

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Sebagai pendukung pengerjaan penelitian ini penulis mencantumkan beberapa referensi penelitian sebelumnya yang sejenis dengan penelitian ini.

1. Amir, A., et al. (2021). "Pengaruh Suhu dan Kelembaban Terhadap Efisiensi Pembakaran Mesin Diesel." Jurnal Energi Terbarukan.

Penelitian ini mengeksplorasi pengaruh suhu dan kelembaban terhadap efisiensi pembakaran pada mesin diesel. Penelitian dilakukan dengan serangkaian percobaan di mana mesin diesel diuji pada kondisi suhu dan kelembaban yang bervariasi. Hasil menunjukkan bahwa penurunan suhu secara signifikan mengarah pada peningkatan densitas energi di dalam ruang bakar, yang berdampak positif terhadap efisiensi pembakaran. Namun, kelembaban yang tinggi mengganggu pembentukan campuran udara-bahan bakar yang optimal dan mengurangi efisiensi pembakaran. Penulis merekomendasikan pengaturan parameter suhu dan kelembaban pada instalasi mesin diesel untuk meningkatkan kinerjanya.

2. Sari, R., & Tresnadian, D. (2020). "Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Diesel dalam Operasi di Berbagai Kondisi Lingkungan." Jurnal Teknik Mesin.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengukur kinerja PLTD di beberapa lokasi dengan variabel lingkungan yang berbeda. Penelitian menunjukkan bahwa fluktuasi suhu dan kelembaban dapat mempengaruhi daya keluaran dan efisiensi bahan bakar. Temuan ini mengindikasikan pentingnya desain sistem kontrol yang dapat menyesuaikan kinerja PLTD dengan perubahan kondisi lingkungan agar dapat beroperasi dengan efisiensi yang maksimal.

3. Zainal, A., & Putra, M. (2019). "Studi Perbandingan Efisiensi Pembakaran Mesin Diesel dengan Variasi Suhu dan Kelembaban." Jurnal Ilmu Energi.

Penelitian ini membandingkan variasi efisiensi pembakaran mesin diesel di beberapa parameter suhu dan kelembaban dengan menggunakan metode eksperimen dan simulasi. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa rasio udara-bahan bakar yang optimal terjadi pada suhu tertentu, di mana pembakaran berlangsung lebih

efisien, menghasilkan lebih sedikit emisi gas berbahaya. Penulis juga menemukan bahwa kelembaban relatif yang rendah meningkatkan kinerja mesin, tetapi juga memperingatkan tentang risiko pembakaran tidak sempurna jika kelembaban terlalu rendah. Penelitian ini mendorong perlunya metode kontrol yang adaptif untuk mesin diesel berdasarkan kondisi lingkungan.

4. Hendrawan, A., et al. (2018). "Pengaruh Kondisi Lingkungan Terhadap Emisi Gas Buang Dari Mesin Diesel." Jurnal Politeknik.

Dalam eksplorasi ini, penulis menyelidiki hubungan antara kondisi lingkungan dan emisi yang dihasilkan oleh mesin diesel. Penelitian ini menemukan bahwa suhu dan kelembaban berpengaruh langsung terhadap konsentrasi emisi CO, NOx, dan HC. Mempertimbangkan fluktuasi variabel lingkungan, penulis menyarankan perlunya pengembangan teknologi exhaust after-treatment untuk meminimalkan emisi berbahaya serta meningkatkan kebersihan udara di sekitar instalasi PLTD.

5. Rahman, M., & Surya, S. (2022). "Evaluasi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Diesel dengan Mempertimbangkan Variasi Suhu dan Kelembaban." Jurnal Energi dan Sumber Daya.

Penelitian ini mengevaluasi bagaimana variasi suhu dan kelembaban mempengaruhi kinerja dan efisiensi PLTD. Dengan menggunakan perangkat lunak simulasi, penulis berhasil menganalisis data dari pengujian lapangan dan menemukan bahwa kinerja PLTD menurun secara signifikan dalam kondisi lingkungan ekstrem. Hasil ini mendorong perlunya pemeliharaan periodik dan pengembangan sistem pendingin untuk menjaga efisiensi operasional mesin diesel di PLTD.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

2.2.1 Pengertian dan Prinsip Kerja PLTD

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan salah satu sistem pembangkitan tenaga listrik yang memanfaatkan mesin diesel sebagai penggerak mula (*prime mover*) untuk memutar generator. Pada sistem ini, energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar minyak (solar) dikonversi melalui proses pembakaran menjadi energi panas, kemudian diubah menjadi energi mekanik dalam

bentuk putaran poros, dan selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik oleh generator (Padhil et al., 2023).

Secara fundamental, mekanisme kerja PLTD berlandaskan pada hukum kekekalan energi, yaitu bahwa energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, melainkan hanya dapat mengalami perubahan bentuk. Proses konversi energi pada PLTD berlangsung secara bertahap, dimulai dari perubahan energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi panas melalui proses pembakaran, kemudian dikonversi menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros mesin, dan pada tahap akhir diubah menjadi energi listrik oleh generator.

Operasi PLTD mengikuti siklus kerja mesin diesel, di mana udara terlebih dahulu dikompresi hingga mencapai tekanan dan temperatur tinggi. Pada akhir langkah kompresi, bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar dan mengalami penyalaan spontan (*self-ignition*). Tekanan tinggi hasil pembakaran mendorong piston sehingga menghasilkan daya mekanik yang diteruskan ke poros engkol dan generator untuk menghasilkan energi listrik.

Dalam sistem kelistrikan Indonesia, PLTD banyak dimanfaatkan karena memiliki beberapa keunggulan, antara lain kemampuan *quick start* untuk melayani beban puncak, fleksibilitas operasi di wilayah terpencil yang belum terjangkau jaringan transmisi interkoneksi, serta stabilitas frekuensi yang baik sehingga sesuai sebagai pembangkit cadangan (*backup supply*).

Meskipun demikian, PLTD memiliki keterbatasan berupa efisiensi yang relatif lebih rendah dibandingkan pembangkit skala besar seperti PLTU dan PLTG, tingkat kebisingan yang tinggi, serta biaya operasional yang cukup besar akibat ketergantungan pada bahan bakar minyak dan kebutuhan pemeliharaan yang intensif.

Secara umum, karakteristik PLTD meliputi kapasitas daya yang bervariasi dari puluhan kilowatt hingga beberapa megawatt per unit, respons beban yang cepat, kemudahan instalasi dan mobilitas yang tinggi, serta efisiensi termal yang berkisar antara 30% sampai 45% tergantung pada kapasitas dan kondisi operasional. Dari sisi ekonomi, biaya operasi PLTD cenderung lebih tinggi

dibandingkan pembangkit berbahan bakar murah, terutama karena faktor harga bahan bakar dan frekuensi perawatan yang relatif tinggi.

2.2.2 Komponen Utama Sistem PLTD

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) tersusun atas beberapa subsistem utama yang saling terhubung dan bekerja secara terpadu dalam suatu mekanisme operasional yang terintegrasi. Setiap subsistem memiliki peran fungsional yang spesifik dalam mendukung proses konversi energi dari energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik. Sinergi antar komponen tersebut memungkinkan pembangkit beroperasi secara kontinu, stabil, dan andal sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik. Secara umum, komponen utama PLTD meliputi mesin diesel, generator, sistem bahan bakar, sistem pendingin, sistem pelumasan, sistem udara masuk, dan sistem pembuangan gas.

1. Mesin Diesel

Mesin diesel merupakan elemen utama dalam sistem PLTD yang berfungsi sebagai penggerak mula (*prime mover*). Mesin ini berperan dalam mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros melalui proses pembakaran internal yang terjadi di dalam silinder. Energi mekanik tersebut selanjutnya dimanfaatkan untuk menggerakkan generator guna menghasilkan energi listrik.

Pada umumnya, mesin diesel yang digunakan pada PLTD beroperasi berdasarkan siklus empat langkah (*four-stroke cycle*) yang berlangsung dalam dua kali putaran poros engkol. Siklus ini terdiri atas langkah hisap, kompresi, usaha, dan buang yang terjadi secara berurutan dan berulang selama mesin beroperasi.

Pada langkah hisap (*intake stroke*), piston bergerak dari Titik Mati Atas (TMA) menuju Titik Mati Bawah (TMB) dengan katup masuk dalam kondisi terbuka, sehingga udara dari lingkungan masuk ke dalam ruang silinder. Selanjutnya, pada langkah kompresi (*compression stroke*), piston bergerak dari TMB menuju TMA dengan kedua katup tertutup, sehingga udara di dalam silinder mengalami pemampatan hingga mencapai tekanan dan temperatur yang

tinggi. Kondisi ini menciptakan lingkungan yang memungkinkan terjadinya penyalan spontan bahan bakar.

Pada akhir langkah kompresi, bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar melalui injektor bertekanan tinggi. Proses ini menandai dimulainya langkah usaha (*power stroke*), di mana bahan bakar terbakar secara spontan akibat temperatur udara hasil kompresi. Gas hasil pembakaran yang bertekanan tinggi kemudian mengembang dan mendorong piston kembali ke arah TMB, sehingga menghasilkan kerja mekanik pada poros engkol. Setelah proses ekspansi selesai, piston bergerak kembali menuju TMA dalam langkah buang (*exhaust stroke*) untuk mengeluarkan gas sisa pembakaran melalui katup buang menuju sistem pembuangan. Rangkaian siklus tersebut berlangsung secara kontinu selama mesin dalam kondisi operasi.

2. Generator

Generator merupakan perangkat elektromekanik yang berfungsi mengubah energi mekanik dari putaran poros mesin diesel menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Pada sistem PLTD, generator yang digunakan umumnya adalah generator sinkron (*synchronous generator*) guna memastikan kestabilan frekuensi keluaran sebesar 50 Hz sesuai dengan standar sistem tenaga listrik nasional.

Secara konstruksi, generator terdiri atas dua bagian utama, yaitu rotor dan stator. Rotor merupakan bagian yang berputar dan berfungsi menghasilkan medan magnet melalui sistem eksitasi. Sementara itu, stator merupakan bagian yang diam dan terdiri atas kumparan konduktor tempat terjadinya induksi gaya gerak listrik akibat perubahan fluks magnetik yang ditimbulkan oleh putaran rotor.

Ketika rotor berputar mengikuti kecepatan mesin diesel, medan magnet yang dihasilkan akan memotong kumparan stator sehingga terjadi perubahan fluks magnetik. Perubahan fluks tersebut menginduksi tegangan listrik pada kumparan stator yang kemudian disalurkan ke sistem distribusi melalui panel kontrol serta perangkat proteksi yang sesuai dengan standar operasi pembangkit.

