

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem ketenagalistrikan nasional Indonesia hingga tahun 2025 masih didominasi oleh pembangkit berbasis energi fosil, meskipun pemerintah terus mendorong percepatan transisi menuju energi baru terbarukan (EBT). Berdasarkan laporan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) tahun 2025, kapasitas terpasang pembangkit listrik nasional pada semester I tahun 2025 telah mencapai sekitar 105 GW, meningkat sebesar 4,4 GW dibandingkan tahun sebelumnya. Dari total kapasitas tersebut, pembangkit berbasis EBT baru mencapai sekitar 15,2 GW atau sekitar 14,5% dari total kapasitas nasional, sedangkan sisanya masih didominasi oleh pembangkit berbahan bakar fosil seperti batu bara, gas alam, dan diesel. Komposisi tersebut menunjukkan bahwa pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbasis batu bara masih menjadi tulang punggung sistem kelistrikan nasional, diikuti oleh pembangkit listrik tenaga gas (PLTG), pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU), serta pembangkit diesel yang banyak digunakan pada wilayah terpencil dan sistem isolated. Di sisi lain, pemerintah melalui Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025–2034 mulai meningkatkan porsi pembangkit EBT melalui pengembangan PLTA, PLTS, PLTP, bioenergi, dan energi angin sebagai bagian dari strategi dekarbonisasi sektor energi nasional. Namun demikian, pertumbuhan kebutuhan listrik nasional yang terus meningkat akibat perkembangan sektor industri, transportasi, kawasan komersial, serta digitalisasi menyebabkan kebutuhan terhadap pembangkit dengan karakteristik fleksibel dan cepat merespons beban tetap tinggi. Kondisi tersebut menjadikan pembangkit berbasis gas masih memegang peranan penting dalam menjaga stabilitas sistem tenaga listrik nasional, khususnya dalam mendukung intermitensi pembangkit energi terbarukan. Selain itu, peningkatan kapasitas pembangkit pada tahun 2025 juga menunjukkan bahwa sebagian besar tambahan kapasitas masih berasal dari pembangkit berbasis gas dan batu bara sehingga persentase kontribusi EBT terhadap total sistem belum mengalami peningkatan yang signifikan. Dengan demikian, konfigurasi sistem pembangkit nasional Indonesia saat ini masih berada pada fase transisi, yaitu antara dominasi pembangkit fosil dengan upaya peningkatan pemanfaatan energi rendah emisi untuk mencapai target net zero emission pada masa mendatang (Kementerian ESDM, 2026).

Pembangkit listrik tenaga gas memiliki peran yang sangat penting dalam sistem pembangkitan nasional karena mampu beroperasi secara fleksibel dan cepat menyesuaikan

perubahan beban listrik sehingga sangat efektif digunakan sebagai pembangkit penyeimbang pada sistem tenaga modern yang mulai terintegrasi dengan energi terbarukan (Ashraf et al., 2026). Selain memiliki fleksibilitas operasi yang tinggi, pembangkit listrik tenaga gas juga memiliki waktu start-up yang lebih cepat dibandingkan pembangkit berbasis batu bara sehingga mampu meningkatkan keandalan sistem kelistrikan nasional pada kondisi beban puncak maupun gangguan sistem (Faqihi & Ghaith, 2025). Penggunaan gas alam sebagai bahan bakar pembangkit juga menghasilkan emisi karbon dan emisi partikulat yang lebih rendah dibandingkan pembangkit berbahan bakar batu bara sehingga dianggap sebagai teknologi transisi menuju sistem energi rendah karbon (Yilmaz et al., 2020). Pemanfaatan sistem heat recovery pada pembangkit turbin gas juga memungkinkan peningkatan efisiensi energi dan penurunan konsumsi bahan bakar melalui integrasi berbagai sistem pemanfaatan panas buang, termasuk fuel gas heater. Dengan karakteristik tersebut, pembangkit listrik tenaga gas menjadi salah satu teknologi utama yang mendukung peningkatan efisiensi energi, pengurangan emisi, serta keandalan sistem ketenagalistrikan nasional dalam menghadapi peningkatan kebutuhan energi listrik (Faqihi & Ghaith, 2023)

