

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem kelistrikan Indonesia memiliki total pembangkitan listrik sebesar 100,69 GW pada akhir tahun 2024 . Konfigurasi pembangkit ini terdiri dari beragam jenis teknologi dengan porsi yang bervariasi. Berdasarkan data kapasitas terpasang masih didominasi oleh pembangkit listrik berbasis energi fosil dengan rincian sebagai berikut: Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara sebesar 53%, diikuti oleh Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) sebesar 27%, dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) sebesar 5%. Maka sektor bahan bakar fosil secara keseluruhan menyumbang sekitar 85% dari total listrik nasional. Di sisi energi terbarukan, total kapasitas terpasang dari pembangkit EBT mencapai 14.277 Megawatt (MW) atau sekitar 14,28 GW dengan rincian sebagai berikut: Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) 7.270,75 MW, Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) sebesar 2.458,95 MW, Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm) 3.470,67 MW, dan berbagai jenis pembangkit EBT lainnya seperti PLTS, PLTB, dan PLTMH (Kementerian ESDM, 2025).

Di Indonesia, sistem kelistrikan menghadapi tantangan unik terkait dengan fluktuasi permintaan energi. Karakteristik puncak beban yang fluktuatif karena adanya variasi permintaan listrik mengakibatkan perlunya pembangkit listrik yang dapat dioperasikan secara cepat dan handal dalam merespon perubahan beban di jaringan. Hal ini menyebabkan dispatching pada *part load* (beban parsial) menjadi keadaan operasional yang umum ditemui dalam jaringan listrik Indonesia untuk menstabilkan jaringan (Liebman -Monash et al., 2019).

Dalam manajemen beban dan stabilitas sistem tenaga listrik, pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) secara fundamental dioperasikan sebagai pembangkit beban dasar (*base load*). Karakteristik operasional PLTU yang memerlukan waktu *start-up* lama dan memiliki efisiensi termal tertinggi saat beroperasi mendekati kapasitas penuh secara kontinu menjadikannya ideal untuk memasok daya secara konstan. Di sisi lain, pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU) memegang peranan krusial sebagai pembangkit pengikut beban (*load follower*). Dengan kemampuan *ramping rate* yang cepat dan fleksibilitas operasional yang tinggi, PLTGU dapat secara efektif menyesuaikan daya keluarannya untuk merespons fluktuasi permintaan listrik, sehingga berfungsi untuk menjaga stabilitas frekuensi sistem pada nilai nominalnya (Coban & Lewicki, 2023).

Fleksibilitas operasional merupakan salah satu keunggulan utama turbin gas modern, seperti unit GE 9HA.02 dengan kapabilitas perubahan beban (*ramp rate*) hingga 88 MW/menit. Tingkat responsivitas yang tinggi ini berperan krusial dalam menjaga stabilitas jaringan. Meskipun demikian, terdapat konsekuensi efisiensi yang signifikan ketika turbin gas beroperasi pada beban parsial (*partial load*). Penurunan efisiensi termal pada kondisi ini disebabkan oleh penyimpangan operasi dari titik desain optimalnya (*off-design point*). Faktor-faktor penyebab utamanya meliputi peningkatan *excess air ratio* dalam sistem pembakaran dan ketidaksesuaian kondisi aerodinamis pada sudu-sudu kompresor dan turbin. Konsekuensi dari penurunan efisiensi ini adalah peningkatan konsumsi bahan bakar spesifik dan emisi per kWh yang dihasilkan, sehingga menjadi tantangan utama dalam optimalisasi operasional dan keekonomian pembangkit (Moliere et al., 2020).

Suhu udara masuk kompresor merupakan faktor penting yang memengaruhi keluaran dan efisiensi turbin gas serta efisiensi *combined cycle* (Basrawi et al., 2011). Terutama pada musim panas, keluaran daya dan efisiensi turbin gas mengalami penurunan signifikan karena kenaikan suhu lingkungan (De Sa & Al Zubaidy, 2011). Banyak pembangkit listrik turbin gas secara rutin menggunakan teknologi pendinginan udara masuk untuk meningkatkan kinerja turbin gas di seluruh dunia (Saghafifar & Gadalla, 2015). Suhu udara masuk kompresor dipengaruhi oleh efek variasi musiman atau teknologi pendinginan udara masuk, yang secara luas diteliti. Jenis lain dari teknologi penyesuaian suhu udara masuk, yaitu teknologi pemanasan udara masuk, juga telah diteliti. Penelitian awal tentang teknologi pemanasan udara masuk, yaitu pemanasan *Inlet Bleed Heating* (IBH), diusulkan oleh General Electric (GE) Corporation. IBH menggunakan udara buangan kompresor untuk memanaskan udara masuk, yang dapat menyebabkan penurunan efisiensi turbin gas. Selain itu, beberapa penelitian difokuskan pada pengaruh positif teknologi pemanasan udara masuk pada efisiensi *combined cycle* dalam kondisi beban parsial (Hua Zhang & David Wesley Ball, 2011).

