

PEMERINTAH PROVINSI KEPULAUAN RIAU  
DINAS PENDIDIKAN  
**SMK NEGERI 5 TANJUNGPINANG**  
Kompetensi Keahlian: Teknika Kapal Niaga

**BUKU TEKS**  
**MESIN PENGGERAK UTAMA**  
Main Propulsion Engine

Oleh:  
**JOKO DARMONO, ST**  
NIP 197305312022211003

*Mesin Diesel & Turbin Uap Penggerak Kapal*

**TANJUNGPINANG**  
2026

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku teks berjudul "Mesin Penggerak Utama (Main Propulsion Engine)" ini dapat diselesaikan. Buku ini disusun sebagai bahan ajar utama bagi peserta didik Kompetensi Keahlian Teknik Kapal Niaga di SMK Negeri 5 Tanjungpinang.

Mesin penggerak utama merupakan jantung dari operasional sebuah kapal. Tanpa mesin penggerak yang andal, kapal tidak dapat melaksanakan fungsinya sebagai sarana transportasi laut. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang prinsip kerja, konstruksi, sistem pendukung, serta perhitungan dasar mesin penggerak utama menjadi kompetensi fundamental bagi setiap calon perwira teknik kapal.

Buku ini membahas dua jenis mesin penggerak utama yang paling umum digunakan di kapal niaga: mesin diesel (motor bakar dalam) dan turbin uap. Untuk mesin diesel, pembahasan mencakup prinsip kerja siklus, sistem pendingin, sistem pelumasan, sistem bahan bakar, perhitungan daya dasar, serta keterkaitannya dengan pesawat bantu. Untuk turbin uap, pembahasan mencakup jenis-jenis turbin, proses konversi energi uap menjadi energi kinetik, segitiga kecepatan, serta perhitungan efisiensi turbin.

Buku ini mencakup delapan topik utama: (1) Pengantar Mesin Penggerak Kapal, (2) Prinsip Kerja Mesin Diesel, (3) Sistem Pendingin Mesin Diesel, (4) Sistem Pelumasan Mesin Diesel, (5) Sistem Bahan Bakar dan Pesawat Bantu, (6) Perhitungan Dasar Motor Diesel, (7) Turbin Uap dan Segitiga Kecepatan, serta (8) Perhitungan Daya Guna Turbin Uap. Setiap bab dilengkapi teori, rumus, contoh soal, tabel referensi, dan latihan soal.

Saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan edisi berikutnya. Semoga buku ini bermanfaat bagi peserta didik dan seluruh insan maritim Indonesia.

Tanjungpinang, 2026  
Penulis,

**Joko Darmono, ST**  
NIP 197305312022211003

# DAFTAR ISI

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| Kata Pengantar                                      | ii        |
| Daftar Isi                                          | iii       |
| Daftar Tabel                                        | v         |
| <b>BAB I — PENGANTAR MESIN PENGGERAK KAPAL</b>      | <b>1</b>  |
| 1.1 Latar Belakang dan Peran Mesin Penggerak Utama  | 1         |
| 1.2 Kompetensi yang Akan Dicapai                    | 2         |
| 1.3 Klasifikasi Mesin Penggerak Kapal               | 3         |
| <b>BAB II — PRINSIP KERJA MESIN DIESEL</b>          | <b>6</b>  |
| 2.1 Siklus Kerja Motor Diesel                       | 6         |
| 2.2 Motor Diesel 2 Tak dan 4 Tak                    | 9         |
| 2.3 Konstruksi Utama Motor Diesel                   | 12        |
| 2.4 Proses Pembakaran dan Sistem Injeksi            | 15        |
| 2.5 Rangkuman & Latihan Bab II                      | 18        |
| <b>BAB III — SISTEM PENDINGIN MESIN DIESEL</b>      | <b>21</b> |
| 3.1 Fungsi dan Jenis Sistem Pendingin               | 21        |
| 3.2 Sistem Pendingin Air Tawar (Jacket Cooling)     | 23        |
| 3.3 Sistem Pendingin Air Laut                       | 26        |
| 3.4 Perawatan Sistem Pendingin                      | 28        |
| 3.5 Rangkuman & Latihan Bab III                     | 30        |
| <b>BAB IV — SISTEM PELUMASAN MESIN DIESEL</b>       | <b>33</b> |
| 4.1 Fungsi Sistem Pelumasan                         | 33        |
| 4.2 Komponen Sistem Pelumasan                       | 35        |
| 4.3 Jenis dan Klasifikasi Minyak Lumas              | 38        |
| 4.4 Pemeliharaan Sistem Pelumasan                   | 40        |
| 4.5 Rangkuman & Latihan Bab IV                      | 42        |
| <b>BAB V — SISTEM BAHAN BAKAR DAN PESAWAT BANTU</b> | <b>45</b> |
| 5.1 Sistem Bahan Bakar Motor Diesel                 | 45        |
| 5.2 Pesawat Bantu Pendukung Mesin Utama             | 48        |
| 5.3 Sistem Udara Start dan Kompresor                | 51        |
| 5.4 Rangkuman & Latihan Bab V                       | 54        |
| <b>BAB VI — PERHITUNGAN DASAR MOTOR DIESEL</b>      | <b>57</b> |
| 6.1 Siklus Termodinamika dan Diagram Indikator      | 57        |
| 6.2 Perhitungan Daya Motor Diesel                   | 60        |
| 6.3 Efisiensi dan Konsumsi Bahan Bakar              | 63        |
| 6.4 Rangkuman & Latihan Bab VI                      | 66        |
| <b>BAB VII — TURBIN UAP DAN SEGITIGA KECEPATAN</b>  | <b>69</b> |
| 7.1 Prinsip Dasar Turbin Uap                        | 69        |

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| 7.2 Jenis-Jenis Turbin Uap                              | 72        |
| 7.3 Proses Konversi Energi Uap Menjadi Energi Kecepatan | 75        |
| 7.4 Segitiga Kecepatan (Velocity Triangle)              | 78        |
| 7.5 Rangkuman & Latihan Bab VII                         | 81        |
| <b>BAB VIII — PERHITUNGAN DAYA GUNA TURBIN UAP</b>      | <b>84</b> |
| 8.1 Siklus Rankine                                      | 84        |
| 8.2 Efisiensi Turbin Uap                                | 87        |
| 8.3 Perhitungan Daya dan Kerja Turbin                   | 90        |
| 8.4 Rangkuman & Latihan Bab VIII                        | 93        |
| Daftar Pustaka                                          | 96        |
| Glosarium                                               | 98        |

## BAB I — PENGANTAR MESIN PENGGERAK KAPAL

### 1.1 Latar Belakang dan Peran Mesin Penggerak Utama

---

Mesin penggerak utama (main propulsion engine) adalah mesin yang berfungsi menghasilkan tenaga mekanik untuk memutar propeller (baling-baling) sehingga kapal dapat bergerak melalui air. Mesin penggerak utama merupakan komponen terpenting dalam sistem permesinan kapal karena menentukan kecepatan, efisiensi bahan bakar, dan kemampuan operasional kapal secara keseluruhan.

Sepanjang sejarah pelayaran, jenis mesin penggerak kapal telah berkembang dari tenaga angin (layar), mesin uap dengan boiler dan piston (steam reciprocating engine), turbin uap, hingga mesin diesel yang dominan digunakan pada kapal modern saat ini. Setiap jenis mesin memiliki karakteristik, keunggulan, dan kelemahan masing-masing yang menentukan pemilihannya untuk jenis dan ukuran kapal tertentu.

#### Mengapa Mesin Diesel Mendominasi Kapal Modern?

- Efisiensi termal tinggi (40-50%), jauh lebih baik dari turbin uap konvensional
- Dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar (HFO, MDO, MGO, LNG)
- Perawatan relatif lebih sederhana dibanding sistem boiler-turbin
- Waktu start-up cepat dibanding sistem turbin uap
- Ukuran lebih compact untuk daya yang sama

### 1.2 Kompetensi yang Akan Dicapai

---

Setelah mempelajari buku ini secara tuntas, peserta didik diharapkan mampu:

1. Menjelaskan prinsip kerja dan konstruksi mesin diesel 2 tak dan 4 tak sebagai mesin penggerak utama kapal.
2. Menjelaskan fungsi dan cara kerja sistem pendingin, sistem pelumasan, dan sistem bahan bakar pada mesin diesel.
3. Menjelaskan keterkaitan mesin diesel dengan pesawat bantu pendukung operasionalnya.
4. Melakukan perhitungan dasar daya, efisiensi, dan konsumsi bahan bakar motor diesel.
5. Menjelaskan prinsip kerja dan jenis-jenis turbin uap sebagai mesin penggerak kapal.
6. Menjelaskan proses konversi energi uap menjadi energi kecepatan dan menggambarkan segitiga kecepatan.
7. Melakukan perhitungan dasar efisiensi dan daya guna turbin uap.

### 1.3 Klasifikasi Mesin Penggerak Kapal

Mesin penggerak kapal dapat diklasifikasikan berdasarkan prinsip kerja dan sumber tenaganya:

| Jenis Mesin        | Prinsip Kerja                                                     | Aplikasi Umum                                                      |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Motor Diesel 2 Tak | Pembakaran dalam, langsung kopel dengan propeller (low speed)     | Kapal kargo besar, tanker, kontainer                               |
| Motor Diesel 4 Tak | Pembakaran dalam, melalui reduction gear (medium/high speed)      | Kapal ukuran kecil-menengah, ferry, tug boat                       |
| Turbin Uap         | Energi uap dari boiler dikonversi menjadi energi kinetik          | Kapal LNG (sebagian), kapal militer, kapal pesiar besar (historis) |
| Turbin Gas         | Pembakaran bahan bakar menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi | Kapal cepat militer, sebagian kapal pesiar modern                  |
| Diesel-Electric    | Diesel generator menyuplai motor listrik penggerak propeller      | Kapal pesiar, ice breaker, kapal khusus (DP vessel)                |

#### Fokus Pembahasan Buku Ini

Buku ini berfokus pada dua jenis mesin penggerak yang paling relevan untuk kompetensi Teknik Kapal Niaga: Motor Diesel (Bab II-VI) sebagai mesin penggerak dominan pada kapal niaga modern, dan Turbin Uap (Bab VII-VIII) yang masih digunakan pada kapal-kapal tertentu (terutama kapal LNG carrier dan beberapa kapal khusus) serta penting dipahami sebagai dasar termodinamika permesinan kapal.

