

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Dalam penelitian ini, berfokus pada analisis konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) terhadap efisiensi energi di PLTD Senayan. Berikut beberapa penelitian yang relevan :

1. Analisis Efisiensi Termal dan Konsumsi Bahan Bakar Spesifik pada Mesin Diesel Generator Set (Hidayat, 2020).

Penelitian yang dilakukan oleh Hidayat, penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi beban yang diberikan pada generator (mendekati 80-100%), maka nilai SFC akan semakin rendah (lebih efisien). Sebaliknya, pada beban rendah (di bawah 50%), konsumsi bahan bakar per kWh meningkat signifikan.

2. Studi Komparasi Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Aktual dengan Manual Book pada PLTD (Prasetyo, 2018)

Penelitian ini dilakukan oleh Prasetyo, memberikan dasar teori mengenai pola kurva SFC terhadap *load factor*. Ditemukan adanya deviasi sebesar 5-8% antara nilai SFC aktual di lapangan dengan nilai SFC pada buku manual pabrikan akibat faktor usia mesin dan kondisi lingkungan.

3. Pengaruh Kualitas Bahan Bakar Biosolar terhadap Nilai SFC pada Pembangkit Listrik (Putra & Wijaya, 2021)

Penelitian ini dilakukan oleh Putra dan Wijaya, yang berisi tentang penggunaan bahan bakar dengan nilai kalor yang lebih rendah menyebabkan kenaikan angka SFC karena mesin membutuhkan volume bahan bakar lebih banyak untuk menghasilkan daya yang sama.

2.2 Landasan Teori

2.2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

A. Pengertian PLTD

Menurut F.J. Tasian (2017) Pembangkit listrik adalah tempat atau sumber energi listrik dibangkitkan didalamnya terdapat generator sebagai pembangkit listriknya dan turbin sebagai penggerakanya.

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Senayan menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utama. Energi mekanik yang dihasilkan mesin digunakan untuk memutar rotor generator, dengan diesel sebagai bahan bakar utamanya.

Bahan bakar diesel memainkan peran penting dalam proses ini; bahan bakar ini memiliki rentang titik didih sekitar 150–380°C dan tersusun dari senyawa hidrokarbon kompleks. Ketersediaan dan efisiensinya menjadikan PLTD pilihan yang andal untuk memenuhi kebutuhan energi, termasuk di PLTD Senayan.

Teknologi PLTD juga dianggap sebagai solusi dan efisien, terutama untuk daerah terpencil atau sebagai unit cadangan saat listrik padam. Dengan manajemen operasional yang tepat, pembangkit listrik berbasis diesel dapat mendukung pasokan energi yang andal dan terukur di berbagai wilayah.

B. Sejarah PLTD Senayan

Sejarah PLTD Senayan merupakan perjalanan panjang dari sebuah infrastruktur olahraga menjadi pilar penting ketahanan energi transportasi modern di Jakarta.

Berikut adalah linimasa sejarahnya:

a. Era Bung Karno (1960)

PLTD Senayan dibangun pada tahun 1960 di era kepemimpinan Presiden Soekarno. Tujuan utamanya saat itu adalah untuk mendukung

kebutuhan listrik besar dalam penyelenggaraan Asian Games IV tahun 1962 di kompleks olahraga Senayan.

b. Fungsi Awal dan Penyuplai Gedung Penting

Setelah perhelatan Asian Games, pembangkit ini tetap beroperasi dengan kapasitas awal sekitar 15,12 Megawatt (MW). Fungsinya berkembang menjadi pemasok listrik cadangan untuk objek-objek vital di sekitarnya, seperti:

- Kompleks Olahraga Gelora Bung Karno.
- Gedung MPR/DPR/DPD.
- Kantor Pusat TVRI.

c. Revitalisasi untuk MRT Jakarta (2019)

Setelah puluhan tahun beroperasi sebagai unit kecil, PT PLN (Persero) melakukan revitalisasi besar-besaran senilai Rp 1 triliun pada tahun 2019. Langkah ini dilakukan untuk menjadikan PLTD Senayan sebagai back-up suplai listrik utama bagi MRT Jakarta agar terhindar dari pemadaman (blackout).

- Peningkatan Kapasitas: Kapasitas dinaikkan drastis dari 15 MW menjadi 101 MW menggunakan 6 unit generator.
- Fungsi Black Start: PLTD ini dirancang sebagai pembangkit *quick start* yang bisa menyala dalam hitungan menit untuk membantu proses normalisasi sistem kelistrikan Jakarta jika terjadi gangguan besar.

d. Peresmian IP Academy (Desember 2019)

Pada 16 Desember 2019, PLTD Senayan kembali dioperasikan secara penuh setelah revitalisasi, bersamaan dengan peresmian IP Academy oleh PT Indonesia Power (sekarang PLN Indonesia Power) sebagai pusat pembelajaran dan pelatihan teknologi pembangkitan.

Sistem cadangan listrik dari PLTD Senayan ke MRT Jakarta dirancang dengan teknologi khusus agar kereta tidak terjebak di terowongan saat terjadi pemadaman listrik total (*blackout*).

Berikut adalah cara kerjanya:

- a. Dual Supply (Pasokan Utama): Dalam kondisi normal, MRT Jakarta mendapatkan pasokan listrik dari dua subsistem PLN yang berbeda, yaitu Subsistem Gandul dan Subsistem Muara Karang.
- b. Deteksi Gangguan: Jika kedua pasokan utama tersebut gagal (seperti peristiwa pemadaman massal Agustus 2019), sistem akan mendeteksi hilangnya tegangan secara otomatis.
- c. Fungsi Black Start: PLTD Senayan berfungsi sebagai unit Black Start atau *Quick Start*. Artinya, mesin diesel di Senayan dapat dihidupkan tanpa memerlukan pancingan listrik dari luar.
- d. Normalisasi dalam Menit: Setelah mesin diesel menyala, energi listrik sebesar 101 MW dikirimkan melalui jaringan kabel transmisi khusus (GIS Senayan dan GIS Danayasa) menuju stasiun MRT dalam hitungan menit.
- e. Evakuasi dan Operasional Terbatas: Pasokan dari PLTD Senayan memastikan kereta memiliki daya yang cukup untuk melanjutkan perjalanan ke stasiun terdekat (evakuasi penumpang) dan menjaga sistem ventilasi serta lampu di terowongan tetap menyala.

Sistem ini menjadikan MRT Jakarta sebagai salah satu transportasi paling aman di Indonesia karena memiliki "asuransi" listrik mandiri di tengah kota.

C. Penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

Secara umum, Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) digunakan untuk melayani beban kecil hingga menengah, mendukung pasokan listrik daerah baru/terpencil dan pedesaan, serta memenuhi kebutuhan listrik industri/pabrik.

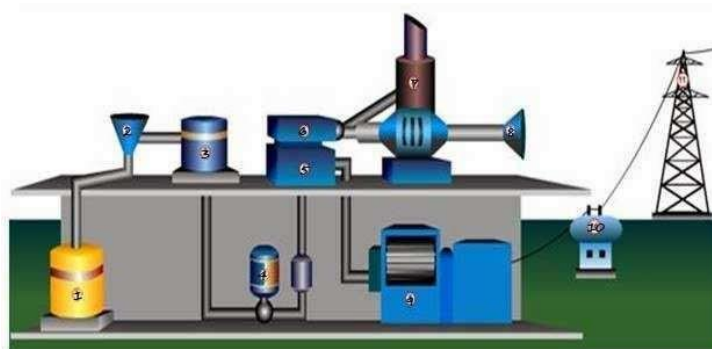
Di PLTD Senayan, dengan kapasitas sekitar 101 MW, unit ini dikerahkan sebagai unit siaga darurat untuk MRT Jakarta dan sebagai unit pembangkit black-start untuk mendukung PLTU Tanjung Priok.



