

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) berperan penting dalam mendukung kebijakan diversifikasi energi nasional berbasis gas alam sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap batu bara. Pemerintah Indonesia melalui program 35.000 MW telah mendorong pembangunan sejumlah pembangkit listrik berbasis *combined cycle* di berbagai wilayah. Salah satu proyek strategis di antaranya adalah pembangunan PLTGU X di kawasan pesisir utara Pulau Jawa. Pembangkit ini dioperasikan oleh konsorsium antara perusahaan energi nasional dan mitra internasional dengan skema kontrak jangka panjang untuk penyediaan tenaga listrik ke sistem transmisi Jawa–Bali. Proyek tersebut merupakan bagian dari inisiatif *Integrated LNG to Power*, di mana gas alam cair (*Liquefied Natural Gas*/LNG) diregasifikasi dan digunakan langsung sebagai bahan bakar utama turbin gas.

Pembangkit *combined cycle* yang menjadi objek penelitian ini memiliki kapasitas produksi listrik bersih sekitar 850 MW per blok, dengan konfigurasi dua blok sistem sehingga total kapasitas mencapai sekitar 1.700 MW. Daya listrik ini cukup untuk memasok kebutuhan jutaan pelanggan di Pulau Jawa dan menjadi salah satu tulang punggung sistem kelistrikan nasional. Sistem pembangkit ini menggunakan kombinasi turbin gas (*Gas Turbine*/GT), *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG), dan turbin uap (*Steam Turbine*/ST) yang saling terintegrasi. Panas buang dari turbin gas dimanfaatkan oleh HRSG untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang kemudian menggerakkan turbin uap. Dengan prinsip ini, energi yang sebelumnya terbuang dapat dimanfaatkan kembali sehingga meningkatkan efisiensi termal keseluruhan sistem.

Unit PLTGU yang menjadi objek penelitian beroperasi dengan konfigurasi *single shaft*, di mana turbin gas, turbin uap, dan generator digabungkan dalam satu poros mekanis yang sama. Desain ini berbeda dengan sistem *multi shaft* yang menggunakan generator terpisah pada masing-masing turbin. Konfigurasi *single shaft* memiliki keunggulan efisiensi mekanis yang lebih tinggi karena kehilangan

daya akibat kopling antar poros dapat diminimalkan. Selain itu, sistem ini memiliki *footprint* instalasi yang lebih kompak, stabilitas beban yang lebih baik, dan kontrol sinkronisasi daya yang lebih cepat.

Dalam sistem ini, turbin gas berperan sebagai penggerak utama yang mengonversi energi panas hasil pembakaran menjadi energi mekanik yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Kinerja dan efisiensi termal turbin gas sangat bergantung pada kondisi operasi, salah satunya variasi beban kerja (*load variation*). Pada setiap tingkat beban, terjadi perubahan signifikan pada laju aliran bahan bakar, tekanan ruang bakar, temperatur gas buang, serta rasio udara-bahan bakar yang pada akhirnya memengaruhi efisiensi termal turbin gas.

Secara umum, efisiensi termal turbin gas akan meningkat hingga mencapai beban optimum dan kemudian cenderung menurun pada beban maksimum akibat meningkatnya kerja kompresor dan kehilangan panas pada sistem pembakaran. Oleh karena itu, analisis performa turbin gas pada berbagai tingkat beban menjadi hal penting untuk mengetahui titik operasi yang memberikan efisiensi terbaik serta menjadi dasar dalam pengambilan keputusan operasional pembangkit.

Salah satu inovasi penting dalam sistem PLTGU modern adalah penerapan *Evaporative Cooling System*, yaitu sistem pendingin udara masuk (*inlet air cooling system*) yang berfungsi untuk menurunkan temperatur udara sebelum masuk ke kompresor turbin gas. Dengan menurunkan suhu udara masuk sebesar 5-10°C, densitas udara akan meningkat sehingga jumlah massa udara yang masuk ke ruang bakar bertambah. Kondisi ini berkontribusi pada peningkatan efisiensi pembakaran dan daya keluaran bersih turbin gas. Sistem ini terbukti efektif terutama pada iklim tropis seperti Indonesia, di mana suhu lingkungan tinggi dan kelembapan relatif besar sering menyebabkan penurunan efisiensi turbin gas pada siang hari.