Perbandingan karakteristik utama Motor Diesel dan Turbin Uap sebagai mesin penggerak:

| Karakteristik             | Motor Diesel                              | Turbin Uap                              |
|---------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Efisiensi Termal          | 40–50%                                    | 30–40% (siklus sederhana)               |
| Waktu Start-up            | Cepat (menit)                             | Lambat (jam, perlu pemanasan boiler)    |
| Getaran                   | Relatif tinggi (gerak bolak-balik piston) | Rendah (gerak rotasi murni)             |
| Perawatan                 | Kompleks pada komponen gerak bolak-balik  | Kompleks pada sistem boiler & kondensor |
| Fleksibilitas Bahan Bakar | Tinggi (HFO, MDO, LNG)                    | Terbatas (perlu boiler khusus)          |
| Ukuran untuk Daya Sama    | Lebih compact                             | Lebih besar (perlu boiler & kondensor)  |

## BAB II — PRINSIP KERJA MESIN DIESEL

Motor diesel adalah motor bakar dalam (internal combustion engine) yang menggunakan kompresi udara tinggi untuk membakar bahan bakar tanpa memerlukan percikan api (busi). Bab ini membahas siklus kerja, jenis, konstruksi, dan proses pembakaran motor diesel.

### 2.1 Siklus Kerja Motor Diesel

Motor diesel bekerja berdasarkan siklus diesel (Diesel Cycle), yang secara teoritis terdiri dari empat proses termodinamika:

| Proses | Nama                              | Deskripsi                                                                 |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1-2    | Kompresi Adiabatik                | Udara dikompresi tanpa pertukaran kalor, suhu dan tekanan naik signifikan |
| 2-3    | Pemasukan Kalor (Tekanan Konstan) | Bahan bakar diinjeksikan dan terbakar pada tekanan konstan                |
| 3-4    | Ekspansi Adiabatik                | Gas hasil pembakaran berekspansi mendorong piston, menghasilkan kerja     |
| 4-1    | Pembuangan Kalor (Volume Konstan) | Gas buang dikeluarkan, siklus kembali ke kondisi awal                     |

#### Perbedaan Diesel Cycle dan Otto Cycle

Pada Otto Cycle (motor bensin), pembakaran terjadi pada volume konstan dan dipicu oleh percikan busi. Pada Diesel Cycle, pembakaran terjadi pada tekanan konstan dan dipicu oleh suhu tinggi akibat kompresi udara (self-ignition/auto-ignition). Rasio kompresi motor diesel jauh lebih tinggi (14:1 hingga 22:1) dibanding motor bensin (8:1 hingga 12:1), sehingga efisiensi termalnya lebih tinggi.

### 2.2 Motor Diesel 2 Tak dan 4 Tak

#### A. Motor Diesel 4 Tak (Four-Stroke)

Motor 4 tak menyelesaikan satu siklus kerja dalam 4 langkah piston (2 putaran crankshaft):

8. LANGKAH HISAP (Intake): Piston bergerak dari TMA (Titik Mati Atas) ke TMB (Titik Mati Bawah). Valve isap terbuka, udara murni masuk ke silinder.

9. **LANGKAH KOMPRESI (Compression):** Piston bergerak dari TMB ke TMA. Kedua valve tertutup, udara dikompresi hingga suhu mencapai 500-700°C dan tekanan 35-55 bar.
10. **LANGKAH USAHA/EKSPANSI (Power/Combustion):** Mendekati TMA, bahan bakar diinjeksikan dan terbakar spontan akibat suhu tinggi. Gas hasil pembakaran berekspansi dan mendorong piston ke TMB, menghasilkan tenaga.
11. **LANGKAH BUANG (Exhaust):** Piston bergerak dari TMB ke TMA. Valve buang terbuka, gas hasil pembakaran dikeluarkan dari silinder.

## B. Motor Diesel 2 Tak (Two-Stroke)

Motor 2 tak menyelesaikan satu siklus kerja dalam 2 langkah piston (1 putaran crankshaft), dengan proses hisap dan buang terjadi hampir bersamaan melalui sistem scavenging (pembilasan):

12. **LANGKAH KOMPRESI & PEMBILASAN AWAL:** Piston bergerak dari TMB ke TMA. Saat piston naik, port pembilasan tertutup, udara dikompresi. Mendekati akhir langkah, bahan bakar diinjeksikan dan terbakar.
13. **LANGKAH USAHA & PEMBUANGAN/PEMBILASAN:** Gas hasil pembakaran mendorong piston ke TMB (langkah usaha). Saat piston mendekati TMB, exhaust valve/port terbuka untuk membuang gas buang, kemudian scavenging port terbuka dan udara bertekanan (dari blower/turbocharger) masuk membilas sisa gas buang sekaligus mengisi silinder dengan udara segar untuk siklus berikutnya.

| Aspek                         | Motor 2 Tak                                        | Motor 4 Tak                                          |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Siklus per putaran crankshaft | 1 siklus kerja per 1 putaran                       | 1 siklus kerja per 2 putaran                         |
| Sistem Valve                  | Umumnya hanya exhaust valve (atau port system)     | Intake dan exhaust valve lengkap                     |
| Kebutuhan Udara Bilas         | Wajib (blower/turbocharger)                        | Tidak wajib (proses hisap alami)                     |
| Putaran Mesin (RPM)           | Rendah (60-250 rpm) — direct drive propeller       | Sedang-tinggi (400-1800 rpm) — perlu reduction gear  |
| Efisiensi Termal              | Lebih tinggi (45-50%)                              | Sedikit lebih rendah (40-45%)                        |
| Aplikasi Umum                 | Kapal kargo besar, tanker, kontainer (main engine) | Generator, kapal kecil-menengah, auxiliary engine    |
| Contoh Merek                  | MAN B&W, Wärtsilä RT-flex/X-series                 | Caterpillar, MAN 4-stroke, Yanmar, Wärtsilä 4-stroke |

## 2.3 Konstruksi Utama Motor Diesel

Motor diesel kapal terdiri dari ratusan komponen, namun dapat dikelompokkan menjadi komponen utama berikut:

| Komponen                | Fungsi                                                                                           |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cylinder Liner          | Tempat piston bergerak naik-turun, ruang pembakaran terjadi                                      |
| Piston & Piston Ring    | Menerima tekanan pembakaran, meneruskan gerak ke connecting rod; ring mencegah kebocoran gas/oli |
| Connecting Rod          | Meneruskan gerak bolak-balik piston ke gerak rotasi crankshaft                                   |
| Crankshaft              | Mengubah gerak bolak-balik (reciprocating) menjadi gerak rotasi (rotary) untuk memutar propeller |
| Cylinder Head           | Penutup atas silinder, tempat valve, fuel injector, dan saluran udara/gas buang                  |
| Camshaft                | Mengatur waktu pembukaan/penutupan valve dan timing injeksi bahan bakar                          |
| Fuel Injector           | Menyemprotkan bahan bakar bertekanan tinggi ke ruang bakar dalam bentuk kabut (atomisasi)        |
| Turbocharger            | Memanfaatkan energi gas buang untuk mengompresi udara masuk, meningkatkan tenaga mesin           |
| Crankcase               | Rumah crankshaft dan tempat penampungan minyak pelumas (pada sebagian desain)                    |
| Scavenging Air Receiver | Penampung udara bilas bertekanan sebelum masuk ke silinder (motor 2 tak)                         |

## 2.4 Proses Pembakaran dan Sistem Injeksi

### A. Tahapan Proses Pembakaran

Pembakaran dalam motor diesel terjadi melalui empat tahapan:

- Ignition Delay (Tunda Penyalaan): Periode antara mulai injeksi bahan bakar dan mulai terjadinya pembakaran. Selama periode ini, bahan bakar bercampur dengan udara panas dan menguap.
- Rapid Combustion (Pembakaran Cepat): Bahan bakar yang telah tercampur terbakar secara cepat dan serentak, menyebabkan kenaikan tekanan dan suhu yang tajam.
- Controlled Combustion (Pembakaran Terkendali): Pembakaran berlanjut sesuai laju injeksi bahan bakar, tekanan relatif konstan/terkendali.
- After Burning (Pembakaran Lanjutan): Sisa bahan bakar yang belum terbakar sempurna terus terbakar selama langkah ekspansi.

### B. Sistem Injeksi Bahan Bakar

Sistem injeksi bertugas mengantarkan bahan bakar ke ruang bakar pada waktu, jumlah, dan bentuk semprotan (atomisasi) yang tepat. Jenis sistem injeksi umum pada motor diesel kapal:

| Sistem Injeksi         | Karakteristik                                                | Aplikasi                  |
|------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Jerk Pump (Mechanical) | Pompa injeksi per silinder, cam-driven, tekanan 300-1000 bar | Motor diesel konvensional |

| Sistem Injeksi | Karakteristik                                                              | Aplikasi                                       |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Common Rail    | Tekanan bahan bakar konstan di rail (1000-2000+ bar), dikontrol elektronik | Motor diesel modern (MAN ME, Wärtsilä RT-flex) |
| Unit Injector  | Pompa dan nozzle menjadi satu unit per silinder                            | Beberapa motor diesel berkecepatan tinggi      |

### Keunggulan Sistem Common Rail

Sistem common rail memungkinkan kontrol elektronik penuh terhadap timing, durasi, dan tekanan injeksi secara independen untuk setiap silinder dan setiap siklus. Hasilnya: pembakaran lebih sempurna, emisi gas buang lebih rendah (memenuhi standar IMO Tier III), konsumsi bahan bakar lebih efisien, serta kemampuan operasi pada RPM sangat rendah (slow steaming) tanpa masalah pembakaran.