Gambar 2.2.1.B MRT dan PLTD Tanjuk Priok

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Senayan memiliki peran strategis sebagai infrastruktur kelistrikan vital di Jakarta dengan penggunaan utama sebagai Cadangan Listrik Utama MRT Jakarta: Fungsi paling krusial adalah sebagai *backup* terakhir jika pasokan listrik utama dan cadangan dari sistem transmisi PLN mengalami gangguan. PLTD ini memastikan kereta MRT tetap dapat dievakuasi atau beroperasi terbatas selama 8 hingga 10 jam dengan kondisi bahan bakar penuh.

D. Bentuk dan Bagian-bagian Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Perhatikan gambar di bawah ini:



Gambar 2.2.1.C Pembangkit Tenaga Diesel

Gambar diatas merupakan bagian dari PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel), yakni:

1. Tangki Penampung Bahan Bakar (*Storage Tank*) berfungsi sebagai tempat penyimpanan utama cadangan bahan bakar solar dalam volume besar untuk kebutuhan operasional jangka panjang.
2. Tangki Harian (*Daily Tank*): Berfungsi menampung bahan bakar yang telah disaring untuk penggunaan sehari-hari. Tangki ini memastikan pasokan bahan bakar ke mesin selalu siap dan bersih dari partikel kasar.
3. Pompa Bahan Bakar (*Fuel Pump*): Berfungsi memindahkan bahan bakar dari tangki menuju mesin dan meningkatkan tekanannya agar siap dikabutkan oleh injektor.
4. Penyemprot (*Nozzle/Injector*): Berfungsi untuk mengabutkan atau menyemprotkan bahan bakar dalam bentuk partikel halus (kabut) ke dalam ruang bakar dengan tekanan tinggi agar mudah terbakar.
5. Mesin Diesel: Bertindak sebagai penggerak mula (*prime mover*) yang mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi mekanik berupa putaran poros.
6. Tempat Pembuangan Gas (*Exhaust*): Berfungsi untuk mengalirkan gas sisa hasil pembakaran dari dalam silinder mesin menuju udara luar serta meredam kebisingan suara mesin.
7. Peralatan Pengatur/Pengaman (*Governor*, Kontrol, dan Proteksi):
 - a. Governor: Mengatur kecepatan putaran mesin agar tetap stabil sesuai dengan beban listrik.
 - b. Kontrol & Proteksi: Melindungi mesin dan generator dari kerusakan akibat kondisi abnormal seperti beban berlebih atau suhu tinggi.
8. Generator: Berfungsi mengubah energi mekanik (putaran) dari mesin diesel menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik.
9. Peralatan Bantu (Pelumasan/Pendingin):

- a. Sistem Pelumasan: Mengurangi gesekan antar komponen mesin agar tidak cepat aus.
 - b. Sistem Pendingin: Menjaga suhu mesin tetap pada batas aman agar tidak terjadi *overheating* selama beroperasi.
10. Trafo (*Transformer*): Berfungsi untuk menaikkan (*step-up*) tegangan listrik yang dihasilkan generator sebelum didistribusikan agar rugi-rugi daya selama pengiriman dapat diminimalisir.
11. Saluran Transmisi: Berfungsi menyalurkan atau mendistribusikan energi listrik dari lokasi pembangkit menuju gardu induk atau langsung ke konsumen.

E. Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

1. Bahan bakar dari tangki penyimpanan pertama-tama dipompa ke reservoir perantara setelah melalui proses penyaringan. Bahan bakar kemudian didistribusikan ke tangki harian. Untuk BBM (bahan bakar minyak): aliran dari tangki harian dipompa ke nosel, di mana tekanannya ditingkatkan dan diatomisasi menjadi kabut. Untuk CNG (bahan bakar gas) pasokan dari tangki harian disalurkan ke kit konversi (pengatur tekanan gas) untuk menyesuaikan tekanan sebelum digunakan.
2. Udara bersih dikompresi oleh kompresor, lalu disalurkan ke tangki udara awal melalui *intake manifold*. Aliran udara tersebut kemudian dialirkan ke turbocharger, tempat tekanan dan suhu udara pertama kali ditingkatkan. Biasanya, tekanan udara suplai sekitar 500 psi dengan suhu yang dapat mencapai 600°C.
3. Udara bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi kemudian dialirkan ke ruang bakar.
4. Bahan bakar baik dari kit konversi (untuk CNG) maupun dari nosel/injektor (untuk BBM) kemudian disuntikkan ke ruang bakar.

5. Energi listrik yang dihasilkan didistribusikan melalui saluran transmisi ke beban; di sisi beban, tegangan diturunkan menggunakan transformator *step-down* (gulungan primer lebih besar daripada gulungan sekunder).

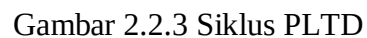
2.2.2. Komponen Utama PLTD

Keandalan PLTD sangat ditentukan oleh kesiapan komponen utama dan sistem bantu (auxiliary). Selain mesin diesel dan generator, sistem bantu diperlukan untuk memastikan pembakaran, pelumasan, pendinginan, pemenuhan udara start, serta keselamatan operasi.

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel memiliki komponen utama, yaitu:

1. Tangki bahan bakar utama: Menampung jumlah bahan bakar diesel yang dibutuhkan untuk operasi.
2. Filter bahan bakar: Menghilangkan kotoran dan air untuk mencegah kerusakan pada pompa/injektor.
3. Tangki harian/tangki penyimpanan sementara: Menyimpan bahan bakar yang telah disaring sebelum masuk ke mesin.
4. Nosel/injektor: Meningkatkan tekanan dan menyemprotkan bahan bakar ke dalam ruang bakar.
5. Mesin diesel (penggerak utama): Mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik.
6. *Turbocharger*: Menyuplai udara bertekanan untuk meningkatkan laju dan efisiensi pembakaran.
7. Filter udara masuk: Menyaring partikel dari udara sebelum masuk ke mesin.
8. Sistem pembuangan: Membuang gas buang hasil pembakaran ke atmosfer dengan aman.
9. Generator: Mengubah energi mekanik menjadi energi listrik menggunakan induksi elektromagnetik.

- ### 2.2.3. Siklus PLTD



1. Sumber Udara – Air Compressor (Starting Air Compressor / SAC)

- a. Udara atmosfer masuk melalui suction filter.

- b. Udara dikompresi secara bertahap (multi-stage compression).
- c. Setelah kompresi, udara melewati aftercooler untuk menurunkan temperatur.
- d. Moisture separator memisahkan kandungan air hasil kondensasi.
- e. Safety Valve (SV) melindungi sistem dari overpressure (set point ± 30 bar).
- f. Check valve mencegah aliran balik menuju kompresor.

Output dari tahap ini adalah udara bertekanan tinggi menuju Air Receiver.

2. Penyimpanan – Starting Air Receiver

Udara bertekanan dari SAC disimpan dalam Air Receiver (tangki udara).

Fungsi utama:

- a. Menyimpan energi dalam bentuk udara tekan.
- b. Menjaga tekanan sistem tetap stabil.
- c. Menyediakan volume udara cukup untuk beberapa kali start engine.

Komponen penting:

- Pressure gauge untuk monitoring tekanan.
- Safety valve sebagai proteksi tambahan.
- Drain valve untuk membuang kondensat. Tekanan normal operasi berkisar 25–30 bar.

3. Distribusi Utama – Main Starting Air Line

Dari air receiver, udara dialirkan ke main starting air line.

