

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Untuk memperkuat kajian ini, peneliti melaksanakan evaluasi dengan merujuk pada tinjauan pustaka dari sejumlah penelitian sebelumnya yang relevan dengan subjek yang sedang dibahas:

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

Penelitian ini membahas bagaimana perbedaan jenis bahan bakar HSD dan LNG yang bisa memengaruhi efisiensi kerja turbin gas di PLTG Muara Karang. Fokus utamanya untuk melihat perubahan kinerja turbin saat beban operasinya berbeda, serta bagaimana karakteristik masing-masing bahan bakar berpengaruh terhadap proses pembakaran dan siklus *Brayton* secara keseluruhan. Dari hasil penelitian ini diketahui bahwa LNG mampu memberikan efisiensi termal yang lebih baik dibandingkan HSD, pada beban 80 MW, efisiensi termal LNG tercatat 32,65%, sedikit lebih tinggi dibandingkan HSD yang sebesar 32,57%. Pada beban 90 MW, perbedaan ini semakin jelas: LNG mencapai 34,66%, sedangkan HSD hanya 33,91%. Kondisi ini timbul akibat kandungan kalor LNG yang lebih tinggi, yang pada akhirnya meningkatkan jumlah energi termal yang memasuki area pembakaran. Selain itu, pada penggunaan HSD, kerja kompresor dan kerja turbin cenderung lebih rendah, sehingga output akhirnya juga tidak setinggi LNG. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa semakin tinggi pembebanannya, semakin baik efisiensi termalnya. Baik pada HSD maupun LNG, beban 90 MW selalu menghasilkan kinerja lebih baik dibandingkan 80 MW. Hal ini terjadi karena pada saat beban naik, kerja kompresor, kerja turbin, dan pembakaran ikut meningkat sehingga efisiensinya ikut naik. Penelitian ini menjadi relevan dengan penelitian saya tentang gas PHE, NR, dan campurannya, karena juga membahas tentang efisiensi bahan bakar pada gas turbin dengan variasi beban (Edy Susanto, Noel, 2025).

2. Analisa Variasi Beban terhadap Efisiensi Turbin Gas PLTGU Grati Blok 2 Unit 1

Penelitian ini membahas bagaimana perubahan beban operasi memengaruhi performa turbin gas, khususnya terhadap parameter seperti efisiensi termal, efisiensi kompresor, efisiensi turbin, konsumsi bahan bakar spesifik (SFC), dan *heat rate*. Penelitian ini menggunakan data operasi riil pada beban 50 MW, 75 MW, dan beban 100 MW untuk melihat bagaimana respon turbin gas Mitsubishi MW-701D terhadap perubahan pembebanan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban kerja operasional berbanding lurus dengan kenaikan performa efisiensi pada turbin gas, meliputi efisiensi kompresor, efisiensi turbin, serta efisiensi termal secara menyeluruh. . Pada beban 100 MW, kinerja turbin mencapai kondisi paling optimal dengan efisiensi termal sebesar 34,84% serta nilai SFC terendah yaitu 0,21 kg/kWh. Sebaliknya pada beban lebih rendah (50 MW dan 75 MW), performa efisiensi termal mengalami penurunan, sementara penggunaan bahan bakar per unit energi lebih besar, yang mengakibatkan pembangkit listrik harus menggunakan lebih banyak bahan bakar untuk menghasilkan output listrik yang sama. Hal ini terjadi karena pada beban tinggi, kerja kompresor dan kerja turbin berada pada titik operasi yang lebih ideal sehingga energi yang dihasilkan lebih sebanding dengan jumlah bahan bakar yang masuk. Penelitian ini menjadi relevan dengan penelitian saya karena sama-sama menekankan bahwa performa turbin gas sangat bergantung pada kondisi operasi serta karakteristik energi masuk baik berupa beban maupun properties bahan bakar (Edwin Leonardo, 2021).

3. *Investigating the Effect of Natural Gas Composition on Centrifugal Gas Compressors Used in Gas Turbine Power Plants*

Penelitian ini meneliti pengaruh komposisi gas alam terhadap kinerja kompresor sentrifugal yang digunakan pada sistem turbin gas pembangkit listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi komposisi gas alam, terutama kandungan hidrokarbon berat (seperti etana, propana, dan butana), berpengaruh signifikan terhadap karakteristik termodinamika aliran gas di dalam kompresor. Perubahan densitas, rasio panas spesifik, dan tekanan parsial akibat perbedaan komposisi gas dapat menyebabkan fluktuasi pada efisiensi kompresor serta memengaruhi stabilitas operasi turbin gas secara keseluruhan. Penelitian tersebut juga menemukan bahwa peningkatan kandungan hidrokarbon berat

dalam campuran gas menyebabkan penurunan efisiensi isentropik kompresor hingga 2–4%, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan efisiensi termal keseluruhan dari siklus *Brayton*. Sebaliknya, penggunaan gas alam dengan komposisi yang lebih ringan (tinggi kandungan metana) memberikan performa kompresor yang lebih stabil dan efisien, serta mengurangi beban kerja pada turbin akibat tekanan discharge yang lebih optimal. Penelitian ini menjadi relevan karena ada hubungannya antara komposisi bahan bakar gas dan efisiensi sistem turbin gas. Variasi komposisi antara gas PHE, gas NR, dan campurannya dapat memberikan efek serupa seperti yang dijelaskan dalam penelitian tersebut, yaitu juga memengaruhi kinerja kompresor dan efisiensi termal turbin (Fujita & Miyazaki, 2024).

4. Analysis of Parameters That Affect the Efficiency of Gas Power Plants

Penelitian ini membahas faktor-faktor utama yang berdampak pada performa efisiensi operasional pembangkit listrik berbasis gas (PLTG), dengan fokus utama pada komponen turbin gas. Fokus penelitian diarahkan untuk memahami bagaimana perubahan parameter operasi seperti suhu udara masuk ke kompresor, suhu bahan bakar, suhu gas buang, serta daya aktif keluaran dapat berdampak terhadap efisiensi termal keseluruhan sistem pembangkit. Variabel yang diamati meliputi temperatur inlet udara (T_1), temperatur bahan bakar (T_2), temperatur gas buang turbin (T_3), serta daya listrik yang dihasilkan (P). Adapun hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap variabel memiliki hubungan langsung terhadap efisiensi termal. Suhu udara masuk yang lebih rendah cenderung meningkatkan efisiensi karena udara yang lebih dingin memiliki densitas lebih tinggi, sehingga proses kompresi menjadi lebih efektif. Sebaliknya, kenaikan suhu bahan bakar dan suhu gas buang menunjukkan penurunan efisiensi akibat pembakaran yang kurang optimal dan hilangnya energi panas melalui exhaust. Analisis statistik menunjukkan bahwa variabel suhu udara masuk dan daya aktif memiliki nilai korelasi paling signifikan terhadap efisiensi, dengan koefisien determinasi (R^2) mencapai 0,97, yang menandakan hubungan yang sangat kuat. Dari penelitian ini menjadi relevan dengan judul saya karena keduanya berfokus pada peningkatan efisiensi termal turbin gas melalui analisis faktor yang memengaruhi proses pembakaran dan performa energi perbedaannya penelitian saya akan memperluas cakupan dengan analisis komposisi bahan bakar gas (PHE, NR, dan campuran), (Saputra et al., 2023).