## RANGKUMAN BAB II

| Topik          | Poin Kunci                                                             |
|----------------|------------------------------------------------------------------------|
| Siklus Diesel  | Kompresi adiabatik → pembakaran tekanan konstan → ekspansi → buang     |
| Motor 2 Tak    | 1 siklus/1 putaran, butuh scavenging, RPM rendah, direct drive         |
| Motor 4 Tak    | 1 siklus/2 putaran, valve lengkap, RPM tinggi, butuh reduction gear    |
| Komponen Utama | Liner, piston, connecting rod, crankshaft, cylinder head, turbocharger |
| Sistem Injeksi | Jerk pump (mekanis) vs common rail (elektronik, lebih presisi)         |

## SOAL LATIHAN BAB II

### A. Pilihan Ganda

14. Pada motor diesel, pembakaran terjadi karena... a. Percikan busi b. Suhu tinggi akibat kompresi (auto-ignition) c. Pemanasan eksternal d. Reaksi kimia katalis
15. Motor diesel 2 tak menyelesaikan satu siklus kerja dalam... a. 1 putaran crankshaft b. 2 putaran crankshaft c. 4 langkah piston dan 2 putaran d. 4 putaran crankshaft
16. Komponen yang berfungsi mengubah gerak bolak-balik piston menjadi gerak rotasi adalah... a. Cylinder liner b. Camshaft c. Crankshaft d. Turbocharger

### B. Soal Uraian

17. Jelaskan secara lengkap 4 langkah kerja motor diesel 4 tak beserta kondisi valve pada setiap langkah!
18. Jelaskan proses scavenging (pembilasan) pada motor diesel 2 tak dan mengapa proses ini sangat penting!
19. Sebutkan dan jelaskan fungsi minimal 6 komponen utama motor diesel!
20. Jelaskan keunggulan sistem injeksi common rail dibandingkan sistem jerk pump konvensional!

## BAB III — SISTEM PENDINGIN MESIN DIESEL

Proses pembakaran dalam motor diesel menghasilkan suhu yang sangat tinggi (1500-2000°C pada ruang bakar). Sistem pendingin berfungsi membuang panas berlebih dari komponen mesin agar suhu kerja tetap dalam batas aman, mencegah kerusakan material dan menjaga performa mesin.

### 3.1 Fungsi dan Jenis Sistem Pendingin

#### Fungsi Sistem Pendingin

- Membuang panas dari cylinder liner, cylinder head, piston, dan komponen lain yang bersentuhan dengan gas pembakaran.
- Menjaga suhu kerja optimal mesin agar material tidak mengalami thermal stress berlebih atau deformasi.
- Mendinginkan minyak pelumas, udara bilas (charge air cooler), dan komponen pendukung lainnya.
- Mencegah kondisi overheating yang dapat menyebabkan kerusakan serius (piston seizure, cylinder liner crack).

Sistem pendingin motor diesel kapal umumnya menggunakan konfigurasi dua sirkuit (two-circuit cooling system):

| Sirkuit                                   | Media Pendingin         | Yang Didinginkan                                                                         |
|-------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sirkuit Tertutup (Primary/Jacket Cooling) | Air tawar (fresh water) | Cylinder liner, cylinder head, piston (pada beberapa desain), turbocharger               |
| Sirkuit Terbuka (Secondary/Sea Water)     | Air laut (sea water)    | Mendinginkan air tawar melalui heat exchanger/cooler; juga mendinginkan oli, udara bilas |

#### Mengapa Menggunakan Sistem Dua Sirkuit?

Air laut bersifat korosif dan mengandung mineral/biofouling yang dapat menyebabkan kerak (scaling) dan korosi pada komponen mesin. Dengan sistem dua sirkuit, air laut hanya bersentuhan dengan heat exchanger (cooler), sedangkan komponen mesin yang sensitif (cylinder liner, cylinder head) didinginkan oleh air tawar yang kualitasnya dapat dikontrol (ditambah corrosion inhibitor, anti-scaling treatment).

### 3.2 Sistem Pendingin Air Tawar (Jacket Cooling)

Sistem jacket cooling water (JCW) mendinginkan komponen-komponen mesin yang langsung bersentuhan dengan panas pembakaran. Komponen-komponen utama sistem ini:

| Komponen                            | Fungsi                                                                                           |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jacket Water Pump                   | Memompa air tawar bersirkulasi melalui jacket cylinder dan cylinder head                         |
| Cylinder Jacket                     | Ruang berisi air tawar yang mengelilingi cylinder liner untuk menyerap panas                     |
| Fresh Water Cooler (Heat Exchanger) | Memindahkan panas dari air tawar ke air laut                                                     |
| Expansion Tank                      | Menampung kelebihan volume air akibat ekspansi termal, juga sebagai titik pengisian dan deaerasi |
| Thermostatic Valve                  | Mengatur suhu air tawar dengan membagi aliran antara melalui cooler atau bypass                  |
| Pre-heater                          | Memanaskan air jacket sebelum start untuk mengurangi thermal shock dan cold corrosion            |

Suhu operasi normal sistem jacket cooling water:

| Parameter                   | Nilai Normal | Keterangan                                                          |
|-----------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------|
| Suhu masuk jacket (inlet)   | 65-75°C      | Tergantung spesifikasi mesin                                        |
| Suhu keluar jacket (outlet) | 80-90°C      | Perbedaan inlet-outlet ( $\Delta T$ ) sekitar 8-12°C                |
| Tekanan sistem              | 2-4 bar      | Untuk mencegah kavitasi dan mempertahankan titik didih lebih tinggi |

### 3.3 Sistem Pendingin Air Laut

Sistem air laut (sea water cooling system) berfungsi sebagai media pembuangan panas akhir (ultimate heat sink) ke laut. Komponen-komponen utama:

- Sea Water Pump: Memompa air laut dari sea chest melalui sistem cooler kemudian dibuang kembali ke laut (overboard).
- Sea Chest: Lubang penghisapan air laut pada lambung kapal, dilengkapi strainer/filter untuk mencegah benda asing masuk.
- Strainer/Filter: Menyaring kotoran, biofouling, dan benda asing dari air laut sebelum masuk pompa.
- Coolers (Heat Exchanger): Fresh water cooler, lube oil cooler, charge air cooler — seluruhnya didinginkan oleh air laut.

**⚠ Masalah Umum Sistem Air Laut**

Biofouling (pertumbuhan organisme laut) pada sea chest dan pipa dapat menyumbat aliran dan mengurangi efisiensi pendinginan secara drastis. Korosi galvanik dapat terjadi pada komponen logam yang berbeda jenis. Perawatan rutin mencakup pembersihan strainer, treatment anti-fouling, dan pemeriksaan anoda korban (sacrificial anode) secara berkala.

**3.4 Perawatan Sistem Pendingin**

Perawatan sistem pendingin yang baik sangat penting untuk mencegah overheating dan kerusakan mesin yang serius.

21. Pemeriksaan Harian: Cek level air pada expansion tank, suhu inlet/outlet jacket water, tekanan sistem, dan kebocoran visual.
22. Treatment Air Tawar: Tambahkan corrosion inhibitor secara berkala sesuai rekomendasi pabrikan untuk mencegah korosi dan scaling pada jacket.
23. Pembersihan Cooler: Bersihkan tube heat exchanger dari kerak dan biofouling secara periodik (cleaning chemical atau mechanical brushing).
24. Pemeriksaan Sea Chest dan Strainer: Bersihkan strainer secara rutin, terutama setelah berlayar di perairan dengan tingkat biofouling tinggi.
25. Uji Kualitas Air: Periksa pH, kandungan klorida, dan konsentrasi inhibitor air jacket secara berkala dengan test kit.

**SOAL LATIHAN BAB III****A. Pilihan Ganda**

26. Sistem pendingin motor diesel kapal umumnya menggunakan... a. Satu sirkuit air laut langsung b. Dua sirkuit (air tawar dan air laut) c. Pendingin udara saja d. Sistem tanpa pendingin
27. Suhu keluar (outlet) jacket cooling water yang normal berkisar... a. 30-40°C b. 50-60°C c. 80-90°C d. 100-110°C

**B. Soal Uraian**

28. Jelaskan mengapa sistem pendingin motor diesel kapal menggunakan dua sirkuit (air tawar dan air laut), bukan air laut langsung ke mesin!
29. Sebutkan dan jelaskan fungsi minimal 5 komponen sistem jacket cooling water!
30. Jelaskan dampak yang dapat terjadi jika sistem pendingin mengalami overheating yang tidak segera ditangani!
31. Buatlah checklist perawatan harian dan periodik sistem pendingin motor diesel!



## BAB IV — SISTEM PELUMASAN MESIN DIESEL

Sistem pelumasan berperan vital dalam mengurangi gesekan antar komponen yang bergerak, membuang panas, membersihkan kontaminan, dan melindungi komponen dari korosi. Kegagalan sistem pelumasan dapat menyebabkan kerusakan mesin yang sangat serius dalam waktu singkat.

