BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Krisis energi fosil dan dampak lingkungan yang menyertainya menjadi tantangan global yang mendesak untuk segera diatasi. Transisi menuju energi terbarukan menjadi strategi utama berbagai negara, termasuk Indonesia. Sebagai produsen minyak sawit terbesar di dunia, Indonesia memanfaatkan biodiesel berbasis minyak sawit (FAME) sebagai bahan bakar alternatif untuk mengurangi ketergantungan bahan bakar fosil sekaligus menekan emisi gas rumah kaca. Implementasi biodiesel terus meningkat secara signifikan dari kadar B25 pada 2008, B30 pada 2020, hingga rencana penerapan B40 pada 2025, menjadikan Indonesia pelopor dalam pemanfaatan biodiesel secara global.

Pada konteks implementasi tersebut, Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG), menggunakan Mesin *Dual-Fuel* yang dirancang untuk menggunakan bahan bakar campuran termasuk biodiesel B40. Mesin kelas industri ini menawarkan potensi pengurangan emisi dan penggunaan energi yang lebih berkelanjutan, namun juga menghadapi tantangan teknis dan Ekonomi yang perlu dianalisis secara mendalam.

Pemilihan biodiesel B40 sebagai bahan bakar dalam penelitian ini didasarkan pada beberapa pertimbangan. Indonesia sebagai produsen minyak sawit terbesar di dunia memiliki potensi besar untuk mengembangkan biodiesel berbasis minyak sawit (FAME) sebagai alternatif pengganti bahan bakar fosil. Biodiesel B40, yang merupakan campuran 40% biodiesel dan 60% diesel, dipilih karena merupakan langkah transisi menuju implementasi B100 yang direncanakan pada

tahun 2025, sesuai dengan kebijakan pemerintah Indonesia dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan menurunkan emisi gas rumah kaca.

B40 memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi mesin dan mengurangi emisi, meskipun beberapa studi sebelumnya menunjukkan adanya penurunan efisiensi pada kadar biodiesel yang lebih tinggi. Namun, B40 dianggap cukup optimal untuk pengujian dalam konteks mesin dual-fuel dengan kapasitas daya besar, seperti yang digunakan di PLTMG, dengan tetap memperhatikan aspek keberlanjutan dan dampak lingkungan.

Secara teknis, biodiesel B40 memiliki nilai kalor yang lebih rendah dan karakteristik pembakaran yang berbeda dibandingkan solar, yang berdampak pada efisiensi termal, konsumsi bahan bakar spesifik (SFC), dan heat rate mesin pembangkit. Studi-studi sebelumnya mengindikasikan penurunan efisiensi dan peningkatan konsumsi bahan bakar saat menggunakan biodiesel, tetapi sebagian besar kajian tersebut bersifat umum atau dilakukan pada mesin dengan tipe dan skala yang berbeda dari Mesin *Dual-Fuel*.

Penelitian oleh Ahmet Çalık (2024), Elgharbawy *et al.* (2024), dan Romy (2022) memberikan kontribusi pada pemahaman efisiensi biodiesel dan metode produksinya, namun terbatas pada kadar biodiesel yang lebih rendah atau pengujian pada mesin berkapasitas kecil hingga menengah. Oleh karena itu, terdapat kebutuhan untuk penelitian yang fokus pada penggunaan biodiesel B40 di mesin dual-fuel kelas industri besar.

Gap penelitian yang signifikan terletak pada kurangnya studi empiris yang mengevaluasi performa teknis dan Ekonomi biodiesel B40 pada mesin dual-fuel di PLTMG. Penelitian ini juga akan mencakup analisis gas buang sebagai bagian dari evaluasi dampak lingkungan, mengingat emisi yang dihasilkan dari pembakaran biodiesel dapat mempengaruhi kualitas udara dan keberlanjutan operasional pembangkit.

