

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Bauran energi primer di Indonesia masih didominasi oleh energi fosil dengan persentase 87,70%, yang terdiri dari batu bara 42,38%, minyak bumi 31,40% dan gas alam 13,92%. Berlawanan dengan itu, peran Energi Baru dan Terbarukan (EBT) masih tergolong rendah dengan persentase 12,30% (MEMR, 2023). Realisasi EBT mengalami penurunan sebesar 1,1% dari tahun sebelumnya (IESR, 2022b), yang mana tidak sejalan dengan kebijakan Pemerintah yang menargetkan bauran energi primer yang optimal dengan peran EBT sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050, yang berkesinambungan dengan penurunan persentase energi fosil (Pemerintah Republik Indonesia, 2014).

Tingginya penggunaan energi fosil berdampak pada tingginya emisi gas rumah kaca yang dihasilkan. Di Indonesia, sektor ketenagalistrikan menyumbang emisi CO₂ tertinggi dengan persentase 43% dari total emisi nasional (IESR, 2022a). Hal ini disebabkan karena pembangkit listrik masih menggunakan batu bara sebesar 67,21%, gas alam 15,96% dan minyak bumi 3,54% (Kementerian ESDM, 2023). Dalam rangka menangani permasalahan tersebut, Pemerintah menetapkan kebijakan terkait percepatan pengembangan energi terbarukan untuk penyediaan tenaga listrik, khususnya pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara (Wijayanto et al., 2025). Di sisi lain, IFHE & BRIN (2023) menargetkan pemanfaatan hidrogen sebagai salah satu jenis EBT untuk diaplikasikan pada beberapa sektor, salah satunya pembangkitan tenaga listrik. Implementasi hidrogen dapat dilakukan pada pembangkit listrik berbahan bakar gas alam dengan menerapkan skema peralihan bahan bakar (*co-firing*) melalui rekayasa teknologi (Ahmad et al., 2023).

Hidrogen merupakan jenis energi bersih dan ramah lingkungan yang sesuai untuk *co-firing* dengan gas alam pada sistem turbin gas di Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) (Jeong et al., 2024). Hidrogen dapat digabungkan dengan gas alam secara homogen tanpa terpisah menjadi fase yang berbeda sehingga memberikan keunggulan dalam proses pembakaran (Boretti, 2024). Berat molekul hidrogen lebih ringan dari gas alam, namun nilai kalornya lebih tinggi sehingga densitas energinya tinggi (Mehra et al., 2017). Hal tersebut akan berdampak pada jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan energi yang sama menjadi lebih rendah, sehingga campuran hidrogen dengan gas alam pada proporsi tertentu dapat meningkatkan efisiensi termal (Zhang et al., 2024). Reaksi pembakaran hidrogen

menghasilkan produk berupa uap air sehingga secara signifikan dapat mengurangi emisi CO₂ yang dilepaskan (Abdin, 2024).

Hasil simulasi *co-firing* hidrogen dengan gas alam pada turbin gas yang dilakukan oleh Jeong et al. (2024) menunjukkan bahwa *co-firing* hidrogen dapat meningkatkan efisiensi sistem PLTGU hingga 1,42% pada siklus terbuka dan 0,42% pada siklus kombinasi. Mendoza Morales et al. (2024) menyatakan bahwa *co-firing* hidrogen dapat meningkatkan daya turbin hingga 5,54% dan efisiensi 2,26%. Simulasi oleh Amrouche et al. (2025) menunjukkan hasil bahwa *co-firing* hidrogen sebesar 60% dapat meningkatkan efisiensi termal hingga 2,9%. Penelitian lain oleh Ahmad et al. (2023) menunjukkan bahwa setiap peningkatan rasio hidrogen sebesar 5% dengan basis kalori berdampak pada penurunan emisi CO₂ sebesar 6%. Babahammou et al. (2024) melalui simulasi *Aspen HYSYS* menemukan bahwa penambahan hidrogen sebesar 20% volume berdampak pada penurunan laju alir bahan bakar sebesar 4,5% dan emisi CO₂ sebesar 14%. Alikulov et al. (2024) menyatakan bahwa berdasarkan simulasi *Aspen HYSYS*, *co-firing* hidrogen dapat meningkatkan daya turbin dan menurunkan emisi CO₂ secara signifikan. Park et al. (2023) menyatakan bahwa *co-firing* hidrogen efektif dalam mengurangi emisi, sejalan dengan hasil simulasinya pada salah satu jenis turbin gas.