3. Sistem Bahan Bakar

Sistem bahan bakar merupakan subsistem yang bertanggung jawab dalam proses penyimpanan, pengaliran, pengkondisian, dan penginjeksian bahan bakar dari tangki penyimpanan hingga ke ruang bakar mesin diesel. Keandalan sistem ini sangat berpengaruh terhadap kualitas proses pembakaran dan performa mesin secara keseluruhan.

Komponen utama sistem bahan bakar meliputi tangki utama (*main tank*), pompa transfer, filter bahan bakar, pompa injeksi (*injection pump*), serta injektor (*fuel injector*). Bahan bakar disimpan dalam tangki utama sebelum dialirkan oleh pompa transfer menuju sistem suplai. Selama proses aliran, bahan bakar melewati filter untuk menghilangkan partikel kotoran maupun kontaminan yang berpotensi mengganggu proses pembakaran atau menyebabkan kerusakan pada komponen mesin.

Pompa injeksi berfungsi meningkatkan tekanan bahan bakar hingga mencapai tekanan yang dibutuhkan untuk proses pengabutan. Injektor kemudian menyemprotkan bahan bakar dalam bentuk partikel halus ke dalam ruang bakar agar tercapai proses atomisasi yang optimal. Atomisasi yang baik memungkinkan pencampuran udara dan bahan bakar berlangsung secara lebih homogen, sehingga pembakaran dapat terjadi secara efisien dan stabil.

4. Sistem Pendingin

Sistem pendingin berperan dalam mengendalikan temperatur operasi mesin diesel agar tetap berada dalam batas yang diperkenankan. Selama proses pembakaran, sebagian energi panas tidak dikonversi menjadi energi mekanik, sehingga perlu dilepaskan untuk mencegah terjadinya kenaikan temperatur yang berlebihan.

Pada PLTD, sistem pendingin umumnya menggunakan sistem pendingin cair (*liquid cooling system*). Fluida pendingin bersirkulasi melalui jaket pendingin mesin untuk menyerap panas dari komponen silinder dan kepala silinder, kemudian dialirkan menuju radiator untuk melepaskan panas ke lingkungan. Sirkulasi fluida pendingin dijaga oleh pompa air agar proses perpindahan panas berlangsung secara kontinu.

Pada unit dengan kapasitas besar, sistem pendingin sering dilengkapi *heat exchanger* dan *cooling tower* guna meningkatkan efektivitas pelepasan panas. Pengendalian temperatur yang optimal sangat penting untuk menjaga efisiensi termal, kestabilan pelumasan, serta mencegah terjadinya kerusakan akibat tegangan termal.(Alfalah, 2023).

5. Sistem Pelumasan

Sistem pelumasan berfungsi mendistribusikan minyak pelumas ke seluruh komponen mesin yang mengalami pergerakan relatif guna meminimalkan gesekan dan keausan. Selain itu, sistem ini juga berperan dalam membantu proses pendinginan, membersihkan partikel logam hasil gesekan, serta menjaga kedekatan antara piston dan dinding silinder.

Pada umumnya, mesin diesel PLTD menggunakan sistem pelumasan tekan, di mana pompa oli mengalirkan pelumas dari bak oli menuju saluran distribusi internal mesin. Sebelum disalurkan, oli melewati filter untuk menyaring partikel kontaminan. Sistem pelumasan yang bekerja secara optimal sangat menentukan tingkat keandalan dan umur pakai mesin diesel.

6. Sistem Udara Masuk

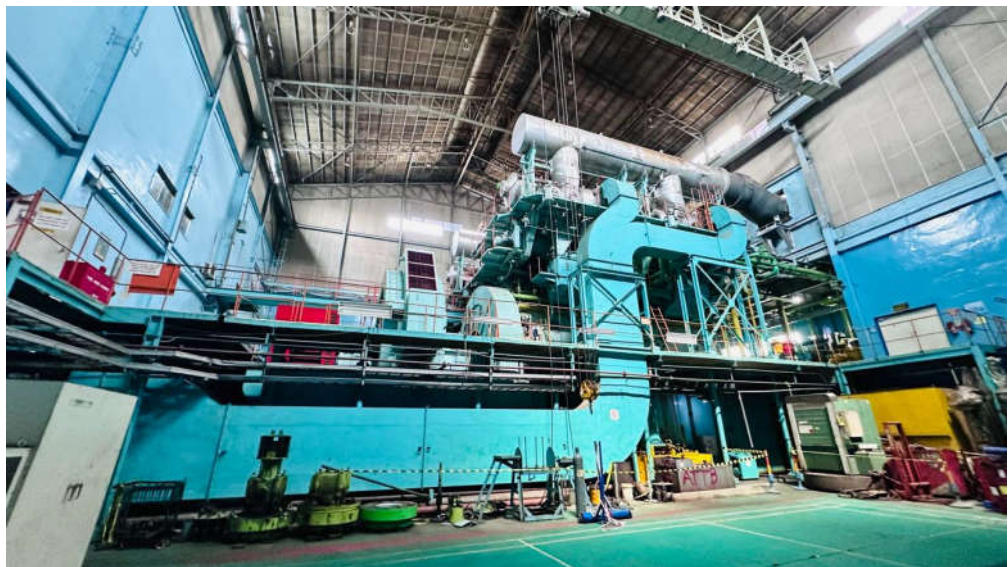
Sistem udara masuk bertugas menyediakan udara sebagai oksidator dalam proses pembakaran. Udara lingkungan terlebih dahulu melewati *air filter* untuk menyaring partikel debu dan kotoran sebelum masuk ke dalam mesin. Kualitas udara masuk sangat berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran dan daya keluaran mesin.

Pada mesin yang dilengkapi *turbocharger*, udara dikompresi sebelum memasuki ruang bakar guna meningkatkan tekanan dan massa udara yang masuk. Udara terkompresi tersebut kemudian didinginkan melalui *intercooler* untuk meningkatkan densitasnya. Peningkatan densitas udara akan meningkatkan kandungan oksigen per satuan volume, sehingga mendukung terjadinya pembakaran yang lebih efisien dan peningkatan daya mesin(Alfalah et al., n.d.).

7. Sistem Pembuangan Gas

Sistem pembuangan gas berfungsi menyalurkan gas hasil pembakaran dari silinder menuju atmosfer secara terkendali dan aman. Komponen utama sistem ini meliputi *exhaust manifold*, *muffler*, serta perangkat pengendali emisi.

Selain berfungsi sebagai saluran pembuangan, sistem ini juga berperan dalam mengurangi tingkat kebisingan dan mengendalikan emisi gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), dan hidrokarbon (HC). Pada mesin yang menggunakan *turbocharger*, sebagian energi dari gas buang dimanfaatkan untuk memutar turbin, sehingga turut berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi sistem secara keseluruhan



Gambar 2. 1 PLTD Sungai Juaro PLN Indonesia Power UPB Keramasan

2.2.3 Proses Konversi Energi pada PLTD

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) menghasilkan energi listrik melalui serangkaian proses konversi energi yang berlangsung secara bertahap dan berkesinambungan. Energi kimia yang tersimpan dalam bahan bakar terlebih dahulu diubah menjadi energi panas melalui proses pembakaran, kemudian dikonversi menjadi energi mekanik oleh mesin diesel, dan pada tahap akhir diubah menjadi energi listrik oleh generator. Secara umum, mekanisme konversi energi pada PLTD dapat dikelompokkan ke dalam tiga tahapan utama, yaitu konversi

energi kimia menjadi energi panas, konversi energi panas menjadi energi mekanik, serta konversi energi mekanik menjadi energi listrik.

Tahap 1 : Konversi Energi Kimia ke Energi Panas

Tahap awal dalam proses pembangkitan energi pada mesin diesel adalah transformasi energi kimia bahan bakar menjadi energi panas melalui reaksi pembakaran yang berlangsung di dalam ruang bakar. Proses ini terjadi setelah bahan bakar diinjeksikan ke udara yang telah mengalami proses kompresi hingga mencapai tekanan dan temperatur tinggi, sehingga memungkinkan terjadinya penyalan spontan (Antono et al., 2018a).

1) Karakteristik Bahan Bakar Diesel (Solar)

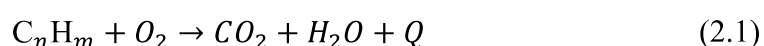
Bahan bakar diesel (solar) merupakan campuran hidrokarbon kompleks yang tersusun dari rantai atom karbon (C) dan hidrogen (H) dengan rumus umum C_nH_m . Nilai kalor bahan bakar diesel berada pada kisaran 42 - 45 MJ/kg, bergantung pada kualitas dan komposisi kimianya. Nilai kalor ini merepresentasikan jumlah energi panas yang dapat dilepaskan selama proses pembakaran berlangsung.

2) Proses Injeksi dan Pembakaran

Pada tahap ini, udara di dalam silinder terlebih dahulu dikompresi oleh gerakan piston hingga mencapai temperatur sekitar 500°C - 700°C dan tekanan sekitar 30 bar - 50 bar. Menjelang akhir langkah kompresi, bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar dalam bentuk kabut halus melalui injektor bertekanan tinggi. Temperatur udara yang sangat tinggi menyebabkan bahan bakar mengalami penyalan spontan (*self-ignition*) tanpa memerlukan sistem pengapian seperti pada mesin bensin

3) Reaksi Kimia Pembakaran

Secara teoritis, reaksi pembakaran hidrokarbon pada mesin diesel dapat dinyatakan sebagai:



Keterangan :

C_nH_m : Senyawa hidrokarbon dalam bahan bakar diesel

O_2 : Oksigen dari udara (udara mengandung $\pm 21\%$ O_2 secara volume)

CO_2 : Karbon dioksida sebagai hasil pembakaran sempurna

H_2O : Uap air sebagai hasil oksidasi hydrogen

Q : Energi panas yang dilepaskan dari reaksi eksotermis

Reaksi tersebut menunjukkan bahwa oksigen dari udara bereaksi dengan hidrokarbon bahan bakar menghasilkan karbon dioksida (CO_2), uap air (H_2O), serta energi panas (Q) sebagai hasil reaksi eksotermis. Pada kondisi pembakaran sempurna, seluruh unsur karbon dan hidrogen akan teroksidasi menjadi CO_2 dan H_2O . Namun dalam kondisi operasi nyata, proses pembakaran tidak selalu berlangsung sempurna sehingga dapat menghasilkan produk samping berupa karbon monoksida (CO) akibat kekurangan oksigen, hidrokarbon tidak terbakar (HC) akibat proses atomisasi yang kurang optimal, nitrogen oksida (NO_x) akibat temperatur pembakaran yang tinggi, serta partikulat (PM) akibat pembakaran tidak sempurna (Antono et al., 2018b).