### 4.1 Fungsi Sistem Pelumasan

| Fungsi                             | Penjelasan                                                                              |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Mengurangi Gesekan (Lubrication)   | Membentuk lapisan film oli antara permukaan yang bergerak (bearing, piston-liner)       |
| Pendinginan (Cooling)              | Membuang panas dari bearing, piston, dan komponen bergerak lainnya                      |
| Pembersihan (Cleaning)             | Membawa partikel kontaminan/karbon dari ruang bakar dan komponen ke filter              |
| Penyekat (Sealing)                 | Membantu menyekat ruang antara piston ring dan cylinder liner dari kebocoran gas        |
| Anti-Korosi (Corrosion Protection) | Melapisi permukaan logam, mencegah kontak langsung dengan udara dan air                 |
| Netralisasi Asam (Neutralization)  | Additive alkaline dalam oli menetralkan asam hasil pembakaran bahan bakar sulfur tinggi |

### 4.2 Komponen Sistem Pelumasan

Sistem pelumasan motor diesel kapal terdiri dari komponen-komponen berikut:

| Komponen                             | Fungsi                                                                               |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Lube Oil Sump/Crankcase              | Tempat penampungan minyak lumas (oil sump)                                           |
| Lube Oil Pump                        | Memompa minyak lumas bersirkulasi ke seluruh bagian yang membutuhkan                 |
| Lube Oil Cooler                      | Mendinginkan minyak lumas menggunakan air tawar/air laut sebagai media pendingin     |
| Lube Oil Filter (Full Flow & Bypass) | Menyaring kontaminan dari minyak lumas sebelum disirkulasikan kembali                |
| Centrifugal Purifier/Separator       | Memisahkan air, lumpur (sludge), dan partikel halus dari minyak lumas secara kontinu |
| Pressure Relief Valve                | Mengatur tekanan sistem pelumasan agar tidak melebihi batas yang ditetapkan          |

| Komponen                    | Fungsi                                                                                                                  |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cylinder Lubrication System | Sistem pelumasan khusus untuk dinding cylinder liner pada motor 2 tak (cylinder oil terpisah dari sistem oli sirkulasi) |

#### Sistem Pelumasan Crosshead (Motor 2 Tak Besar)

Pada motor diesel 2 tak besar (low speed), terdapat dua sistem oli yang TERPISAH: (1) System Oil — melumasi crankshaft, crosshead bearing, dan mekanisme bagian bawah; (2) Cylinder Oil — diinjeksikan langsung ke dinding cylinder liner untuk melumasi piston ring dan menetralkan asam hasil pembakaran bahan bakar sulfur tinggi. Pemisahan ini diperlukan karena cylinder oil terkontaminasi produk pembakaran dan tidak dapat digunakan ulang seperti system oil.

### 4.3 Jenis dan Klasifikasi Minyak Lumas

Pemilihan minyak lumas yang tepat sangat penting dan harus sesuai rekomendasi pabrikan mesin. Klasifikasi minyak lumas didasarkan pada viskositas dan kadar alkalinitas (Total Base Number/TBN).

#### Total Base Number (TBN)

TBN menunjukkan kemampuan oli untuk menetralkan asam yang terbentuk dari pembakaran bahan bakar bersulfur. Semakin tinggi kadar sulfur bahan bakar, semakin tinggi TBN oli yang diperlukan.

| Jenis Bahan Bakar  | Kadar Sulfur            | TBN Cylinder Oil yang Direkomendasikan |
|--------------------|-------------------------|----------------------------------------|
| HFO (High Sulphur) | >1,5%                   | TBN 70-100                             |
| HFO (Low Sulphur)  | ≤0,5% (ECA compliant)   | TBN 40                                 |
| MDO/MGO            | <0,1-0,5%               | TBN 15-40                              |
| LNG (Dual Fuel)    | Sangat rendah/tidak ada | TBN 5-15 (oli khusus gas engine)       |

### 4.4 Pemeliharaan Sistem Pelumasan

32. Pemeriksaan Level dan Tekanan: Pantau level oli sump dan tekanan pelumasan secara berkelanjutan; tekanan rendah dapat memicu alarm dan trip mesin.
33. Pengoperasian Purifier: Jalankan centrifugal purifier secara kontinu/berkala untuk membersihkan oli dari air dan sludge.

34. Penggantian Filter: Ganti elemen filter sesuai jadwal atau saat differential pressure melebihi batas yang ditetapkan.
35. Analisis Oli Berkala: Kirim sampel oli untuk uji laboratorium (oil analysis) — memeriksa viskositas, TBN, kandungan air, kandungan logam (indikasi keausan komponen).
36. Penggantian Oli Berkala: Ganti oli sesuai running hours atau hasil analisis oli yang menunjukkan degradasi.

#### **Manfaat Analisis Oli (Oil Analysis) sebagai Predictive Maintenance**

Kandungan logam tertentu dalam oli dapat mengindikasikan komponen yang mengalami keausan dini: kandungan besi (Fe) tinggi → keausan cylinder liner/piston ring; kandungan tembaga (Cu) tinggi → keausan bearing; kandungan silikon (Si) tinggi → kontaminasi debu/pasir. Dengan analisis oli rutin, kerusakan besar dapat dideteksi dan dicegah sebelum terjadi breakdown.

### **SOAL LATIHAN BAB IV**

#### **A. Pilihan Ganda**

37. TBN pada minyak lumas menunjukkan kemampuan oli untuk...  
a. Mendinginkan mesin  
b. Menetralkan asam hasil pembakaran  
c. Meningkatkan tekanan kompresi  
d. Mengencerkan bahan bakar
38. Pada motor diesel 2 tak besar, oli yang diinjeksikan langsung ke dinding cylinder liner disebut...  
a. System oil  
b. Hydraulic oil  
c. Cylinder oil  
d. Gear oil

#### **B. Soal Uraian**

39. Jelaskan minimal 5 fungsi sistem pelumasan pada motor diesel!
40. Jelaskan perbedaan system oil dan cylinder oil pada motor diesel 2 tak besar, termasuk alasan pemisahannya!
41. Mengapa bahan bakar dengan kadar sulfur tinggi memerlukan minyak lumas dengan TBN yang tinggi pula? Jelaskan!
42. Jelaskan bagaimana analisis oli (oil analysis) dapat digunakan sebagai metode predictive maintenance pada motor diesel!

## BAB V — SISTEM BAHAN BAKAR DAN PESAWAT BANTU

### 5.1 Sistem Bahan Bakar Motor Diesel

Sistem bahan bakar bertugas menyediakan, mengkondisikan, dan menyalurkan bahan bakar ke ruang bakar mesin dengan kualitas, tekanan, dan suhu yang sesuai untuk pembakaran optimal.

#### Jenis Bahan Bakar Kapal

| Jenis Bahan Bakar         | Singkatan | Karakteristik                                                          |
|---------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------|
| Heavy Fuel Oil            | HFO       | Viskositas tinggi, perlu pemanasan untuk dipompa & disemprotkan, murah |
| Marine Diesel Oil         | MDO       | Campuran distilat dan residu, viskositas sedang                        |
| Marine Gas Oil            | MGO       | Distilat murni, viskositas rendah, untuk ECA (Emission Control Area)   |
| Liquefied Natural Gas     | LNG       | Bahan bakar gas cair, untuk dual-fuel engine, emisi sangat rendah      |
| Very Low Sulphur Fuel Oil | VLSFO     | HFO dengan kadar sulfur $\leq 0,5\%$ sesuai regulasi IMO 2020          |

#### Komponen Sistem Bahan Bakar

| Komponen                 | Fungsi                                                                              |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Bunker Tank/Storage Tank | Menampung bahan bakar dalam jumlah besar (penyimpanan utama)                        |
| Settling Tank            | Memisahkan air dan sedimen dari bahan bakar secara gravitasi                        |
| Fuel Oil Purifier        | Memisahkan air, sedimen, dan partikel dari bahan bakar secara sentrifugal           |
| Service/Day Tank         | Tangki harian, menampung bahan bakar bersih siap digunakan                          |
| Fuel Oil Heater          | Memanaskan bahan bakar (terutama HFO) untuk mencapai viskositas injeksi yang tepat  |
| Booster Pump             | Memompa bahan bakar dari service tank ke sistem injeksi dengan tekanan yang sesuai  |
| Viscosity Control System | Mengontrol viskositas bahan bakar agar konsisten meskipun jenis bahan bakar berubah |
| Fuel Oil Filter          | Menyaring partikel halus sebelum bahan bakar masuk ke injection pump                |

### Pentingnya Kontrol Viskositas Bahan Bakar

Viskositas bahan bakar HFO sangat dipengaruhi suhu. Pada suhu rendah, HFO menjadi sangat kental dan tidak dapat dipompa atau diatomisasi dengan baik oleh injector, menyebabkan pembakaran tidak sempurna (smoke, deposit). Sistem fuel oil heater dengan viscosity control mengatur suhu pemanasan secara otomatis agar viskositas bahan bakar tetap pada rentang optimal (umumnya 10-15 cSt) saat masuk ke injection pump, terlepas dari jenis bahan bakar yang digunakan.

## 5.2 Pesawat Bantu Pendukung Mesin Utama

Pesawat bantu (auxiliary machinery) adalah peralatan yang mendukung operasional mesin penggerak utama agar dapat berfungsi dengan baik. Tanpa pesawat bantu yang berfungsi normal, mesin utama tidak dapat dioperasikan.

| Pesawat Bantu                   | Fungsi Terkait Mesin Utama                                                      |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Jacket Water Pump               | Mensirkulasikan air pendingin jacket cooling — wajib aktif sebelum start ME     |
| Lube Oil Pump (Pre-lubrication) | Mensirkulasikan oli sebelum start untuk melumasi bearing sebelum mesin berputar |
| Sea Water Cooling Pump          | Mensirkulasikan air laut untuk pendinginan akhir (heat exchanger)               |
| Air Compressor                  | Menyediakan udara bertekanan untuk start mesin dan kontrol pneumatik            |
| Fuel Oil Booster Pump & Heater  | Menyediakan bahan bakar dengan viskositas dan tekanan sesuai untuk injeksi      |
| Turbocharger                    | Meningkatkan tekanan udara masuk (boost) untuk pembakaran lebih efisien         |
| Exhaust Gas Boiler              | Memanfaatkan panas gas buang ME untuk menghasilkan uap (waste heat recovery)    |
| Generator Diesel Engine         | Menyediakan daya listrik untuk seluruh sistem pendukung mesin utama             |

### Konsep "Engine Cannot Run Without Auxiliaries"

Mesin penggerak utama TIDAK DAPAT dioperasikan tanpa dukungan pesawat bantu. Sebelum start mesin utama, urutan pesawat bantu yang harus dijalankan terlebih dahulu: (1) Jacket cooling water pump, (2) Sea water cooling pump, (3) Lube oil pre-lubrication pump, (4) Fuel oil supply system dengan suhu/viskositas sesuai, (5) Air compressor untuk

udara start. Kegagalan salah satu pesawat bantu dapat menyebabkan interlock mencegah mesin start, atau alarm/trip jika gagal saat mesin berjalan.

