air H₂O.

Untuk mencapai pembakaran sempurna, yang melepaskan energi maksimal dan meminimalkan emisi gas berbahaya seperti karbon monoksida CO dan jelaga, dibutuhkan ketersediaan oksigen yang memadai sehingga seluruh hidrokarbon bereaksi sempurna menjadi CO₂ dan H₂O (Çengel & Boles, 2019).

Secara umum, reaksi pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu:

1. Pembakaran Sempurna

Seluruh komponen bahan bakar bereaksi sepenuhnya dengan oksigen sehingga hanya menghasilkan gas karbon dioksida (CO₂) dan uap air (H₂O), tanpa sisa bahan bakar yang tersisa. Proses ini biasanya terjadi pada turbin gas ketika bunga api dari pemantik menyalakan campuran udara dan bahan bakar di ruang bakar. Selanjutnya, api menyebar dan membakar seluruh campuran sehingga reaksi pembakaran berlangsung secara menyeluruh dan stabil.

2. Pembakaran Tidak Sempurna

Pembakaran tidak sempurna dapat menimbulkan fenomena detonasi. Kondisi ini terjadi ketika proses pembakaran tidak berlangsung secara serentak atau menyeluruh setelah fase kompresi selesai, sehingga bunga api dari busi belum memicu seluruh campuran. Bagian campuran bahan bakar yang belum terbakar dapat menyala secara spontan akibat peningkatan suhu akibat tekanan dari gas yang sudah terbakar. Akibatnya, suhu pada campuran yang belum terbakar menjadi lebih tinggi daripada temperatur yang dibutuhkan untuk pengapian sendiri, yang menandai terjadinya pembakaran tidak sempurna.

2.5 Proses Termodinamika

2.5.1 Perhitungan Siklus *Brayton* Ideal

Langkah-langkah pada siklus *Brayton* dapat dijelaskan melalui penggunaan tabel data udara, di mana data ini menjadi kunci untuk menganalisis kerja kompresi (1-2) dan kerja turbin (3-4) yang idealnya terjadi secara isentropik.

$$\frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.1)$$

$$\frac{P_{r3}}{P_{r4}} = \frac{P_2}{P_4} \quad (2.2)$$

Rasio kompresi pada siklus *Brayton* didefinisikan sebagai perbandingan tekanan yang terjadi selama proses kompresi isentropik. Pada kondisi ideal, proses ini berlangsung pada lintasan isentropik sehingga kenaikan tekanan dapat dinyatakan menggunakan persamaan rasio tekanan sebagai berikut:

$$r_p = r_{pc} = r_{pt} \quad (2.3)$$

Rasio tekanan r_p merupakan perbandingan tekanan yang digunakan dalam penentuan efisiensi termal siklus *Brayton* dengan asumsi *cold air-standard*. Pada siklus ini, efisiensi termal sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya rasio tekanan turbin. Semakin tinggi nilai rasio tekanan, maka efisiensi termal akan meningkat, dan kecenderungan ini juga berlaku pada turbin gas kondisi nyata. Dengan demikian, persamaan efisiensi termal untuk siklus *Brayton* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$r_n = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \quad (2.4)$$

$$r_p = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \frac{P_{r3}}{P_{r4}} \quad (2.5)$$

Rasio suhu Absolut:

$$\frac{T_2}{T_1} = r_p \frac{K - 1}{K} \quad (2.6)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = r_p \frac{K - 1}{K} \quad (2.7)$$

Ketika proses kompresi isentropik (1–2), udara yang masuk ke sistem turbin gas pertama kali melewati bagian *inlet* kompresor. Di dalam kompresor, udara tersebut dipampatkan hingga mencapai tekanan yang lebih tinggi. Pada

tahap ini diasumsikan tidak terjadi perubahan entropi, karena proses 1–2 dianggap berlangsung secara isentropik. Dengan asumsi tersebut, hubungan termodinamika proses kompresi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$w_c = \dot{m}_{air} \times (h_2 - h_1) \quad (2.8)$$