4) Konversi Energi

Energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran meningkatkan tekanan dan temperatur gas di dalam ruang bakar. Kondisi ini menyebabkan piston terdorong ke bawah pada langkah ekspansi sehingga energi panas dikonversi menjadi energi mekanik pada poros engkol. Besarnya energi panas yang dilepaskan selama proses pembakaran dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$Q = m_f \times HV \quad (2.2)$$

Keterangan :

Q : Energi panas hasil pembakaran (kJ)

m_f : Massa bahan bakar yang terbakar (kg)

HV : Nilai kalor bahan bakar (*heating value*) (kJ/kg)

Meskipun demikian, tidak seluruh energi panas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai kerja yang berguna. Sebagian energi hilang melalui gas buang, sistem pendingin, serta rugi-rugi akibat gesekan dan inefisiensi mekanis pada komponen mesin.

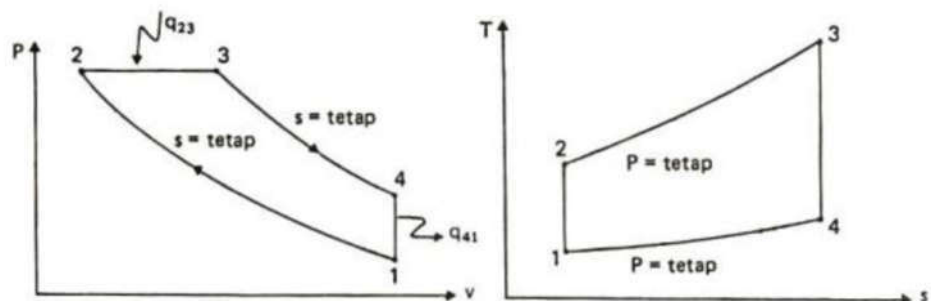
Tahap 2 : Konversi Energi Panas ke Energi Mekanik

Setelah energi kimia bahan bakar dikonversi menjadi energi panas melalui proses pembakaran, energi panas tersebut selanjutnya dimanfaatkan untuk menghasilkan energi mekanik pada mesin diesel.

1. Proses Termodinamika dalam silinder

Mekanisme konversi energi panas menjadi energi mekanik dapat dijelaskan melalui siklus termodinamika Diesel yang terdiri atas beberapa tahapan utama, yaitu :

- 1) Langkah kompresi (adiabatik), di mana udara di dalam silinder dikompresi oleh piston sehingga tekanan dan temperatur meningkat secara signifikan.
- 2) Langkah pembakaran (isobarik/tekanan konstan), yaitu proses injeksi bahan bakar yang diikuti pembakaran, sehingga energi panas dilepaskan dan tekanan gas meningkat tajam.
- 3) Langkah ekspansi (adiabatik), di mana gas hasil pembakaran mendorong piston dan mengubah energi panas menjadi kerja mekanik melalui proses ekspansi.
- 4) Langkah buang (isokhorik/volume konstan), yaitu proses pengeluaran gas sisa pembakaran melalui katup buang.



Gambar 2. 2 Diagram P-V dan T-S Mesin Diesel

(sumber : Muttaqin et al., 2023)

2. Konversi gerak linier menjadi gerak rotasi

Tekanan gas hasil pembakaran menyebabkan piston bergerak turun dan menghasilkan gerak linier. Gerakan linier tersebut diteruskan melalui *connecting rod* menuju poros engkol (*crankshaft*), yang kemudian mengubah gerakan bolak-balik piston menjadi gerak rotasi kontinu.

3. Daya mekanik poros (*Shaft Power*)

Energi mekanik yang dihasilkan oleh putaran poros engkol disebut sebagai daya mekanik poros (*shaft power*) dan merupakan keluaran utama mesin diesel. Dalam praktiknya, sebagian energi mengalami kehilangan akibat gesekan antar komponen, rugi-rugi pendinginan, serta pelepasan panas melalui gas buang. Tingkat keberhasilan konversi energi panas menjadi energi mekanik dinyatakan melalui efisiensi mekanik, yang dirumuskan sebagai :

$$\eta_{mekanik} = \frac{P_{poros}}{Q_{pembakaran}} \quad (2.3)$$

Keterangan :

$\eta_{mekanik}$: Efisiensi mekanik mesin diesel (%)

P_{poros} : Daya mekanik poros (Watt)

$Q_{pembakaran}$: Energi panas yang tersedia dari pembakaran (Watt)

Tahap 3 : Konversi Energi Mekanik ke Energi Listrik

Energi mekanik dari poros engkol selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik melalui generator sinkron.

1. Hubungan Mekanik Mesin dan Generator

Poros mesin diesel dihubungkan secara langsung (*direct coupling*) atau melalui kopling dengan poros rotor generator. Ketika mesin beroperasi, rotor generator berputar mengikuti kecepatan mesin, misalnya sekitar 1500 rpm untuk menghasilkan frekuensi sistem sebesar 50 Hz.

2. Prinsip Induksi Elektromagnetik

Rotor generator memiliki kutub magnetik berupa elektromagnet yang berputar di dalam stator yang terdiri atas kumparan konduktor. Putaran rotor menghasilkan perubahan fluks magnetik yang memotong kumparan stator. Berdasarkan hukum Faraday, perubahan fluks magnetik tersebut menimbulkan gaya gerak listrik yang dirumuskan sebagai :

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

Keterangan :

ε : Gaya gerak listrik / EMF (Volt)

N : Jumlah lilitan kumparan (turn)

Φ : Fluks magnetik (Weber)

t : Waktu (detik)

3. Pengaturan Tegangan dan Frekuensi

Kestabilan tegangan keluaran dijaga oleh *Automatic Voltage Regulator* (AVR) yang mengatur arus medan pada rotor. Frekuensi listrik yang dihasilkan bergantung pada kecepatan putaran rotor dan jumlah kutub generator, yang dinyatakan sebagai :

$$f = \frac{p \times n}{120} \quad (2.5)$$

Keterangan:

f : Frekuensi (Hz)

p : Jumlah kutub generator

n : Kecepatan putaran rotor (rpm)

4. Efisiensi Konversi Generator

Pada tahap ini juga terjadi rugi-rugi energi dalam bentuk panas akibat resistansi lilitan, rugi magnetik seperti histeresis dan arus eddy, serta gesekan mekanis rotor. Meskipun demikian, efisiensi generator umumnya berada pada kisaran 92% - 98% tergantung pada desain dan kondisi operasionalnya (Djohari, 2020).

2.2.4 Kinerja dan Efisiensi Sistem PLTD

Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) dapat dianalisis melalui beberapa parameter utama yang merepresentasikan tingkat efisiensi konversi energi pada setiap tahapan proses pembangkitan.

1. Efisiensi Termal (η_{th})

Efisiensi termal menunjukkan kemampuan mesin diesel dalam mengonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik keluaran. Secara matematis, efisiensi termal dinyatakan sebagai :

$$\eta_{th} = \frac{P_{output}}{\dot{m}_{bb} \times LHV} \quad (2.6)$$

Keterangan :

P_{output} : Daya keluaran (kW)

$\dot{m}_{bb}$: Laju konsumsi bahan bakar (kg/s)

LHV : Nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)

2. *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC)

Brake Specific Fuel Consumption merupakan parameter yang menyatakan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik. Persamaan BSFC dirumuskan sebagai :

$$BSFC = \frac{\dot{m}_{bb}}{P_{output}} \text{ [kg/kWh]} \quad (2.7)$$

Keterangan :

$\dot{m}_{bb}$: Laju aliran massa bahan bakar (kg/jam atau kg/s)

P_{output} : Daya keluaran generator/mesin (kW)

Nilai BSFC yang lebih rendah menunjukkan tingkat efisiensi operasi mesin yang lebih baik.

3. Efisiensi Mekanik (η_m)

Efisiensi mekanik menggambarkan kemampuan mesin dalam mengubah energi hasil pembakaran menjadi daya mekanik pada poros engkol. Secara matematis dinyatakan sebagai :

$$\eta_m = \frac{P_{poros}}{P_{indikator}} \quad (2.8)$$

Keterangan :

P_{poros} : Daya poros (*Brake Power*) (kW)

$P_{indikator}$: Daya indikator hasil pembakaran di dalam silinder (kW)

Kerugian energi pada tahap ini umumnya disebabkan oleh gesekan komponen, sistem pendingin, serta kerja pompa.

4. Efisiensi Generator (η_g) (Djohari, 2020)

Efisiensi generator menunjukkan kemampuan konversi energi mekanik menjadi energi listrik, yang dirumuskan sebagai :

$$\eta_g = \frac{P_{listrik}}{P_{poros}} \quad (2.9)$$

Keterangan :

η_g : Efisiensi generator (%)

$P_{listrik}$: Daya listrik keluaran generator (kW)

P_{poros} : Daya mekanik yang masuk ke generator (kW)

5. Efisiensi Total PLTD

Efisiensi keseluruhan sistem PLTD merupakan hasil perkalian dari efisiensi termal, efisiensi mekanik, dan efisiensi generator, yang dinyatakan sebagai :

$$\eta_{total} = \eta_{th} \times \eta_m \times \eta_g \quad (2.10)$$

Keterangan :

η_{total} : Efisiensi total sistem PLTD (%)

η_{th} : Efisiensi termal mesin diesel (%)

η_m : Efisiensi mekanik mesin (%)

η_g : Efisiensi generator (%)

6. Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi PLTD

Beberapa faktor utama yang memengaruhi efisiensi operasional PLTD antara lain kondisi suhu dan kelembaban udara yang memengaruhi densitas oksigen, kualitas bahan bakar (nilai kalor, kemurnian, dan viskositas), kondisi mesin serta sistem pelumasan, tingkat pembebanan operasi yang umumnya optimal pada 70% - 90% beban penuh, serta kebersihan sistem pendingin dan filter udara.

2.3 Proses Pembakaran pada Mesin Diesel

2.3.1 Prinsip Dasar Pembakaran Internal pada Mesin Diesel

Mesin diesel merupakan salah satu jenis mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) di mana proses pembakaran bahan bakar berlangsung di dalam ruang silinder mesin. Energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar diesel (solar) terlebih dahulu diubah menjadi energi panas melalui reaksi kimia dengan oksigen, kemudian dikonversi menjadi energi mekanik dalam bentuk gerakan piston.

Berbeda dengan mesin bensin, mesin diesel tidak menggunakan busi sebagai sumber penyalaan (*spark ignition*). Proses penyalaan terjadi secara spontan

(*auto-ignition*) akibat tekanan dan temperatur udara yang tinggi sebagai hasil dari proses kompresi di dalam silinder.