Efektivitas sistem *Evaporative Cooling* tidak hanya bergantung pada kondisi udara ambien, tetapi juga pada tingkat beban turbin gas. Pada beban rendah, peningkatan efisiensi akibat pendinginan cenderung kecil karena massa udara kompresor relatif rendah, sedangkan pada beban tinggi pendinginan udara masuk

menjadi faktor krusial untuk mempertahankan efisiensi. Oleh karena itu, penting untuk meninjau secara empiris bagaimana variasi beban memengaruhi efektivitas sistem *Evaporative Cooling* terhadap efisiensi termal turbin gas.

Meskipun banyak penelitian sebelumnya menyoroti pengaruh variasi temperatur udara masuk terhadap efisiensi termal turbin gas, kajian mengenai bagaimana *Evaporative Cooler* memengaruhi efisiensi termal turbin gas berdasarkan variasi beban operasi aktual masih terbatas. Padahal, pada kondisi beban berbeda, respons termodinamika sistem juga berubah, baik dari sisi konsumsi bahan bakar, tekanan kompresor, maupun rasio panas buang terhadap daya keluaran. Oleh karena itu, pengujian kinerja turbin gas pada berbagai level beban menjadi penting untuk memperoleh pemahaman menyeluruh mengenai hubungan antara beban operasi dan efisiensi termal turbin gas, baik pada saat *Evaporative Cooler* beroperasi maupun tidak beroperasi.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh variasi beban operasi terhadap efisiensi termal turbin gas pada sistem PLTGU berkonfigurasi *single shaft*. Analisis dilakukan berdasarkan data operasional aktual pada dua kondisi, yaitu *Evaporative Cooler* beroperasi dan tidak beroperasi, dengan tiga titik beban operasi yang mewakili rentang beban parsial hingga mendekati beban penuh pada 670,700, dan 730 MW.

Selain analisis kuantitatif berbasis parameter efisiensi, pemahaman kinerja turbin gas juga memerlukan pendekatan visual yang mampu menggambarkan distribusi energi secara menyeluruh. Salah satu pendekatan yang umum digunakan dalam analisis sistem energi adalah diagram Sankey, yang merepresentasikan aliran dan proporsi energi dari sumber hingga keluaran dan kehilangan energi. Dalam konteks penelitian ini, diagram Sankey digunakan sebagai alat bantu visual untuk memperjelas hasil analisis utama terkait perubahan distribusi energi akibat variasi beban dan kondisi pengoperasian evaporative cooler.

Melalui pendekatan ini, diharapkan penelitian dapat memberikan gambaran empiris mengenai bagaimana variasi beban memengaruhi efisiensi termal turbin gas

serta seberapa besar kontribusi sistem *Evaporative Cooling* dalam menjaga efisiensi tersebut pada berbagai kondisi beban. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan sejauh mana penerapan *evaporative cooler* mempengaruhi kecenderungan perubahan efisiensi termal dan *heat rate* turbin gas pada kondisi beban menengah hingga mendekati beban tinggi khususnya di wilayah beriklim tropis seperti Indonesia yang memiliki karakteristik suhu dan kelembapan tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Efisiensi turbin gas merupakan salah satu parameter utama yang menentukan kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU). Perubahan beban operasi (*load variation*) menyebabkan perubahan signifikan pada kondisi termodinamika, seperti laju aliran bahan bakar, temperatur gas buang, tekanan kompresor, dan rasio udara-bahan bakar, yang secara langsung memengaruhi efisiensi sistem.

Selain itu, pengoperasian *Evaporative Cooler* juga memberikan dampak terhadap performa turbin gas, karena sistem ini mampu menjaga kestabilan udara masuk kompresor terutama saat beban tinggi. Namun, hubungan kuantitatif antara variasi beban dan efisiensi turbin gas dengan mempertimbangkan kondisi *Evaporative Cooler ON* dan *OFF* belum banyak dikaji pada sistem *single shaft* di iklim tropis seperti Indonesia.

Berdasarkan hal tersebut, permasalahan utama yang akan dibahas dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi beban operasi turbin gas pada titik beban 670 MW, 700 MW, dan 730 MW terhadap parameter kinerja utama turbin gas, yang meliputi rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*), laju aliran massa campuran, efisiensi kompresor, efisiensi ruang bakar, efisiensi turbin, efisiensi termal turbin gas, dan *heat rate* pada kondisi *evaporative cooler* beroperasi dan tidak beroperasi?
2. Seberapa besar perubahan efisiensi yang terjadi ketika *Evaporative Cooler* dioperasikan dibandingkan saat tidak dioperasikan?

