

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

BUKU TEKS
PERMESINAN BANTU
Auxiliary Machinery

Oleh:
JOKO DARMONO, ST
NIP 197305312022211003

Pompa, Kompresor, Pesawat Pendingin & Permesinan Bantu Kapal

TANJUNGPINANG
2026

KATA PENGANTAR

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

Permesinan bantu adalah seluruh peralatan mekanis di atas kapal yang mendukung operasional mesin penggerak utama, sistem kelistrikan, sistem muatan, dan kebutuhan hidup awak kapal — namun bukan mesin penggerak utama itu sendiri. Meskipun disebut "bantu", peralatan ini sangat vital: tanpa pompa, kompresor, separator, dan pesawat pendingin yang berfungsi baik, mesin penggerak utama tidak dapat dioperasikan dan kehidupan di kapal tidak dapat berjalan normal.

Buku ini membahas berbagai jenis permesinan bantu yang umum dijumpai di kapal niaga, meliputi pompa (sentrifugal, reciprocating, rotary), kompresor udara, separator/purifier, pesawat pendingin (refrigeration & air conditioning), ketel uap bantu (auxiliary boiler), sistem hidrolik, serta peralatan penanganan air (fresh water generator, sewage treatment plant). Pembahasan mencakup prinsip kerja, konstruksi, pengoperasian, perawatan, serta perhitungan sederhana kapasitas dan head pompa.

Buku ini mencakup delapan topik utama: (1) Pengantar Permesinan Bantu Kapal, (2) Pompa Sentrifugal, (3) Pompa Reciprocating dan Rotary, (4) Perhitungan Dasar Pompa, (5) Kompresor Udara, (6) Separator dan Purifier, (7) Pesawat Pendingin dan Sistem Hidrolik, serta (8) Ketel Uap Bantu dan Pesawat Bantu Penunjang Lain. 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
BAB I — PENGANTAR PERMESINAN BANTU KAPAL	1
1.1 Definisi dan Peran Permesinan Bantu	1
1.2 Kompetensi yang Akan Dicapai	2
1.3 Klasifikasi Permesinan Bantu	3
BAB II — POMPA SENTRIFUGAL	6
2.1 Prinsip Kerja Pompa Sentrifugal	6
2.2 Konstruksi Pompa Sentrifugal	9
2.3 Karakteristik dan Kurva Pompa	12
2.4 Aplikasi Pompa Sentrifugal di Kapal	14
2.5 Rangkuman & Latihan Bab II	17
BAB III — POMPA RECIPROCATING DAN ROTARY	20
3.1 Pompa Reciprocating (Piston/Plunger)	20
3.2 Pompa Rotary (Gear, Screw, Vane)	23
3.3 Perbandingan dan Pemilihan Jenis Pompa	26
3.4 Rangkuman & Latihan Bab III	28
BAB IV — PERHITUNGAN DASAR POMPA	31
4.1 Kapasitas dan Head Pompa	31
4.2 Daya Pompa dan Efisiensi	34
4.3 Hukum Afinitas Pompa (Pump Affinity Laws)	37
4.4 Pompa Paralel dan Seri	39
4.5 Rangkuman & Latihan Bab IV	41
BAB V — KOMPRESOR UDARA	44
5.1 Fungsi dan Jenis Kompresor di Kapal	44
5.2 Kompresor Torak (Reciprocating)	46
5.3 Perhitungan Dasar Kompresor	49
5.4 Rangkuman & Latihan Bab V	52
BAB VI — SEPARATOR DAN PURIFIER	55
6.1 Prinsip Kerja Separator Sentrifugal	55
6.2 Jenis Separator di Kapal	58
6.3 Pengoperasian dan Perawatan Separator	61
6.4 Rangkuman & Latihan Bab VI	63
BAB VII — PESAWAT PENDINGIN DAN SISTEM HIDRAULIK	66
7.1 Prinsip Kerja Sistem Refrigerasi	66
7.2 Sistem Air Conditioning (AC) Kapal	69

7.3 Sistem Hidraulik Kapal	71
7.4 Rangkuman & Latihan Bab VII	74
BAB VIII — KETEL UAP BANTU DAN PESAWAT BANTU LAIN	77
8.1 Ketel Uap Bantu (Auxiliary Boiler)	77
8.2 Fresh Water Generator	80
8.3 Sewage Treatment Plant dan Oily Water Separator	82
8.4 Rangkuman & Latihan Bab VIII	85
Daftar Pustaka	88
Glosarium	90

BAB I — PENGANTAR PERMESINAN BANTU KAPAL

1.1 Definisi dan Peran Permesinan Bantu

Permesinan bantu (auxiliary machinery) adalah seluruh peralatan mekanis di atas kapal yang tidak berfungsi sebagai mesin penggerak utama (main propulsion engine), namun mendukung berbagai sistem operasional kapal — mulai dari penyediaan listrik, air bersih, udara bertekanan, pendinginan, hingga penanganan limbah.

Meskipun disebut "bantu", peran permesinan bantu sama sekali tidak kalah penting dari mesin penggerak utama. Bahkan dapat dikatakan bahwa mesin penggerak utama **TIDAK DAPAT** beroperasi tanpa dukungan permesinan bantu (pompa pendingin, pompa pelumas, kompresor udara start). Selain itu, permesinan bantu juga menentukan kelayakan hidup (habitability) awak kapal — mulai dari air tawar untuk minum dan mandi, pendingin ruangan, hingga pengolahan limbah agar tidak mencemari laut.

Mengapa Permesinan Bantu Disebut "Jantung Kedua" Kapal?

- Tanpa pompa pendingin → mesin utama overheat dan harus dimatikan
- Tanpa kompresor udara → mesin utama tidak dapat di-start
- Tanpa separator bahan bakar → mesin utama dapat rusak akibat bahan bakar kotor
- Tanpa fresh water generator → krisis air tawar bagi awak kapal
- Tanpa sewage treatment → pelanggaran MARPOL dan pencemaran laut

1.2 Kompetensi yang Akan Dicapai

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

1. Menjelaskan klasifikasi dan fungsi berbagai jenis permesinan bantu di kapal.
2. Menjelaskan prinsip kerja, konstruksi, dan aplikasi pompa sentrifugal, reciprocating, dan rotary.
3. Melakukan perhitungan sederhana kapasitas, head, dan daya pompa.
4. Menjelaskan prinsip kerja dan pengoperasian kompresor udara serta melakukan perhitungan dasarnya.
5. Menjelaskan prinsip kerja separator sentrifugal dan purifier untuk bahan bakar dan minyak lumas.
6. Menjelaskan prinsip kerja sistem refrigerasi, air conditioning, dan sistem hidrolik kapal.
7. Menjelaskan fungsi ketel uap bantu, fresh water generator, dan peralatan pengolahan limbah kapal.

1.3 Klasifikasi Permesinan Bantu

Permesinan bantu dapat dikelompokkan berdasarkan fungsinya dalam sistem kapal:

Kategori	Jenis Permesinan Bantu	Fungsi Utama
Permesinan Fluida (Pompa)	Pompa sentrifugal, reciprocating, rotary, screw	Memindahkan fluida (air, bahan bakar, oli, ballast)
Permesinan Udara/Gas	Kompresor udara, blower, fan	Menghasilkan udara bertekanan dan ventilasi
Permesinan Pemisah	Separator, purifier, oily water separator	Memisahkan campuran cairan (minyak-air-padatan)
Permesinan Termal	Ketel uap bantu, heat exchanger, refrigeration plant	Transfer panas, pembentukan uap, pendinginan
Permesinan Hidraulik	Power pack hidraulik, hydraulic cylinder/motor	Penggerak mekanisme (steering gear, deck crane, hatch cover)
Permesinan Penunjang Hidup	Fresh water generator, sewage treatment plant, incinerator	Penyediaan air tawar dan pengolahan limbah awak kapal

Sumber Penggerak Permesinan Bantu

Permesinan bantu dapat digerakkan oleh berbagai sumber tenaga: motor listrik (paling umum, untuk pompa, kompresor, separator), tenaga uap (steam-driven pump pada kapal dengan boiler), tenaga mekanik langsung dari mesin utama (PTO/Power Take Off), atau tenaga hidraulik (untuk aktuator dan motor hidraulik). Pemilihan sumber tenaga bergantung pada ketersediaan energi, kebutuhan keandalan, dan desain kapal.