5. Analisis Pengaruh Laju Aliran Massa Bahan Bakar Gas Terhadap Efisiensi Energi dan Eksergi Sebelum dan Sesudah HGPI pada PLTG UP Muara Karang Blok 1 Unit 2

Penelitian ini membahas bagaimana perubahan laju aliran massa bahan bakar gas memengaruhi efisiensi energi dan eksergi pada turbin gas. Fokus utama penelitian ini adalah membandingkan kondisi sebelum dan sesudah Hot Gas Path Inspection (HGPI) dengan beberapa variasi beban operasi. Data yang dianalisis merupakan data operasional nyata dari pembangkit, sehingga hasil perhitungan mampu menunjukkan secara langsung respons turbin gas terhadap perubahan pasokan bahan bakar, dari hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran massa bahan bakar berpengaruh berlawanan arah terhadap efisiensi energi maupun eksergi. Sebelum pelaksanaan HGPI, aliran bahan bakar yang lebih besar justru menurunkan nilai efisiensi. Pola yang sama terlihat pada efisiensi eksergi, di mana terjadi peningkatan setelah turbin gas menjalani perawatan HGPI. Dan pada penelitian ini menegaskan bahwa kondisi komponen turbin sangat menentukan efisiensi termal, di mana HGPI terbukti meningkatkan kinerja kompresor, ruang bakar, dan turbin. Selain itu, variasi beban juga memberikan dampak signifikan, semakin tinggi beban operasi, semakin baik efisiensi energi dan eksergi, karena kerja kompresor dan turbin lebih optimal pada kondisi mendekati operasi nominal. Jurnal ini menjadi relevan dengan penelitian saya karena sama-sama menyoroti bagaimana perubahan karakteristik bahan bakar dan kondisi operasi memengaruhi efisiensi sistem turbin gas (Abimanyu, 2021).

2.2 Landasan Teori

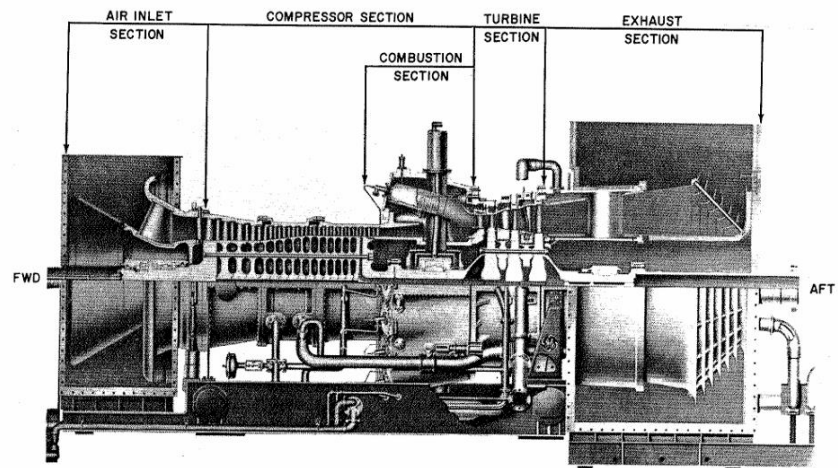
Adapun beberapa landasan teori yang mendukung analisis dalam skripsi ini serta berkaitan langsung dengan topik yang diteliti antara lain:

2.2.1 Teori Dasar PLTG dan Turbin Gas

PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas) merupakan sistem pembangkit yang memanfaatkan turbin gas sebagai penggerak utama generator. Perangkat ini dibuat dengan mekanisme kerja yang relatif sederhana, yaitu mengonversi energi panas dari proses pembakaran bahan bakar menjadi energi mekanik, yang kemudian dikonversikan kembali menjadi energi listrik (Rakha Syammary, Hendri, 2020)

2.2.1.1 Komponen - Komponen Utama Turbin Gas

Turbin gas memiliki tiga komponen utama, yaitu kompresor, ruang bakar (combustion chamber), dan turbin:



Gambar 2. 1 Turbin Gas GE MS9001

(Sumber: Manual Book *GE*, 1992)

a. Kompresor

Kompresor berperan meningkatkan tekanan serta suhu udara sebelum dialirkan ke ruang bakar. Udara bertekanan ini kemudian digunakan untuk mendukung proses pembakaran, membantu pengabutan bahan bakar, mendinginkan sudu serta ruang bakar, dan berfungsi sebagai udara perapat pada sistem pelumasan bantalan (Rakha Syammary, Hendri, 2020).

Kompresor yang paling sering diterapkan pada turbin gas adalah kompresor aksial, karena mampu memberikan efisiensi tinggi dalam proses pemampatan udara. Pada tipe ini, tekanan udara meningkat secara bertahap di setiap tahap (stage), di mana masing-masing tahap menghasilkan kenaikan tekanan tertentu. Setiap deret sudu menerima aliran udara dari tahap sebelumnya dan mengatur percepatan ataupun perlambatan aliran sesuai karakteristik aerodinamiknya. Udara yang keluar dari setiap tingkat memiliki kecepatan yang relatif sama dengan udara masuk, namun tekanannya terus meningkat. Pada tahap awal, kenaikan tekanan masih kecil, tetapi semakin ke tahap akhir tekanan meningkat secara signifikan dan volume udara menjadi lebih kecil. Peningkatan tekanan ini

menyebabkan densitas udara bertambah, sehingga untuk menjaga kestabilan tekanan dan kecepatan aliran, bentuk rumah kompresor dibuat semakin menyempit pada bagian keluarannya. Meskipun demikian, selalu ada kemungkinan terjadinya kerugian tekanan (*pressure losses*) akibat gesekan antara udara dengan permukaan sudu yang kasar atau kotor. Secara umum, kompresor aksial dapat dirancang berdasarkan dua prinsip kerja, yaitu jenis impuls dan jenis reaksi. Pada kompresor impuls, proses difusi hanya terjadi di bagian stator, sedangkan pada kompresor reaksi, difusi terjadi baik di bagian stator maupun rotor (Gusnita & Said, 2017).