### 5.3 Sistem Udara Start dan Kompresor

Motor diesel kapal berukuran besar (terutama 2 tak) tidak menggunakan motor starter listrik seperti mobil, melainkan menggunakan udara bertekanan tinggi untuk memutar crankshaft pada awal start.

#### Komponen Sistem Udara Start

- Air Compressor: Mengompresi udara atmosfer menjadi udara bertekanan tinggi (umumnya 25-30 bar).
- Air Receiver/Bottle: Menyimpan udara bertekanan untuk digunakan saat start. Kapasitas harus cukup untuk beberapa kali start berturut-turut (umumnya minimal 12 kali start sesuai regulasi).
- Starting Air Valve: Valve yang membuka untuk menyalurkan udara bertekanan ke masing-masing silinder pada timing yang tepat sesuai posisi piston.
- Air Distributor: Mengatur urutan dan timing pembukaan starting air valve sesuai firing order mesin.

#### Bahaya Crankcase Explosion Terkait Sistem Udara Start

Kebocoran udara start bertekanan tinggi yang bercampur dengan kabut oli di dalam crankcase dapat memicu crankcase explosion jika ada sumber panas (hot spot dari bearing yang overheat). Oleh karena itu, sistem starting air valve dilengkapi non-return valve dan flame trap untuk mencegah perambatan api balik ke air receiver.

### SOAL LATIHAN BAB V

#### A. Pilihan Ganda

43. Tangki yang berfungsi memisahkan air dan sedimen dari bahan bakar secara gravitasi adalah... a. Bunker tank b. Settling tank c. Service tank d. Day tank
44. Motor diesel kapal besar umumnya di-start menggunakan... a. Motor starter listrik b. Udara bertekanan tinggi c. Tenaga manual d. Hydraulic motor

#### B. Soal Uraian

45. Jelaskan fungsi fuel oil heater dan viscosity control system dalam sistem bahan bakar motor diesel!
46. Sebutkan minimal 5 pesawat bantu yang harus beroperasi sebelum mesin utama dapat di-start, dan jelaskan fungsinya masing-masing!
47. Jelaskan komponen sistem udara start dan bagaimana sistem ini bekerja untuk memulai putaran mesin!
48. Jelaskan risiko crankcase explosion dan bagaimana sistem starting air dirancang untuk mencegah hal tersebut!

## BAB VI — PERHITUNGAN DASAR MOTOR DIESEL

Bab ini membahas perhitungan-perhitungan dasar yang umum digunakan dalam menganalisis performa motor diesel, termasuk daya, efisiensi, dan konsumsi bahan bakar.

### 6.1 Siklus Termodinamika dan Diagram Indikator

Diagram indikator (indicator diagram/P-V diagram) menggambarkan hubungan antara tekanan (P) dalam silinder dan volume (V) selama satu siklus kerja. Luas area dalam diagram P-V merepresentasikan kerja yang dihasilkan per siklus.

#### Tekanan Indikator Rata-Rata (Mean Indicated Pressure / MIP)

MIP atau biasa disebut IMEP (Indicated Mean Effective Pressure) adalah tekanan rata-rata teoritis konstan yang, jika bekerja pada piston selama satu langkah, akan menghasilkan kerja yang sama dengan kerja aktual dalam satu siklus. IMEP diperoleh dari luas diagram indikator dibagi panjang langkah piston pada skala diagram, dikalikan dengan skala pegas indikator (spring scale).

### 6.2 Perhitungan Daya Motor Diesel

#### A. Daya Indikator (Indicated Power / IHP atau IP)

Daya indikator adalah daya yang dihasilkan oleh gas pembakaran di dalam silinder, dihitung berdasarkan IMEP:

$$IP = (P_m \times L \times A \times N \times n) / 60$$

$P_m$  = IMEP (kPa atau N/m<sup>2</sup>) |  $L$  = Panjang langkah piston (m)  $A$  = Luas piston (m<sup>2</sup>) |  $N$  = Putaran per menit (rpm)  $n$  = Jumlah silinder | Untuk motor 2 tak: gunakan  $N$ ; untuk 4 tak: gunakan  $N/2$

#### B. Daya Efektif/Daya Rem (Brake Power / BHP atau BP)

Daya efektif adalah daya yang tersedia pada output shaft (poros keluaran) setelah dikurangi rugi-rugi mekanis (gesekan bearing, piston, dll.):

$$BP = IP \times \eta_{\text{mech}}$$

BP = Brake Power (kW) | IP = Indicated Power (kW)  $\eta_{\text{mech}}$  = Efisiensi mekanis (umumnya 0,85-0,92 atau 85-92%)

### C. Daya Poros (Shaft Power / SHP)

Daya poros adalah daya yang diukur pada propeller shaft, setelah dikurangi rugi-rugi pada gearbox/sistem transmisi (jika ada):

$$\text{SHP} = \text{BP} \times \eta_{\text{transmisi}}$$

$\eta_{\text{transmisi}}$  = Efisiensi transmisi/gearbox (umumnya 0,97-0,99 untuk direct drive)

#### Contoh Soal Perhitungan Daya Indikator

Sebuah motor diesel 4 tak, 6 silinder, memiliki: IMEP = 8 bar = 800 kPa, panjang langkah (L) = 0,6 m, diameter piston (D) = 0,5 m, putaran (N) = 500 rpm. Luas piston:  $A = \pi/4 \times D^2 = \pi/4 \times 0,5^2 = 0,196 \text{ m}^2$  Untuk motor 4 tak, gunakan  $N/2 = 250$  (siklus kerja per menit per silinder)  $\text{IP} = (P_m \times L \times A \times N/2 \times n) / 60$   $\text{IP} = (800 \times 0,6 \times 0,196 \times 250 \times 6) / 60$   $\text{IP} = (800 \times 0,6 \times 0,196 \times 250 \times 6) / 60 = 2.352 \text{ kW}$  Jika efisiensi mekanis 88%, maka:  $\text{BP} = 2.352 \times 0,88 = 2.069,76 \text{ kW} \approx 2.070 \text{ kW}$

## 6.3 Efisiensi dan Konsumsi Bahan Bakar

### A. Specific Fuel Oil Consumption (SFOC)

SFOC adalah jumlah bahan bakar yang dikonsumsi per satuan daya per satuan waktu — indikator utama efisiensi bahan bakar mesin:

$$\text{SFOC} = m_f / P$$

SFOC = Specific Fuel Oil Consumption (g/kWh)  $m_f$  = Massa bahan bakar yang dikonsumsi (g/jam)  $P$  = Daya yang dihasilkan (kW)

Nilai SFOC tipikal motor diesel 2 tak modern berkisar 165-175 g/kWh, sedangkan motor 4 tak medium speed berkisar 175-195 g/kWh.

### B. Efisiensi Termal (Thermal Efficiency)

Efisiensi termal menunjukkan seberapa besar energi kimia bahan bakar yang berhasil diubah menjadi kerja mekanik:

$$\eta_{th} = (P \times 3600) / (m_f \times CV) \times 100\%$$

$\eta_{th}$  = Efisiensi termal (%) |  $P$  = Daya (kW)  $m_f$  = Konsumsi bahan bakar (kg/jam) |  $CV$  = Nilai kalor bahan bakar (kJ/kg) Faktor 3600 = konversi kW ke kJ/jam

#### Contoh Soal SFOC dan Efisiensi Termal

Motor diesel menghasilkan daya 2.000 kW dengan konsumsi bahan bakar 340 kg/jam. Nilai kalor bahan bakar ( $CV$ ) = 42.000 kJ/kg.  $SFOC = (340.000 \text{ g/jam}) / 2.000 \text{ kW} = 170 \text{ g/kWh}$   
Efisiensi termal:  $\eta_{th} = (2.000 \times 3600) / (340 \times 42.000) \times 100\%$   $\eta_{th} = 7.200.000 / 14.280.000 \times 100\%$   $\eta_{th} = 50,4\%$  Kesimpulan: Motor ini memiliki efisiensi termal sebesar 50,4%, tergolong tinggi dan khas untuk motor diesel 2 tak modern.

### C. Hubungan Torsi dan Daya

$$P = (2\pi \times N \times T) / 60$$

$P$  = Daya (Watt) |  $N$  = Putaran (rpm) |  $T$  = Torsi (N·m)

#### Contoh Soal Torsi

Motor diesel menghasilkan daya 3.000 kW pada putaran 100 rpm. Hitung torsi yang dihasilkan!  $P = (2\pi \times N \times T) / 60$   $3.000.000 = (2\pi \times 100 \times T) / 60$   $3.000.000 = (628,3 \times T) / 60$   $3.000.000 = 10,47 \times T$   $T = 3.000.000 / 10,47 = 286.500 \text{ N·m} \approx 286,5 \text{ kN·m}$

## RANGKUMAN BAB VI

| Rumus                                                        | Keterangan                                                |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| $IP = (P_m \times L \times A \times N \times n) / 60$        | Daya indikator dari diagram P-V (n disesuaikan 2tak/4tak) |
| $BP = IP \times \eta_{mech}$                                 | Daya efektif/rem setelah rugi mekanis                     |
| $SFOC = m_f / P$                                             | Konsumsi bahan bakar spesifik (g/kWh)                     |
| $\eta_{th} = (P \times 3600) / (m_f \times CV) \times 100\%$ | Efisiensi termal motor                                    |
| $P = (2\pi \times N \times T) / 60$                          | Hubungan daya, putaran, dan torsi                         |

## SOAL LATIHAN BAB VI

### A. Pilihan Ganda

49. SFOC merupakan indikator yang menunjukkan... a. Suhu bahan bakar b. Efisiensi bahan bakar per kW per jam c. Tekanan bahan bakar d. Viskositas bahan bakar
50. Jika daya indikator suatu motor 1000 kW dan efisiensi mekanis 90%, maka daya efektifnya adalah... a. 900 kW b. 1000 kW c. 1100 kW d. 1111 kW

### B. Soal Uraian/Hitungan

51. Sebuah motor diesel 2 tak, 5 silinder memiliki IMEP = 12 bar, diameter piston 0,7 m, panjang langkah 1,5 m, putaran 110 rpm. Hitunglah daya indikator (IP)! (Catatan: untuk motor 2 tak, gunakan N langsung tanpa dibagi 2)
52. Sebuah motor diesel menghasilkan daya efektif 4.500 kW dengan konsumsi bahan bakar 760 kg/jam. Jika nilai kalor bahan bakar 41.500 kJ/kg, hitunglah SFOC dan efisiensi termal motor tersebut!
53. Sebuah motor diesel menghasilkan torsi 250 kN·m pada putaran 95 rpm. Hitunglah daya yang dihasilkan dalam kW!
54. Jelaskan perbedaan antara Indicated Power (IP), Brake Power (BP), dan Shaft Power (SHP) serta faktor-faktor yang menyebabkan perbedaan nilai ketiganya!