BAB II — POMPA SENTRIFUGAL

Pompa sentrifugal adalah jenis pompa yang paling banyak digunakan di kapal karena konstruksinya sederhana, kapasitas besar, dan perawatan relatif mudah. Bab ini membahas prinsip kerja, konstruksi, karakteristik, dan aplikasi pompa sentrifugal.

2.1 Prinsip Kerja Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal bekerja dengan mengubah energi mekanik (putaran impeller) menjadi energi kinetik fluida, kemudian energi kinetik tersebut dikonversi menjadi energi tekanan (head) saat fluida melewati casing/volute pompa.

8. Fluida masuk ke pusat impeller (mata impeller/eye of impeller) secara aksial.
9. Impeller yang berputar memberikan gaya sentrifugal pada fluida, mendorongnya ke arah radial (keluar) dengan kecepatan tinggi.
10. Fluida berkecepatan tinggi memasuki casing/volute berbentuk spiral yang luas penampangnya semakin membesar, sehingga kecepatan fluida berkurang dan dikonversi menjadi tekanan (sesuai prinsip Bernoulli).
11. Fluida bertekanan keluar melalui discharge nozzle menuju sistem perpipaan.

Prinsip Bernoulli pada Pompa Sentrifugal

Persamaan Bernoulli menyatakan bahwa total energi fluida (energi tekanan + energi kinetik + energi potensial) adalah konstan pada aliran ideal. Saat fluida melewati casing volute yang luas penampangnya membesar, kecepatan fluida menurun (hukum kontinuitas $Q=A \times V$), sehingga energi kinetik yang "hilang" dikonversi menjadi energi tekanan (head). Inilah mekanisme dasar pompa sentrifugal menghasilkan tekanan/head.

2.2 Konstruksi Pompa Sentrifugal

Komponen-komponen utama pompa sentrifugal:

Komponen	Fungsi
Impeller	Komponen berputar yang memberikan energi kinetik pada fluida; jenis: closed, semi-open, open
Casing/Volute	Rumah pompa berbentuk spiral, mengonversi energi kinetik menjadi energi tekanan
Shaft (Poros)	Menghubungkan impeller dengan penggerak (motor listrik/diesel)

Komponen	Fungsi
Bearing	Menopang poros dan menahan gaya radial/aksial
Seal/Packing	Mencegah kebocoran fluida di sekitar poros (mechanical seal atau gland packing)
Suction & Discharge Nozzle	Saluran masuk dan keluar fluida
Wear Ring	Cincin yang dapat diganti untuk menjaga clearance impeller-casing

Jenis Impeller Berdasarkan Arah Aliran

- Radial Flow Impeller: Fluida keluar tegak lurus terhadap sumbu putar — head tinggi, kapasitas rendah-sedang.
- Axial Flow Impeller: Fluida bergerak sejajar sumbu putar (seperti propeller) — head rendah, kapasitas sangat besar (digunakan pada pompa ballast kapasitas besar).
- Mixed Flow Impeller: Kombinasi radial dan aksial — karakteristik di antara keduanya.

2.3 Karakteristik dan Kurva Pompa

Performa pompa sentrifugal direpresentasikan dalam kurva karakteristik (pump performance curve) yang menggambarkan hubungan antara kapasitas (Q), head (H), efisiensi (η), dan daya (P) pada putaran tertentu.

Parameter	Hubungan dengan Kapasitas (Q)
Head (H)	Menurun saat Q meningkat (kurva H - Q umumnya menurun dari kiri ke kanan)
Efisiensi (η)	Naik mencapai titik maksimum (Best Efficiency Point/BEP), kemudian menurun
Daya (P)	Umumnya meningkat seiring kenaikan Q
NPSH Required	Meningkat seiring kenaikan Q (semakin tinggi Q , semakin besar risiko kavitasi)

Titik Operasi Pompa (Operating Point)

Titik operasi pompa ditentukan oleh perpotongan antara kurva karakteristik pompa (pump curve) dengan kurva karakteristik sistem perpipaan (system curve). Sistem curve menggambarkan head yang dibutuhkan sistem (static head + friction losses) pada berbagai kapasitas aliran.

 **Bahaya Kavitasi (Cavitation)**

Kavitasi terjadi ketika tekanan pada sisi suction pompa turun di bawah tekanan uap jenuh (vapour pressure) fluida, menyebabkan terbentuknya gelembung uap yang kemudian pecah secara mendadak (implosi) saat memasuki area bertekanan lebih tinggi. Implosi ini menghasilkan gelombang kejut yang dapat merusak permukaan impeller (erosi/pitting), menimbulkan suara berisik (seperti kerikil dalam pompa), getaran, dan penurunan performa drastis. Pencegahan: pastikan $NPSH_{available} > NPSH_{required}$, hindari suction lift berlebihan, periksa strainer tidak tersumbat.

2.4 Aplikasi Pompa Sentrifugal di Kapal

Pompa sentrifugal digunakan secara luas untuk berbagai keperluan di kapal:

Aplikasi	Karakteristik Pompa yang Dibutuhkan
Sea Water Cooling Pump	Kapasitas besar, head rendah-sedang, tahan korosi air laut (bronze/duplex steel)
Fresh Water Cooling Pump	Kapasitas sedang, head sedang
Bilge Pump	Self-priming atau dilengkapi priming pump, mampu menangani fluida bercampur kotoran
Ballast Pump	Kapasitas sangat besar, head rendah-sedang, untuk mengisi/mengosongkan tangki ballast
Fire Pump	Kapasitas dan head sesuai persyaratan SOLAS, harus dapat start cepat dalam keadaan darurat
General Service Pump	Multifungsi: bilge, ballast, fire fighting, didesain serbaguna
Fuel Oil Transfer Pump	Tahan terhadap viskositas tinggi (terutama jika digunakan untuk HFO)

RANGKUMAN BAB II

Topik	Poin Kunci
Prinsip Kerja	Energi mekanik → energi kinetik (impeller) → energi tekanan (volute, prinsip Bernoulli)
Komponen Utama	Impeller, casing/volute, shaft, bearing, seal
Jenis Impeller	Radial (head tinggi), axial (kapasitas besar), mixed flow
Titik Operasi	Perpotongan pump curve dengan system curve
Kavitasi	Akibat $NPSH$ tidak terpenuhi — merusak impeller, turunkan performa

SOAL LATIHAN BAB II

A. Pilihan Ganda

12. Pompa sentrifugal mengubah energi mekanik menjadi energi kinetik melalui... a. Casing/volute b. Impeller c. Bearing d. Seal
13. Konversi energi kinetik menjadi energi tekanan pada pompa sentrifugal terjadi di... a. Impeller b. Shaft c. Casing/volute d. Suction nozzle
14. Kavitasi terjadi akibat... a. Tekanan suction terlalu tinggi b. Tekanan suction turun di bawah tekanan uap jenuh c. Kapasitas pompa terlalu kecil d. Putaran pompa terlalu rendah

B. Soal Uraian

15. Jelaskan secara lengkap bagaimana pompa sentrifugal menghasilkan head/tekanan berdasarkan prinsip Bernoulli!
16. Sebutkan dan jelaskan fungsi minimal 5 komponen utama pompa sentrifugal!
17. Jelaskan penyebab dan dampak terjadinya kavitasi pada pompa sentrifugal, serta cara mencegahnya!
18. Sebutkan minimal 5 aplikasi pompa sentrifugal di kapal dan jelaskan karakteristik pompa yang dibutuhkan untuk masing-masing aplikasi!

BAB III — POMPA RECIPROCATING DAN ROTARY

Selain pompa sentrifugal, kapal juga menggunakan pompa jenis perpindahan positif (positive displacement pump) — yaitu pompa reciprocating dan rotary — untuk aplikasi yang membutuhkan tekanan tinggi atau penanganan fluida viscous.