Penelitian ini akan mengisi kekosongan tersebut melalui analisis komprehensif terhadap efisiensi termal, SFC, *heat rate*, gas buang, serta aspek biaya dan dampak lingkungan. Untuk menjamin validitas dan reliabilitas temuan, penelitian ini secara eksplisit mengintegrasikan dua sumber data utama. Pertama, data primer yang diperoleh secara langsung melalui pengujian lapangan (*field testing*) pada Mesin *Dual-Fuel* yang dioperasikan menggunakan bahan bakar B40 pada berbagai level pembebanan (7 MW, 8 MW, dan 9 MW). Kedua, data sekunder berupa data operasional historis dan logsheet pembangkit periode 2022–2024 yang digunakan sebagai baseline perbandingan kinerja (B0 dan B35). Pendekatan integratif antara data uji aktual dan data historis ini memastikan bahwa analisis performa termal, emisi, dan keekonomian yang dihasilkan selaras dengan kondisi riil operasional pembangkit, sehingga rekomendasi yang diberikan bersifat aplikatif dan terukur.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka ada beberapa permasalahan dapat di identifikasi sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan biodiesel B40 terhadap efisiensi termal mesin *Dual-Fuel* pada berbagai level pembebanan (7 MW, 8 MW, dan 9 MW) untuk mengidentifikasi *sweet spot* dan *trade-off* termodinamika?
2. Sejauh mana penerapan normalisasi *Specific Fuel Consumption* (SFC) terhadap *Lower Heating Value* (LHV) dan analisis *Net Heat Rate* membuktikan efisiensi konversi energi serta stabilitas pembakaran antar unit generator?

3. Bagaimana profil emisi gas buang pada kondisi beban puncak (9 MW) dan implikasi teknis penggunaan B40 terhadap kompatibilitas material sistem bahan bakar dalam mendukung strategi *condition-based maintenance*?
4. Bagaimana kelayakan keekonomian operasional PLTMG ditinjau dari *Levelized Cost of Electricity* (LCOE), titik impas (*break-even point*), serta integrasi monetisasi *carbon credit*?

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan dalam penelitian ini tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka peneliti membatasi beberapa masalah yang akan ditetapkan dalam penelitian ini, maka akan dibatasi berdasarkan hal-hal berikut:

1. Penelitian ini akan dilakukan di area kerja peneliti, yaitu di PLTMG (terdiri dari 14 unit generator).
2. Jenis bahan bakar yang akan digunakan sebagai variabel utama dalam penelitian adalah Biodiesel B40 (campuran 40% biodiesel FAME dan 60% solar).
3. Analisis emisi gas buang (PM, SO_2, NOx, dan CO) secara eksklusif difokuskan pada kondisi pembebanan puncak 9 MW (~66% *load factor*) dengan menggunakan data historis B35 sebagai baseline. Pembatasan ini didasarkan pada prinsip *worst-case scenario compliance testing* yang lazim diterapkan pada utilitas pembangkit listrik, di mana temperatur ruang bakar tertinggi pada beban penuh merepresentasikan kondisi paling kritis untuk pembentukan thermal NOx (mekanisme Zeldovich). Implikasi dari batasan ini adalah bahwa profil emisi yang dihasilkan tidak dapat diekstrapolasi atau digeneralisasi secara linear untuk beban parsial (7 MW dan 8 MW). Namun,

pendekatan ini memberikan jaminan konservatif (*upper bound guarantee*): jika B40 mampu mematuhi baku mutu lingkungan pada kondisi beban terberatnya, maka kepatuhan pada beban yang lebih rendah secara inheren terjamin karena temperatur pembakaran yang lebih rendah.

4. Pembandingan performa termal dan keekonomian akan dilakukan menggunakan data penggunaan Solar Murni (B0) sebagai baseline pada rentang pembebanan mesin 7 MW, 8 MW, dan 9 MW.
5. Penggunaan bahan bakar yang dianalisis terbatas pada jenis biodiesel (B40, B35, dan B0) tanpa mempertimbangkan bahan bakar alternatif lain (seperti hidrogen atau biogas) dalam penelitian ini.
6. Asumsi daya yang diambil dan dianalisis adalah daya bersih (*net power*) yang dihasilkan pada terminal generator.
7. Pengaturan beban jika terjadi beban lebih *(overload*) akan diatur pada sistem manajemen pembangkit sesuai dengan kebijakan operasional standar PLTMG, dan data pada kondisi transient tersebut tidak dimasukkan dalam perhitungan steady-state.
8. Pengukuran parameter lingkungan eksternal (seperti suhu dan kelembapan udara) akan dilakukan secara manual dengan alat ukur yang terkalibrasi, dan diasumsikan konstan selama periode pengujian singkat.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin di capai dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh penggunaan biodiesel B40 terhadap efisiensi termal mesin *Dual-Fuel* pada berbagai level pembebanan (7 MW, 8 MW, dan 9 MW) untuk

mengidentifikasi sweet spot operasional dan *trade-off* perpindahan panas *(heat transfer loss*).