## BAB VII — TURBIN UAP DAN SEGITIGA KECEPATAN

Turbin uap adalah mesin penggerak yang mengubah energi panas/tekanan uap menjadi energi kinetik (kecepatan), kemudian energi kinetik tersebut dikonversi menjadi energi mekanik (putaran) melalui sudu-sudu (blades) yang terpasang pada rotor.

### 7.1 Prinsip Dasar Turbin Uap

Uap bertekanan dan bersuhu tinggi dari boiler dialirkan melalui nozzle, di mana energi panas dan tekanan uap dikonversi menjadi energi kinetik (kecepatan tinggi). Uap berkecepatan tinggi tersebut kemudian diarahkan ke sudu-sudu turbin, mendorong sudu dan menghasilkan gaya yang memutar rotor turbin.

#### Hukum Dasar yang Berlaku pada Turbin Uap

- Hukum Kekekalan Energi: Energi total uap (entalpi) sebelum dan sesudah melalui nozzle/sudu adalah konstan, hanya berubah bentuk dari energi panas/tekanan menjadi energi kinetik.
- Hukum Newton II dan III (Momentum): Gaya yang dihasilkan pada sudu turbin sebanding dengan perubahan momentum aliran uap yang membelok arah saat melewati sudu.

### 7.2 Jenis-Jenis Turbin Uap

#### A. Berdasarkan Prinsip Kerja

##### 1. Turbin Impuls (Impulse Turbine)

Pada turbin impuls, seluruh penurunan tekanan (pressure drop) terjadi di nozzle (sudu diam/stator), sedangkan sudu gerak (rotor blade) hanya berfungsi mengubah arah aliran uap tanpa terjadi penurunan tekanan tambahan. Tekanan uap sebelum dan setelah melewati sudu gerak adalah SAMA, hanya kecepatan dan arahnya yang berubah.

- Contoh: Turbin De Laval (single stage), Turbin Curtis (velocity-compounded), Turbin Rateau (pressure-compounded).

##### 2. Turbin Reaksi (Reaction Turbine)

Pada turbin reaksi, penurunan tekanan terjadi baik pada sudu diam (stator/nozzle) MAUPUN pada sudu gerak (rotor). Sudu gerak berfungsi seperti nozzle bergerak — uap berekspansi dan

berakselerasi saat melewati sudu gerak, menghasilkan gaya reaksi (seperti prinsip roket) selain gaya impuls.

- Contoh: Turbin Parsons (turbin reaksi murni).

| Aspek                          | Turbin Impuls                     | Turbin Reaksi                                    |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|
| Penurunan Tekanan              | Hanya di nozzle/stator            | Di stator DAN rotor                              |
| Bentuk Sudu Gerak              | Simetris (mengubah arah saja)     | Asimetris seperti aerofoil (seperti nozzle)      |
| Kecepatan Uap pada Rotor       | Tinggi pada satu tingkat          | Lebih rendah, terdistribusi merata antar tingkat |
| Efisiensi per Tingkat          | Lebih rendah                      | Lebih tinggi                                     |
| Jumlah Tingkat untuk Daya Sama | Lebih sedikit (per tingkat besar) | Lebih banyak (per tingkat kecil)                 |

## B. Berdasarkan Arah Aliran Uap

- Turbin Aksial (Axial Flow): Aliran uap sejajar dengan sumbu rotor — paling umum digunakan.
- Turbin Radial (Radial Flow): Aliran uap tegak lurus terhadap sumbu rotor.

## C. Berdasarkan Jumlah Tingkat (Stage)

- Turbin Tingkat Tunggal (Single Stage): Hanya satu set nozzle dan sudu gerak — untuk daya kecil.
- Turbin Multi-Tingkat (Multi-Stage): Beberapa set nozzle dan sudu gerak tersusun seri — untuk daya besar, memungkinkan ekspansi uap bertahap dengan efisiensi lebih tinggi.

## D. Konfigurasi Turbin Uap Kapal (Marine Steam Turbine)

Turbin uap kapal umumnya terdiri dari beberapa turbin yang disusun seri untuk memaksimalkan ekstraksi energi dari uap pada rentang tekanan yang luas:

| Turbin                             | Tekanan Uap                          | Karakteristik                                  |
|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| High Pressure (HP) Turbine         | Tertinggi (uap dari boiler langsung) | Sudu pendek, jumlah tingkat banyak, RPM tinggi |
| Intermediate Pressure (IP) Turbine | Sedang                               | Sudu lebih panjang dari HP                     |
| Low Pressure (LP) Turbine          | Rendah (mendekati kondensor)         | Sudu paling panjang, volume uap besar          |

## 7.3 Proses Konversi Energi Uap Menjadi Energi Kecepatan

Proses konversi energi terjadi pada NOZZLE, berdasarkan persamaan energi (First Law of Thermodynamics untuk aliran steady, mengabaikan perubahan energi potensial):

$$h_1 + V_1^2/2 = h_2 + V_2^2/2$$

$h_1, h_2$  = Entalpi uap sebelum dan setelah nozzle (J/kg)  $V_1, V_2$  = Kecepatan uap sebelum dan setelah nozzle (m/s)

Jika kecepatan masuk nozzle ( $V_1$ ) diabaikan (sangat kecil dibanding  $V_2$ ), maka kecepatan uap keluar nozzle dapat dihitung:

$$V_2 = \sqrt{(2 \times (h_1 - h_2))} = \sqrt{(2 \times \Delta h)}$$

$V_2$  = Kecepatan uap keluar nozzle (m/s)  $\Delta h = h_1 - h_2$  = Penurunan entalpi (J/kg) ( $\Delta h$  dalam J/kg, hasil  $V_2$  dalam m/s)

#### Contoh Soal Kecepatan Uap di Nozzle

Uap masuk nozzle dengan entalpi  $h_1 = 3000$  kJ/kg dan keluar dengan entalpi  $h_2 = 2800$  kJ/kg. Kecepatan masuk diabaikan. Hitung kecepatan uap keluar nozzle!  $\Delta h = h_1 - h_2 = 3000 - 2800 = 200$  kJ/kg = 200.000 J/kg  $V_2 = \sqrt{(2 \times \Delta h)} = \sqrt{(2 \times 200.000)} = \sqrt{400.000} = 632,5$  m/s Kesimpulan: Uap keluar nozzle dengan kecepatan sekitar 632,5 m/s — kecepatan inilah yang akan mendorong sudu turbin.

## 7.4 Segitiga Kecepatan (Velocity Triangle)

Segitiga kecepatan adalah representasi vektor yang menggambarkan hubungan antara kecepatan absolut uap, kecepatan relatif uap terhadap sudu, dan kecepatan sudu (blade) pada turbin. Segitiga kecepatan digunakan untuk menganalisis gaya dan kerja yang dihasilkan pada sudu turbin.

### Komponen Kecepatan dalam Segitiga Kecepatan

| Simbol              | Nama                             | Keterangan                                                                   |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $V_1$ (atau $C_1$ ) | Kecepatan absolut uap masuk sudu | Kecepatan uap keluar nozzle, relatif terhadap tanah/casing                   |
| $U$                 | Kecepatan sudu (blade velocity)  | Kecepatan linear sudu akibat putaran rotor, $U = \pi \times D \times N / 60$ |

| Simbol                 | Nama                                                | Keterangan                                                                                                              |
|------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_{r1}$ (atau $W_1$ ) | Kecepatan relatif uap masuk sudu                    | Kecepatan uap relatif terhadap sudu yang bergerak: $V_{r1} = V_1 - U$ (secara vektor)                                   |
| $V_{r2}$ (atau $W_2$ ) | Kecepatan relatif uap keluar sudu                   | Kecepatan relatif setelah dibelokkan sudu (untuk impuls, $ V_{r2}  \approx  V_{r1}  \times k$ , $k$ =koefisien gesekan) |
| $V_2$ (atau $C_2$ )    | Kecepatan absolut uap keluar sudu                   | $V_2 = V_{r2} + U$ (secara vektor)                                                                                      |
| $\alpha_1$             | Sudut nozzle (sudut $V_1$ terhadap arah tangensial) | Ditentukan oleh desain nozzle, umumnya 15-25°                                                                           |
| $\beta_1, \beta_2$     | Sudut sudu masuk dan keluar                         | Ditentukan oleh desain sudu                                                                                             |

### 💡 Cara Menggambar Segitiga Kecepatan

1. Gambar vektor  $U$  (kecepatan sudu) secara horizontal sesuai arah gerak sudu. 2. Gambar vektor  $V_1$  (kecepatan absolut uap masuk) dengan sudut  $\alpha_1$  terhadap arah  $U$ . 3.  $V_{r1} = V_1 - U$  (secara vektor): hubungkan ujung  $U$  ke ujung  $V_1$  — ini adalah segitiga kecepatan MASUK. 4. Untuk segitiga kecepatan KELUAR:  $V_{r2}$  memiliki sudut  $\beta_2$  terhadap arah  $U$  (umumnya sama besar dengan  $\beta_1$  untuk sudu simetris, tetapi arah berbeda). 5.  $V_2 = V_{r2} + U$  (secara vektor): menghasilkan segitiga kecepatan keluar. Kedua segitiga (masuk dan keluar) sering digabung menjadi satu diagram dengan  $U$  sebagai basis bersama, disebut COMBINED VELOCITY DIAGRAM.