3.1 Pompa Reciprocating (Piston/Plunger)

Pompa reciprocating menggunakan gerak bolak-balik piston atau plunger di dalam silinder untuk menghisap dan mendorong fluida secara periodik melalui valve searah (check valve).

Prinsip Kerja

19. LANGKAH HISAP (Suction Stroke): Piston bergerak menjauhi cylinder head, menciptakan ruang vakum. Suction valve terbuka, fluida masuk ke dalam silinder. Discharge valve tertutup.
20. LANGKAH BUANG (Discharge Stroke): Piston bergerak ke arah cylinder head, mendorong fluida. Suction valve tertutup, discharge valve terbuka, fluida keluar dari silinder.

Jenis Pompa Reciprocating

Jenis	Karakteristik
Single Acting	Hanya satu sisi piston yang aktif memompa (1 langkah hisap, 1 langkah buang per putaran)
Double Acting	Kedua sisi piston aktif memompa secara bergantian — output lebih halus (2x langkah kerja per putaran)
Simplex	Hanya satu silinder/piston
Duplex/Triplex	Dua/tiga silinder bekerja bergantian — output lebih halus dan kontinu

Karakteristik Khas Pompa Reciprocating: Self-Priming dan Positive Displacement

Pompa reciprocating bersifat positive displacement — volume fluida yang dipindahkan per siklus relatif KONSTAN terlepas dari head/tekanan sistem (berbeda dengan pompa sentrifugal yang kapasitasnya berubah sesuai head). Karakteristik ini membuat pompa reciprocating: (1) mampu self-priming (menghisap udara dari pipa suction tanpa perlu diisi air terlebih dahulu), (2) dapat menghasilkan tekanan sangat tinggi, (3) WAJIB dilengkapi

relief valve karena jika discharge tersumbat, tekanan akan naik tak terkendali hingga merusak pompa atau pipa.

⚠ Bahaya Pompa Positive Displacement Tanpa Relief Valve

JANGAN PERNAH mengoperasikan pompa reciprocating (atau pompa rotary) dengan discharge valve tertutup penuh tanpa relief valve yang berfungsi! Karena sifat positive displacement, fluida akan terus didorong meskipun tidak ada jalan keluar, menyebabkan tekanan naik drastis hingga dapat meledakkan pipa, merusak seal, atau merusak pompa itu sendiri.

3.2 Pompa Rotary (Gear, Screw, Vane)

Pompa rotary juga termasuk positive displacement pump, namun menggunakan elemen yang berputar (bukan bolak-balik) untuk memindahkan fluida.

A. Pompa Roda Gigi (Gear Pump)

Terdiri dari dua roda gigi (gear) yang berputar berlawanan arah di dalam casing. Fluida terperangkap di antara gigi-gigi dan dinding casing, terbawa dari sisi suction ke sisi discharge.

- External Gear Pump: Kedua gear berada di luar (bermeshing langsung) — umum untuk oli pelumas.
- Internal Gear Pump: Satu gear di dalam gear lain (internal/external gear configuration) — untuk fluida lebih viscous.

B. Pompa Sekrup (Screw Pump)

Menggunakan satu atau lebih sekrup (screw/rotor) yang saling bermeshing di dalam casing. Fluida bergerak secara aksial sepanjang ulir sekrup dari suction ke discharge. Screw pump menghasilkan aliran yang sangat halus (minim pulsasi) dan mampu menangani fluida dengan viskositas tinggi.

C. Pompa Vane (Vane Pump)

Menggunakan rotor dengan sudu-sudu (vanes) yang dapat bergerak masuk-keluar secara radial di dalam casing eksentrik (cam ring). Saat rotor berputar, ruang antar vane berubah volume — membesar di sisi suction (menghisap fluida) dan mengecil di sisi discharge (mendorong fluida).

Jenis Pompa Rotary	Karakteristik	Aplikasi Umum di Kapal
Gear Pump	Sederhana, andal, untuk fluida viscous (oli)	Lube oil pump, fuel oil transfer pump
Screw Pump	Aliran halus, kapasitas besar, viskositas tinggi	Cargo pump (tanker), fuel oil pump kapasitas besar
Vane Pump	Tekanan tinggi, kompak	Hydraulic power pack, steering gear

3.3 Perbandingan dan Pemilihan Jenis Pompa

Karakteristik	Pompa Sentrifugal	Pompa Reciprocating	Pompa Rotary
Tipe	Dynamic (non-positive displacement)	Positive displacement	Positive displacement
Kapasitas vs Head berubah?	Kapasitas berubah signifikan terhadap head	Kapasitas relatif konstan terhadap head	Kapasitas relatif konstan terhadap head
Self-Priming	Tidak (umumnya)	Ya	Ya (kebanyakan)
Cocok untuk Fluida Viscous	Kurang cocok	Cocok	Sangat cocok
Wajib Relief Valve	Tidak wajib	WAJIB	WAJIB
Aliran	Kontinu, halus	Berpulsasi (kecuali multi-cylinder)	Kontinu, halus
Kapasitas Tipikal	Besar	Kecil-sedang	Kecil-sedang
Tekanan Tipikal	Rendah-sedang	Tinggi	Sedang-tinggi

SOAL LATIHAN BAB III

A. Pilihan Ganda

21. Pompa yang kapasitasnya relatif konstan terlepas dari head sistem disebut... a. Dynamic pump b. Positive displacement pump c. Centrifugal pump d. Axial pump
22. Pompa yang WAJIB dilengkapi relief valve adalah... a. Pompa sentrifugal b. Pompa reciprocating dan rotary c. Pompa axial d. Semua jenis pompa tidak perlu
23. Pompa yang paling cocok untuk memindahkan minyak lumas dengan viskositas tinggi adalah... a. Pompa sentrifugal b. Pompa vane c. Gear pump/screw pump d. Pompa axial flow

B. Soal Uraian

24. Jelaskan prinsip kerja pompa reciprocating single acting dan double acting!
25. Mengapa pompa reciprocating dan rotary WAJIB dilengkapi relief valve, sedangkan pompa sentrifugal tidak wajib? Jelaskan dengan prinsip positive displacement!
26. Jelaskan perbedaan gear pump, screw pump, dan vane pump beserta aplikasinya di kapal!
27. Buatlah tabel perbandingan pompa sentrifugal, reciprocating, dan rotary dari segi kapasitas, tekanan, dan kesesuaian terhadap jenis fluida!

BAB IV — PERHITUNGAN DASAR POMPA

Bab ini membahas perhitungan-perhitungan dasar pompa yang harus dikuasai oleh setiap calon perwira teknik kapal, meliputi kapasitas, head, daya, efisiensi, hukum afinitas, dan susunan pompa paralel/seri.

4.1 Kapasitas dan Head Pompa

A. Kapasitas (Debit/Flow Rate)

Kapasitas pompa (Q) adalah volume fluida yang dipindahkan per satuan waktu:

$$Q = A \times v$$

Q = Kapasitas/debit (m³/s) | A = Luas penampang pipa (m²) | v = Kecepatan aliran (m/s)

Satuan kapasitas yang umum digunakan di kapal: m³/jam (m³/h), liter/menit (L/min), atau m³/s untuk perhitungan.

B. Head Pompa

Head adalah energi per satuan berat fluida yang diberikan oleh pompa, dinyatakan dalam satuan panjang (meter kolom fluida). Total head pompa (H) terdiri dari beberapa komponen:

$$H_{\text{total}} = H_{\text{static}} + H_{\text{friction}} + H_{\text{velocity}}$$

H_{static} = Beda elevasi antara permukaan fluida suction dan discharge (m)
 H_{friction} = Rugi-rugi akibat gesekan pipa, fitting, valve (m)
 H_{velocity} = Head kecepatan (umumnya diabaikan karena nilainya kecil)

Jenis Head	Definisi
Static Suction Head	Beda elevasi antara sumber fluida (lebih tinggi) dan centerline pompa — POSITIF jika sumber fluida lebih tinggi dari pompa
Static Suction Lift	Beda elevasi jika sumber fluida LEBIH RENDAH dari pompa — pompa harus "mengangkat" fluida
Static Discharge Head	Beda elevasi antara centerline pompa dan titik keluar/discharge

Jenis Head	Definisi
Friction Head	Rugi-rugi tekanan akibat gesekan fluida dengan dinding pipa dan fitting (dihitung dengan rumus Darcy-Weisbach atau Hazen-Williams)
Total Dynamic Head (TDH)	Total head yang harus disediakan pompa = Static Discharge Head + Static Suction Lift + Total Friction Losses

Konversi Head ke Tekanan

Head (H dalam meter) dapat dikonversi ke tekanan (P dalam Pa atau bar) menggunakan rumus: $P = \rho \times g \times H$, di mana ρ = massa jenis fluida (kg/m^3), g = gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$). Untuk air tawar ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$), 1 meter head $\approx 9,81 \text{ kPa} \approx 0,0981 \text{ bar}$. Sebagai aturan praktis: 10 meter head air $\approx 1 \text{ bar}$.