Secara umum, mekanisme kerja pembakaran pada mesin diesel dapat dijelaskan sebagai berikut :

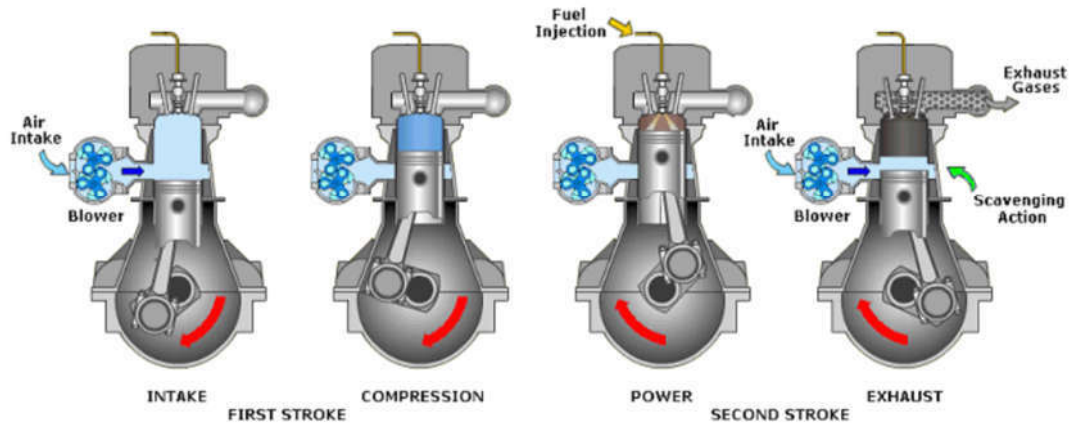
1. Udara bersih dihisap ke dalam silinder melalui katup masuk.
2. Udara yang berada di dalam silinder dikompresi dengan rasio kompresi tinggi, umumnya berkisar antara 14:1 hingga 22:1.
3. Pada akhir langkah kompresi, temperatur udara meningkat hingga sekitar 600°C - 700°C dengan tekanan mencapai 30 bar - 50 bar.
4. Bahan bakar diesel diinjeksikan ke dalam udara panas tersebut melalui injektor bertekanan tinggi sekitar 150 bar - 200 bar.
5. Terjadi penyalaan spontan yang menghasilkan tekanan dan temperatur sangat tinggi, dapat mencapai sekitar 2.000°C, sehingga mendorong piston ke bawah dan menghasilkan tenaga mekanik (Antono et al., 2018a).

Proses ini berlangsung secara berulang pada setiap siklus kerja dan sinkron dengan pergerakan piston. Siklus operasi mesin diesel terdiri atas empat langkah utama, yaitu hisap, kompresi, usaha, dan buang, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Prinsip Dasar Pembakaran Internal pada Mesin Diesel

Langkah	Proses Utama	Penjelasan Singkat
1	Hisap (<i>Intake</i>)	Udara masuk ke dalam silinder melalui katup masuk
2	Kompresi (<i>Compression</i>)	Udara dikompresi sehingga tekanan dan temperatur meningkat
3	Usaha (<i>Power</i>)	Injeksi bahan bakar, pembakaran, dan ekspansi gas menghasilkan tenaga
4	Buang (<i>Exhaust</i>)	Gas hasil pembakaran dikeluarkan dari silinder melalui katup buang

2.3.2 Siklus Kerja Mesin Diesel (4 Langkah)



Gambar 2. 2 Siklus Kerja Mesin Diesel (4 Langkah)

(sumber : Muttaqin et al., 2023)

Mesin diesel pada PLTD umumnya beroperasi berdasarkan siklus empat langkah (*four-stroke cycle*). Dalam satu siklus kerja penuh, piston melakukan dua kali gerakan naik dan dua kali gerakan turun yang setara dengan dua putaran poros engkol. Setiap langkah pada siklus ini memiliki peranan penting dalam proses konversi energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik.

1. Langkah Hisap (*Intake Stroke*)

Pada tahap ini piston bergerak dari Titik Mati Atas (TMA) menuju Titik Mati Bawah (TMB) dengan katup masuk terbuka. Udara segar dari lingkungan masuk ke dalam silinder untuk menyediakan oksigen yang diperlukan dalam proses pembakaran. Berbeda dengan mesin bensin, mesin diesel hanya mengisap udara tanpa campuran bahan bakar pada tahap ini.

2. Langkah Kompresi (*Compression Stroke*)

Piston bergerak dari TMB menuju TMA dengan kedua katup tertutup. Udara di dalam silinder dikompresi hingga mencapai tekanan sekitar 30 bar - 50 bar dan temperatur 500°C - 700°C. Kondisi ini menghasilkan suhu yang cukup tinggi sehingga memungkinkan bahan bakar mengalami penyalaan spontan tanpa memerlukan sistem pengapian.

3. Langkah Usaha / Pembakaran (*Power Stroke*)

Menjelang akhir proses kompresi, bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar dalam bentuk kabut halus oleh injektor. Suhu udara yang tinggi menyebabkan bahan bakar terbakar secara otomatis (*auto-ignition*). Gas hasil pembakaran kemudian mengembang dan mendorong piston ke arah TMB sehingga menghasilkan energi mekanik pada poros engkol. Tahap ini merupakan sumber utama daya pada mesin diesel.

4. Langkah Buang (*Exhaust Stroke*)

Setelah langkah usaha, piston bergerak kembali dari TMB menuju TMA dengan katup buang terbuka. Gas sisa pembakaran dikeluarkan dari silinder menuju sistem pembuangan, sehingga silinder kembali siap untuk memulai siklus kerja berikutnya.

2.3.3 Rasio Udara - Bahan Bakar (*Air-Fuel Ratio/AFR*) dan Pengaruhnya terhadap Efisiensi

Rasio udara–bahan bakar (*Air-Fuel Ratio/AFR*) merupakan perbandingan antara massa udara dengan massa bahan bakar yang terlibat dalam proses pembakaran. Nilai AFR teoritis untuk bahan bakar diesel berada pada kisaran 14,5 : 1, yang berarti bahwa pembakaran sempurna 1 kg bahan bakar memerlukan sekitar 14,5 kg udara.

Dalam praktik operasional mesin diesel, proses pembakaran umumnya berlangsung pada kondisi campuran miskin (*lean mixture*) dengan kelebihan udara. Oleh karena itu, AFR aktual biasanya berada pada rentang 18 : 1 hingga 40 : 1, bergantung pada kondisi beban dan kecepatan putaran mesin.

Pengaruh variasi AFR terhadap efisiensi pembakaran dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. AFR terlalu rendah (campuran kaya bahan bakar), kondisi ini menyebabkan kekurangan oksigen sehingga pembakaran tidak berlangsung sempurna. Dampaknya adalah penurunan efisiensi termal serta peningkatan emisi karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC).

2. AFR terlalu tinggi (campuran miskin bahan bakar), kelebihan udara menyebabkan proses pembakaran berlangsung lebih lambat dan menurunkan temperatur puncak pembakaran. Akibatnya, emisi NO_x cenderung menurun, namun daya keluaran mesin juga berkurang.
3. AFR optimal, nilai AFR yang optimal menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna, efisiensi maksimum, serta emisi gas buang yang lebih rendah.

Perubahan kondisi lingkungan, khususnya suhu dan kelembaban udara, berpengaruh langsung terhadap massa udara yang masuk ke silinder. Peningkatan suhu udara menurunkan densitas udara sehingga AFR menurun dan pembakaran menjadi kurang optimal. Selain itu, kelembaban udara yang tinggi mengurangi fraksi udara kering (oksigen) sehingga AFR efektif juga menurun.

2.3.4 Tahapan Pembakaran pada Mesin Diesel

Proses pembakaran pada mesin diesel tidak terjadi secara simultan, melainkan melalui beberapa tahapan yang berlangsung sangat cepat, umumnya dalam rentang waktu 1 sampai 3 milidetik. Tahapan tersebut meliputi *ignition delay*, *premixed combustion*, dan *diffusion combustion*.

1. *Ignition Delay* (Penundaan Penyalaan)

Tahap ini merupakan selang waktu antara awal injeksi bahan bakar hingga terjadinya penyalaan pertama di dalam ruang bakar. Pada fase ini terjadi proses penguapan bahan bakar, pencampuran dengan udara panas, serta reaksi kimia awal (*pre-flame reaction*).

Durasi *ignition delay* dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain tekanan dan temperatur udara pada akhir kompresi, kualitas bahan bakar (angka cetane), karakteristik injeksi dan ukuran droplet bahan bakar, serta kondisi kelembaban udara dan densitas oksigen. Waktu penundaan yang terlalu lama dapat menyebabkan akumulasi bahan bakar sebelum terbakar, yang berpotensi menimbulkan ledakan mendadak (*diesel knock*), meningkatkan tekanan puncak, menurunkan efisiensi, serta mempercepat keausan komponen mesin.

2. *Premixed Combustion* (Pembakaran Campuran Awal)

Setelah tahap *ignition delay*, sebagian bahan bakar yang telah tercampur secara homogen dengan udara akan terbakar secara cepat. Fase ini ditandai dengan peningkatan tekanan yang signifikan dan kenaikan temperatur silinder yang tinggi. Meskipun menghasilkan kontribusi energi yang besar, proses ini relatif sulit dikendalikan. Tahap ini berperan penting dalam menentukan efisiensi termal awal dan kestabilan operasi mesin.

3. *Diffusion Combustion* (Pembakaran Difusi / Utama)

Tahapan akhir pembakaran terjadi ketika bahan bakar terus diinjeksikan ke dalam udara panas dan terbakar secara difusi, bergantung pada ketersediaan oksigen. Fase ini berlangsung lebih lama dan relatif stabil, ditandai dengan penurunan tekanan secara bertahap. Proses pembakaran difusi memiliki pengaruh besar terhadap efisiensi total mesin serta karakteristik emisi gas buang. Tahapan ini diakhiri dengan proses *after-burning*, yaitu pembakaran sisa partikel bahan bakar dan karbon yang belum terbakar secara sempurna.

2.3.5 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pembakaran

Kualitas dan efisiensi proses pembakaran pada mesin diesel dipengaruhi oleh berbagai parameter operasional dan kondisi lingkungan. Beberapa faktor utama yang berperan dalam menentukan keberhasilan proses pembakaran antara lain sebagai berikut :

1. Tekanan Kompresi

Tekanan kompresi yang tinggi akan meningkatkan temperatur udara di dalam silinder, sehingga mempercepat terjadinya penyalaan spontan (*auto-ignition*) dan meningkatkan efisiensi pembakaran.