## Perubahan Momentum dan Gaya Tangensial

Gaya tangensial ( $F_t$ ) yang bekerja pada sudu dihasilkan dari perubahan momentum komponen tangensial kecepatan uap:

$$F_t = \dot{m} \times (V_{w1} + V_{w2})$$

$F_t$  = Gaya tangensial (N) |  $\dot{m}$  = Laju aliran massa uap (kg/s)  $V_{w1}$ ,  $V_{w2}$  = Komponen kecepatan tangensial (whirl) masuk dan keluar (m/s) ( $V_{w2}$  bernilai positif jika arahnya berlawanan dengan  $V_{w1}$ )

Kerja yang dihasilkan per satuan massa uap (kerja spesifik):

$$W = U \times (V_{w1} + V_{w2})$$

$W$  = Kerja spesifik per kg uap (J/kg) |  $U$  = Kecepatan sudu (m/s)  
 $V_{w1} + V_{w2}$  = jumlah komponen tangensial (m/s)

**Contoh Soal Segitiga Kecepatan**

Uap memasuki sudu turbin impuls dengan kecepatan absolut  $V_1 = 500$  m/s pada sudut nozzle  $\alpha_1 = 20^\circ$ . Kecepatan sudu  $U = 200$  m/s. Asumsikan sudu simetris ( $\beta_1 = \beta_2$ ) tanpa gesekan ( $V_{r2} = V_{r1}$ ), aliran keluar aksial murni ( $V_{w2}$  dapat dihitung dari geometri). Komponen tangensial kecepatan masuk:  $V_{w1} = V_1 \times \cos \alpha_1 = 500 \times \cos 20^\circ = 500 \times 0,940 = 470$  m/s  
 Komponen aksial:  $V_{f1} = V_1 \times \sin \alpha_1 = 500 \times \sin 20^\circ = 500 \times 0,342 = 171$  m/s  
 Kecepatan relatif tangensial masuk:  $V_{rw1} = V_{w1} - U = 470 - 200 = 270$  m/s  
 Untuk sudu simetris tanpa gesekan,  $V_{rw2} = V_{rw1} = 270$  m/s (arah berlawanan setelah dibelokkan)  
 Komponen tangensial kecepatan keluar:  $V_{w2} = V_{rw2} - U = 270 - 200 = 70$  m/s (Catatan: tanda  $V_{w2}$  menunjukkan arah; untuk perhitungan gaya gunakan  $|V_{w1}| + |V_{w2}|$  jika berlawanan arah)  
 Kerja spesifik:  $W = U \times (V_{w1} + V_{w2}) = 200 \times (470 + 70) = 200 \times 540 = 108.000$  J/kg = 108 kJ/kg

**SOAL LATIHAN BAB VII****A. Pilihan Ganda**

55. Pada turbin impuls, penurunan tekanan uap terjadi di... a. Sudu gerak saja b. Nozzle/sudu diam saja c. Nozzle dan sudu gerak d. Kondensor
56. Kecepatan sudu turbin ( $U$ ) dirumuskan sebagai... a.  $U = \pi \times D \times N$  b.  $U = \pi \times D \times N / 60$  c.  $U = D \times N / 60$  d.  $U = 2\pi \times N$
57. Pada segitiga kecepatan,  $V_{r1}$  (kecepatan relatif masuk) diperoleh dari... a.  $V_{r1} = V_1 + U$  b.  $V_{r1} = V_1 - U$  (vektor) c.  $V_{r1} = U - V_1$  d.  $V_{r1} = V_1 \times U$

**B. Soal Uraian/Hitungan**

58. Jelaskan perbedaan prinsip kerja turbin impuls dan turbin reaksi, serta berikan contoh masing-masing!
59. Uap masuk nozzle dengan entalpi 2950 kJ/kg dan keluar dengan entalpi 2700 kJ/kg, kecepatan masuk diabaikan. Hitung kecepatan uap keluar nozzle!
60. Gambarkan dan jelaskan langkah-langkah membuat segitiga kecepatan untuk turbin impuls, sebutkan semua komponen vektor yang terlibat!
61. Uap masuk sudu dengan  $V_1 = 450$  m/s, sudut nozzle  $\alpha_1 = 18^\circ$ , kecepatan sudu  $U = 180$  m/s. Hitung komponen tangensial ( $V_{w1}$ ) dan komponen aksial ( $V_{f1}$ ) dari kecepatan absolut masuk!

## BAB VIII — PERHITUNGAN DAYA GUNA TURBIN UAP

Bab ini membahas siklus termodinamika turbin uap (siklus Rankine) dan perhitungan efisiensi serta daya yang dihasilkan oleh turbin uap.

### 8.1 Siklus Rankine

Siklus Rankine adalah siklus termodinamika dasar yang menjadi acuan sistem tenaga uap (boiler-turbin-kondensor-pompa), termasuk pada kapal yang menggunakan turbin uap sebagai penggerak utama.

| Proses | Komponen     | Deskripsi Termodinamika                                                                   |
|--------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1-2    | Pompa (Pump) | Kompresi isentropik air dari kondensor ke tekanan boiler (kerja masuk $W_{\text{pump}}$ ) |
| 2-3    | Boiler       | Pemanasan isobarik — air berubah menjadi uap super panas (kalor masuk $Q_{\text{in}}$ )   |
| 3-4    | Turbin       | Ekspansi isentropik uap, menghasilkan kerja (kerja keluar $W_{\text{turbin}}$ )           |
| 4-1    | Kondensor    | Pendinginan isobarik — uap berubah menjadi air (kalor keluar $Q_{\text{out}}$ )           |

#### Diagram Siklus Rankine pada T-s Diagram

Pada diagram suhu-entropi (T-s), siklus Rankine ideal membentuk: garis vertikal naik (1-2, proses pompa — entropi konstan), garis horizontal/lengkung naik pada tekanan konstan (2-3, proses boiler — pemanasan dan penguapan), garis vertikal turun (3-4, proses turbin — ekspansi isentropik), dan garis horizontal turun pada tekanan konstan (4-1, proses kondensor — pengembunan). Luas area yang dilingkupi siklus pada diagram T-s merepresentasikan kerja netto ( $W_{\text{net}}$ ) yang dihasilkan.

### 8.2 Efisiensi Turbin Uap

#### A. Efisiensi Siklus Rankine (Efisiensi Termal)

$$\eta_{\text{Rankine}} = W_{\text{net}} / Q_{\text{in}} = (W_{\text{turbin}} - W_{\text{pompa}}) / Q_{\text{in}}$$

$$W_{\text{net}} = \text{Kerja netto siklus (kJ/kg)} \quad | \quad Q_{\text{in}} = \text{Kalor masuk dari boiler (kJ/kg)} \\ W_{\text{turbin}} = h_3 - h_4 \quad | \quad W_{\text{pump}} = h_2 - h_1 \quad | \quad Q_{\text{in}} = h_3 - h_2$$

## B. Efisiensi Isentropik Turbin (Turbine Isentropic Efficiency)

Efisiensi isentropik turbin membandingkan kerja aktual turbin dengan kerja ideal (isentropik) jika tidak ada rugi-rugi (irreversibilitas):

$$\eta_T = (h_3 - h_{4\text{aktual}}) / (h_3 - h_{4s})$$

$\eta_T$  = Efisiensi isentropik turbin  $h_3$  = Entalpi uap masuk turbin (kJ/kg)  $h_{4\text{aktual}}$  = Entalpi uap keluar turbin aktual (kJ/kg)  $h_{4s}$  = Entalpi uap keluar turbin ideal/isentropik (kJ/kg)

Nilai efisiensi isentropik turbin uap pada kapal modern berkisar 80-90%, dipengaruhi oleh gesekan aliran uap, kebocoran (leakage), dan kerugian akibat kelembaban uap pada tingkat akhir (LP turbine).

## C. Efisiensi Mekanis dan Efisiensi Generator

Untuk aplikasi turbin uap penggerak generator listrik (turbo-generator) atau penggerak propeller melalui reduction gear:

| Jenis Efisiensi                             | Definisi                                                          | Nilai Tipikal |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------|
| Efisiensi Isentropik Turbin ( $\eta_T$ )    | Kerja aktual vs kerja ideal turbin                                | 80-90%        |
| Efisiensi Mekanis ( $\eta_{\text{mech}}$ )  | Daya output shaft vs daya yang diterima sudu (rugi bearing, dll.) | 95-99%        |
| Efisiensi Gearbox ( $\eta_{\text{gear}}$ )  | Daya keluar gearbox vs daya masuk (untuk reduction gear)          | 97-99%        |
| Efisiensi Generator ( $\eta_{\text{gen}}$ ) | Daya listrik keluar vs daya mekanik masuk (untuk turbo-generator) | 95-98%        |

## 8.3 Perhitungan Daya dan Kerja Turbin

### A. Daya Turbin

$$P_{\text{turbin}} = \dot{m} \times W_{\text{turbin}}$$

$P_{\text{turbin}}$  = Daya turbin (kW)  $\dot{m}$  = Laju aliran massa uap (kg/s)  $W_{\text{turbin}}$  = Kerja spesifik turbin (kJ/kg) =  $h_3 - h_4$

**Contoh Soal Perhitungan Efisiensi dan Daya Turbin**

Uap masuk turbin dengan entalpi  $h_3 = 3200$  kJ/kg. Entalpi keluar turbin secara isentropik (ideal)  $h_{4s} = 2400$  kJ/kg, namun entalpi aktual keluar  $h_4 = 2550$  kJ/kg. Laju aliran massa uap  $\dot{m} = 8$  kg/s. (a) Efisiensi isentropik turbin:  $\eta_T = (h_3 - h_4) / (h_3 - h_{4s}) = (3200 - 2550) / (3200 - 2400) = 650/800 = 0,8125 = 81,25\%$  (b) Kerja aktual turbin per kg uap:  $W_{\text{turbin}} = h_3 - h_4 = 3200 - 2550 = 650$  kJ/kg (c) Daya turbin aktual:  $P_{\text{turbin}} = \dot{m} \times W_{\text{turbin}} = 8 \times 650 = 5.200$  kW = 5,2 MW Kesimpulan: Turbin menghasilkan daya 5,2 MW dengan efisiensi isentropik 81,25%.