4.2 Daya Pompa dan Efisiensi

A. Daya Hidraulik (Water Horse Power / Hydraulic Power)

Daya hidraulik adalah daya yang sebenarnya diterima fluida (daya teoritis tanpa rugi-rugi):

$$P_{\text{hydraulic}} = \rho \times g \times Q \times H$$

$P_{\text{hydraulic}}$ = Daya hidraulik (Watt) ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3) |
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ Q = Kapasitas (m^3/s) | H = Head total (m)

B. Daya Pompa (Brake Power / Shaft Power)

Daya pompa adalah daya yang harus diberikan oleh penggerak (motor) ke poros pompa, lebih besar dari daya hidraulik karena adanya rugi-rugi mekanis dan hidraulis dalam pompa:

$$P_{\text{pompa}} = P_{\text{hydraulic}} / \eta_{\text{pompa}}$$

P_{pompa} = Daya pompa/Brake Power (Watt) η_{pompa} = Efisiensi pompa (umumnya 0,6-0,85 atau 60-85%)

Contoh Soal Perhitungan Daya Pompa

Sebuah pompa sea water cooling memiliki kapasitas $Q = 200 \text{ m}^3/\text{jam}$, head total $H = 25 \text{ m}$, efisiensi pompa $\eta = 75\%$. Fluida adalah air laut dengan $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$. Konversi Q ke m^3/s :
 $Q = 200/3600 = 0,0556 \text{ m}^3/\text{s}$ Daya hidraulik: $P_{\text{hydraulic}} = \rho \times g \times Q \times H$
 $P_{\text{hydraulic}} = 1025 \times 9,81 \times 0,0556 \times 25 = 13.965 \text{ Watt} \approx 13,97 \text{ kW}$ Daya pompa (Brake Power):
 $P_{\text{pompa}} = P_{\text{hydraulic}} / \eta = 13,97 / 0,75 = 18,6 \text{ kW}$ Kesimpulan: Motor penggerak

pompa harus mampu menyediakan daya minimal 18,6 kW (umumnya dipilih motor dengan rating standar di atasnya, misal 22 kW, untuk faktor keamanan).

4.3 Hukum Afinitas Pompa (Pump Affinity Laws)

Hukum afinitas menjelaskan bagaimana kapasitas, head, dan daya pompa berubah ketika putaran (N) atau diameter impeller (D) diubah. Hukum ini sangat berguna untuk memprediksi performa pompa pada putaran berbeda (misalnya saat menggunakan variable speed drive).

$$Q_2/Q_1 = N_2/N_1 \quad | \quad H_2/H_1 = (N_2/N_1)^2 \quad | \quad P_2/P_1 = (N_2/N_1)^3$$

Q = Kapasitas | H = Head | P = Daya | N = Putaran (rpm)
Berlaku untuk impeller diameter tetap, fluida sama

Contoh Soal Hukum Afinitas

Sebuah pompa pada putaran 1450 rpm menghasilkan kapasitas 100 m³/jam, head 20 m, dan daya 8 kW. Jika putaran diturunkan menjadi 1160 rpm (rasio $N_2/N_1 = 1160/1450 = 0,8$), hitung kapasitas, head, dan daya yang baru! $Q_2 = Q_1 \times (N_2/N_1) = 100 \times 0,8 = 80$ m³/jam $H_2 = H_1 \times (N_2/N_1)^2 = 20 \times (0,8)^2 = 20 \times 0,64 = 12,8$ m $P_2 = P_1 \times (N_2/N_1)^3 = 8 \times (0,8)^3 = 8 \times 0,512 = 4,096$ kW Kesimpulan: Dengan menurunkan putaran 20% (dari 1450 ke 1160 rpm), kapasitas turun menjadi 80%, head turun menjadi 64%, namun DAYA turun signifikan menjadi hanya 51,2% dari semula. Inilah dasar penghematan energi menggunakan Variable Speed Drive (VSD) pada pompa!

4.4 Pompa Paralel dan Seri

A. Susunan Paralel

Dua atau lebih pompa identik disusun paralel (inlet dan outlet digabung) untuk meningkatkan KAPASITAS total pada head yang sama:

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + \dots \text{ (pada H yang sama)}$$

Head sistem TIDAK bertambah, namun kapasitas bertambah

B. Susunan Seri

Dua atau lebih pompa identik disusun seri (output pompa pertama menjadi input pompa kedua) untuk meningkatkan HEAD total pada kapasitas yang sama:

$$H_{\text{total}} = H_1 + H_2 + \dots \text{ (pada } Q \text{ yang sama)}$$

Kapasitas sistem TIDAK bertambah, namun head bertambah

Aplikasi Praktis: Mengapa Kapal Memiliki Multiple Pompa Identik?

Banyak sistem di kapal (misalnya ballast system, fire fighting system) menggunakan dua atau lebih pompa identik yang dapat dioperasikan secara paralel. Selain untuk REDUNDANSI (cadangan jika satu pompa rusak), susunan paralel memungkinkan operator memilih: menjalankan SATU pompa untuk kebutuhan normal (efisien), atau menjalankan KEDUA pompa paralel untuk kebutuhan kapasitas besar (misalnya saat deballast cepat sebelum manuver).

RANGKUMAN BAB IV

Rumus	Keterangan
$Q = A \times v$	Kapasitas pompa dari luas pipa dan kecepatan aliran
$H_{\text{total}} = H_{\text{static}} + H_{\text{friction}}$	Head total = head statis + rugi gesekan
$P_{\text{hydraulic}} = \rho g Q H$	Daya hidrolik (daya teoritis fluida)
$P_{\text{pompa}} = P_{\text{hydraulic}} / \eta$	Daya pompa aktual (Brake Power)
$Q_2/Q_1 = N_2/N_1$; $H_2/H_1 = (N_2/N_1)^2$; $P_2/P_1 = (N_2/N_1)^3$	Hukum afinitas pompa
Paralel: Q bertambah; Seri: H bertambah	Susunan multiple pompa identik

SOAL LATIHAN BAB IV

A. Pilihan Ganda

28. Jika dua pompa identik disusun paralel, maka yang bertambah adalah...
 a. Head total b. Kapasitas total c. Efisiensi d. Daya per unit

29. Berdasarkan hukum afinitas, jika putaran pompa dinaikkan 2x, maka daya yang dibutuhkan menjadi... a. 2x b. 4x c. 8x d. Tetap sama
30. 10 meter head air tawar setara dengan tekanan sekitar... a. 0,1 bar b. 1 bar c. 10 bar d. 100 bar

B. Soal Uraian/Hitungan

31. Sebuah pompa ballast memiliki kapasitas 350 m³/jam dengan head total 18 m. Jika efisiensi pompa 70% dan fluida adalah air laut ($\rho=1025 \text{ kg/m}^3$), hitunglah daya hidraulik dan daya pompa (brake power) yang diperlukan!
32. Sebuah pompa pada 1750 rpm menghasilkan $Q=150 \text{ m}^3/\text{jam}$, $H=30\text{m}$, $P=15\text{kW}$. Jika putaran diturunkan menjadi 1400 rpm, hitunglah Q , H , dan P yang baru menggunakan hukum afinitas!
33. Jelaskan perbedaan efek susunan pompa paralel dan seri terhadap kapasitas dan head sistem, serta berikan contoh aplikasinya di kapal!
34. Sebuah sistem perpipaan memiliki static lift 4 m dan friction losses 6 m pada kapasitas operasi. Hitunglah Total Dynamic Head (TDH) yang harus disediakan pompa!