Ketersediaan bahan bakar fosil yang semakin terbatas serta meningkatnya kebutuhan energi global menyebabkan upaya peningkatan efisiensi penggunaan bahan bakar pada turbin gas menjadi sangat penting untuk dilakukan (Yoon et al., 2013). Salah satu metode yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi sistem turbin gas adalah dengan melakukan pemanasan awal bahan bakar gas sebelum memasuki ruang bakar menggunakan energi panas sisa dari gas buang turbin (Faqihi & Ghaith, 2023). Pemanasan bahan bakar gas dapat meningkatkan kualitas pembakaran karena temperatur bahan bakar yang lebih tinggi mampu mempercepat proses pencampuran dan reaksi pembakaran di dalam combustion chamber sehingga proses pembakaran menjadi lebih stabil (Yilmaz et al., 2020). Selain itu, pemanfaatan gas buang sebagai sumber panas fuel gas heater mampu meningkatkan pemanfaatan energi sisa sehingga menurunkan jumlah energi yang terbuang ke lingkungan dan meningkatkan efisiensi termal sistem pembangkit secara keseluruhan (Faqihi & Ghaith, 2025). Integrasi fuel gas heater dengan sistem waste heat recovery juga dilaporkan mampu menurunkan heat rate pembangkit serta meningkatkan efisiensi eksergi akibat berkurangnya irreversibility pada proses pembakaran (Yang et al., 2025). Selain meningkatkan efisiensi energi, penggunaan metode pemanasan bahan bakar gas sebelum proses pembakaran juga memberikan dampak positif terhadap pengurangan konsumsi bahan bakar spesifik dan penurunan emisi karbon pada pembangkit listrik tenaga gas modern. Oleh karena itu, teknologi fuel gas heater berbasis

pemanfaatan panas buang menjadi salah satu pendekatan yang potensial dalam mendukung konservasi energi dan optimalisasi performa sistem turbin gas (Faqihi & Ghaith, 2023).

Dalam merealisasikan sistem tersebut, penerapan pendekatan *pinch technology* sangat penting untuk diimplementasikan guna mengoptimalkan pemanfaatan panas gas buang secara sistematis (Klemeš et al., 2018). Pemanfaatan energi termal dari gas buang tidak dapat dilakukan secara sembarangan, melainkan harus secara ketat mempertimbangkan *thermal matching* (kesesuaian profil temperatur) antara kurva *hot stream*/aliran panas (gas buang) dan kurva *cold stream*/aliran dingin (bahan bakar gas) agar perpindahan panas terjadi dengan kerugian eksergi seminimal mungkin (Huber, 2024). Desain sistem *heat exchanger* yang disusun tanpa pendekatan *pinch* berisiko tinggi mengalami *overdesign*, yang pada gilirannya akan melonjakkan kebutuhan biaya kapital (CAPEX) peralatan tanpa rasio peningkatan performa yang sepadan.

Perancangan *waste heat recovery* yang presisi melalui metodologi ini tidak hanya berfungsi untuk sekadar meningkatkan efisiensi termal siklus, tetapi secara fundamental terbukti mampu menekan laju konsumsi bahan bakar secara signifikan sehingga bermuara pada penurunan pengeluaran operasional (OPEX) pembangkit (Klemeš et al., 2018). Melalui optimasi *thermal matching* tersebut, integrasi *fuel gas heater* pada sistem gas buang turbin gas dapat menjadi salah satu strategi modifikasi (*retrofit*) yang berbiaya relatif rendah namun memberikan fleksibilitas operasi dan dampak penghematan yang masif, baik dari sisi energi maupun ekonomi.

Penelitian oleh Faqihi dan Ghaith mengusulkan sistem pemulihan panas buang pada turbin gas *simple cycle* dengan memanfaatkan panas dari *silencer* cerobong asap untuk memanaskan bahan bakar gas (*performance heating*). Untuk menghindari kerugian kinerja turbin akibat tekanan balik, saluran perpindahan panas diintegrasikan secara langsung ke dalam permukaan *nose* dan *tail* pada *baffle silencer* eksisting. Evaluasi kinerja sistem dilakukan menggunakan pendekatan pemodelan matematika dan komputasi dinamika fluida (CFD) yang membandingkan desain permukaan dasar dengan desain modifikasi berpola bergelombang (*Wavy Pattern Nose/WPN* dan *Wavy Pattern Tail/WPT*). Hasil komputasi menunjukkan bahwa sistem ini mampu menghasilkan pemulihan energi bersih sebesar 2,45 hingga 4,54 MW. Pemanfaatan energi tersebut terbukti mampu menghemat konsumsi bahan bakar gas hingga 68,97 kg/jam dan memangkas emisi CO₂ hingga 1.517 ton/tahun. Analisis ekonomi menyimpulkan bahwa kombinasi desain *nose* dasar dengan desain *tail* berpola bergelombang

merupakan konfigurasi paling optimal yang dapat memberikan total penghematan operasional tertinggi, yakni mencapai 109.964 USD per tahun (Faqihi & Ghaith, 2025)