Penelitian yang dilakukan di Slovakia mengkaji kinerja beban parsial pada sebuah PLTGU 80 MW dan mengidentifikasi metode pemanasan udara masuk turbin gas sebagai cara yang paling efektif untuk penghematan bahan bakar. Berlawanan dengan konsep umum pendinginan udara masuk untuk operasi beban penuh, studi ini membuktikan bahwa pada mode beban parsial, menaikkan suhu udara masuk justru lebih menguntungkan. Mekanismenya adalah suhu udara masuk yang lebih tinggi menyebabkan lebih banyak uap bertekanan tinggi dihasilkan di HRSG, yang kemudian meningkatkan *output* turbin uap, sehingga kebutuhan bahan bakar di turbin gas bisa dikurangi untuk mencapai output daya total yang sama.

Berdasarkan data operasional, penelitian ini menemukan bahwa konsumsi gas alam dapat berkurang sebesar 13 m³/jam untuk setiap kenaikan 1°C suhu udara masuk. Secara keseluruhan, dengan menerapkan metode ini bersama dua perbaikan lain yang diusulkan, efisiensi elektrik rata-rata pembangkit dapat meningkat dari 44% menjadi 45%, yang menunjukkan potensi besar pemanasan udara masuk untuk meningkatkan efisiensi PLTGU yang sering beroperasi pada beban parsial (Variny & Mierka, 2009).

Penelitian (Zhu et al., 2021) mengusulkan metode baru untuk mengatur turbin gas pada beban rendah, yaitu dengan memanaskan udara yang masuk ke kompresor menggunakan udara ekstraksi dari kompresor. Inti dari temuan ini adalah adanya kombinasi yang paling pas antara suhu udara masuk dan bukaan katup kompresor (IGV) untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas turbin secara signifikan pada beban rendah. Hasil utamanya menunjukkan bahwa dengan suhu udara masuk yang tepat, katup IGV dapat dibiarkan terbuka penuh bahkan saat beban operasi turun hingga 50%, sehingga menghasilkan kinerja yang lebih baik dibandingkan metode konvensional dengan menurunkan bukaan IGV. Peningkatan ini terjadi karena pemanasan udara membuat komponen turbin bekerja lebih efisien mendekati kondisi idealnya, yang pada akhirnya menunjukkan bahwa pemanasan udara berpotensi menggantikan fungsi IGV sebagai pengatur beban utama.

Penelitian oleh (Liu et al., 2019) memperkenalkan sebuah metode baru untuk meningkatkan efisiensi turbin gas pada beban parsial dengan cara memanaskan udara masuk menggunakan panas buangan HRSG. Studi ini menunjukkan bahwa menaikkan suhu udara masuk secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi turbin gas, yang utamanya disebabkan oleh peningkatan efisiensi pada komponen kompresor dan turbin. Hasil penelitian menemukan bahwa untuk setiap tingkat beban parsial, terdapat suhu pemanasan optimal yang dapat memaksimalkan efisiensi; sebagai contoh, pada kondisi beban 50%, efisiensi turbin gas dapat ditingkatkan hingga hampir 5% (dari 26,2% menjadi 31,1%) dengan mencapai suhu udara masuk optimal sebesar 38°C. Studi ini juga menyimpulkan bahwa suhu optimal ini cenderung lebih tinggi pada saat beban turbin lebih rendah, menunjukkan potensi besar teknologi ini untuk operasi beban parsial yang lebih efisien.

Penelitian lain memperkenalkan sebuah metode baru yang disebut HEAT untuk meningkatkan kinerja pembangkit listrik tenaga gas uap (PLTGU) pada kondisi beban parsial. Dalam penelitian tersebut, HEAT didefinisikan sebagai metode khusus di mana udara yang akan masuk ke kompresor dipanaskan menggunakan sebagian gas buang dari HRSG untuk meningkatkan efisiensi pada kondisi beban parsial. Hasil studi menunjukkan bahwa strategi

kontrol yang disarankan, yaitu HEAT-T3-T4, mampu meningkatkan efisiensi *combined cycle* hingga 1,7% poin lebih tinggi dibandingkan dengan metode kontrol konvensional menggunakan *Inlet Guide Vane* (IGV). Peningkatan efisiensi ini terutama disebabkan oleh suhu keluaran kompresor yang lebih tinggi, yang mengurangi kehilangan energi (destruksi eksergi) selama pembakaran dan pada akhirnya meningkatkan kinerja siklus secara keseluruhan (Yang et al., 2019).