Pada jalur ini terdapat:

- a. Main stop valve (isolasi sistem).
- b. Non-return valve (NRV) mencegah backflow dari mesin.
- c. Pressure regulator (jika ada) untuk menjaga tekanan sesuai kebutuhan mesin.

Udara kemudian menuju Starting Air Manifold pada diesel engine.

4. Starting Air Manifold pada Diesel Engine

Starting air manifold adalah pipa distribusi yang mengalirkan udara ke masing-masing silinder.

Fungsinya:

- a. Mendistribusikan udara bertekanan secara merata.
- b. Menjadi penghubung antara main air line dan starting valve tiap silinder.
Pada tahap ini, udara belum masuk ke ruang bakar, masih menunggu sinyal start.

5. Starting Valve per Cylinder

Setiap silinder memiliki starting air valve, prosesnya:

- a. Saat tombol start ditekan, sistem kontrol mengaktifkan pilot air.
- b. Pilot air membuka starting valve sesuai firing order mesin.
- c. Udara bertekanan ± 30 bar masuk ke ruang silinder.
- d. Tekanan udara mendorong piston turun.
- e. Crankshaft mulai berputar.
- f. Sistem distribusi udara mengikuti urutan pembakaran (firing order).

6. Transisi dari Starting Air ke Pembakaran Diesel

Setelah crankshaft mencapai kecepatan minimum (cranking speed):

- a. Sistem bahan bakar diaktifkan.
- b. Injektor mulai menyemprotkan solar.
- c. Terjadi pembakaran (compression ignition).
- d. Mesin mulai menghasilkan tenaga sendiri.

Pada titik ini:

- Starting air otomatis dihentikan.
- Starting valve menutup.
- Mesin beroperasi normal tanpa bantuan udara start.

7. Sistem Proteksi dan Interlock

Beberapa proteksi penting dalam sistem:

- a. Interlock tekanan minimum (misalnya >24 bar) agar start hanya dilakukan jika tekanan cukup.

- b. Safety valve untuk mencegah overpressure.
- c. Pressure switch untuk monitoring.
- d. Check valve untuk mencegah tekanan balik.

Jika tekanan receiver turun di bawah batas aman, start engine tidak akan diizinkan.

8. Rangkaian Alur Singkat (Flow Summary)

Atmospheric Air → Air Compressor → Aftercooler → Moisture Separator → Air Receiver → Main Stop Valve → Non Return Valve → Starting Air Manifold → Starting Valve per Cylinder → Ruang Silinder → Cranking → Injeksi Solar → Pembakaran Normal Diesel Engine.

2.2.4. Proses Penyalaan PLTD

Sebelum mesin diesel dinyalakan, terdapat beberapa sistem pendukung yang harus dalam kondisi siap operasi. Sistem-sistem ini berfungsi untuk menjamin keamanan, keandalan, dan mencegah kerusakan saat proses start berlangsung.

1. Sistem Starting Air (Udara Tekanan Tinggi)
2. Sistem Pelumasan (Lube Oil System)
3. Sistem Pendingin (Cooling Water / Jacket Water)
4. Sistem Bahan Bakar (HSD/MFO)
5. Sistem Instrument Air & Control
6. Sistem Excitation dan Synchronizing Generator

Urutan Proses Penyalaan PLTD

1. Pemeriksaan Awal (Pre-Start Check)
 - Memastikan level oli pelumas mencukupi.
 - Memastikan level air pendingin normal.
 - Memastikan tekanan starting air sesuai standar (umumnya 20–30 bar).

- Memastikan tekanan bahan bakar normal.
- Memastikan tidak ada alarm aktif.
- Memastikan turning gear sudah dilepas.

2. Mengaktifkan Sistem Pendukung

- Lube Oil Pump ON

Tujuan: membangun tekanan pelumasan sebelum mesin berputar.

- Cooling Water Pump ON

Tujuan: menjaga suhu mesin tetap stabil saat proses pembakaran dimulai.

- Sistem Bahan Bakar Siap
- Valve dibuka dan tekanan diperiksa.
- Untuk MFO diperlukan proses pemanasan awal (preheating).

3. Starting Air System Ready

Memastikan tekanan udara start mencukupi. Udara bertekanan ini digunakan untuk memutar crankshaft pada saat awal penyalaan.

4. Proses Start (Cranking)

- Tombol START ditekan.
- Starting air valve membuka dan udara masuk ke silinder.
- Crankshaft mulai berputar.
- Setelah mencapai putaran minimum, injeksi bahan bakar aktif.
- Terjadi pembakaran dan mesin hidup sendiri (self-sustaining speed).
- Starting air otomatis terputus.

5. Warm-Up (Tanpa Beban)

Mesin dijalankan tanpa beban selama 5–15 menit untuk memastikan:

- Tekanan oli stabil.
- Temperatur meningkat secara bertahap.
- Tidak ada getaran atau suara abnormal.

6. Sinkronisasi ke Jaringan

Sebelum generator dihubungkan ke sistem jaringan, harus dipastikan:

- Tegangan sesuai.
- Frekuensi sesuai.
- Sudut fasa sama.

Jika tidak sinkron, sistem proteksi akan bekerja atau dapat terjadi kerusakan pada generator.

7. Pembebanan (Loading)

- Setelah sinkronisasi berhasil, beban dinaikkan secara bertahap sambil memonitor
- Temperatur mesin.
- Tekanan oli.
- Temperatur gas buang.
- Getaran mesin.

Proses penyalaan PLTD harus dilakukan secara sistematis dan berurutan. Sistem pelumasan dan pendingin harus siap sebelum starting air digunakan untuk memutar mesin. Setelah mesin hidup stabil, dilakukan sinkronisasi sebelum pembebanan bertahap. Prosedur yang tidak sesuai dapat menyebabkan kerusakan serius pada mesin maupun generator.

2.2.5. Mesin Diesel dan siklusnya

A. Pengertian Mesin Diesel

Pada pembangkit listrik tenaga diesel, mesin diesel bertindak sebagai penggerak utama, mengubah energi dari pembakaran bahan bakar menjadi energi mekanik. Kinerja dan efisiensi pembangkit listrik secara keseluruhan sangat ditentukan oleh komponen ini.

Mesin diesel sebagai prime mover terdiri dari blok silinder, piston, connecting rod, crankshaft, camshaft/valve train, turbocharger (pada mesin tertentu), serta sistem injeksi bahan bakar. Kinerja mesin ditentukan oleh kualitas pembakaran, kondisi kompresi, timing injeksi, dan kesehatan komponen bergerak.

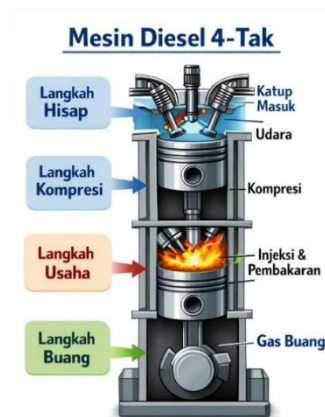
Mesin diesel beroperasi menggunakan siklus pembakaran internal (kompresi penyalaan), yang meliputi:

- Hisap: Udara segar dihisap ke dalam silinder.
- Kompresi: Udara dikompresi hingga mencapai suhu tinggi.
- Pembakaran: Bahan bakar diesel disuntikkan, terbakar spontan, dan mendorong piston (proses kerja/ekspansi).
- Buang: Gas buang dikeluarkan dari silinder.