3. Pada titik beban operasi manakah dari ketiga titik yang dianalisis (670 MW, 700 MW, dan 730 MW) diperoleh kinerja turbin gas yang relatif paling efisien, ditinjau dari nilai efisiensi termal turbin gas dan *heat rate*, baik pada *evaporative cooler* beroperasi dan tidak beroperasi?
4. Sejauh mana penerapan *evaporative cooler* mempengaruhi kecenderungan perubahan efisiensi termal turbin gas dan *heat rate* turbin gas pada kondisi beban menengah hingga mendekati beban tinggi?

1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi beban operasi terhadap efisiensi turbin gas pada sistem PLTGU yang dilengkapi dengan *Evaporative Cooling System*.

Selain itu, tujuan-tujuan khusus yang ingin dicapai adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi beban operasi turbin gas pada titik beban 670 MW, 700 MW, dan 730 MW terhadap parameter kinerja utama turbin gas, yang meliputi *Air Fuel Ratio* (AFR), laju aliran massa campuran, efisiensi kompresor, efisiensi ruang bakar, efisiensi turbin, efisiensi termal turbin gas, dan *heat rate* pada kondisi *evaporative cooler* beroperasi dan tidak beroperasi.
2. Membandingkan perubahan efisiensi turbin gas pada dua kondisi operasi, yaitu *Evaporative Cooler* dioperasikan dan *Evaporative Cooler* tidak dioperasikan, untuk menilai kontribusi sistem pendinginan udara masuk terhadap peningkatan performa.
3. Mengidentifikasi titik beban operasi yang menunjukkan kinerja relatif paling efisien dari ketiga titik beban yang dianalisis, ditinjau dari nilai efisiensi termal turbin gas dan *heat rate*, baik pada kondisi *Evaporative Cooler* dioperasikan maupun *Evaporative Cooler* tidak dioperasikan.
4. Mengevaluasi pengaruh penerapan *evaporative cooler* terhadap kecenderungan perubahan efisiensi termal turbin gas dan *heat rate* turbin gas pada beban menengah hingga mendekati beban tinggi.

1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat dalam tiga aspek utama, yaitu akademik, praktis, dan lingkungan:

1. Manfaat Akademik

Penelitian ini memperkaya kajian ilmiah di bidang teknik energi, khususnya dalam analisis performa turbin gas pada sistem PLTGU dengan variasi beban operasi. Hasil penelitian dapat menjadi referensi akademik dalam studi optimasi efisiensi turbin gas melalui pengendalian beban dan pemanfaatan teknologi pendinginan udara masuk.

2. Manfaat Praktis

Dari sisi operasional, penelitian ini memberikan dasar evaluasi bagi operator pembangkit untuk menentukan strategi pengoperasian turbin gas yang paling efisien berdasarkan variasi beban aktual. Analisis ini juga dapat menjadi bahan pertimbangan dalam menyusun prosedur operasi standar (*Standard Operating Procedure/SOP*) dan program *performance monitoring* yang berbasis data aktual pada kondisi *Evaporative Cooler* dioperasikan dan tidak.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Agar pembahasan penelitian lebih terarah dan sesuai dengan batas kemampuan analisis, maka ruang lingkup masalah dalam penelitian ini ditetapkan sebagai berikut:

1. Objek Penelitian

Penelitian dilakukan pada salah satu unit Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) yang berlokasi di wilayah pesisir utara Pulau Jawa. Unit tersebut memiliki kapasitas sekitar 850 MW per blok dan beroperasi dengan bahan bakar gas alam (natural gas) pada konfigurasi *combined cycle single shaft*, di mana turbin gas, turbin uap, dan generator berada pada satu poros mekanis.

Analisis difokuskan pada turbin gas (GT) sebagai komponen utama yang mengalami perubahan efisiensi akibat variasi beban operasi pada kondisi *Evaporative Cooler* beroperasi dan tidak. Sistem pendingin udara masuk ini menjadi variabel penting karena secara langsung memengaruhi densitas udara kompresor, konsumsi bahan bakar, dan performa termodinamika siklus Brayton.

2. Data dan Parameter yang Digunakan

Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari rekaman data operasional harian (*daily operation data*) yang dicatat secara otomatis oleh sistem kontrol pembangkit (*Distributed Control System-DCS*).