Berdasarkan hal di atas, dalam Tesis ini penulis mencoba merespons tantangan efisiensi operasional *gas turbine* pada kondisi *part load* dengan menganalisis potensi penggunaan *Low Pressure Feedwater* sebagai *air inlet heater*, yang digunakan pada *gas turbine* GE tipe 09HA.02. Dengan demikian, Tesis ini tidak hanya memberikan kontribusi terhadap peningkatan efisiensi global PLTGU namun juga mengaitkan hasil penelitian dengan keadaan operasional yang umum dijumpai dalam grid kelistrikan Indonesia. Tesis ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru dalam mengoptimalkan efisiensi operasional PLTGU dan memperkuat daya saingnya dalam menyediakan pasokan listrik yang handal dan berkelanjutan di Indonesia.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan yang akan dikaji dalam tesis ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja termal unit PLTGU pada operasional beban parsial 55% sebagai kondisi acuan (*baseline*)?
2. Bagaimana dampak penerapan sistem pemanas udara masuk (*air inlet heater*) terhadap kinerja PLTGU pada kondisi beban parsial 55%?
3. Bagaimana pengaruh variasi laju aliran air umpan (*feedwater*) pada sistem *air inlet heater* terhadap peningkatan efisiensi PLTGU?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengevaluasi kinerja PLTGU pada kapasitas 55% kondisi aktual sebagai acuan dasar (*baseline*)
2. Mengevaluasi dan menganalisis dampak penerapan sistem pemanas udara masuk (*air inlet heater*) terhadap peningkatan kinerja PLTGU pada kapasitas 55%
3. Menentukan pengaruh variasi laju air umpan (*feedwater*) pada sistem *air inlet heater* terhadap kinerja PLTGU dengan melakukan pemodelan menggunakan perangkat lunak DWSim.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat diimplementasikan pada pola operasional PLTGU pada umumnya, khususnya *single shaft gas turbine* GE series 09HA-02. Dengan adanya penelitian ini semoga bisa membantu operasional terbaik yang bisa dilakukan agar mendapatkan nilai efisiensi PLTGU yg optimal dalam penggunaan sistem *air inlet heater*.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada analisis kinerja termodinamika satu blok Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) pada beban 55%. Blok daya yang dimodelkan memiliki konfigurasi siklus kombinasi poros tunggal (*single-shaft combined cycle*) dengan kapasitas terpasang nominal 880 MW, yang merepresentasikan salah satu dari dua unit identik di fasilitas tersebut.

Siklus *topping* (Turbin Gas) yang dievaluasi menggunakan model turbin gas GE 9HA.02, yang beroperasi pada frekuensi 50 Hz. Kinerja pada titik desain (kondisi ISO) dibatasi pada efisiensi siklus kombinasi netto sebesar 64.1% (berbasis LHV). Untuk analisis di luar titik desain, operasi beban parsial (*part-load*) dimodelkan dengan mengasumsikan strategi kontrol modulasi *Inlet Guide Vanes* (IGV) untuk mempertahankan temperatur gas buang untuk memaksimalkan efisiensi siklus *bottoming*.

Siklus *bottoming* dibatasi pada konfigurasi *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) tipe *triple-pressure with reheat* (3PRH), yang merupakan standar industri untuk mencapai efisiensi tinggi pada turbin gas kelas-H. Parameter uap yang digunakan sebagai batasan model didasarkan pada data teknis untuk sistem serupa, yaitu sirkuit tekanan tinggi (HP) pada 184 bar/600°C, sirkuit *reheat* uap tekanan menengah (IP) pada temperatur 600°C, dan sirkuit tekanan rendah (LP) pada tekanan 5 bar.

Penelitian ini menetapkan kondisi beban 55% sebagai titik operasi utama dalam analisis kinerja. Pemilihan parameter ini didasarkan pada evaluasi data operasional historis yang menunjukkan bahwa tingkat pembebanan tersebut memiliki frekuensi *dispatch* tertinggi dari pihak pengatur beban (*grid operator*), sehingga mendominasi profil operasi harian unit. Oleh karena itu, pemusatan analisis pada kondisi beban parsial ini dinilai esensial untuk menjamin bahwa hasil evaluasi termodinamika yang diperoleh bersifat representatif dan relevan dengan realitas operasional pembangkit saat ini.