B. Jenis-jenis Mesin Diesel

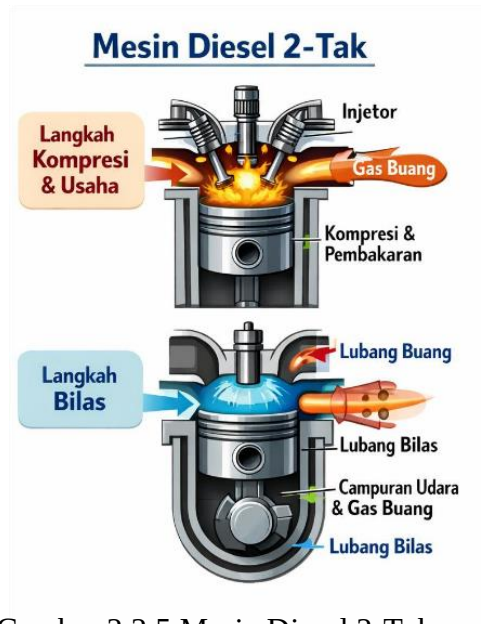
Dua kategori yang umum digunakan:

- Mesin Diesel 4-Tak: Lebih efisien dengan emisi yang relatif lebih rendah



Gambar 2.2.5 Mesin Diesel 4-Tak

- Mesin Diesel 2-Tak: Konstruksinya lebih sederhana, sering digunakan pada aplikasi berukuran atau berkapasitas lebih kecil.



Gambar 2.2.5 Mesin Diesel 2-Tak

Adapun Kelebihan & Kekurangan Utama pada Diesel 4- Tak dan Diesel 2- Tak:

a. Diesel 4-Tak

Kelebihan: Lebih hemat bahan bakar dan memiliki emisi gas buang yang lebih rendah. Komponen bekerja lebih stabil sehingga umur mesin cenderung lebih panjang.

Kekurangan: Konstruksi lebih rumit dengan banyak bagian bergerak (katup, pelatuk, noklen as), yang meningkatkan biaya perawatan jangka panjang.

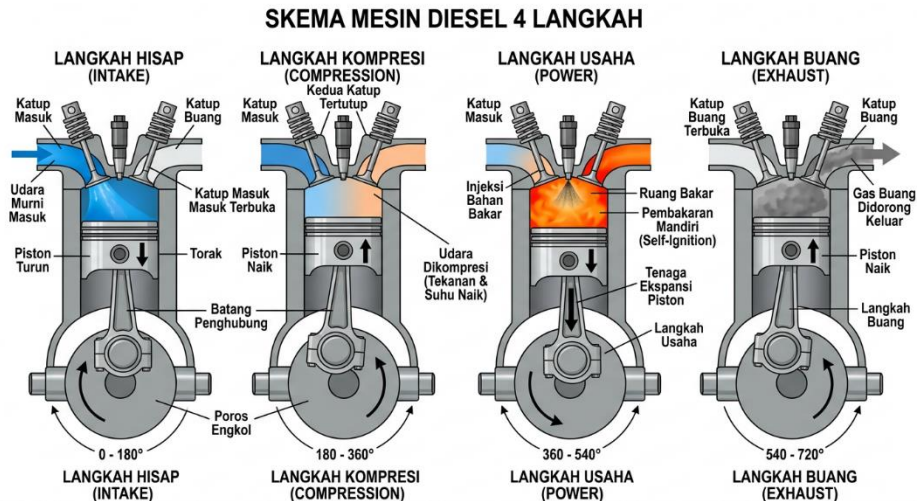
b. Diesel 2-Tak

Kelebihan: Memberikan torsi konstan yang sangat besar dan daya yang lebih responsif. Konstruksi secara mekanis bisa lebih sederhana karena minim katup.

Kekurangan: Efisiensi termal bisa lebih rendah jika sistem pembilasan tidak sempurna. Masalah emisi sering menjadi kendala pada regulasi modern.

Specific Fuel Consumption (SFC) di PLTD Senayan, menggunakan mesin diesel 4 langkah untuk mengukur efisiensi bahan bakar dengan

menghitung massa bahan bakar yang dikonsumsi per satuan daya yang dihasilkan.



Gambar 2.2.5 Skema mesin diesel 4 langkah

Adapun penjelasan proses mesin diesel 4 langkah berdasarkan gambar skema diatas, sebagai berikut:

1. Langkah Hisap (*Intake Stroke*): Piston bergerak dari Titik Mati Atas (TMA) ke Titik Mati Bawah (TMB). Hanya udara murni yang masuk ke dalam ruang bakar, berbeda dengan mesin bensin yang menghisap campuran udara-bahan bakar.
2. Langkah Kompresi (*Compression Stroke*): Piston bergerak dari TMB ke TMA. Udara yang terperangkap dalam ruang bakar dikompresi hingga tekanan dan suhu meningkat drastis.
3. Langkah Usaha/Pembakaran (*Power/Combustion Stroke*): Piston berada di dekat TMA. Injektor menyembrotkan bahan bakar solar ke dalam udara panas. Solar terbakar sendiri, menghasilkan tekanan tinggi yang mendorong piston turun ke TMB, menghasilkan tenaga.

4. Langkah Buang (*Exhaust Stroke*): Piston kembali bergerak ke atas (TMB ke TMA). Katup buang terbuka, dan piston mendorong sisa gas pembakaran keluar dari silinder.

C. Sistem Start Mesin Diesel

Sistem start (*starting system*) pada mesin diesel berfungsi untuk memberikan putaran awal pada poros engkol (*crankshaft*) hingga mencapai kecepatan tertentu (sekitar 150–250 RPM) agar terjadi kompresi yang cukup untuk memulai pembakaran mandiri (*self-combustion*).

a. Jenis-Jenis Sistem Start

Berdasarkan sumber tenaganya, sistem start mesin diesel dibagi menjadi beberapa metode utama:

- Sistem Start Elektrik: Paling umum digunakan pada kendaraan ringan, truk, dan Genset Perkins. Sistem ini mengubah energi listrik dari baterai menjadi energi mekanik melalui motor starter untuk memutar *flywheel*.
- Sistem Start Udara (*Air Starting*): Digunakan pada mesin diesel berukuran besar, seperti mesin induk kapal.
Direct: Udara bertekanan (25–30 bar) dimasukkan langsung ke dalam ruang bakar silinder sesuai urutan pengapian (*firing order*) untuk mendorong piston.
Indirect: Udara digunakan untuk menggerakkan motor udara yang kemudian memutar mesin.
- Sistem Start Manual: Digunakan pada mesin diesel kecil (seperti mesin dongfeng atau traktor tangan) dengan menggunakan tenaga manusia melalui engkol putar (*cranking*) dan tuas dekompresi untuk meringankan putaran awal.

- Sistem Start Hidrolik: Menggunakan tekanan oli dari akumulator untuk memutar motor hidrolik. Umumnya digunakan di lingkungan berisiko tinggi seperti industri migas karena tidak menimbulkan percikan api.

b. Komponen Utama (Sistem Elektrik)

Komponen penyusun sistem start elektrik meliputi:

- Baterai (Aki): Sumber energi listrik.
- Motor Starter: Mengubah listrik menjadi torsi putar melalui *armature coil* dan *commutator*.
- *Magnetic Switch* (Solenoid): Bertindak sebagai sakelar arus besar sekaligus pendorong gigi pinion.
- *Pinion Gear*: Roda gigi yang menghubungkan motor starter dengan roda gila (*flywheel*) mesin.
- *Glow Plug* (Busi Pijar): Membantu memanaskan ruang bakar sebelum start agar solar lebih mudah terbakar, terutama di suhu dingin.

c. Cara Kerja Dasar

- *Aktivasi*: Kunci kontak diputar ke posisi *START*, mengalirkan arus ke solenoid.
- *Engaging*: Solenoid mendorong gigi pinion hingga bertautan dengan *flywheel*.
- *Cranking*: Motor starter berputar kencang, memutar poros engkol hingga piston bergerak naik-turun untuk menghisap udara dan melakukan kompresi.