Perhitungan efisiensi terhadap kompresor dengan menggunakan persamaan :

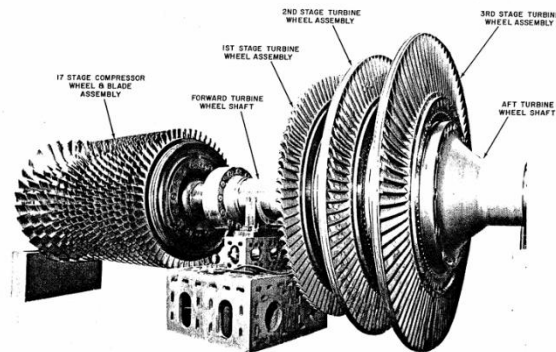
$$\eta_c = \frac{W_c}{W_{cs}} \dots\dots\dots (2.27)$$

Dimana :

η_c :Efisiensi kompresor

W_c :Kerja kompresor aktual

W_{cs} :Kerja kompresor ideal

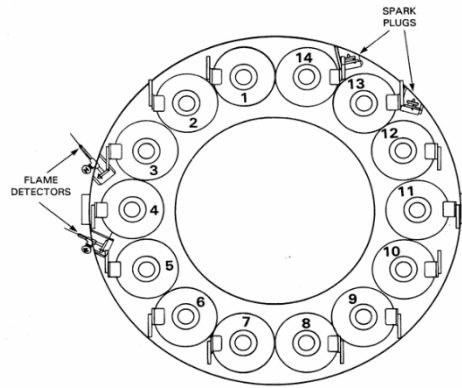


Gambar 2. 2 Kompresor
(Sumber: Manual Book GE, 1992)

b. Ruang Bakar (*combustion chamber*)

Ruang bakar berfungsi sebagai tempat berlangsungnya reaksi kimia antara bahan bakar dan udara bertekanan yang disuplai dari kompresor. Proses ini menghasilkan energi panas yang selanjutnya diekspansikan di turbin untuk menghasilkan kerja mekanik pada sistem pembangkit. Secara konstruktif, ruang bakar tersusun atas dua pipa konsentris yang tertutup di bagian depan dan dirancang sedemikian rupa agar mampu menyalurkan

gas hasil pembakaran menuju turbin dengan arah dan kecepatan yang tepat. Jenis *combustion chamber* pada Siemens GT V94.2 yaitu berbentuk Annular.

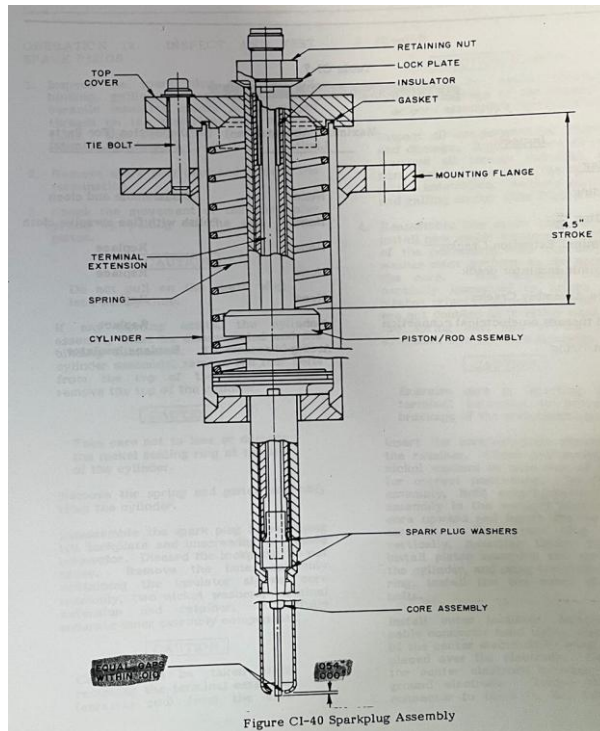


Gambar 2. 3 Combustion Chamber Bentuk Annular

(Sumber: Manual Book *GE*, 1992)

Bentuk bagian belakang ruang bakar dibuat untuk mengatur aliran gas panas agar distribusinya merata sebelum memasuki sudu-sudu turbin, sehingga performa ekspansi gas dapat berlangsung optimal. Pada sistem turbin gas, tidak semua udara yang masuk ke ruang bakar dimanfaatkan untuk proses pembakaran, berbeda dengan mesin torak. Hanya sekitar 20–30% udara yang berperan sebagai udara primer untuk mendukung pembakaran pada kondisi beban penuh, sedangkan bagian terbesar digunakan sebagai udara pendingin serta sebagai media pengencer gas panas sebelum diarahkan ke tahap turbin. Jumlah udara primer ini diatur melalui ukuran dan jumlah lubang udara yang terdapat pada dinding ruang bakar (Gusnita & Said, 2017).

Aliran bahan bakar ke ruang bakar dikendalikan oleh nosel pada burner. Burner di ruang bakar yang berbentuk annular terdiri dari delapan unit. Di dalam setiap burner terdapat ignitor dan spark plug yang berfungsi saat proses penyalaan awal. Ruang bakar memiliki dua jenis aliran bahan bakar, yakni *premix* dan *diffusion*. Pada metode *premix*, bahan bakar dicampurkan terlebih dahulu dengan udara sebelum dilepaskan melalui nosel. Sementara itu, pada metode *diffusion*, proses pencampuran bahan bakar dan udara berlangsung langsung di area reaksi pembakaran.



Gambar 2. 4 Burner Pada Combustion Chamber
(Sumber: *Manual Book GE*, 1992)

c. Turbin Gas

Turbin gas merupakan salah satu pembangkit listrik yang semakin populer karena memiliki efisiensi yang tinggi, keandalan dan fleksibilitasnya. Untuk menilai kinerja turbin gas, maka diperlukan pemantauan pada berbagai parameter diantaranya output daya, efisiensi, laju aliran gas buang, temperatur gas buang, temperatur udara, rasio kompresi hingga laju aliran udara (Roswati Nurhasanah et al, 2024).

Sistem turbin gas paling dasar terdiri dari tiga elemen pokok, yaitu kompresor, ruang bakar, dan turbin. Turbin gas sendiri merupakan salah satu bagian dari rangkaian tersebut. Konsep awal turbin gas modern dikembangkan oleh John Barber dari Nuneaton, Inggris. Rancangan tersebut mencakup kompresor, ruang bakar dengan proses pembakaran bertekanan konstan, serta turbin yang bekerja menghasilkan gaya impuls. (Sunarwo, 2016).