BAB V — KOMPRESOR UDARA

5.1 Fungsi dan Jenis Kompresor di Kapal

Kompresor udara berfungsi menghasilkan udara bertekanan untuk berbagai kebutuhan kapal. Tanpa kompresor udara yang berfungsi, motor diesel utama (terutama 2 tak) tidak dapat di-start.

Aplikasi Udara Bertekanan	Tekanan Tipikal	Keterangan
Starting Air (Udara Start Mesin)	25-30 bar	Untuk start motor diesel utama dan bantu
Control Air (Udara Kontrol)	7-9 bar	Untuk sistem kontrol pneumatik, instrumen
Service Air (Udara Servis)	7-9 bar	Untuk peralatan pneumatik, pembersihan, pengecatan
Deck Machinery (Udara Deck)	7-9 bar	Untuk peralatan deck seperti hatch cover (pada sebagian kapal)

Jenis kompresor yang umum digunakan di kapal:

- Kompresor Torak (Reciprocating Compressor): Paling umum untuk starting air bertekanan tinggi (25-30 bar), tersedia dalam konfigurasi single-stage atau multi-stage.
- Kompresor Sekrup (Screw Compressor): Untuk kebutuhan udara kontrol/servis bertekanan menengah, operasi lebih halus dan minim getaran.
- Kompresor Sentrifugal: Jarang digunakan di kapal niaga umum, lebih umum pada aplikasi kapasitas sangat besar (LNG carrier untuk boil-off gas).

5.2 Kompresor Torak (Reciprocating Compressor)

Kompresor torak bekerja dengan prinsip yang serupa dengan pompa reciprocating, namun fluida kerjanya adalah gas (udara) yang bersifat compressible (dapat dimampatkan).

Siklus Kerja Kompresor Torak

35. LANGKAH HISAP (Suction): Piston bergerak menjauhi cylinder head, suction valve terbuka, udara atmosfer masuk ke silinder.
36. LANGKAH KOMPRESI (Compression): Piston bergerak ke cylinder head, kedua valve tertutup, udara dikompresi — tekanan dan suhu naik.
37. LANGKAH BUANG (Discharge): Saat tekanan silinder mencapai tekanan discharge, discharge valve terbuka, udara bertekanan dikeluarkan menuju air receiver.

Kompresor Multi-Stage

Untuk mencapai tekanan tinggi (25-30 bar untuk starting air), kompresor menggunakan konfigurasi multi-stage (umumnya 2 atau 3 tingkat) dengan intercooler di antara tingkat:

Tingkat	Tekanan Tipikal	Fungsi Intercooler
LP (Low Pressure) Stage	Atmosfer → 4-5 bar	Mendinginkan udara sebelum masuk HP stage
HP (High Pressure) Stage	4-5 bar → 25-30 bar	Aftercooler mendinginkan udara sebelum masuk air receiver

💡 Mengapa Diperlukan Intercooler pada Kompresor Multi-Stage?

Proses kompresi menghasilkan panas (sesuai hukum gas: $PV=nRT$, kompresi meningkatkan suhu). Tanpa intercooler, suhu udara pada tingkat akhir akan sangat tinggi, meningkatkan risiko kebakaran (terutama jika ada uap oli dalam udara — risiko ledakan), serta menurunkan efisiensi kompresi (udara panas memiliki volume lebih besar, memerlukan kerja kompresi lebih besar). Intercooler mendinginkan udara di antara tingkat, mendekatkan proses kompresi ke kondisi isothermal yang lebih efisien.

⚠️ Bahaya Kebakaran/Ledakan pada Air Receiver

Kontaminasi minyak pelumas dalam sistem udara bertekanan tinggi dapat membentuk deposit karbon di pipa dan air receiver. Pada suhu dan tekanan tinggi, deposit ini berisiko terbakar atau meledak (diesel effect/dieseling). Pencegahan: lakukan drain kondensat dan deposit oli dari air receiver secara rutin, ganti filter udara kompresor sesuai jadwal, dan jangan melebihi rasio kompresi yang direkomendasikan.

5.3 Perhitungan Dasar Kompresor

A. Kapasitas Kompresor (Free Air Delivery / FAD)

FAD adalah volume udara yang dikompresi, dinyatakan dalam kondisi udara bebas (atmosfer) sebelum dikompresi:

$$FAD = V_{\text{displacement}} \times N \times \eta_{\text{volumetric}}$$

FAD = Free Air Delivery (m³/menit) V_displacement = Volume langkah silinder (m³) N = Putaran kompresor (rpm) $\eta_{\text{volumetric}}$ = Efisiensi volumetrik (umumnya 0,7-0,9)

B. Rasio Kompresi (Compression Ratio)

$$r = P_2 / P_1$$

r = Rasio kompresi P_1 = Tekanan absolut hisap (bar absolut) P_2 = Tekanan absolut buang (bar absolut) Catatan: P absolut = P gauge + 1,013 bar (tekanan atmosfer)

C. Daya Kompresor (Pendekatan Isotermal)

Daya kompresi isotermal (pendekatan sederhana, menganggap proses kompresi berlangsung pada suhu konstan):

$$P_{\text{isothermal}} = P_1 \times Q_1 \times \ln(r)$$

$P_{\text{isothermal}}$ = Daya kompresi isotermal (kW jika P_1 dalam kPa dan Q_1 dalam m³/s) P_1 = Tekanan hisap absolut | Q_1 = Kapasitas hisap (FAD) r = Rasio kompresi | ln = logaritma natural

Contoh Soal Perhitungan Kompresor

Sebuah kompresor udara start memiliki FAD = 0,5 m³/s pada kondisi tekanan hisap atmosfer (P_1 = 101,3 kPa absolut). Tekanan buang (discharge) adalah 30 bar gauge = 31,013 bar absolut = 3101,3 kPa. Rasio kompresi: $r = P_2/P_1 = 3101,3 / 101,3 = 30,6$ Daya isotermal: $P_{\text{isothermal}} = P_1 \times Q_1 \times \ln(r)$ $P_{\text{isothermal}} = 101,3 \times 0,5 \times \ln(30,6)$ $P_{\text{isothermal}} = 101,3 \times 0,5 \times 3,42$ $P_{\text{isothermal}} = 173,2$ kW Kesimpulan: Daya isotermal teoritis adalah 173,2 kW. Daya aktual kompresor akan LEBIH BESAR dari nilai ini karena proses kompresi aktual bukan isotermal murni (ada kenaikan suhu) dan terdapat rugi-rugi mekanis. Inilah alasan mengapa kompresor multi-stage dengan intercooler lebih efisien — mendekatkan kondisi aktual ke kondisi isotermal ideal.

SOAL LATIHAN BAB V

A. Pilihan Ganda

38. Tekanan udara start motor diesel utama umumnya berkisar... a. 5-7 bar b. 10-15 bar c. 25-30 bar d. 50-60 bar
39. Fungsi intercooler pada kompresor multi-stage adalah... a. Meningkatkan tekanan b. Mendinginkan udara antar tingkat kompresi c. Menyaring udara d. Mengurangi kapasitas
40. Rasio kompresi dihitung dengan rumus... a. $r = P_2 - P_1$ b. $r = P_2/P_1$ c. $r = P_1/P_2$ d. $r = P_1 \times P_2$

B. Soal Uraian/Hitungan

41. Jelaskan siklus kerja kompresor torak (reciprocating compressor) dan jelaskan kondisi valve pada setiap langkah!
42. Jelaskan mengapa kompresor untuk starting air menggunakan konfigurasi multi-stage dengan intercooler, bukan single-stage!
43. Sebuah kompresor memiliki FAD = 0,8 m³/s, tekanan hisap atmosfer 101,3 kPa, tekanan buang 9 bar gauge (10,013 bar absolut). Hitunglah rasio kompresi dan daya isothermal!
44. Jelaskan bahaya yang dapat terjadi pada air receiver akibat kontaminasi minyak pelumas, dan bagaimana mencegahnya!