Bahan bakar untuk siklus ini didefinisikan sebagai gas alam yang berasal dari proses regasifikasi *Liquefied Natural Gas* (LNG) yang dipasok oleh *Floating Storage and Regasification Unit* (FSRU). Untuk tujuan penyederhanaan model termodinamika, komposisi bahan bakar diasumsikan sebagai gas alam standar 96.66% CH₄, 2.3% C₂H₆, 0.47% C₃H₈,

0.2% C₄H₁₀, 0.02% C₅H₁₂ dan 0.35% N₂ berdasarkan volume, yang merupakan komposisi LNG aktual dari lapangan Tangguh, Papua.

1.6 Orisinalitas Penelitian

No.	Penelitian (Peneliti, Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
1	(Variny & Mierka, 2009).	Improvement of part load efficiency of a combined cycle power plant provisioning ancillary services	▪ Konsumsi gas alam berkurang 13 m³/h untuk setiap kenaikan 1°C suhu udara masuk ▪ Efisiensi elektrik rata-rata pembangkit meningkat dari 44% menjadi 45%.	Variasi suhu udara masuk menggunakan <i>dry condenser</i> sebagai pemanas udara masuk turbin gas.
2	(Zhu et al., 2021)	Improvement of part-load Performance of Gas Turbine by Adjusting Compressor Inlet Air Temperature and IGV Opening	▪ Efisiensi GT terbaik pada beban 50% dengan nilai IGV dan temperature udara masuk berturut-turut 0° dan 38°C adalah 31.17% ▪ Efisiensi GT terbaik pada beban 70% dengan nilai IGV dan temperature udara masuk berturut-turut 0° dan 27°C adalah 36.43% ▪ Efisiensi GT terbaik pada beban 90% dengan nilai IGV dan temperature udara masuk berturut-turut 0° dan 17°C adalah 39.16%.	Menggunakan <i>air discharge</i> kompresor sebagai pemanas udara masuk turbin gas dan disertai pengaturan <i>IGV angle</i> pada kompresor.
3	(Liu et al., 2019)	Effect of Inlet Air Heating on Gas Turbine Efficiency under Partial Load	▪ Pada kondisi beban 55%, efisiensi turbin meningkat 5% (dari 26,2% menjadi 31,1%) dengan suhu udara masuk optimal sebesar 38°C.	Menggunakan gas buang dari HRSG sebagai pemanas udara masuk pada turbin gas

No.	Penelitian (Peneliti, Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
4	(Yang et al., 2019)	Design/off-design performance simulation and discussion for the gas turbine combined cycle with inlet air heating	▪ Siklus dengan HEAT-T3-T4 pada beban parsial meningkatkan efisiensi maksimum sebesar 1,7% pt. ▪ Suhu yang lebih tinggi dari udara keluaran kompresor dapat mengurangi destruksi eksergi tambahan selama proses pembakaran, sehingga kinerja siklus ditingkatkan dan tingkat konsumsi bahan bakar dapat dihemat.	Menggunakan gas buang dari HRSG sebagai pemanas udara masuk turbin gas

Penelitian sebelumnya oleh Variny & Mierka (2009) telah membuktikan konsep pemanasan udara masuk untuk meningkatkan efisiensi beban parsial, penelitian ini mengisi celah riset yang signifikan dengan memperkenalkan tiga kebaruan fundamental. Pertama, penelitian ini mengusulkan penggunaan Low Pressure (LP) Feedwater sebagai medium pemanas yang terintegrasi langsung dengan siklus uap, berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan udara buangan *dry condenser*. Kedua, konsep ini diaplikasikan pada turbin gas GE 9HA.02 kelas-H modern berskala besar (880 MW), di mana respon termodinamikanya belum pernah dieksplorasi, sangat kontras dengan unit 80 MW yang lebih tua pada studi sebelumnya. Ketiga, metodologi yang digunakan adalah pemodelan termodinamika parametrik untuk mencari kondisi operasi optimal dengan memvariasikan laju alir feedwater, sebuah pendekatan kuantitatif yang melampaui analisis korelasi data historis yang dilakukan sebelumnya.