Yang et al. mengkaji potensi pemanfaatan panas sisa berderajat tinggi dari pendingin udara turbin (TCA) untuk pemanas bahan bakar gas. Penelitian ini menggunakan metode analisis tingkat energi (*energy grade analysis*) yang berlandaskan pada prinsip pencocokan suhu dan pemanfaatan bertingkat (*cascading utilization*) aliran uap dan air di batas sistem. Berdasarkan metode tersebut, para peneliti mengevaluasi tiga desain skema modifikasi (*retrofit*), yaitu sistem paralel, sistem seri, dan sistem independen bersiklus karbon dioksida superkritis. Hasil analisis termodinamika menunjukkan bahwa modifikasi ini secara efektif mampu memulihkan hingga 4.602 kW panas sisa yang sebelumnya terbuang, di mana sistem seri mencatatkan koefisien pemanfaatan daya panas sisa tertinggi sebesar 0,392 dibandingkan konfigurasi lainnya. Secara kelayakan ekonomi, sistem seri mampu menghasilkan pendapatan tahunan tertinggi mencapai 5,605 juta CNY dengan biaya investasi peralatan yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem independen, sehingga konfigurasi seri direkomendasikan sebagai skema *retrofit* paling layak untuk diterapkan pada unit GTCC eksisting (Yang et al., 2025).

Dalam upaya mengoptimalkan sistem termodinamika, Gonca mengkaji kinerja energi, eksergi, dan ekologi dari sebuah turbin gas yang dimodifikasi dengan penambahan dua *intercooler* dan dua *re-heater* menggunakan pemodelan termodinamika parametrik. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh rentang variasi desain dan operasi turbin—seperti rasio tekanan (0–30), kecepatan turbin (10.000–18.000 rpm), suhu masuk (300–400 K), aliran massa udara (10–30 kg/s), koefisien perpindahan panas (0,2–1 kW/m²K), hingga fraksi gas sisa (5%–20%)—terhadap daya keluaran, efisiensi eksergi, kerusakan eksergi, dan koefisien kinerja ekologis (ECOP). Hasil pemetaan kinerja menunjukkan bahwa peningkatan rasio ekuivalen bahan bakar secara efektif mampu meningkatkan daya dan ECOP serta menekan kerusakan eksergi. Salah satu temuan numerik kunci menunjukkan adanya titik ambang batas pada rasio ekuivalen; parameter kinerja sistem terbukti berkurang seiring peningkatan rasio tekanan jika rasio ekuivalen berada di bawah angka 0,3, namun akan berbalik meningkat jika rasio ekuivalen berada di atas 0,3. Sebaliknya, peningkatan suhu masuk (mendekati 400 K) dan tingginya koefisien perpindahan panas justru memperbesar kerugian sistem dan menurunkan kinerja. Lebih lanjut, simulasi ini juga mengonfirmasi bahwa variasi dimensi fisik turbin, yakni pada rentang diameter (0,5–2,5 m) dan tinggi (1–5 m), serta fluktuasi suhu dinding turbin (400–800 K) tidak memberikan perubahan nilai kinerja yang signifikan dibandingkan dengan besaran kontrol massa udara dan bahan bakar (Gonca, 2017)