BAB VI — SEPARATOR DAN PURIFIER

Separator dan purifier adalah peralatan yang memisahkan campuran fluida dengan densitas berbeda (minyak-air-padatan) menggunakan gaya sentrifugal. Peralatan ini sangat penting untuk menjaga kualitas bahan bakar dan minyak lumas sebelum digunakan oleh mesin.

6.1 Prinsip Kerja Separator Sentrifugal

Separator sentrifugal bekerja berdasarkan perbedaan densitas (berat jenis) komponen dalam campuran fluida. Bowl (mangkuk) separator berputar pada kecepatan sangat tinggi (5000-10000 rpm), menghasilkan gaya sentrifugal yang jauh lebih besar dari gravitasi bumi.

Gaya Sentrifugal vs Gravitasi

Gaya sentrifugal yang dihasilkan separator dapat mencapai ribuan kali gaya gravitasi (g-force). Akibatnya, komponen TERBERAT (padatan/sludge) akan terlempar paling jauh ke dinding bowl, komponen DENSITAS MENENGAH (air) akan berada di tengah, dan komponen TERINGAN (minyak bersih) akan berada paling dekat dengan sumbu putar, kemudian dialirkan keluar melalui outlet masing-masing. Proses ini jauh lebih cepat dibanding pemisahan gravitasi alami (settling tank) yang membutuhkan waktu berjam-jam.

Urutan densitas dari yang terberat ke teringan: SLUDGE (padatan, lumpur) > AIR > MINYAK (bahan bakar/lumas)

6.2 Jenis Separator di Kapal

A. Berdasarkan Fungsi

Jenis Separator	Fungsi	Posisi dalam Sistem
Fuel Oil Purifier (FO Purifier)	Memisahkan air dan sedimen dari bahan bakar sebelum digunakan mesin	Antara settling tank dan service tank
Lube Oil Purifier (LO Purifier)	Membersihkan minyak lumas dari air, sludge, dan partikel kontaminan secara kontinu	Sirkuit sistem pelumasan (bypass dari sump tank)
Oily Water Separator (OWS)	Memisahkan minyak dari air got (bilge water) sebelum dibuang ke laut sesuai MARPOL	Sistem pembuangan bilge

B. Berdasarkan Konstruksi Bowl

- Disc Type Separator: Bowl berisi susunan disc (piringan) berbentuk kerucut bertingkat yang memperluas permukaan pemisahan, mempercepat proses separasi. Jenis paling umum untuk FO dan LO purifier kapal.
- Self-Cleaning (Self-Discharging) Separator: Bowl dapat membuka secara otomatis untuk mengeluarkan sludge yang terkumpul tanpa perlu menghentikan operasi dan membongkar bowl secara manual — sangat umum pada separator modern.

6.3 Pengoperasian dan Perawatan Separator

A. Prinsip Pengoperasian Purifier

45. Pemanasan: Bahan bakar/oli dipanaskan terlebih dahulu (umumnya 90-98°C untuk FO, 60-70°C untuk LO) untuk menurunkan viskositas sehingga proses pemisahan lebih efektif.
46. Pengaturan Gravity Disc/Dam Ring: Komponen ini mengatur batas/interface antara air dan minyak di dalam bowl, harus disesuaikan dengan densitas bahan bakar yang digunakan.
47. Kontrol Aliran (Throughput): Kapasitas aliran harus disesuaikan — aliran terlalu cepat mengurangi waktu tinggal (retention time) fluida dalam bowl, menurunkan efisiensi pemisahan.
48. Self-Cleaning Cycle: Pada interval tertentu (berdasarkan waktu atau jumlah sludge terdeteksi), bowl melakukan siklus pembersihan otomatis (sludge discharge) menggunakan air operasi (operating water).

B. Perawatan Separator

- Pembersihan Bowl secara Manual: Pada interval tertentu, bowl dibongkar dan dibersihkan dari deposit sludge yang mengeras (manual cleaning), terutama jika self-cleaning tidak optimal.
- Pemeriksaan Seal dan Gasket: Seal bowl harus dalam kondisi baik untuk mencegah kebocoran saat berputar pada kecepatan tinggi.
- Pemeriksaan Gear dan Bearing: Separator menggunakan gear untuk meningkatkan putaran motor ke putaran bowl yang sangat tinggi — perlu pelumasan dan inspeksi rutin.
- Kalibrasi Sensor: Sensor interface (untuk OWS terutama) harus dikalibrasi secara berkala untuk memastikan akurasi deteksi kandungan minyak.

Regulasi MARPOL terkait Oily Water Separator

Berdasarkan MARPOL Annex I, air buangan dari OWS (bilge water) yang dibuang ke laut harus memiliki kandungan minyak TIDAK LEBIH dari 15 ppm (parts per million). OWS dilengkapi Oil Discharge Monitoring Equipment (ODME) yang akan menghentikan pembuangan secara otomatis (overboard valve menutup) jika kandungan minyak melebihi batas. Manipulasi terhadap sistem ini (misalnya melalui "magic pipe" — pipa bypass ilegal)

merupakan TINDAK PIDANA SERIUS dan sering menjadi temuan utama investigasi pencemaran laut internasional.

SOAL LATIHAN BAB VI

A. Pilihan Ganda

49. Urutan densitas dari yang terberat ke teringan dalam separator adalah... a. Minyak-Air-Sludge b. Air-Minyak-Sludge c. Sludge-Air-Minyak d. Sludge-Minyak-Air
50. Batas kandungan minyak dalam air buangan OWS sesuai MARPOL adalah... a. 5 ppm b. 15 ppm c. 50 ppm d. 100 ppm
51. Fuel oil purifier umumnya memanaskan bahan bakar pada suhu... a. 30-40°C b. 50-60°C c. 90-98°C d. 120-150°C

B. Soal Uraian

52. Jelaskan prinsip kerja separator sentrifugal dan mengapa gaya sentrifugal lebih efektif dibanding pemisahan gravitasi alami!
53. Jelaskan perbedaan fungsi Fuel Oil Purifier, Lube Oil Purifier, dan Oily Water Separator!
54. Mengapa bahan bakar/oli perlu dipanaskan sebelum masuk purifier? Jelaskan pengaruh suhu terhadap efisiensi pemisahan!
55. Jelaskan aspek hukum terkait Oily Water Separator dan risiko penggunaan "magic pipe"!

BAB VII — PESAWAT PENDINGIN DAN SISTEM HIDRAULIK

7.1 Prinsip Kerja Sistem Refrigerasi

Sistem refrigerasi (pesawat pendingin) berfungsi memindahkan panas dari area bersuhu rendah (ruang muat pendingin, cold storage provisi) ke area bersuhu lebih tinggi (lingkungan luar), menggunakan prinsip siklus kompresi uap (vapour compression cycle).

Siklus Kompresi Uap

Komponen	Proses	Fungsi
Kompresor	Kompresi	Menaikkan tekanan dan suhu refrigerant gas (uap)
Kondensor	Kondensasi	Refrigerant gas bertekanan tinggi melepas panas ke media pendingin (udara/air laut), berubah menjadi cair
Expansion Valve	Ekspansi	Refrigerant cair bertekanan tinggi diturunkan tekanannya secara mendadak, suhu turun drastis
Evaporator	Evaporasi	Refrigerant cair bertekanan rendah menyerap panas dari ruangan yang didinginkan, berubah menjadi gas

Mengapa Refrigerant Menyerap Panas saat Berubah Fasa?

Saat refrigerant cair berubah menjadi gas (evaporasi) di evaporator, dibutuhkan energi (kalor laten penguapan) untuk memutuskan ikatan antar molekul cairan. Energi ini diambil dari lingkungan sekitar evaporator (ruangan yang didinginkan), sehingga ruangan tersebut menjadi dingin. Sebaliknya, saat refrigerant gas berubah menjadi cair (kondensasi) di kondensor, kalor laten dilepaskan ke media pendingin (udara/air laut).