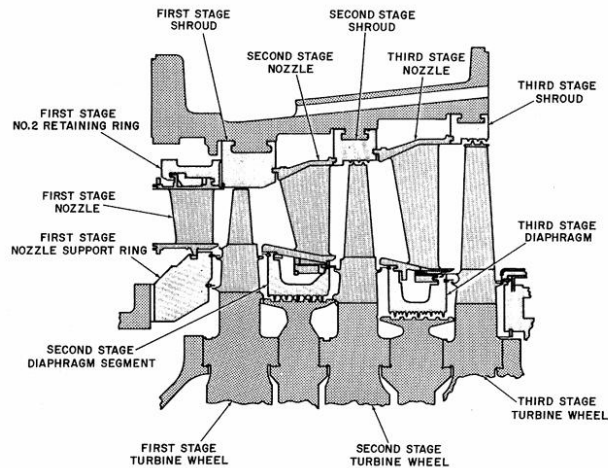
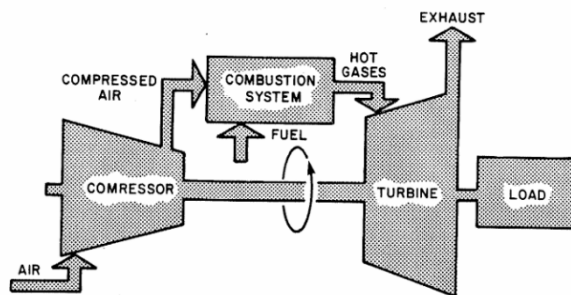


Figure 3-17 Turbine Section-Cutaway View

Gambar 2. 5 Sudu – Sudu Turbin Gas

(Sumber: *Manual Book GE*, 1992)

2.2.1.2 Prinsip Kerja PLTG



Gambar 2. 6 Prinsip Kerja PLTG

(Sumber: *Manual Book GE*, 1992)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Muara Karang Blok 1 memiliki kapasitas sekitar 500 MW dengan konfigurasi turbin gas dan turbin uap yang saling terintegrasi, type turbin gas yang digunakan adalah GE MS 9001E dengan kapasitas satu turbin gas yaitu 90 MW. PLTG beroperasi dengan menggunakan turbin gas sebagai penggerak utama, yang bertugas mengonversi energi kimia dari bahan bakar gas menjadi energi listrik. Secara prinsip, udara dari lingkungan dengan suhu sekitar 29°C dihisap oleh kompresor, lalu tekanannya dinaikkan sehingga suhu udaranya juga meningkat menjadi sekitar 300°C, dengan tujuan untuk memenuhi syarat udara bertekanan tinggi untuk

proses pembakaran. Setelah itu, udara diarahkan menuju ruang bakar (*combustion chamber*) dan kemudian dicampur dengan bahan bakar gas. Campuran tersebut dinyalakan oleh sistem pengapian hingga terjadi proses pembakaran. Pembakaran ini menghasilkan gas panas bersuhu tinggi yang dialirkan ke sudu-sudu turbin untuk memutar poros (*shaft*) yang tersambung langsung dengan generator. Putaran poros turbin menyebabkan rotor generator berputar terhadap statornya, sehingga menghasilkan energi listrik dan gas panas sisa hasil pembakaran akan dibuang ke atmosfer melalui cerobong buang (*Stack*).

2.2.1.3 Efisiensi Termal

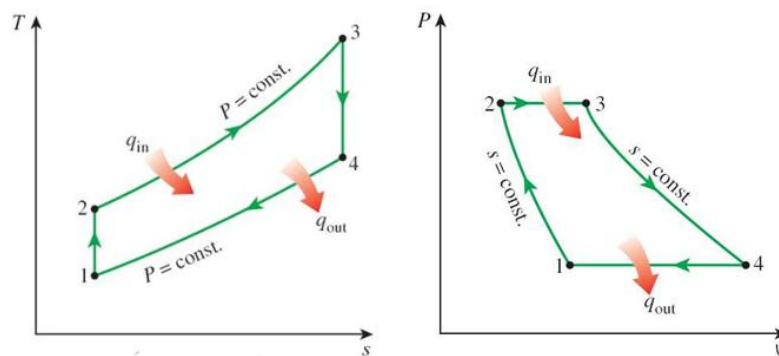
Efisiensi termal adalah ukuran seberapa efisien mesin kalor mengubah kalor yang diterimanya menjadi kerja (Yunus A. Cengel, 2015). Dari penelitian lain juga menambahkan bahwa efisiensi termal PLTG sangat dipengaruhi oleh jenis bahan bakar yang digunakan. Gas dengan nilai kalor lebih tinggi seperti gas PHE menghasilkan temperatur pembakaran yang lebih tinggi sehingga efisiensi sistem meningkat (Alifa et al., 2024). Berikut ini merupakan beberapa teori perhitungan yang digunakan untuk mengetahui efisiensi PLTG

2.2.1.4 Siklus *Brayton*

Siklus *Brayton* menjelaskan tahapan perubahan energi pada udara yang terlebih dahulu dimampatkan oleh kompresor, kemudian dicampur dengan bahan bakar dan dibakar di ruang bakar sehingga menghasilkan gas panas bertekanan tinggi. Gas panas ini selanjutnya dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin. Pada siklus *Brayton* ideal, setiap proses dianggap berjalan secara reversibel tanpa adanya gesekan, kehilangan panas, atau penurunan tekanan, sehingga efisiensi termalnya dianggap maksimum. Sedangkan pada siklus *Brayton* aktual, kondisi di lapangan tidak sempurna teori, selalu terdapat kerugian energi akibat gesekan, kebocoran, penurunan tekanan di ruang bakar, serta efisiensi kompresor dan turbin yang tidak mencapai 100%. Hal-hal tersebut menyebabkan efisiensi termal aktual lebih rendah dibandingkan kondisi ideal. Oleh karena itu, perbandingan antara siklus ideal dan aktual penting dilakukan untuk mengetahui sejauh mana performa turbin gas dapat ditingkatkan.

2.2.1.5 Siklus Brayton Ideal

Jika irreversibilitas diabaikan, maka udara akan mengalir melalui setiap komponen dalam siklus *Brayton* tanpa mengalami penurunan tekanan, sehingga udara dapat melewati ruang bakar dengan tekanan yang tetap konstan. Selain itu, apabila perpindahan panas ke lingkungan diabaikan, proses yang terjadi pada komponen tersebut menjadi isentropik. Hal ini mengacu pada siklus *Brayton* ideal, yang diilustrasikan dalam diagram tekanan (P) dan temperatur (T) pada gambar di bawah ini (Boyce, 2002).



Gambar 2. 7 Siklus *Brayton* Ideal pada PLTG
(Yunus A. Cengel, 2015)

Dalam analisis siklus *Brayton*, irreversibilitas yang terjadi diabaikan sehingga udara dianggap mengalir melalui setiap komponen utama tanpa adanya penurunan tekanan akibat gesekan. Aliran udara diasumsikan memiliki tekanan konstan di dalam alat penukar kalor. Oleh karena itu, proses yang terjadi pada kompresor dan turbin dapat dianggap sebagai proses isentropik. Pada kondisi ini, analisis dapat dilakukan menggunakan tabel data udara, di mana proses isentropik (1–2) menggambarkan tahap kompresi pada kompresor, sedangkan proses (3–4) merepresentasikan tahap ekspansi pada turbin.

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

$$\frac{P_{r3}}{P_{r4}} = \frac{P_3}{P_4} \dots \dots \dots (2.2)$$

Rasio kompresi dalam siklus *Brayton* terjadi dalam tekanan yang konstan pada proses isentropik dimana menggunakan persamaan sebagai berikut:

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

Dimana, r_p adalah rasio tekanan, persamaan efisiensi *thermis Brayton* dengan pengamsunsian standard udara dingin. Efisiensi *thermis* dari siklus *Brayton* tergantung pada rasio tekanan dari turbin. Efisiensi *thermis* bertambah dengan kedua parameter, dimana juga kasus untuk turbin gas aktual.