Berdasarkan berbagai penelitian sebelumnya, dapat diketahui bahwa pemanfaatan panas buang pada sistem turbin gas memiliki potensi yang sangat besar untuk meningkatkan efisiensi energi, menurunkan konsumsi bahan bakar, serta mengurangi emisi gas buang melalui penerapan sistem *fuel gas heater* dan *waste heat recovery*. Berbagai pendekatan yang telah dikembangkan menunjukkan bahwa pemanfaatan energi panas sisa tidak hanya mampu meningkatkan efisiensi termal sistem pembangkit, tetapi juga memberikan peningkatan efisiensi eksergi dengan mengurangi irreversibility pada proses pembakaran dan perpindahan panas. Selain itu, karakteristik pembangkit listrik tenaga gas yang fleksibel dan memiliki respons operasi yang cepat menjadikannya sebagai salah satu komponen utama dalam mendukung stabilitas sistem ketenagalistrikan nasional di tengah meningkatnya energi baru terbarukan. Di sisi lain, meningkatnya kebutuhan energi listrik nasional yang masih didominasi oleh pembangkit berbahan bakar fosil menuntut adanya upaya optimalisasi performa pembangkit agar penggunaan bahan bakar dapat dilakukan secara lebih efisien dan berkelanjutan. Oleh karena itu, pengembangan metode pemanfaatan panas buang sebagai pemanas bahan bakar gas menjadi salah satu solusi yang relevan untuk diterapkan pada sistem pembangkit modern, khususnya pada pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) yang memiliki potensi panas buang dalam jumlah besar. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi performa energi dan eksergi dari pemanfaatan gas buang sebagai pemanas bahan bakar gas pada turbin gas GE tipe 09HA.02 melalui pendekatan simulasi menggunakan perangkat lunak DWSIM. Penggunaan perangkat lunak simulasi dalam penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai karakteristik perpindahan energi, perubahan efisiensi sistem, serta potensi penghematan bahan bakar akibat penerapan *fuel gas heater* berbasis *waste heat recovery*. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan strategi konservasi energi pada sistem PLTG, khususnya dalam meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi kehilangan energi, serta mendukung pengurangan emisi karbon pada sektor pembangkitan listrik nasional. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu referensi dalam pengembangan teknologi optimalisasi performa turbin gas yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan untuk mendukung ketahanan energi nasional di masa mendatang.

1.2 Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana pemodelan dan validasi siklus termodinamika turbin gas GE 09HA.02 pada kondisi eksisting (baseline) menggunakan perangkat lunak komputasi DWSIM?
2. Bagaimana optimasi integrasi perpindahan panas gas buang ke dalam sistem Fuel Gas Heater (FGH) menggunakan pendekatan Pinch Technology?
3. Bagaimana dampak penerapan Fuel Gas Heater hasil optimasi tersebut terhadap evaluasi energi (penurunan heat rate dan konsumsi bahan bakar) serta evaluasi eksergi (laju destruksi eksergi) pada sistem turbin gas?
4. Bagaimana tingkat kelayakan modifikasi sistem Fuel Gas Heater tersebut dievaluasi berdasarkan estimasi ekonomi teknik sederhana berupa indikator biaya kapital (CAPEX), penghematan biaya operasi (OPEX), dan masa pengembalian modal (payback period)?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat dan memvalidasi model simulasi operasional turbin gas GE 09HA.02 pada kondisi tunak menggunakan perangkat lunak *open-source* DWSIM.
2. Menerapkan metodologi *Pinch Technology* untuk menentukan selisih temperatur minimum dan *thermal matching* yang optimal pada penerapan *Fuel Gas Heater*
3. Menganalisis pengaruh pemanasan bahan bakar gas terhadap efisiensi energi dan eksergi pada turbin gas GE 09HA-02
4. Mengestimasi dampak kelayakan keekonomian dari penerapan sistem *Fuel Gas Heater* melalui perhitungan proyeksi penghematan bahan bakar tahunan, perkiraan biaya investasi alat penukar kalor, serta kalkulasi masa pengembalian modal sederhana (*simple payback period*).

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat diimplementasikan pada pola operasional turbin gas 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 turbin gas yg optimal dalam penggunaan sistem pemanas bahan bakar gas.

1.5 Orisinalitas Penelitian

Berdasarkan tinjauan literatur terdahulu, kajian optimalisasi termodinamika pada pembangkit listrik telah banyak dilakukan, seperti analisis CFD pada silencer cerobong oleh Faqihi dan Ghaith (2025), simulasi pemanfaatan panas sisa di GTCC M701F3 oleh Yang et al.

(2025), hingga pemodelan parametrik modifikasi siklus Brayton oleh Gonca (2017). Namun, mayoritas dari literatur tersebut masih menitikberatkan pada modifikasi rute perpindahan panas eksternal atau menggunakan perangkat lunak berlisensi komersial (Ansys, EBSILON, EES).