2. Suhu Udara Masuk

Udara masuk dengan temperatur tinggi dapat mempercepat proses penguapan bahan bakar, namun pada saat yang sama menurunkan massa jenis udara. Kondisi ini dapat mengurangi jumlah oksigen efektif yang tersedia untuk proses pembakaran.

3. Waktu Penyalaan

Waktu penyalaan yang terlalu maju dapat menimbulkan gejala *knocking* dan meningkatkan tekanan puncak silinder, sedangkan penyalaan yang terlambat dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna (*incomplete combustion*).

4. Kualitas Bahan Bakar

Bahan bakar dengan angka cetane tinggi cenderung memiliki waktu penundaan penyalaan (*ignition delay*) yang lebih singkat sehingga menghasilkan proses pembakaran yang lebih stabil dan halus.

5. Tekanan Injeksi

Tekanan injeksi yang tinggi menghasilkan proses atomisasi bahan bakar yang lebih baik, sehingga pencampuran udara - bahan bakar menjadi lebih homogen dan pembakaran berlangsung lebih sempurna.

6. Kelembaban Udara

Kelembaban udara yang tinggi mengurangi fraksi oksigen dalam udara masuk, sehingga laju pembakaran menurun dan emisi karbon monoksida (CO) serta hidrokarbon (HC) cenderung meningkat.

2.3.6 Indikator Efisiensi Pembakaran

Evaluasi kinerja pembakaran pada mesin diesel dilakukan melalui beberapa parameter indikator yang mencerminkan tingkat efisiensi konversi energi :

1. Efisiensi Termal (η_{th})

Efisiensi termal menunjukkan efektivitas konversi energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik. Secara matematis dinyatakan sebagai :

$$\eta_{th} = \frac{P_{out}}{\dot{m}_{bb} \times LHV} \quad (2.11)$$

Keterangan :

η_{th} : Efisiensi termal mesin diesel (%)

P_{out} : Daya keluaran mesin / daya poros (kW)

$\dot{m}_{bb}$: Laju aliran massa bahan bakar (kg/s atau kg/jam)

LHV : Nilai kalor bawah bahan bakar diesel (kJ/kg)

Nilai efisiensi termal mesin diesel pada PLTD umumnya berada pada kisaran 35% - 45% (Djohari, 2020).

2. *Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)*

BSFC merupakan parameter yang menyatakan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kWh, dirumuskan sebagai :

$$BSFC = \frac{\dot{m}_{bb}}{P_{out}} \text{ (kg/kWh)} \quad (2.12)$$

Nilai BSFC yang baik untuk mesin diesel pembangkit umumnya berada pada kisaran 0,22 - 0,26 kg/kWh (Djohari, 2020).

3. Emisi Gas Buang

Komposisi gas buang dapat digunakan sebagai indikator tingkat kesempurnaan pembakaran. Emisi karbon monoksida (CO) meningkat pada kondisi pembakaran tidak sempurna, sedangkan hidrokarbon (HC) menunjukkan adanya bahan bakar yang tidak terbakar. Emisi nitrogen oksida (NOx) cenderung meningkat pada temperatur pembakaran tinggi, sementara karbon dioksida (CO₂) merupakan produk utama dari pembakaran sempurna. Analisis gas buang dapat digunakan untuk memperkirakan rasio udara–bahan bakar aktual dan efisiensi pembakaran secara tidak langsung.

4. Temperatur Gas Buang (*Exhaust Temperature*)

Temperatur gas buang merupakan indikator tambahan yang mencerminkan kualitas proses pembakaran. Temperatur yang terlalu tinggi menunjukkan pembakaran berlangsung cepat namun disertai potensi kehilangan panas yang besar, sedangkan temperatur yang terlalu rendah mengindikasikan pembakaran yang lambat dan tidak sempurna. Pada PLTD, temperatur gas buang optimum umumnya berada pada kisaran 380°C - 450°C pada kondisi beban penuh (Djohari, 2020).

2.4 Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi Pembakaran

2.4.1 Pengaruh Suhu Udara Lingkungan

Suhu udara lingkungan merupakan salah satu faktor eksternal yang paling berpengaruh terhadap kinerja pembakaran mesin diesel. Pada PLTD, udara lingkungan digunakan sebagai udara masuk (*intake air*) yang berfungsi sebagai oksidator dalam proses pembakaran bahan bakar. Perubahan suhu udara luar secara langsung akan memengaruhi densitas udara, kandungan oksigen per satuan volume, dan karakteristik pembentukan campuran udara - bahan bakar (Alfalah et al., n.d.)

1. Hubungan Suhu terhadap Densitas Udara dan Kandungan Oksigen

Udara dapat diasumsikan sebagai gas ideal yang mengikuti persamaan gas ideal :

$$PV = nRT \quad (2.13)$$

Maka densitas udara (ρ) dapat dinyatakan sebagai :

$$\rho = \frac{P}{R \times T} \quad (2.14)$$

Keterangan :

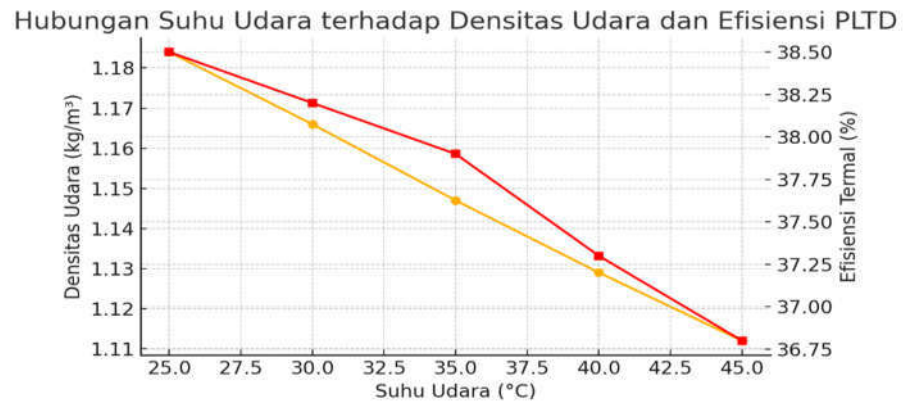
ρ : Densitas udara (kg/m^3)

P : Tekanan udara (Pa)

R : Konstanta gas udara kering ($287 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$)

T : Suhu udara absolut (K)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suhu udara akan menyebabkan penurunan densitas udara apabila tekanan dianggap konstan. Penurunan densitas udara mengakibatkan berkurangnya massa udara yang masuk ke silinder pada setiap langkah hisap, sehingga jumlah oksigen yang tersedia untuk pembakaran juga menurun.



Gambar 2. 4 Hubungan Suhu Udara terhadap Densitas Udara dan Efisiensi PLTD

2. Dampak Suhu Tinggi terhadap Pembentukan Campuran Udara - Bahan Bakar

Pada mesin diesel, udara terlebih dahulu dikompresi sebelum bahan bakar diinjeksikan. Oleh karena itu, temperatur udara masuk memiliki pengaruh signifikan terhadap proses pembentukan campuran dan tahap awal pembakaran:

1) Penurunan densitas udara masuk

Udara dengan temperatur tinggi memiliki densitas yang lebih rendah sehingga jumlah oksigen per satuan volume berkurang. Kondisi ini menyebabkan rasio udara - bahan bakar (AFR) menurun dan pembakaran cenderung menjadi lebih kaya bahan bakar, yang pada akhirnya meningkatkan emisi CO dan HC akibat pembakaran tidak sempurna.

2) Percepatan penguapan bahan bakar

Temperatur udara yang tinggi mempercepat proses penguapan droplet bahan bakar hasil atomisasi injektor. Meskipun kondisi ini dapat memperpendek waktu penundaan penyalaan (*ignition delay*), penguapan yang terlalu cepat dapat menghasilkan campuran yang tidak homogen sehingga terbentuk daerah kaya dan miskin bahan bakar secara tidak merata di dalam ruang bakar.

3) Penurunan efektivitas *turbocharger* dan *intercooler*

Udara masuk yang panas mengurangi kemampuan *turbocharger* dalam meningkatkan massa udara yang masuk ke silinder. Oleh karena itu, penggunaan *intercooler* menjadi penting untuk menurunkan temperatur

udara sebelum masuk ke ruang bakar. Tanpa proses pendinginan udara masuk, peningkatan tekanan tidak diikuti peningkatan massa udara sehingga efisiensi volumetrik menurun.

4) Kenaikan tekanan dan temperatur awal kompresi

Temperatur awal yang tinggi meningkatkan tekanan dan temperatur akhir kompresi sehingga proses penyalaan spontan terjadi lebih cepat. Meskipun dapat memperpendek *ignition delay*, kondisi ini berpotensi meningkatkan tekanan puncak pembakaran yang dapat memicu *diesel knock*.

3. Pengaruh Suhu terhadap Efisiensi Pembakaran dan Emisi

Kinerja mesin diesel sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara massa udara masuk, kualitas campuran, serta karakteristik waktu pembakaran. Peningkatan suhu lingkungan memengaruhi seluruh faktor tersebut sehingga berdampak pada efisiensi pembakaran dan karakteristik emisi gas buang.

1) Pengaruh terhadap Efisiensi Pembakaran

Kenaikan suhu udara menyebabkan efisiensi termal menurun akibat berkurangnya ketersediaan oksigen sehingga pembakaran tidak berlangsung optimal. Selain itu, nilai *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) meningkat karena dibutuhkan lebih banyak bahan bakar untuk menghasilkan daya yang sama. Secara empiris, peningkatan suhu udara sebesar 5°C dapat menurunkan efisiensi PLTD sekitar 0,4% - 0,6%.

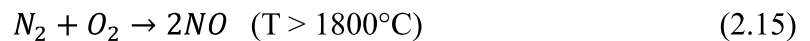
Tabel 2. 2 Ilustratif Pengaruh terhadap Efisiensi Pembakaran

Suhu Udara	Efisiensi Termal (%)	BSFC (kg/kWh)
25°C	38,5	0,225
35°C	37,9	0,231
45°C	36,8	0,240

Peningkatan suhu udara menunjukkan kecenderungan penurunan efisiensi termal dan peningkatan konsumsi bahan bakar.

2) Pengaruh terhadap Emisi Gas Buang

Suhu lingkungan yang tinggi menyebabkan peningkatan emisi CO dan HC akibat pembakaran tidak sempurna. Selain itu, temperatur pembakaran yang tinggi mempercepat reaksi pembentukan NO_x yang dapat dinyatakan sebagai :



Penurunan efisiensi pembakaran juga menyebabkan emisi CO₂ menurun karena tidak seluruh bahan bakar terbakar sempurna. Temperatur gas buang cenderung meningkat akibat energi panas yang tidak dimanfaatkan secara optimal.