Sehingga didapat,

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$r_p = \frac{Pr_2}{Pr_1} = \frac{Pr_3}{Pr_4} \dots\dots\dots (2.5)$$

Rasio suhu Absolut :

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

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

Proses Kompresi Isentropik (1-2) : Udara yang memasuki sistem turbin gas terlebih dahulu melewati bagian inlet kompresor. Di dalam kompresor, udara ditekan hingga mencapai level tekanan tertentu. Pada tahap ini, tidak terjadi perubahan entropi. Karena proses (1–2) berlangsung secara isentropik, maka berlaku bahwa:

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

Proses Pembakaran Isobarik (2-3) : Udara yang telah dimampatkan kemudian dialirkan ke ruang bakar. Pada tahap ini, bahan bakar disuntikkan dan proses pembakaran berlangsung. Panas hasil pembakaran (q_{in}) diserap oleh udara sehingga temperatur meningkat dan volumenya bertambah. Tekanan tetap konstan karena gas hasil pembakaran dapat mengembang bebas menuju turbin. Dengan asumsi tidak ada panas yang terbuang, seluruh energi panas dianggap terserap sempurna, dan pada turbin gas tidak terdapat tambahan energi lain yang dibangkitkan. Dari proses pembakaran tersebut diperoleh persamaan sebagai berikut:

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

Proses Ekspansi Isentropik (3-4) : Pada tahap ini, udara bersuhu dan bertekanan tinggi yang telah menerima energi panas dari proses pembakaran mengalami ekspansi ketika melewati turbin. Rangkaian sudu pada turbin bekerja layaknya nosel kecil yang mengubah energi termal menjadi energi kinetik. Sebagian energi kinetik tersebut digunakan untuk menggerakkan kompresor, sedangkan sisanya dalam sistem pembangkit listrik dimanfaatkan untuk memutar generator.

$$W_t = \dot{m}_{flue\ bb} \times (h_3 - h_4) \dots\dots\dots (2.10)$$

Proses Pelepasan Kalor (4-1) : Pelepasan kalor merupakan tahap ketika gas buang dikeluarkan kembali ke lingkungan. Dalam siklus *Brayton* tertutup yang ideal, aliran udara yang meninggalkan turbin masih mengandung energi panas tersisa. Gas hasil ekspansi tersebut kemudian dialirkan melewati penukar panas untuk menurunkan temperatur sebelum akhirnya kembali memasuki siklus awal pada tahapan yang setara dengan proses 1-2.

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

Kerja *Netto* Ideal:

$$W_{nett} = W_{turbin} - W_{kompresor} \dots\dots\dots (2.12)$$

Mencari laju aliran gas hasil pembakaran:

$$\dot{m}_{flue\ bb} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel} \dots\dots\dots (2.13)$$

Mencari laju aliran udara :

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

BackWork Ratio ideal :

$$BWR_{aktual} = \frac{W_{kompresor}}{W_{turbin}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.15)$$

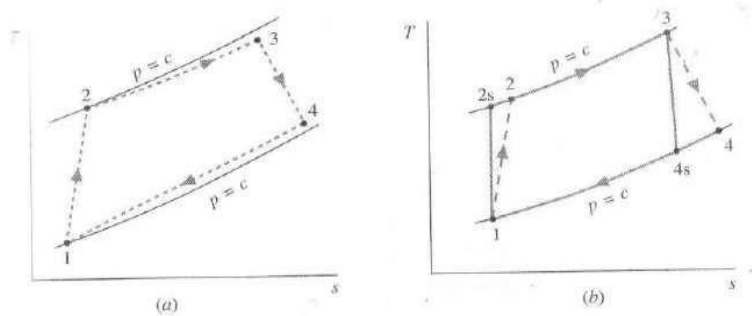
Efisiensi Termal Turbin Gas Ideal :

$$\eta_{tg} = \frac{(w_t - w_c)}{q_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.16)$$

Heat rate turbin gas Ideal :

$$Heat\ rate\ GT = \frac{q_{in}}{W_{nett}} \dots\dots\dots (2.17)$$

2.2.1.6 Siklus *Brayton* Aktual



Gambar 2. 8 Siklus *Brayton* Aktual

(Sumber: Boles, 2006)

Meningkatnya tingkat irreversibilitas pada komponen turbin maupun kompresor mengakibatkan berkurangnya output kerja yang dapat dihasilkan turbin, sekaligus membuat kebutuhan kerja pada kompresor menjadi lebih besar. Kondisi ini mengakibatkan daya bersih (*netto*) sistem mengalami penurunan. Agar mesin pembangkit dapat menghasilkan daya *netto* yang optimal, diperlukan efisiensi turbin dan kompresor yang relatif tinggi sehingga kerugian energi akibat irreversibilitas dapat diminimalkan.

Setelah diperoleh nilai entalpi udara pada sisi masuk dan keluar kompresor, efisiensi kompresor dapat dihitung menggunakan persamaan yang sesuai. Langkah ini bertujuan untuk menentukan besarnya efisiensi kompresor aktual.

$$\eta_c = \frac{(h_{2'} - h_1)}{(h_2 - h_1)} \times 100\% \quad (2.18)$$

Kompresor dan generator digerakkan oleh turbin gas. Untuk mengetahui efisiensi turbin gas, maka harus membandingkan daya yang dibutuhkan oleh generator dengan daya *netto* yang dihasilkan. Ini ditunjukkan dalam suatu persamaan. Mencari nilai efisiensi Turbin aktual:

$$\eta_t = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_{4'})} \times 100\% \quad (2.19)$$

Pada langkah 1-2, perhitungan proses kompresi dilakukan ketika udara atmosfer masuk ke dalam sistem turbin gas melalui sisi *inlet* kompresor. Ketika udara dikompresi oleh kompresor, suhu udara keluar dari kompresor menjadi lebih tinggi dan efisiensi kompresor menjadi lebih rendah, yang menghasilkan peningkatan kerja yang diperlukan.