Jenis Refrigerant

Jenis Refrigerant	Contoh	Keterangan
CFC (Chlorofluorocarbon)	R-12, R-11	DILARANG — merusak ozon (Protokol Montreal)
HCFC	R-22	Phase-out bertahap — masih merusak ozon (lebih ringan)

Jenis Refrigerant	Contoh	Keterangan
HFC	R-134a, R-404A, R-507	Tidak merusak ozon, namun memiliki GWP (Global Warming Potential) tinggi
Natural Refrigerant	Ammonia (R-717), CO ₂ (R-744)	Ramah lingkungan, digunakan pada sistem pendingin kargo besar

7.2 Sistem Air Conditioning (AC) Kapal

Sistem AC kapal pada prinsipnya menggunakan siklus refrigerasi yang sama, namun dengan tujuan mengondisikan udara ruang akomodasi (suhu, kelembaban, sirkulasi) untuk kenyamanan awak kapal.

- Air Handling Unit (AHU): Unit yang mensirkulasikan udara ruangan melalui coil pendingin (evaporator) dan mendistribusikannya ke kabin/ruangan melalui ducting.
- Chiller: Sistem terpusat yang menghasilkan air dingin (chilled water) yang disirkulasikan ke berbagai AHU di seluruh kapal — lebih efisien untuk kapal besar dengan banyak ruangan.
- Fan Coil Unit (FCU): Unit lokal di setiap kabin yang menerima chilled water dan mensirkulasikan udara kabin melaluinya.

7.3 Sistem Hidraulik Kapal

Sistem hidraulik menggunakan fluida (oli hidraulik) bertekanan untuk mentransmisikan tenaga dan menggerakkan aktuator (silinder/motor hidraulik). Sistem hidraulik banyak digunakan untuk mekanisme yang membutuhkan gaya besar dengan kontrol presisi.

Aplikasi Sistem Hidraulik di Kapal

Aplikasi	Fungsi Hidraulik
Steering Gear	Menggerakkan rudder (kemudi) — sistem hidraulik wajib untuk kapal sesuai SOLAS
Deck Crane	Menggerakkan boom dan winch crane untuk bongkar muat
Hatch Cover	Membuka/menutup tutup palka kargo
Mooring Winch	Menggulung/mengulur tali tambat
Watertight Door	Menggerakkan pintu kedap air secara remote
Stabilizer Fin	Menggerakkan sirip stabilizer untuk mengurangi rolling

Prinsip Dasar Hukum Pascal

Sistem hidrolik bekerja berdasarkan Hukum Pascal: tekanan yang diberikan pada fluida tertutup akan diteruskan secara merata ke segala arah.

$$F_1/A_1 = F_2/A_2 = P$$

F_1, F_2 = Gaya pada piston 1 dan 2 (N) A_1, A_2 = Luas penampang piston 1 dan 2 (m^2) P = Tekanan sistem (Pa) — sama di seluruh sistem tertutup

Contoh Soal Hukum Pascal pada Sistem Hidraulik

Sebuah sistem hidrolik memiliki piston kecil ($A_1 = 0,001 \text{ m}^2$) yang diberi gaya 100 N, terhubung dengan piston besar ($A_2 = 0,05 \text{ m}^2$). Hitunglah tekanan sistem dan gaya yang dihasilkan piston besar! Tekanan sistem: $P = F_1/A_1 = 100/0,001 = 100.000 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa} = 1 \text{ bar}$ Gaya pada piston besar: $F_2 = P \times A_2 = 100.000 \times 0,05 = 5.000 \text{ N} = 5 \text{ kN}$ Kesimpulan: Dengan gaya input hanya 100 N pada piston kecil, sistem hidrolik dapat menghasilkan gaya 5.000 N (50x lebih besar) pada piston besar — inilah prinsip yang memungkinkan steering gear menggerakkan rudder seberat puluhan ton dengan input tenaga yang relatif kecil.

SOAL LATIHAN BAB VII

A. Pilihan Ganda

56. Komponen sistem refrigerasi yang berfungsi menyerap panas dari ruangan yang didinginkan adalah... a. Kompresor b. Kondensor c. Expansion valve d. Evaporator
57. Refrigerant yang DILARANG karena merusak lapisan ozon adalah... a. R-134a b. R-717 (Ammonia) c. R-12 (CFC) d. R-744 (CO₂)
58. Sistem hidrolik bekerja berdasarkan... a. Hukum Newton b. Hukum Pascal c. Hukum Bernoulli d. Hukum Boyle

B. Soal Uraian/Hitungan

59. Jelaskan keempat komponen utama siklus kompresi uap (refrigerasi) dan proses yang terjadi pada masing-masing komponen!
60. Jelaskan mengapa refrigerant menyerap panas saat berubah dari cair menjadi gas (evaporasi)!
61. Sebuah sistem hidrolik steering gear memiliki piston kecil $A_1=0,0008 \text{ m}^2$ dengan gaya input 150N, dan piston besar (ram cylinder) $A_2=0,08 \text{ m}^2$. Hitunglah tekanan sistem dan gaya output pada ram cylinder!

62. Sebutkan minimal 4 aplikasi sistem hidraulik di kapal dan jelaskan mengapa hidraulik dipilih dibanding sistem mekanik/elektrik untuk aplikasi tersebut!

BAB VIII — KETEL UAP BANTU DAN PESAWAT BANTU LAIN

8.1 Ketel Uap Bantu (Auxiliary Boiler)

Ketel uap bantu (auxiliary boiler) menghasilkan uap untuk berbagai keperluan di kapal yang menggunakan motor diesel sebagai penggerak utama (bukan turbin uap).

Kebutuhan Uap di Kapal Bermesin Diesel

- Pemanasan bahan bakar HFO (heating bunker tank, settling tank, service tank, fuel oil heater).
- Pemanasan minyak lumas pada beberapa sistem.
- Pemanasan kargo cair pada kapal tanker (cargo heating coil).
- Kebutuhan akomodasi: pemanas air (hot water), pemanas ruangan (di daerah dingin), dapur.
- Sistem tank cleaning pada kapal tanker.

Jenis Ketel Uap Bantu

Jenis Ketel	Prinsip Kerja	Karakteristik
Fire Tube Boiler	Gas panas mengalir di dalam tube, air mengelilingi tube	Konstruksi sederhana, untuk kapasitas kecil-sedang
Water Tube Boiler	Air mengalir di dalam tube, gas panas mengelilingi tube	Kapasitas dan tekanan lebih tinggi, respon lebih cepat
Exhaust Gas Boiler (Composite Boiler)	Memanfaatkan panas gas buang mesin utama untuk menghasilkan uap	Waste heat recovery — sangat efisien, sering dikombinasi dengan oil-fired boiler

Komposit Boiler: Kombinasi Exhaust Gas dan Oil-Fired

Banyak kapal modern menggunakan composite boiler — kombinasi exhaust gas economizer (memanfaatkan panas gas buang mesin utama yang "gratis") dengan oil-fired boiler (burner berbahan bakar minyak) dalam satu unit. Saat mesin utama berjalan dengan beban cukup tinggi, exhaust gas section dapat menghasilkan uap yang cukup untuk seluruh kebutuhan kapal TANPA pembakaran bahan bakar tambahan — menghemat konsumsi bahan bakar secara signifikan. Oil-fired burner hanya diaktifkan saat kebutuhan uap tidak terpenuhi oleh exhaust gas (misalnya saat manuver/RPM rendah atau saat kapal sandar dengan mesin utama mati).

8.2 Fresh Water Generator

Fresh Water Generator (FWG) atau evaporator adalah peralatan yang menghasilkan air tawar dari air laut melalui proses distilasi (penguapan dan pengembunan), menggunakan panas buangan dari sistem jacket cooling water mesin utama.

Prinsip Kerja Fresh Water Generator

63. Air laut dialirkan ke evaporator yang dioperasikan dalam kondisi vakum (tekanan rendah).
64. Dalam kondisi vakum, titik didih air turun signifikan (bisa di bawah 50°C), sehingga panas jacket cooling water mesin utama (suhu 80-90°C) cukup untuk menguapkan air laut tanpa memerlukan sumber panas tambahan.
65. Uap air murni (tanpa garam) yang terbentuk dialirkan ke kondensor, didinginkan oleh air laut, dan mengembun menjadi air tawar (distillate).
66. Air laut yang tersisa (semakin pekat/brine) dibuang kembali ke laut.