Penelitian oleh Zhu et al. telah secara mendalam menginvestigasi peningkatan kinerja turbin gas pada beban parsial dengan membangun sebuah hubungan optimal antara pemanasan udara masuk (inlet air heating) dan bukaan *Inlet Guide Vane* (IGV). Studi tersebut menyimpulkan bahwa pemanasan udara masuk berpotensi menggantikan fungsi IGV untuk regulasi beban, dengan menggunakan panas dari gas buang eksternal. Namun, penelitian ini mengisi celah riset yang fundamental pada tiga aspek utama. Pertama, dari segi sumber panas

dan lingkup analisis, penelitian ini mengusulkan penggunaan *Low Pressure (LP) Feedwater* yang merupakan aliran internal dari siklus uap, sebuah pendekatan integrasi termal yang berbeda dan menuntut analisis dampak pada kinerja PLTGU (siklus kombinasi) secara keseluruhan, melampaui fokus analisis Zhu et al. pada kinerja turbin gas (GT) saja. Kedua, fokus analisis berbeda; sementara Zhu et al. mencari filosofi kontrol baru dengan mengoptimalkan dua variabel (suhu dan IGV), penelitian ini melakukan analisis parametrik mendalam terhadap laju aliran *feedwater* untuk mengoptimalkan kinerja spesifik dari sistem pemanas yang diusulkan. Ketiga, dan yang paling esensial, konsep ini diaplikasikan pada turbin gas GE 9HA.02 kelas-H yang canggih, yang memiliki karakteristik termodinamika dan sistem kontrol yang sangat berbeda dibandingkan turbin kelas-E (PG9171E) yang menjadi basis studi Zhu et al.

Meskipun penelitian sebelumnya oleh Liu et al. telah secara komprehensif membuktikan bahwa teknologi pemanasan udara masuk dapat meningkatkan efisiensi turbin gas pada beban parsial, penelitian ini mengisi celah riset yang signifikan melalui tiga aspek kebaruan yang fundamental. Pertama, dari segi sumber panas, Liu et al. secara spesifik menggunakan panas buangan dari gas buang HRSG dalam sebuah siklus eksternal. Sebaliknya, penelitian ini mengusulkan penggunaan *Low Pressure (LP) Feedwater* sebagai medium pemanas, sebuah pendekatan integrasi termal yang langsung memanfaatkan aliran proses dari dalam siklus uap itu sendiri. Kedua, objek studi dalam penelitian ini adalah turbin gas GE 9HA.02, sebuah teknologi kelas-H modern dengan efisiensi dan karakteristik termodinamika yang jauh lebih maju dibandingkan turbin GE9171E kelas-E yang menjadi fokus analisis Liu et al. Ketiga, dari segi metodologi, sementara Liu et al. berhasil mengidentifikasi adanya temperatur pemanasan optimal untuk setiap tingkat beban, penelitian ini melangkah lebih jauh dengan melakukan analisis termodinamika parametrik untuk mengevaluasi pengaruh variasi laju alir *feedwater* terhadap kinerja unit.

Penelitian oleh Yang et al. telah secara komprehensif memperkenalkan metode pemanasan udara masuk (HEAT) untuk meningkatkan efisiensi PLTGU pada beban parsial, dengan menunjukkan bahwa strategi kontrol mereka dapat meningkatkan efisiensi siklus kombinasi hingga 1,7% poin dibandingkan metode konvensional berbasis IGV. Namun, penelitian ini mengisi celah riset yang fundamental melalui tiga aspek kebaruan yang spesifik. Pertama, dari sisi sumber panas, metode HEAT secara eksplisit memanfaatkan sebagian gas buang dari *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). Sebaliknya, penelitian ini mengusulkan penggunaan *Low Pressure (LP) Feedwater*, sebuah pendekatan yang secara termodinamika

berbeda karena memanfaatkan aliran proses internal dari dalam siklus uap itu sendiri. Kedua, fokus analisis berbeda; sementara Yang et al. membandingkan strategi kontrol (HEAT vs. IGV), penelitian ini berfokus pada analisis parametrik mendalam dengan memvariasikan laju aliran *feedwater* untuk mengoptimalkan kinerja dari sistem pemanas spesifik yang diusulkan. Ketiga, dan yang paling esensial, konsep ini diaplikasikan pada turbin gas GE 9HA.02, sebuah teknologi kelas-H, berbeda dengan turbin kelas-F (PG9351FA). Mengingat perbedaan mendasar dalam teknologi, efisiensi, dan sistem kontrol antara kelas-F dan kelas-H, penerapan dan analisis dampak metode ini pada platform yang lebih maju merupakan area yang belum terjamah.

Berdasarkan hal di atas, maka kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi energi dan eksergi untuk meningkatkan efisiensi PLTGU dengan menggunakan sistem pemanas udara yang terintegrasi langsung dengan siklus uap (*LP Feedwater*) pada platform turbin gas GE 09HA.02, sebuah konfigurasi, lingkup, dan pendekatan optimasi yang belum dieksplorasi.