2. Mengevaluasi performa konsumsi bahan bakar melalui analisis komparatif *Specific Fuel Consumption* (SFC) aktual dan ternormalisasi terhadap *Lower Heating Value* (LHV) serta *Net Heat Rate*, sekaligus mengukur stabilitas pembakaran antar unit generator.
3. Menganalisis profil emisi gas buang pada kondisi beban puncak (9 MW) serta menguji kompatibilitas material sistem bahan bakar sebagai landasan penerapan strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*).
4. Mengukur kelayakan keekonomian operasional PLTMG menggunakan pendekatan *Levelized Cost of Electricity* (LCOE), menentukan titik impas (*break-even point*), dan mengevaluasi dampak monetisasi carbon credit terhadap biaya produksi listrik.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Manfaat Teoritis

   Penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan mengenai pengaruh penggunaan biodiesel B40 terhadap performa termal dan efisiensi mesin dual-fuel kelas industri besar, khususnya Mesin *Dual-Fuel*. Hasil penelitian ini memperkaya literatur tentang optimasi bahan bakar biodiesel dalam konteks pembangkit listrik tenaga mesin gas.

2. Manfaat Praktis

   Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi teknis dan Ekonomi yang konkret bagi pengelola PLTMG dalam mengoptimalkan penggunaan biodiesel B40. Secara khusus,

penelitian ini menyediakan rekomendasi berbasis data lapangan terkait pengaturan injeksi bahan bakar, pemeliharaan mesin, dan strategi pengelolaan biaya operasional untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan operasional pembangkit.

1.6 Originalitas penelitian

Tabel 1. 1 Penelitian Terdahulu

No	Penelitian Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian & Kebaruan (Novelty) Riset Ini
1	Ahmet Çalık, 2024	*Exploring the efficiency and emission characteristics of hydroxy-boosted canola biodiesel.*	Penambahan gas HHO pada B20 dan B40 meningkatkan efisiensi termal dan menurunkan konsumsi bahan bakar sebesar 4,43–5,74%.	Fokus pada modifikasi hardware (injeksi HHO) di skala laboratorium/mesin kecil. Belum ada evaluasi empiris terhadap SFC ternormalisasi LHV dan *Net Heat Rate* pada mesin *Dual-Fuel* skala utilitas besar murni mengandalkan oksigen intrinsik B40 (tanpa HHO), serta belum memetakan *sweet spot* efisiensi termal pada variasi beban spesifik (7, 8, dan 9 MW).
2	Elgharbawy *et al*., 2024	*Enhancing biodiesel production efficiency with industrial waste-derived catalysts: Techno-economic analysis.*	Metode microwave/ultrasonik meningkatkan efisiensi konversi produksi (97%) dan memberikan NPV serta ROI pabrik yang lebih tinggi.	Terbatas pada analisis keekonomian proses produksi/manufaktur biodiesel (NPV, ROI pabrik). Tidak ada komparasi dengan keekonomian operasional pembangkit menggunakan metrik *Levelized Cost of Electricity* (LCOE), analisis *Break-Even Point* premium harga,

No	Penelitian Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian & Kebaruan (Novelty) Riset Ini
				maupun monetisasi carbon credit pada aplikasi mesin skala utilitas.
3	Bizualem & Nurie, 2024	*A review on biodiesel micromixers: Types, configurations, and flow patterns*	Rekayasa *micromixer* menghasilkan *yield* produksi biodiesel lebih tinggi dengan energi reaksi lebih rendah.	Berfokus pada rekayasa kimia alat pencampur untuk meningkatkan yield produksi. Tidak menyentuh aspek termodinamika konversi energi di ruang bakar mesin besar, khususnya bagaimana fraksi FAME 40% mempengaruhi *Thermal Efficiency* dan *Heat Rate* pada kondisi steady-state di pembebanan parsial (7 MW) hingga beban puncak (9 MW).
4	Romy, 2022	*Energy Analysis of Diesel Engine With B30 at* PLTD Selat Panjang	Analisis energi pada mesin diesel konvensional (Caterpillar 3512B) menggunakan B30 di PLTD berskala kecil.	Menggunakan kadar campuran lebih rendah (B30) pada mesin diesel konvensional berskala kecil (<1 MW). Belum ada komparasi komprehensif antara B0, B35, dan B40 pada arsitektur mesin *Dual-Fuel* modern (sistem injeksi *common-rail* >600 bar) berkapasitas 140 MW, serta belum menganalisis profil emisi NOx dan PM pada beban puncak 9 MW.
5	Laguado-Ramírez *et al.*, 2024	*Comparative assessment of emissions, performance, and economics parameters for a dual–fuel diesel generator operating with rice bran*	Campuran RB-10% + H2 menurunkan BSFC (3,14%) dan emisi (HC, CO), serta menurunkan biaya operasional 3,93%.	Menguji campuran berbasis nabati berfraksi rendah (RB-10%) yang diperkaya hidrogen. Riset ini mengisi kekosongan pada campuran berbasis sawit berfraksi tinggi (B40) tanpa bantuan hidrogen, serta memperluas analisis tidak hanya