3) Pengaruh terhadap Kinerja PLTD Secara Umum

Peningkatan suhu udara lingkungan menyebabkan penurunan daya keluaran karena massa udara yang masuk per langkah hisap berkurang. Efisiensi total sistem juga menurun akibat terpengaruhnya efisiensi termal, mekanik, dan generator. Pada PLTD yang beroperasi di wilayah beriklim tropis dengan suhu 30°C - 35°C, penurunan efisiensi dapat mencapai 2% - 4% dibandingkan operasi pada suhu 25°C.

4. Upaya Mengatasi Dampak Suhu Udara Tinggi

Untuk menjaga efisiensi dan keandalan operasi PLTD pada kondisi suhu lingkungan tinggi, beberapa langkah teknis dapat diterapkan, antara lain penggunaan *air intake cooler* atau *intercooler* untuk meningkatkan densitas udara masuk, peningkatan kinerja sistem pendingin mesin, penggunaan injektor bertekanan tinggi untuk memastikan atomisasi bahan bakar tetap optimal, optimasi waktu injeksi sesuai kondisi lingkungan, serta perawatan rutin filter udara guna menjaga kelancaran aliran udara masuk.

2.4.2 Pengaruh Kelembaban Udara

1. Pengertian Kelembaban Udara

Kelembaban udara menunjukkan jumlah uap air yang terkandung dalam campuran udara atmosfer. Secara fisik, udara merupakan campuran antara udara kering (*dry air*) dan uap air (*water vapor*). Dalam kajian termodinamika, kelembaban udara umumnya diklasifikasikan menjadi tiga parameter utama, yaitu kelembaban mutlak, kelembaban relatif, dan kelembaban spesifik.

1) Kelembaban Mutlak (*Absolute Humidity*, AH)

Kelembaban mutlak menyatakan massa uap air yang terkandung dalam setiap satuan volume udara lembap. Besaran ini dinyatakan dalam satuan kg/m³ atau g/m³ dan dirumuskan sebagai :

$$AH = \frac{m_v}{V} \quad (2.16)$$

Keterangan :

AH : Kelembaban Mutlak (kg/m³ atau g/m³)

m_v : Massa uap air (kg atau g)

V : Volume udara lembap (m³)

Kelembaban mutlak menggambarkan jumlah aktual uap air tanpa mempertimbangkan kapasitas maksimum udara dalam menampung uap air. Nilainya cenderung meningkat seiring kenaikan suhu karena udara bersuhu tinggi mampu menahan uap air dalam jumlah lebih besar.

2) Kelembaban Relatif (*Relative Humidity*, RH)

Kelembaban relatif merupakan perbandingan antara tekanan parsial uap air aktual dengan tekanan uap air jenuh pada temperatur yang sama, dinyatakan dalam persen (%). Secara matematis dirumuskan sebagai :

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100\% \quad (2.17)$$

Keterangan :

RH : Kelembaban Relatif (%)

P_v : Tekanan parsial uap air aktual (Pa)

P_{vs} : Tekanan uap air jenuh pada suhu yang sama (Pa)

Apabila RH mencapai 100%, udara berada dalam kondisi jenuh dan tidak mampu lagi menampung uap air tambahan sehingga dapat terjadi kondensasi. Pada kondisi RH di bawah 100%, udara masih memiliki kemampuan menyerap uap air. Di wilayah beriklim tropis, seperti Sumatera Selatan, nilai RH umumnya berkisar antara 70% - 95%, yang menunjukkan kondisi udara sangat lembap.

3) Kelembaban Spesifik (*Specific Humidity*, SH)

Kelembaban spesifik menyatakan perbandingan massa uap air terhadap massa total udara lembap, yang dinyatakan sebagai :

$$SH = \frac{m_v}{m_a + m_v} \quad (2.18)$$

Keterangan :

SH : Kelembaban Spesifik

m_v : Massa uap air (kg)

m_a : Massa udara kering (kg)

Dalam rekayasa pembakaran, kelembaban spesifik digunakan untuk menghitung fraksi udara kering dan kandungan oksigen aktual dalam udara masuk.

2. Hubungan Kelembaban terhadap Fraksi Udara Kering dan Kandungan Oksigen

Udara lembap mengandung uap air yang menggantikan sebagian volume udara kering. Karena uap air tidak berperan sebagai oksidator dalam pembakaran, peningkatan kelembaban akan menurunkan fraksi udara kering serta kadar oksigen yang tersedia di dalam ruang bakar.

Densitas udara lembap merupakan penjumlahan densitas udara kering dan densitas uap air :

$$\rho = \rho_a + \rho_v \quad (2.19)$$

dengan :

$$\rho_a = \frac{P_a}{R_a T} \quad (2.20)$$

$$\rho_v = \frac{P_v}{R_v T} \quad (2.21)$$

Tekanan total udara lembap mengikuti Hukum Dalton :

$$P_{total} = P_a + P_v \quad (2.22)$$

Semakin besar tekanan parsial uap air, maka tekanan parsial udara kering menurun, sehingga massa oksigen per satuan volume juga berkurang.

Fraksi oksigen efektif pada udara lembap dapat dinyatakan sebagai :

$$O_{2,eff} = 0.21 \times \frac{P_a}{P_{total}} \quad (2.23)$$

Keterangan :

- ρ : Densitas udara lembap total (kg/m³)
- ρ_a : Densitas udara kering (kg/m³)
- ρ_v : Densitas uap air (kg/m³)
- P_{total} : Tekanan total udara lembap (Pa)
- P_a : Tekanan parsial udara kering (Pa)
- P_v : Tekanan parsial uap air (Pa)
- R_a : Konstanta gas spesifik udara kering (287 J/kg·K)
- R_v : Konstanta gas spesifik uap air (461 J/kg·K)
- T : Suhu udara absolut (K)
- $O_{2,eff}$: Fraksi oksigen efektif pada udara lembap

3. Dampak Kelembaban terhadap Proses Pembakaran dan Emisi

Kelembaban udara memengaruhi proses pencampuran bahan bakar, reaksi kimia pembakaran, serta temperatur puncak di dalam ruang bakar.

1) Dampak pada Proses Pembakaran

- a. Penurunan konsentrasi oksigen, peningkatan kelembaban menyebabkan sebagian udara kering tergantikan oleh uap air, sehingga konsentrasi oksigen menurun dan pembakaran cenderung kurang sempurna.
- b. Efek pendinginan oleh uap air, uap air memiliki kapasitas panas spesifik tinggi, sehingga menyerap sebagian energi panas pembakaran dan menurunkan temperatur puncak serta tekanan efektif rata - rata.
- c. Perpanjangan *ignition delay*, udara lembap menurunkan temperatur akhir kompresi dan memperlambat reaksi kimia awal, sehingga waktu tunda penyalaan menjadi lebih panjang
- d. Penurunan daya keluaran, berkurangnya oksigen dan tekanan pembakaran menyebabkan penurunan daya mekanik poros. Secara empiris, kenaikan kelembaban 10% dapat menurunkan daya mesin sekitar 1% - 1,5%.

2) Dampak terhadap Efisiensi Pembakaran

Kelembaban yang tinggi mengurangi efisiensi termal akibat pembakaran yang kurang sempurna. Kondisi ini juga meningkatkan nilai BSFC.

Tabel 2. 3 Dampak pada Efisiensi Pembakaran

Kelembaban Relatif	Efisiensi Termal (%)	BSFC (kg/kWh)
60%	38,2	0,226
75%	37,7	0,230
90%	36,9	0,237

Dari tabel di atas terlihat bahwa peningkatan kelembaban dari 60% menjadi 90% menurunkan efisiensi sebesar 1,3% dan menaikkan konsumsi bahan bakar spesifik sebesar 5%.

2) Dampak terhadap Emisi Gas Buang

Kelembaban udara memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap karakteristik emisi gas buang pada mesin diesel. Peningkatan kadar uap air di dalam udara masuk menimbulkan efek pendinginan di ruang bakar, sehingga temperatur puncak pembakaran menurun. Penurunan temperatur ini berdampak langsung pada berkurangnya pembentukan nitrogen oksida (NO_x), karena reaksi pembentukannya sangat bergantung pada temperatur tinggi, khususnya pada kondisi di atas 1800°C. Dalam kondisi kelembaban tinggi, penurunan emisi NO_x dapat mencapai sekitar 10% - 20%.

Di sisi lain, meningkatnya kandungan uap air menyebabkan fraksi oksigen efektif dalam udara berkurang, sehingga proses pembakaran menjadi kurang sempurna. Kondisi ini mendorong peningkatan emisi karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) akibat masih adanya bahan bakar yang tidak terbakar secara optimal. Meskipun demikian, keberadaan uap air juga dapat memberikan efek positif terhadap penurunan emisi partikulat (*soot*), karena uap air membantu proses oksidasi karbon sisa selama fase ekspansi gas pembakaran.

Selain memengaruhi komposisi emisi, tingginya kandungan uap air dalam gas buang juga dapat meningkatkan potensi korosi pada komponen sistem pembuangan, seperti knalpot dan *turbocharger*, terutama dalam jangka waktu operasi yang panjang. Oleh karena itu, kelembaban udara perlu dipertimbangkan sebagai salah satu faktor penting dalam analisis kinerja dan emisi mesin diesel pada PLTD.

4) Dampak Operasional pada PLTD

Pada wilayah dengan kelembaban tinggi seperti Palembang dan sekitarnya, massa oksigen yang masuk ke ruang bakar dapat menurun sekitar 5%, sehingga efisiensi pembakaran turun 2% - 3%. Emisi CO cenderung meningkat, sedangkan NO_x sedikit menurun. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian parameter operasi seperti rasio bahan bakar, tekanan

injeksi, dan pengaturan *turbocharger* untuk mempertahankan kinerja optimal PLTD.

2.5 Parameter Kinerja Mesin Diesel dan Efisiensi Pembakaran

2.5.1 Definisi Efisiensi Pembakaran dan Efisiensi Termal

1. Efisiensi Pembakaran (*Combustion Efficiency*, η_c)

Efisiensi pembakaran merupakan parameter yang menggambarkan kemampuan mesin diesel dalam mengonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi panas yang efektif digunakan dalam proses pembangkitan kerja mekanik. Secara matematis, efisiensi pembakaran dapat dinyatakan sebagai :

$$\eta_c = \frac{Q_{aktual}}{Q_{teoritis}} \times 100\% \quad (2.24)$$

Keterangan :

Q_{aktual} : Energi panas yang benar-benar dilepaskan selama pembakaran

$Q_{teoritis}$: Energi kimia total bahan bakar berdasarkan nilai kalor bawah

Pada mesin diesel modern, nilai efisiensi pembakaran umumnya berada pada kisaran 95% - 99%, bergantung pada kondisi udara masuk, kualitas atomisasi bahan bakar, serta rasio udara - bahan bakar (*Air-Fuel Ratio*, *AFR*). Penurunan efisiensi pembakaran dapat terjadi apabila campuran udara-bahan bakar tidak homogen, *AFR* terlalu kaya (*excess fuel*), temperatur dan tekanan udara rendah akibat kelembaban tinggi, serta kondisi komponen seperti filter udara yang tersumbat atau injektor yang mengalami keausan.