Data tersebut diperoleh melalui kerja sama informatif dengan operator unit pembangkit dan mencakup parameter-parameter utama sebagai berikut:

- Daya keluaran generator (*Plant Gross Load*),
- Laju aliran bahan bakar gas (*mass fuel flow*),
- Laju aliran udara (*mass air flow*)
- Temperatur udara ambien dan temperatur udara masuk kompresor (*ambient air temperature* dan *compressor inlet temperature*),
- Temperatur gas buang (*exhaust temperature*),
- Tekanan keluar kompresor (*Compressor Pressure Discharge*)
- Rasio kompresi kompresor (*Compressor Pressure Ratio*)
- Sudut bukaan inlet (*Inlet Guide Vane*)
- Laju aliran air pendingin pada sistem *Evaporative Cooling*.

Analisis dilakukan pada beberapa variasi beban operasi antara 670, 700, dan 730 MW yang mewakili kondisi dari beban parsial hingga mendekati beban penuh. Dengan demikian, analisis dilakukan secara komparatif berdasarkan data operasional aktual.

3. Batasan Analisis

- Fokus utama penelitian diarahkan pada analisis pengaruh variasi beban operasi terhadap efisiensi termal pada sistem turbin gas (η_{gtg}) pada dua

kondisi operasi, yaitu *Evaporative Cooler* beroperasi dan *Evaporative Cooler* tidak beroperasi.

- Selain analisis utama berbasis variasi beban, penelitian ini juga menyertakan pendekatan analitis tambahan untuk memberikan kedalaman teknis terhadap hasil utama, meliputi:
 - Efisiensi sistem utama siklus gas meliputi efisiensi kompresor, efisiensi ruang bakar, dan efisiensi turbin berdasarkan kondisi ideal dan aktualnya.
 - Analisis *heat rate* sebagai indikator kinerja energi sistem, yang merepresentasikan jumlah energi panas dari bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik.

Analisis tambahan ini bersifat pendukung (informasi tambahan) untuk memperkaya pemahaman hasil utama penelitian, bukan sebagai variabel pokok.

- Diagram Sankey digunakan sebagai analisis pendukung untuk memvisualisasikan neraca energi sistem turbin gas berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan. Diagram ini tidak digunakan sebagai dasar perhitungan kinerja utama, melainkan sebagai representasi visual untuk memperkuat interpretasi hasil analisis efisiensi.
- Penelitian ini tidak membahas efisiensi total siklus *combined cycle* yang melibatkan sistem HRSG dan turbin uap, melainkan hanya terbatas pada sistem turbin gas (GT) dan analisis termal blok pada tingkat turbin gas.
- Data yang digunakan merupakan hasil pembacaan sensor otomatis dari sistem kontrol pembangkit (DCS), dan telah diseleksi untuk memastikan kestabilan beban serta keandalan data.
- Penelitian ini tidak melakukan eksperimen langsung di lapangan, melainkan menganalisis data aktual yang diperoleh melalui komunikasi resmi dengan pihak operator.

Dengan ruang lingkup tersebut, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan analisis yang fokus, komprehensif, dan aplikatif dalam

menjelaskan hubungan antara variasi beban operasi dan efisiensi pada sistem turbin gas, baik pada *Evaporative Cooler* beroperasi maupun tidak.

1.6 Kebaharuan

Penelitian berfokus pada analisis kinerja turbin gas yang dilakukan berdasarkan data operasional aktual pada beberapa variasi beban yang merepresentasikan kondisi operasi aktual pembangkit. Penelitian ini secara khusus membandingkan kinerja turbin gas pada tiga titik beban, yaitu 670 MW, 700 MW, dan 730 MW, dengan mempertimbangkan kondisi *evaporative cooler* beroperasi dan tidak beroperasi. Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih nyata mengenai perilaku sistem pada kondisi beban menengah hingga mendekati beban tinggi.

Selain itu, penelitian ini tidak hanya meninjau efisiensi termal pada siklus brayton saja, tetapi juga menganalisis parameter kinerja utama turbin gas secara lebih rinci, seperti *Air Fuel Ratio*, laju aliran massa gas, efisiensi kompresor, efisiensi ruang bakar, efisiensi turbin, serta heat rate. Analisis yang dilakukan secara menyeluruh ini memungkinkan pemahaman yang lebih jelas mengenai bagaimana variasi beban dan kondisi udara masuk mempengaruhi perubahan efisiensi sistem.

Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada penggabungan analisis kinerja komponen dan efisiensi sistem secara terintegrasi menggunakan data aktual pembangkit, sehingga hasil yang diperoleh lebih mencerminkan kondisi operasi nyata dibandingkan pendekatan yang hanya berbasis simulasi atau satu titik beban saja.