No	Penelitian Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian & Kebaruan (Novelty) Riset Ini
		biodiesel and hydrogen		pada BSFC, tetapi juga pada perhitungan keekonomian makro pembangkit (LCOE dan *Break-Even Point*) di konteks negara berkembang.

Berbagai penelitian terdahulu telah memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan biodiesel, namun mayoritas masih berfokus pada aspek produksi, modifikasi hardware, atau aplikasi pada skala terbatas. Misalnya, studi oleh Elgharbawy *et al*. (2024) dan Bizualem & Nurie (2024) berhasil meningkatkan efisiensi konversi dan yield produksi biodiesel melalui metode katalis limbah industri dan rekayasa *micromixer*.

Namun, analisis keekonomian dalam studi tersebut terbatas pada tingkat manufaktur pabrik (NPV dan ROI) tanpa menyentuh aspek keekonomian operasional pembangkit listrik. Di sisi lain, penelitian yang berfokus pada modifikasi performa mesin, seperti yang dilakukan oleh Ahmet Çalık (2024) dan Laguado-Ramírez *et al.* (2024), menunjukkan peningkatan efisiensi melalui injeksi gas HHO atau hidrogen pada campuran biodiesel berfraksi rendah (B20 atau RB-10%). Pendekatan ini belum merepresentasikan kondisi operasional riil di lapangan yang mengharuskan penggunaan biodiesel fraksi tinggi secara *stand-alone* tanpa bantuan aditif gas.

Sementara itu, penelitian yang sudah menerapkan biodiesel pada sektor pembangkit di Indonesia, seperti studi Romy (2022) di PLTD Selat Panjang, masih terbatas pada mesin diesel konvensional berskala kecil (<1 MW) dengan kadar campuran yang lebih rendah (B30). Studi-studi tersebut belum mengevaluasi secara komprehensif bagaimana fraksi FAME yang lebih tinggi (40%) berinteraksi dengan arsitektur mesin dual-fuel modern berkapasitas besar, khususnya yang

dilengkapi sistem injeksi common-rail bertekanan tinggi (>600 bar) dan beroperasi pada variasi pembebanan dinamis.

Berdasarkan pemetaan tersebut, terdapat gap penelitian yang signifikan, yaitu belum adanya studi empiris yang mengevaluasi performa termal dan keekonomian biodiesel B40 pada mesin dual-fuel skala utilitas besar (140 MW). Oleh karena itu, kebaruan (novelty) utama penelitian ini terletak pada tiga aspek fundamental yang saling terintegrasi:

1) Evaluasi Termodinamika

   Analisis Specific Fuel Consumption (SFC) yang dinormalisasi terhadap *Lower Heating Value* (LHV) dan *Net Heat Rate* pada variasi pembebanan spesifik (7 MW, 8 MW, dan 9 MW) untuk memetakan *sweet spot* efisiensi termal secara empiris, bukan hanya mengandalkan data *gross* yang bias akibat defisit kalor.

2) Validasi Emisi Beban Puncak

   Analisis profil emisi gas buang (khususnya NOx dan PM) pada beban 9 MW sebagai bukti kepatuhan *(compliance)* lingkungan dalam kondisi operasional paling kritis.

3) Keekonomian Makro Pembangkit

   Perhitungan kelayakan ekonomi menggunakan metrik *Levelized Cost of Electricity* (LCOE), analisis *Break-Even Point* terhadap premium harga bahan bakar, serta integrasi monetisasi *carbon credit* yang belum pernah diterapkan dalam studi biodiesel skala utilitas sebelumnya.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengisi kekosongan literatur mengenai aplikasi biodiesel fraksi tinggi di mesin kelas industri, tetapi juga memberikan landasan data empiris yang aplikatif dan terukur. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi rujukan strategis bagi operator pembangkit dan pengambil kebijakan dalam mengoptimalkan transisi energi menuju B40 yang berkelanjutan secara teknis, lingkungan, dan Ekonomi