Oleh karena itu, rumus berikut dapat digunakan untuk menemukan jumlah kerja yang dibutuhkan.

$$W_{ca} = \frac{\dot{m}_{air} \times (h_2 - h_1)}{\eta_c} \dots\dots\dots (2.20)$$

Mencari Efisiensi *Combustor* :

$$\eta_{comb} = \frac{T_2 - T_3}{T_2' - T_3} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.21)$$

Turbin gas digunakan untuk menggerakkan kompresor serta memutar generator. Efisiensi turbin gas dihitung dengan membandingkan daya yang diperlukan oleh generator dengan daya *netto* yang dihasilkan, dinyatakan dalam suatu persamaan.

$$W_{ta} = \dot{m}_{flue\ bb} \times (h_3 - h_4) \times \eta_t \dots\dots\dots (2.22)$$

Menghitung kerja *netto* aktual:

$$W_{netto\ actual} = W_{ta} - W_{ca} \dots\dots\dots (2.23)$$

Back Work Rasio:

$$Bwt_{aktual} = \frac{w_{ca}}{w_{ta}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.24)$$

Mencari efisiensi termal turbin gas aktual:

$$\eta_{ttg} = \frac{(w_{ta} - w_{ca})}{\dot{Q}_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.25)$$

Heat rate netto aktual:

Besar energi yang digunakan oleh unit pembangkitan dalam memproduksi satu unit output atau per kWh –nya dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$Heat\ rate\ netto_{actual} = \frac{\dot{Q}_{in}}{w_{netto\ actual}} \dots\dots\dots (2.26)$$

2.2.1.7 Sankey Diagram

Sankey Diagram merupakan metode visualisasi yang digunakan untuk menggambarkan aliran energi, massa, atau sumber daya dalam suatu sistem secara kuantitatif, di mana ketebalan garis aliran berbanding lurus dengan besaran energi atau kuantitas yang mengalir. Diagram ini disusun berdasarkan hasil perhitungan neraca energi

atau massa, sehingga mampu merepresentasikan distribusi energi dari sisi input hingga output secara sistematis. Dalam kajian teknik, *Sankey Diagram* banyak digunakan untuk memvisualisasikan hubungan antarproses dalam sistem yang kompleks, karena mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai perpindahan dan pemanfaatan energi. Dalam sistem pembangkit listrik, *Sankey Diagram* digunakan untuk menganalisis distribusi energi dan mengidentifikasi kerugian energi (*energy losses*) pada setiap komponen utama sistem. Visualisasi ini mempermudah evaluasi efisiensi termal dengan menunjukkan proporsi energi yang dikonversi menjadi energi berguna serta energi yang hilang selama proses konversi.

2.2.2 Hukum Termodinamika

2.2.2.1 Hukum Termodinamika Pertama

Hukum pertama termodinamika, yang sering disebut sebagai hukum kekekalan energi, menegaskan bahwa energi tidak dapat dibuat atau dihilangkan, tetapi hanya mengalami perubahan bentuk. Pada sistem turbin gas beroperasi dalam kondisi terbuka, prinsip ini digunakan sebagai dasar untuk menghitung keseimbangan energi, yakni hubungan antara panas yang diterima, kerja yang dikeluarkan turbin, serta perubahan entalpi pada fluida kerjanya. Secara matematis, hubungan tersebut ditulis sebagai:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(h_{out} - h_{in}) \dots\dots\dots (2.28)$$

Artinya, selisih antara panas yang disuplai dan kerja yang dihasilkan setara dengan perubahan energi internal fluida (Yunus A. Cengel, 2015).

Hukum termodinamika pertama digunakan untuk menghitung efisiensi termal dengan membandingkan energi keluaran dengan energi masukan. Efisiensi thermal dapat mendeskripsikan bagaimana sebuah sistem atau perangkat dapat menggunakan energi dengan cara yang paling efisien. Sehingga dengan kerja yang minimal dapat diperoleh hasil yang maksimal, sehingga dapat mengurangi pemborosan energi (Muhammad Ridwan, 2024)

Dalam konteks PLTG Muara Karang, hukum ini sangat relevan karena perubahan komposisi bahan bakar seperti gas PHE (Pertamina Hulu Energi), NR (Natural Gas-LNG), dan campurannya akan memengaruhi nilai kalor pembakaran (*heating value*) serta

entalpi keluaran hasil pembakaran. Variasi tersebut berdampak langsung pada jumlah energi panas yang tersedia untuk dikonversi menjadi kerja mekanik turbin, sehingga memengaruhi efisiensi termal sistem secara keseluruhan (Yunus A. Cengel, 2015).

2.2.3 Bahan Bakar dan Pembakaran

Berikut merupakan karakteristik masing-masing jenis bahan bakar yang digunakan, berdasarkan data yang tersedia dari *Performance Test* :

2.2.3.1 Karakteristik Bahan Bakar PHE

Bahan bakar gas PHE (Pertamina Hulu Energi) merupakan bagian penting dalam produksi migas nasional Indonesia. PHE berkontribusi besar dalam pengelolaan blok minyak dan gas dengan fokus pada transisi energi bersih melalui inovasi dalam penggunaan bahan bakar gas yang ramah lingkungan. PHE berkontribusi sebesar sekitar 37 % terhadap produksi gas nasional, sambil terus mengejar proyek eksplorasi dan monetisasi lapangan baru sebagai bagian dari strategi transisi energi. Komposisi gas PHE didominasi oleh metana (CH_4) dengan kandungan hidrokarbon lainnya dalam jumlah yang lebih kecil, sehingga memiliki nilai kalor yang tinggi dan efisiensi pembakaran yang baik (Pertamina, 2024).

Gas dari PHE ini disalurkan melalui pipa khusus yang mengalirkan gas alam bumi hasil eksplorasi dan produksi PHE ke pembangkit listrik tersebut. Gas ini memiliki karakteristik yang cukup stabil dan memiliki kandungan energi yang sesuai untuk mendukung pembangkitan listrik secara efisien di Muara Karang. Selain itu, pasokan dari PHE membantu menjaga kontinuitas operasi pembangkit, sehingga suplai listrik dapat memenuhi kebutuhan wilayah Jabodetabek dengan handal. Dengan adanya pipa gas PHE yang terintegrasi, PLTG Muara Karang dapat memanfaatkan bahan bakar gas berkualitas tanpa ketergantungan pada sumber lain secara penuh, yang membuat pengelolaan pasokan energi menjadi lebih fleksibel dan efisien.

Berikut ini adalah indikator kualitas bahan bakar PHE dari hasil Performance Test PLTGU Muara Karang Blok 1, diketahui bahwa persentase metana sangat mempengaruhi kualitas pembakaran, dimana semakin tinggi kandungan metana dari suatu bahan bakar maka efisiensinya akan lebih tinggi.

a. PHE Gas Composition

Tabel 2. 1 Komposisi bahan bakar PHE Gas Composition

Komposisi	Rumus	% Mol	Units	Ratio % Mol
Propane	C ₃ H ₈	8,833	% Mol	0,42135504
i-Butane	C ₄ H ₁₀	1,8388	% Mol	0,08771512
n-Butane	C ₄ H ₁₀	2,2225	% Mol	0,10601852
i-Pentane	C ₅ H ₁₂	0,7973	% Mol	0,0380331
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	0,572	% Mol	0,02728576
Carbon Dioxide	CO ₂	10,6565	% Mol	0,50834032
Ethane	C ₂ H ₆	6,9115	% Mol	0,32969494
Nitrogen	N ₂	1,1727	% Mol	0,05594057
Methane	CH ₄	66,5334	% Mol	3,17380094
C ₆ +		0,4622	% Mol	0,022048036
N-Hexane	C ₆ H ₁₄	0	% Mol	0
N-Heptane	C ₇ H ₁₆	0	% Mol	0
N-Octane	C ₈ H ₁₈	0	% Mol	0
TOTAL		100,00	% Mol	4,77