2. Efisiensi Termal (*Thermal Efficiency*, η_{th})

Efisiensi termal menunjukkan tingkat efektivitas pemanfaatan energi panas hasil pembakaran untuk dikonversi menjadi energi mekanik pada mesin diesel. Secara umum, efisiensi termal dapat dinyatakan dalam dua bentuk, yaitu berdasarkan daya indikator maupun daya poros. Berdasarkan daya indikator :

$$\eta_{th} = \frac{P_{indikator}}{\dot{m}_{bb} \times LHV} \quad (2.25)$$

sedangkan berdasarkan daya efektif (*brake thermal efficiency*) :

$$\eta_{bth} = \frac{P_{poros}}{\dot{m}_{bb} \times LHV} \quad (2.26)$$

Keterangan :

$P_{indikator}$: Daya indikator mesin (kW)

P_{poros} : Daya keluaran poros (kW)

$\dot{m}_{bb}$: Laju aliran massa bahan bakar (kg/s)

LHV : Nilai kalor bawah bahan bakar solar (± 42.700 kJ/kg)

Dalam praktik operasional PLTD, nilai efisiensi termal umumnya berada pada rentang 32% - 45%. Besarnya nilai tersebut dipengaruhi oleh kondisi beban operasi, temperatur lingkungan, serta kinerja efisiensi mekanik mesin dan generator dalam sistem pembangkit.

2.5.2 Parameter yang Digunakan dalam Analisis Kinerja Mesin Diesel

Evaluasi efisiensi pembakaran dan performa mesin diesel dilakukan melalui beberapa parameter operasional utama yang mencerminkan kualitas proses konversi energi pada sistem pembangkit.

1. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (*Brake Specific Fuel Consumption* / BSFC)

BSFC merupakan parameter utama yang digunakan untuk menilai tingkat efisiensi penggunaan bahan bakar dalam menghasilkan daya listrik. Secara matematis dinyatakan sebagai :

$$BSFC = \frac{\dot{m}_{bb}}{P_{output}} [kg/kWh] \quad (2.27)$$

Keterangan :

$\dot{m}_{bb}$: Laju konsumsi bahan bakar (kg/jam)

P_{output} : Daya listrik keluaran generator (kW)

Nilai BSFC yang lebih rendah menunjukkan kinerja mesin yang lebih efisien. Pada mesin diesel pembangkit, nilai BSFC ideal berada pada kisaran 0,22 - 0,26 kg/kWh pada kondisi beban nominal. Pada beban ringan (<60%), nilai BSFC cenderung meningkat akibat penurunan efisiensi volumetrik dan kualitas pembakaran.

Tabel 2. 4 Contoh Empiris BSFC PLTD Sungai Juaro

Beban Mesin (%)	BSFC (kg/kWh)	Efisiensi Termal (%)
50	0,255	35,8
75	0,233	38,2
100	0,225	39,4

Data tersebut menunjukkan bahwa peningkatan beban operasi umumnya diikuti penurunan BSFC karena pembakaran menjadi lebih sempurna dan rugi gesek relatif berkurang.

2. Emisi Gas Buang (O₂, CO₂, CO, HC, NO_x)

Analisis komposisi gas buang merupakan metode tidak langsung yang banyak digunakan untuk mengevaluasi kualitas proses pembakaran serta efektivitas konversi energi kimia bahan bakar menjadi energi panas di dalam mesin diesel. Parameter utama yang diamati meliputi kandungan O₂, CO₂, CO, HC, dan NO_x, yang masing-masing memberikan indikasi kondisi pembakaran di ruang bakar.

Kandungan O₂ (oksigen) dalam gas buang menunjukkan keseimbangan rasio udara–bahan bakar. Kadar O₂ yang tinggi mengindikasikan campuran terlalu miskin (*lean mixture*), sedangkan kadar O₂ yang rendah menunjukkan campuran kaya bahan bakar. Untuk pembakaran yang efisien, kadar O₂ umumnya berada pada rentang 3% - 6% volume.

CO₂ (karbon dioksida) merupakan produk utama pembakaran sempurna hidrokarbon. Semakin tinggi konsentrasi CO₂, semakin baik kualitas

pembakaran yang terjadi. Nilai optimum CO₂ pada mesin diesel pembangkit umumnya berkisar antara 10% - 13% volume.

Sebaliknya, CO (karbon monoksida) terbentuk akibat kekurangan oksigen atau temperatur pembakaran yang tidak mencukupi. Keberadaan CO menjadi indikator pembakaran tidak sempurna, dengan batas yang diharapkan umumnya kurang dari 0,3% volume.

HC (hidrokarbon tak terbakar) menunjukkan adanya fraksi bahan bakar yang tidak mengalami reaksi oksidasi secara sempurna. Konsentrasi HC cenderung meningkat pada kondisi AFR yang terlalu tinggi, kelembaban udara yang tinggi, atau proses atomisasi yang kurang optimal. Pada sistem PLTD modern, kadar HC diharapkan berada di bawah 50 ppm.

Sementara itu, NO_x (nitrogen oksida) terbentuk pada temperatur pembakaran tinggi (T > 1800°C) melalui reaksi oksidasi nitrogen di udara yang dapat dinyatakan sebagai :



Konsentrasi NO_x meningkat pada kondisi temperatur ruang bakar yang tinggi dan waktu tinggal (*residence time*) gas pembakaran yang panjang. Namun, pada kondisi suhu dan kelembaban lingkungan tinggi, pembentukan NO_x cenderung menurun akibat efek pendinginan oleh uap air yang menurunkan temperatur puncak pembakaran.

Hubungan antara parameter gas buang dan kualitas pembakaran secara umum dapat dirangkum pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2. 5 Korelasi Umum Antara Parameter Gas Buang dan Kualitas Pembakaran

Kondisi Pembakaran	O ₂	CO ₂	CO	HC	NO _x	Efisiensi
Sempurna	3–6%	11–13%	<0,3%	<50 ppm	Sedang	Tinggi

Kondisi Pembakaran	O ₂	CO ₂	CO	HC	NO _x	Efisiensi
Tidak sempurna (kaya)	Rendah	Rendah	Tinggi	Tinggi	Rendah	Rendah
Terlalu miskin	Tinggi	Rendah	Rendah	Sedang	Rendah	Rendah

Tabel tersebut menunjukkan bahwa kombinasi kadar O₂ moderat, CO₂ tinggi, serta CO dan HC rendah merupakan indikator pembakaran yang efisien pada mesin diesel PLTD.

3. Temperatur Gas Buang (*Exhaust Gas Temperature*)

Temperatur gas buang merupakan indikator penting yang mencerminkan kualitas pembakaran dan tingkat pemanfaatan energi panas. Temperatur gas buang yang terlalu tinggi (>450°C) menunjukkan kehilangan panas yang besar ke lingkungan sehingga efisiensi termal menurun. Sebaliknya, temperatur yang terlalu rendah (<300°C) mengindikasikan pembakaran yang tidak sempurna. Pada PLTD, rentang temperatur gas buang optimum berada pada 380°C - 450°C pada kondisi beban nominal.

Secara umum, efisiensi termal meningkat seiring penurunan temperatur gas buang hingga batas optimum, namun apabila temperatur terlalu rendah, pembakaran tidak sempurna justru meningkat. Kenaikan beban operasi biasanya diikuti peningkatan temperatur gas buang secara moderat akibat intensitas pembakaran yang lebih tinggi. Sebaliknya, kenaikan suhu lingkungan cenderung meningkatkan temperatur gas buang tetapi menurunkan efisiensi total akibat penurunan densitas udara masuk

2.5.3 Hubungan antara Efisiensi dan Kondisi Operasi Mesin

Kinerja mesin diesel pada PLTD sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi dan lingkungan kerja. Faktor utama yang menentukan tingkat efisiensi antara lain beban kerja mesin, kondisi udara masuk (suhu dan kelembaban), tekanan udara

serta kebersihan filter udara, kualitas bahan bakar (viskositas, angka cetane, dan kandungan sulfur), serta kondisi mekanis sistem injeksi dan *turbocharger*.

1. Pengaruh beban operasi

Secara umum terdapat hubungan yang erat antara efisiensi termal, konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC), dan temperatur gas buang. Peningkatan efisiensi termal biasanya diikuti oleh penurunan BSFC karena konsumsi bahan bakar menjadi lebih hemat. Sebaliknya, temperatur gas buang yang terlalu tinggi menunjukkan bahwa sebagian energi panas tidak termanfaatkan secara optimal, sehingga efisiensi menurun. Kondisi operasi yang optimal umumnya dicapai pada temperatur gas buang sekitar 400°C - 430°C, yang mencerminkan pembakaran yang lebih sempurna, emisi yang lebih rendah, serta nilai BSFC yang minimum.

2. Pengaruh kondisi udara masuk

Kondisi udara lingkungan, khususnya suhu dan kelembaban, berperan penting dalam menentukan kualitas pembakaran. Peningkatan suhu udara menyebabkan penurunan densitas udara sehingga massa oksigen yang masuk ke ruang bakar berkurang, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi pembakaran. Sementara itu, kelembaban udara yang tinggi meningkatkan kandungan uap air sehingga fraksi udara kering menurun dan temperatur puncak pembakaran berkurang. Kondisi ini menyebabkan penurunan efisiensi, meskipun emisi NO_x cenderung menurun akibat efek pendinginan uap air.

3. Hubungan Efisiensi, BSFC, dan Temperatur Gas Buang

Secara umum terdapat hubungan yang erat antara efisiensi termal, konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC), dan temperatur gas buang. Peningkatan efisiensi termal biasanya diikuti oleh penurunan BSFC karena konsumsi bahan bakar menjadi lebih hemat. Sebaliknya, temperatur gas buang yang terlalu tinggi menunjukkan bahwa sebagian energi panas tidak termanfaatkan secara optimal, sehingga efisiensi menurun. Kondisi operasi yang optimal umumnya dicapai pada temperatur gas buang sekitar 400°C - 430°C, yang mencerminkan pembakaran yang lebih sempurna, emisi yang lebih rendah, serta nilai BSFC yang minimum.