Mengapa Operasi dalam Kondisi Vakum?

Pada tekanan atmosfer normal, air mendidih pada 100°C. Namun, jacket cooling water mesin utama hanya bersuhu 80-90°C — tidak cukup untuk mendidihkan air pada tekanan atmosfer. Dengan menurunkan tekanan di dalam evaporator (membuat kondisi vakum menggunakan ejector atau vacuum pump), titik didih air turun (sesuai diagram fasa air) hingga di bawah suhu jacket water yang tersedia, sehingga proses evaporasi dapat berlangsung menggunakan panas "gratis" dari mesin utama — TANPA mengonsumsi bahan bakar tambahan.

Pembatasan Penggunaan FWG di Perairan Tertentu

Fresh Water Generator TIDAK BOLEH dioperasikan saat kapal berada di perairan yang terkontaminasi (misalnya dekat pelabuhan dengan tumpahan minyak, perairan dengan red tide/alga beracun, atau area ballast water exchange tertentu), karena air laut yang terkontaminasi dapat ikut terdistilasi atau merusak sistem evaporator. Perwira jaga harus memantau kondisi perairan dan menghentikan operasi FWG jika diperlukan.

8.3 Sewage Treatment Plant dan Oily Water Separator

A. Sewage Treatment Plant (STP)

STP mengolah air limbah dari toilet (black water) dan air buangan dapur/kamar mandi (grey water) sebelum dibuang ke laut, sesuai persyaratan MARPOL Annex IV.

Tahapan Proses pada Sewage Treatment Plant Biologis

Tahap	Proses	Tujuan
Aerasi (Aeration)	Udara dipompakan ke dalam tangki berisi limbah dan bakteri aerobik	Bakteri menguraikan zat organik dalam limbah
Sedimentasi/Settling	Limbah yang telah terurai diendapkan	Memisahkan padatan dari cairan
Disinfeksi	Penambahan chlorine atau sistem UV	Membunuh bakteri patogen sebelum dibuang ke laut

Standar effluent (air buangan) STP sesuai MARPOL Annex IV mensyaratkan parameter tertentu seperti Suspended Solids, BOD (Biochemical Oxygen Demand), dan coliform bacteria dalam batas yang ditetapkan sebelum air dapat dibuang ke laut, kecuali kapal berada di luar jarak tertentu dari daratan (untuk pembuangan tanpa treatment, sesuai kategori area).

B. Incinerator

Incinerator membakar sampah padat (garbage), sludge dari purifier, dan limbah lain pada suhu tinggi (umumnya 850-1200°C) untuk mengurangi volume limbah sebelum sisa abu dibuang sesuai prosedur (Garbage Record Book — MARPOL Annex V).

RANGKUMAN BAB VIII

Peralatan	Fungsi Utama	Sumber Energi
Auxiliary Boiler	Menghasilkan uap untuk pemanasan FO, kargo, akomodasi	Bahan bakar (oil-fired) / panas gas buang (exhaust gas)
Fresh Water Generator	Menghasilkan air tawar dari air laut (distilasi vakum)	Panas jacket cooling water mesin utama
Sewage Treatment Plant	Mengolah limbah toilet/dapur sesuai MARPOL Annex IV	Listrik (aerasi, disinfeksi)
Incinerator	Membakar sampah dan sludge sesuai MARPOL Annex V/VI	Bahan bakar

SOAL LATIHAN BAB VIII

A. Pilihan Ganda

67. Jenis boiler yang memanfaatkan panas gas buang mesin utama disebut... a. Fire tube boiler b. Water tube boiler c. Exhaust gas boiler d. Electric boiler
68. Fresh Water Generator dapat menghasilkan air tawar tanpa bahan bakar tambahan karena dioperasikan dalam kondisi... a. Bertekanan tinggi b. Vakum (tekanan rendah) c. Suhu sangat tinggi d. Pendinginan ekstrem
69. Air limbah toilet kapal disebut... a. Grey water b. Ballast water c. Black water d. Bilge water

B. Soal Uraian

70. Jelaskan keunggulan composite boiler (kombinasi exhaust gas dan oil-fired) dibanding boiler oil-fired saja!
71. Jelaskan prinsip kerja Fresh Water Generator dan mengapa proses ini dapat berlangsung tanpa konsumsi bahan bakar tambahan!
72. Jelaskan tahapan proses pada Sewage Treatment Plant biologis dan tujuan masing-masing tahap!
73. Jelaskan kapan dan mengapa Fresh Water Generator harus dihentikan operasinya, kaitkan dengan kondisi perairan tertentu!

DAFTAR PUSTAKA

- Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI. (2018). Silabus Mata Pelajaran SMK Kompetensi Keahlian Teknik Kapal Niaga. Jakarta: Kemendikbud.
- IMO. (2018). International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), Consolidated Edition. London: IMO.
- Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2008). Pump Handbook (4th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Pounder, C. (Ed.) (2009). Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines (9th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Sembiring, J. (2017). Permesinan Bantu 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.
- Trakhtenberg, M. (2014). Centrifugal Pumps: Design and Application. Houston: Gulf Professional Publishing.
- 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.

GLOSARIUM

Istilah / Singkatan	Definisi
Affinity Laws	Hukum afinitas — hubungan antara Q, H, P pompa terhadap perubahan putaran/diameter impeller.
Auxiliary Boiler	Ketel uap bantu yang menghasilkan uap untuk kebutuhan kapal bermesin diesel.
Bowl	Mangkuk berputar pada separator/purifier tempat proses pemisahan terjadi.
BEP	Best Efficiency Point — titik kapasitas pompa dengan efisiensi tertinggi.
Black Water	Limbah cair dari toilet kapal.
Brake Power (Pompa)	Daya aktual yang harus diberikan motor ke poros pompa.
Composite Boiler	Boiler gabungan exhaust gas economizer dan oil-fired burner.
Evaporator	Komponen sistem refrigerasi/FWG tempat fluida menyerap panas dan menguap.
FAD	Free Air Delivery — kapasitas kompresor dalam kondisi udara bebas (atmosfer).
FWG	Fresh Water Generator — alat penghasil air tawar dari air laut melalui distilasi vakum.
Gravity Disc	Komponen pada purifier yang mengatur interface air-minyak di dalam bowl.
Grey Water	Air buangan dari dapur, kamar mandi, dan laundry kapal (bukan toilet).
Hukum Pascal	Tekanan pada fluida tertutup diteruskan secara merata ke segala arah.
Hydraulic Power	Daya teoritis yang diterima fluida oleh pompa (tanpa rugi-rugi).
Intercooler	Pendingin udara di antara tingkat-tingkat kompresor multi-stage.
Kavitasi	Pembentukan dan pecahnya gelembung uap akibat tekanan suction terlalu rendah.
NPSH	Net Positive Suction Head — head minimum yang diperlukan di sisi suction pompa untuk menghindari kavitasi.
OWS	Oily Water Separator — alat pemisah minyak dari air got sebelum dibuang ke laut.
Positive Displacement Pump	Pompa yang memindahkan volume fluida tetap per siklus (reciprocating, rotary).
Refrigerant	Fluida kerja dalam sistem refrigerasi yang menyerap dan melepas panas melalui perubahan fasa.
Relief Valve	Valve pengaman yang membuka jika tekanan sistem melebihi batas, mencegah kerusakan pompa positive displacement.

Istilah / Singkatan	Definisi
Self-Priming	Kemampuan pompa menghisap udara dari pipa suction tanpa perlu diisi cairan terlebih dahulu.
STP	Sewage Treatment Plant — instalasi pengolah limbah toilet dan dapur kapal.
Total Dynamic Head (TDH)	Total head yang harus disediakan pompa, meliputi static head dan friction losses.
Vapour Compression Cycle	Siklus kompresi uap — siklus dasar sistem refrigerasi (kompresor-kondensor-ekspansi-evaporator).