Sumber: Form *Performance Test* PLTGU Muara karang Blok 1

2.2.3.2 Karakteristik Bahan Bakar NR

Gas alam, atau yang sering disebut sebagai Natural Gas (NR), merupakan sumber energi yang sangat penting dalam industri energi global. Gas ini terdiri dari campuran hidrokarbon, terutama metana, dan dapat ditemukan dalam bentuk gas atau cair (LNG). LNG merupakan gas alam yang didinginkan hingga mencapai suhu kriogenik sehingga berubah fase menjadi cair. Pada kondisi ini, volumenya menyusut sekitar 600 kali,

membuat proses penyimpanan dan pengangkutannya jauh lebih efisien. LNG menjadi opsi yang menarik karena dapat dikirim menggunakan kapal tanker ke wilayah yang belum memiliki jaringan pipa, sehingga distribusi energi dapat menjangkau area yang lebih luas. Secara global, kebutuhan terhadap LNG diprediksi terus meningkat, terutama di negara-negara yang berupaya mengurangi penggunaan batu bara dan mendorong pemanfaatan sumber energi yang lebih bersih (Pereira et al., 2023).

Gas NR (Nusantara Regas) atau LNG berperan besar dalam suplai bahan bakar PLTG Muara Karang melalui proses regasifikasi yang dilakukan oleh fasilitas FSRU Nusantara Regas. LNG yang sebelumnya disimpan dalam bentuk cair kemudian diubah menjadi gas dan disalurkan ke pembangkit untuk memenuhi kebutuhan energi yang tinggi.

b. NR 350 Gas Composition

Tabel 2. 2 Komposisi bahan bakar NR 350 Gas Composition

Komposisi	Rumus	% Mol	Units	Ratio % Mol
Propane	C ₃ H ₈	0,4522	% Mol	0,430628988
i-Butane	C ₄ H ₁₀	0,0832	% Mol	0.079231163
n-Butane	C ₄ H ₁₀	0,1035	% Mol	0,098562805
i-Pentane	C ₅ H ₁₂	0,0208	% Mol	0,019807791
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	0,0073	% Mol	0,006951773
Carbon Dioxide	CO ₂	0	% Mol	0
Ethane	C ₂ H ₆	2,1171	% Mol	2,01610931
Nitrogen	N ₂	0,1891	% Mol	0,180079482
Methane	CH ₄	97,0268	% Mol	92,39839057
C ₆ +		0	% Mol	0
N-Hexane	C ₆ H ₁₄	0	% Mol	0
N-Heptane	C ₇ H ₁₆	0	% Mol	0
N-Octane	C ₈ H ₁₈	0	% Mol	0
TOTAL		100,00	% Mol	95,23

Sumber: Form *Performance Test* PLTGU Blok 1

2.2.3.3 Karakteristik Bahan Bakar PHE + NR

Di PLTGU Muara Karang Blok 1, penggunaan campuran bahan bakar antara gas PHE dan gas NR (LNG) telah menjadi strategi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi operasional, menjaga stabilitas pasokan dan mengurangi emisi. Kombinasi kedua jenis gas ini memungkinkan pembangkit untuk memanfaatkan keunggulan masing-masing, di mana gas PHE memberikan pasokan yang stabil dan terjangkau, sementara LNG menawarkan fleksibilitas dalam hal penyimpanan dan transportasi. Dengan memanfaatkan kedua sumber ini, PLTGU Muara Karang dapat beroperasi dengan lebih efisien, mengoptimalkan biaya operasional, dan memenuhi permintaan energi yang terus meningkat.

Selain itu, pemanfaatan campuran bahan bakar tersebut sejalan dengan program transisi menuju energi yang lebih ramah lingkungan. Dengan menekan penggunaan bahan bakar fosil yang memiliki tingkat polusi lebih tinggi, PLTGU Muara Karang turut membantu menurunkan emisi gas rumah kaca serta mengurangi pencemaran udara. Implementasi teknologi pemantauan emisi yang ketat juga memastikan bahwa pembangkit ini beroperasi dalam batasan yang ditetapkan oleh regulasi lingkungan. Dengan demikian, campuran bahan bakar PHE dan NR di PLTGU Muara Karang Blok 1 tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga berperan penting dalam mencapai tujuan keberlanjutan energi di Indonesia (Sukendar et al., 2024).

2.2.3.4 Reaksi Pembakaran

Proses pembakaran merupakan tahapan yang sangat penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) karena pada tahap ini energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar gas seperti PHE maupun NR akan dikonversi menjadi energi panas yang digunakan untuk menghasilkan energi mekanik pada turbin. Efisiensi dan kestabilan proses pembakaran secara langsung memengaruhi kemampuan sistem dalam mengubah energi panas menjadi kerja serta menentukan tingkat efisiensi termal dan performa keseluruhan pembangkit listrik. Gas PHE NR terdiri dari metana (CH_4) sebagai komponen utama (sekitar 85-95%), dengan sedikit etana, propana, dan nitrogen, yang memberikan nilai kalor tinggi sekitar 50 MJ/kg. Dalam turbin gas, pembakaran terjadi di ruang bakar (*combustor*) pada suhu tinggi (1.200–1.500°C), di mana gas LNG

dicampur dengan udara terkompresi untuk menghasilkan gas panas yang mendorong turbin. Proses ini mengikuti reaksi eksotermik: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{panas}$, yang efisien karena LNG memiliki pembakaran yang bersih dengan emisi rendah jika dibandingkan bahan bakar fosil lainnya (Yunus A. Cengel, 2015).

Proses pembakaran gas PHE NR di PLTG melibatkan beberapa tahap, mulai dari injeksi bahan bakar, pencampuran dengan udara, dan pembakaran yang stabil untuk menghindari fluktuasi api atau pembentukan NO_x . Salah satu karakteristik utama adalah temperatur aliran gas keluar dari ruang bakar yang dalam banyak kasus dapat mencapai lebih dari 1 500 °C (tergantung desain) sebelum memasuki turbin. Selain itu, rasio udara terhadap bahan bakar (air-fuel ratio), kondisi pencampuran udara-bahan bakar, serta tekanan dan kondisi termodinamik lainnya sangat menentukan terjadinya pembakaran yang sempurna dan meminimalkan pembentukan polutan seperti NO_x . Keunggulan pemanfaatan gas alam (NR) untuk pembangkit listrik tenaga gas terletak pada efisiensi termal yang lebih tinggi dan emisi yang lebih rendah dibandingkan pembakaran batu bara atau minyak. Untuk optimasi, pembakaran gas PHE NR dapat ditingkatkan melalui campuran dengan hidrogen atau penyesuaian persentase, untuk mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi.