- *Firing*: Setelah putaran mencapai kecepatan cukup dan terjadi pembakaran, mesin akan hidup secara mandiri dan sistem starter akan terlepas secara otomatis.

D. Kelebihan dan Kekurangan Mesin Diesel

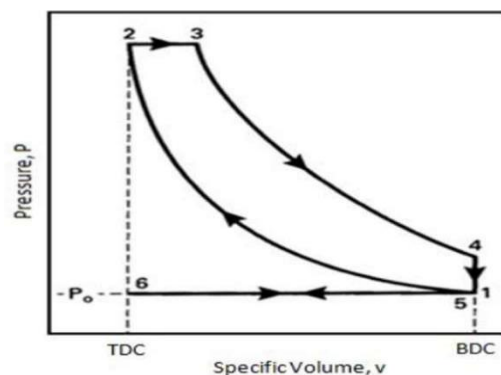
a. Keunggulan

Efisiensi tinggi: Mesin diesel umumnya lebih unggul daripada mesin bensin dalam mengubah energi bahan bakar menjadi tenaga mekanik.

Tahan lama: Dirancang untuk operasi jangka panjang dengan perawatan yang tepat.

Mesin diesel pada pembangkit listrik tenaga diesel digunakan dalam berbagai skala: dari unit kecil untuk daerah terpencil hingga pembangkit besar yang memasok listrik ke jaringan listrik.

Siklus diesel adalah siklus teoritis untuk *compression-ignition engine* atau mesin diesel. Perbedaan antara siklus diesel dan Otto adalah penambahan panas pada tekanan tetap. Karena alasan ini siklus Diesel kadang disebut siklus tekanan tetap. Dalam diagram P-v, siklus diesel dapat digambarkan seperti berikut:



Gambar 2.2.3 Siklus Diesel Diagram P-v

(Sumber : Cengel, Y.A., & Boles, M.A. (2015))

Proses dari siklus tersebut yaitu:

6-1 = Langkah Hisap pada $P = c$ (isobarik)

1-2 = Langkah Kompresi, P bertambah, $Q = c$ (isentropik / reversibel adiabatik)

2-3 = Pembakaran, pada tekanan tetap (isobarik)

3-4 = Langkah Kerja P bertambah, $V = c$ (isentropik / reversibel adiabatik)

5-5 = Pengeluaran Kalor sisa pada $V = c$ (isokhorik)

5-6 = Langkah Buang pada $P = c$

b. Kekurangan Mesin Diesel

Meskipun memiliki keunggulan dalam hal kecepatan respon, penggunaan mesin diesel di PLTD Senayan juga memiliki beberapa kekurangan utama, terutama karena lokasinya yang berada di tengah kawasan perkotaan yang padat:

- a. Polusi Suara (Kebisingan): Mesin diesel menghasilkan suara bising yang sangat tinggi, sering kali melebihi standar baku mutu lingkungan. Diperlukan teknologi peredam atau penghalang kebisingan (noise barrier) khusus untuk meminimalkan gangguan terhadap kawasan sekitarnya.
- b. Emisi Gas Buang: Pembakaran bahan bakar solar menghasilkan emisi gas seperti SO_2 , NO_2 serta partikulat debu yang dapat memengaruhi kualitas udara dan kesehatan pernapasan bagi pekerja maupun masyarakat di sekitar area pembangkit.
- c. Biaya Operasional Tinggi: Harga bahan bakar diesel (solar/biodiesel) jauh lebih mahal dibandingkan dengan sumber energi lain seperti batu bara atau energi terbarukan, sehingga biaya operasional per kWh yang dihasilkan cenderung lebih tinggi.
- d. Kapasitas Terbatas: PLTD umumnya tidak dirancang untuk memenuhi beban listrik skala besar secara terus-menerus (base load)

di kota besar, melainkan lebih efektif sebagai cadangan atau penanganan beban puncak saja.

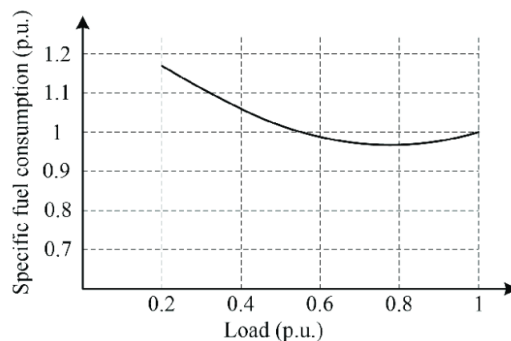
- e. Kebutuhan Pemeliharaan Rutin: Mesin diesel memerlukan perawatan intensif, termasuk penggantian oli dan suku cadang secara berkala, untuk memastikan keandalannya tetap terjaga terutama untuk fungsi emergency start.

2.2.6 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

a. Definisi Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC)

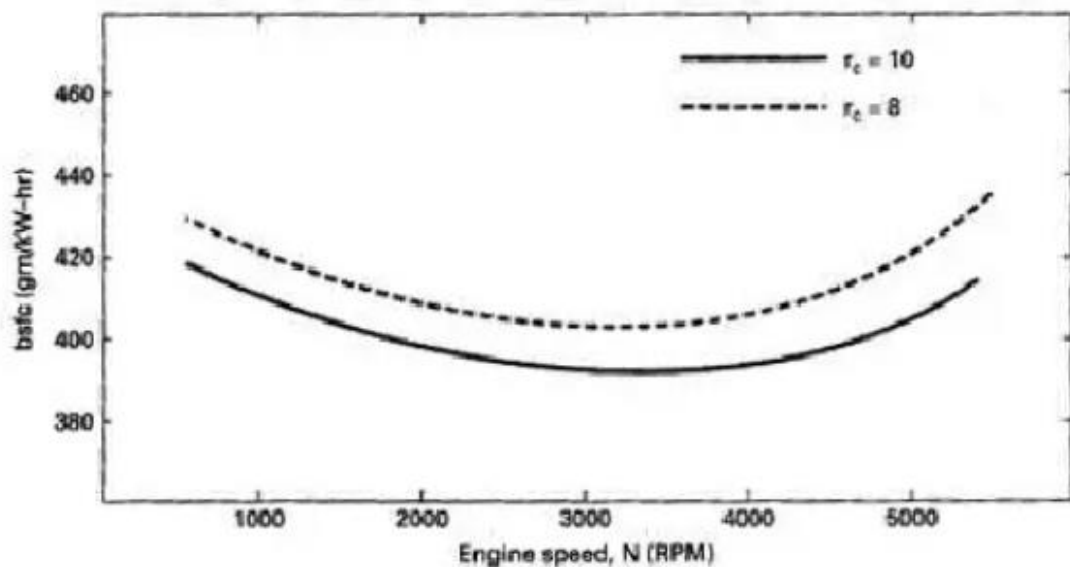
Specific Fuel Consumption (SFC) atau Konsumsi Bahan Bakar Spesifik adalah sebuah parameter performa mesin yang mendefinisikan efisiensi sebuah mesin pembakaran dalam dalam mengubah energi kimia bahan bakar menjadi kerja mekanis atau daya listrik. Berbeda dengan konsumsi bahan bakar total (liter/jam), SFC memberikan gambaran efisiensi yang objektif karena mengaitkan jumlah bahan bakar dengan output daya yang dihasilkan.

Secara matematis, SFC dinyatakan sebagai rasio laju aliran massa bahan bakar terhadap daya keluaran bersih. Dalam konteks PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel), daya yang diukur biasanya adalah daya pada terminal generator (kW). Grafik umum hubungan SFC dengan pembebanan pada mesin diesel.