Sebagai bentuk kebaruan (*novelty*) yang lebih komprehensif, penelitian ini mengisi celah tidak hanya dengan menggunakan perangkat lunak *open-source* DWSIM untuk memodelkan turbin gas, tetapi melalui kombinasi pemodelan DWSIM, analisis energi-eksergi, dan pendekatan *pinch-based heat integration*. Penelitian ini secara khusus menonjolkan optimasi pemanfaatan panas gas buang yang didasarkan pada prinsip *temperature matching* guna memastikan perpindahan panas berlangsung dengan meminimalkan irreversibilitas.

Lebih lanjut, sebagai pembeda utama dari literatur terdahulu, penelitian ini tidak sekadar mengevaluasi performa termodinamika dan memonitor emisi gas buang CO₂ pada tiap komponen, melainkan juga mengarahkan hasil analisis pada efisiensi biaya operasi (OPEX) dan pengendalian biaya kapital (CAPEX) akibat implementasi sistem pemanas bahan bakar. Perbandingan dan posisi penelitian ini terhadap literatur sebelumnya diuraikan lebih detail pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Gap Penelitian

No.	Penelitian (Peneliti, Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
1	Faqihi & Ghaith (2025)	Enhancement of waste heat recovery from exhaust stack silencers in a simple cycle gas turbine	▪ Sistem memulihkan energi bersih sebesar 2,45–4,54 MW. Pemanfaatan panas menghemat bahan bakar hingga 68,97 kg/jam dan memangkas emisi CO₂ hingga 1.517 ton/tahun. Desain ekor bergelombang (WPT) memberikan penghematan tertinggi 109.964 USD/tahun. ▪ Pemodelan matematika analitis 1D dan simulasi numerik 3D menggunakan Ansys Workbench 2020 R2 (SpaceClaim & Fluent).	Penelitian ini memusatkan analisis pada evaluasi termodinamika internal komponen utama turbin gas GE 09HA-02 secara spesifik, yang disimulasikan menggunakan perangkat lunak <i>open-source</i> DWSIM. Kebaruan ditekankan pada penggabungan simulasi dengan pendekatan <i>pinch-</i>

No.	Penelitian (Peneliti, Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
				<i>based heat integration</i> untuk menekan biaya kapital pemasangan alat penukar kalor.
2	Yang et al. (2025)	Waste-heat utilization for turbine air cooler and fuel heater in gas turbine combined cycle	▪ Analisis tingkat energi (<i>energy grade analysis</i>) dan pemanfaatan bertingkat. Simulasi kondisi tunak dijalankan menggunakan perangkat lunak EBSILON Professional ▪ Modifikasi memulihkan panas sisa sebesar 4.602 kW. Sistem konfigurasi seri mencatatkan pemanfaatan daya tertinggi (0,392) dan menghasilkan pendapatan operasional paling superior sebesar 5,605 juta CNY	Penelitian ini tidak memodifikasi rute perpindahan panas, melainkan berfokus pada analisis energi dan eksergi dasar dari turbin gas kelas-H (GE 09HA-02). Penelitian mengedepankan optimasi pemanfaatan panas buang berbasis <i>temperature matching</i> yang secara simultan mengevaluasi dampak efisiensi biaya operasi.
3	Gonca (2017)	Exergetic and ecological performance analyses of a gas turbine system with two intercoolers and two re-heaters	▪ Pemodelan teoritis dan analisis termodinamika parametrik menggunakan perangkat lunak Engineering Equation Solver (EES) ▪ Efisiensi hukum kedua (eksergi) dan kinerja ekologis (ECOP) meningkat seiring kenaikan rasio ekuivalen bahan bakar. Kenaikan rasio tekanan akan menurunkan efisiensi eksergi jika ekuivalen bahan bakar di bawah 0,3, namun	Memodelkan performa unit komersial spesifik (GE 09HA-02) di DWSIM, memanfaatkan data operasional primer secara presisi untuk memetakan efisiensi energi, pemusnahan eksergi per komponen, serta memonitor profil

No.	Penelitian (Peneliti, Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
			akan berbalik meningkatkan efisiensi jika rasio ekuivalen di atas 0,3.	emisi CO2. Penelitian ini memberikan batasan evaluasi yang jelas antara optimasi termodinamika dan kelayakan ekonomi (OPEX/CAPEX).