2.2.3.5 Parameter Pembakaran

Proses pembakaran di ruang bakar turbin gas sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter operasional, di antaranya suhu udara masuk, tekanan ruang bakar, rasio udara terhadap bahan bakar (air-fuel ratio), serta pola distribusi udara ke zona pembakaran, recirculation, dan dilusi. Peningkatan suhu udara masuk terbukti meningkatkan suhu di ruang bakar yang berakibat pada naiknya konsentrasi emisi nitrogen oksida (NO_x). Hal ini disebabkan oleh meningkatnya energi kinetik partikel sehingga reaksi oksidasi nitrogen berlangsung lebih intensif pada temperatur tinggi. Variasi tekanan inlet dan suhu inlet memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi pembakaran dan karakteristik emisi. Ketika suhu udara masuk mencapai sekitar 600 K dan tekanan sekitar 3,5 bar, efisiensi pembakaran cenderung meningkat, tetapi di sisi lain emisi gas NO_x juga naik akibat peningkatan temperatur lokal di ruang bakar. Oleh karena itu, pengendalian parameter inlet menjadi aspek penting dalam perancangan dan pengoperasian sistem

pembakaran agar diperoleh keseimbangan antara efisiensi termal dan batas emisi (Mohsen , Hamidreza, 2019).

Selain parameter termodinamika, karakteristik geometrik dan dinamika aliran dalam ruang bakar juga memiliki pengaruh yang besar terhadap hasil pembakaran. kecepatan referensi aliran udara dan waktu tinggal (residence time) memengaruhi bentuk nyala api, zona pencampuran, serta tingkat kesempurnaan reaksi kimia. Nilai rasio kelebihan udara yang optimal akan memastikan proses pembakaran berlangsung mendekati sempurna, sehingga menekan pembentukan karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon tak terbakar, sekaligus mengurangi kerugian energi akibat gas buang yang masih mengandung bahan bakar. (Shufan et al., 2023).

2.2.3.6 Penggunaan Bahan Bakar Spesifik (SFC)

Bahan Bakar Spesifik (*Specific fuel consumption* atau SFC) adalah salah satu parameter utama untuk menilai tingkat efisiensi proses pembakaran pada turbin gas di PLTG. Nilai ini menunjukkan seberapa banyak bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan daya keluaran, sehingga dapat menggambarkan kemampuan mesin dalam mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik maupun energi listrik. Mesin pembangkit dikatakan hemat ketika nilai efisiensi SFC rendah, karena lebih sedikit bahan bakar yang dibutuhkan untuk daya yang sama (Edy Susanto, Noel, 2025).

Dalam konteks PLTGU seperti Muara Karang Blok 1, SFC digunakan untuk mengevaluasi performa operasional, membandingkan jenis bahan bakar (misalnya gas PHE vs. LNG), dan mengoptimalkan konsumsi energi.

$$SFC = m/P \dots\dots\dots (2.29)$$

Keterangan:

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

m : Tingkat pemakaian bahan bakar (gr/h)

P : Daya yang diekluarkan dalam (kW)

Pada rumus diatas menunjukan bahwa mencari *SFC* terdapat dua paramater yaitu besarnya bahan bakar dan daya yang dikeluarkan oleh pembangkit. Dalam praktik, SFC

diukur melalui sensor aliran bahan bakar dan meter daya (*Flowmeter*) selama uji coba atau operasi rutin, dan sering kali disesuaikan dengan kondisi lingkungan seperti suhu dan tekanan.

2.2.3.7 Hukum Campuran Gas

Landasan utama dalam konsep pencampuran gas adalah Hukum Tekanan Parsial Dalton. Prinsip ini menjelaskan bahwa tekanan total dari suatu campuran gas ideal merupakan penjumlahan tekanan parsial setiap komponen, di mana masing-masing gas dianggap memberikan tekanannya sendiri seakan-akan menempati seluruh volume campuran pada suhu yang sama. Hukum campuran gas menjelaskan hubungan antara sifat-sifat termodinamika campuran gas ideal, seperti tekanan, temperatur, dan volume, yang berlaku ketika dua atau lebih gas dicampurkan tanpa terjadi reaksi kimia. Setiap komponen gas di dalam campuran ideal dianggap menempati seluruh volume sistem dan memberikan kontribusi tekanan parsial sesuai dengan hukum Dalton, yaitu $P_{total} = \sum P_i$. Tekanan parsial masing-masing komponen gas ditentukan oleh fraksi mol dan tekanan totalnya, dengan rumus $P_i = y_i \cdot P_{total}$, di mana y_i adalah fraksi mol komponen ke- i . Prinsip ini digunakan dalam analisis pembakaran turbin gas untuk menghitung komposisi campuran bahan bakar dan udara, yang kemudian memengaruhi rasio stoikiometri serta temperatur pembakaran yang dihasilkan (Moran, Shapiro, 2020).

2.2.4 Simulasi dan Optimasi

Seperti yang telah ditetapkan pada judul, adapun metode simulasi uji feforma persentase bahan bakar yang akan disumulasikan menggunakan *Software* dibawah ini yaitu :

2.2.4.1 *Software* Yang Digunakan



Gambar 2. 9 *Software* Simulasi

Gambar 2.9 menunjukkan tampilan antarmuka awal perangkat lunak simulasi DWSIM yang digunakan dalam penelitian ini sebagai alat pemodelan sistem termodinamika. DWSIM merupakan perangkat lunak simulasi proses kimia yang bersifat open-source, dikembangkan oleh tim pengembang independen di bawah lisensi GPL (General Public License). Perangkat lunak ini pertama kali dirilis pada tahun 2007 oleh Daniel Wagner, seorang insinyur kimia dari Brasil, dan telah berkembang menjadi alat yang handal untuk simulasi termodinamika, aliran fluida, dan proses energi. Dalam konteks skripsi teknik mesin atau energi, DWSIM sering digunakan untuk memodelkan siklus termodinamika seperti siklus *Brayton*, yang merupakan dasar operasi turbin gas di PLTG. Dalam literatur akademik, DWSIM telah digunakan dalam berbagai penelitian, termasuk simulasi pembangkit listrik berbasis gas, yang menunjukkan akurasi dalam memprediksi efisiensi dan performa sistem (Wagner, 2018).

Salah satu kekuatan DWSIM adalah kemampuannya untuk mensimulasikan proses termodinamika secara rinci, termasuk kompresi, ekspansi, dan pertukaran panas, yang sangat relevan dengan siklus *Brayton* ideal dan aktual. Pengguna dapat memodelkan komponen seperti kompresor, turbin, ruang bakar, dan heat exchanger dengan mudah. Selain itu, DWSIM dilengkapi dengan alat analisis sensitivitas dan optimasi, yang memungkinkan pengguna untuk menjalankan simulasi variasi parameter seperti perubahan suhu atau tekanan untuk melihat dampaknya terhadap efisiensi termal. Dengan fitur analisis sensitivitas, pengguna dapat mengeksplorasi bagaimana variasi komposisi bahan bakar (misalnya, persentase metana dalam campuran) mempengaruhi emisi CO₂ dan efisiensi, yang relevan dengan data PHE dan NR (Hassan & Manji, 2023).