**B. Konsumsi Uap Spesifik (Specific Steam Consumption / SSC)**

SSC menunjukkan jumlah uap yang diperlukan untuk menghasilkan satu satuan daya — analog dengan SFOC pada motor diesel:

$$\text{SSC} = \dot{m} \times 3600 / P$$

SSC = Specific Steam Consumption (kg/kWh)  $\dot{m}$  = Laju aliran massa uap (kg/s) |  $P$  = Daya turbin (kW) Faktor 3600 = konversi detik ke jam

**Contoh Soal SSC dan Efisiensi Keseluruhan**

Dari contoh sebelumnya:  $\dot{m} = 8$  kg/s,  $P_{\text{turbin}} = 5.200$  kW.  $\text{SSC} = (8 \times 3600) / 5.200 = 28.800 / 5.200 = 5,54$  kg/kWh Jika turbin ini menggerakkan generator dengan efisiensi mekanis 97% dan efisiensi generator 96%, maka daya listrik yang dihasilkan:  $P_{\text{listrik}} = P_{\text{turbin}} \times \eta_{\text{mech}} \times \eta_{\text{gen}}$   $P_{\text{listrik}} = 5.200 \times 0,97 \times 0,96$   $P_{\text{listrik}} = 5.200 \times 0,9312$   $P_{\text{listrik}} = 4.842,24$  kW  $\approx 4,84$  MW

**C. Perbandingan Efisiensi Keseluruhan: Motor Diesel vs Turbin Uap**

| Sistem                                | Efisiensi Keseluruhan Tipikal | Catatan                                             |
|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Motor Diesel 2 Tak Modern             | 45-50%                        | Efisiensi termal langsung dari bahan bakar ke kerja |
| Turbin Uap (Siklus Sederhana)         | 30-40%                        | Termasuk rugi-rugi boiler, kondensor, dan turbin    |
| Turbin Uap dengan Reheat & Regenerasi | 40-45%                        | Siklus lebih kompleks, mendekati efisiensi diesel   |

| Sistem                               | Efisiensi Keseluruhan Tipikal | Catatan                                            |
|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|
| Combined Cycle (Gas + Steam Turbine) | 50-60%                        | Memanfaatkan gas buang turbin gas untuk boiler uap |

### ⚠ Catatan Penting: Mengapa Turbin Uap Jarang untuk Kapal Niaga Modern?

Meskipun secara historis turbin uap digunakan luas (terutama kapal tanker era 1970-1980an dan kapal LNG), efisiensi termal yang lebih rendah dibanding motor diesel modern membuat turbin uap kurang kompetitif untuk kapal niaga umum. Turbin uap masih dipertahankan pada kapal LNG carrier tertentu (karena dapat memanfaatkan boil-off gas LNG sebagai bahan bakar boiler) dan pada beberapa kapal khusus (kapal pemecah es bertenaga nuklir, kapal militer) di mana karakteristik getaran rendah dan kemampuan menggunakan berbagai bahan bakar menjadi pertimbangan utama.

## RANGKUMAN BAB VIII

| Rumus                                                                                       | Keterangan                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| $\eta_{\text{Rankine}} = W_{\text{net}}/Q_{\text{in}}$                                      | Efisiensi siklus Rankine                              |
| $\eta_T = (h_3 - h_4)/(h_3 - h_{4s})$                                                       | Efisiensi isentropik turbin                           |
| $P_{\text{turbin}} = \dot{m} \times (h_3 - h_4)$                                            | Daya turbin dari laju aliran massa dan kerja spesifik |
| $\text{SSC} = \dot{m} \times 3600/P$                                                        | Konsumsi uap spesifik (kg/kWh)                        |
| $P_{\text{listrik}} = P_{\text{turbin}} \times \eta_{\text{mech}} \times \eta_{\text{gen}}$ | Daya listrik dari turbo-generator                     |

## SOAL LATIHAN BAB VIII

### A. Pilihan Ganda

62. Siklus dasar yang menjadi acuan sistem tenaga uap adalah... a. Siklus Otto b. Siklus Diesel c. Siklus Rankine d. Siklus Brayton
63. Efisiensi isentropik turbin uap modern pada kapal umumnya berkisar... a. 30-40% b. 50-60% c. 80-90% d. 95-99%
64. SSC (Specific Steam Consumption) analog dengan SFOC pada motor diesel, yaitu menunjukkan... a. Suhu uap per kW b. Konsumsi uap per kWh c. Tekanan uap per kW d. Efisiensi boiler

### B. Soal Uraian/Hitungan

65. Jelaskan keempat proses dalam siklus Rankine beserta komponen yang terlibat pada masing-masing proses!
66. Uap masuk turbin dengan entalpi 3100 kJ/kg. Entalpi keluar isentropik 2350 kJ/kg, entalpi aktual keluar 2480 kJ/kg, laju aliran massa uap 10 kg/s. Hitunglah: (a) efisiensi isentropik turbin, (b) daya turbin aktual, (c) SSC!
67. Jelaskan mengapa efisiensi keseluruhan turbin uap siklus sederhana lebih rendah dibanding motor diesel modern, dan sebutkan upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi siklus Rankine!
68. Jelaskan dalam kondisi apa turbin uap masih relevan digunakan sebagai mesin penggerak kapal pada era modern, berikan contoh kapalnya!

## DAFTAR PUSTAKA

- Cengel, Y. A. & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI. (2018). *Silabus Mata Pelajaran SMK Kompetensi Keahlian Teknik Kapal Niaga*. Jakarta: Kemendikbud.
- MAN Energy Solutions. (2020). *Basic Principles of Ship Propulsion*. Copenhagen: MAN Energy Solutions.
- Pounder, C. (Ed.) (2009). *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines* (9th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Sembiring, J. (2016). *Motor Diesel Penggerak Utama Kapal*. Jakarta: Pustaka Maritim.
- Smith, E. H. (2013). *Marine Auxiliary Machinery* (8th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Taylor, D. A. (1996). *Introduction to Marine Engineering* (2nd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Wartsila. (2019). *Wartsila Encyclopedia of Marine and Energy Technology*. Helsinki: Wartsila Corporation.
- Woud, H. K. & Stapersma, D. (2002). *Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems*. London: IMarEST.
- Yahya, S. M. (2011). *Turbines, Compressors and Fans* (4th ed.). New Delhi: Tata McGraw-Hill.

## GLOSARIUM

| Istilah / Singkatan  | Definisi                                                                          |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Atomisasi            | Proses pengubahan bahan bakar cair menjadi kabut/partikel halus oleh injector.    |
| BHP/Brake Power      | Daya efektif/rem yang tersedia pada output shaft mesin setelah rugi mekanis.      |
| Common Rail          | Sistem injeksi bahan bakar dengan tekanan konstan dikontrol elektronik.           |
| Crankcase            | Rumah crankshaft, tempat oli pelumas pada sebagian desain mesin.                  |
| Crankshaft           | Poros engkol yang mengubah gerak bolak-balik piston menjadi gerak rotasi.         |
| Entalpi (h)          | Besaran termodinamika yang menyatakan kandungan energi total fluida (kJ/kg).      |
| IMEP                 | Indicated Mean Effective Pressure — tekanan rata-rata efektif indikator.          |
| Indicated Power (IP) | Daya yang dihasilkan gas pembakaran di dalam silinder.                            |
| Jacket Cooling Water | Air tawar pendingin yang mengelilingi cylinder liner mesin diesel.                |
| Kondensor            | Komponen yang mengubah uap menjadi air dengan melepas kalor (siklus Rankine).     |
| Nozzle               | Saluran yang mengubah energi tekanan/panas uap menjadi energi kecepatan.          |
| Purifier             | Alat pemisah sentrifugal untuk membersihkan bahan bakar/oli dari air dan kotoran. |
| Reduction Gear       | Roda gigi reduksi yang menurunkan RPM mesin ke RPM propeller.                     |
| Scavenging           | Proses pembilasan gas buang dengan udara segar pada motor diesel 2 tak.           |
| SFOC                 | Specific Fuel Oil Consumption — konsumsi bahan bakar spesifik (g/kWh).            |
| Siklus Diesel        | Siklus termodinamika teoritis motor diesel: kompresi-pembakaran-ekspansi-buang.   |
| Siklus Rankine       | Siklus termodinamika dasar sistem tenaga uap (boiler-turbin-kondensor-pompa).     |
| SSC                  | Specific Steam Consumption — konsumsi uap spesifik (kg/kWh).                      |
| TBN                  | Total Base Number — ukuran kemampuan oli menetralkan asam hasil pembakaran.       |
| TMA/TMB              | Titik Mati Atas/Bawah — posisi piston pada titik tertinggi/terendah.              |
| Turbin Impuls        | Turbin di mana penurunan tekanan uap hanya terjadi di nozzle.                     |
| Turbin Reaksi        | Turbin di mana penurunan tekanan uap terjadi di stator dan rotor.                 |

| Istilah / Singkatan | Definisi                                                                     |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Turbocharger        | Alat yang memanfaatkan energi gas buang untuk mengompresi udara masuk mesin. |
| Velocity Triangle   | Segitiga kecepatan — representasi vektor kecepatan uap pada sudu turbin.     |
| Viskositas          | Ukuran kekentalan suatu fluida, dinyatakan dalam centistokes (cSt).          |