Gambar 2.2.7 Grafik SFC dan Beban Mesin Diesel

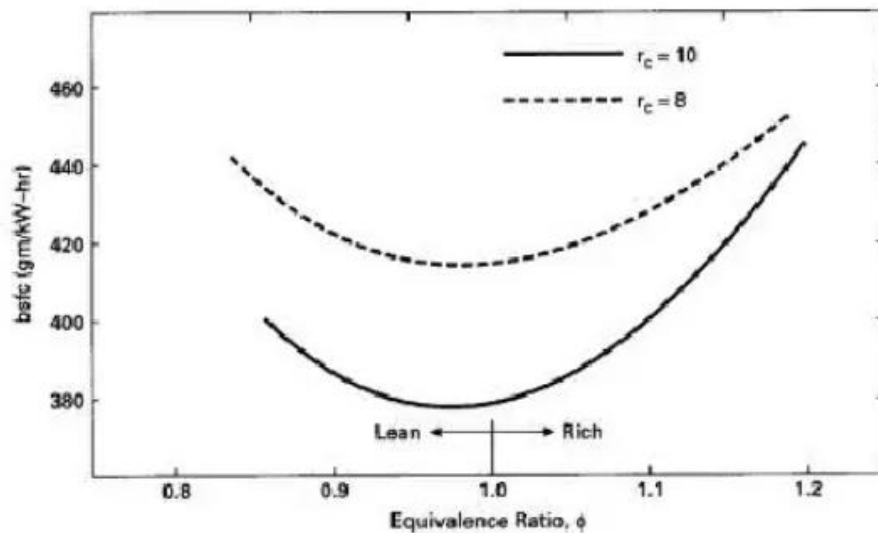
Konsumsi bahan bakar spesifik menurun ketika kecepatan mesin meningkat, mencapai minimal dan kemudian meningkat pada kecepatan tinggi. Konsumsi bahan bakar meningkat ketika kecepatan tinggi karena kerugian gesekan yang lebih besar. Pada kecepatan mesin rendah, lamanya waktu per siklus memungkinkan kehilangan panas lebih dan konsumsi bahan bakar naik. Pada Gambar 2.2. menunjukkan bagaimana SFC juga tergantung rasio kompresi dan rasio kesetaraan bahan bakar. Ini menurun dengan rasio kompresi yang lebih tinggi karena efisiensi termal yang tinggi. Terendah ketika pembakaran terjadi dalam campuran dengan rasio kesetaraan bahan bakar didekat salah satu ($\Phi = 1$). Semakin jauh pembakaran stoikiometri, semakin tinggi konsumsi bahan bakar.



Gambar 2.2.7. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

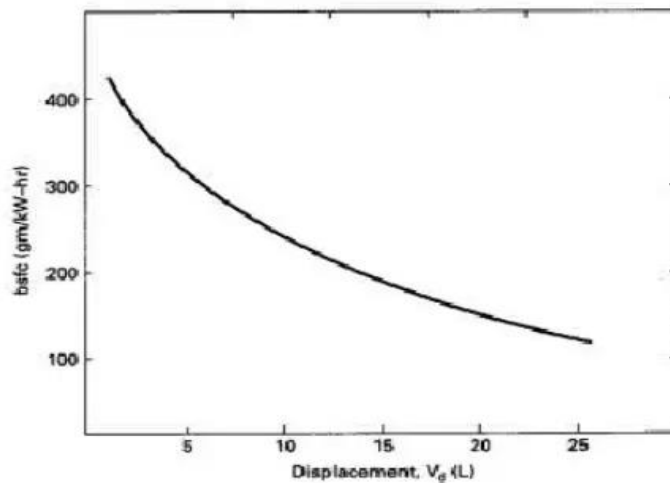
Gambar 2.2.7. Konsumsi bahan bakar spesifik sebagai fungsi dari kecepatan mesin. Konsumsi Bahan Bakar menurun seiring

kecepatan mesin meningkat karena waktu yang lebih singkat untuk kehilangan panas selama setiap siklus. Pada kecepatan mesin yang lebih tinggi konsumsi bahan bakar meningkat karena kerugian gesekan tinggi. Sebagai rasio kompresi adalah meningkatnya konsumsi bahan bakar karena efisiensi termal yang lebih besar.



Gambar 2.2.8. SFC

Gambar 2.2.8. Konsumsi bahan bakar spesifik sebagai fungsi dari rasio kesetaraan bahan bakar. Konsumsi minimum pada konsumsi yang sedikit ramping, meningkat dengan kedua campuran lebih kaya dan lebih ramping.



Gambar 2.2.9 *Specific Fuel Consumption*

Gambar 2.2.9. Konsumsi bahan bakar spesifik sebagai fungsi perpindahan mesin. Umumnya, konsumsi bahan bakar rata-rata lebih kecil dengan mesin yang lebih besar. Salah satu alasan untuk ini adalah kurang panas yang hilang karena volume lebih tinggi untuk rasio luas permukaan ruang pembakaran dalam mesin yang besar. Selain itu, mesin yang lebih besar beroperasi pada kecepatan yang lebih rendah yang mengurangi kerugian gesekan.

b. Rumus Perhitungan Konsumsi Bahan Bakar (SFC)

Specific Fuel Consumption (SFC) adalah parameter yang mengukur berapa banyak bahan bakar yang diperlukan oleh mesin untuk menghasilkan energi listrik sebanyak satu kilowatthour (kWh). SFC merupakan parameter penting untuk mengevaluasi efisiensi dan kinerja mesin. Dengan perbaikan SFC, penggunaan bahan bakar minyak atau pada umumnya berupa High Speed Diesel (HSD) juga dapat dikurangi. Hal ini berarti akan mempengaruhi jumlah karbon yang dihasilkan oleh mesin diesel. Oleh karena itu, sangat penting untuk menjaga mesin

diesel bekerja pada titik optimal sehingga SFC yang dihasilkan tetap baik. SFC biasanya diukur dalam liter per kilowatthour (L/kWh).

Specific Fuel Consumption (SFC) adalah rasio bahan bakar yang dikonsumsi (kg atau liter) dibagi daya yang dihasilkan (kWh) dalam kurun waktu tertentu, mengukur efisiensi mesin. Rumus dasarnya adalah $SFC = \text{Konsumsi Bahan Bakar (kg/jam)} / \text{Daya (kW)}$. Semakin rendah nilai SFC, semakin efisien penggunaan bahan bakar.

Rumus Utama SFC :

$$SFC = \frac{mf}{P}$$

SFC : *Specific Fuel Consumption* (kg/kWh atau g/kWh)

mf : Laju aliran bahan bakar (kg/jam atau g/s)

P : Daya yang dihasilkan (kW atau kJ)

1. SFC Umum (kg/kWh):

$$SFC = \frac{\text{Konsumsi Bahan Bakar (kg)}}{\text{Daya (kW)} \times \text{Waktu (jam)}}$$

2. SFC Berdasarkan Volume (Liter/kWh):

$$SFC = \frac{\text{Volume Bahan Bakar (liter)}}{\text{Daya (kW)} \times \text{Waktu (jam)}}$$

3. Konversi ke Berat (kg/kWh):

$$SFC \text{ (kg/ kWh)} = SFC \text{ (Liter/ kWh)} \times \text{Berat Jenis Solar (Kg/ L)}$$

Cara Menghitung SFC (Contoh Kasus)

Misalkan sebuah generator diesel (genset) mengonsumsi 50 liter solar dalam

2 jam, dan menghasilkan daya konstan 100 kW. Berat jenis solar =

1. Hitung konsumsi liter per jam:

$$50 \text{ Liter} / 2 \text{ jam} = 25 \text{ Liter} / \text{jam}$$

2. Hitung SFC dalam Liter/kWh:

$$25 \text{ Liter} / \text{jam} / 100 \text{ kWh} = 0,25 \text{ Liter} / \text{kWh}$$

3. Konversi ke kg/kWh (opsional, untuk standar):

$$0,25 \text{ Liter kWh} \times 0,82 \text{ kg/L} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

Konsumsi bahan bakar spesifik adalah ukuran efisiensi bahan bakar dari setiap penggerak utama yang membakar bahan bakar dan menghasilkan daya putar, atau daya poros. Biasanya digunakan untuk membandingkan efisiensi mesin pembakaran internal dengan keluaran poros.