Pada proses pembakaran isobarik (2–3), udara bertekanan dari kompresor selanjutnya masuk ke ruang bakar. Pada tahap ini, bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang pembakaran dan bercampur dengan udara sehingga reaksi pembakaran berlangsung. Proses pembakaran menghasilkan energi panas yang kemudian diserap oleh udara bertekanan tersebut. Selama proses ini, volume gas meningkat tetapi tekanannya dianggap tetap. Dengan asumsi bahwa seluruh panas yang dilepas selama pembakaran sepenuhnya diserap, perpindahan kalor terjadi tanpa adanya tambahan energi lain yang dapat dibangkitkan di dalam turbin gas. Untuk kondisi *steady state* pada suatu volume kendali, keseimbangan massa dan energi diterapkan. Dari proses pembakaran tersebut diperoleh persamaan berikut:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{fuel} \times LHV \quad (2.9)$$

Pada proses ekspansi isentropik (3–4), Udara bertekanan yang telah menerima energi panas dari proses pembakaran kemudian mengalir menuju turbin untuk mengalami ekspansi. Gas panas ini memutar sudu-sudu turbin sehingga menghasilkan kerja mekanik. Sebagian dari energi yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan kompresor, sementara sisanya dikonversi menjadi tenaga penggerak bagi generator.

$$w_t = \dot{m}_{fuel} \times (h_3 - h_4) \quad (2.10)$$

Pada proses pembuangan panas (4–1), Udara yang keluar dari turbin masih menyimpan sejumlah energi panas. Panas sisa ini kemudian dilepaskan ke lingkungan, sehingga kondisi udara kembali mendekati keadaan awal dan siklus dapat kembali berlanjut ke tahap kompresi 1–2.

$$\dot{Q}_{out} = (\dot{m}_{air} \times \dot{m}_{fuel}) \times (h_4 - h_1) \quad (2.11)$$

Kerja Netto Ideal:

$$w_{netto} = w_t - w_c \quad (2.12)$$

Laju Aliran Gas Hasil Pembakaran:

$$\dot{m}_{fuel\ bb} = w_t - w_c \quad (2.13)$$

Laju Aliran Udara:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in} &= (\dot{m}_{fuel\ bb} \times h_3) - (\dot{m}_{air} \times h_2) \\ \dot{Q}_{in} &= ((\dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}) \times h_3) - (\dot{m}_{air} \times h_2) \\ \dot{m}_{air} &= \frac{(\dot{Q}_{in} - (\dot{m}_{fuel} \times h_3))}{(h_3 - h_2)} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Efisiensi Termal Turbin Gas Ideal:

$$\eta_{ttg} = \frac{(w_t - w_c)}{Q_{in}} \times 100\% \quad (2.15)$$

Heat Rate Netto Ideal:

$$Heat\ Rate\ Netto = \frac{Q_{in}}{w_{netto}} \quad (2.16)$$

2.5.1 Perhitungan Siklus *Brayton* Aktual

Agar sebuah mesin pembangkit mampu menghasilkan daya netto yang tinggi, diperlukan efisiensi turbin dan kompresor yang tetap berada pada tingkat yang relatif baik. Setelah nilai efisiensi kompresor diperoleh, serta diketahui entalpi udara pada kondisi masuk dan keluar kompresor, efisiensi aktual kompresor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\eta_c = \frac{(h_2' - h)}{(h_2 - h_1)} \times 100\% \quad (2.17)$$

Kompresor dan generator memperoleh tenaga dari turbin gas. Untuk menentukan efisiensi turbin gas, daya yang diperlukan oleh generator dibandingkan dengan daya netto yang dihasilkan turbin. Hubungan ini dinyatakan melalui persamaan berikut untuk menghitung efisiensi turbin aktual:

$$\eta_t = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_4')} \times 100\% \quad (2.18)$$