PLTGU Cilegon merupakan salah satu pembangkit listrik di Indonesia yang menggunakan gas alam sebagai bahan bakar utama. PLTGU Cilegon melepaskan emisi CO₂ hingga 1,9 juta ton CO₂ per tahun dengan intensitas 0,67 kg CO₂/kWh (Kementerian ESDM, 2014), lebih tinggi dari rata-rata global sebesar 0,52 kg CO₂/kWh (Ang & Su, 2016). Beberapa program mitigasi yang dapat dilakukan untuk menurunkan tingkat emisi di antaranya adalah meningkatkan efisiensi energi dan melakukan peralihan bahan bakar (Karmellos et al., 2016). Dalam hal ini, *co-firing* hidrogen menjadi hal yang potensial sehingga menarik untuk dikaji baik melalui pengujian langsung maupun dengan simulasi menggunakan perangkat lunak. Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan untuk simulasi sistem pembangkit listrik adalah *Aspen HYSYS*, di mana perangkat ini dapat membuat suatu model dan simulasi proses secara akurat (Liu & Karimi, 2018a).

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, perumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pemodelan dan simulasi *co-firing* hidrogen dengan gas alam pada turbin gas di PLTGU Cilegon?

2. Bagaimana pengaruh *co-firing* hidrogen dengan gas alam terhadap efisiensi turbin gas di PLTGU Cilegon?
3. Bagaimana pengaruh *co-firing* hidrogen dengan gas alam terhadap emisi CO₂ yang dihasilkan oleh turbin gas di PLTGU Cilegon?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat dan memvalidasi model simulasi *co-firing* hidrogen dengan gas alam pada turbin gas di PLTGU Cilegon menggunakan perangkat lunak *Aspen HYSYS*.
2. Menganalisis pengaruh *co-firing* hidrogen dengan gas alam terhadap efisiensi turbin gas di PLTGU Cilegon.
3. Menganalisis pengaruh *co-firing* hidrogen dengan gas alam terhadap emisi CO₂ yang dihasilkan oleh turbin gas di PLTGU Cilegon.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Akademis

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan kajian tentang *co-firing* hidrogen pada turbin gas, khususnya dalam konteks pemodelan termodinamika melalui simulasi perangkat lunak yang dapat direplikasi.

2. Manfaat Praktis

Penelitian ini memberikan informasi kuantitatif terkait dampak penerapan *co-firing* hidrogen berdasarkan pendekatan simulasi berbasis data operasi aktual, sehingga dapat dijadikan sebagai dasar teknis awal untuk studi kelayakan penerapan hidrogen pada turbin gas, khususnya di PLTGU Cilegon.

3. Manfaat terhadap Kebijakan Energi

Penelitian ini menjadi pertimbangan dan referensi bagi pembuat kebijakan dalam menyusun perencanaan transisi energi berupa implementasi hidrogen secara lebih akurat sesuai dengan potensi yang sudah teridentifikasi, khususnya pada sektor ketenagalistrikan.

1.5. Orisinalitas Penelitian

Ringkasan hasil penelitian terdahulu yang berhubungan dengan topik mengenai simulasi *co-firing* hidrogen dengan gas alam pada turbin gas dijabarkan pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Orisinalitas penelitian

No.	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode dan Fokus Penelitian	Gap Penelitian
1	Jeong et al. (2024)	<i>Analysis of the influence of hydrogen co-firing on the operation and performance of the gas turbine and combined cycle</i>	Simulasi <i>co-firing</i> hidrogen pada turbin gas H-25, M501F dan M501J dengan rasio hidrogen 0-100%. Fokus analisis pada pengaruh <i>co-firing</i> hidrogen terhadap efisiensi dan emisi NO _x pada 2 skenario, yaitu temperatur gas masuk turbin konstan dan daya turbin konstan.	Penelitian ini menganalisis kinerja turbin gas pada berbagai model, namun tidak ada fokus khusus pada turbin gas model M701F. Tidak terdapat analisis pada skenario <i>excess air ratio</i> konstan, serta pengaruh spesifik <i>co-firing</i> hidrogen terhadap emisi CO ₂ .
2	Ahmad et al. (2023)	<i>Thermodynamic Study on Decarbonization of Combined Cycle Power Plant</i>	Simulasi <i>co-firing</i> hidrogen pada turbin gas H-25 dengan rasio hidrogen sebesar 0-30% berbasis kalori. Analisis berfokus pada pengaruh <i>co-firing</i> hidrogen terhadap efisiensi serta emisi NO _x dan CO ₂ dengan skenario temperatur gas masuk turbin konstan.	Penelitian ini mencakup <i>co-firing</i> berbasis nilai kalor, namun tidak mengeksplorasi variasi <i>co-firing</i> berbasis volume. Tidak terdapat analisis pada skenario <i>excess air ratio</i> konstan dengan temperatur gas masuk turbin sebagai variabel dependen.
3	Babahammou et al. (2024)	<i>Technical modelling and simulation of integrating hydrogen from solar energy into a gas turbine power plant to reduce emissions</i>	Simulasi <i>co-firing</i> hidrogen pada turbin gas 9FA dengan rasio hidrogen 5-20% berbasis volume. Fokus analisis pada pengaruh <i>co-firing</i> hidrogen terhadap efisiensi dan emisi CO ₂ pada skenario temperatur gas buang turbin konstan.	Penelitian ini tidak mensimulasikan turbin gas model M701F. Fokus analisis dengan menggunakan skenario temperatur gas buang turbin konstan berbeda dengan pendekatan <i>air-fuel ratio</i> konstan.
4	Alikulov et al. (2024)	<i>Effect of ammonia and</i>	Simulasi <i>co-firing</i> hidrogen dan amonia	Penelitian ini tidak relevan untuk