4. Persamaan hubungan matematis efisiensi terhadap variabel operasi

Secara umum, efisiensi termal mesin dapat dinyatakan sebagai fungsi dari beberapa variabel operasi utama, yaitu :

$$\eta_{th} = f(T_{in}, RH, P_{in}, AFR, \dot{m}_{bb}) \quad (2.29)$$

Keterangan :

T_{in} : Suhu udara masuk ($^{\circ}\text{C}$)

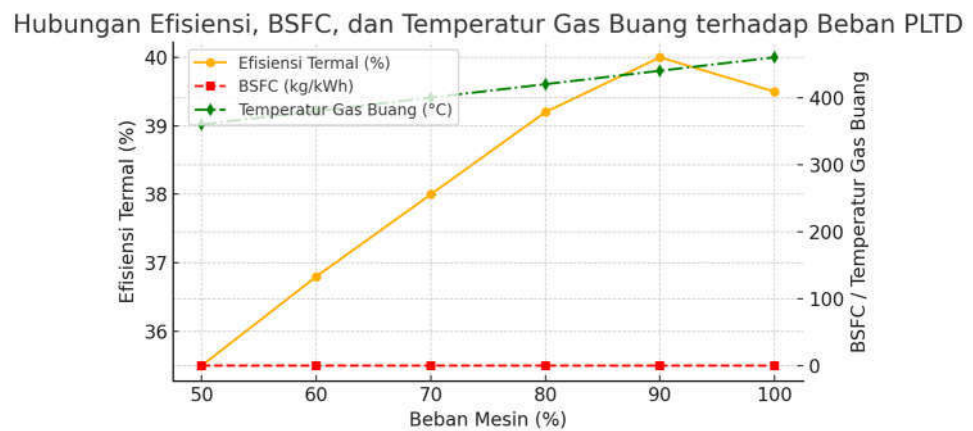
RH : Kelembaban relatif (%)

P_{in} : Tekanan udara masuk (bar)

AFR : Rasio udara - bahan bakar aktual

$\dot{m}_{bb}$: Laju bahan bakar (kg/s)

Hubungan antara efisiensi, BSFC, dan temperatur gas buang terhadap variasi beban operasi PLTD secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Hubungan Efisiensi, BSFC, dan Temperatur Gas Buang terhadap Beban Operasi PLTD (Djohari, 2020).

2.6 Dasar Teori dan Persamaan yang Digunakan

2.6.1 Persamaan Densitas Udara Lembab

Udara lembab merupakan campuran dua komponen gas, yaitu udara kering (*dry air*) dan uap air (*water vapor*). Dalam analisis termodinamika, campuran ini

diasumsikan sebagai gas ideal sehingga densitas total udara lembap dapat ditentukan menggunakan persamaan gas ideal.

1. Hukum Gas Ideal

Hubungan dasar gas ideal dinyatakan sebagai :

$$PV = mRT \quad (2.30)$$

sehingga densitas udara dapat dituliskan sebagai :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT} \quad (2.31)$$

Keterangan :

P : Tekanan total udara (Pa)

V : Volume udara (m^3)

m : Massa udara (kg)

R : Konstanta gas spesifik ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)

T : Suhu absolut (K)

2. Persamaan Densitas Udara Lembab (ρ)

Untuk kondisi udara lembap, densitas total merupakan penjumlahan kontribusi densitas udara kering dan densitas uap air, yang dapat dinyatakan sebagai :

$$\rho = \frac{P_d}{R_d T} + \frac{P_v}{R_v T} \quad (2.32)$$

Karena tekanan parsial udara kering memenuhi hubungan $P_d = P - P_v$, maka persamaan tersebut dapat ditulis kembali menjadi :

$$\rho = \frac{(P - P_v)}{R_d T} + \frac{P_v}{R_v T} \quad (2.33)$$

Keterangan :

ρ : Densitas total udara lembab (kg/m^3)

P_d : Tekanan parsial udara kering (Pa)

P_v : Tekanan parsial uap air (Pa)

R_d : $287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ (konstanta gas udara kering)

R_v : $461 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ (konstanta gas uap air)

T : Suhu mutlak (K)

Persamaan ini digunakan untuk menentukan massa udara aktual yang masuk ke dalam silinder mesin diesel berdasarkan kondisi suhu dan kelembaban lingkungan.

2.6.2 Hubungan Tekanan Parsial dan Kandungan Uap Air (Hukum Dalton)

Hukum Dalton menyatakan bahwa tekanan total suatu campuran gas merupakan penjumlahan dari tekanan parsial masing-masing komponennya. Hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai :

$$P_{total} = P_d + P_v \quad (2.34)$$

Keterangan :

P_{total} : Tekanan atmosfer total (Pa)

P_d : Tekanan parsial udara kering (Pa)

P_v : Tekanan parsial uap air (Pa)

Untuk menentukan tekanan parsial uap air, digunakan persamaan tekanan uap jenuh (*saturation vapor pressure*). Salah satu persamaan empiris yang umum digunakan adalah persamaan Tetens :

$$P_{vs} = 610.78 \times \exp \left(\frac{17.27 T_c}{T_c + 237.3} \right) \quad (2.35)$$

Tekanan parsial uap air aktual kemudian dapat dihitung berdasarkan kelembaban relatif sebagai berikut :

$$P_v = RH \times P_{vs} \quad (2.36)$$

Selanjutnya, tekanan parsial udara kering diperoleh dari :

$$P_d = P_{total} - P_v \quad (2.37)$$

Ketereangan :

- P_{vs} : Tekanan uap air jenuh (Pa)
- T_c : Suhu udara dalam °C
- P_v : Tekanan parsial uap air aktual (Pa)
- RH : Kelembaban relatif (0 - 1 atau %)
- P_d : Tekanan parsial udara kering (Pa)
- P_{total} : Tekanan atmosfer total (Pa)

Secara fisik, peningkatan kelembaban relatif akan meningkatkan nilai P_v dan menurunkan P_d . Karena oksigen berasal dari udara kering, peningkatan kelembaban menyebabkan penurunan fraksi oksigen efektif di udara masuk, sehingga massa udara yang tersedia untuk pembakaran berkurang dan efisiensi pembakaran cenderung menurun.

2.6.3 Persamaan Efisiensi Pembakaran dan Konsumsi Bahan Bakar

Evaluasi kinerja energi pada mesin diesel dilakukan melalui dua parameter utama, yaitu efisiensi pembakaran (η_c) dan efisiensi termal (η_{th}).

1. Efisiensi Pembakaran (η_c)

Efisiensi pembakaran menyatakan tingkat pemanfaatan oksigen dalam proses pembakaran bahan bakar, yang secara matematis dirumuskan sebagai :

$$\eta_c = \frac{Q_{aktual}}{Q_{teoritis}} = \frac{\dot{m}_{udara} (Y_{O_2,in} - Y_{O_2,out}) h_c}{\dot{m}_{bb} LHV} \quad (2.38)$$

Keterangan :

- $\dot{m}_{udara}$: Laju aliran massa udara (kg/s)

$Y_{O_2,in}, Y_{O_2,out}$: Fraksi mol oksigen masuk dan keluar

h_c : Entalpi pembakaran per mol O_2

$\dot{m}_{bb}$: Laju aliran bahan bakar (kg/s)

LHV : Nilai kalor bawah bahan bakar (kJ/kg)

Persamaan ini menggambarkan efektivitas pemanfaatan oksigen selama proses pembakaran.

2. Efisiensi Termal (η_{th})

Efisiensi termal menunjukkan perbandingan antara daya keluaran mesin dan daya input bahan bakar, yang dirumuskan sebagai :

$$\eta_{th} = \frac{P_{out}}{\dot{m}_{bb} \times LHV} \quad (2.39)$$

dengan P_{out} merupakan daya keluaran poros (kW), sedangkan $\dot{m}_{bb} \times LHV$ menyatakan daya input bahan bakar. Jika dikaitkan dengan konsumsi bahan bakar spesifik ($BSFC$), maka efisiensi termal dapat dituliskan sebagai :

$$\eta_{th} = \frac{3600}{BSFC \times LHV} \quad (2.40)$$

dengan $BSFC$ dalam kg/kWh dan LHV dalam kJ/kg. Konstanta 3600 digunakan untuk konversi satuan energi dari kWh ke kJ,

2.6.4 Hubungan Matematis antara Variabel Lingkungan dan Efisiensi

Berdasarkan kajian termodinamika dan hasil pengujian empiris PLTD, hubungan antara efisiensi termal dan kondisi udara lingkungan dapat dimodelkan secara regresi linier sebagai :

$$\eta_{th} = a - b(T_{in} - 25) - c(RH - 60) \quad (2.41)$$

Keterangan :

T_{in} : Suhu udara masuk ($^{\circ}C$)

- RH : Kelembaban relatif (%)
- a : Efisiensi pada kondisi standar ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $RH = 60\%$)
- b, c : Koefisien koreksi efisiensi terhadap suhu dan kelembaban

Tabel 2. 6 Nilai Empiris Dari Hasil Observasi PLTD Sungai Juaro

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
a	0,45	-	Efisiensi standar (45%)
b	0,002	per $^{\circ}\text{C}$	Penurunan efisiensi per kenaikan suhu
c	0,0008	per % RH	Penurunan efisiensi per kenaikan kelembaban

2.6.5 Hubungan Antara Massa Udara, Suhu, dan Efisiensi

Jumlah oksigen yang masuk ke dalam silinder sangat menentukan keberhasilan proses pembakaran. Laju massa udara masuk dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} \times V_{intake} \times N_{cycle} \quad (2.42)$$

Karena densitas udara menurun akibat peningkatan suhu dan kelembaban, hubungan tersebut dapat dinyatakan secara proporsional sebagai :

$$\dot{m}_{air} \propto \frac{(P - P_v)}{T} \quad (2.43)$$

Keterangan :

- $\dot{m}_{air}$: Laju aliran massa udara yang masuk ke silinder (kg/s)
- ρ_{air} : Densitas udara masuk / udara lembap (kg/m^3)
- V_{intake} : Volume udara masuk per siklus hisap (m^3/siklus)
- N_{cycle} : Jumlah siklus kerja mesin per satuan waktu (siklus/s)
- P : Tekanan udara total (Pa)

P_v : Tekanan parsial uap air (Pa)

T : Suhu udara absolut (K)

Dengan demikian, peningkatan suhu dan kelembaban menyebabkan penurunan densitas udara, yang berakibat pada berkurangnya massa udara masuk ke silinder dan pada akhirnya menurunkan efisiensi pembakaran mesin diesel.