Pada proses 1–2, perhitungan kompresi dilakukan saat udara dari atmosfer memasuki sistem turbin gas melalui *inlet* kompresor. Ketika udara dipampatkan, temperatur keluaran kompresor meningkat dan efisiensi kompresor cenderung menurun, sehingga kebutuhan kerja untuk proses

kompresi bertambah besar. Dengan kondisi tersebut, besar kerja yang diperlukan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$w_{ca} = \frac{\dot{m}_{air} \times (h_2 - h_1)}{\eta_c} \quad (2.19)$$

Efisiensi *Combuster*:

$$\eta_{comb} = \frac{(T_2 - T_3)}{(T_2' - T_3)} \times 100\% \quad (2.20)$$

Turbin gas berfungsi untuk menggerakkan kompresor sekaligus memutar generator. Efisiensi turbin gas dapat ditentukan dengan membandingkan daya yang dibutuhkan oleh generator dengan daya netto yang dihasilkan, yang dapat diekspresikan melalui suatu persamaan.

$$w_{ta} = \dot{m}_{fuel} \times (h_3 - h_4) \times \eta_t \quad (2.21)$$

Kerja Netto Aktual:

$$W_{netto\ aktual} = w_{ta} - w_{ca} \quad (2.22)$$

Efisiensi Termal Turbin Gas Aktual:

$$\eta_{ttg} = \frac{(w_{ta} - w_{ca})}{Q_{in}} \times 100\% \quad (2.23)$$

Jumlah energi yang dibutuhkan oleh unit pembangkit untuk menghasilkan satu unit *output* atau per kWh dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Heat\ Rate\ Netto_{aktual} = \frac{Q_{in}}{W_{netto\ aktual}} \quad (2.24)$$

Back Work Ratio dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$BWR_{aktual} = \frac{W_{ca}}{W_{ta}} \times 100\% \quad 2.25$$

2.5.2 Perhitungan *Specific Fuel Consumption* (SFC)

Specific Fuel Consumption (SFC) adalah parameter yang digunakan untuk menilai kinerja termal mesin, menunjukkan jumlah massa bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan daya keluaran tertentu. Nilai SFC yang lebih rendah menunjukkan bahwa mesin bekerja lebih efisien karena kebutuhan bahan bakarnya lebih kecil untuk menghasilkan energi yang sama (Çengel & Boles, 2019). SFC dirumuskan sebagai:

$$SFC = \frac{m}{P} \quad (2.25)$$

Keterangan:

SFC : Pemakaian bahan bakar per daya yang dihasilkan (g/Kwh)

m : Laju aliran massa bahan bakar (g/h)

P : Daya keluaran turbin gas (kW)

Rumus ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai seberapa efektif mesin mengubah bahan bakar menjadi energi berguna. Rumus ini menjadi dasar dalam perhitungan kinerja pembangkit untuk mengevaluasi efisiensi penggunaan bahan bakar selama operasi.

2.6 Diagram Sankey

Diagram Sankey merupakan metode visualisasi aliran energi yang digunakan untuk menunjukkan distribusi energi dalam suatu sistem, di mana lebar aliran merepresentasikan besarnya energi pada setiap proses. Diagram ini banyak dimanfaatkan dalam analisis sistem pembangkit listrik karena mampu menggambarkan secara jelas perbandingan antara energi masuk, energi keluaran, serta energi yang hilang selama proses konversi energi berlangsung.

Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Diagram Sankey digunakan untuk memvisualisasikan konversi energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik, sekaligus mengidentifikasi sumber utama kehilangan energi seperti rugi panas gas buang, kerugian pada ruang bakar, dan irreversibilitas pada turbin gas. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pendekatan Diagram Sankey efektif untuk mengevaluasi efisiensi termal dan mengidentifikasi komponen dengan kontribusi rugi energi terbesar dalam sistem pembangkit.

Dalam penelitian ini, Diagram Sankey digunakan sebagai landasan analisis untuk mendukung perhitungan efisiensi termal turbin gas GT 1.1 di PLTG Blok 1 UP Muara Karang. Diagram ini membantu memperjelas perbedaan distribusi energi antara penggunaan bahan bakar *High Speed Diesel* (HSD) dan gas pada variasi beban operasi.