No.	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode dan Fokus Penelitian	Gap Penelitian
		<i>hydrogen blends on the performance and emissions of an existing gas turbine unit</i>	pada turbin gas kapasitas 7,6 MW pada skenario 0% H ₂ /NH ₃ ; 30% NH ₃ ; 30% H ₂ ; serta 30% H ₂ + 30% NH ₃ . Fokus analisis pada pengaruh <i>co-firing</i> terhadap efisiensi serta emisi NO _x dan CO ₂ pada masing-masing skenario.	turbin gas kapasitas besar seperti model M701F kapasitas 240 MW. Fokus utama <i>co-firing</i> dengan campuran hidrogen dan amonia berbeda dengan simulasi <i>co-firing</i> menggunakan hidrogen murni.
5	Mendoza Morales et al. (2024)	<i>Assessing the impact of CH₄/H₂ blends on the thermodynamic performance of aero-derivative gas turbine CHP configurations</i>	Simulasi <i>co-firing</i> hidrogen pada turbin gas GE-LM2500 dengan rasio hidrogen 0-100%. Fokus analisis pada pengaruh <i>co-firing</i> terhadap daya dan efisiensi pada skenario temperatur gas masuk turbin konstan, temperatur keluar turbin konstan dan <i>heat input</i> konstan.	Penelitian ini menganalisis pengaruh <i>co-firing</i> pada berbagai skenario, namun tidak ada fokus khusus pada skenario <i>excess air ratio</i> konstan. Fokus analisis hanya pada aspek efisiensi, tidak terdapat analisis terkait emisi yang dihasilkan.
6	Amrouche et al. (2025)	<i>Hydrogen-natural gas blending for enhanced performance of the MS-5002C gas turbine in Southern Algeria</i>	Simulasi <i>co-firing</i> hidrogen pada turbin gas MS-5002C dengan rasio hidrogen 0-100% berbasis volume. Fokus analisis pada pengaruh <i>co-firing</i> terhadap efisiensi serta emisi CO ₂ dan NO _x pada skenario variasi <i>excess air ratio</i> dan temperatur udara ambien.	Penelitian ini menganalisis pengaruh <i>co-firing</i> hidrogen pada berbagai variasi <i>excess air ratio</i> dan temperatur udara ambien, namun tidak ada pendekatan yang difokuskan pada <i>excess air ratio</i> konstan sesuai desain.
7	Park et al. (2023)	<i>Thermodynamic performance study of large-scale industrial</i>	Simulasi <i>co-firing</i> hidrogen dan amonia pada turbin gas Mitsubishi kelas J	Penelitian ini tidak relevan untuk turbin gas kapasitas menengah seperti

No.	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode dan Fokus Penelitian	Gap Penelitian
		<i>gas turbine with methane/ammonia/hydrogen blended fuels</i>	dengan rasio 0-100%. Fokus analisis pada pengaruh <i>co-firing</i> terhadap efisiensi dan aspek ekonomi pada skenario temperatur gas masuk turbin konstan.	model M701F kapasitas 240 MW. Fokus utama <i>co-firing</i> dengan hidrogen dan amonia berbeda dengan simulasi menggunakan hidrogen murni.

Berdasarkan Tabel 1.1 di atas dapat dilihat bahwa penelitian-penelitian sebelumnya membahas simulasi *co-firing* hidrogen dengan gas alam secara spesifik pada beberapa jenis turbin gas, namun belum ada yang menggunakan objek turbin gas Mitsubishi seri M701F kapasitas 240 MW seperti yang terpasang di PLTGU Cilegon. Selain itu, skenario simulasi yang dilakukan sebelumnya menggunakan pendekatan temperatur gas masuk turbin konstan, temperatur gas buang turbin konstan, *heat input* konstan serta daya turbin konstan, sedangkan pada pendekatan *excess air ratio* konstan belum menjadi fokus dalam penelitian terdahulu