Ini adalah rasio konsumsi bahan bakar dibagi dengan daya yang dihasilkan. Dalam satuan tradisional, satuan ini mengukur konsumsi bahan bakar dalam pon per jam dibagi dengan daya kuda rem, $\text{lb}/(\text{hp}\cdot\text{h})$; dalam satuan SI, ini sesuai dengan kebalikan dari satuan energi spesifik, $\text{kg}/\text{J} = \text{s}^2 / \text{m}^2$.

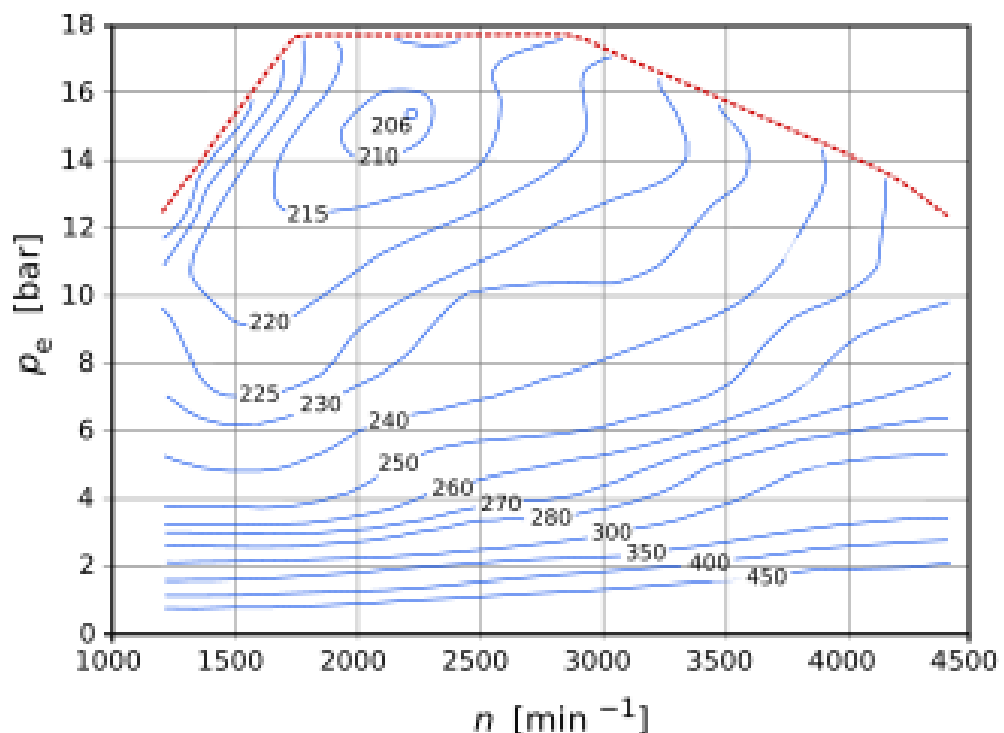
Karena alasan ini, SFC juga dapat dianggap sebagai konsumsi bahan bakar spesifik daya. SFC memungkinkan efisiensi bahan bakar dari berbagai mesin untuk dibandingkan secara langsung.

c. Faktor-faktor yang mempengaruhi Konsumsi Bahan Bakar (SFC)

Nilai SFC di PLTD Senayan tidak bersifat statis, melainkan fluktuatif berdasarkan beberapa variabel teknis:

1. Karakteristik Pembebanan (*Load Factor*): Mesin diesel memiliki kurva efisiensi spesifik di mana SFC terendah biasanya dicapai pada beban 75%–85%. Pada beban rendah (di bawah 50%), SFC meningkat tajam karena kerugian mekanis (gesekan) dan kerugian panas tetap ada sementara daya yang dihasilkan kecil.

2. Kualitas Bahan Bakar: Penggunaan Biodiesel (seperti B35) memiliki nilai kalor yang sedikit lebih rendah dibanding HSD murni, yang cenderung meningkatkan nilai SFC untuk menghasilkan daya yang sama.
 3. Kondisi Udara Masuk (*Intake Air*): Kepadatan udara yang dipengaruhi oleh suhu dan tekanan sekitar di area Senayan mempengaruhi rasio campuran udara dan bahan bakar (*Air-Fuel Ratio*).
 4. Sistem Injeksi: Ketepatan waktu injeksi dan tekanan atomisasi bahan bakar menentukan kesempurnaan pembakaran. Pembakaran yang tidak sempurna akan langsung meningkatkan angka SFC.
- d. Nilai operasional dan Sebagai Statistik Rata-Rata Siklus



Gambar 2.2.10 Peta BSFC [g/(kW·h)]

Setiap mesin akan memiliki nilai BSFC yang berbeda pada kecepatan dan beban yang berbeda. Misalnya, mesin piston mencapai efisiensi

maksimum ketika udara masuk tidak dibatasi dan mesin beroperasi mendekati torsi puncaknya. Namun, efisiensi yang sering dilaporkan untuk mesin tertentu bukanlah efisiensi maksimumnya, melainkan rata-rata statistik siklus ekonomi bahan bakar. Misalnya, nilai rata-rata siklus BSFC untuk mesin bensin adalah 322 g/(kW·h), yang setara dengan efisiensi 25% ($1/(322 \times 0,0122225) = 0,2540$). Efisiensi aktual dapat lebih rendah atau lebih tinggi daripada rata-rata mesin karena kondisi operasi yang bervariasi. Dalam kasus mesin bensin produksi, BSFC yang paling efisien adalah sekitar 225 g/(kW·h), yang setara dengan efisiensi termodinamika 36%.

Peta iso-BSFC (plot pulau bahan bakar) dari mesin diesel ditampilkan. Titik optimal pada BSFC 206 memiliki efisiensi 40,6%. Sumbu x adalah rpm; sumbu y adalah BMEP dalam bar (BMEP sebanding dengan torsi).

e. Karakteristik Konsumsi Bahan Bakar Spesifik di PLTD

Karakteristik Specific Fuel Consumption (SFC) atau Konsumsi Bahan Bakar Spesifik pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) mencerminkan efisiensi mesin dalam mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik. Secara umum, SFC didefinisikan sebagai jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu kWh energi listrik bruto.

Berikut adalah karakteristik utama SFC di PLTD:

1. Hubungan Terbalik dengan Beban (*Load*)

Karakteristik paling menonjol adalah SFC akan menurun seiring dengan peningkatan beban mesin hingga mencapai titik optimalnya.

- Beban Rendah: Mesin bekerja tidak efisien karena rugi-rugi mekanis dan termal tetap tinggi meskipun daya yang dihasilkan kecil, sehingga nilai SFC tinggi (boros).

- Beban Penuh (*Full Load*): Efisiensi termal tertinggi biasanya dicapai saat mesin beroperasi mendekati kapasitas nominalnya (80-100%). Pada kondisi ini, nilai SFC berada pada titik terendah (paling irit).

2. Nilai Standar Operasional

Berdasarkan standar industri dan spesifikasi pabrikan, nilai SFC PLTD modern umumnya berada pada rentang berikut:

- Rentang Umum: Antara 0,21 hingga 0,28 liter/kWh. (sumber: Kementerian ESDM; PLN)
- Satuan Berat: Dalam satuan massa, biasanya berkisar antara 200 hingga 250 g/kWh.
- Mesin Lama: Unit yang sudah tua atau kurang perawatan sering kali memiliki SFC di atas 0,30 L/kWh karena penurunan performa komponen.

3. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi

Efisiensi konsumsi spesifik ini dipengaruhi oleh beberapa variabel teknis:

- Kualitas Bahan Bakar: Penggunaan bahan bakar dengan nilai kalor (heating value) yang lebih rendah, seperti campuran Biodiesel (B30), dapat meningkatkan nilai SFC karena volume yang dibutuhkan lebih banyak untuk menghasilkan daya yang sama.
- Kondisi Lingkungan: Suhu udara masuk, kelembapan, dan tekanan udara (ketinggian lokasi) mempengaruhi kepadatan oksigen untuk pembakaran, yang berdampak langsung pada SFC.
- Teknologi Mesin: Penggunaan *turbocharger* dan sistem injeksi bahan bakar yang presisi membantu menurunkan SFC dengan meningkatkan efisiensi pembakaran.

2.2.7 Efisiensi Energi

Efisiensi energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) adalah ukuran seberapa efektif mesin diesel mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi listrik. Semakin tinggi efisiensinya, semakin sedikit bahan bakar yang terbuang dan semakin rendah biaya produksi listrik per kWh.

1. Indikator Utama Efisiensi (SFC)

Di dunia PLTD, efisiensi sering diukur menggunakan *Specific Fuel Consumption* (SFC), yaitu rasio jumlah bahan bakar yang dikonsumsi (liter) terhadap energi listrik yang dihasilkan (kWh).

Nilai Rata-rata: Unit mesin diesel PLTD umumnya memiliki nilai SFC sekitar 0,27 hingga 0,29 liter/kWh.

Target: Penurunan nilai SFC (misalnya dari 0,29 ke 0,27 liter/kWh) menunjukkan peningkatan efisiensi yang signifikan dalam operasional harian.

2. Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi

Beberapa faktor teknis dan operasional sangat menentukan performa PLTD:

- a. Desain & Teknologi Mesin: Penggunaan mesin diesel modern dengan sistem injeksi yang presisi.
- b. Turbocharger: Alat ini meningkatkan efisiensi dengan memanfaatkan gas buang untuk memampatkan udara masuk ke ruang bakar.
- c. Kualitas Bahan Bakar: Penggunaan bahan bakar yang sesuai standar, termasuk campuran biodiesel seperti B30 yang kini banyak digunakan oleh PLN.
- d. Faktor Daya (Power Factor): Perbaikan faktor daya beban dapat membantu mengoptimalkan konsumsi bahan bakar dan mengurangi emisi.

- e. Pemeliharaan (Maintenance): Servis rutin pada sistem injeksi, filter udara, dan filter bahan bakar menjaga mesin tetap pada performa puncak.

3. Upaya Peningkatan

Untuk menekan pemborosan, operator biasanya melakukan:

- a. Optimasi Pola Operasi: Mengatur jadwal mesin agar beroperasi pada beban optimal.
- b. Sistem Hybrid: Menggabungkan PLTD dengan energi terbarukan seperti PLTS (Panel Surya) untuk mengurangi ketergantungan pada BBM.

4. Rumus Efisiensi Energi

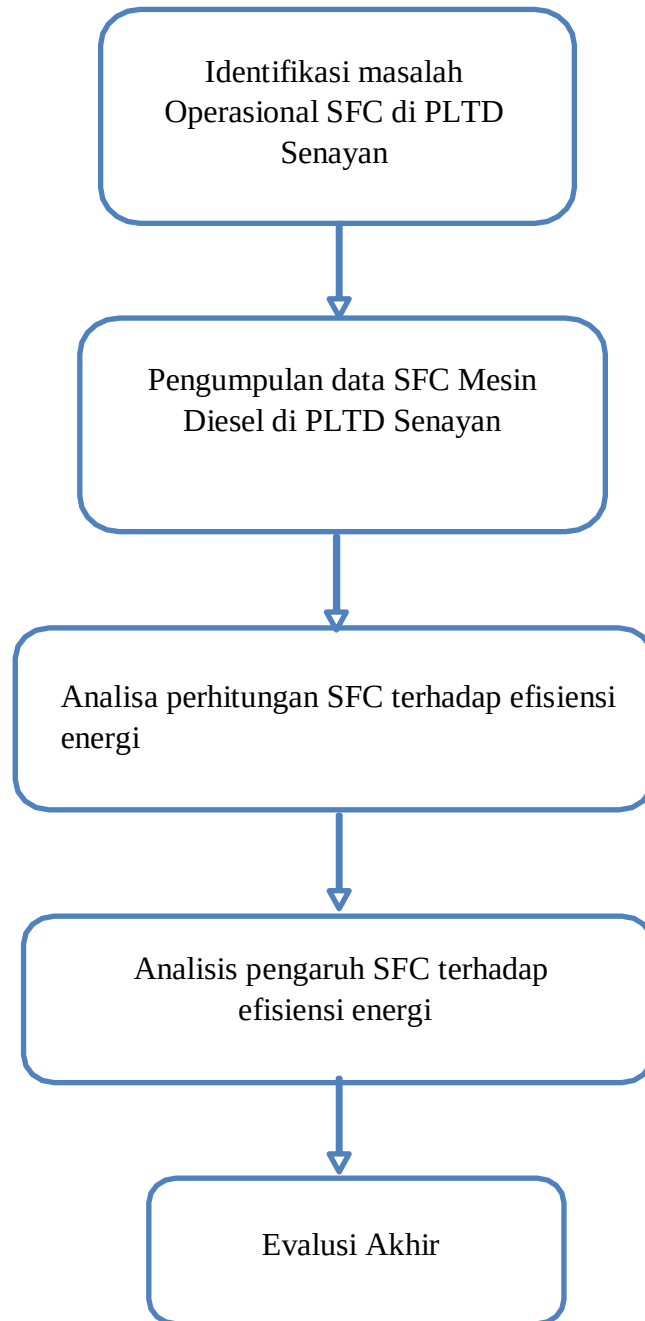
$$\eta = \frac{1}{SFC \times \text{Nilai Kalor HSD}} \times 100 \%$$

η : Efisiensi Energi

SFC : Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (L/kWh)

Nilai Kalor HSD : Rata-rata 1 liter HSD mengandung energi sebesar 10,55 kWh

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.3. Kerangka Pemikiran

Penelitian ini dari permasalahan yang terjadi mengenai efisiensi energi di PLTD Senayan yang sangat mempengaruhi besarnya konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) yang digunakan apakah terlalu boros atau tidak atau adanya kegagalan operasional tertentu pada unit mesin diesel di PLTD Senayan. Kemudian Langkah selanjutnya mengambil data teknis dan operasional yang diperlukan seperti jumlah konsumsi bahan bakar dalam periode tertentu sehingga menghasilkan daya Listrik (kWh) produksi dan data spesifikasi mesin dan beban operasional.

Data yang telah terkumpul kemudian di olah menggunakan rumus SFC dihitung dengan membagi laju konsumsi bahan bakar dengan daya yang dihasilkan. Nilai ini nanti akan menunjukkan seberapa banyak bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan setiap 1 kWh Listrik. Kemudian dapat melakukan evaluasi terhadap hubungan nilai SFC dengan tingkat efisiensi energi apakah SFC rendah atau tinggi. Tahap terakhir melakukan kesimpulan hasil dari penelitian serta memberikan rekomendasi untuk meningkatkan efisiensi energi.